

보건분야 - 연구자료  
연구원 2008-4-5

# 조선업종 용접흡(망간) 저감을 위한 작업환경 개선방안 및 노출기준 적용 가능성 연구

2007년 연구결과보고서



한국산업안전공단  
산업안전보건연구원

## 요 약 문

1. 과 제 명 : 조선업종 용접흡(망간) 저감을 위한 작업환경 개선방안 및 노출기준 적용 가능성 연구
2. 연구기간 : 2007. 1. 1 ~ 2006. 12. 31.
3. 연구자 : 연구책임자 하 현 철 ((주)벤틱 대표이사)
4. 연구목적 및 필요성

2005년에 연구된 화학물질 노출기준 개정 연구에 따르면(김양호 등, 2005년), 망간 흡 및 분진의 기준을 현행 망간(분진 및 화합물) : 5 mg/m<sup>3</sup>, 망간 흡 : 1 mg/m<sup>3</sup>에서 망간(금속·화합물·분진·흡 등) : 0.5 mg/m<sup>3</sup>으로 강화할 것을 제안하였다. 하지만, 조선업종에서는 노출기준이 0.5mg/m<sup>3</sup>으로 강화될 경우 노출기준 초과율이 현행 15 %전후에서 25 % 이상으로 증가 할 것으로 예상되지만, 협소한 공간과 복잡한 블록 내부 구조로 인한 환기의 어려움 등으로 노출량 감소가 어려운 현실을 주장하고 있다. 강화된 망간 노출 기준 적용 가능성을 평가하기 위해서는 조선업종의 용접 흡(망간) 노출 실태를 조사하고, 효율적인 용접흡(망간) 저감방안을 적용했을 때 달성 가능한 용접흡(망간) 농도 평가가 우선적으로 필요한 실정이다. 따라서 본 연구를 통해 조선업의 용접 공정에 따른 근로자 노출실태를 조사하고, 현장에 실제 적용 가능한 작업환경 개선 방안을 마련하고, 망간 노출 기준 적용성을 판단하고자 한다.

## 5. 연구방법 및 내용

### ○ 조사 연구

- 선박 건조 과정 및 공정에 따른 용접흡(망간) 환기 실태
- 경남 지역 중소형 조선소 작업환경 측정 결과서 분석
- 대형 조선소 용접흡 및 망간 노출 실태 조사
- 망간 노출 기준 강화시 초과율 변화 분석
- 조선업종의 망간 발생 형태

### ○ 현장 및 실험실 실험

- 제한공간 및 밀폐공간 환기 방안 수립을 위한 현장 실험
- 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 환기 방안별 효율 평가
- 용접면 내·외부 용접흡 측정 농도 비교(용접면에 의한 차단 효과 분석)
- 실험실 실험을 통해 용접흡 저감 방안 효율 평가
- 고농도 용접흡 차단 방안 적용시 용접흡 및 망간 저감 효율 평가

### ○ 망간 노출기준 강화 가능성 평가 및 작업환경관리 방안 수립

- 노출기준 개정 가능성 검토
- 작업환경 관리 방안 수립

## 6. 연구 결과

본 연구를 통해 현장 실험, 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험실 실험을 통해 밀폐된 블록이라 할지라도 적절한 환기 시스템을 가동한다면 현재보다 50% 이상의 용접흡(망간) 저감 효율을 거둘 수 있는 것으로 나타났다. 특히, 여러 가지 현장 여건에 의해 용접면 외부에서 측정한 결과를 바탕으로 작업환경 측정 결과서를 작성하고 있는데, 노동부 고시에 따라 용접면 내부에서 용접흡(망간)을 측정한다면, 50~70%의 용접흡 저감 효과를 거둘 수 있는

것으로 조사되었다. 용접점에 발생되어 작업자 호흡영역으로 이동하는 고농도의 용접흄을 고압기류나 환기팬을 이용하여 적절하게 차단해 주고, 소형(또는 중대형) 팬을 이용하여 밀폐공간 내부에 급배기를 실시해 주고, 작업환경 측정시 용접면 내부에서 샘플링을 한다면, 현재 작업환경측정 결과서에 있는 노출량보다 최소 50% 이상의 용접흄(망간) 저감 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서, 망간 기준을 현재  $1\text{mg}/\text{m}^3$ 에서  $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 강화를 하여도 적극적인 환기대책 수립과 용접흄(망간) 샘플링 위치를 용접면 내부로 바꾼다면 노출 기준 초과율은 증가하지 않을 것으로 판단되어, 망간의 강화된 노출 기준 적용은 충분한 가능성을 가지고 있다고 판단된다.

## 7. 활용 계획

본 연구를 통해 제안된 다양한 작업환경 개선 방법을 각 조선업종에 맞도록 개선하여 적용한다면 밀폐공간 내부에서 작업하는 용접 작업자의 용접흄(망간) 노출량을 크게 감소할 수 있을 것으로 판단된다. 또, 본 연구를 통해 적극적인 환기와 작업환경 측정 방법의 변경 등의 방법을 적용한다면 현재 노출량보다 최소 50% 이상의 용접흄(망간) 저감 효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났기 때문에 강화된 망간 노출 기준의 적용 가능성을 평가하는 기본 자료로 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

## 8. 중 심 어

조선업종 환기, 용접흄 저감, 망간 저감, 밀폐공간 환기, 망간 노출기준

# 차 례

I. 서 론 .....	13
1. 연구배경 .....	13
2. 연구목적 .....	15
II. 연구방법 .....	16
1. 연구내용 .....	16
2. 연구방법 .....	17
III. 연구결과 .....	22
1. 현장 실태조사 실시 .....	22
2. 문헌 조사 .....	43
3. 용접흡 및 망간농도 저감 방안수립 .....	68
IV. 고 찰 .....	138
1. 조선업종의 용접흡(망간) 노출 실태 및 기준 강화시 초과율 변동 .....	138
2. 용접흡(망간) 저감을 위한 기본 방향 .....	139
3. 환기에 의한 용접흡(망간) 저감 방안 .....	140
4. 용접면 내부에서 용접흡(망간) 측정이 가능하도록 기술적인 개선 방안 수립 .....	143
V. 결 론 .....	144
참고문헌 .....	147
Abstract .....	149

## 표 차 례

〈표 1〉 모 조선소의 년도별 작업환경 측정결과 정리 .....	14
〈표 2〉 설문조사지 양식 .....	18
〈표 3〉 내업 공정 모습과 환기 실태 .....	25
〈표 4〉 외업공정 모습과 환기 실태 .....	26
〈표 5〉 중소형 조선소 작업환경 측정결과 정리 .....	28
〈표 6〉 각 조선소별 용접흡 및 망간 기준 초과율 정리 .....	29
〈표 7〉 5대 조선소 용접흡 초과 실태-최근 2년간 .....	31
〈표 8〉 5대 조선소 망간 초과 실태-최근 2년간 .....	34
〈표 9〉 5대 조선소 용접 작업자 수와 송풍기 보급 대수 현황 .....	37
〈표 10〉 대형 조선소 망간 기준 강화에 따른 초과율 변화 .....	39
〈표 11〉 대형 조선소 망간 기준 강화에 따른 기준 2배 초과율 변화 .....	40
〈표 12〉 중소규모 조선소 망간 기준 강화에 따른 초과율 변화 .....	41
〈표 13〉 중소형 조선소 망간 기준 강화에 따른 기준 2배 초과율 변화 .....	42
〈표 14〉 환기 방법에 따른 용접흡 저감 효율 분석 결과 .....	56
〈표 15〉 각 용접 조건별 흡 농도 .....	63
〈표 16〉 제한공간의 환기방안별 흡 농도 측정 결과 .....	79
〈표 17〉 주름관 덕트를 이용한 국소배기시 흡 저감 효과 .....	80
〈표 18〉 개구면 위치 및 환기형태별 밀폐 공간 흡 농도 평균값 .....	93
〈표 19〉 개구면 위치 및 환기형태별 작업자 호흡영역 주변 흡 농도 .....	95
〈표 20〉 환기 형태에 따른 용접흡 내외부 흡 농도 .....	111
〈표 21〉 환기형태에 따른 용접면 내외부의 용접흡 농도 측정결과 .....	124
〈표 22〉 환기형태에 따른 용접면 내외부의 망간 농도 측정결과 .....	126

---

〈표 23〉 용접기 사용 대수와 환기 방법에 따른 밀폐공간 평균 농도 ·····	127
〈표 24〉 용접지점에서 거리에 따른 용접흡 측정 결과 ·····	131
〈표 25〉 배기 덕트(팬)위치에 따른 용접흡 및 농도 측정 결과 ·····	133
〈표 26〉 에어노즐 분사량에 따른 용접흡 및 망간농도 측정결과 ·····	135

## 그림 차례

[그림 1] 연구 추진 체계 .....	16
[그림 2] 선박 건조 과정 .....	23
[그림 3] 선박 건조 공정에 따른 밀폐도 .....	23
[그림 4] 개방도에 따른 용접흡 농도 및 초과율(O 조선소 내부 자료) .....	24
[그림 5] 조선소별 용접흡 및 망간 초과율 .....	30
[그림 6] 년도별 용접흡 초과율 .....	32
[그림 7] 년도별 망간 초과율 .....	35
[그림 8] 용접흡과 망간 초과율 상관도 분석 그래프 .....	36
[그림 9] 용접흡 비드 상부에 형성된 슬래그 모습 .....	45
[그림 10] K사 용접봉 MSDS내용 .....	46
[그림 11] 송기마스크 흡 제거 원리 .....	49
[그림 12] 송기마스크 현장 실험 모습 .....	50
[그림 13] 송기마스크 효율 .....	50
[그림 14] 흡 토치 제원 .....	51
[그림 15] 흡토치 사용 모습 .....	52
[그림 16] 흡토치 문제점 .....	52
[그림 17] 용접흡 차단용 토치 원리 .....	53
[그림 18] 용접흡 차단용 토치 제원 .....	54
[그림 19] 용접흡 차단용 토치 실험 모습 .....	54
[그림 20] 용접흡 차단용 토치 효과 .....	55
[그림 21] 용접흡 배기용 집진기 및 현장 사용 모습 .....	62
[그림 22] 용접 연구에 사용된 흡토치 및 용접 조건 .....	62
[그림 23] 완성된 배 모습 .....	68

[그림 24] 탑재시 용접이 필요한 배 단면 모습 .....	69
[그림 25] Side shell 환기 방안 .....	70
[그림 26] Double bottom & Water balance 부분의 환기방안 .....	70
[그림 27] 용접흡의 노출 경로 .....	71
[그림 28] 열선풍속계를 이용한 팬 유속 측정 모습 .....	72
[그림 29] 연기발생기 및 기류평가 모습 .....	72
[그림 30] 직독식 분진 농도 측정기 및 측정 모습 .....	73
[그림 31] 흡 샘플링 모습 .....	74
[그림 32] 제한공간에 적용 가능한 환기 방안의 개략도 .....	75
[그림 33] 각 환기 방안별 기류 테스트 결과 .....	77
[그림 34] 각 환기방안별 기류 흐름 개략도 .....	78
[그림 35] 소형팬을 이용한 흡 환기 모습 .....	80
[그림 36] 밀폐 공간에 적용 가능한 환기 방안 .....	82
[그림 37] 각 환기 방안별 기류 테스트 결과 .....	84
[그림 38] 각 환기방안별 기류 흐름 개략도 - Case 1, 2 .....	86
[그림 39] 각 환기방안별 기류 흐름 개략도 - Case 3, 4, 5 .....	87
[그림 40] 효율적인 환기 방안 수립이 필요한 밀폐 공간 구조 .....	88
[그림 41] 개구면 위치별 모델 형성 모습 .....	90
[그림 42] 밀폐공간 환기 효율 평가를 위한 환기 모델 .....	91
[그림 43] 개구면 위치 및 환기형태별 밀폐 공간 흡 농도 평균값 .....	93
[그림 44] 개구면 위치 및 환기형태별 작업환 호흡영역 흡 농도 평균값 .....	95
[그림 45] 밀폐공간 전체와 작업자 호흡영역 용접흡 농도 비교 .....	96
[그림 46] 작업자 중앙 단면 등농도 분포 .....	97
[그림 47] 0.5m 높이 단면 등농도 분포 .....	100
[그림 48] 입구 팬 급기 환기일 때 기류 흐름 .....	103
[그림 49] 입구 팬 배기 환기일 때 기류 흐름 .....	104

[그림 50] 현장에 사용되고 있는 용접면 .....	105
[그림 51] 용접면 착용 실태 .....	106
[그림 52] 실험 대상 블록 크기 .....	107
[그림 53] 실험이 실시된 블록 형태 및 용접 작업자 위치 .....	107
[그림 54] 용접면 외부에서 위치한 카세트 홀드 모습 .....	108
[그림 55] 블록 내부 급배기 조건 및 시료 채취 위치 .....	109
[그림 56] 환기상태에 따른 용접면 내·외부 용접흡 농도 .....	111
[그림 57] 고농도 용접흡에 노출되고 있는 모습 .....	112
[그림 58] 실험실 규격 .....	113
[그림 59] 용접실험 장치모습 .....	114
[그림 60] 실험장치 모식도 .....	114
[그림 61] 실험 모재 용접 비드 생성 모습 .....	116
[그림 62] 환기조건에 따른 용접흡 농도 측정 실험 방법 .....	117
[그림 63] 용접면 내·외부 농도 측정을 위한 카세트 홀드 위치 .....	118
[그림 64] 용접기 1대 가동시 실험 조건 .....	118
[그림 65] 용접기 2대 가동시 실험 조건 .....	119
[그림 66] 용접 거리에 따른 흡 노출량 실험 방법 .....	119
[그림 67] 송풍기 위치에 따른 환기 효율 평가 실험 방법 .....	120
[그림 68] 에어 노즐을 이용한 흡 차단 모식도 .....	122
[그림 69] 에어튜브를 장착한 실험 장치 .....	123
[그림 70] 환기형태에 따른 용접면 내외부의 용접흡 농도변화 .....	125
[그림 71] 환기형태에 따른 용접면 내외부의 망간 농도변화 .....	126
[그림 72] 용접기 대수와 환기 방법에 따른 밀폐공간 내부 용접흡 농도 .....	128
[그림 73] 용접기 대수와 환기 방법에 따른 밀폐공간 내부 망간 농도 .....	128
[그림 74] 용접기 대수와 환기방법에 따른 밀폐공간 내부 용접흡 분포 .....	129
[그림 75] 용접작업자 위치에 따른 용접흡 농도변화 .....	131

---

[그림 76] 용접작업자 위치에 따른 망간 농도변화 .....	132
[그림 77] 배기덕트 위치에 따른 용접흡 농도변화 .....	134
[그림 78] 배기덕트 위치에 따른 망간 농도변화 .....	134
[그림 79] 에어노즐 분사량에 따른 용접흡 농도변화 .....	136
[그림 80] 에어노즐 분사량에 따른 망간 농도변화 .....	136
[그림 81] 공기 분사량에 따른 흡 거동 분석 .....	137

# I. 서론

## 1. 연구배경

- 2005년에 연구된 화학물질 노출기준 개정 연구에 따르면(김양호 등, 2005년), 망간 흡 및 분진의 기준을 현행 망간(분진 및 화합물) : 5 mg/m<sup>3</sup>, 망간 흡 : 1 mg/m<sup>3</sup>에서 망간(금속·화합물·분진·흡 등) : 0.5 mg/m<sup>3</sup>으로 강화할 것으로 제안하였다.

아래의 내용은 김양호 등이 2005년에 제출한 보고서 결론 부분을 정리한 것이다.

“신경학적 방법론의 도입으로 명확한 임상소견(파킨슨증후군)이전의 신경행동학적 이상이 0.25~1.7 mg/m<sup>3</sup>에서 나타날 수 있다고 최근에 많이 보고되었으며, 일단 신경학적 증상이나 징후가 발현되면 지속되면서 시간경과에 따라 점차 악화되는 경향을 보이며 대부분이 비가역적이다. 따라서 망간이 건강에 미치는 영향을 임상증상의 발현 전에, 혹은 질병이 가역적인 단계에서 찾아내는 것이 매우 중요하다. 미국의 ACGIH TLV-TWA는 0.2 mg/m<sup>3</sup>이지만, 이는 권고기준이며, 규제기준을 채택하고 있는 서구의 영국, 독일 등은 0.5 mg/m<sup>3</sup>를 채택하고 있다. 그러므로 한국은 규제기준을 채택하고 있으므로 현행기준을 0.5 mg/m<sup>3</sup>으로 낮추는 것이 타당하다고 생각된다.”

- 2005년의 연구에서는 조선업종을 제외하고 측정이 가능한 15개 사업장 망간 노출 실태를 조사한 결과, 총 시료 114개 중 우리나라 기준 (현행 1mg/m<sup>3</sup>)을 초과하는 것은 3개(2.6%)였고, 강화된 기준(0.5 mg/m<sup>3</sup>)을 적용하여도 기준을 초과하는 것은 9개의 개인 시료와 2개의 지역 시료뿐으로 기준 초과율은 9.6%에 불과하였다.

- 하지만, 현재의 기준인 망간 흄 농도  $1\text{mg}/\text{m}^3$ 에서도 모 조선소의 3년간 작업환경 측정 결과를 정리해보면 10~13% 정도가 노출기준을 초과하고 있는 것으로 조사되었다.

〈표 1〉 모 조선소의 년도별 작업환경 측정결과 정리

측정 항목		초과율(%)				노출 기준 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )
		'04 하반기	'05 상반기	'05 하반기	'06 상반기	
용접 흄		32.6	29.9	39.7	36.5	5
중금속	망간	10.2	9.6	13.3	11.0	1
	철	2.0	1.2	3.1	1.5	5

- 이상의 결과에서 알 수 있듯이, 조선소를 제외한 망간 취급 공정에서는 기준을 강화하여도 노출 기준 초과율이 10%를 넘지 않지만, 조선소의 경우 현재 기준인  $1\text{mg}/\text{m}^3$ 을 적용하여도 10~13% 정도의 노출기준 초과율을 보이고 있어, 업종별로 망간 흄 노출량이 크게 차이나는 것을 알 수 있다.
- 조선업에 있어 망간은 철관(후판)에 약 1% 전후, 용접봉에 1~5% 정도 함유되어 있고, 용접 시 용접봉과 철관(모재)에 함유된 망간이 흄 형태로 발생된다. 용접봉에 함유된 망간은 용접 용착물의 강도를 강화시켜 주는 역할과 용접 시 CO가스 발생에 의한 기공을 없애주는 탈산소제 역할을 하기 때문에 용접봉에 함유되어야 할 필수 물질이다.
- 이 때문에 조선업 관계사에서는 노출기준이  $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 강화될 경우 노출기준 초과율이 현행 15%전후에서 25% 이상으로 증가할 것으로 예상되지만, 협소한 공간과 복잡한 블록 내부 구조로 인한 환기의 어려움 등으로 노출량 감소가 어려운 현실을 주장하고 있다.

- 하지만, 노출기준 개정을 위한 건강장해 정보, 외국의 사례 등을 고려할 때 개정안(기준 강화)은 합리적인 것으로 판단되고, 저 농도에서 장기간 용접 작업하는 근로자의 직업병(파킨슨증후군 등) 예방을 위해 노출기준 강화의 필요성이 대두되고 있다.
- 따라서, 조선업종의 망간 노출기준 강화를 위해서는 조선업종의 용접 흠(망간) 노출 실태를 조사하고, 효율적인 용접흠(망간) 저감방안을 적용했을 때 달성 가능한 용접흠(망간 농도) 농도 평가가 우선되어야 한다.
- 이러한 연구를 통해 조선업종에서 용접흠 저감이 가능한지를 평가한 후 강화된 노출 기준의 적용가능성을 검토해야 할 것으로 판단된다.

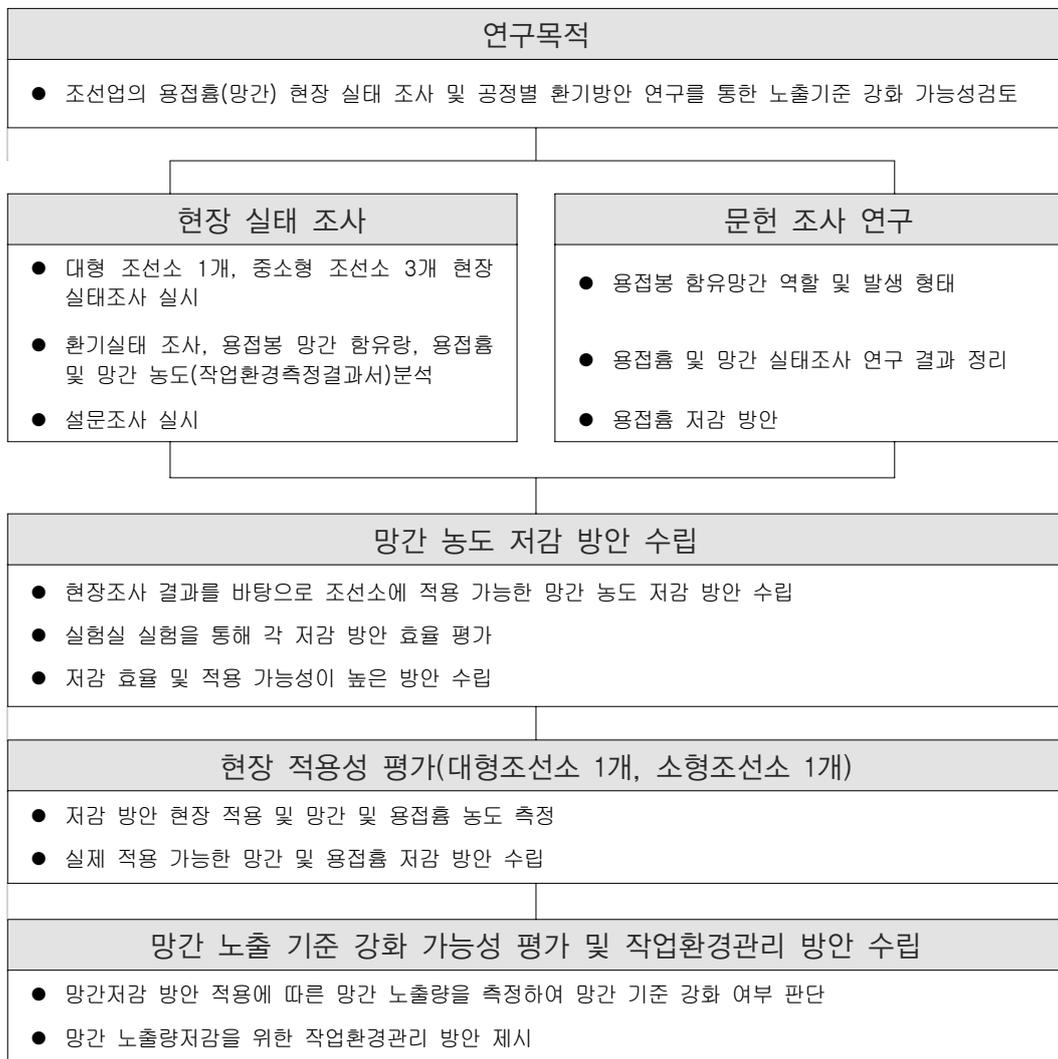
## 2. 연구 목적

- 국내외적으로 용접 흠(망간)의 노출농도 강화의 필요성이 대두되고 있고, 국내 조선업의 호황으로 용접물량 증가 및 용접근로자 고용증대로 인한 직업병 발생률이 잠재적으로 증가될 우려가 큰 실정이다.
- 용접공정에서 발생하는 다량의 금속 흠(망간)으로 부터 작업자를 보호할 수 있는 여러 환기 방법이 있지만, 실제 조선소에 적용하고 있거나 적용할 수 있는 환기방안에 대한 현장 평가와 실효성에 대한 검증은 전혀 이루어 진바가 없다.
- 따라서 본 연구를 통해 조선업의 용접 공정에 따른 근로자 노출실태를 조사하고, 현장에 실제 적용 가능한 작업환경 개선 방안을 마련하고, 망간 노출 기준 개정 가능성 유무를 판단하고자 한다.
- 작업환경 개선 방안은 작업 형태 개선 및 환기 방안 등 망간 농도를 줄이기 위한 모든 방안을 고려하여 수립하고자 한다.

## II. 연구 방법

### 1. 연구 내용

○ 본 연구를 위한 연구내용 및 흐름도는 [그림 1]과 같다.



[그림 1] 연구 추진 체계

## 2. 연구 방법

### (1) 현장 실태조사

- 1) 선박 건조 과정 및 공정에 따른 용접흡(망간) 환기 실태
  - 대형 조선소 1대사 및 중소형 조선소 3개사를 현장 방문하여 용접흡 저감을 위한 환기 방안에 대한 실태 조사를 실시하였다.
  - 현장 조사 시 환기실태(팬 사용 실태) 및 작업자 작업 특성(용접시간 및 용접 방법)을 파악하였고, 작업자들과 면담을 통해 환기팬 사용 방법 및 문제점을 파악하였다.
  
- 2) 경남 지역 중소형 조선소 작업환경 측정 결과서 분석
  - 경남 지역(거제 및 통영, 고성)에 소재한 7개 중소형 조선소의 2006~2007년 작업환경 측정 결과서를 분석하여 용접흡 및 망간 초과율을 조사하였다.
  
- 3) 대형 조선소 용접흡 및 망간 노출 실태 조사
  - 국내 5대 조선소를 대상으로 한국경영자총연합(경총)의 도움을 받아 용접흡 및 망간 노출 실태 및 환기장치 사용 실태 등을 조사하기 위한 설문조사를 실시하였다.
  - 설문지 내용은 <표 2>와 같다.

〈표 2〉 설문조사지 양식

○ 용접흡 및 망간 노출 실태 및 환기 실태 설문 조사서				
1. 용접흡 노출 실태				
구분	'05상	'05하	'06상	'06하
측정건수				
초과건수				
초과율				
평균값				
2. 망간 노출 실태				
구분	'05상	'05하	'06상	'06하
측정건수				
초과건수				
초과율				
평균값				
3. 혈중망간 노출 실태				
구분	'05상	'05하	'06상	'06하
측정건수				
초과건수				
초과율				
평균값				
4. 환기실태				
1) CO <sub>2</sub> 용접 작업자 수 :				(명)
2) 송풍기 지급 실태				
구분		지급 대수(대)		
Φ 200-300(개인용)				
Φ 600 이상(고정용)				

## 4) 망간 노출 기준 강화시 초과율 변화 분석

- 망간 노출 기준을 현재  $1\text{mg}/\text{m}^3$ 에서  $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 변경시 초과율 변화 및 용접흡 저감에 따른 초과율 변화 등을 분석하였다
- 대형 조선소 중에는 작업환경 초과율이 가장 높은 사업장과 경남 지역 소재 7개 중소형 조선소를 대상으로 초과율 변화를 분석하였다.

## (2) 문헌 조사

## 1) 조선업종의 망간 발생 형태

- 용접봉에 함유된 망간의 역할 및 발생 형태를 조사하여 정리하였다.
- 용접흡 및 망간 노출 실태 조사를 위해 작업환경 측정 결과서를 정리하고, MSDS자료를 분석하여 용접봉의 망간 함유량을 조사하였다.

## 2) 용접봉 망간 함유량 조사

- 국내 조선소에서 사용 중인 62개 제품의 MSDS를 분석하여 용접봉의 망간 함유량을 조사하였다.

## 3) 기존 연구 사례

- ① 용접흡 노출 특성 평가 및 저감 방안 연구 사례 조사
- ② 용접흡 저감을 위한 실험적 연구 사례 조사
- ③ OO조선소 노동환경 평가 결과서 요약
- ④ 국외 용접흡 및 망간 저감 사례 조사
- ⑤ 미국 조선업 산업안전보건 기준 번역본 정리

### (3) 용접흡 및 망간농도 저감 방안수립

- 1) 제한공간 및 밀폐공간 환기 방안 수립을 위한 현장 실험
  - 3면이 막혀 있는 제한공간과 사람이 출입할 수 있는 Man hole이 한 두개 설치되어 있는 밀폐 공간은 조선소에서 가장 용접흡(망간) 노출 농도가 높은 작업공정이다.
  - 현장 조사를 통해 이러한 공정에 적용하는 있는 용접흡(망간) 저감방법 중 효과가 있거나 본 연구팀의 판단으로 효과가 있을 것으로 예상되는 저감 방법을 정리하여 현장 실험을 통해 각 방안의 효율을 평가하였다.
  - 본 실험을 통해 검증된 방법은 향후 컴퓨터 시뮬레이션 등을 통해 환기 효과를 분석하고, 실제 현장에서 어느 정도 용접흡 저감 효과를 거둘 수 있을지 판단하는 기본 자료로 활용하였다.
  
- 2) 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 환기 방안별 효율 평가
  - 1차 저감 방안으로 선정된 방법을 컴퓨터 시뮬레이션과 실험실 실험을 통해 효과를 분석하여, 용접흡(망간) 저감 효과도 뛰어나고 현장에 실제 적용 가능한 저감 방안을 정리하였다.
  
- 3) 용접면 내외부 용접흡 측정 농도 비교(용접면에 의한 차단 효과 분석)
  - 용접흡은 경우 작업환경측정 및 정도관리규정(노동부고시 제2005-49호) 제21조(측정방법) 3항의 규정에 보면 “용접흡은 여과채취방법으로 하되 용접보안면을 착용한 경우에는 그 내부에서 채취하고 중량분석방법과 원자흡광분광기 또는 유도결합프라스마를 이용한 분석방법으로 측정한다.” 되어있다. 즉, 용접흡 및 망간 농도를 측정할 경우에는 용접면 내부에서 시료를 채취해야 하지만, 현재 작업환경 측정 결과서는 대부분 용접면 외부에서 측정한 용접흡 및 망간 농도이다.
  - 기존 연구에 의하면 용접면에 의한 흡 차단 효과는 50~70% 정도로 매우 높게 보고되어 있다

- 밀폐된 블록을 대상으로 환기 조건에 따른 용접면 내외부 용접흄과 망간 농도를 측정 평가하였다.

4) 실험실 실험을 통해 용접흄 저감 방안 효율 평가

- 현장 실험을 통해 여러 가지 환기 방법과 용접면에 의한 용접흄(망간) 차단 효과를 평가하였지만, 현장 실험은 다양한 기타 인자에 의해 영향을 받게 된다.
- 따라서 좀 더 객관적인 실험 자료를 얻기 위해 아래 설명된 5가지 조건에 대한 실험을 실시하여, 용접흄(망간) 노출량을 최소화 할 수 있는 환기 및 기타 방안을 수립하고자 하였다.

- ① 환기 형태에 따른 용접면 내외부 용접흄 및 망간 농도 변화
- ② 환기 형태별 밀폐공간 평균 흄 농도 분포 측정
- ③ 용접지점에서 거리에 따른 용접흄 및 망간 농도 측정
- ④ 배기 덕트 위치에 환기 효율 평가
- ⑤ 고농도 용접흄 차단 방안 적용시 용접흄 및 망간 저감 효율 평가

**(4) 망간 노출기준 강화 가능성 평가 및 작업환경관리 방안 수립**

1) 노출기준 개정 가능성 검토

- 현장 실태조사 결과와 공정별 환기방안 성능평가 결과를 토대로 노출기준의 개정 가능성에 대해 검토하였다.

2) 작업환경 관리 방안 수립

- 현장 실태 조사 및 적용성 평가를 통해 수립된 망간 농도 저감 방안을 표준화시켜서 조선소에서 쉽게 적용할 수 있도록 하였다.

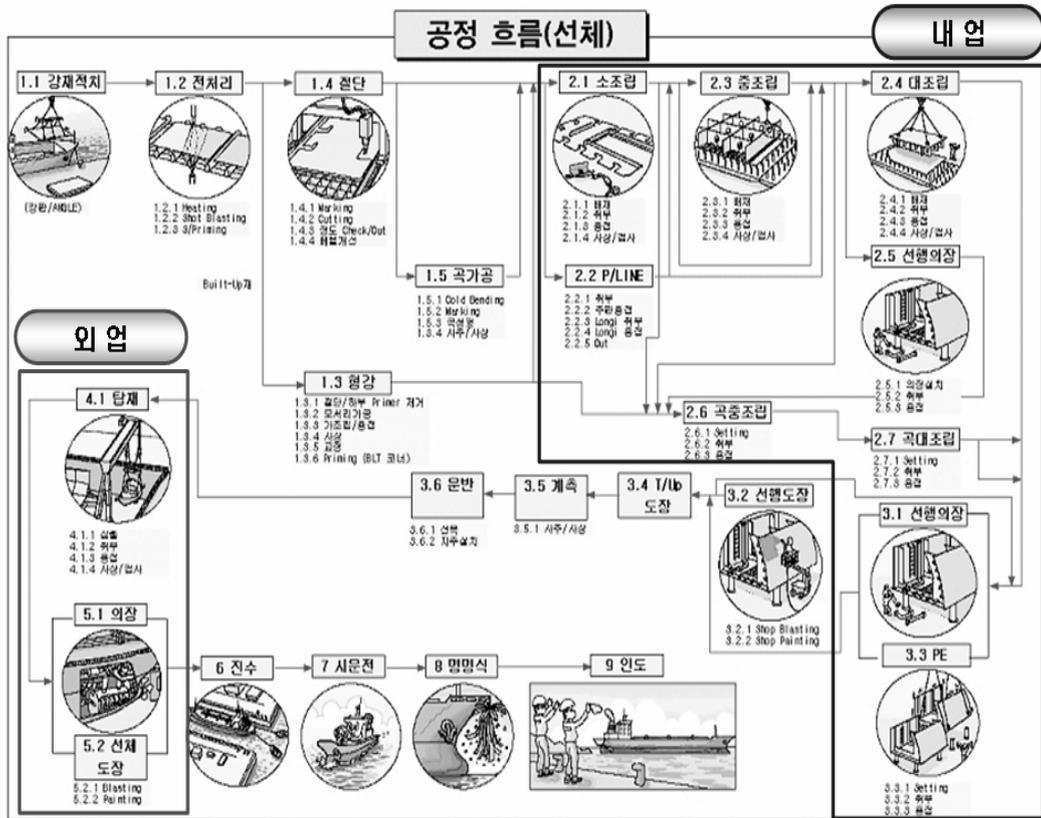
### Ⅲ. 연구 결과

#### 1. 현장 실태조사 실시

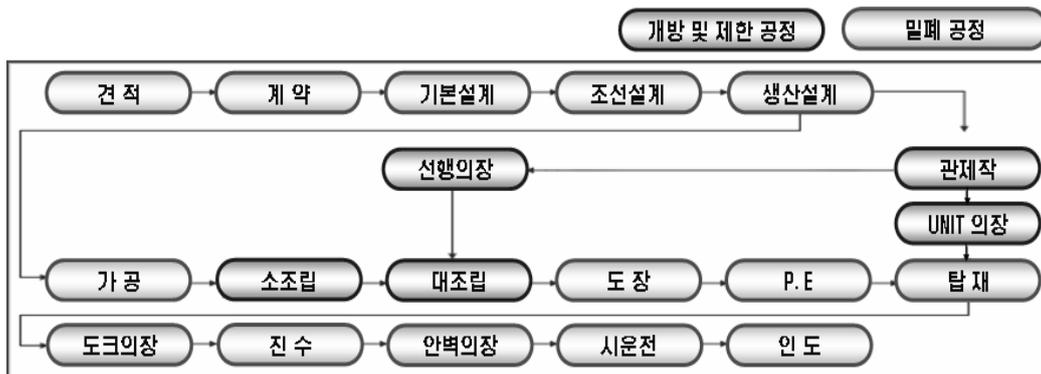
##### (1) 선박 건조과정 및 공정에 따른 용접 흡(망간) 환기 실태

###### 1) 선박 건조 과정

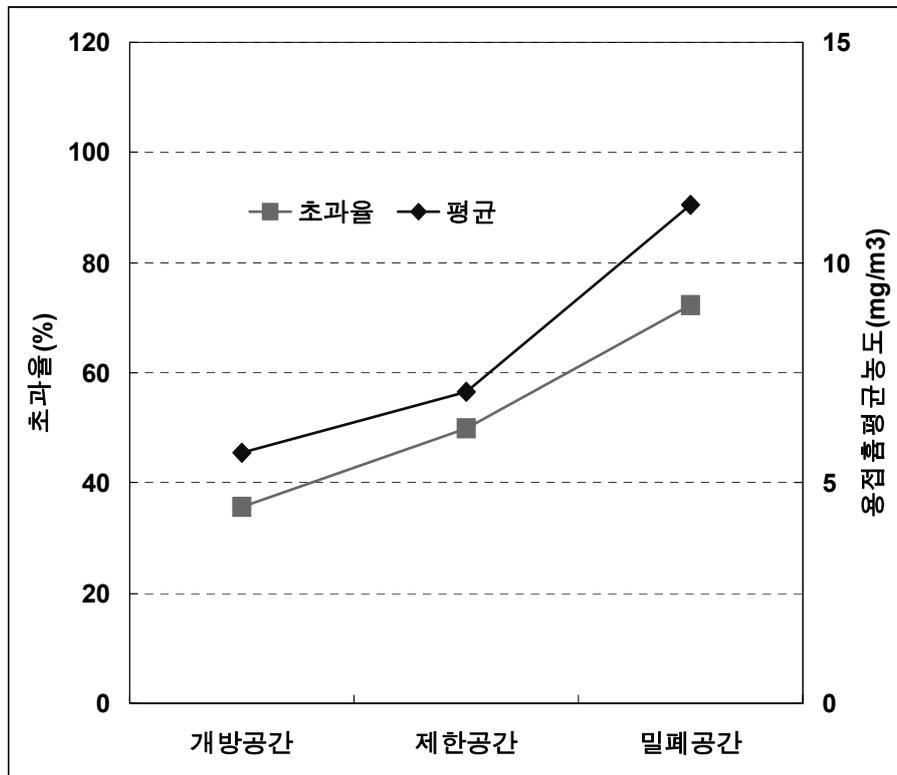
[그림 2]는 일반적인 선박 건조 과정을 정리한 것이다. 일반적으로 대형 블록을 제작하는 공정을 내업이라고 하고, 블록을 조립하여 배의 형상을 만드는 공정을 외업이라고 한다. [그림 3]은 각 공정별로 밀폐도를 정리한 것이다. [그림 3]에서 알 수 있듯이 내업의 블록 제작 공정은 대부분 제한공간인데 반해, 외업의 탑재 및 의장 공정은 대부분 밀폐 공정으로 분류된다. [그림 4]는 모조선소에서 자체적인 관리를 위해 밀폐도에 따른 용접흡 초과율을 정리한 것이다. 개방공간은 3면 이상 개방, 제한공간은 1~2면 개방, 밀폐공간은 출입구를 제외하고 모두 막힌 공간으로 규정하였다. 분석 결과를 살펴보면, 밀폐공간에서 노출량이 다른 공간에 비해서 크게 초과하는 것으로 조사되었다. 특히 밀폐공간에서는 평균값이 용접흡 노출기준인 5 mg/m<sup>3</sup>을 2배 이상 초과하고 있는 것으로 조사되었다. 이 결과로 볼 때 조선업종에서 용접흡(망간)의 노출량이 가장 높을 것으로 예상되는 공정이 밀폐공간임을 알 수 있다. 이러한 밀폐공간은 [그림 2]의 선박 제작공정으로 볼 때 대부분 외업에 해당되는 부분임을 알 수 있다.



[그림 2] 선박 건조 과정



[그림 3] 선박 건조 공정에 따른 밀폐도

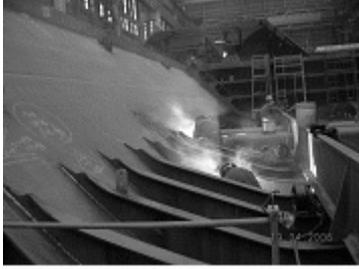
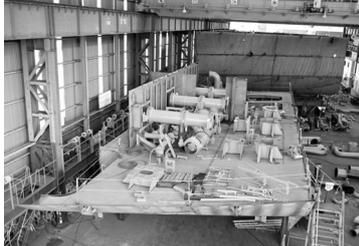


[그림 4] 개방도에 따른 용접흙 농도 및 초과율  
(O 조선소 내부 자료)

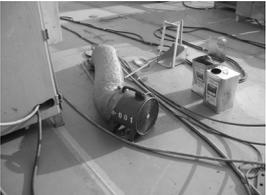
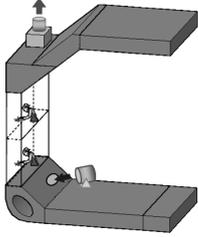
2) 선박 건조 과정에 따른 환기 실태

<표 3>은 내업 공정 모습과 환기 실태를 정리한 것이고, <표 4>는 외업 공정 모습과 환기실태를 정리한 것이다.

〈표 3〉 내업 공정 모습과 환기 실태

공정명	현장사진	공정설명	환기방안
소조립		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 개방된 공간에서 아래보기 자세의 용접이 대부분임</li> <li>- 작업장 내부 기류 및</li> </ul>	
중조립			
대조립		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 선체의 외판재에 덮개를 설치하여 블록(Block)을 완성하는 공정으로 밀폐 공간에서 용접작업을 수행함</li> </ul>	<p>&lt;주름관 덕트를 이용한 배기&gt;</p> 
선행의장		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 각종 파이프라인 등을 연결하는 공정</li> </ul>	<p>&lt;소형팬을 이용한 급배기&gt;</p>

〈표 4〉 외업공정 모습과 환기 실태

공정명	현장사진	공정설명	환기방안
선행의장		<p>- 조립공정에서 만들어진 블록(Block)을 연결하여 슈퍼블록을 제작하며, 배의 각 부위를 부분 완성시킴</p>	 <p>&lt;하우스팬을 이용한 환기&gt;</p>  <p>&lt;소형팬을 이용한 환기&gt;</p>
탑재	  <p>&lt;블록 내부 용접 모습&gt;</p>	<p>- 선행의장에 의해 완성된 슈퍼블록을 조립하고, 선체의 각 부위를 연결하여 배의 모양을 완전히 갖춤</p>	 <p>&lt;대형팬을 이용한 급기&gt;</p>  <p>&lt;밀폐공간의 급배기 모습&gt;</p>  <p>&lt;배 하부에서 대형팬을 이용한 급기모습&gt;</p>

## (2) 경남 지역 중소형 조선소 작업환경 측정 결과서 분석

2007년 7월 ~ 8월 사이에 경남지역에 소재하는 7개 중소형 조선소를 방문하였고, 2007년(2006년)도 작업환경 측정 결과서를 확보하여, 용접흡과 망간 측정결과를 정리하였다. <표 5>는 작업환경측정결과를 정리한 것이다. <표 6>은 각 조선소별 용접흡 및 망간 농도 초과 비율을 정리한 것이다.

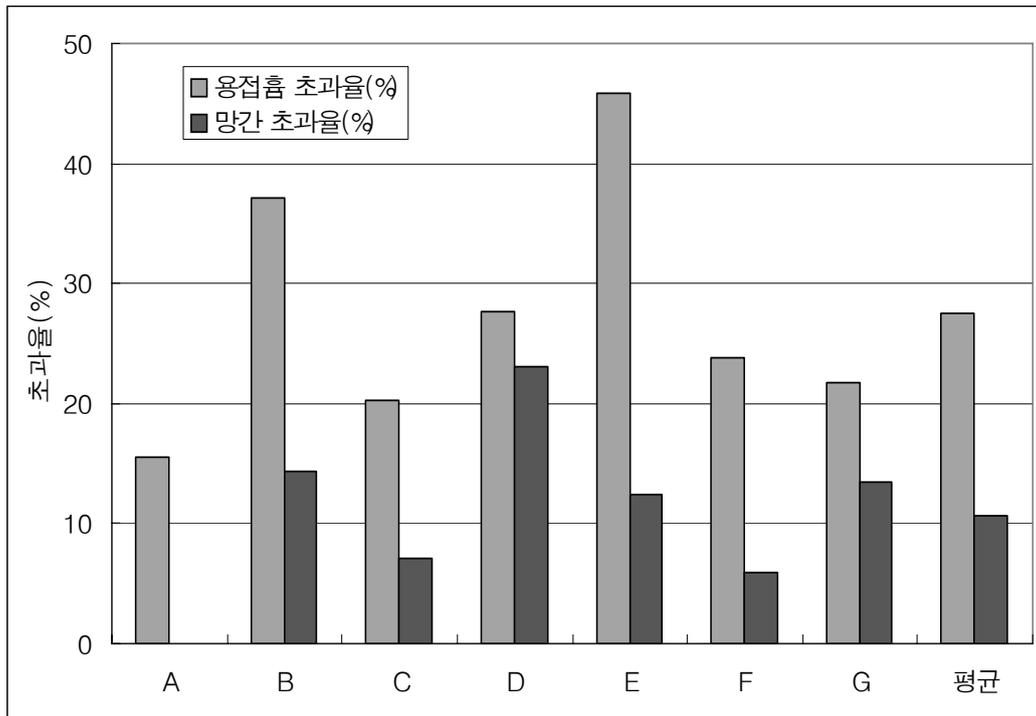
〈표 5〉 중소형 조선소 작업환경 측정결과 정리

조선소	유해인자	측정 시료수	최소값	최대값	표준 편차	기하 평균	초과 횟수	초과율 (%)
가	용접흡 (5mg/m <sup>3</sup> )	41	0.0916	8.7661	2.3373	1.7514	7	15.56
	망간 (1mg/m <sup>3</sup> )	45	0.0008	0.8398	0.1536	0.0139	0	0.00
나	용접흡 (5mg/m <sup>3</sup> )	35	0.4667	13.6216	4.2192	3.5589	13	37.14
	망간 (1mg/m <sup>3</sup> )	35	0.0169	1.6424	0.5329	0.2475	5	14.29
다	용접흡 (5mg/m <sup>3</sup> )	128	0.1461	13.7319	3.5618	1.8773	26	20.31
	망간 (1mg/m <sup>3</sup> )	127	0.0029	1.8082	0.4142	0.0448	9	7.09
라	용접흡 (5mg/m <sup>3</sup> )	65	0.5088	13.4035	3.9395	2.9928	18	27.69
	망간 (1mg/m <sup>3</sup> )	65	0.0216	1.7741	0.6040	0.1774	15	23.08
마	용접흡 (5mg/m <sup>3</sup> )	24	0.1461	9.2603	3.3061	2.7443	11	45.83
	망간 (1mg/m <sup>3</sup> )	24	0.0009	1.3380	0.4865	0.0877	3	12.50
바	용접흡 (5mg/m <sup>3</sup> )	67	0.3889	9.8630	2.8802	2.4005	16	23.88
	망간 (1mg/m <sup>3</sup> )	67	0.0017	1.7437	0.3825	0.0577	4	5.97
사	용접흡 (5mg/m <sup>3</sup> )	170	0.0916	13.9312	4.2340	2.0139	37	21.76
	망간 (1mg/m <sup>3</sup> )	170	0.0046	1.9814	0.5494	0.0780	23	13.53

〈표 6〉 각 조선소별 용접흡 및 망간 기준 초과율 정리

구분	A	B	C	D	E	F	G	평균
용접흡 초과율(%)	15.56	37.14	20.31	27.69	45.83	23.88	21.76	27.45
망간 초과율(%)	0	14.29	7.09	23.08	12.5	5.97	13.53	10.66

[그림 5]는 용접흡 및 망간 농도 기준 초과율을 그래프로 나타낸 것인데, 용접흡 초과율과 망간 초과율이 일정한 패턴으로 나타나지 않고 있는 것을 알 수 있다. E사의 경우 용접흡 초과율은 가장 높는데 반해, 망간 초과율은 7개사 중에 4위에 해당한다. 또, A사의 경우에는 망간 초과 근로자가 없는 것으로 조사되었다. 이는 모든 작업자에게서 망간을 측정하는 것이 아니기 때문에 용접흡 초과율과 망간 초과율을 직접 비교할 수 없는 제한점이 있었다.



[그림 5] 조선소별 용접흙 및 망간 초과율

### (3) 대형 조선소 용접흙 및 망간 노출 실태 조사

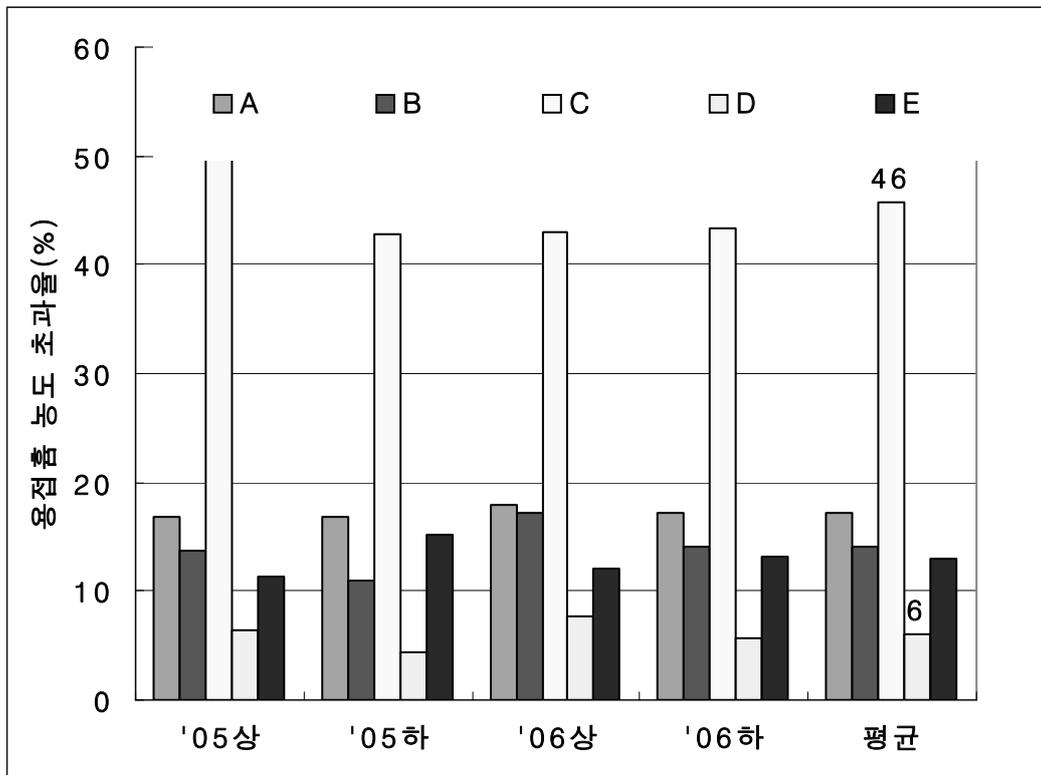
2007년 7월 28일 경총에서 각 사업장으로 설문지를 발송하였고, 2007년 8월 31일까지 회신된 5개 대형 조선소의 설문 결과를 분석하였다. 각 조선소에서 회신한 설문 조사 원본은 부록에 정리하였다.

#### 1) 용접흙 노출 실태

5대 조선소의 최근 2년간 용접흙 농도 초과율을 정리하여 <표 7>에 정리하였다. 2년간 평균 초과율을 보면 19.2%로 나타났다. 이는 경남 지역 중소형 조선소의 평균 초과율인 27.45%보다 낮은 결과이다. [그림 6]은 연도별 용접흙 초과율을 정리한 것이다.

〈표 7〉 5대 조선소 용접흡 초과 실태-최근 2년간

구분		'05상	'05하	'06상	'06하	초과율 평균
A사	측정건수	780	741	766	791	
	초과건수	131	125	138	136	
	초과율	16.8%	16.9%	18.0%	17.2%	17.2%
	평균값	2.35	2.58	2.68	2.80	
B사	측정건수	183	199	186	227	
	초과건수	25	22	32	32	
	초과율	13.7%	11.1%	17.2%	14.1%	14.0%
	평균값	2.65	2.63	3.50	2.81	
C사	측정건수	221	203	233	251	
	초과건수	118	87	100	109	
	초과율	53.4%	42.9%	42.9%	43.4%	45.6%
	평균값	4.07	2.69	3.78	4.05	
D사	측정건수	766	742	803	833	
	초과건수	49	33	61	47	
	초과율(%)	6.4%	4.4%	7.6%	5.6%	6.0%
	평균값	1.67	1.65	1.92	1.65	
E사	측정건수	406	377	381	382	
	초과건수	46	57	46	50	
	초과율	11.3%	15.1%	12.1%	13.1%	12.9%
	평균값					
<b>초과율 평균</b>						<b>19.2%</b>



[그림 6] 년도별 용접흡 초과율

<표 7>을 보면, 용접흡 초과율이 가장 높은 C사의 경우 무려 45.6%가 초과를 하지만, 초과율이 가장 낮은 D사의 경우 6%의 낮은 초과율을 보이고 있다. C사의 경우에는 중소기업 조선소의 용접흡 초과율보다 1.7배 정도 높은 값이고, D사 보다는 무려 7.6배 정도 높은 초과율을 보이고 있다.

용접흡 초과율 현황만을 놓고 보면, C사의 용접흡 관리 상태 및 환기 실태가 대단히 열악하고 D사의 경우 용접흡 농도를 저감하기 위한 조치를 적절히 취하고 있다고 판단 할 수 있다. 하지만, 현장 조사 결과 조선소별로 특별히 차이는 환기 방법을 적용하고 있지 않다는게 본 연구팀과 조선소에 작업환경을 측정하는 측정기관의 공통된 의견임을 감안할 때 환기 이외의 방법/원인에 의해 용접흡 초과율에서 큰 차이가 발생된 것으로 판단된다.

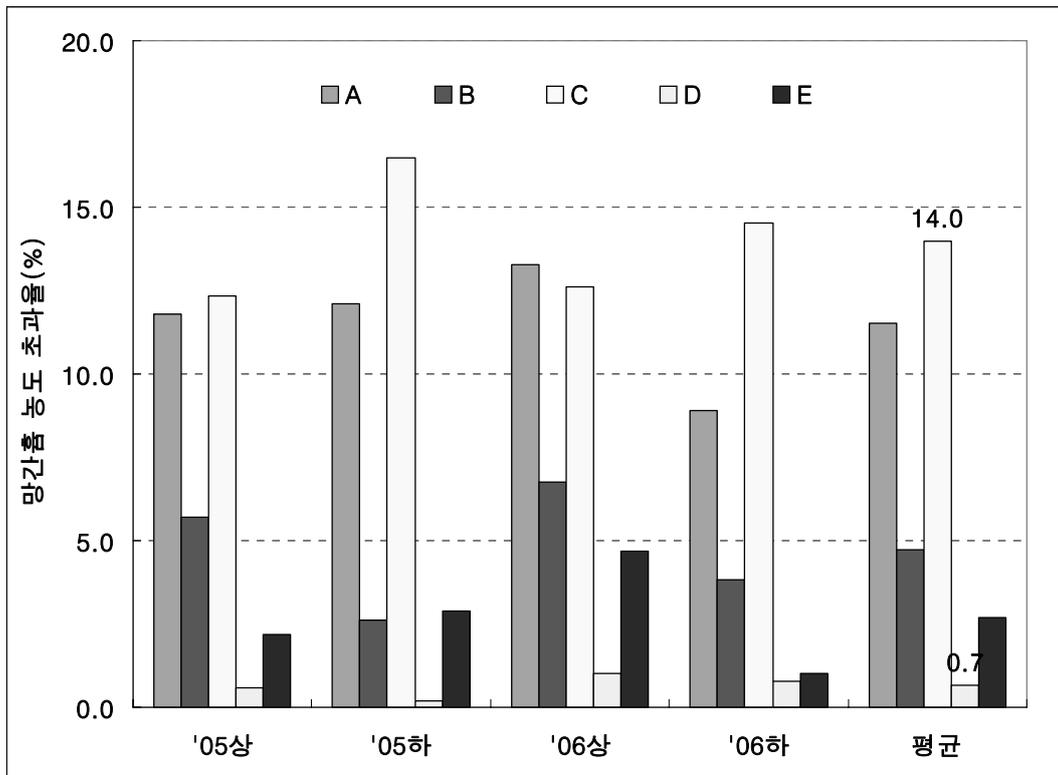
## 2) 망간 노출 실태

5대 조선소의 최근 2년간 망간 농도 초과율을 정리하여 <표 8>에 정리하였고, [그림 7]는 각 조선소별로 측정결과를 정리하여 그래프로 나타낸 것이다.

<표 8>에서 알 수 있듯이, 망간 측정결과 초과율이 가장 높은 C사의 경우 14.0%인데 반해 가장 낮은 D사의 경우 0.7%로 조사되었다. D사에 비해 C사의 초과율이 21.5배나 높게 측정되었다. 용접흡 농도 초과율과 마찬가지로 특별한 환기시스템을 적용하지 않았음에도 불구하고 측정결과에 큰 차이를 보이는 원인을 분석해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다. 대형조선 5개사의 평균 망간 초과율은 6.7%로 중소기업의 10.66%보다 낮게 측정되었다.

〈표 8〉 5대 조선소 망간 초과 실태-최근 2년간

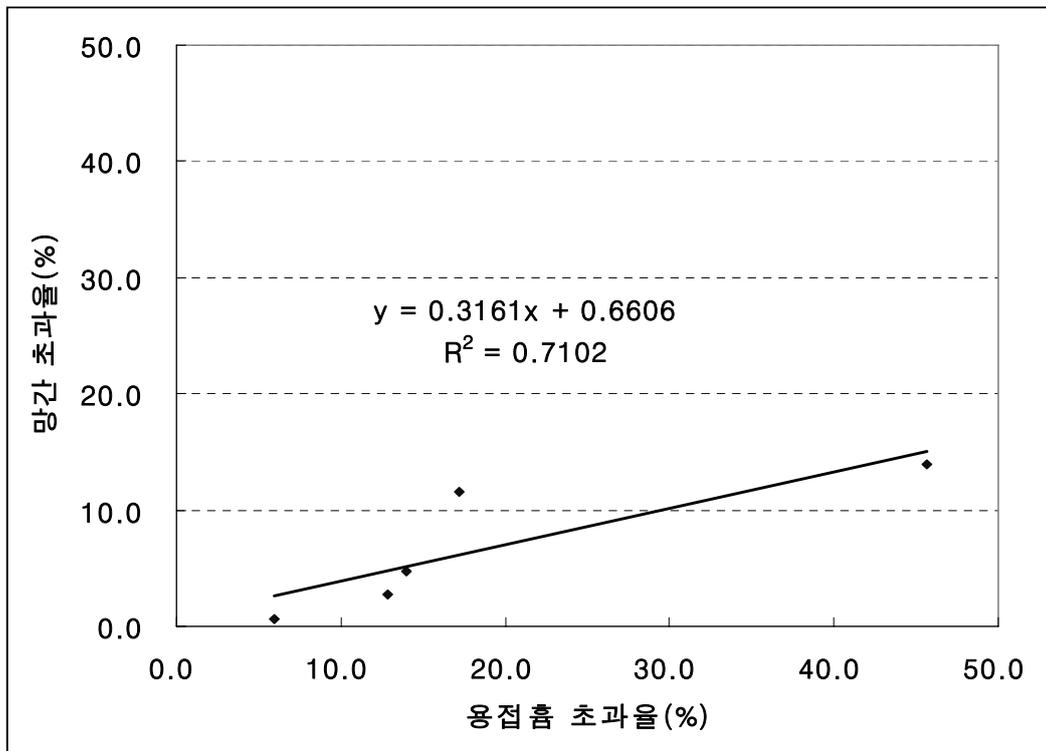
구 분		'05상	'05하	'06상	'06하	초과율 평균
A사	측정건수	701	721	744	764	
	초과건수	83	87	99	68	
	초과율	11.8%	12.1%	13.3%	8.9%	11.5%
	평균값	0.29	0.19	0.29	0.23	
B사	측정건수	175	191	178	210	
	초과건수	10	5	12	8	
	초과율	5.7%	2.6%	6.7%	3.8%	4.7%
	평균값	0.12	0.13	0.18	0.17	
C사	측정건수	219	200	230	248	
	초과건수	27	33	29	36	
	초과율	12.3%	16.5%	12.6%	14.5%	14.0%
	평균값	0.17	0.13	0.10	0.14	
D사	측정건수	824	811	832	898	
	초과건수	5	2	8	7	
	초과율(%)	0.6%	0.2%	1.0%	0.8%	0.7%
	평균값	0.09	0.084	0.094	0.07	
E사	측정건수	406	376	471	382	
	초과건수	9	11	22	4	
	초과율	2.2%	2.9%	4.7%	1.0%	2.7%
	평균값					
초과율 평균						6.7%



[그림 7] 년도별 망간 초과율

3) 용접흡 Vs.망간 초과율 상관도 분석

5대 조선소의 용접흡 및 망간 평균 초과율 자료를 이용하여 용접흡과 망간 초과율의 상관도를 분석하여 [그림 8]에 정리하였다. [그림 8]에서 알 수 있듯이 용접흡과 망간 초과율의 상관도( $R^2$ )가 71% 정도로 비교적 높게 나타났다. 즉, 용접흡 초과율이 높은 조선소는 망간 초과율도 같이 높아진다는 것을 의미하는 것으로, 용접흡에 대한 적절한 저감 대책을 수립한다면 망간 농도도 자연스럽게 감소한다는 것을 알 수 있다.



[그림 8] 용접흡과 망간 초과율 상관도 분석 그래프

#### 4) 송풍기 보급율

5대 조선소의 송풍기 보급대수를 조사하여 <표 9>에 정리하였다. <표 9>에서 작업자 수는 협력사가 포함된 조선소와 포함되지 않은 회사가 있기 때문에 정확한 용접작업자 수 파악은 힘들 것으로 판단된다. 소형팬을 작업자가 들고 이동할 수 있도록 제작된 것으로 현장에서는 개인용 환기 방안 수립을 위해 기본적으로 필요한 환기 시스템이다. 그리고 고정용 팬은 밀폐 공간 전체나 블록 내부 전체를 환기시키기 위해 가동하는 대형팬으로 조선소에서 전체환기용으로 일반적으로 사용하고 있다. 소형팬의 경우 대략 용접 작업자수 대비해서 50% 이상 보급되어 있는 것으로 파악되었고, 실제 설문에 조사된 송풍기가 모두 가동되는지는 정확히 알 수 없는 실정이다.

〈표 9〉 5대 조선소 용접 작업자 수와 송풍기 보급 대수 현황

구분	용접 작업자수	Φ 200-300(개인용)	Φ 600 이상(고정용)
A	4,463	2,452	2,211
B	480	600	114
C	1,574	1,337	777
D	3,453	4,179	4,091
E	552	1,353	779

(4) 망간 노출기준 강화시 초과율 변화

망간 농도의 기준을 강화했을 때 망간농도 초과율의 변화와 망간 저감 대책을 수립했을 때 초과율 변화를 분석했다. 대형 조선소는 용접흡 및 망간 초과율이 가장 높은 C사의 2006년도 측정 결과를 분석하였고, 중소형 조선소는 경남 지역 7개 조선소 측정결과를 이용하여 분석하였다.

특히, 망간 기준을 2배 초과할 경우에 “산업안전보건법 시행규칙 제 93조의 4(작업환경측정횟수)에서 별표 11의 3 제 1호에 해당하는 화학적 인자(발암성물질에 한한다)를 취급하는 작업자 중 측정치가 노출기준을 2배 이상 초과하는 경우에는 3월에 1회 이상 작업환경측정을 실시하여야 한다는 규정”에 의해 연간 4회 작업환경 측정을 해야 한다.

하지만, 용접흡의 경우 산업보건 기준에 관한 규칙 제 2장 분진에 의한 건강 장애 예방 별표 1의 19항 규정(실내·깁내·탱크·선박·관 또는 차량 등의 내부에서 금속을 용접 또는 용단하는 작업)에 의해 일반 분진으로 취급을 받기 때문에 노출 기준을 2배 이상 초과하여도 작업환경 측정 횟수를 조정할 필요가 없도록 되어 있다.

이 규정 때문에 대부분의 조선소들이 망간 노출 농도가 기준의 2배 이상 초과하는 것에 많은 부담을 느끼고 있다. 따라서, 현행 망간 노출기준

1mg/m<sup>3</sup>에서 노출기준이 0.5mg/m<sup>3</sup>으로 강화될 경우 작업환경 측정 회수 증가 등의 문제가 발생하게 된다. 따라서, 현재 작업환경 측정 결과서를 분석하여 망간 노출 기준 강화시 기준 초과율과 노출기준 2배 초과율을 분석해 보고, 용접흡(망간) 저감 방안 수립시 노출기준 초과율 변화를 분석해 보고자 한다.

#### 1) 대형 조선소의 망간 초과율 변화

<표 10>은 대형 조선소 망간 기준 강화에 따른 초과율 변화를 정리한 것이고, <표 11>은 망간 기준 강화시 노출기준 2배 초과율을 정리한 것이다. 또, 각 경우에 용접흡(망간) 저감 방안을 적용하여 현재 노출 농도보다 30% 저감했을 때, 50% 저감했을 때 각각 노출 기준 초과율 변화를 분석 하였다.

<표 10>을 살펴보면, 현재 초과율이 9.6%에서 노출기준 강화시 17.4%로 1.8배 정도 초과율이 증가하게 된다. 용접흡(망간) 저감 방안을 적용하여 현재보다 용접흡(망간) 노출농도를 30% 정도 저감했을 경우 초과율이 13.0%로 현재기준을 적용했을 때 보다 1.35배 정도 초과율이 증가하게 된다. 따라서, 망간 기준을 2배 강화했을 때 초과율이 증가하기 않도록 하기 위해서는 용접흡(망간) 저감 방안의 효율이 50% 이상 유지하도록 해야 한다는 것을 알 수 있다. 따라서, 향후 용접흡(망간) 노출 저감 방안 수립 시에는 현재 노출량의 50% 이상 감소시킬 수 있는 저감 방안을 고려해야 할 것으로 판단된다.

<표 11>은 노출기준 2배 초과율을 정리한 것인데, 노출기준 강화 시 현재 2.4%에서 9.6%로 약 4배 정도 초과하는 것을 알 수 있다. 이처럼 현재와 같은 노출량을 그대로 유지한 채로 노출 기준만 강화한다면 각 조선소에서는 거의 모든 공정에 작업환경측정을 4회/년 정도로 해야 된다는 것을 의미하고, 대형 조선소의 경우 작업환경 측정에 2~3개월 이상이 소요되는 것을 감안할 때 많은 부담으로 작용할 수밖에 없다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 적절한 용접흡(망간) 저감 방안을 수립한 후 노출 기준 강화를 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 물론 용접흡(망간) 노출 농도 저감 노력은 사업주가 자발적으로 추진하는 것이 바람직하다.

〈표 10〉 대형 조선소 망간 기준 강화에 따른 초과율 변화

구분	망간 농도 측정자 수	망간 기준 강화시 초과율 변화				망간 기준 0.5mg/m <sup>3</sup> 일 때 저감 대책 효율에 따른 초과율 변화			
		1mg/m <sup>3</sup>		0.5mg/m <sup>3</sup>		망간 농도 30% 저감		망간 농도 50% 저감	
		기준 초과	초과율	기준 초과	초과율	기준 초과	초과율	기준 초과	초과율
06년도 상반기	607	67	11.0	114.0	18.8	90	14.8	67	11.0
06년도 하반기	626	86	13.7	147	23.5	112	17.9	86	13.7
07년도 상반기	617	24	3.9	61	9.9	39	6.3	24	3.9
초과율 평균			9.6%		17.4%		13.0%		9.6%

〈표 11〉 대형 조선소 망간 기준 강화에 따른 기준 2배 초과율 변화

구분	망간 농도 측정자 수	망간 기준 강화시 초과율 변화				망간 기준 0.5mg/m <sup>3</sup> 일 때 저감 대책 효율에 따른 초과율 변화			
		1mg/m <sup>3</sup>		0.5mg/m <sup>3</sup>		망간 농도 30% 저감		망간 농도 50% 저감	
		기준 2배 초과	초과율	기준 2배 초과	초과율	기준 2배 초과	초과율	기준 2배 초과	초과율
06년도 상반기	607	13	2.1	67	11.0	35	5.8	13	2.1
06년도 하반기	626	28	4.5	86	13.7	59	9.4	28	4.5
07년도 상반기	617	3	0.5	24	3.9	13	2.1	3	0.5
초과율 평균			2.4%		9.6%		5.8%		2.4%

## 2) 중소규모 조선소의 망간 초과율 변화

〈표 12〉는 중소규모 조선소에서 망간 기준 강화시 초과율을 분석한 자료인데 현재 15.0% 초과에서 25.5%로 초과율이 증가하게 된다. 즉, 용접사 4명 중 한 명이 작업환경 노출 기준을 초과하는 결과를 가져오게 된다. 또, 〈표 13〉을 살펴보면, 15%가 작업환경 노출기준을 2배 이상 초과하게 된다. 중소규모 조선소도 대형 조선소와 마찬가지로 현재 노출량을 그대로 유지하고 망간 노출기준을 0.5mg/m<sup>3</sup>으로 변경할 경우, 작업환경 측정 횟수 증가 등으로 많은 부담을 안게 될 것으로 판단된다.

〈표 12〉 중소규모 조선소 망간 기준 강화에 따른 초과율 변화

구분	망간 농도 측정자 수	망간 기준 강화시 초과율 변화				망간 기준 0.5mg/m <sup>3</sup> 일 때 저감 대책 효율에 따른 초과율 변화			
		1mg/m <sup>3</sup>		0.5mg/m <sup>3</sup>		망간 농도 30% 저감		망간 농도 50% 저감	
		기준 초과	초과율	기준 초과	초과율	기준 초과	초과율	기준 초과	초과율
가	65	18	27.7	26.0	40.0	22	33.8	18	27.7
나	170	28	16.5	36	21.2	33	19.4	23	13.5
다	65	6	9.2	10	15.4	8	12.3	6	9.2
라	127	11	8.7	18	14.2	14	11.0	11	8.7
마	45	1	2.2	2	4.4	2	4.4	1	2.2
바	24	3	12.5	7	29.2	7	29.2	3	12.5
사	35	10	28.6	19	54.3	17	48.6	10	28.6
초과율 평균			15.0%		25.5%		22.7%		14.6%

〈표 13〉 중소형 조선소 망간 기준 강화에 따른 기준 2배 초과율 변화

구분	망간 농도 측정자수	망간 기준 강화시 초과율 변화				망간 기준 0.5mg/m <sup>3</sup> 일 때 저감 대책 효율에 따른 초과율 변화			
		1mg/m <sup>3</sup>		0.5mg/m <sup>3</sup>		망간 농도 30% 저감		망간 농도 50% 저감	
		기준 2배 초과	초과율	기준 2배 초과	초과율	기준 2배 초과	초과율	기준 2배 초과	초과율
가	65	0	0.0	18	27.7	8	12.3	0	0.0
나	170	0	0.0	28	16.5	15	8.8	0	0.0
다	65	0	0.0	6	9.2	1	1.5	0	0.0
라	127	0	0.0	11	8.7	5	3.9	0	0.0
마	45	0	0.0	1	2.2	1	2.2	0	0.0
바	24	0	0.0	3	12.5	0	0.0	0	0.0
사	35	0	0.0	10	28.6	4	11.4	0	0.0
초과율 평균			0.0%		15.0%		5.8%		0.0%

## 2. 문헌 조사

### (1) 조선 업종에서 망간 발생 특성

금속 망간(페로망간)은 주로 철제품(철판)의 단단함, 경도, 강도를 향상시키기 위해 사용되는데, 조선업종에서도 선급률에 따라 1% 전후의 망간이 함유된 철판을 사용한다. 조선업종의 용접 시 발생하는 망간은 철판에 함유된 것과 용접봉에 함유된 것이 있는데, 철판에 함유된 것 보다는 용접봉에 함유된 망간 농도가 직접적으로 망간 흡 발생량과 관계가 있다. 용접봉에 망간이 함유된 목적은 용접 용착물의 강도를 강화하고 CO<sub>2</sub>용접 시 CO발생에 의한 기공 발생을 방지하기 위한 탈산소제로 작용하기 때문이다.

탄산가스 아크 용접시의 아크열에 의해 탄산가스가 분해되어 CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>로 변하거나 차폐가스 내부로 극히 소량의 공기가 혼입된다. 이렇게 탄산가스의 분해산물이나 차폐가스 내부로 유입된 공기에 의해 용접부위가 산화되거나 기공이 형성되어 용접불량이 발생하게 된다. 이와 같은 용접불량을 방지하기 위해 탈산제를 사용하는데, 일반적으로 Si, Mn, Ti 등이 사용된다.

특히, 망간의 경우 탈산제로 사용된 후에도 용접부위의 강도 유지를 위해서 일정 수준 이상으로 잔류해야 하기 때문에 용접 시에 감쇠되는 것을 고려해서 적절한 함유량이 되도록 첨가한다.

순탄산가스 아크용접 일 때 용접봉에 함유된 각 성분이 남는 비율은 연강 일 경우 C는 일반적으로 산화 감소하여 50-80 %, Si는 30-60 %, Mn은 40-60 %이고 Cr, Ni, Mo 는 거의 줄어들지 않는다. 즉, 용접봉에 함유된 망간의 40-60% 정도가 흡 형태로 발생되어 대기 중으로 확산되는 것을 의미한다. 용접 시 산소와 결합된 망간 등의 탈산제는 슬래그를 형성하여 비드 위로 부상하기 때문에 작업자가 호흡을 통해 노출될 가능성은 높지 않다고 판단된다.

각 용접봉에 함유된 망간의 양은 강도와 연성에 대한 표준에 맞는 용접 등급을 만들어내기 위해 철과 합금 원소들을 최적으로 조합함을 반영한 것

으로 임의로 변경할 경우 용접 품질 저하가 우려되어 조선소에서 임의로 변경하지 못한다.

용접봉에 함유된 망간의 역할을 다음과 같다.

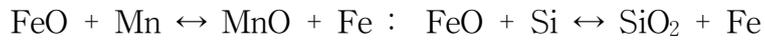
- 탄산가스아크 용접은 불활성가스대신에 경제적인 탄산가스를 이용하는 용접방법으로 전극은 소모성(용극식, 熔極式)을 주로 사용한다. 탄산가스는 활성이므로 고온의 아크에서는 산화성이 크고 용착금속의 산화가 심하여 기공 및 그 밖의 결함이 생기기 쉬우므로 Mn, Si 등의 탈산제(탈산소제)를 함유한 와이어를 사용한다.
- 순수한 CO<sub>2</sub> 가스이외에 CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>-CO, CO<sub>2</sub>-Ar, CO<sub>2</sub>-Ar-O<sub>2</sub> 등이 사용되기도 한다. CO<sub>2</sub>가스는 고온아크에서  $2\text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{O}_2$ 로 되므로 탄산가스 아크 용접의 실드 분위기는 CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub> 및 O 가스가 혼합된다.
- 탈산제가 사용되는 이유는 CO의 기포로 인한 용접결함을 방지하기 위함인데 다음과 같은 작용을 한다.
  - ① 실드 가스인 이산화탄소가 고온인 아크열에 의하여 분해된다.  

$$\text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{O}$$
  - ② 위의 산화성 분위기에서 용융철이 산화된다.  

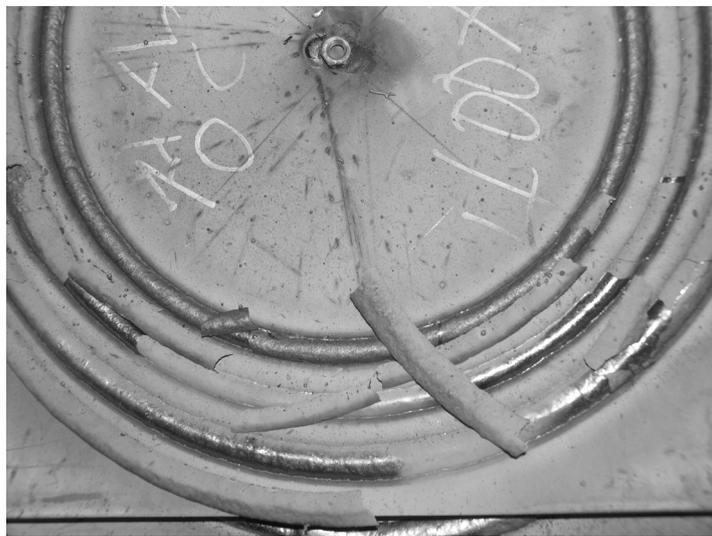
$$\text{Fe} + \text{O} \leftrightarrow \text{FeO}$$
  - ③ 이 산화철이 강(鋼) 중에 함유된 탄소와 화합하여 다음처럼 일산화탄소기포가 생성된다.  

$$\text{FeO} + \text{C} \leftrightarrow \text{Fe} + \text{CO} \uparrow$$

- ④ 그러나 Mn, Si등의 탈산제가 있으면 아래 반응이 일어나 용융강(熔融鋼)중의 산화철을 감소시켜 기포의 발생을 억제.



- ⑤ 탈산 생성물인 MnO, SiO<sub>2</sub> 등은 용착금속과의 비중차에 의해 슬래크를 형성해 용접비드 표면에 떠오르게 된다.



[그림 9] 용접 홈 비드 상부에 형성된 슬래그 모습

## (2) 용접봉의 망간 함유량 분석

용접봉에 함유된 망간 농도를 분석하기 위해 K 사 24개 제품, S사 9개 제품, H사 25개 제품, HC사 4개 제품 등 총 62개 제품의 MSDS를 확보하였다. 용접봉에 함유된 망간의 농도는 용접부위의 강도와 연성에 대한 표준에 맞는 공급되고 있었고, 각 용접 형태별로도 약간의 차이가 있었다. 일반적으로 CO<sub>2</sub>용접은 1~3 % 이내이고, 대부분 1.5 % 정도 범위였다. 망간 함유량이 높은 용접봉은 피복아크 용접봉과 서브머지드 용접봉으로 약 3~5 % 정도 범위를 보이고 있었다.

물질안전보건자료  
(Material Safety Data Sheets)

물질분류	유해성물질
관리번호	

1. 제품 및 제조회사 정보				
제품명 : 용도 : 연강 및 490N/mm <sup>2</sup> 급 고장력강용 FLUX CORED WIRE 규격 : AWS E71T-1 , KS YFW-C50DR		제조자 : 주소 : 전화번호 : 최종개정일자 : 2000. 09. 06		
2. 구성성분의 명칭 및 조성				
다음의 사항들은 본제품을 구성하는 성분들에 대한 것이며 용접시 발생하는 여러물질(흠 및 가스)들에 대해서는 10. 안정성 및 반응성에서 참조할것.				
구분	성분	CAS No.	함유량 (%)	비고
와이어의 화학적성분	IRON OXIDE	1309-38-2	3.2	-
	SODIUM SILICATE	1344-09-8	0.4	-
	MANGANESE	7439-96-5	1.5	-
	SILICON OXIDE	7631-86-9	1.0	-
	TITANIUM OXIDE	13463-67-7	15.4	-
	MAGNESIUM OXIDE	1309-48-4	0.4	-
	ZIRCONIUM SILICATE	7440-42-6	1.0	-
	ALUMINUM OXIDE	1344-28-1	0.2	-
심선	LOW CARBON STEEL STRIP	-	76.9	-

[그림 10] K사 용접봉 MSDS내용

(3) 기존 연구 사례

국내외적으로 현재까지 대부분의 연구가 조선업의 일부 공정에 대한 공기 중 용접 흠(망간) 농도에 대한 평가가 대부분이며, 이 또한 2000년도 이전에 이루어 졌기 때문에 조선업 호황으로 인한 현재 상태를 반영하지는 못하고 있다.

또한, 용접공정에서 발생하는 흠으로 부터 작업자의 호흡영역을 보호할 수 있는 환기방안에 대한 연구는 과거 본 연구팀을 중심으로 일부 진행된 바가 있다.

용접흠 저감에 대한 국내외 연구 자료는 다음과 같다.

## 1) 용접흡 노출 및 저감방안 연구

- ① 백남원 등(1997)에 의해 모조선소의 밀폐된 작업장에서의 공기중 용접흡 및 중금속 농도에 관한 조사 연구가 진행된바 있는데, 모조선소의 조립 공정과 탑재 부서를 중심으로 블록 내부의 밀폐공간과 개방공간에 대해 용접흡 및 중금속 농도를 평가하였다. 연구결과를 살펴보면, 밀폐 작업장의 공기중 용접흡은 개방된 작업장보다 3.2배 높았고, 용접흡 중의 중금속 농도는 철, 망간, 아연, 구리에서 약 2~4배정도 높았으며, 납, 니켈, 크롬, 카드뮴은 큰 차이가 없었다.

또한 밀폐 작업장에서 공기중 용접흡 농도는 전체 시료 중 82.1%가 노출기준을 초과하였으며, 개방된 작업장에서는 전체 시료 중 57.6%가 노출기준을 초과한 것으로 나타났다. 망간에 대한 농도는 밀폐 작업장에서 전체 시료 중 60.5%가 노출기준을 초과하였으며, 개방된 작업장에서는 17.6%가 노출기준을 초과하였다.

따라서, 전반적으로 개방공간에 비해 블록(Block) 내부의 밀폐 공간에서 작업할 경우 노출기준을 초과할 우려가 크고 작업자에 대한 적절한 환기 대책이 절실히 필요한 것으로 나타났다.

- ② 이영세 등(1999)에 의해 철강 용접 작업자의 용접 조건에 따른 망간 및 크롬 노출 실태를 실험적으로 연구하였다. 용접흡 발생량은 용접의 종류, 용접봉 및 모재의 종류에 따라 다르다. 사용 전류와 전압이 크고, 용접봉의 직경이 클 때, 그리고 용접봉이 극성이 직류 양전극일 때 용접흡의 발생이 많다고 알려져 있다. 이 연구 결과를 보면, 용접봉의 종류에 따라 용접흡 발생량과 중금속 성분이 발생량에 유의한 차이가 있는 것으로 조사되었다. 용접봉의 종류는 용접부위의 강도와 경도에 따라 각종 중금속의 첨가량이 정해져 있기 때문에 임의적인 변경이 불가능하다.

용접면 형태에 따른 흡 차단 효과는 머리부착형(head type)이 67.6 %,

손잡이형(hand type)이 58.5 %로 나타났다. 한편 에어공급식 용접면은 다소 착용하기에는 불편하지만 흡 차단효율이 99.2%로 가장 높은 것으로 나타났다.

용접면과 마스크를 동시에 착용했을 경우 흡 차단효과는 79.0~87.5 %로 용접면 또는 마스크 중 한 가지를 착용할 때 보다 훨씬 흡 차단효과가 큰 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 용접작업자에 대하여 용접면과 마스크를 동시 착용하여야 함을 시사해 준다. 용접작업장에 국소배기장치 시설을 설치, 가동하여 흡 노출 감소효과를 분석한 결과 용접의 종류와 특성에 따라 31.5~73.1 %의 효과가 있는 것으로 나타났다.

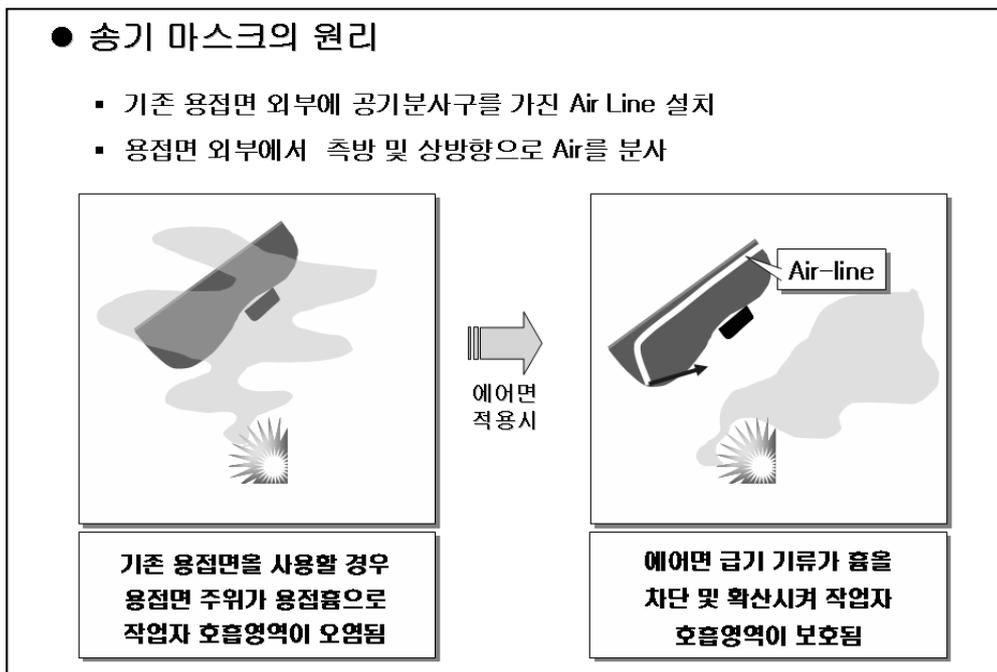
이상의 결과에서 볼 때 작업환경 측정을 용접면 내부에서 실시하고 환기 설비를 적정하게 갖춘다면 현재보다 작업환경 측정시 용접흡 농도를 크게 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

- ③ 김강윤(1999년) 등이 연구한 용접사업장 근로자 흡 및 금속노출 농도 평가와 혈중 금속 농도 연구를 살펴보면, 용접작업자 중 조선업종의 용접흡 초과율이 54.5%로 가장 높게 나타났다. 그리고 CO<sub>2</sub> 용접시 망간은 조사대상 사업장 평균 16.8% 정도 초과하고 조선업종의 경우 19.2%가 초과하는 것으로 조사되었다. 이 망간 초과율은 일반적인 조선업종의 망간 초과율 범위에 속하는 것으로 판단된다. 근로자중 혈중 망간이 1 $\mu$ g /100ml 이상은 자동차산업 72.9%, 금속관련 제조업 59.0%, 조선업 94.3%였으며, 2/100 이상은 각각 12.3%, 17.9%, 28.6% 였다. 혈중 납은 40 /100 이상이 자동차 산업에서만 0.8 %였다.

2) 용접흄 저감을 위한 실험적 연구

① 압축공기 분사용 용접 마스크

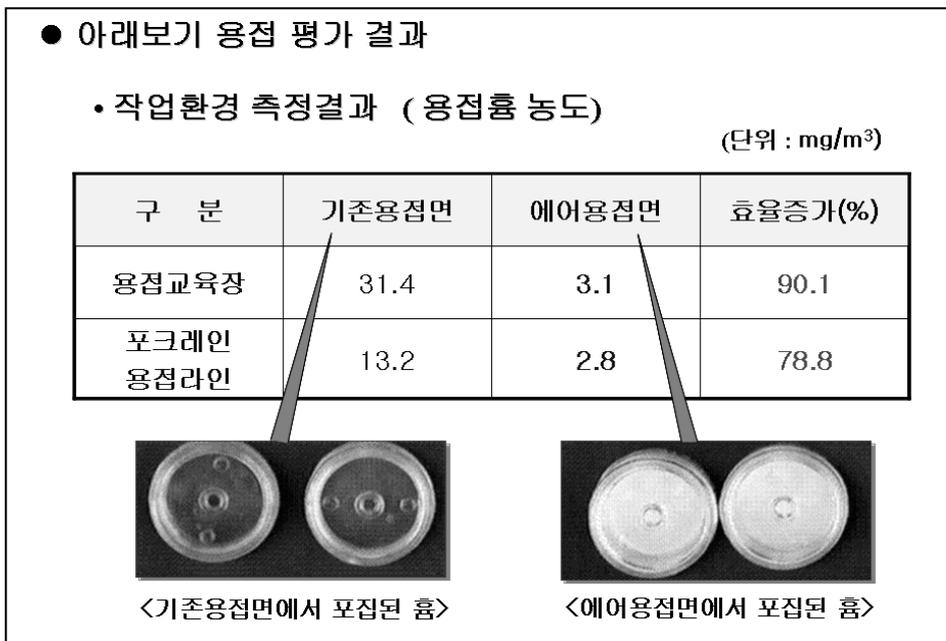
본 연구팀(하현철, 김태형 등, 1999)을 중심으로 압축공기 분출용 용접 마스크(송기마스크)에 대한 용접 흄의 노출농도 저감효과를 평가하였다. 이 용접 마스크의 원리는 용접점에서 발생된 고농도의 용접흄이 작업자 호흡영역으로 직접 이동하지 못하도록 에어를 이용하여 용접흄을 차단/확산하는 원리를 이용하였다. 현장 적용 결과 80% 이상의 높은 용접흄 저감 효과를 나타내었다. 하지만, 용접면의 착용특성상 잦은 탈착시 에어라인의 연결로 인해 작업에 불편을 제공하고, 또한 블록(Block)과 같은 협소한 밀폐공간에서는 작업에 방해되는 경우가 발생하여 조선소와 같은 밀폐공간에서의 현장 적용에 한계가 있는 것으로 판단되었다.



[그림 11] 송기마스크 흄 제거 원리



[그림 12] 송기마스크 현장 실험 모습

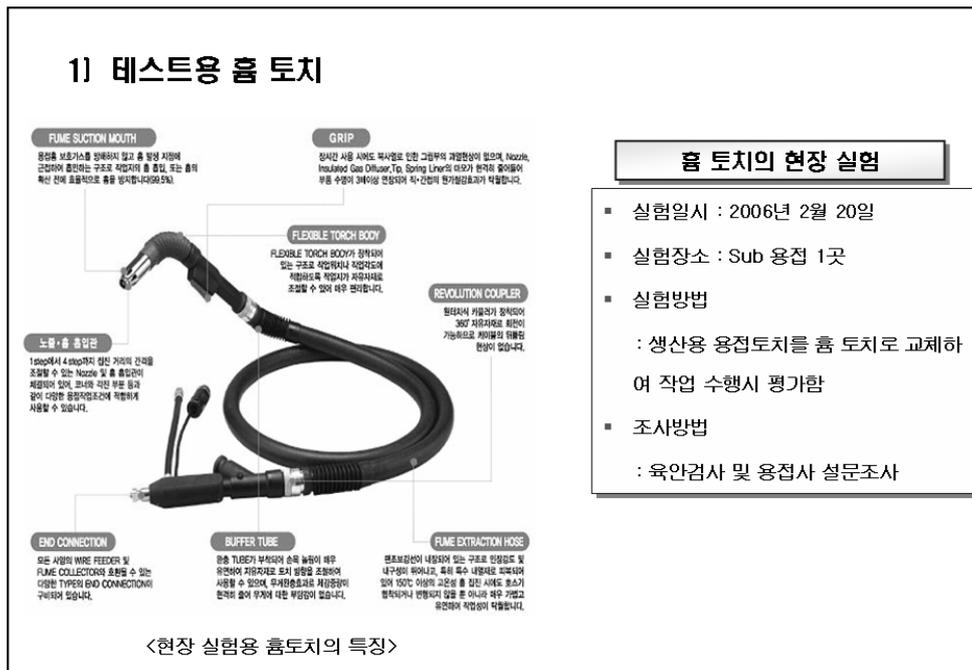


[그림 13] 송기마스크 효율

② 흡 토치의 현장 적용성 검토

본 연구팀(김태형, 하현철 등, 2006)을 중심으로 흡 토치에 대한 현장 적용 가능성을 평가하였다. 현장 평가는 선박의 엔진을 제작하는 모 공장의 생산현장에서 실시했으며, 평가 내용 및 결과는 다음과 같다. 본 테스트에 사용된 흡 토치는 국내 용접기 생산업체인 일홍용접에서 개발한 제품을 사용하였다.

흡 토치의 실험실적 연구에서는 95% 이상의 용접흡 배기효과가 있는 것으로 평가되었으나, 실제 생산공정에 적용한 경우 작업자의 용접 자세에 따라 용접 흡 배기효과가 불량한 경우가 발생하고 작업자의 불편(ex, 워빙의 어려움, 모서리 용접시 토치 간섭 등) 호소로 인해 현장 적용이 어려울 것으로 평가되었다.



[그림 14] 흡 토치 제원

## 2) 흠 토치 현장 테스트 결과

- CO<sub>2</sub> 가스의 분사로 인해 주위로 확산되는 흠을 효과적으로 배기시키기에는 흠 토치의 배기유량이 부족하여 만족스럽지 못한 결과를 얻음
- 용접 토치의 각도에 따라 효율의 큰 차이를 보이고 있었음



<흠 토치의 성능 평가 모습>



<흠 토치의 근접 촬영 모습>

[그림 15] 흠토치 사용 모습

## 3) 기타 도출된 문제점

- 용접 부위에 따라 토치 노즐의 굵기가 다양하게 요구되나, 흠 토치의 경우 배기관으로 인하여 노즐 굵기가 제한됨
- 용접 부위에 따라 토치를 모재에 밀착시켜 용접해야 할 경우 플렉시블 토치 바디 (flexible torch body)가 움직여 용접품질 저하 우려
- 과거(2004년) 실험한 흠 토치에 비해 무게가 가벼우나 일반 토치에 비해 약간의 무게감이 느껴짐
- 흠 토치의 현장 테스트 결과, 작업 특성을 고려해 앞선 기술적 보완이 요구되며 현 상태에서는 적용하기 어려울 것을 판단됨

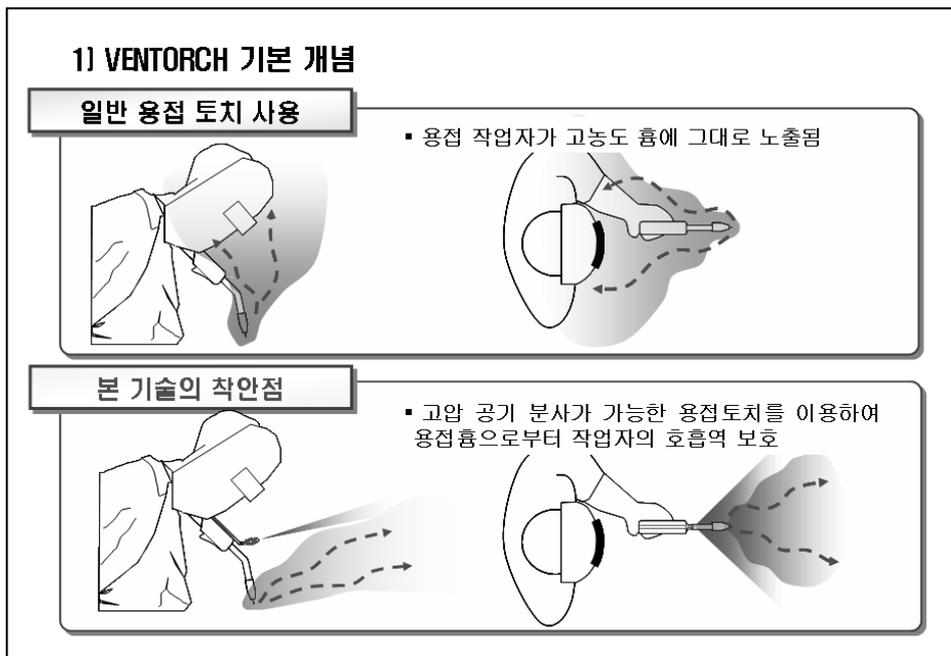


[그림 16] 흠토치 문제점

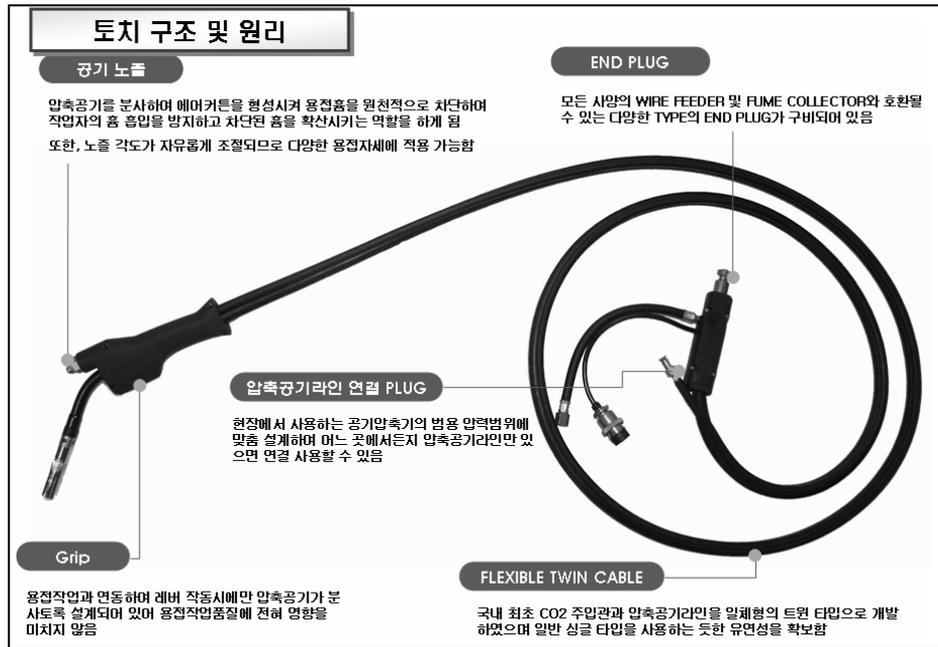
③ 흡차단용 토치의 현장 적용성 검토

본 연구팀(김태형, 하현철 등, 2006)은 용접흡의 효율적인 저감 대책 수립의 일환으로 흡차단용 용접토치(VENTORCH)를 개발하여 특허를 출원하였다. 개발된 흡 차단용 용접토치를 이용해 선박 엔진을 제작하는 업체에서 현장 적용 가능성을 검토하였다. 흡 차단용 용접토치의 원리는 용접기 끝부분에 바람이 나오는 노즐을 설치하여, 용접 점에서 발생된 흡이 작업자 호흡영역으로 이동하지 못하도록 확산/차단하는 원리를 이용한 것이다.

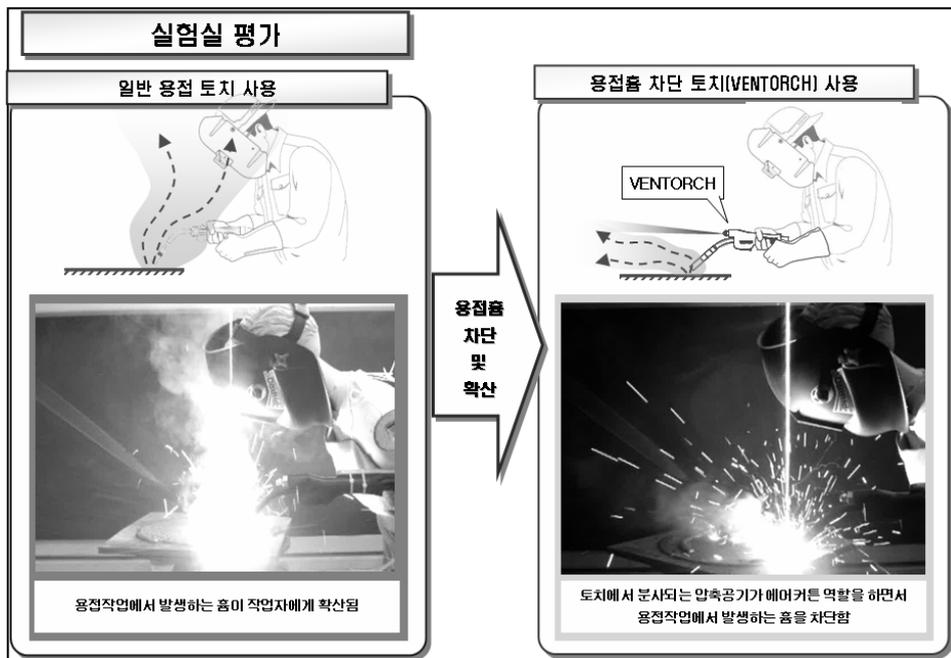
현장 적용성 검토 결과 실제 생산 공정에서 작업자의 호흡영역 농도가 65% 이상 저감효과가 있는 것으로 평가되었으며, 작업자 역시 만족감을 나타냈다. 따라서 조선소 선박 제조과정의 작업자 호흡영역에서의 용접 흡(망간) 저감 방안으로 검토할 가치가 충분한 것으로 평가되었다.



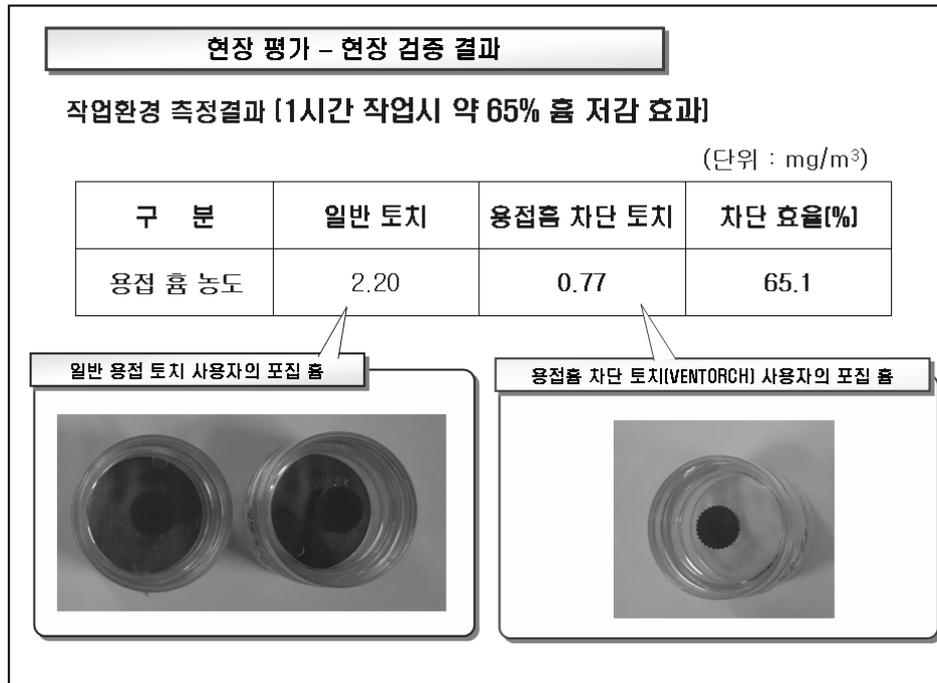
[그림 17] 용접흡 차단용 토치 원리



[그림 18] 용접흡 차단용 토치 제원



[그림 19] 용접흡 차단용 토치 실험 모습



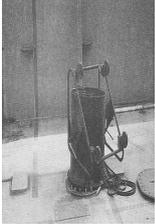
[그림 20] 용접흡 차단용 토치 효과

3) OO조선소 노동환경 평가 결과서

본 자료는 1998년도에 oo조선소 노동환경 평가의 일환으로 아주대학교 의과대학 산업의학교실에서 환기 방법에 따른 용접흡 저감 효율과 현장적용 가능성을 평가한 연구 보고서를 요약한 것이다.

해당 보고서 137~164 페이지에 걸쳐 서술된 내용을 간략하게 요약하여 <표 14>에 정리하였다.

〈표 14〉 환기 방법에 따른 용접흄 저감 효율 분석 결과

구분	환기 방법	흄 저감 효과			효과 분석
		팬 사용 전 (mg/m <sup>3</sup> )	팬 사용 후 (mg/m <sup>3</sup> )	저감율 (%)	
밀폐 공간에서 600mm 환기팬 사용	 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 600mm 환기팬을 이용하여 블록 내부의 공기를 배기시킴</li> </ul>	43.3	14.8	66	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 환기팬을 가동하면 농도를 1/3수준으로 감소시킴</li> <li>- 하지만, 여전히 노출기준의 3배를 초과하고 있어, 추가 대책이 필요함</li> </ul>
	 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 용접 작업이 이루어지는 블록에 급기</li> </ul>		11.8 (개인시료)		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 비닐 덕트를 이용하여 급기할 때, 용접을 실시하는 블록에 급기하는 경우가 인근 블록에 급기하는 경우보다 지역시료는 62% 정도 감소하지만,</li> <li>- 개인시료는 8% 정도밖에 저감되지 않았다.</li> <li>- 즉, 전체환기를 실시하여서 지역 농도를 저감하여도, 용접점에서 발생하는 고농도의 흄이 작업자 호흡영역을 통과하게 되면 용접흄 저감 효율이 크게 저하되는 것을 알 수 있음</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 용접 작업이 이루어지는 인접 블록에 급기</li> </ul>		3.7 (지역시료)		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 용접 작업이 이루어지는 인접 블록에 급기</li> </ul>		12.8 (개인시료)		
		9.7 (지역시료)			

〈표 14〉 환기 방법에 따른 용접흠 저감 효율 분석 결과-계속

구분	환기 방법	흠 저감 효과			효과 분석
		팬 사용 전 (mg/m <sup>3</sup> )	팬 사용 후 (mg/m <sup>3</sup> )	저감율 (%)	
200m m 소형 팬을 이용 한 환기 방안	 <p>- 50cm 거리에 팬을 두고 환기 전 후 흠 농도 비교</p>	3.6	1.2	67	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 소형팬을 이용하여 근접 환기시킬 때 흠 노출량을 가장 확실하게 줄일 수 있음</li> <li>- 팬 이동이 용이하도록 소형화가 필요함</li> </ul>
자바라를 이용 한 배기	 <p>- 자바라를 블록내에만 위치할 때</p>		62.4		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 자바라를 연결하여 블록내부 흠을 배기시키더라도 자바라 위치에 따른 효율이 크게 차이남</li> <li>- 용접점에 근접한 경우 60% 정도의 흠 저감 효과가 있었는데, 자바라 위치에 따라 저감 효율을 더 높일 수 있음</li> </ul>
	<p>- 자바라를 용접위치 1.5m 이내에 위치시킬 때</p>		26.0		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 블록 내부의 용접흠 농도를 저감하기 위해서는 확산되기 전에, 그리고 용접점에서 발생된 고농도의 용접흠이 작업자 호흡영역으로 이동하기 전에 배기시켜야 함</li> </ul>

〈표 14〉 환기 방법에 따른 용접흡 저감 효율 분석 결과-계속

구분	환기 방법	흡 저감 효과			효과 분석
		팬 사용 전 (mg/m <sup>3</sup> )	팬 사용 후 (mg/m <sup>3</sup> )	저감율 (%)	
흡토치 사용에 따른 효과 분석	- 흡토치의 사용에 따른 용접흡 저감 효과를 분석함	4.7	5.0	-6	- 실제 현장에서 흡토치의 효과는 미미함 - 특히, 흡토치 사용시 작업의 불편함, 용접결함, 가격 등의 문제로 인해 현장 적용이 어려울 것으로 판단됨
용접면 내외부 흡농도 평가	- 용접면에 의한 용접흡 차단 효과를 분석하기 위해 용접면 내외부 용접흡 농도를 측정함	38.5 (용접면 외부)	10.7 (용접면 내부)	72	- 용접면으로 인한 용접흡 차단효과는 용접면의 종류, 작업자세, 용접장소의 밀폐도와 환기 상태 등 다양한 인자에 의해 영향을 받기 때문에 용접면의 흡 차단 효과를 일반화하기는 어려움 - 하지만, 용접점에서 발생한 고농도의 용접흡이 직접 호흡영역으로 이동하지 못하도록 하는 것만으로도 용접흡 저감효과가 충분히 있다는 것을 알 수 있음

- 다음은 본 연구를 수행한 연구자가 조선소 용접흡 저감방안에 대한 종합적인 의견을 제시한 것이다. 연구보고서 160-163페이지에 서술된 내용을 인용하여 정리했다.

현재 용접흡과 관련해서 가장 심각한 수준으로 노출이 일어나기 때문에 **집중적인 관리가 필요한 부분은 환기가 불량한 제한공간이나 밀폐공간에서의 용접작업이다.** 따라서 최우선 과제는 이 부분을 개선하는 것에 집중하여야 할 것으로 생각된다. 현재 환기가 불량한 공간에서의 용접과 관련해서 실시하고 있는 방안은 주로 대형 환기팬이나 중형팬을 이용하여 공기를 불어넣어주는 것이 가장 널리 사용되고 있으며 일부 블록에서는 급기와 배기를 동시에 실시하는 경우가 있다. 이와 같은 환기방식은 개방된 공간에서는 큰 효과는 없지만 밀폐도가 높은 곳에서는 공기 중 용접흡 농도를 1/3수준으로 낮추는 효과를 나타낸다. 그러나 문제는 블록내부와 같은 밀폐된 공간내에서 용접작업이 이루어질 경우 환기가 이루어지지 않으면 그 농도가 노출기준의 7-8배 수준으로 높아지는 것은 흔한 일이며 **환기장치가 가동되더라도 상당히 높은 수준의 농도가 유지되며 특히 개인적인 노출은 그보다 더 높은 수준을 나타내는 경우가 빈번히 발생한다.**

따라서 밀폐된 공간에서의 전체적인 환기는 반드시 필요하지만 그것으로 안전한 수준을 유지하기는 매우 어렵기 때문에 반드시 국소적인 대책이 필요하게 된다.

눈으로 보기에 깨끗한 상태가 유지되더라도 실제 자신이 노출되는 수준은 얼마든지 높아질 수 있는 것이 용접흡 노출의 특징이다.

국소적인 대책으로 가장 좋은 방법은 용접부위에 배기덕트가 설치되어서 용접흡이 발생부위에서 널리 확산되기 전에 밖으로 배출하는 것이다. 이를 위한 첫 번째 방법은 이미 설치되어 있는 시설의 활용도를 높이는 것으로서 배기 시설이 설치되어 있는 공장의 경우에는 현재 무용지물로 전락한 딱딱한 재질의 자바라를 유연성 있는 종류로 교체하여 사용빈도를 높이도록 하여야 한다. 또한 용접흡의 흐름을 바꾸어 각 개인의 호흡영역의 오염수준을 낮춤으로써 직접적인 노출을 줄이기 위해서는 이번 조사결과에서도 나타난 것처럼 소형팬을 잘 활용하는 것이 필요한데 이런 용도로는 현재의 200mm 소형팬 보다도 더 작은 팬을 사용해도 가능하다. 또한 이런 용도로는 굳이 집진장치도 필요 없으

므로 가볍고 휴대성이 용이한 팬을 활용하는 것이 가장 효과적일 것으로 판단된다. 그리고 현재의 200mm 소형팬은 자바라를 연결하여 블록내의 용접부위 주변에 설치함으로써 발생하는 용접흡을 빠른 시간 안에 배출하도록 활용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 현재 주로 사용하고 있는 300mm 환기팬을 이용한 송기방식은 전체적인 환기를 다소 돕고는 있으나 강력한 소음만 발생하고 그 효과는 미비한 것으로 나타나고 있다. 따라서 가능하면 200mm 소형팬을 이용한 국소배기 방식으로 바꾸고 300mm 환기팬을 일부 필요한 경우에 외부의 공기를 불러 넣어주는 용도로 사용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

밀폐된 공간으로 공기만 세계 불러 넣어주고 배기시킨다고 해서 용접흡 배출이 쉽게 이루어지는 것이 아니라는 사실은 이번 조사결과에서도 입증되었다. 배기력은 약하더라도 자바라의 위치선정과 용접흡이 발생하는 부위에 얼마나 가깝게 설치되는가에 따라 실제 노출수준은 크게 달라진다.

따라서 용접흡을 제대로 배출하기 위해서는 반드시 자바라를 연결한 소형팬을 설치하고 자바라의 흡기구 부분의 위치를 작업부위 근처에 올바르게 유지하도록 하는 것이 필요하다. 또한 이에 필요한 개인적인 노력을 생산의 한 과정으로 이해하고 반드시 실행하는 것만이 가장 좋은 대처방안이다.

또한 앞에서 기술한 것과 같이 개인적인 조치방안과 특별로 배기장치를 어떻게 설치하는 것이 바람직한가에 대한 매뉴얼을 작성하여 교육하는 프로그램을 실시하는 것도 매우 중요한 방법이다.

또 다른 방안으로는 용접흡 발생이 근본적으로 적은 용접와이어를 사용하는 것인데 현재 사용하고 있는 저흡발생 용접와이어 DW100은 그 효과가 충분치 않은 것으로 나타났다. 물론 이것은 저흡발생 용접와이어를 주로 밀폐 공간 작업 시 사용하고 있기 때문이지만 그 경우 농도가 노출기준을 크게 초과하고 있기 때문에 효과가 없는 것으로 나타나고 있다. 보다 더 근본적으로 흡발생량을 줄인 용접와이어들이 개발 중에 있기 때문에 이에 대한 활용도 한가지 방안이 될 것이다.

이상의 결과에서 알 수 있듯이, 조선소의 용접흡과 망간 노출 농도를 줄이기 위해서는 용접점에서 발생된 고농도의 용접흡이 작업자 호흡영역으로 이동하지 못하도록 적절한 배기 시스템을 갖추거나, 소형 송풍기 등을 이용하여 확산시키는 방법이 최고 효율적이다. 특히, 밀폐 공간의 경우 국

소배기와 전체환기를 병행하는 것이 반드시 필요한 것으로 나타났다.

#### 4) 국외 용접흡 및 망간 저감 사례

국외에서는 조선소 용접에 대해 특별하게 저감 대책을 수립한 사례를 없었다. 망간 저감 대책으로는 건설현장의 용접에 망간 및 용접흡 저감을 위해 특별히 고안된 환기 시스템을 적용한 사례가 있었고, 수리 조선소에서 용접흡에 대한 환기 방안으로 하우스 팬을 사용하여 급배기 시키는 것이 효과적이라는 결과를 제시한 사례 정도만 있을 뿐 이었다.

특히, 국외 조선소를 벤치마킹한 조선업종의 관계자들의 의견을 정리해보면, 일본이나 유럽 조선소에서도 국내 조선에서 적용하지 않는 특별한 환기 장치를 적용한 사례를 없고, 다만 블록 내부에 용접 작업자가 국내 조선소보다 적고, 개인당 용접량이 적기 때문에 흡 발생량과 블록내 흡 농도가 국내보다 낮다는 것이다.

즉, 호황인 국내 조선업종은 좁은 공간에 많은 수의 용접작업자가 투입되어 용접을 실시하기 때문에 흡 발생량이 많아서 용접흡 농도가 매우 높게 측정되지만, 일본이나 유럽의 경우 물량이 적기 때문에 용접량이 많지 않아서 흡 농도 자체가 낮아서 특별한 대책을 수립하지 않아도, 작업자 노출농도가 크게 초과하지 않기 때문에 환기 등에 대한 관심이 크지 않다.

#### ① 건축 용접에서 발생하는 망간과 용접흡 저감 방안

출처 : Manganese and Welding Fume Exposure and Control in Construction; John D. Meeker; Pam Susi ; Michael R. Flynn  
Journal of Occupational and Environmental Hygiene, Volume 4, Issue 12 October 2007 , pages 943 - 951

고압 저유량의 용접흡 배기용 집진기를 개발하여 건설 현장에 적용하여 용접흡 60%, 망간 75%를 감소시킨 연구 결과를 정리하였다. [그림 21]은 현장에 적용된 용접흡 배기용 집진기 및 현장 사용 모습이다.

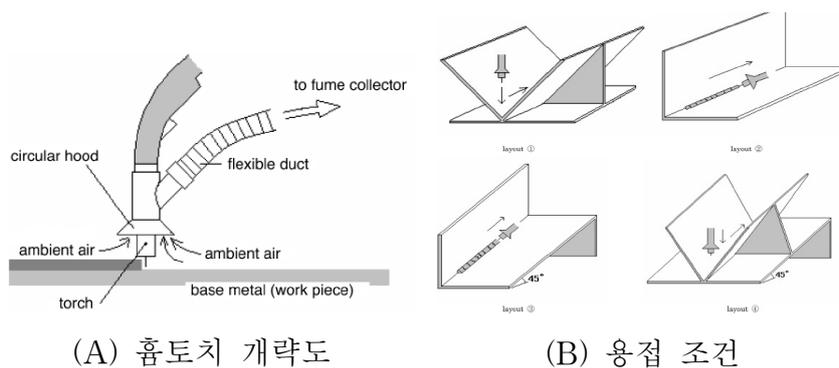


[그림 21] 용접흡 배기용 집진기 및 현장 사용 모습

② CO<sub>2</sub>용접에서 흡토치 성능 평가

출처 : Performance of a Fume-exhaust Gun System in CO<sub>2</sub> Arc welding  
 Jun OJIMA ; J Occup Health 2006; 48:207-209

[그림 22]와 같은 흡토치를 각 용접 조건에 적용하여 용접흡 저감 효율을 평가한 연구 결과이다. <표 15>를 살펴보면, 평판모재에서 흡 토치를 사용시 용접흡 농도가 85% 정도 감소되는 것으로 조사되었다. 하지만, 이와 비슷한 흡 토치를 국내에서 현장 실험한 결과 실험실에서는 효과가 있었지만, 현장에서는 큰 효과를 거두지 못하였고, 여러 가지 이유로 인해 현장 적용이 어려운 것으로 판단되었다.



(A) 흡토치 개략도

(B) 용접 조건

[그림 22] 용접 연구에 사용된 흡토치 및 용접 조건

〈표 15〉 각 용접 조건별 흠 농도

Work piece layout	Welding position	Weld line	Fume exhaustion	Fume Conc.[mg/m <sup>3</sup> ]**
①	flat	0°	ON	78.6 ± 16.6
①	flat	0°	ON	10.8 ± 2.8
②	horizontal fillet	0°	ON	20.1 ± 5.2
③	horizontal fillet, down hill	45°	ON	29.1 ± 4.1
④	fiat, down hill	45°	ON	28.8 ± 8.5

\*; shield gas flow rate=20 l/min \*\*; Values are the mean ± S.D(n=10)

5) 미국 조선업 산업안전보건 기준

한국산업안전공단에서 번역한 미국 조선업 산업안전보건 기준 중에서 용접 작업시 배기대책에 대한 내용을 정리하였다. 미국에서도 특별한 환기 방법을 제시하지는 않고 밀폐공간에 대한 용접 작업시 전체환기와 국소배기를 적절하게 병행해야 한다고 제시하고 있다.

조항 : 1915.51

제목 : 용접, 절단, 가열작업 시 배기 및 방호대책

Subpart 번호 : D

Subpart 제목 : 용접, 절단, 가열

(a) 이 장의 조항들은 선박수리, 선박건조, 선박해체 작업 모두에 적용이 된다. 단, 이 장의 (e) 조항은 선박수리 및 선박건조작업에만 적용이 되고 (g) 조항은 선박수리작업에만 적용한다.

(b) 기계적 환기 요구조건

(b)(1) 이 장에서 기계적 환기는 다음의 요구조건에 만족해야 한다.

(b)(1)(i) 기계적 환기설비는 전체환기시스템 또는 국소배기시스템 중 한가지로 이루어져야 한다.

(b)(1)(ii) 기계적 전체환기는 용접흡 및 발생한 연기가 안전한계 이내를 유지하기에 필요한 공기순환을 실시할 수 있도록 충분한 용량으로 배치해야 한다.

(b)(1)(iii) 국소배기설비는 용접기나 가열기의 옆에 비치하는 용도로 작업대상물에 최대한 근접하여 자유로운 이동이 가능한 후드로 구성되어야 한다. 이 시스템은 용량이 충분하여 흡이나 연기를 발생원에서 제거하고 호흡지역에서 이러한 흡이나 연기의 농도를 안전한계치 이내로 유지하기에 충분한 용량으로 배치해야 한다.

(b)(1)(iv) 작업공간에서 배출되는 오염된 공기는 개방된 대기중에 방출되게 해야 한다. 만일 그렇지 않은 경우에는 유입되는 공기의 공급원이 깨끗한 것 이어야 한다.

(b)(1)(v) 교체되는 모든 공기는 깨끗하고 호흡이 가능한 것이어야 한다.

(b)(1)(vi) 산소를 환기를 목적으로, 더위를 식히기 위해, 옷에 묻어있는 먼지나 오염물을 제거하기 위해 또는 작업장내부를 청소하기 위한 용도로 사용하여서는 안된다.

(c) 제한공간내의 용접, 절단, 가열작업

(c)(1) 이장의 (c)(3) 및 (d)(2) 규정을 이외의 (b)규정에 만족하는 전체환기 설비는 제한공간에서 용접, 절단, 가열작업을 수행하는 곳이면 모두 설치되어야 한다.

(c)(2) 제한공간으로의 접근로가 제공되어야 하고 이러한 공간에 대한 환기 덕트가 1915.76(b)(1) 및 (2) 규정에 의해 배치되어야 한다.

(c)(3) 접근로를 차단하지 않고서는 충분한 환기효과를 얻을 수 없는 경우 제한공간내의 근로자에 대해서는 1915.152(a) 규정을 만족하도록 공기공급식 호흡장구를 착용하여 방호조치를 실시해야 하며 이러한 제한공간의 외부에서 작업을 실시하는 자에 대해서는 내부에서 작업을 실시하는 근로자와 항상 연락체계를 유지하여 응급상황 시 지원을 유지하도록 해야 한다.

(d) 독성을 지닌 금속의 용접, 절단, 가열작업

(d)(1) 아래에 나열한 특정금속에 대하여 선박의 밀폐공간에서 용접, 절단, 가열작업을 수행하는 경우에는 이 장의 (a) 규정에 만족하도록 전체환기 또는 국소배기설비를 설치해야 한다.

(d)(1)(i) 아연이 함유된 베이스 또는 충전금속, 아연함유 물질로 도금된 금속

(d)(1)(ii) 납이 주성분인 금속

(d)(1)(iii) 카드뮴을 함유한 충전금속

(d)(1)(iv) 카드뮴을 함유하고 있는 금속 또는 카드뮴 함유물질로 도금된 금속

(d)(2) 아래에 나열한 특정금속에 대하여 선박의 밀폐공간에서 용접, 절단, 가열작업을 수행하는 경우에는 이 장의 (b) 규정에 만족하도록 국소배기설비를 설치하거나 이러한 공간내의 근로자는 1915.152(a) 규정을 만족하도록 공기공급식 호흡장구를 착용해야 한다.

(d)(2)(i) 불순물로 함유된 것이 아닌 납을 함유하고 있는 금속 또는 납 함유물질로 도금된 금속

(d)(2)(ii) 카드뮴을 함유하고 있거나 카드뮴 도금된 베이스금속

(d)(2)(iii) 수은을 함유하고 있거나 수은 도금된 베이스금속

(d)(2)(iv) 베릴륨을 함유하고 있는 베이스 또는 충전금속, 베릴륨은 독성이 매우 높기 때문에 이와 관련한 작업에 대해서는 국소배기설비와 공기공급식 호흡장구에 의한 방호를 모두 실시해야 한다.

(d)(3) 개방공간에서 위와 관련한 작업을 수행하는 근로자에게는 1915.152의 (a) 및 (d)(2)(iv) 규정에 만족하도록 필터형 호흡장비로 방호조치를 실시해야 한다. 단, 베릴륨을 함유한 금속과 관련하여 이러한 작업을 수행하는 근로자에 대해서는 1915.152(a) 규정에 만족하도록 공기공급식 호흡장비로 방호조치를 실시해야 한다.

(d)(4) 용접기와 가열기를 사용하여 작업을 실시하는 근로자와 동일한 대기조건에 노출되는 근로자에 대해서는 이들 근로자와 동일한 방호조치를 실시해야 한다.

(e) 불활성 가스 금속 아아크 용접

(e)(1) 불활성 가스 금속 아아크 용접작업을 수행하는 경우에는 발생하는 자외선이 피복 금속 아아크 용접 작업시 발생하는 자외선보다 5~30 배의 강도로 발산이 되고, 자외선에 의한 염화 유기용제의 분해, 독성 흡 및 가스의 유리화 등이 발생하기 때문에, 다음의 예방조치를 실시하기 이전에는 근로자에게 작업을 수행시키거나 작업공정에 노출되게 하여서는 안 된다.

(e)(1)(i) 염화 유기용제를 사용하는 경우 노출된 아아크로부터 최소한 200 feet 이상 이격시켜야 한다. 또한, 이러한 표면에 대해 용접작업을 실시하기 이전 염화 유기용제가 완전히 건조 되어 있어야 한다.

(e)(1)(ii) 1915.56(e) 규정된 것처럼 방호막으로 방호되지 않는 지역의 근로자 및 작업보조자에 대해서는 1915.151(a) 및 (c) 규정에 만족하도록 필터

렌즈를 착용하여 방호조치를 실시해야 한다. 두 명 이상의 용접사가 작업을 실시함으로써 서로의 아아크에 노출되는 경우에는 헬멧을 들어 올리거나 면을 제거하였을 때 섬광이나 방사선 에너지로부터 용접사를 방호하기 위해 용접헬멧 또는 손보호 쉴드 아래에 1915.(a) 및 (c)의 규정을 만족하는 적절한 타입의 필터렌즈 보안경을 착용해야 한다.

(e)(1)(iii) 방사광선에 노출되는 용접사 및 근로자에 대해서는 자외선에 의한 화상 및 기타 피해로부터 보호하도록 피부를 완전히 차폐하기 위한 적절한 방호조치를 실시해야 한다. 용접 헬멧과 손 방호쉴드는 반사율이 높은 표면이 없고, 누설 및 개방이 없어야 한다.

(e)(1)(iv) 스테인레스강에 대해 불활성 금속 아아크 용접을 실시하는 경우 이산화질소의 위험농도로부터 방호하기 위해 이장의 (d)(2) 규정에 만족하도록 조치를 취해야 한다.

(f) 일반용접, 절단, 가열

(f)(1) 이장의 (c), (d) 또는 (e) 규정에 열거된 조건이나 물질과 관련되지 않은 용접, 절단, 가열작업에 대해서는 기계적 환기설비 또는 호흡용 방호장구를 착용하지 않고서도 보통작업을 수행할 수 있다. 그러나, 비정상적인 물리조건이나 대기조건, 안전하지 못한 오염물질의 축적 등이 존재하는 곳에 대해서는 적절한 기계적 환기 설비 또는 호흡방호장비를 제공해야 한다.

(f)(2) 어떤 형태로든 용접, 절단, 가열작업을 수행하는 근로자에 대해서는 1915.151(a) 및 (c)의 요구조건에 적합한 적절한 눈 보호구에 의해 방호조치를 실시해야 한다.

(g) 금속광석의 화물 및 잔류물

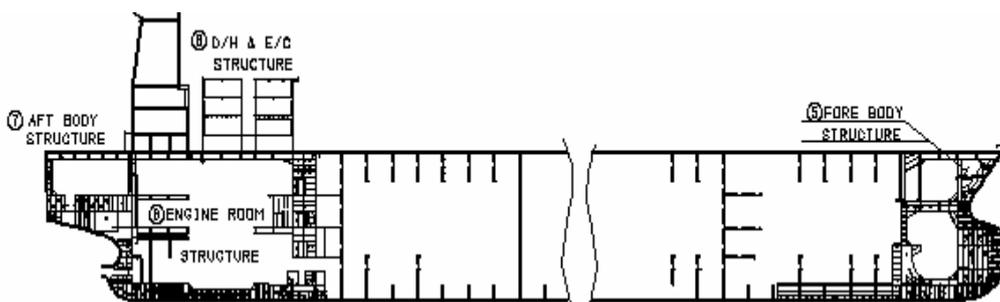
(g)(1) 독성이 현저한 금속광석의 화물 및 잔류물질은 용접, 절단, 가열과 관련한 선박수리작업을 실시하기 전 보관지역에서 제거하거나 발생하는 열로부터 방호조치를 실시해야 한다.

### 3. 용접흡 및 망간농도 저감 방안수립

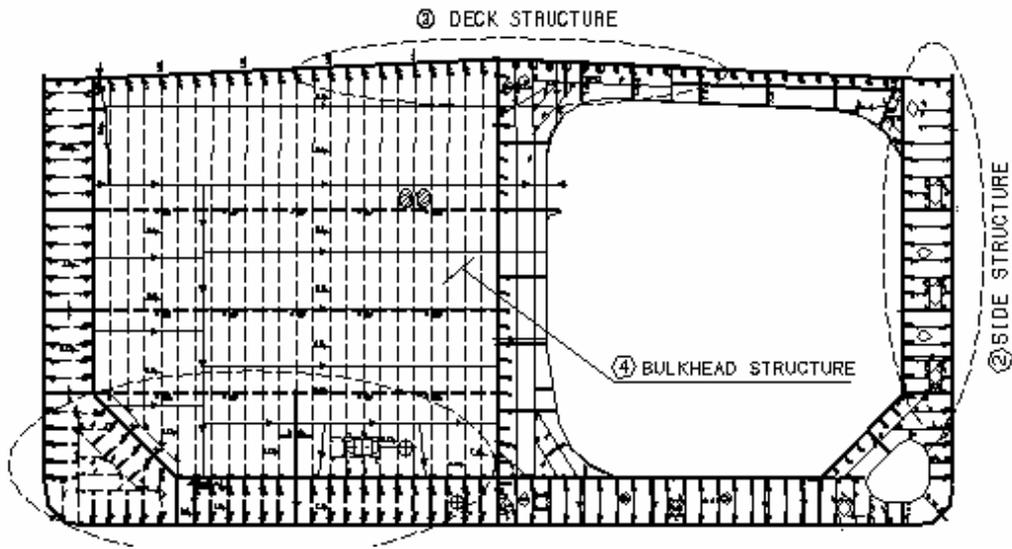
#### (1) 제한공간 및 밀폐공간 환기 방안 수립을 위한 현장 실험

##### 1) 조선소 환기 실태

조선소에 있어 용접흡 및 망간에 가장 고농도로 노출될 수 있는 작업군은 3면이 막혀있는 제한공간과 4면이 막힌 상태에서 작업자가 출입할 수 있는 man-hole만 뚫려 있는 밀폐공간의 용접 작업이다. 이들은 대부분 탑재 공정에 소속되어 있는데, [그림 23]은 LNG 선의 완성된 모습이고 [그림 24]는 완성된 배의 단면을 나타낸 것이다. 탑재공정에서 블록을 조립하기 위해서는 [그림 24]과 같은 단면 부분을 용접으로 이어 붙이게 되는데, 이와 같이 이어 붙이는 공정이 대부분 제한 또는 밀폐 공정에 해당한다. 제한공간에 작업을 할 경우 작업자가 송풍기를 들고 이동하는 것이 원활하지가 않아 배 외부에서 팬을 이용해서 급배기를 실시하는 경우가 많다.

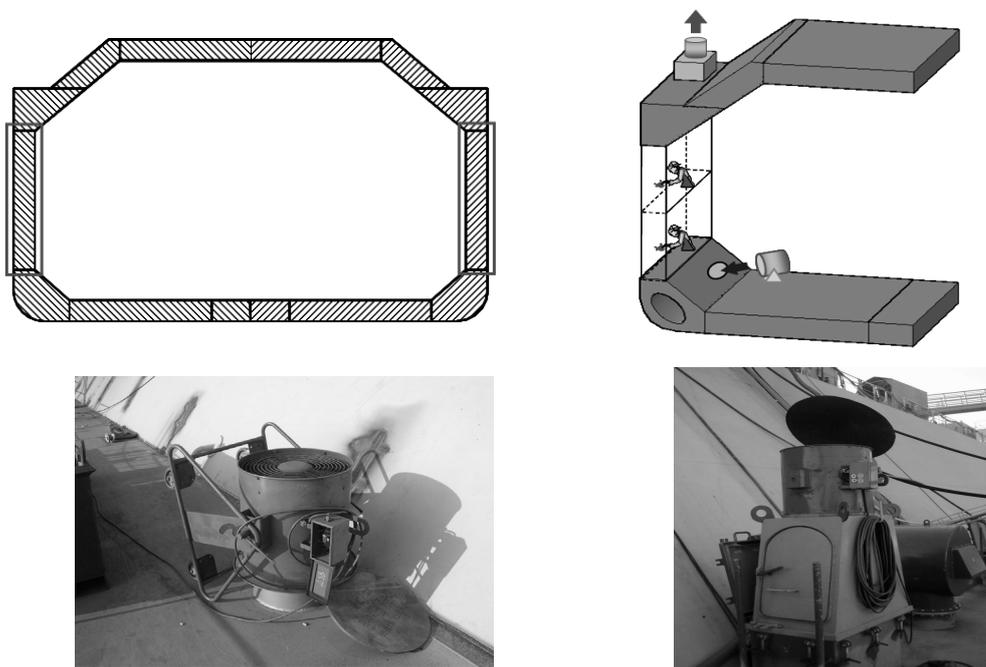


[그림 23] 완성된 배 모습

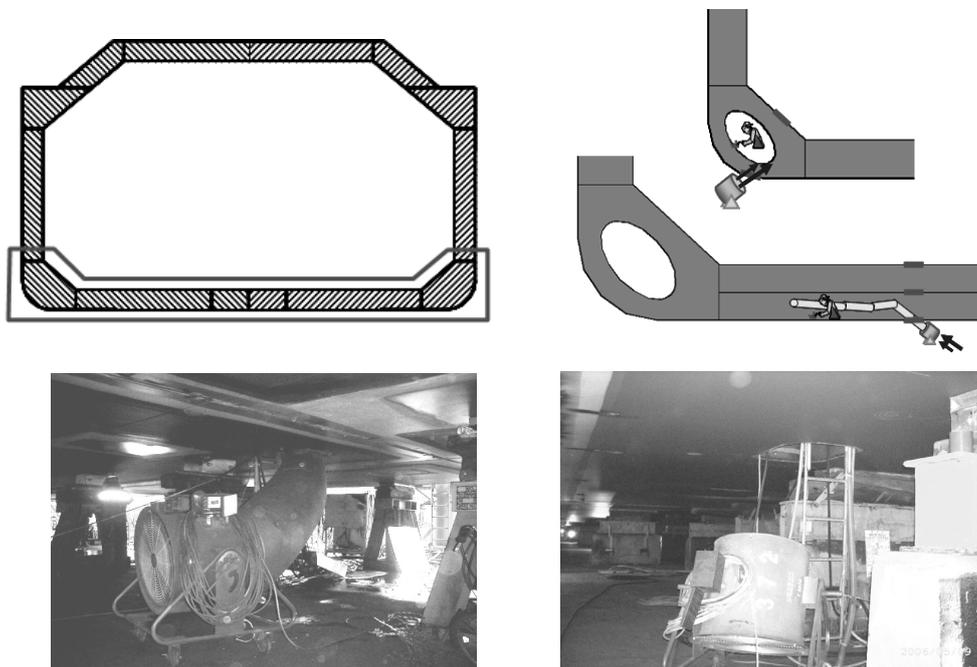


[그림 24] 탐재시 용접이 필요한 배 단면 모습

일반적으로 조선소에서 환기가 가장 열악하다 알려진 Side shell 부분과 Double bottom & Water balance 부분의 환기는 [그림 25]와 [그림 26]과 같이 배 외부에서 대형 팬을 이용하여 하부에서는 급기를 시키고 상부에서는 배기를 시키는 것이 일반적이다. 이와 같이 전체환기를 실시할 경우 블록 내부의 용접흡 농도는 감소를 하지만, 작업자 노출 용접흡량은 크게 줄일 수 없는 문제점이 있다. [그림 27]은 용접 작업시 용접흡의 분포를 사진과 그림으로 정리한 것인데, 용접시 가장 높은 용접흡에 노출되는 경로는 [그림 27]과 같이 용접점에서 고농도로 상승하는 용접흡이 작업자 호흡영역으로 이동하는 경우이다. 이러한 경우에는 순간적으로 고농도의 용접흡에 노출되어, 일평균 노출량 증가에 크게 기여하게 된다.



[그림 25] Side shell 환기 방안



[그림 26] Double bottom & Water balance 부분의 환기방안



- 용접면 하단 및 가슴을 타고 흡이 상승하여 용접면내 호흡역으로 유입
- 밀폐 공간의 높은 지역 농도



[그림 27] 용접흡의 노출 경로

[그림 27]과 같이 용접 흡이 작업자 호흡영역으로 상승하는 경우는 밀폐 공간 내부에서 주변 기류 흐름이 거의 없는 경우에 특히 잘 발생된다. 조선소의 경우 제한공간이나 밀폐공간 내부의 기류 속도는 0.2m/s이하가 대부분이기 때문에 이러한 형태의 용접흡 확산이 자주 발생한다. 이 때문에 용접 부위에서 상승한 고농도의 흡에 직접 노출되고, 환기량의 절대적 부족으로 발생된 흡이 장기간 정체하기 때문에 제한공간과 밀폐공간의 용접흡(망간) 농도가 타 공정보다 훨씬 높게 측정되는 것으로 판단된다.

이와 같은 현상으로 볼 때 조선소 용접흡 저감을 위한 작업환경 개선방안 수립은 제한공간과 밀폐 공간을 주 대상으로 선정하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 따라서, 향후 용접흡(망간) 저감을 위한 모든 연구대상은 제한공간과 밀폐공간에 주안점을 두고 연구를 진행하였다.

## 2) 현장 실험 방법

제한공간과 밀폐 공간에 적용 가능한 환기 방안을 수립하여, 현장 적용시 블록 내부 기류 흐름 및 용접흡 농도를 분석하였다. 현장 실험을 통해 용접흡 저감 효율이 우수한 방법을 선정하였다.

① 열선풍속계를 이용한 팬 유량 측정

조선소에는 흠 환기를 위해 이동식 소형팬과 대형팬 등 각종 팬이 사용되고 있다. 현장 조사시 컴퓨터 시뮬레이션 입력 자료 확보 및 실제 팬 용량 등을 알아보기 위해 열선풍속계(TSI-8130, USA)를 이용하여 유량을 실측하였다. [그림 28]는 유량 측정에 사용된 열선풍속계와 유속 측정 모습을 나타낸 것이다.



<열선풍속계 TSI-8130>



<송풍기 풍속 측정 모습>

[그림 28] 열선풍속계를 이용한 팬 유속 측정 모습

② 연기발생기를 이용한 기류 측정

각종 팬 사용에 따른 환기 효율을 가시적으로 평가하기 위해 연기발생기를 이용하였다. 연기의 이동방향과 소멸속도로써 환기효율을 평가하였다. [그림 29]는 연기발생기와 실제 연기발생기를 이용한 환기율 평가 모습이다.



<연기발생기 모습>



<기류 평가 모습>

[그림 29] 연기발생기 및 기류평가 모습

③ 직독식 분진농도 측정기를 이용한 효율 평가

환기조건 변화에 따른 흡 농도의 실시간 변화를 평가하기 위해 직독식 분진농도 측정기를 이용하였다. 현장에서 사용되는 각종 환기조건에 따라 작업자 주변 및 밀폐공간 내부 흡 농도를 실시간으로 측정하여 최적의 환기방안 수립을 위한 기초 자료로 활용하였다. [그림30]은 직독식 분진농도 측정기와 실제 현장의 측정 모습이다.



<직독식 분진 농도 측정계>



<분진 농도 측정 모습>

[그림 30] 직독식 분진 농도 측정기 및 측정 모습

④ 개인시료 포집기를 이용한 흡 농도 측정

직독식 분진 농도 측정기의 측정결과에 대한 검증과 보완을 목적으로 개인시료 포집기를 이용하여 분진 농도를 측정하였다. 공기중 용접흡 시료는 공경이 작은 MCE(mixed cellulose ester) 여과지(직경: 37mm, 공경: 0.8  $\mu\text{m}$ )를 37mm 카세트에 넣고 개인포집기(personal air sampler, Gillian 사)에 연결한 후 작업자의 호흡영역에 착용하게 하여 분당 1~2 $\ell$ 의 유량으로 채취하였다. 용접흡 채취에 사용되는 MCE여과지는 공경이 0.8  $\mu\text{m}$ 이지만 여과지의 공경 보다 적은 흡입자(0.01~1.2  $\mu\text{m}$ )도 여과지와 입자사이에 작용하는 정전기에 의하여 포집할 수 있다. 망간

분석을 위한 용접흡 시료의 전처리는 포집된 여과지를 50 ml 비이커에 옮기고, 인산 3 ml, 황산 2 ml와 질산 0.5 ml를 가한 후 5분 동안 가열판 위에서 끓는 점 까지 가열하여 여과지와 포집된 용접흡을 회화하였다. 이 용액을 다시 냉각시킨 후에 25 ml용량 플라스크에 옮겨서 비저항 18 M $\Omega$ 의 증류수로 최종 용량을 25 ml로 하여 분석하였다.



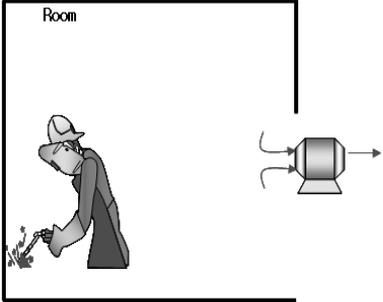
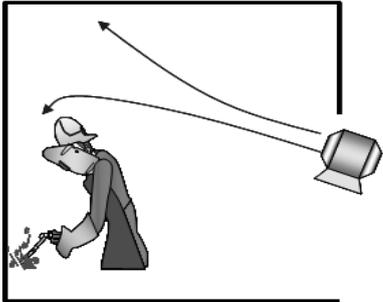
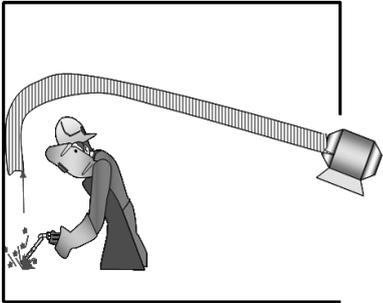
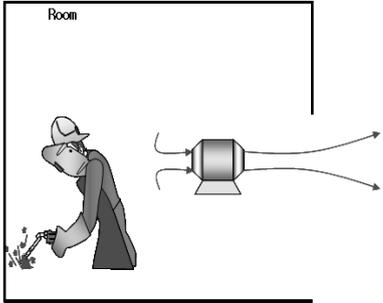
[그림 31] 흠 샘플링 모습

### 3) 제한공간의 환기 방안

제한 공간은 3면이 막혀있지만 작업자가 걸어서 출입할 수 있을 정도의 큰 개구면을 가진 공간으로 정의하였다. 제한공간의 경우 작업자가 쉽게 출입이 가능하여 팬을 들고 다니기도 어렵지 않다. 제한공간에 대한 효율적인 환기방안을 평가하기 위해 각 환기방안별 기류 및 흠 농도를 측정하였다.

#### ① 제한 공간에 적용 가능한 환기 방안

[그림 32]는 제한공간에 적용 가능한 환기방안의 개략도는 정리한 것이다. 일반적으로 적용 가능한 4가지 경우가 있고, 현장의 작업자들은 Case 1과 Case 4의 경우와 같은 배기 방안을 주로 선호하는 것으로 나타났다. 제한공간에 사용하는 팬은 작업자들이 들고 다닐 수 있는 직경  $\Phi$  200mm, 배기유량 20m<sup>3</sup>/min의 용량이었다.

Case 1 배기 방안	Case 2 급기 방안
	
<p>○ Room 입구에서 Ø200 소형팬으로 배기시킬 경우</p>	<p>○ Room 입구에서 소형팬으로 급기시킬 경우</p>
Case 3 덕트를 이용한 배기 방안	Case 4 공간 내부에서 배기 방안
	
<p>○ 소형팬에 자바라를 연결하여 작업자 주변에서 국소배기 시킬 경우</p>	<p>○ Room 내부에 축류팬을 설치해 배기시킬 경우</p>

[그림 32] 제한공간에 적용 가능한 환기 방안의 개략도

② 기류 흐름 평가 결과

제한 공간의 환기 방안별 효율을 평가하기 위해 연기를 발생 시킨 후 기류를 촬영하였고 그 결과는 다음과 같다.

㉠ 기류 촬영 결과

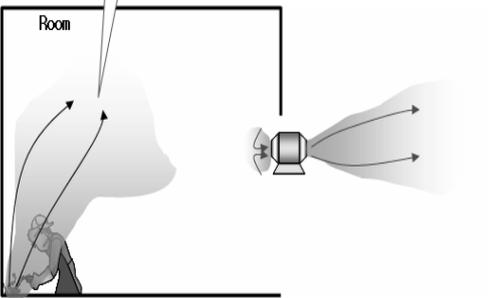
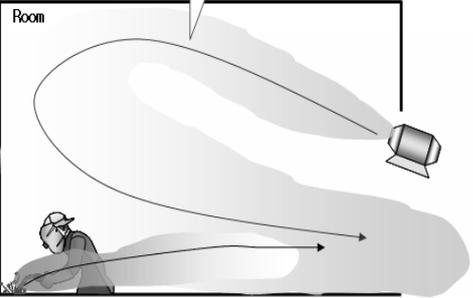
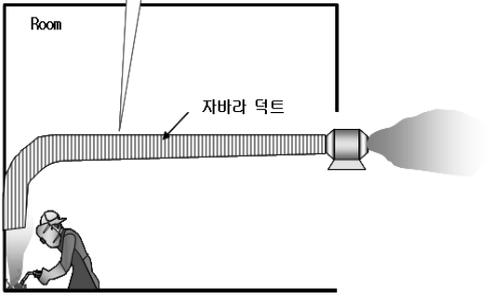
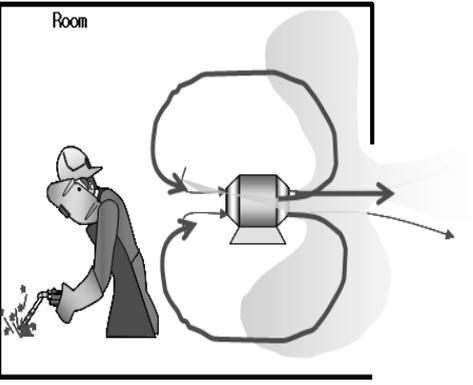
[그림 33]은 각 환기 방안별 기류 흐름을 촬영한 동영상을 시간대별로 캡처하여 사진으로 만든 것을 정리한 것이다. Case 1은 시간이 흘러도 출입문으로 연기가 전혀 유출되지 않고 있다. 즉, 환기는 하고 있지만 팬만 가동될 뿐 실제 환기 효율은 거의 없다는 것을 알 수 있다. 이에 반해 Case 2 급기 방안과 Case 4 공간내부에서 배기방안은 공간 외부로 약간의 흡이 배기되고 있는 것을 볼 수 있다. 국소배기 형태의 Case 3 덕트를 이용한 배기 방안에서는 용접시 발생된 흡이 배기 덕트를 통해 배출되기 때문에 용접 작업자 주변으로 용접 흡이 심하게 확산되지 않는 것을 알 수 있다.

구분	Room 내부 기류 흐름 (시간대별)				
<b>Case 1</b> 배기 방안					
<p>○ 공간 내부의 연기가 전혀 배출되지 않음</p>					
<b>Case 2</b> 급기 방안					
<p>○ 급기팬을 가동한 직후 공간 내부의 연기가 원활하게 배출됨</p> <p>○ 작업자 주변의 연기가 급기 기류에 의해 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있었음</p>					
<b>Case 3</b> 덕트를 이용한 배기 방안					
<p>○ 국소배기 형태이기 때문에 가장 효율적으로 연기를 배기시킴</p>					
<b>Case 4</b> 공간 내부에서 배기 방안					
<p>○ 공간 내부에서 팬을 이용하여 배기시킬 경우 출입구 면적이 충분히 넓어서 급배기 기류가 원활하게 유동하기 때문에 연기 배출효과가 우수함</p>					

[그림 33] 각 환기 방안별 기류 테스트 결과

㉔ 각 환기 방안별 기류 흐름

[그림 34]는 각 환기 방안별 기류 흐름을 개략적으로 그림으로 나타낸 것인데, 출입구에 팬을 매달아 놓고 배기를 시키는 방안은 적절치 못한 것으로 나타났다. 하지만, 많은 작업자들이 소형팬을 배기용으로 사용하고 있는 실정이다.

Case 1 배기 방안	Case 2 급기 방안
<p>Room 내부 용접 흠을 전혀 배기시키지 못함</p> 	<p>소형팬의 급기류에 의해 Room 내부 용접 흠이 희석되고, 외부로 유도되어 배출됨</p> 
<p>○ 룸 내부에서 발생하는 용접 흠을 전혀 배기시키지 못함 소형팬 주변 공기만 배기시킴</p>	<p>○ 소형팬의 급기 기류가 룸 내부에서 발생하는 용접 흠을 희석시킬 뿐만 아니라 룸 밖으로 배출시키고 있음</p>
Case 3 덕트를 이용한 배기 방안	Case 4 공간 내부에서 배기 방안
<p>용접 부위에서 발생하는 흠을 효과적으로 배기시킴</p> <p>지바라 덕트</p> 	
<p>○ 용접 부위에서 발생하는 흠을 효과적으로 배기시켜 룸 밖으로 배출함</p>	<p>○ 용접점에서 발생된 흠이 배기팬을 통해 일부 출입문으로 배기됨</p>

[그림 34] 각 환기방안별 기류 흐름 개략도

③ 흡 농도 측정 결과

[그림 35]와 같이 환기 형태에 따른 흡 농도 저감 효율을 평가하기 위해 작업장 상부에서 흡 농도를 포집하였다. Case 4는 기류 흐름 평가 결과 효율이 낮아서 흡 농도 평가는 실시하지 않았다.

〈표 16〉 제한공간의 환기방안별 흡 농도 측정 결과

환기 방식	흡 농도(mg/m <sup>3</sup> )
Case 1 배기 방안	35.0
Case 2 급기 방안	20.0
Case 3 덕트를 이용한 배기 방안	13.3

〈표 16〉을 살펴보면 Case 1 배기 방안은 흡 농도가 35 mg/m<sup>3</sup>인데 반해 덕트를 연결하면 13.3mg/m<sup>3</sup>으로 62%가 감소하는 것으로 나타났다. 덕트를 연결한 배기방안의 경우 용접위치와 후드간의 거리가 50cm로 약간 거리가 있었고, 팬 유량도 주름관 덕트를 연결하였기 때문에 15 m<sup>3</sup>/min으로 25% 정도 배기유량이 감소하였음에도 불구하고 용접흡 저감 효율은 큰 것으로 나타났다.

급기의 경우 배기보다는 43% 정도 용접흡 농도가 감소하여 제한공간의 경우 배기보다는 급기를 실시하는 것이 효율적이고, 주름관 덕트를 연결할 수 있다면 주름관 덕트를 이용한 배기가 가장 효율적인 환기 방안으로 나타났다.

[그림 35]는 15m<sup>3</sup>/min 정도의 소형팬을 용접점 30cm 이내에 위치시켰을 때 환기 유무에 따른 용접흡 농도를 각각 2명의 용접사를 대상으로 실험을 실시한 결과이다. 용접 흡 농도 측정 결과 국소배기 장치를 적절하게 가동할 경우 85%의 용접흡 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. [그림 35]는 주름관 덕트를 이용한 환기 유무에 따른 용접흡 거동 모습이다.

〈표 17〉 주름관 덕트를 이용한 국소배기시 흡 저감 효과

구분	용접 흡 농도(mg/m <sup>3</sup> )		저감 효율(%)
	주름관 덕트를 이용한 배기	배기없음	
A	4.9	-	
	3.8	-	
B	4.4	-	
	2.9	-	
C	-	24.2	
	-	33.8	
D	-	28.4	
	-	18.0	
기하 평균	3.9	25.4	85



<환기 팬 사용시 흡 거동 모습>



<환기 팬 미사용시 흡 거동 모습>

[그림 35] 소형팬을 이용한 흡 환기 모습

## ④ 제한공간의 적용 가능한 효율적인 환기 방안

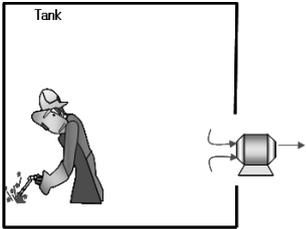
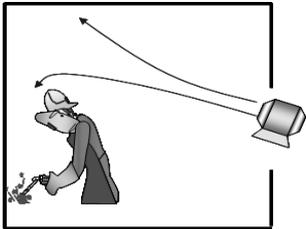
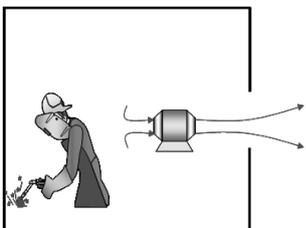
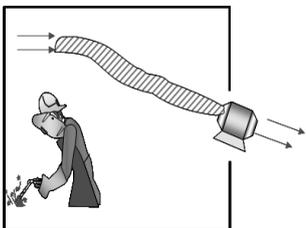
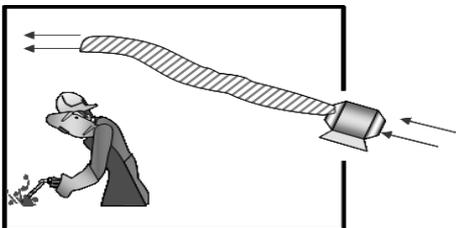
현장에서 실시한 환기방안에 따른 기류 흐름 관측 및 흡 농도 측정결과 팬을 손쉽게 이동시킬 수 있는 제한공간의 경우 주름관 덕트를 연결한 국소배기 방안이 가장 효율적인 환기 방안으로 나타났다. 하지만, 주름관 덕트 연결이 자유롭지 못한 상황인 경우에는 배기보다는 급기를 실시하는 것이 효율적인 방법으로 조사되었다.

## 4) 밀폐 공간 환기방안

조선 업종에 있어서 환기에 가장 취약한 지역이 바로 밀폐공간이다. 밀폐공간은 용접사가 불편할 정도의 좁은 Man-hole을 통해 이동하기 때문에 작업에 필요한 용접기를 옮기는데도 많은 어려움이 있는 공간이다. 상황이 이렇기 때문에 환기를 위한 팬을 가지고 이동하기 힘들다는 이유로 환기를 실시하지 않는 경우가 많다. 이러한 밀폐공간에서 작업하는 용접사의 용접흡(망간) 노출량을 감소시키기 위해서는 적절한 환기 방안수립이 반드시 필요한 실정이다. 현장 실험을 통해 밀폐 공간에 적용 가능한 환기 방안을 수립하고자 한다.

## ① 밀폐 공간에 적용 가능한 환기 방안

[그림 36]은 제한공간에 적용 가능한 환기방안의 개략도는 정리한 것이다. 일반적으로 적용 가능한 4가지 경우가 있고, 현장의 작업자들은 Case 1과 Case 4의 경우와 같은 배기 방안을 주로 선호하고 있었다.

Case 1 배기 방안	Case 2 급기 방안
	
<p>○ Room 입구에서 Ø200 소형팬으로 배기시킬 경우</p>	<p>○ Room 입구에서 소형팬으로 급기시킬 경우</p>
Case 3 공간 내부에서 배기 방안	Case 4 덕트를 이용한 배기 방안 (밀폐공간 중앙에 설치)
	
<p>○ Room 내부에 축류팬을 설치해 배기시킬 경우</p>	<p>○ 소형팬에 자바라를 연결하여 작업자 주변에서 국소배기시킬 경우</p> <p>○ 주름관 덕트는 용접 위치에 따라 이동하지 않고 밀폐공간 중앙에 설치한 것으로 가정하였음</p>
Case 5 덕트를 이용한 급기 방안(밀폐공간 중앙에 설치)	
	
<p>○ 소형팬에 자바라를 연결하여 작업자 주변에 급기시킬 경우</p>	

[그림 36] 밀폐 공간에 적용 가능한 환기 방안

② 기류 흐름 평가 결과

밀폐공간의 환기 방안별 효율을 평가하기 위해 연기를 발생 시킨 후 기류를 촬영하였고 그 결과는 [그림 37]과 같다.

㉠ 기류 촬영 결과

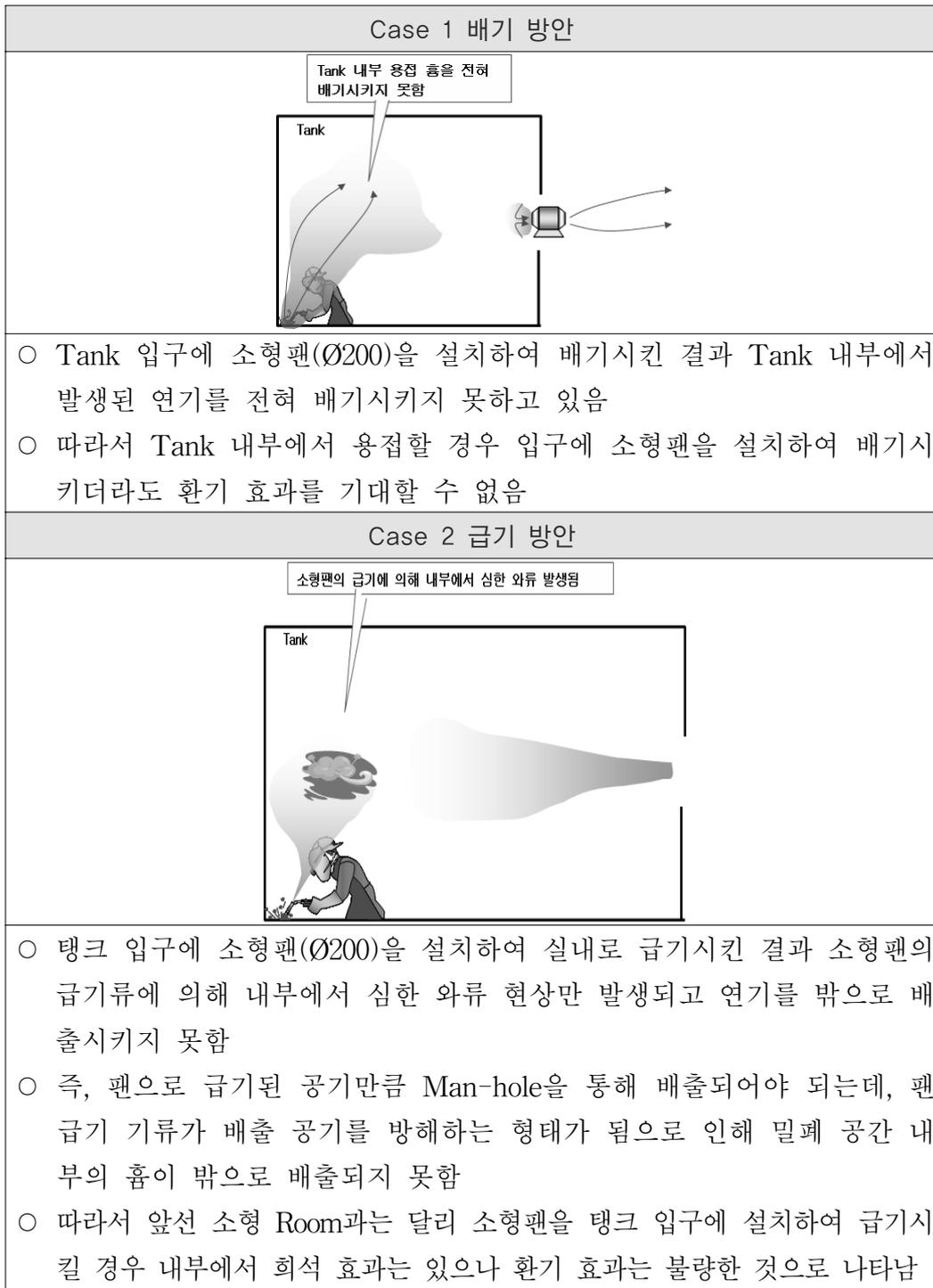
[그림 37]는 각 환기 방안별 기류 흐름을 촬영한 동영상을 시간대별로 캡 처하여 사진으로 만든 것을 정리한 것이다.

구분	Tank 내부 기류 흐름 (시간대별)				
Case 1 배기 방안	 <p>○ 공간 내부의 연기가 거의 배출되지 않음</p>				
Case 2 급기 방안	 <p>○ 공간 내부의 연기가 거의 배출되지 않음</p>				
Case 3 공간 내부에서 배기 방안	 <p>○ 공간 내부의 연기가 일부 배출되지만 큰 효과는 없음</p>				
Case 4 덕트를 이용한 배기 방안 (밀폐공간 중앙에 설치)	 <p>○ 공간 내 연기를 비교적 원활하게 배출시키지만, 출입구를 통해 유입되는 기류에 의해 공간 내부 연기가 강한 와류를 형성함</p>				
Case 5 덕트를 이용한 급기 방안(밀폐 공간 중앙에 설치)	 <p>○ 공간 내부의 연기를 가장 원활하게 배출시킴 ○ 출입구가 좁은 밀폐 공간의 경우 덕트를 이용한 급기가 가장 효율적인 환기 방법임</p>				

[그림 37] 각 환기 방안별 기류 테스트 결과

## ㉔ 각 환기 방안별 기류 흐름

[그림 38]과 [그림 39]는 각 환기방안에 따른 기류 흐름을 가시적으로 표현한 것이다. 출입구가 좁기 때문에 기류가 흐를 수 있는 공간 또한 작다. 이러한 이유 때문에 출입구가 큰 제한공간과는 다른 형태의 환기 효율을 보여주고 있다. 밀폐공간의 경우 덕트를 이용한 급배기가 가장 바람직한 환기 형태로 평가되었다.



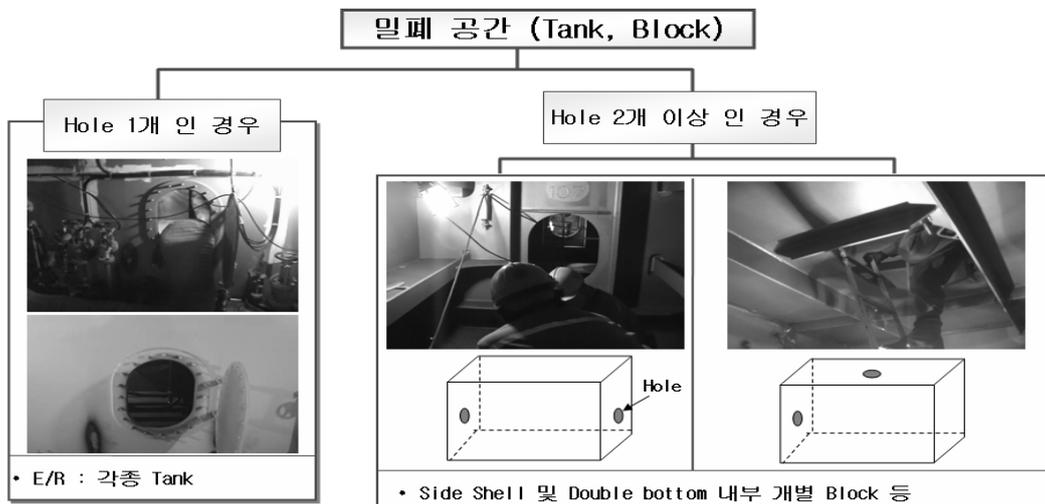
[그림 38] 각 환기방안별 기류 흐름 개략도 - Case 1, 2

Case 3 공간 내부에서 배기 방안	
<p>Tank 내부 용접 흠을 전혀 배기시키지 못함</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 소형팬을 탱크 내부에 설치하여 입구로 불 경우 발생된 연기의 일부가 배출되는 효과가 발생하지만 환기효과가 크게 나타나지 않음</li> <li>○ 따라서 소형팬을 탱크 내부에 설치하여 밖으로 불어 내는 방식은 큰 환기 효과를 기대할 수 없는 것으로 확인됨</li> </ul>
Case 4 덕트를 이용한 배기 방안	
<p>자바라 덕트에 의한 배기로 입구를 통해 유입된 외기와 연기가 부딪혀 외류 형성</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 탱크 내부에 자바라 덕트를 설치하여 배기시킬 경우 배기량만큼 입구를 통해 외기 유입되어 내부에서 발생하는 연기와 부딪혀 와류 현상 발생됨</li> <li>○ 따라서 탱크 내부에서 발생하는 용접 흠이 입구를 통해 유입되는 외기와 부딪혀 와류 형성되어 환기효과가 크지 않을 것으로 판단됨</li> </ul>
Case 5 덕트를 이용한 급기 방안	
<p>자바라 덕트에 의한 급기에 의해 탱크 내부에서 발생한 연기가 밖으로 배출됨</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 탱크 내부에 자바라 덕트를 설치하여 급기시킬 경우 탱크 입구로 연기를 원활히 배출시키고 있음</li> <li>○ 따라서 탱크 내부를 환기시키기 위해서는 자바라 덕트를 이용해 급기시킬 경우 환기효과가 우수할 것으로 판단됨</li> </ul>

[그림 39] 각 환기방안별 기류 흐름 개략도 - Case 3, 4, 5

③ 밀폐공간의 환기 방안

밀폐 공간에 대한 환기 효율 평가를 위한 용접흡 농도 측정 실험은 현장 여건상 수행하지 못했다. 현장 실험이 불가능하여 실험실에서 밀폐 공간에 대한 환기 효율을 평가하고 용접흡 및 망간 저감 효율을 평가하였다. 각 환기 방안에 따른 기류 가시화 실험 결과 소형팬에 주름관 덕트를 연결하여 밀폐 공간 내부에서 급기 시키는 방법이 매우 효과적인 것으로 나타났다. 물론 주름관 덕트를 이용하여 용접위치에서 바로 배기시키는 방법이 가장 효율적이지만 실제 밀폐공간에서 용접 위치에 따라 주름관 덕트를 이동하면서 용접하는 것이 힘들 것으로 판단되었다. 따라서 본 실험에서는 주름관 덕트를 작업장 중에서 설치한 상황에서 급배기에 따른 효율 평가를 실시하였기 때문에 배기보다 급기 효과가 더 좋게 나타난 것으로 판단된다. 자세한 환기 방안에 따른 효율 평가는 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험실 실험을 통해 검증하고자 한다. 현장 조사 결과 밀폐 공간은 Man-hole이 1개인 경우와 2개인 경우로 구분할 수 있고, 2개인 경우 예는 측벽에 위치한 경우와 측벽과 상부벽에 각각 1개씩 위치한 경우로 나눌 수 있다. [그림 40]은 향후 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 효율적인 환기방안을 수립하고자 하는 밀폐공간의 조건이다.



[그림 40] 효율적인 환기 방안 수립이 필요한 밀폐 공간 구조

## (2) 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 환기방안별 효율 평가

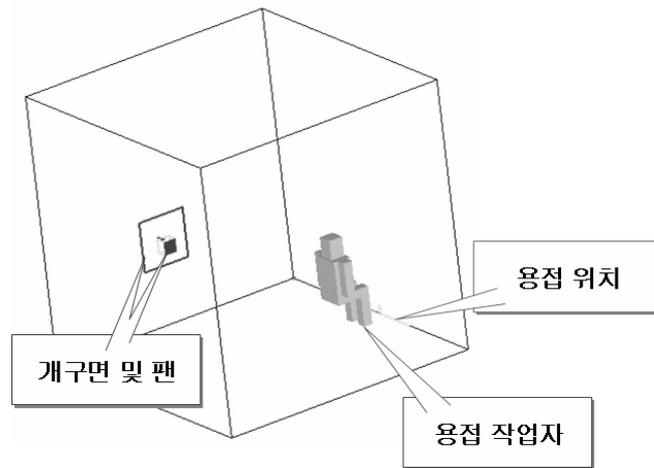
밀폐공간에 대한 환기 효율을 평가하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 각 방안별 환기 효율을 예측하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 환기 효율 예측은 정확한 용접흡 농도를 구하는 것이 아니고 동일한 조건으로 용접 흡이 발생한다고 할 때 각 방안별로 환기 효율을 평가하여 최적의 환기 방안을 수립하는데 목적이 있다. 최적의 환기방안이 수립되면 그 결과를 이용하여 현장에서 실제 작업 상황에 적용하여 용접흡 농도를 측정하고자 한다. 모델링에는 상용전산유체소프트웨어인AIRPAK(Ver 2.3)을 사용하였다.

### 1) 시뮬레이션 모델

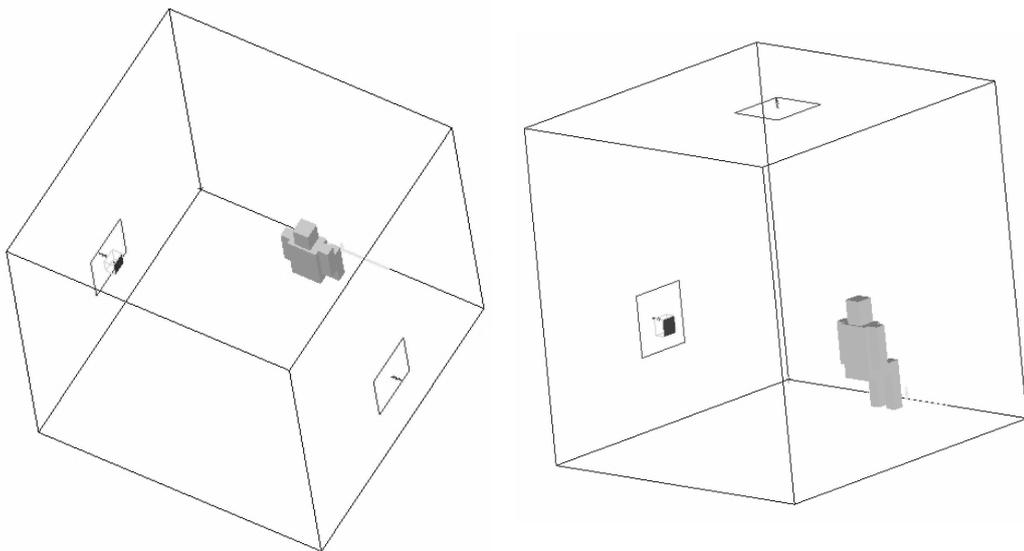
시뮬레이션을 이용한 각 환기방안의 효율을 평가하기 위해 먼저 현장상황을 고려한 시뮬레이션 모델을 선정하였다. 밀폐공간의 크기는 $3\text{m}\times 3\text{m}\times 3\text{m}$ ( $27\text{m}^3$ ) 체적으로 하였고, 용접작업자는 1명이 있는 것으로 가정하였다. 개구면의 크기는  $0.55\text{m}\times 0.55\text{m}$ ( $0.3\text{m}^2$ )으로 가정하였다.

#### ① 개구면 위치

개구면의 위치는 측벽에 1개, 마주보는 양 측벽에 각 1개씩 2개, 측벽과 상부에 각 1개씩 2개 등 총 3가지의 경우로 가정하였다. [그림41]은 각 개구면 위치에 따른 모델을 정리한 것이다.



<개구면이 1개인 밀폐 블록>



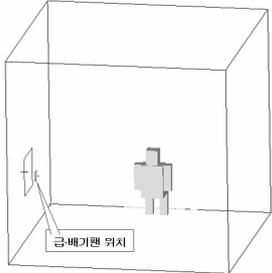
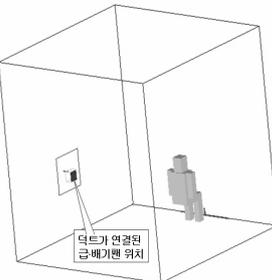
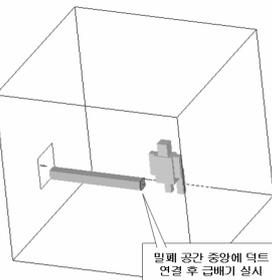
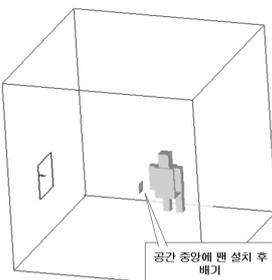
<양측벽에 위치한 개구면>

<측벽과 상부에 위치한 개구면>

[그림 41] 개구면 위치별 모델 형성 모습

② 밀폐 공간의 환기 모델

밀폐 공간의 환기 방안을 수립하기 위해 각 개구면 위치별로 7개씩 총 21개의 모델에 대한 환기 효율을 예측하였다.

환기 방안	시뮬레이션을 위한 모델 형성	현장 적용 모습	비고
개구면 입구 배기			<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 개구면 입구에 팬을 매달아서 사용하는 형태임</li> <li>○ 밀폐 공간에서 가장 일반적으로 적용되는 형태임</li> </ul>
개구면 입구 급기			
개구면 입구 배기(덕트 연결)			<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 개구면 입구에 덕트를 위치시키고 팬은 밀폐 공간 외부에 있음</li> <li>○ 팬을 이동하는 것보다 쉬운 방법임</li> </ul>
개구면 입구 급기(덕트 연결)			
공간 중앙 배기(덕트 연결)			<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 덕트를 밀폐 공간 중앙까지 연결함</li> </ul>
공간 중앙 급기(덕트 연결)			
공간 내부에 팬 위치 후 배기			<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 팬을 밀폐 공간 중앙에 위치시키고 배기시킴</li> <li>○ 현장에서 많이 실시하고 있는 방법임</li> </ul>

[그림 42] 밀폐공간 환기 효율 평가를 위한 환기 모델

## 2) 용접흡 농도 예측 결과

전산유체역학을 이용하여 21개 환기방안에 대한 예측결과는 다음과 같다

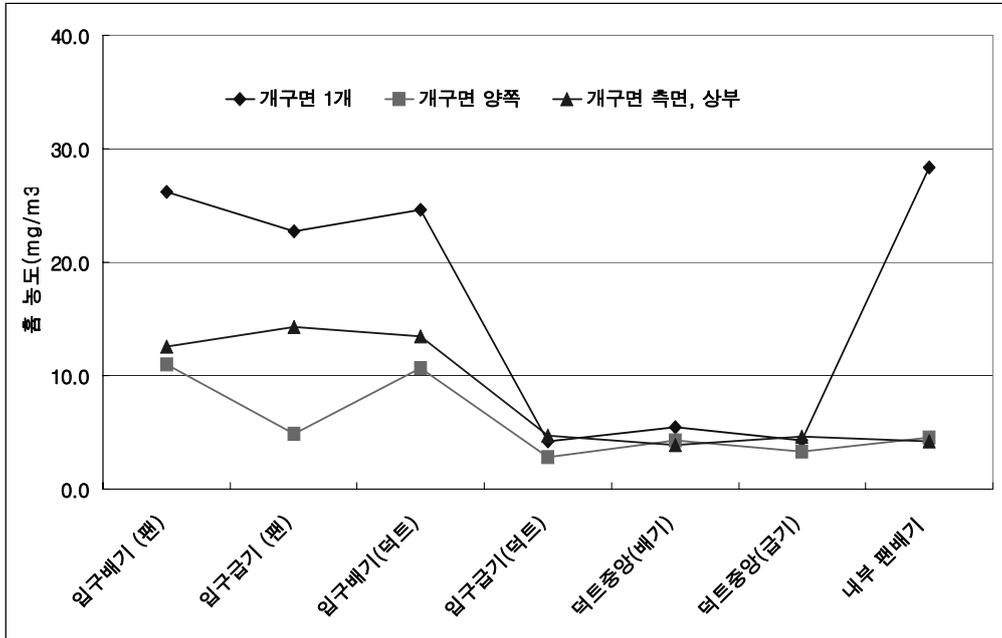
## ① 밀폐공간 전체의 흡 농도 분포

개구면 위치 및 환기 형태별 밀폐공간 평균 농도를 예측한 결과는 <표 18>에 정리하였다. <표 18>에 예측된 농도는 정확한 예측값이 아니라 동일 조건에서 환기 방안별로 환기효율을 비교하는 정성적인 평가 결과이다. 밀폐공간 전체 평균 농도 예측결과의 경우 개구면 입구 덕트 연결한 급기와 밀폐 공간 내부에 주름관 덕트를 연결하여 급·배기 시키는 경우에는 평균 농도가  $5\text{mg}/\text{m}^3$  이하로 예측되어 작업환경이 매우 만족한 수준에서 유지될 수 있다는 것을 알 수 있다. 하지만, 개구면 급·배기 및 개구면 입구 덕트 연결 배기와 공간 내부에 팬을 위치시키고 배기를 할 경우에는 환기 효율이 매우 낮아져서 밀폐공간 내부의 농도가 작업환경 기준을 초과하는 것으로 예측되었다. 개구면이 1개일 때보다는 2개일 때 흡 농도가 80% 이상 감소하는 것으로 조사되었다. [그림 43]을 살펴보면, 개구면이 1개인 경우에는 환기 방법에 따라 최고 85%까지 흡 농도가 변화하는 것을 알 수 있다. 즉, 개구면이 1개인 경우에는 적절한 환기방법을 적용하지 않으면 작업환경 기준을 초과할 수 있다는 것을 알 수 있다. 또, 개구면이 2개인 경우에도, 개구면이 양 측벽에 위치한 것이 측벽과 상부에 위치한 것보다 약간 효과적인 것으로 예측되었다. 하지만, 개구면 입구에서 급기하는 경우를 제외하고는 개구면이 2개일 때 개구면 위치와 환기 효율은 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

〈표 18〉 개구면 위치 및 환기형태별 밀폐 공간 흡 농도 평균값

(단위 : mg/m<sup>3</sup>)

구분	개구면 입구 배기	개구면 입구 급기	개구면 입구 배기 (덕트 연결)	개구면 입구 급기 (덕트 연결)	공간 중앙 배기 (덕트 연결)	공간 중앙 급기 (덕트 연결)	공간 내부에 팬 위치 (배기)
개구면 1개	26.2	22.7	24.7	4.2	5.4	4.3	28.4
개구면 양쪽	11.0	4.9	10.6	2.8	4.3	3.3	4.5
개구면 측면, 상부	12.5	14.3	13.5	4.7	3.9	4.6	4.2
평균	16.6	14.0	16.3	3.9	4.5	4.1	12.4



[그림 43] 개구면 위치 및 환기형태별 밀폐 공간 흡 농도 평균값

## ② 작업자 호흡영역 주변 흡 농도 분포

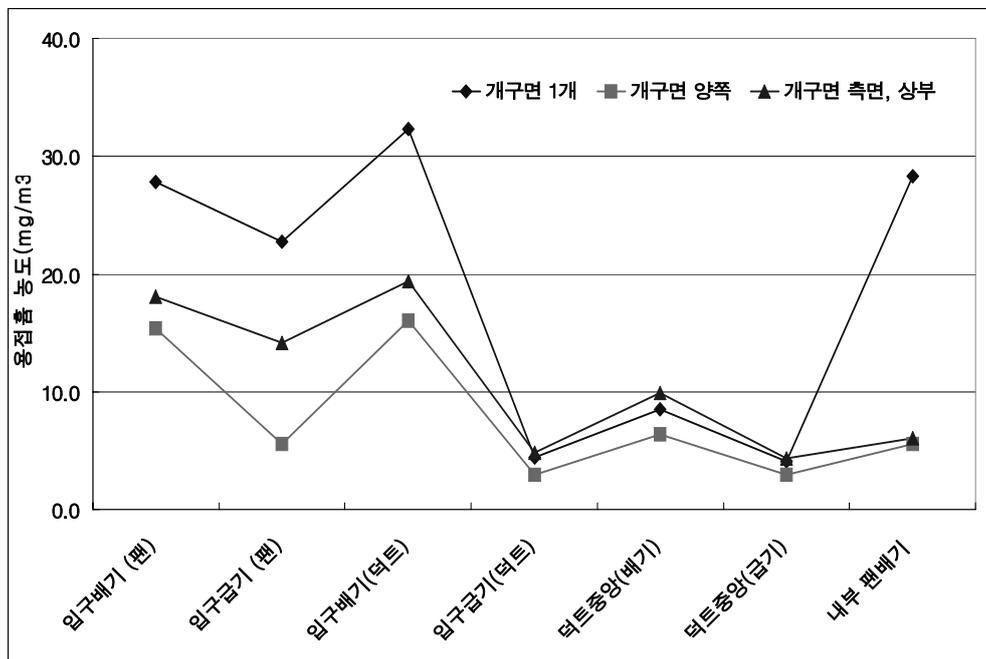
용접흡 노출 기준 감소를 위해서는 밀폐공간 전체 농도보다는 작업자 호흡영역 주변의 농도를 저감시키는 것이 더욱 효과적이다. <표 19>은 21개 환기방안별 작업자 호흡영역 주변 농도를 예측한 결과를 정리한 것이다. 작업자 호흡영역은 코를 중심으로 상하 0.5m×0.5m×0.5m 체적의 농도를 평균한 것이다.

<표 19>을 살펴보면, 작업자 호흡영역의 농도가 노출 기준 이하로 유지되는 것은 개구면 입구에 덕트를 연결하여 급기하는 경우와 밀폐공간 중앙에 급기 덕트를 연결하여 급기시키는 경우뿐이다. 즉, 주름관 덕트를 연결하여 적정 유량으로 급기를 실시할 때만 용접점에서 발생하는 고농도 흡이 작업자 호흡영역으로 이동하지 못하게 하기 때문에 작업자의 용접흡 노출 저감에 효과가 있는 것으로 판단된다. 물론 현장에서는 용접불량 등을 고려하여 급기 기류 방향을 적절하게 조정할 필요가 있다. [그림 44]를 살펴보면, 급기 형태만 적절하다면 개구면 위치와 개수에 상관없이 작업자 호흡영역으로 용접흡이 이동하는 것을 효율적으로 방지할 수 있다는 것을 알 수 있다.

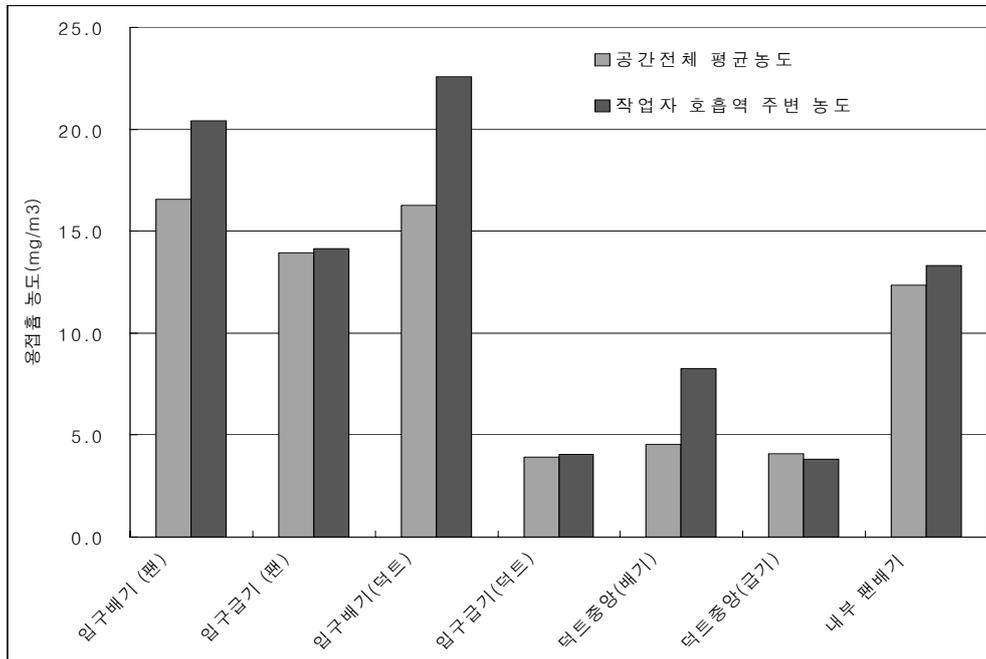
〈표 19〉 개구면 위치 및 환기형태별 작업자 호흡영역 주변 흠 농도

(단위 : mg/m<sup>3</sup>)

	개구면 입구 배기	개구면 입구 급기	개구면 입구 배기 (덕트 연결)	개구면 입구 급기 (덕트 연결)	공간 중앙 배기 (덕트 연결)	공간 중앙 급기 (덕트 연결)	공간 내부 에 팬 위치 (배기)
개구면 1개	27.8	22.7	32.3	4.4	8.5	4.1	28.3
개구면 양쪽	15.4	5.5	16.0	3.0	6.4	3.0	5.5
개구면 측면, 상부	18.1	14.2	19.4	4.8	9.9	4.4	6.0
평균	20.4	14.1	22.6	4.1	8.3	3.8	13.3



[그림 44] 개구면 위치 및 환기형태별 작업환 호흡영역 흠 농도 평균값



[그림 45] 밀폐공간 전체와 작업자 호흡영역 용접흡 농도 비교

[그림 44]는 밀폐공간 전체 용접흡 평균 농도와 작업자 호흡영역 평균 농도를 비교한 그래프이다. 배기보다는 급기를 실시할 때 공간전체 평균농도와 작업자 호흡영역 평균농도의 차이가 크지 않다는 것을 알 수 있다. 즉, 급기에 의한 환산 효과로 인해 용접흡 노출량을 크게 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다.

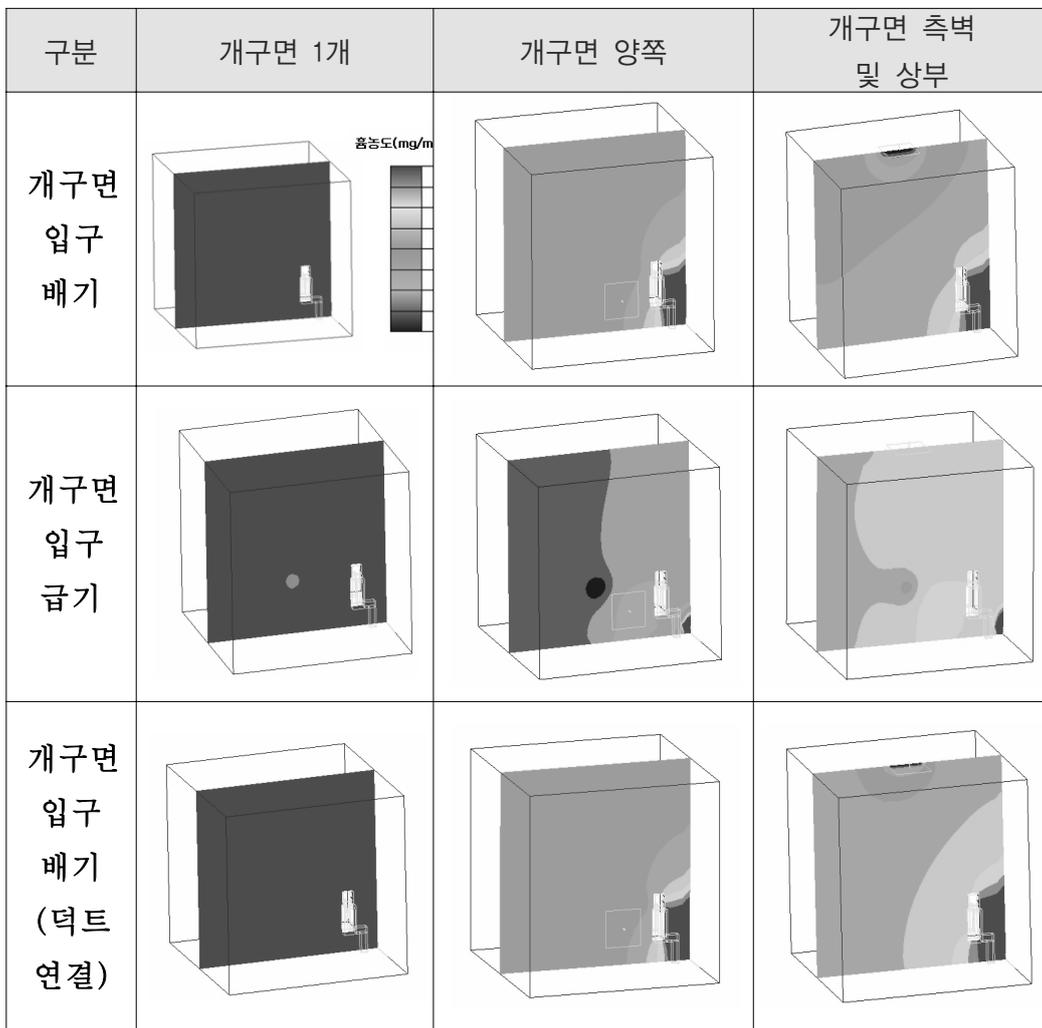
### 3) 각 Case별 등농도 분포 예측 결과

환기조건별로 농도 변화와 공간내 농도 분포를 알아보기 위해 용접흡 등농도 분포를 살펴보았다. 작업자가 앉아서 용접하는 것을 기준으로 했기 때문에 높이 0.5m 단면과 작업자 중앙 단면의 등농도 분포를 정리하였다.

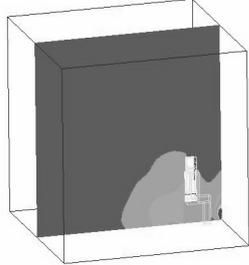
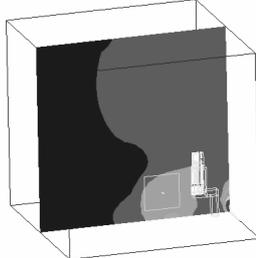
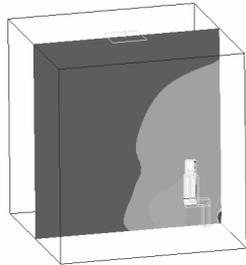
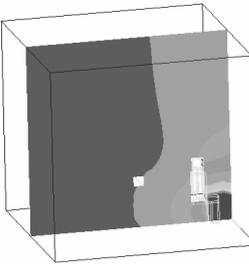
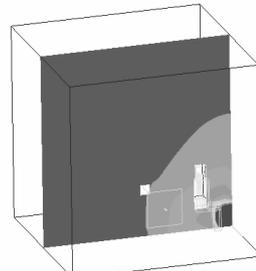
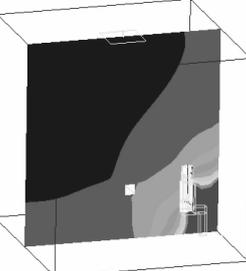
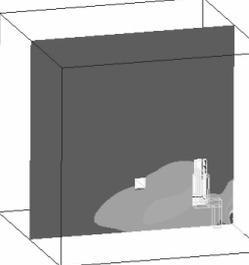
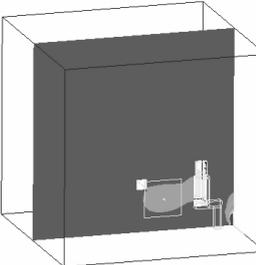
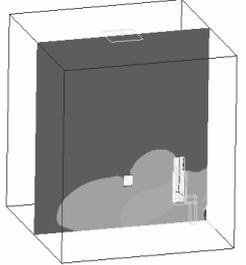
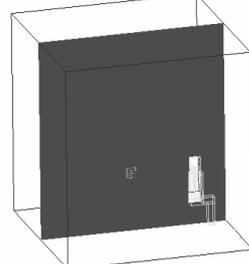
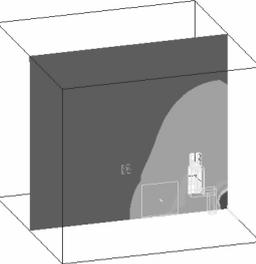
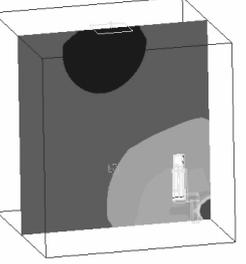
#### ① 작업자 중앙 단면 등농도 분포

[그림 46]은 작업자 중앙 단면의 용접흡 등농도 분포를 정리한 결과이다. 붉은 색은 용접흡 농도가 20 mg/m<sup>3</sup>을 초과한 것이다. 개구면이 1개

인 경우 공간 전체가 붉은 색 계통을 나타내는 경우가 많고, 개구면이 2개인 경우에는 환기 조건에 따라 푸른색의 비교적 깨끗한 공기가 분포하는 영역이 나타나고 있다. 하지만, 배기를 실시할 경우 대부분 작업자 주변에 붉은 색의 고농도 정체 영역이 나타나는 반면, 급기 조건일 경우에는 붉은 색의 고농도 조건이 거의 없다. 급기 조건일 경우에 붉은 색의 고농도 영역은 용접점 근처에 있기 때문에 실제 작업자 호흡영역과는 거리가 멀다.



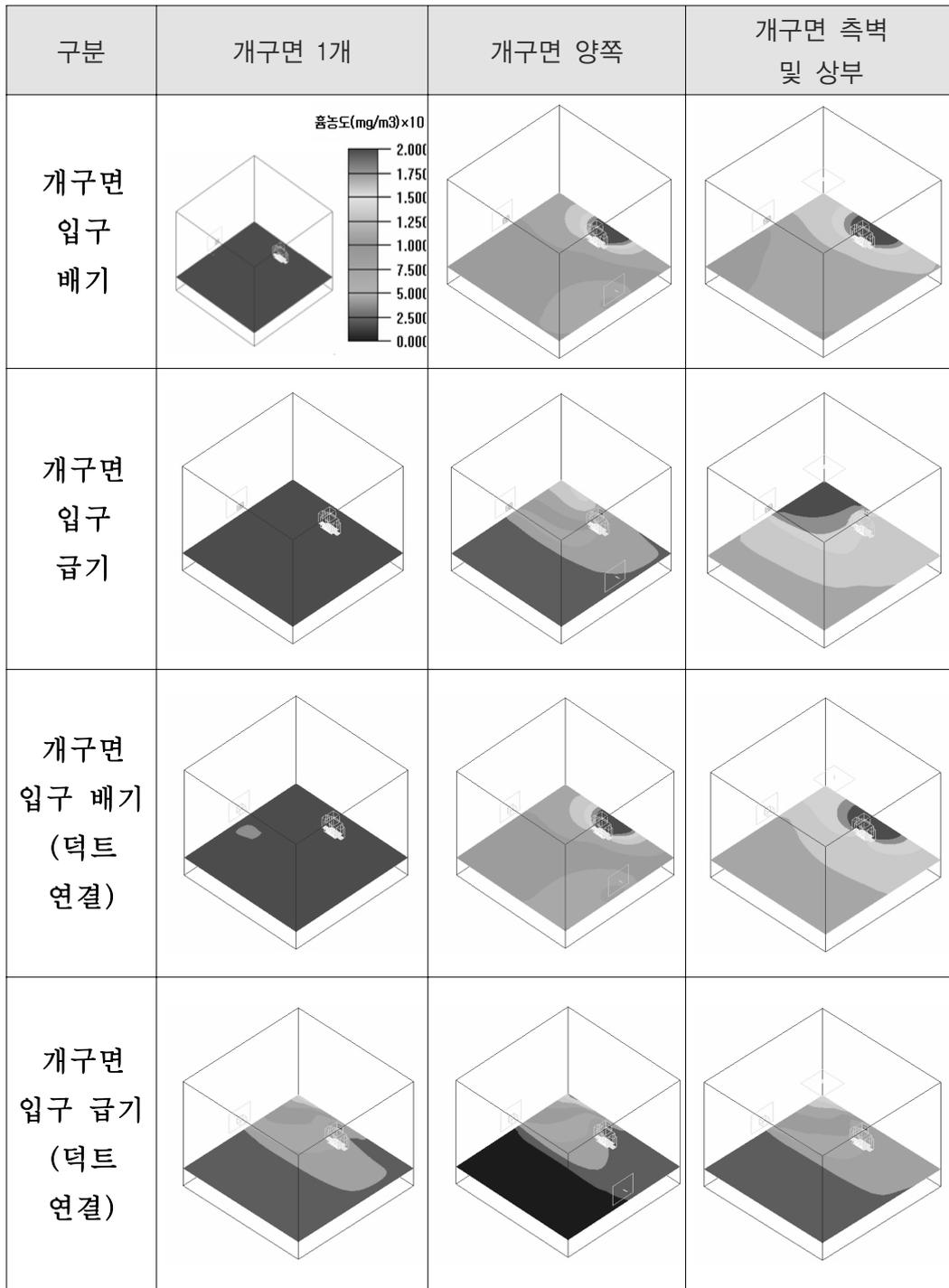
[그림 46] 작업자 중앙 단면 등농도 분포

구분	개구면 1개	개구면 양쪽	개구면 측벽 및 상부
개구면 입구 급기 (덕트 연결)			
공간 중앙 배기 (덕트 연결)			
공간 중앙 급기 (덕트 연결)			
공간 내부에 팬 위치 후 배기			

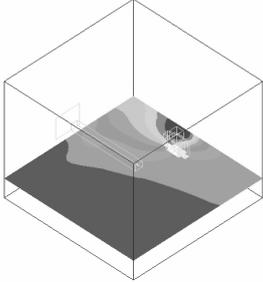
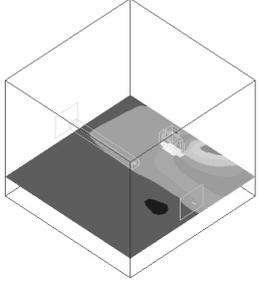
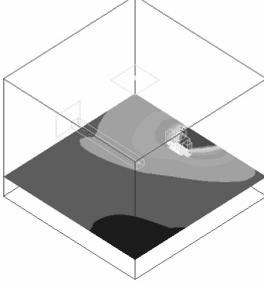
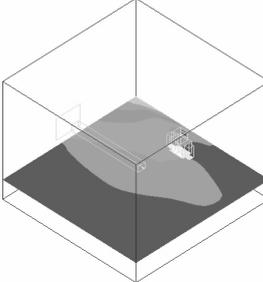
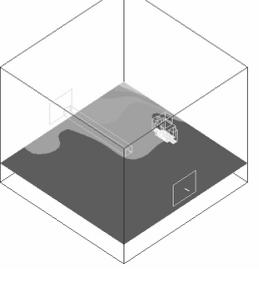
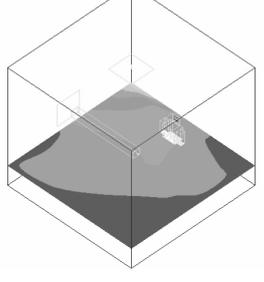
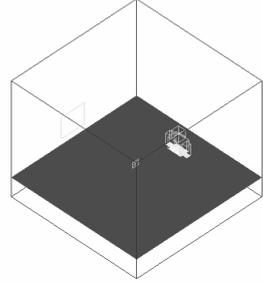
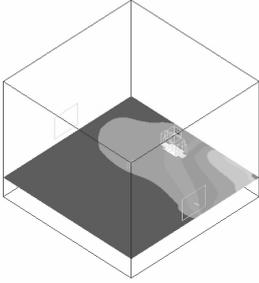
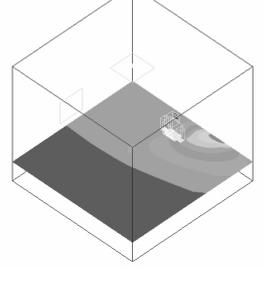
[그림 46] 작업자 중앙 단면 등농도 분포-계속

## ② 0.5m 높이 단면 등농도 분포

[그림 47]은 0.5m 단면의 용접흡 등농도 분포를 정리한 결과이다. 붉은 색은 용접흡 농도가  $20 \text{ mg/m}^3$ 을 초과한 것이다. 개구면이 1개인 경우 공간 전체가 붉은 색 계통을 나타내는 경우가 많고, 개구면이 2개인 경우에는 환기 조건에 따라 푸른색의 비교적 깨끗한 공기가 분포하는 영역이 나타나고 있다. 하지만, 배기를 실시할 경우 대부분 작업자 주변에 붉은 색의 고농도 정체 영역이 나타나는 반면, 급기 조건일 경우에는 붉은 색의 고농도 조건이 거의 없다. 작업자 전면에 붉은 색은 실제 코 주변이기 때문에 작업자가 호흡하는 영역의 농도라고 판단해도 무방하다. 따라서, 배기 조건에서는 유량을 증가하여도 실제 작업자 호흡영역 주변의 농도를 적절하게 저감시키지 못하기 때문에 노출량 저감에는 어려움이 있을 것으로 판단된다.



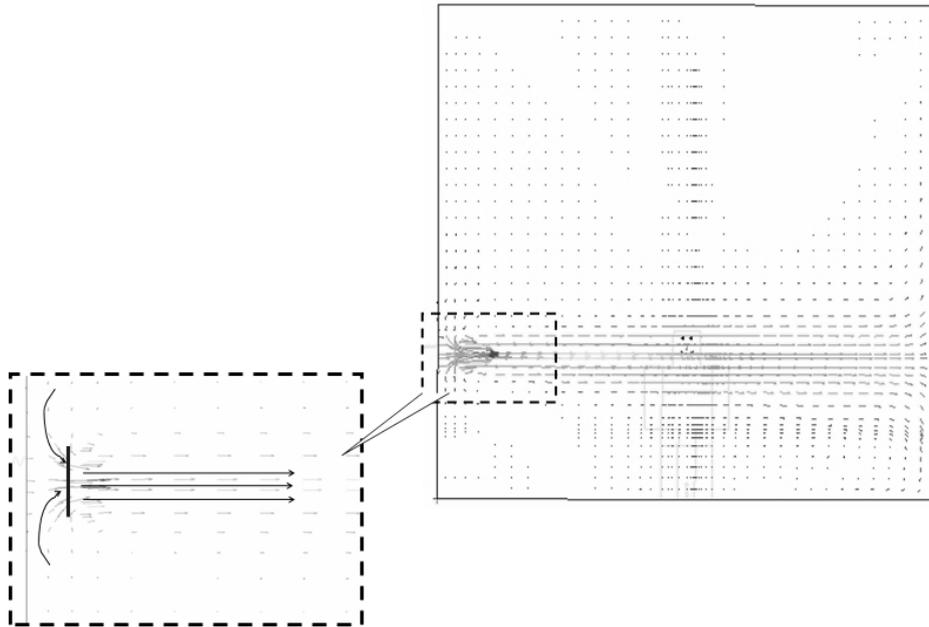
[그림 47] 0.5m 높이 단면 등농도 분포

구분	개구면 1개	개구면 양쪽	개구면 측벽 및 상부
공간 중앙 배기(덕트 연결)			
공간 중앙 급기(덕트 연결)			
공간 내부에 팬 위치 후 배기			

[그림 47] 0.5m 높이 단면 등농도 분포- 계속

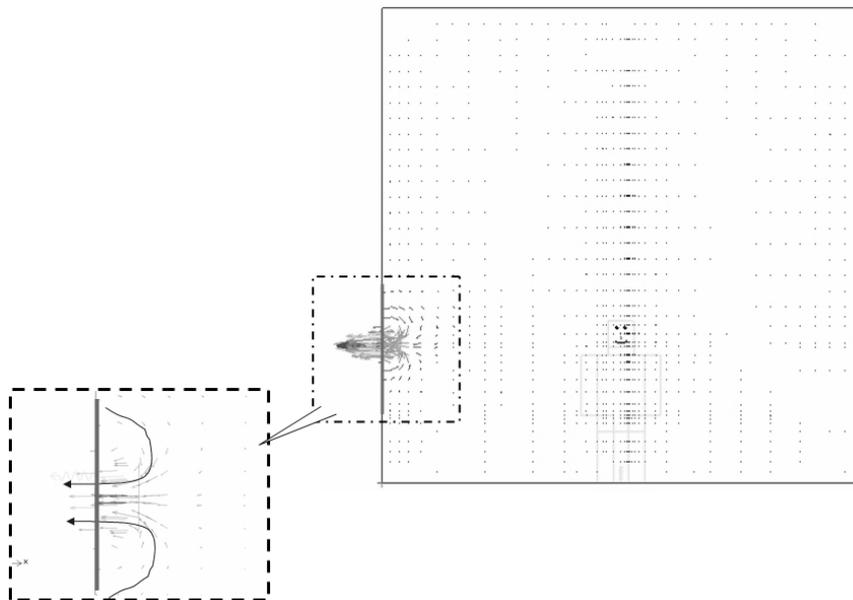
## ③ 기류 해석 결과

환기조건별로 용접흡 농도를 예측한 결과 실제 현장에서 가장 많이 적용하는 환기 방법인 개구면 입구 급·배기 조건의 환기 효율이 매우 낮은 것으로 예측되었다. 그 이유를 알아보기 위해 개구면 입구 급·배기 조건일 때 기류 유동장을 분석해 보았다. [그림 48]는 입구팬 급기 환기일 때 기류 흐름 모습인데, 팬이 밀폐공간 내부에 있는 경우에는 밀폐공간 내부 기류가 팬으로 유입되어 급기 되는 현상, 즉 밀폐공간 내부 공기를 재순환 시키는 현상이 발생되고 있다. 이 때문에 급기를 하여도 신선한 공기의 급기량이 부족하기 때문에 환기효율이 많이 낮아지는 것으로 판단된다. 그리고 급기팬이 밀폐공간 외부에 있는 경우에는 좁은 출입문으로 급기 기류가 유입되어야 되기 때문에 흡을 함유한 밀폐공간 내부 공기가 배출될 공간이 없어지게 된다. 이 때문에 밀폐공간 내부가 양압이 형성되어 급기 팬을 가동시도 급기가 잘 안 되는 현상이 발생한다. 또, 급기팬을 출입구에 매달아 놓는 경우 (실제 작업자 출입이 힘들어 이런 상황은 거의 없음) 급기 기류와 밀폐공간에서 배기되는 기류가 출입구 근처에서 강하게 부딪혀서 심한 난류를 형성한다. 이러한 조건으로 현장에서 실험을 했을 때도 밀폐공간 내부에서 와류만 형성될 뿐 환기는 거의 되지 않는 것을 알 수 있었다.



[그림 48] 입구 팬 급기 환기일 때 기류 흐름

[그림 49]는 입구 팬 배기 환기일 때 기류 흐름을 나타낸 것이다. 출입구에 팬을 설치하고 배기를 시킬 경우, 벡터 그림에서 알 수 있듯이 밀폐공간 내부 기류가 팬을 통해 배출되는 것이 아니고 출입구를 통해 밀폐공간으로 유입되는 신선한 공기가 배기팬으로 유입되어 배출되는 현상이 발생된다. 즉, 배기팬의 배기공기는 밀폐공간 내부에 정체된 흡배기와는 상관없이 출입구로 유입되는 신선한 공기를 배기시키는 역할을 하기 때문에 환기 효과가 매우 낮은 것으로 나타났다.



[그림 49] 입구 팬 배기 환기일 때 기류 흐름

### (3) 용접면 내 외부 용접흡 측정 농도 비교

#### 1) 실험 목적

용접흡은 경우 작업환경측정 및 정도관리규정(노동부고시 제2005-4호) 제 21조(측정방법) 3항의 규정에 보면 “용접흡은 여과채취방법으로 하되 용접 보안면을 착용한 경우에는 그 내부에서 채취하고 중량분석방법과 원자흡광 분광기 또는 유도결합프라스마를 이용한 분석방법으로 측정한다.” 로 되어 있다. 즉, 용접흡 및 망간 농도를 측정할 경우에는 용접면 내부에서 시료를 채취해야 하지만, 현재 작업환경 측정 결과서는 대부분 용접면 외부에서 측정한 용접흡 및 망간 농도이다.

기존 연구에 의하면 용접면 내부에서 측정할 경우 용접면 외부보다 약 70% 정도 용접흡 농도가 적게 측정된다는 보고를 볼 때, 엄청나게 과대 평가된 측정결과가 정리되고 있다는 것을 알 수 있다.

이와 같이 용접면 내부에서 측정을 하면 용접흡 농도가 크게 감소된다는

것을 알면서도 작업환경 측정시 용접면 내부에서 측정하지 못하는 것은 작업자가 용접부위를 확인하기 위해 수시로 용접면을 벗고 작업을 하는데, 이때 용접면 내부에 있던 카세트 홀드가 용접면 내부로 나오게 된다. 이를 방지하기 위해서는 작업환경 측정자가 용접사 옆에 있으면서 수시로 카세트 홀드 위치를 파악해야 하지만, 현실적으로 거의 불가능한 실정이다.

[그림 50]은 현장에 사용하고 있는 용접면의 모습인데, 오른쪽은 회사에서 지급한 형태대로 사용하는 것이고, 왼쪽은 용접사가 가죽 천을 이용하여 용접면 턱 부분을 막아서 사용하고 있다. 가죽천을 이용해서 막고 사용하는 이유는 용접점에서 발생한 용접흄이 가슴을 타고 상승하여 용접면 턱 부분을 통해 용접면 내부로 유입되는 것을 방지하기 위한 일종의 자구책이라고 볼 수 있다.

이와 같이 용접사의 의지에 따라서 용접면 내부로 용접면이 유입되는 것을 최소화할 수 있는 방법이 있다. 또 [그림 51]은 현장에서 용접면을 착용하고 있는 모습인데, 용접면만 착용하는 경우와 용접면 내부에 두건을 착용하는 경우도 있다. 이처럼 용접면 착용 방법에 따라서도 용접면 내부로 용접흄이 유입되는 양이 크게 차이 날 수 있을 것으로 판단된다. 현재 시중에 다양한 형태의 용접면이 출시되어 있고, 조선소 내에서도 다양한 형태의 용접면을 사용하고 있기 때문에 용접면 형태에 따라 용접면 내부로 유입되는 용접흄 농도는 큰 차이를 보일 것으로 생각된다.



[그림 50] 현장에 사용되고 있는 용접면



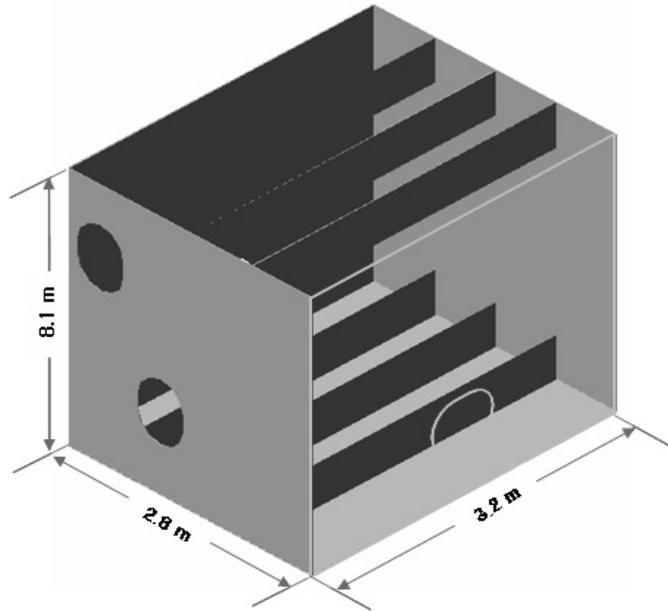
[그림 51] 용접면 착용 실태

본 실험에서는 용접면 형태에 따른 용접흡 유입 특성을 파악하기에 앞서, 환기형태에 따른 용접면 내외부 용접흡 농도를 비교 평가하였다. 본 실험을 통해 용접흡 측정 방법을 노동부 고시에 준하여 용접면 내부에서 측정할 때 그리고 환기를 병행할 경우에 용접흡 저감 농도를 예측해 보고자 하였다.

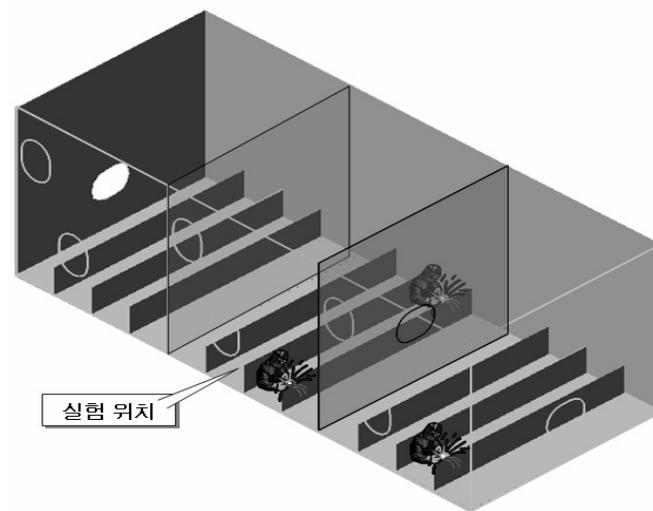
## 2) 실험 방법

### ① 실험 대상 블록 형태

실험은 [그림 52]과 같이 (W)2.8m × (L)3.2m × (H)8.1m 크기의 블록 내부에서 실시하였다. 실험 대상 블록은 3구역으로 되어 있었는데 [그림 53]와 같이 실험이 실시된 가운데 블록 내부에서는 용접사 두명이 있었고, 실험이 실시된 오른쪽 블록에 용접사 1명이 작업을 하고 있었다.



[그림 52] 실험 대상 블록 크기



[그림 53] 실험이 실시된 블록 형태 및 용접 작업자 위치

② 실험 조건

[그림 54]과 같이 용접사의 용접면 내부와 용접면 외부에 각각 카세트 홀더를 달고 용접면 내외부 농도를 동시에 측정하였다. 환기는 25m<sup>3</sup>/min용량의 송풍기를 이용하여 급배기 조건하에서 용접흡 농도를 측정하였다.



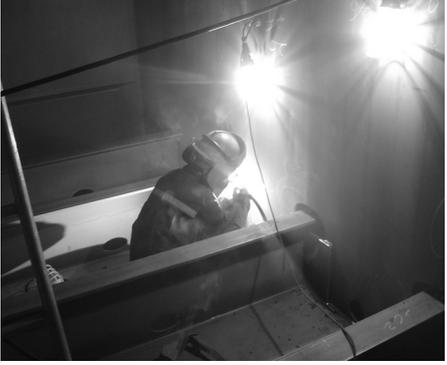
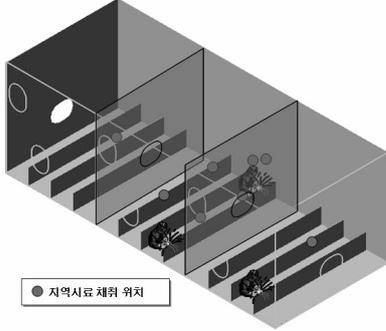
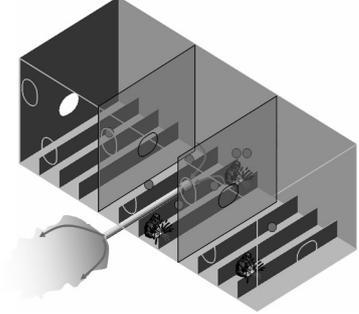
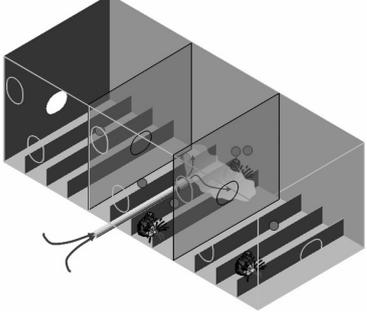
<카세트 홀더를 설치한 모습>



<필터 장착 모식도>

[그림 54] 용접면 외부에서 위치한 카세트 홀드 모습

[그림 55]은 현장의 급배기 시스템 설치모습과 시료 채취구 위치를 표시한 것이다. 시료 채취는 실험이 실시되는 대상 블록에 6개와 양쪽 인근 블록에 각 1개씩 총 8개를 채취하였고, 용접사는 용접면 내외에서 2개를 측정하였다. 블록에서 6개를 측정한 이유는 환기실시에 따른 블록 내부 용접흡 농도와 용접면 내부 농도와의 상관 관계를 알아보기 위해 실시하였다.

<p>현재 작업 상태</p>	<p>현재 작업 상태(모식도)</p>
	 <p>● 지역시료 채취 위치</p> <p>용접공3명 +시료채취8곳</p>
<p>배기 조건 상태</p>	<p>배기 조건 상태(모식도)</p>
	 <p>배기+용접공3명 +시료채취8곳</p>
<p>급기 조건 상태</p>	<p>급기 조건 상태(모식도)</p>
	 <p>급기+용접공3명 +시료채취8곳</p>

[그림 55] 블록 내부 급배기 조건 및 시료 채취 위치

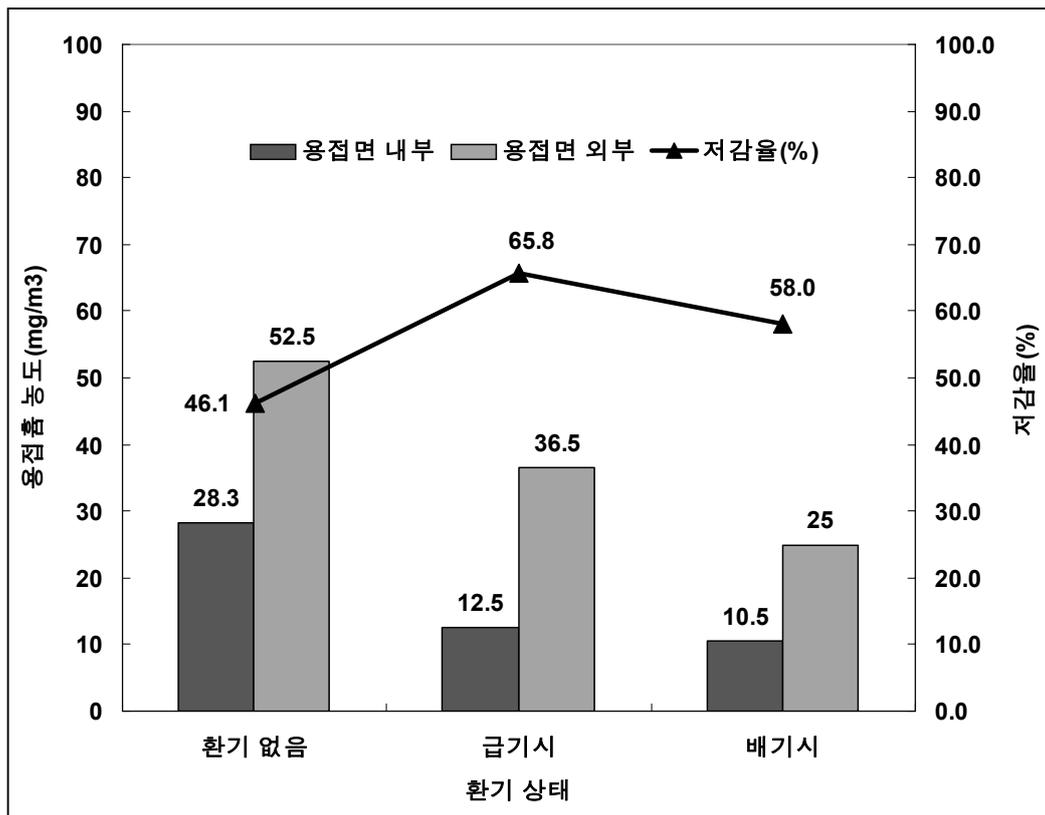
## ③ 실험 결과

<표 20>는 환기 조건에 따른 용접면 내외부 용접흄 농도를 측정한 결과를 정리한 것이다. 환기유무에 상관없이 용접면 내부에서 측정할 경우 56.6% 정도의 용접흄 저감 효율이 있는 것으로 나타났다. 특히 환기를 실시할 경우에는 용접면 내부 흄 농도가 환기를 실시하지 않을 때보다 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 본 실험에서 조선소에서 가장 문제가 되는 블록 내부 용접이라 할지라도, 용접면 내부에서 용접흄을 측정하고 환기만 적절하게 실시한다면 용접흄 농도를 크게 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. <표 20>에서 현재 환기가 없는 경우 용접면 외부 측정 결과인  $52.5\text{mg}/\text{m}^3$ 에서 적절한 배기를 실시하고 용접면 내부에서 측정을 할 경우 용접흄 농도가  $10.5\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 감소하게 된다. 즉, 용접흄 저감율로 계산한다면 71%의 용접흄이 저감된다는 것을 알 수 있다. 물론 본 실험이 1개의 블록을 대상으로 3시간 정도의 짧은 실험 시간 등 많은 제한적인 요소가 있지만, 현장실험을 지켜본 바 해서는 용접면 내부에서 측정하고 적절한 환기만 실시한다면 밀폐된 블록 내부에서 작업하는 작업자의 용접흄 측정 농도를 충분히 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

하지만, 현재 용접면 내부에서 측정이 어려운 이유는 용접면 내부에 카세트 홀드를 고정시키기 힘들고 작업자가 수시로 용접면을 벗는 과정에서 카세트 홀드가 용접면 내부에 고정되지 못하는 문제가 있다. 이 문제는 용접면 내부에서 용접흄을 측정할 수 있도록 적절한 측정 시스템을 개발하는 과정이 우선되어야 된다고 사료된다.

〈표 20〉 환기 형태에 따른 용접흄 내외부 흄 농도

구분	용접면 내외부 용접흄 농도			블록 내부 용접흄 농도(mg/m <sup>3</sup> )
	용접면내부	용접면 외부	저감율(%)	
환기 없음	28.3	52.5	46.1	70.4
급기시	12.5	36.5	65.8	24.1
배기시	10.5	25	58.0	28.8
평균 저감율			56.6	



[그림 56] 환기상태에 따른 용접면 내·외부 용접흄 농도

#### (4) 실험실 실험을 통한 효율 평가

##### 1) 실험 목적

현장 실험 및 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 얻은 결론은 작업자가 고농도의 용접흡에 노출되는 것을 방지하기 위해서는 [그림 57]과 같이 용접점에서 상승하는 고농도의 용접흡에 작업자의 호흡영역이 위치하지 않도록 환기 또는 기류에 의한 확산 등이 필요하다. 그리고 밀폐 공간의 경우 밀폐 공간 내부에 환기를 실시하지 않으면 고농도의 흡이 정체되기 때문에 적절한 환기가 필요하다. 특히, 노동부 고시에 제시된 것과 같이 용접면 내부에서 용접흡을 측정할 경우 작업자 노출 농도를 크게 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.



[그림 57] 고농도 용접흡에 노출되고 있는 모습

현장 실험에서는 다양한 인자들에 의해 영향을 받기 때문에 정확한 자료를 확보하지 못하고, 각 환기 특성에 따른 효율을 대략 평가하였다. 실험실에서는 기타 인자들의 영향을 배제하고 우리가 보고자 하는 용접흡 저감 방안의 효율과 적용 가능성을 정확하게 평가할 수 있다.

실험실 실험에서는 다음과 같은 저감 방안들에 대한 용접흡 저감 효율을

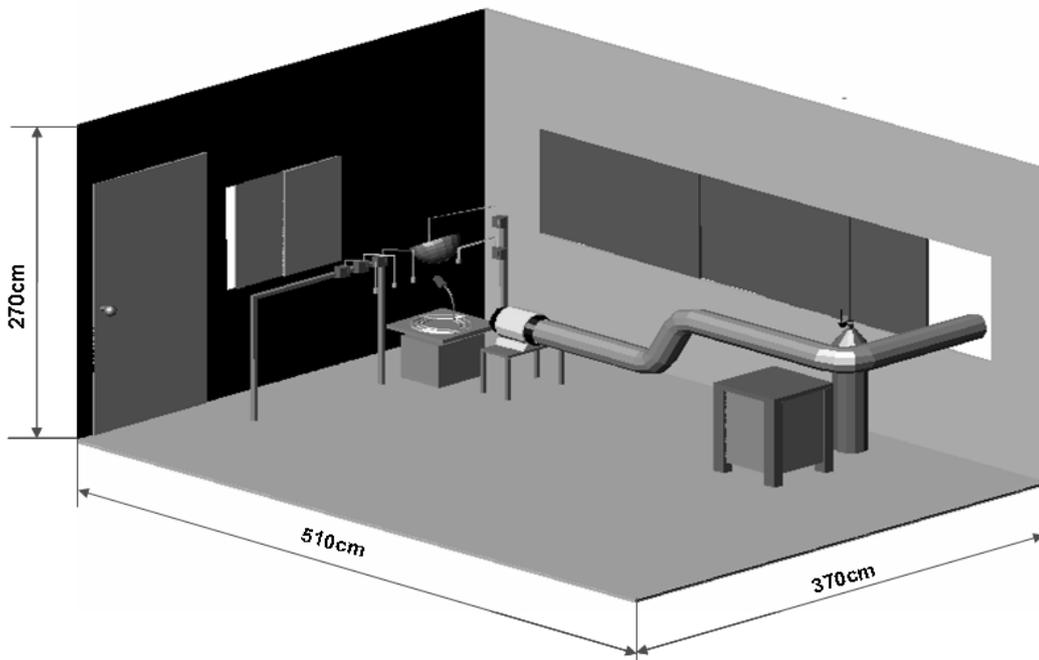
평가하였다.

- ① 환기 형태에 따른 용접면 내외부 용접흠 및 망간 농도 변화
- ② 환기 형태별 밀폐공간 평균 흠 농도 분포 측정
- ③ 용접지점에서 거리에 따른 용접흠 및 망간 농도 측정
- ④ 배기 덕트 위치에 환기 효율 평가
- ⑤ 고농도 용접흠 차단 방안 적용시 용접흠 및 망간 저감 효율 평가

이상 5가지 저감 방안에 대한 용접흠과 망간 저감 효율을 평가하였다.

## 2) 실험 장치 구성

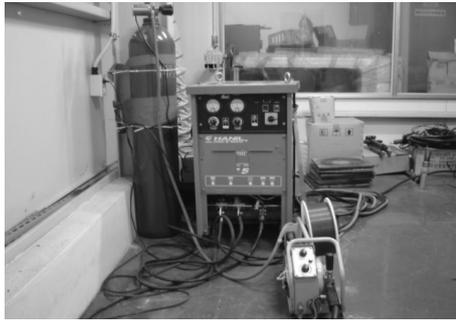
조선소의 블록과 같은 밀폐공간을 모사하기 위해 510(W)×370(L)×270(H) 규모의 실험실 내부에서 실험하였다. 이 실험실은 창문과 출입문이 있는데, 창문을 일부 개방하여 실제 조선소의 Manhole과 같은 역할을 하도록 하였다.



[그림 58] 실험실 규격



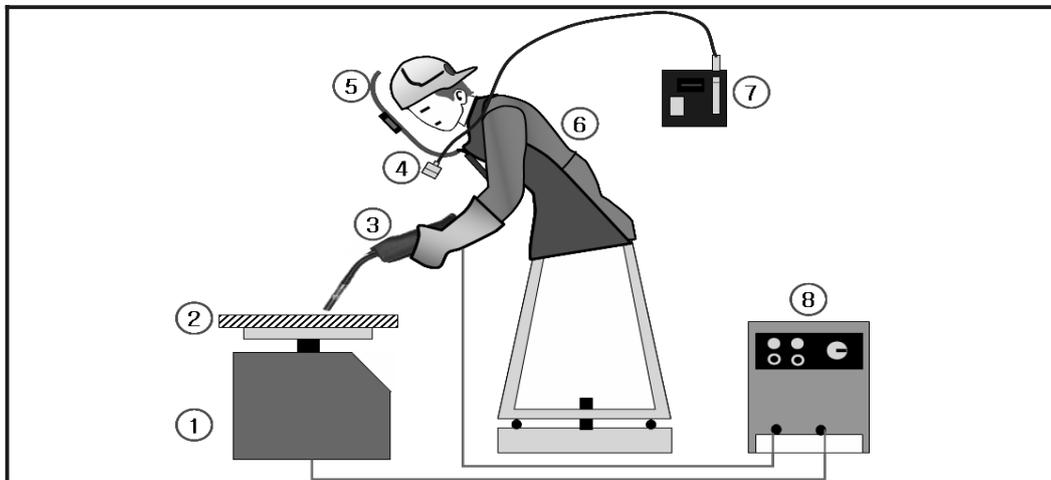
<용접 턴테이블과 환기팬>



<용접기 모습>

<용접 실험 모습>

[그림 59] 용접 실험 장치 모습

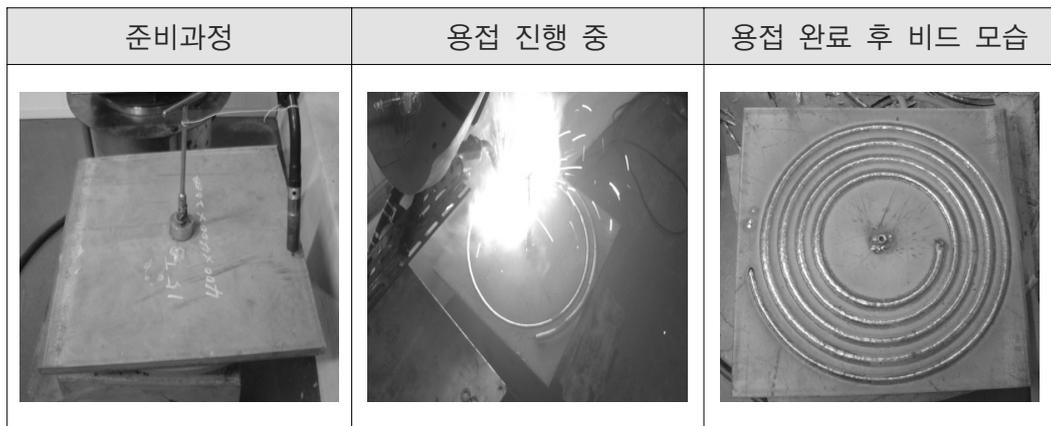


①	HWP-50 턴테이블(Turn-table)	⑤	용접면(Base metal)
②	모재 (400×400×18mm 철판)	⑥	회전마네킨(Manikin)
③	용접토치(Welding torch)	⑦	시료포집기(Personal air sampler)
④	카세트 홀드(MCE, 37mm)	⑧	용접기(Hic 500s)

[그림 60] 실험장치 모식도

실험장치는 [그림 59]와 같이 주로 용접기와 회전이 가능한 마네킨(Manikin) 그리고 모재, 턴테이블(Turn-table), 시료포집장치로 구성되어 있다. 그리고 급배기의 수요로 소형 휴대용 환기팬(MJVF-40Hz)을 사용하였다. [그림 60]은 실험장치를 개략도로 나타낸 것이다.

- 용접기는 Miller delta 651모델의 CO<sub>2</sub>용접기를 사용하였고 용접와이어는 탄산가스 아크 용접용 플럭스 코어드 와이어(Flux cored wire) 1.2mm를 사용하였고 용접토치는 현재 시중에서 제일 많이 유통되는 일반형 용접토치를 사용하였다.
- 모재는 한국공업규격(KS D 0062) 피복 아크용접봉의 전체 흡량 측정 방법에 준하여 가로400mm×세로400mm×두께18mm인 일반 구조용 압연강재를 사용하였다. 와이어 브러쉬(Brush)를 이용하여 용접모재 표면에 붙어있는 이물질을 제거하였다.
- 시료포집기(Personal air sampler)는 매번에 그 흡입량을 2CMM가 되게끔 보정하여 사용하였다. 카세트 홀드(Cassette holder)는 샘플의 망간(Mn)농도 측정을 염두에 두어 MCE 필터를 사용하였고 사용전후에 110℃전기건조로에서 각각 20분간 건조한 후 무게를 측정하였다.
- 턴테이블을 이용하여 자동 용접을 할 경우에 비드가 한번 형성되는데 2분 정도의 짧은 시간이 소요되기 때문에 용접 실험을 위해서는 여러 번 용접 위치를 이동해야 되는 불편함이 있다. 이 문제를 해결하기 위해 용접 비드가 [그림 61]과 같이 달팽이 모양으로 형성되도록 실험장치를 특별하게 제작하였다. 이렇게 달팽이 모양으로 용접비드가 형성되면 약 10분간 실험을 실시할 수 있었다.



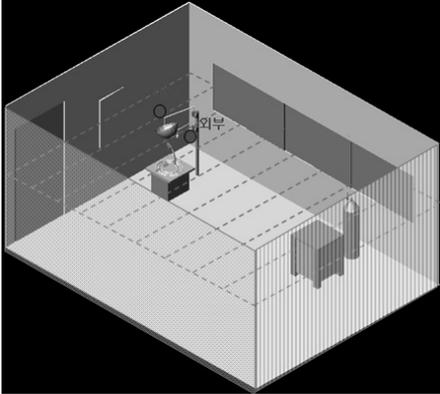
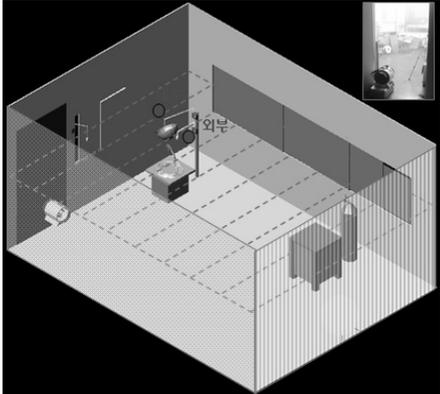
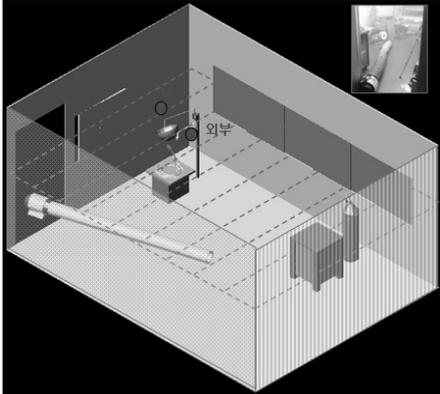
[그림 61] 실험 모재 용접 비드 생성 모습

### 3) 실험 내용 및 방법

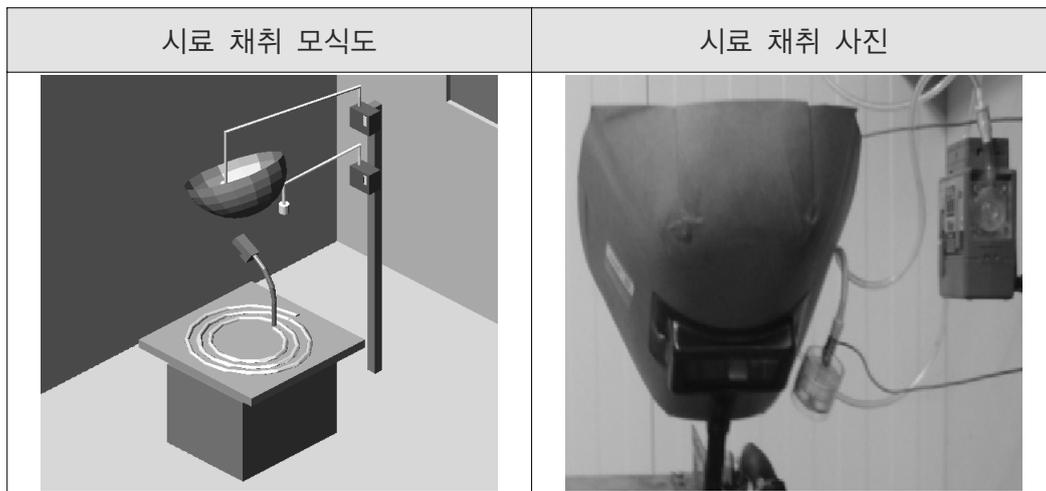
매 실험의 시료포집시간은 10분으로 정하고 시료포집기(Personal air sampler) 유량은 2L/min으로 보정하였다. 실험오차를 줄이기 위하여 매번 실험은 3차 반복하여 그 결과를 평균하여 용접흡 농도와 망간(Mn)의 농도를 계산하였다.

#### ① 환기형태에 따른 용접면 내·외부 용접흡 및 망간 농도 변화

본 연구내용의 실험조건은 [그림 62]에 표시한 것과 같이 동일한 조건 하에서 실시하였다. [그림 62]에서 보면, 밀폐공간에서 환기를 실시하지 않은 경우와 출입문 입구에서 급배기를 실시한 경우, 그리고 플렉시블 덕트를 밀폐공간 내부에서 급배기를 실시한 경우 등 5가지로 구분하였다. [그림 63]는 용접면 내·외부의 흡 및 망간 농도를 측정하기 위한 카세트 홀드 위치를 나타낸 것이다.

환기 방안	환기 방안 모식도
<p>밀폐공간 내부에 환기 없음</p>	
<p>출입문 입구에서 급배기 실시</p>	
<p>플렉시블 덕트를 연결하여 밀폐 공간 내부에서 급배기 실시</p>	

[그림 62] 환기조건에 따른 용접흡 농도 측정 실험 방법



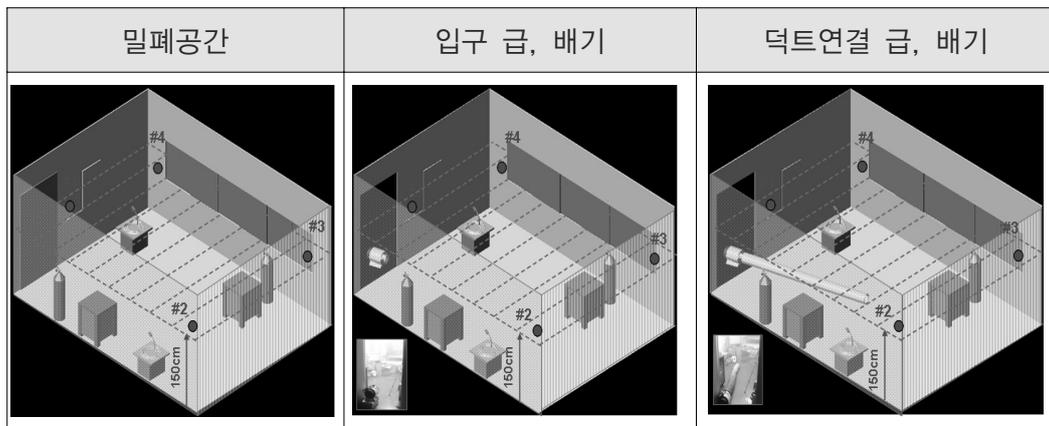
[그림 63] 용접면 내·외부 농도 측정을 위한 카세트 홀드 위치

② 환기 형태별 밀폐공간 평균 흡 농도 분포 측정

용접 작업자 수와 환기 방법에 따른 공간 내부 용접흡 농도 및 분포를 알아보기 위해 용접기 1대 가동 시와 2대 가동시의 공간 내 용접흡 농도를 측정하였다. [그림 64]는 용접기 1대 가동 시 5가지 환기 방법에 따른 실험 조건과 측정 위치를 표시한 것이고 [그림 65]은 용접기 2대 가동 시 5가지 환기 방법에 따른 실험조건과 측정 위치를 표시한 것이다.



[그림 64] 용접기 1대 가동시 실험 조건

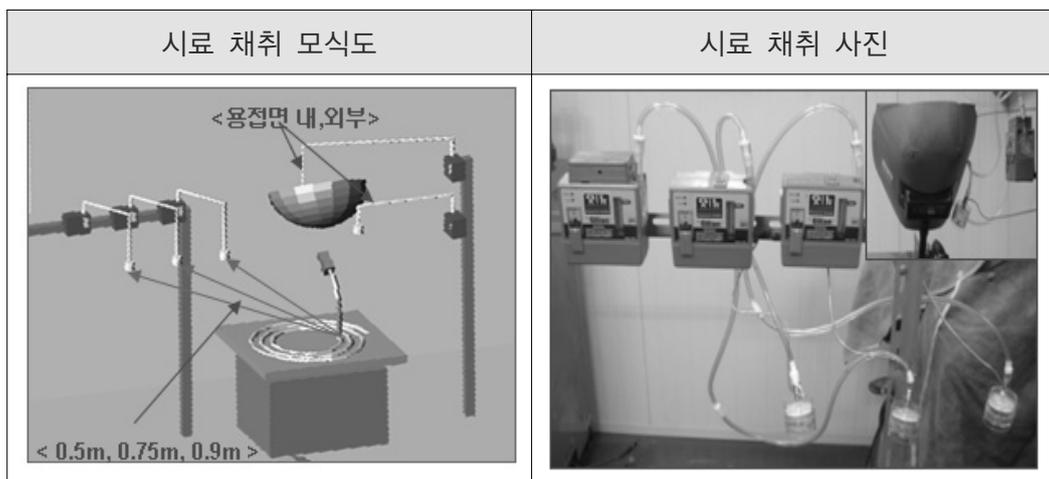


[그림 65] 용접기 2대 가동시 실험 조건

③ 용접지점에서 거리에 따른 용접흡 및 망간 농도 측정

용접지점과 호흡기 위치가 멀어질수록 용접흡에 노출되는 양을 크게 줄일 수 있다는 전제하에, 용접 지점과의 거리에 따른 용접흡 및 망간 농도를 평가하였다.

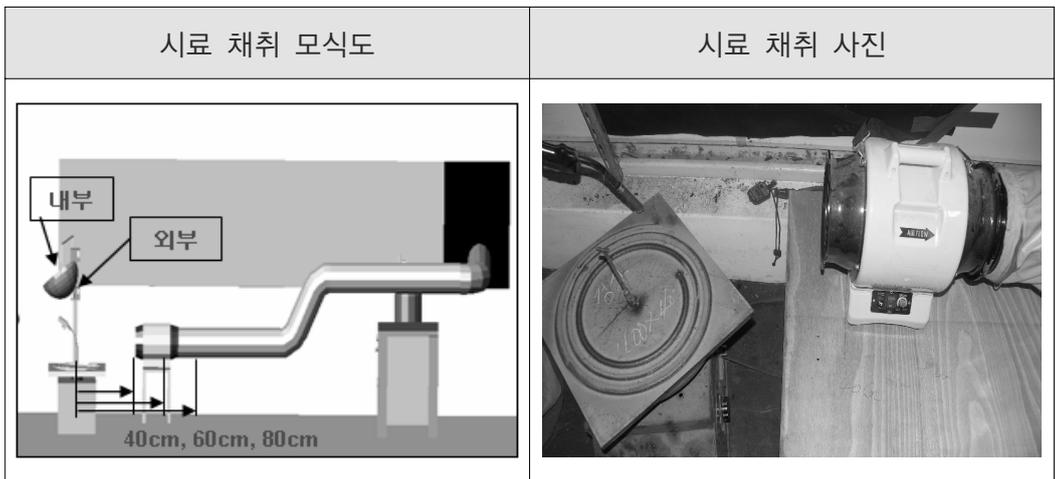
거리는 0.5m, 0.75m, 0.9m로 구분하여 측정하였고, [그림 66]에서 알 수 있듯이 샘플러 3대를 연결하여 각 위치별로 동시에 측정 가능 하도록 하였다.



[그림 66] 용접 거리에 따른 흡 노출량 실험 방법

④ 배기 덕트 위치에 환기 효율 평가

용접흡 환기에 있어 가장 효율적인 방법은 용접위치 근처에 송풍기 또는 플렉시블 덕트를 연결하여 블록 외부로 흡을 배기시키는 방법이다. 하지만, 현장 실험 결과 송풍기(또는 플렉스블 덕트) 위치에 따라서 흡배출량이 큰 차이가 나고, 결과적으로 작업자의 노출량도 큰 차이가 난다. 현재 조선소에서 일반적으로 사용하고 있는 소형 송풍기를 이용한다고 가정할 때, 용접점에서 어느 정도 위치시키는 것이 가장 효율적인지, 아니면 용접점에서 어느 지점 이내에 위치시켜야만 효율적으로 용접흡을 배기시킬 수 있는지 판단하기 위해 [그림 67]과 같이 송풍기 위치에 다른 용접면 내외부 용접흡과 망간 농도를 측정하였다.



[그림 67] 송풍기 위치에 따른 환기 효율 평가 실험 방법

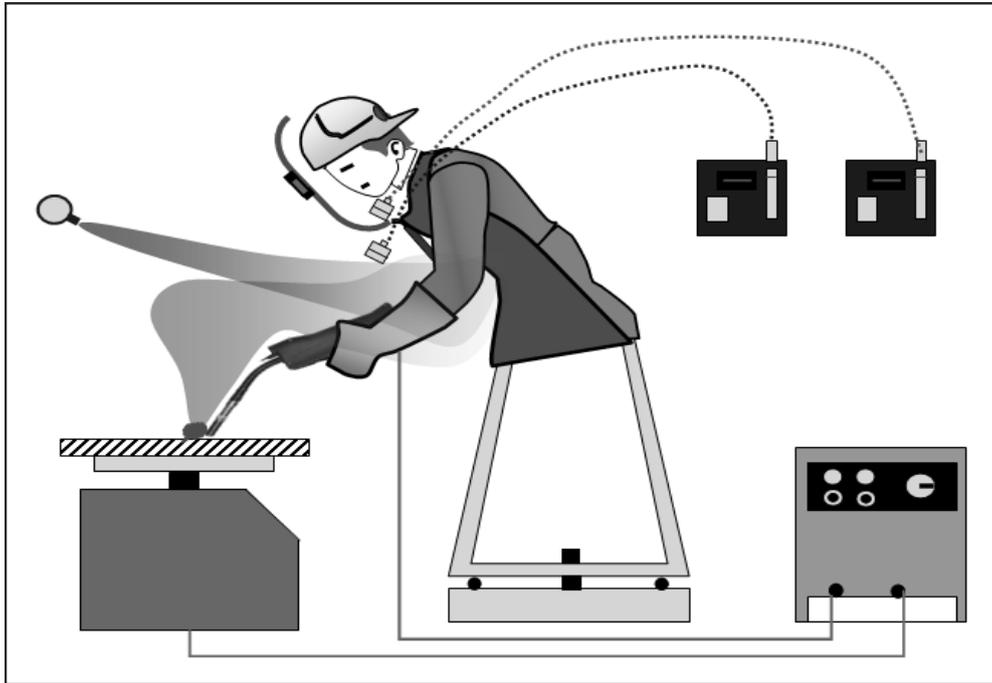
⑤ 고농도 용접흡 차단 방안 적용시 용접흡 및 망간 저감 효율 평가

[그림 57]에서 설명했듯이, 용접점에 발생하는 작업자 호흡 영역으로 상승하는 용접흡에 노출되는 경우가, 노출량 초과와 가장 큰 원인으로 파악되고 있다. 이와 같이 용접점에서 발생된 고농도 흡이 작업자 호흡영역으로 이동하지 못하도록 기류를 이용하여 차단해 준다면, 현재 노출량을 크게 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같이 기류를

차단해 주는 원리를 이용하여 용접면에 기류를 공급하는 방법 ([그림 8] 참조)과 용접기에 공기를 공급하는 방법 ([그림 14] 참조) 등에 대한 연구가 진행되었다. 이중에 용접면에 급기 하는 방법은 용접 흡 저감 효율은 매우 높지만, 에어 공급라인에 의한 여러 가지 문제가 제기 되어 현장 적용성이 떨어지고 있다. 그리고 용접기에서 공기를 공급해주는 방법은 기존 제품은 용접 불량문제로 인해 사용이 불가능하고 기타 제품은 아직 상용화단계 이전에 있어 현장에서 쉽게 적용이 힘든 상황이다.

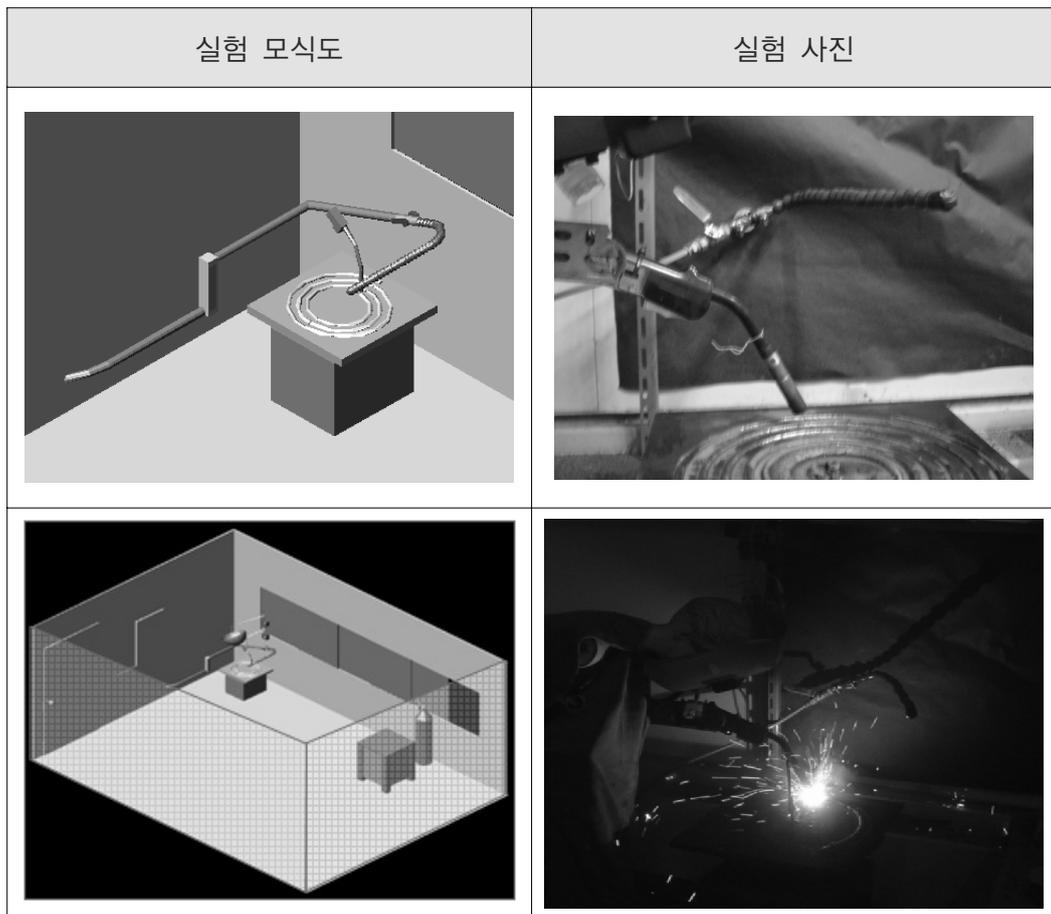
하지만, 예비 조사에 의해 용접흡이 작업자 호흡영역으로 이동하는 것을 차단해 주는 것이 가장 효율이 좋다는 것이 알려져 있기 때문에 기존에 제시된 2가지 방법 이외에, 본 연구팀에서 새로운 용접흡 차단 방법을 고안하여 현장 실험을 실시하였다.

대부분의 밀폐 공간에서는 벽면을 따라 용접을 하기 때문에 벽면에 에어공급 튜브를 부착(튜브 자체를 자석재질로 만들거나 튜브에 자석을 부착하는 방법을 적용)하여 작업자 하체 쪽으로 강한 기류를 공급하는 방법이다. 이 방법은 모든 용접 현장에 에어라인이 있기 때문에 급기 튜브만 작업자가 이동을 하면 되기 때문에 송풍기를 이용한 환기 방법 보다는 작업 불편을 크게 줄일 수 있는 방법이다. 특히, 송풍기를 들고 이동할 수 없는 아주 좁은 지역에서 용접할 경우 이 방법과 블록 외부에서 급기해 주는 방법을 병행 한다면 큰 효과를 거둘 수 있을 것으로 판단된다. [그림 68]는 에어 튜브를 이용한 흡 차단 모식도를 나타낸 것이다.



[그림 68] 에어 노즐을 이용한 흠 차단 모식도

에어 튜브는 직경 25mm인 PVC파이프에 20mm 간격으로 1mm의 구멍을 한 줄로 낸 다음 파이프의 한쪽은 봉합하고 다른 한쪽에는 에어 공급량을 조절할 수 있도록 밸브를 장치하고 고압에어를 공급할 수 있는 호스를 밸브에 연결하였다. 또한 호스라인에 유량계를 설치하여 밸브로 에어노즐에 공급되는 에어의 유량을 임의로 조정할 수 있게 제작하였다. [그림 69]는 에어 튜브를 설치한 모습과 실험 모습을 정리한 것이다.



[그림 69] 에어튜브를 장착한 실험 장치

4) 실험 결과

① 환기 형태에 따른 용접면 내외부 용접흄 및 망간 농도 변화

㉠ 용접흄 차단 효과

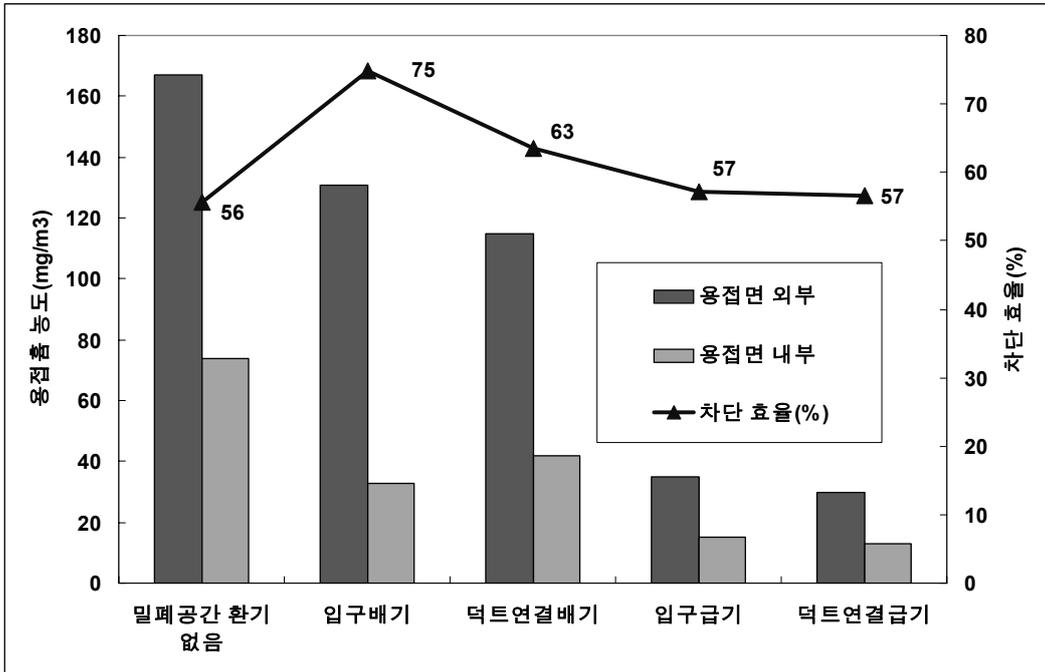
<표 21>은 환기 형태에 따른 용접면 내외부 용접흄 농도를 정리한 결과이다. 용접면에 의한 차단 효율은 모든 조건에서 50%를 넘고 있다. 특히, 5가지 조건을 평균했을 때 용접흄 차단 효과는 62% 정도로 높게 나타났다. 특히, 용접흄 내부 농도가 가장 낮게 측정된 덕트 연결 급기환기일 경우에는 용접면 내부 농도가 13 mg/m<sup>3</sup>에 불과하여

환기가 없는 상황에서 용접면 외부에서 측정된 167mg/m<sup>3</sup>에 비해서는 92% 정도 저감된 농도를 보이고 있다. 물론 현재 실험 조건이 용접점에서 발생하는 흄이 직접 호흡 영역으로 상승하는 조건에서 실험을 하였고, 샘플링 시간도 실제 용접이 진행되는 시간에서만 측정을 하였기 때문에 덕트 연결 급기를 하고 용접면 내부에서 측정을 하여도 용접흄 작업환경 기준을 초과하는 것으로 나타났다.

현장 조사 결과 실제 용접 작업은 총 작업 시간의 40~60% 이고 휴식 시간에는 용접흄에 거의 노출되지 않는 점 등을 감안한다면, 적절한 환기와 용접면 내부에서 샘플링을 한다면 용접흄 노출기준을 충분히 만족할 수 있을 것으로 판단된다.

〈표 21〉 환기형태에 따른 용접면 내외부의 용접흄 농도 측정결과

구 분	용접면 외부 (mg/m <sup>3</sup> )	용접면 내부 (mg/m <sup>3</sup> )	차단 효율 (%)
밀폐공간 환기 없음	167	74	56
입 구 배 기	131	33	75
덕트연결배기	115	42	63
입 구 급 기	35	15	57
덕트연결급기	30	13	57



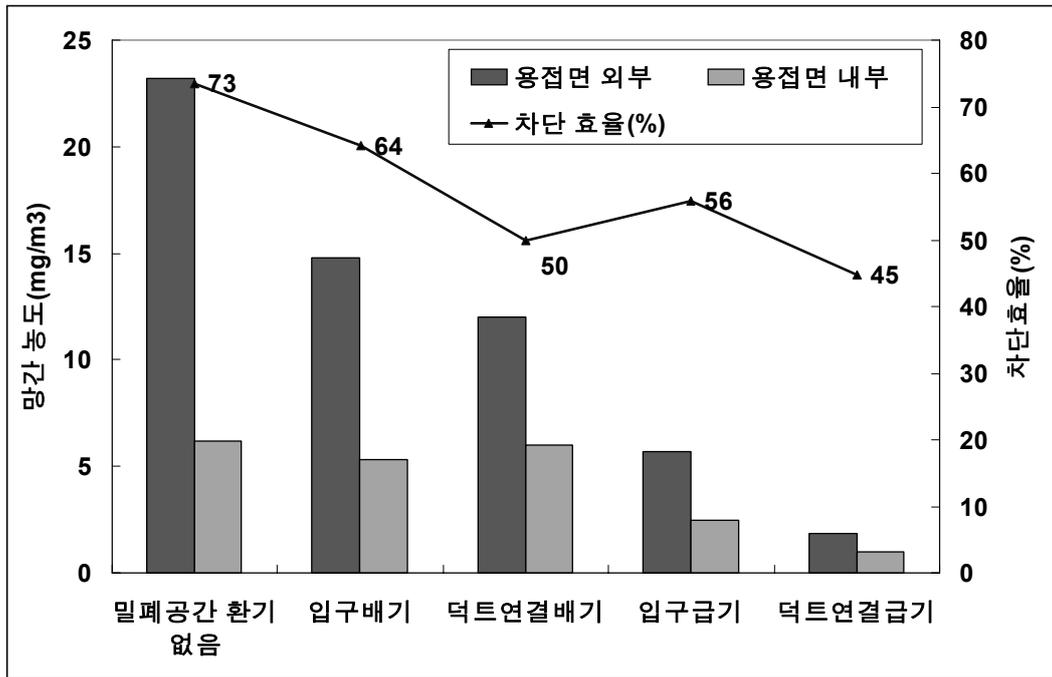
[그림 70] 환기형태에 따른 용접면 내외부의 용접흄 농도변화

㉠ 망간 차단 효과

<표 22>은 환기 형태에 따른 용접면 내외부 망간 농도 측정 결과를 정리한 것이다. 5가지 환기 조건에서 평균 58% 정도의 차단 효율이 있는 것으로 나타났다. 특히, 환기를 실시하지 않는 경우(대부분의 현재 블록 내부 상황)에서는 73%의 높은 차단 효율이 있었다. 환기를 실시하지 않는 경우 용접면 외부 농도가 23.2mg/m³에서 덕트 연결 급기시 용접면 내부 농도는 1.01mg/m³으로 저감되어 95% 정도까지 망간 농도를 줄일 수 있는 것으로 조사되었다. 적절한 환기실시와 용접면 내부에서 샘플링을 한다면 망간 기준을 현재 1mg/m³에서 0.5mg/m³으로 강화시켜도 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

〈표 22〉 환기형태에 따른 용접면 내외부의 망간 농도 측정결과

구 분	용접면 외부 (mg/m <sup>3</sup> )	용접면 내부 (mg/m <sup>3</sup> )	차단 효율 (%)
밀폐공간 환기 없음	23.2	6.17	73
입 구 배 기	14.8	5.3	64
덕트연결배기	12	6	50
입 구 급 기	5.67	2.5	56
덕트연결급기	1.83	1.01	45



[그림 71] 환기형태에 따른 용접면 내외부의 망간 농도변화

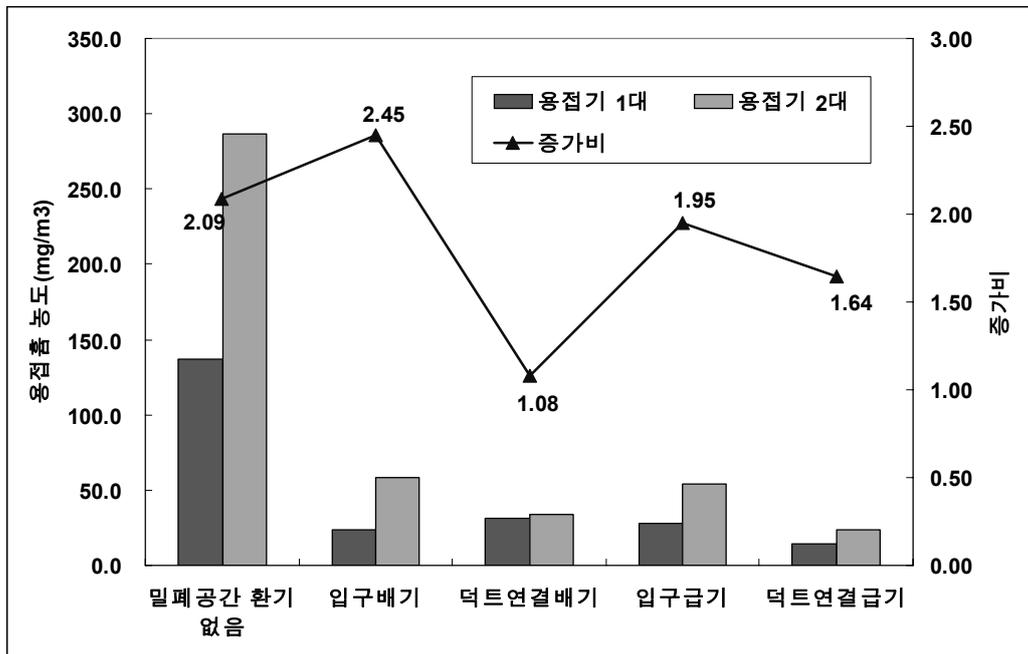
② 환기 형태별 밀폐 공간 평균 흡 농도분포에 따른 변화

용접기 사용 대수와 환기 방법에 따른 밀폐 공간 내부 평균 농도를 측정하여 <표 23>에 정리하였다.

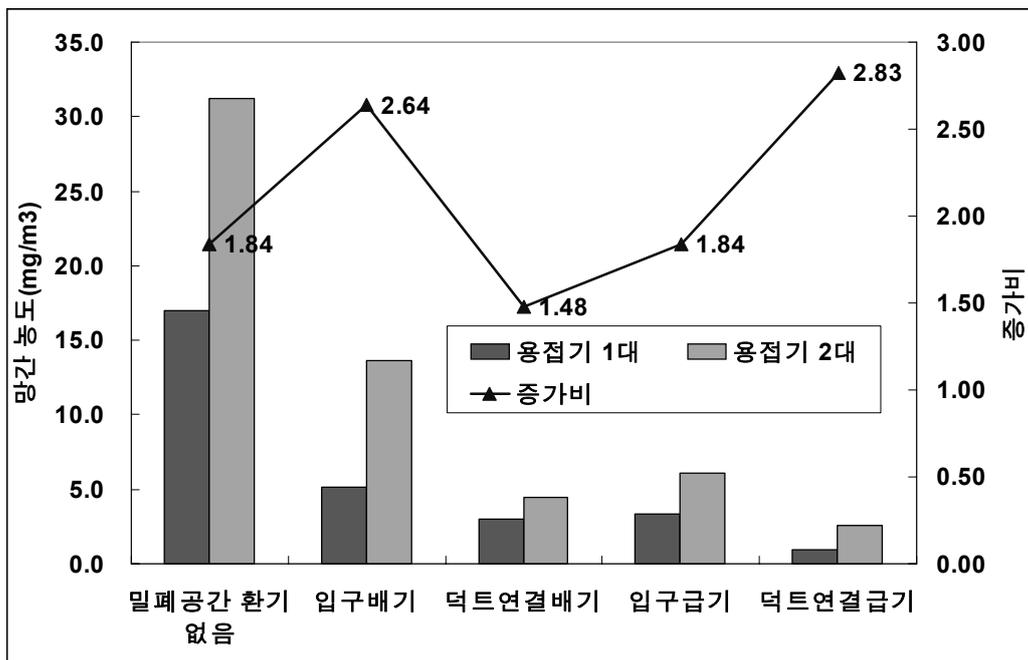
<표 23>를 살펴보면, 환기를 실시하지 않을 경우의 용접흡과 망간 농도가 덕트 연결 급기 조건에 비해 10배 정도 높게 측정된 것을 알 수 있다. 이와 같이 밀폐 공간에서 환기를 실시하지 않을 경우에 블록 내부에 고농도의 흡이 정체되어 용접 작업 시간뿐만 아니라 휴식 시간에도 용접흡에 노출될 우려가 높은데 반해, 적절한 전체환기만 실시하여도 블록 내부 용접흡 및 망간 농도를 크게 감소시켜 주기 때문에 용접시와 휴식시간에 작업자가 용접흡에 노출되는 양을 크게 줄여 줄 수 있는 것으로 나타났다.

<표 23> 용접기 사용 대수와 환기 방법에 따른 밀폐공간 평균 농도

구 분	용접흡 평균농도 (mg/m <sup>3</sup> )		Mn 평균농도 (mg/m <sup>3</sup> )	
	용접기 1대 사용시	용접기 2대 사용시	용접기 1대 사용시	용접기 2대 사용시
밀폐공간 환기 없음	137.3	286.7	16.99	31.20
입 구 배 기	23.7	58.0	5.15	13.60
덕트연결배기	31.7	34.2	3.04	4.50
입 구 급 기	28.0	54.5	3.32	6.10
덕트연결급기	14.3	23.5	0.92	2.60

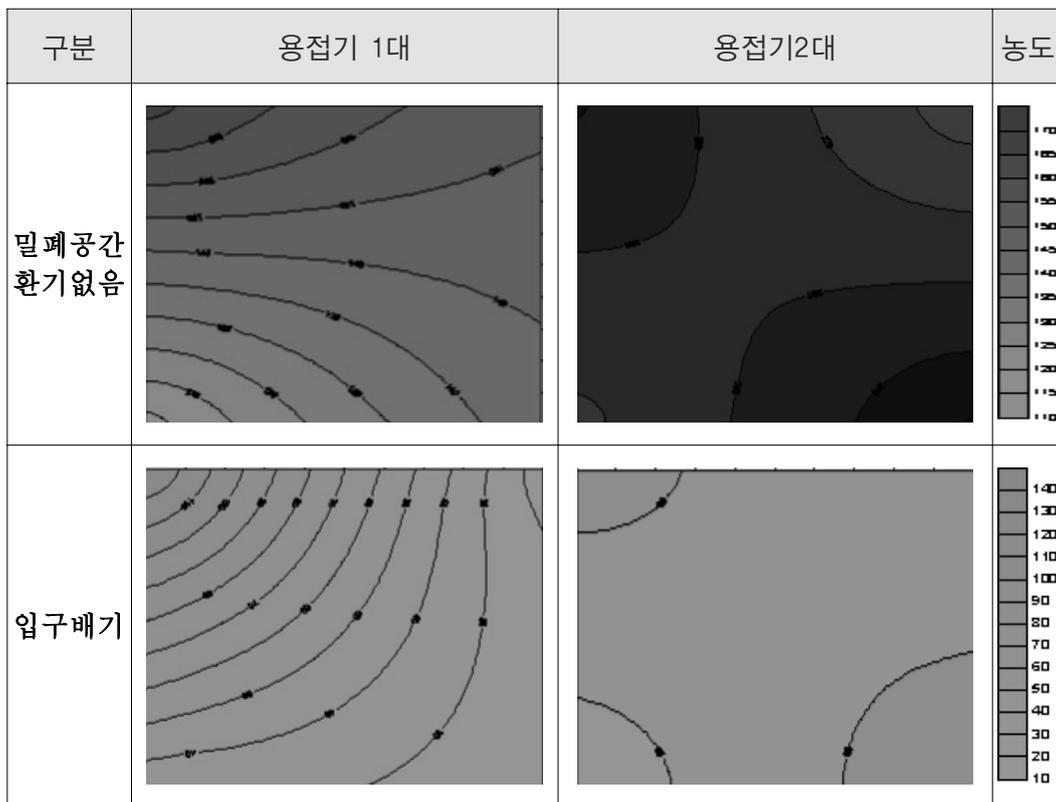


[그림 72] 용접기 대수와 환기 방법에 따른 밀폐공간 내부 용접흡 농도

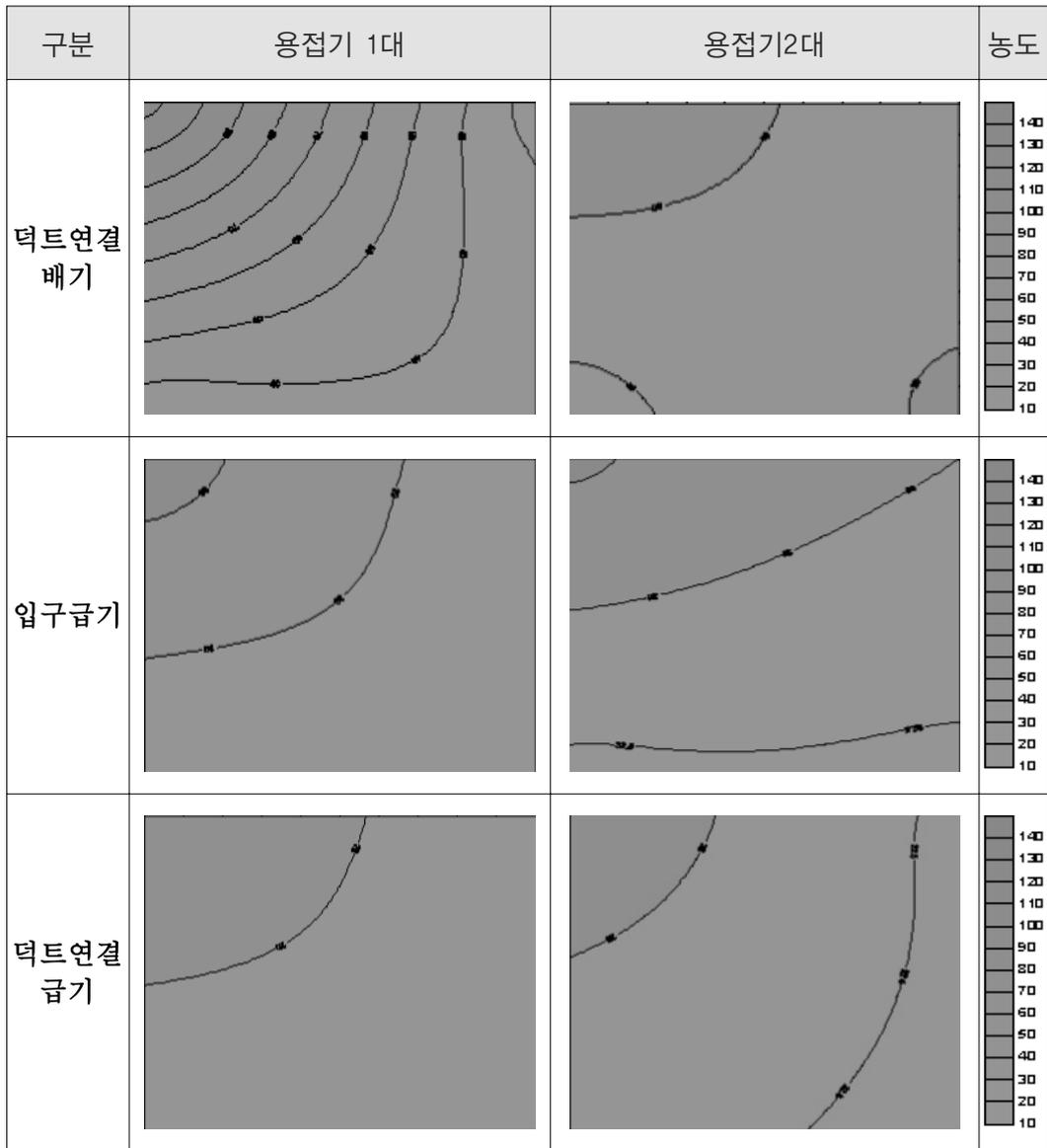


[그림 73] 용접기 대수와 환기 방법에 따른 밀폐공간 내부 망간 농도

[그림 74]은 용접기 대수와 환기 방법에 따라 밀폐 공간 내부의 용접 흡 분포를 정리하여 나타낸 것이다. 환기를 실시하지 않을 때와 환기를 실시할 용접 흡 분포 농도가 명확하게 차이나는 것을 알 수 있다. 특히, 환기를 실시하지 않을 경우에 용접기 1대 일 때보다 2대 일 때 용접 흡 농도가 매우 높지만, 환기를 실시하게 되면 농도 분포에 있어 큰 차이가 없다. 이와같이 밀폐 공간일 경우에는 효율적인 환기를 실시해 줄 수 있다면 가장 좋겠지만, 효율적인 방법을 적용하지 못하더라도, 송풍기를 이용해서 환기를 실시해 주는 것이 환기를 실시하지 않은 것보다 훨씬 효율적이라는 것을 알 수 있다.



[그림 74] 용접기 대수와 환기방법에 따른 밀폐공간 내부 용접 흡 분포



[그림 74] 용접기 대수와 환기방법에 따른 밀폐공간 내부 용접흄 분포 -계속

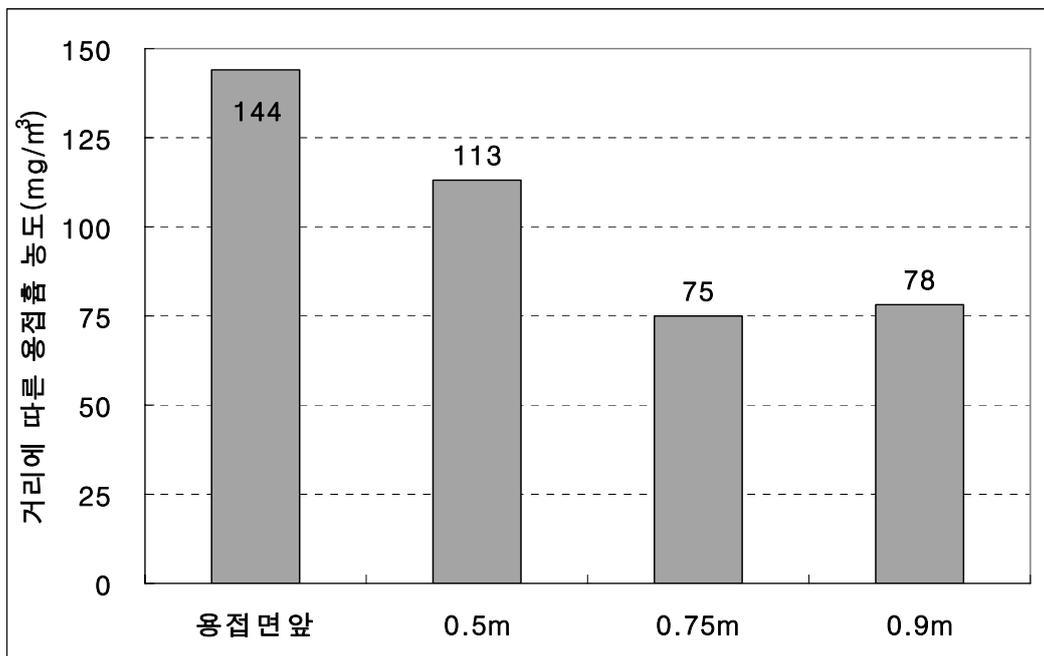
③ 용접지점에서 거리에 따른 용접흄 및 망간 농도 측정

<표 24>은 용접 지점에서 거리에 따른 용접흄 농도 측정 결과를 정리한 것이다. 용접 위치에서 약 75cm정도 떨어지면 용접면 외부 농도의 50% 정도로 낮아지는 것으로 조사되었다. 반 팔 정도 뻗은 50cm 거리

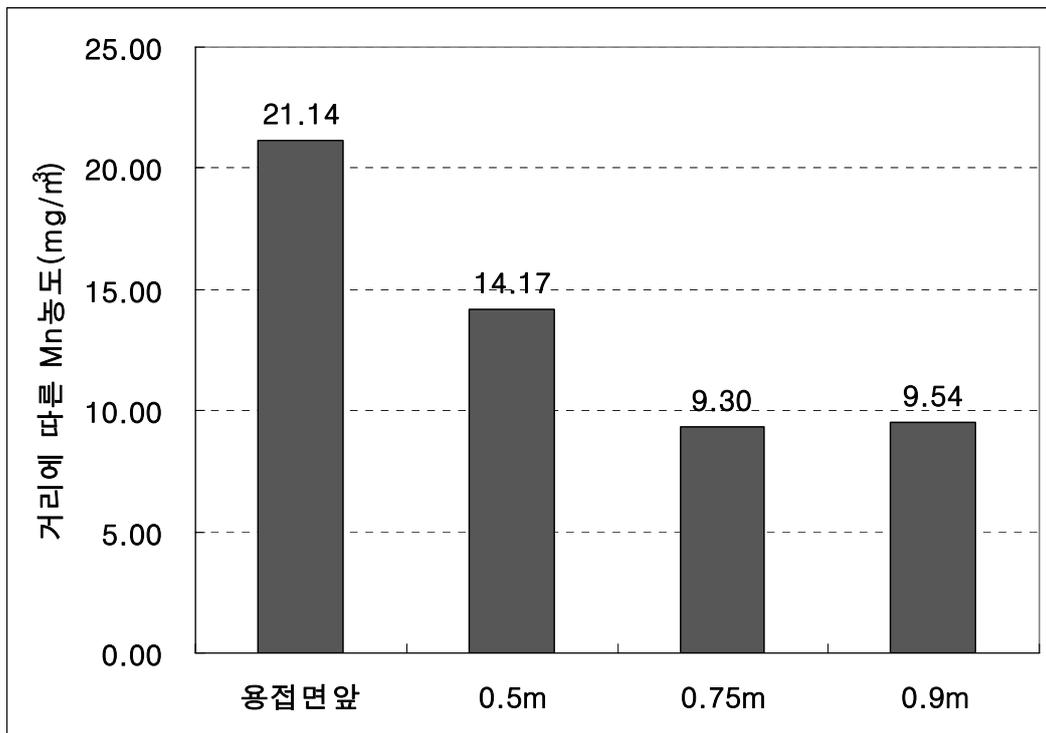
에서도 30% 정도 용접흠 저감 효율이 있는 것으로 파악되어, 작업자가 작업 자세만 잘 조정하여도 흠 저감 효율이 높을 것으로 판단된다.

〈표 24〉 용접지점에서 거리에 따른 용접흠 측정 결과

용접자 위치에 따른 변화	용접면 외부	0.5m	0.75m	0.9m
용접흠 농도 (mg/m <sup>3</sup> )	144	113	75	78
용접면 외부 기준 흠 농도비	100	78.5	52.1	54.2
Mn농도 (mg/m <sup>3</sup> )	21.14	14.17	9.30	9.54
용접면 외부 기준 흠 농도비	100	67.0	44.0	45.1



[그림 75] 용접작업자 위치에 따른 용접흠 농도변화



[그림 76] 용접작업자 위치에 따른 망간 농도변화

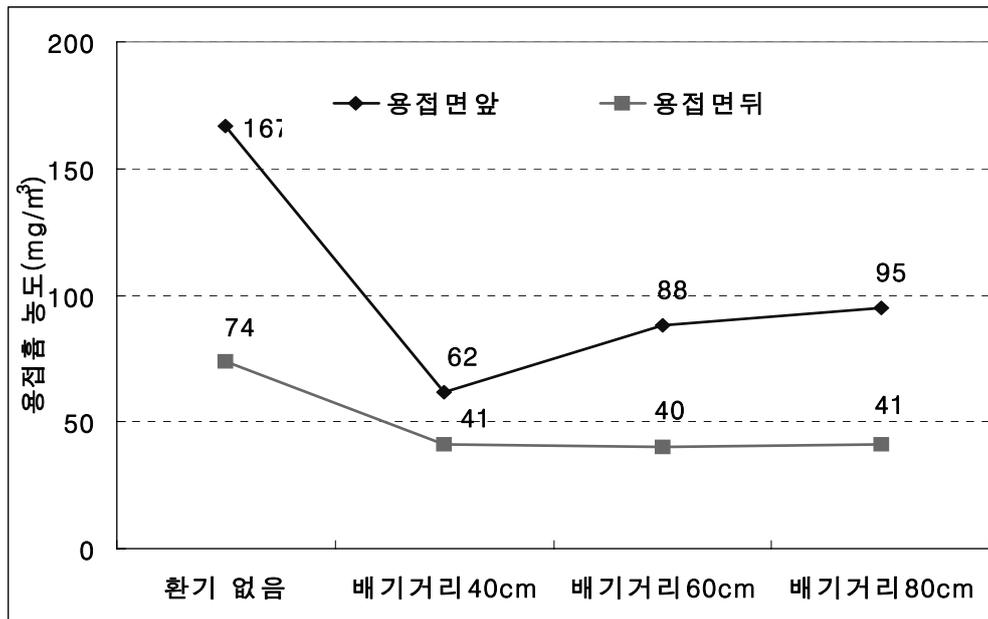
④ 배기 덕트 위치에 환기 효율 평가

<표 25>는 배기 송풍기 위치에 따른 용접흡 농도를 측정된 결과이다. 배기거리 40cm일 때 흡 저감 효율(용접면 외부 기준)은 62.9%, 망간 저감 효율은 68.8%로 매우 높게 측정되었다. 배기 송풍기 위치가 80cm거리에 있어도 흡은 43.1%, 망간은 59.2%의 높은 저감 효과가 있었다.

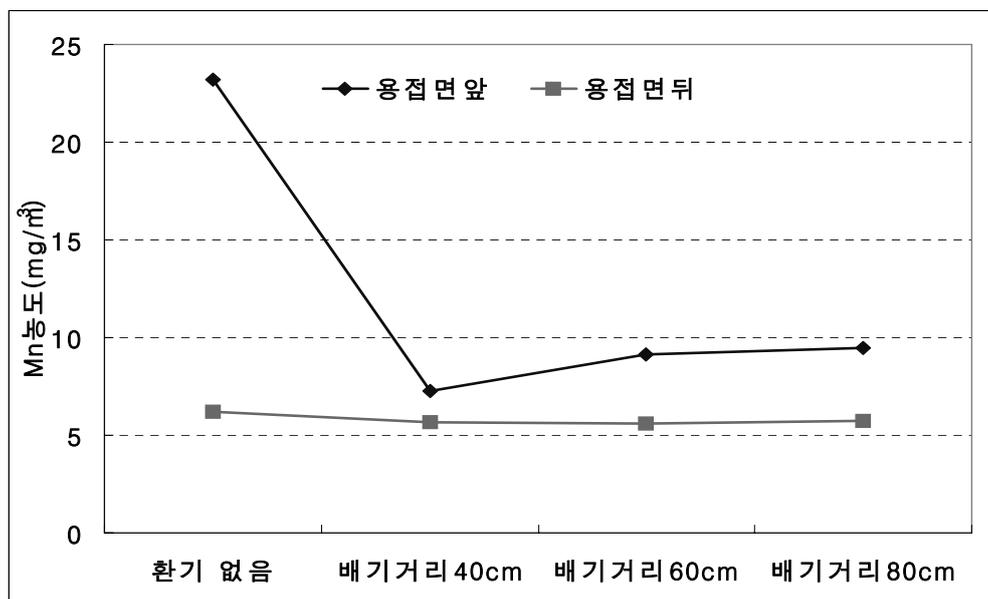
물론 배기 거리는 송풍기 유량에 따라 다르게 나타날 수 있지만, 대략 일반적으로 조선소에서 사용하는 소형 이동식 송풍기의 경우 용접점에서 80cm이내에만 설치하면 40% 이상의 용접흡 노출량 감소를 이룰 수 있다는 것을 알 수 있다.

〈표 25〉 배기 덕트(팬)위치에 따른 용접흄 및 농도 측정 결과

구 분	측정 위치	환기없음	배기거리 40cm	배기거리 60cm	배기거리 80cm
용접흄 농도 (mg/m <sup>3</sup> )	용접면 내부	167	62	88	95
	저감 효율 (%)	0.0	<b>62.9</b>	47.3	43.1
	용접면 외부	74	41	40	41
	저감 효율 (%)	0.0	44.6	45.9	44.6
Mn 농도 (mg/m <sup>3</sup> )	용접면 내부	23.21	7.24	9.14	9.46
	저감 효율 (%)	0.0	<b>68.8</b>	60.6	59.2
	용접면 외부	6.17	5.68	5.58	5.72
	저감 효율 (%)	0.0	8.1	9.5	7.3



[그림 77] 배기덕트 위치에 따른 용접흡 농도변화

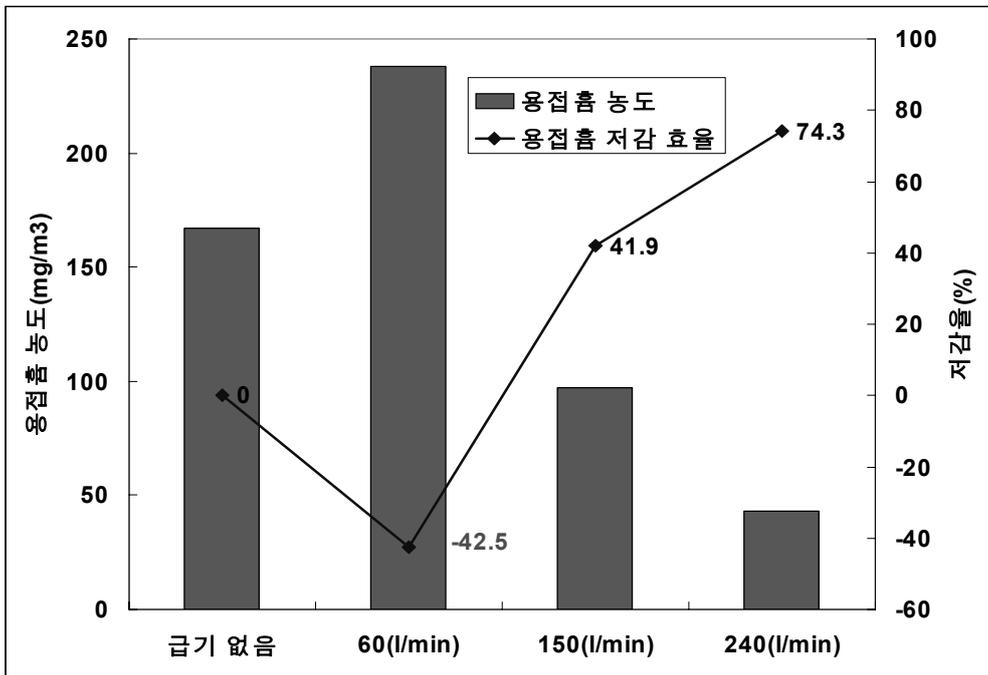


[그림 78] 배기덕트 위치에 따른 망간 농도변화

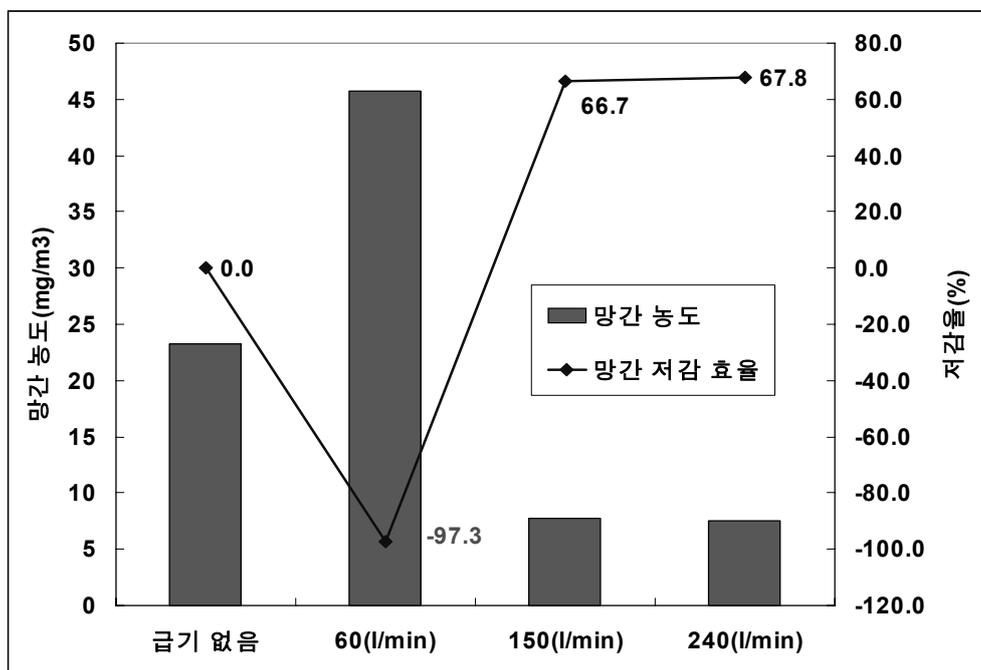
⑤ 고농도 용접흡 차단 방안 적용시 용접흡 및 망간 저감 효율 평가  
 용접점에서 발생되어 작업자 호흡영역으로 이동하는 고농도 용접흡을 차단하기 위해 에어 튜브를 이용한 실험 결과를 <표 26>에 정리하였다. <표 26>을 살펴보면, 급기가 없을 때 용접흡 농도가 167mg/m<sup>3</sup> 인데 반해, 60 ℓ/min유량으로 급기했을 때 용접흡 농도가 238mg/m<sup>3</sup>으로 42.5% 정도 용접흡 농도가 증가하였다. 하지만, 150 ℓ/min이상으로 급기했을 경우에는 41.9%에서 74.3% 정도까지 용접흡 농도가 크게 감소하였다. 이와 마찬가지로 망간 농도도 공기 유량이 적을 경우에는 급기를 하지 않았을 때 보다 증가하였지만, 급기량이 충분할 경우에는 망간 농도가 크게 감소하는 것으로 측정되었다.

<표 26> 에어노즐 분사량에 따른 용접흡 및 망간농도 측정결과

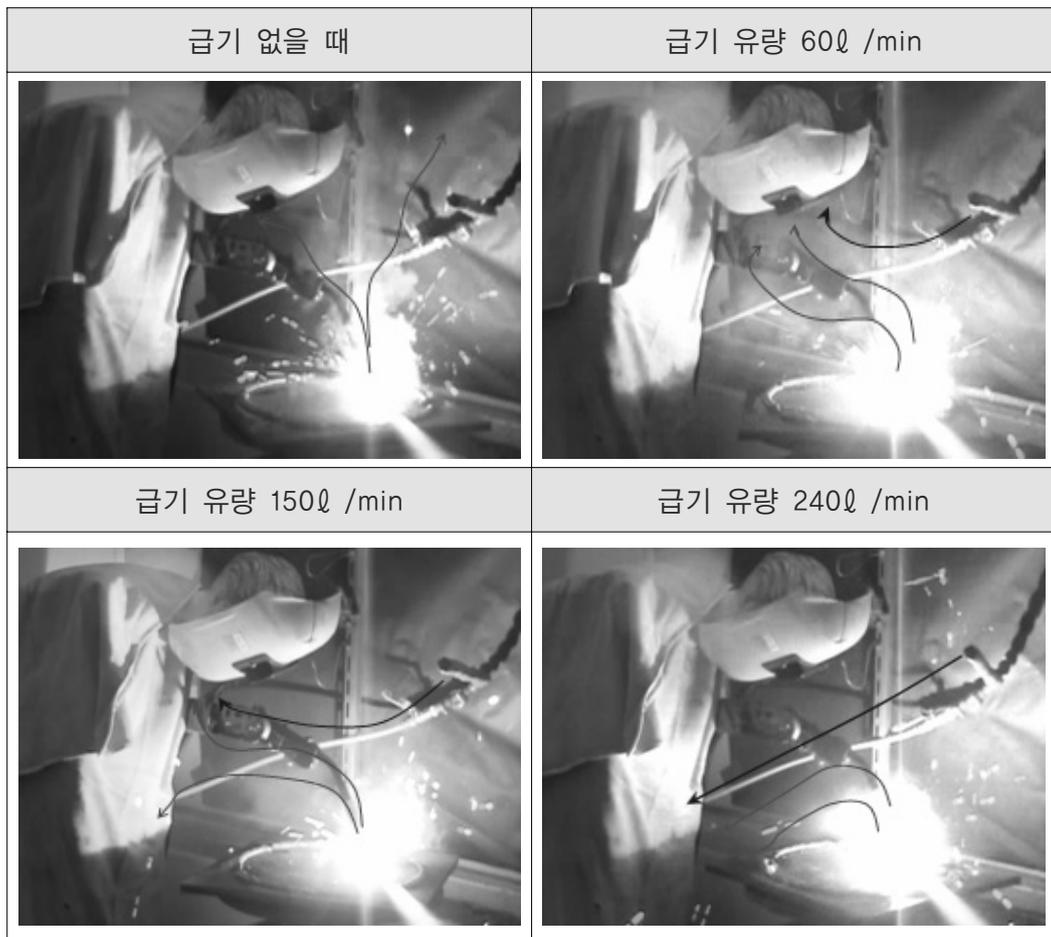
구 분	급기 유량(ℓ /min)			
	급기없음	60	150	240
용접흡농도 (mg/m <sup>3</sup> )	167	238	97	43
용접흡 저감 효율(%)	0.0	-42.5	41.9	74.3
Mn 농도 (mg/m <sup>3</sup> )	23.21	45.79	7.74	7.48
망간 저감 효율(%)	0.0	-97.3	66.7	67.8



[그림 79] 에어노즐 분사량에 따른 용접흡 농도변화



[그림 80] 에어노즐 분사량에 따른 망간 농도변화



[그림 81] 공기 분사량에 따른 흠 거동 분석

[그림 81]은 공기 분사량에 따른 흠 거동을 분석한 결과인데, 급기가 없을 때 용접흠이 작업자 이마 쪽으로 상승하는데 반해, 급기량이 부족한 60ℓ/min에서는 작업자 턱 아래 부분으로 흠이 이동한 것을 볼 수 있다. 즉, 턱 아래 부분으로 이동한 용접흠이 용접면 하부를 통해 작업자 호흡영역으로 더욱 많이 이동하기 때문에 용접흠과 망간 농도가 급기 없을 때보다 높게 측정되었다. 하지만, 급기유량이 충분한 경우에는 급기 기류를 따라 작업자 뒤편으로 원활하게 확산되어, 고농도 용접흠이 작업자 호흡영역으로 상승하지 않는 것을 알 수 있다.

## IV. 고 찰

### 1. 조선업종의 용접흡(망간) 노출 실태 및 기준 강화시 초과율 변동

#### (1) 조선업종 용접흡(망간) 노출 실태

- 국내 5대 조선소 작업환경 측정 결과서를 분석한 결과 대형 조선의 경우 용접흡 19.2%, 망간 6.7% 정도가 노출기준을 초과하였다.
- 경남 지역 소재 중소규모 조선소 7개사의 작업환경 측정 결과서를 분석한 결과, 용접흡 27.5%, 망간 10.7% 정도가 노출기준을 초과하였다.

#### (2) 기준 강화시 초과율 변동

- 망간 노출기준을 현재  $1\text{mg}/\text{m}^3$ 에서  $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 강화할 경우 대형 조선소의 경우 초과율이 9.6%에서 17.4%로, 중소형 조선소에서는 15.0%에서 25.5%로 증가하는 것으로 산출되었다.
- 작업환경 측정 주기와 직접 연관이 있는 기준 2배 초과율은 대형 조선의 경우 2.4%에서 9.6%, 중소형 조선소에서는 0%에서 15.0%로 급증하는 것으로 나타났다.
- 규모별 작업환경 측정결과에서 살펴보면 중소형 조선소의 경우 현재 기준으로 볼 때 망간 초과율은 높지만, 기준을 2배 초과하는 경우는 없는 것으로 나타났다.

## 2. 용접흡(망간) 저감을 위한 기본 방향

현장 실험 및 실험실 실험 그리고 컴퓨터 시뮬레이션 등을 통해 조선업종의 용접흡(망간) 저감 방안에 대한 연구를 수행하였다. 조선업종 용접 작업은 대부분 블록과 같은 밀폐공간 내부에서 진행되기 때문에 용접작업자가 고농도의 용접흡(망간)에 노출되는 원인은 다음과 같이 2가지로 나눌 수 있다.

- ① 용접점에서 발생한 고농도의 흡이 작업자 호흡영역으로 직접 이동하면서 노출되는 것
- ② 블록 내부 전체환기 불량으로 용접 작업 중에 발생한 흡이 블록 내부에 정체되면서 노출되는 것으로 구분할 수 있다.

따라서, 조선업종에서 문제가 되는 용접흡(망간)을 저감하기 위해서는 다음과 같은 전략을 가지고 개선 방안을 수립하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 용접흡(망간) 저감을 위한 기본 환기 방향은 다음 3가지로 나눌 수 있다

- ① 용접점에서 발생한 고농도의 흡이 작업자 호흡영역으로 이동하지 못하도록 적절하게 급기 기류를 이용하여 차단/확산
- ② 배기송풍기 또는 플렉시블 덕트를 이용하여 용접점에서 발생한 고농도의 흡을 직접 배기시키는 방법과 급기에 의한 희석 방법
- ③ 밀폐 공간 내부에 정체된 고농도의 흡은 송풍기 급배기를 이용한 전체환기를 통해 저감 하는 방법

또, 현재 노동부 고시에 따라 용접면 내부에서 용접흡을 샘플링 하도록 되어 있지만, 여러 가지 현장 여건에 의해 대부분 용접면 외부에서 측정값을 작업환경 측정값으로 기록하고 있고, 이 때문에 용접면에 의한 용접흡 차단 효과를 볼 수 없어 실제 작업자의 호흡 영역으로 이동하는 것보다 훨씬 과대평가된 결과 자료를 결과서로 보관하고 있는 실정이다.

실제 용접면에 의한 용접흡 차단효과가 50~70% 정도에 이르는 것을 감안할 때 용접면 내부에서 용접흡 농도를 측정할 수 있도록 기술적인 검토가 필요할 것으로 판단된다. 따라서, 용접흡(망간) 저감을 위한 4번째 저감 방안은 다음과 같다.

#### ④ 용접면 내부에서 용접흡(망간) 측정이 가능하도록 기술적인 개선 방안 수립

이상에서 3가지 형태의 환기 방안과 측정 방법 개선(용접면 내부 측정) 등 4가지 방법을 적절하게 현장에서 조화롭게 운용한다면 현재 용접흡(망간) 노출 농도를 크게 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

또, 망간 농도를 현재  $1\text{mg}/\text{m}^3$ 에서  $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 강화하여도 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

### 3. 환기에 의한 용접흡(망간) 저감 방안

#### (1) 용접점에서 발생된 고농도의 흡이 작업자 호흡영역으로 이동하지 못하도록 적절하게 급기 기류를 이용하여 차단/확산 방안

[그림 27]와 같이 용접흡이 작업자 호흡영역으로 직접 이동할 때 고농도의 용접흡(망간)에 노출되기 때문에 강한 기류에 의한 차단이나 급기 기류에 의한 확산이 효율적인 것으로 나타났다.

밀폐 공간 내부에서 전체환기만으로는 용접점에서 발생되어 상승하는 용접흡 기둥이 작업자 호흡영역으로 이동하지 못하도록 제어가 어려운 것으로 나타났다. 작업자 호흡영역으로 이동하는 고농도 흡을 고압 공기를 이용하여 차단하는 방법으로 공기 급기 기능이 있는 토치와 에어 튜브를 이용한 확산 실험을 실시하였다.

- 용접 토치에 공기 급기 기능이 있는 토치를 이용했을 때 65% 정도의 용접흡 저감 효과가 있었다.
- 용접자 앞 벽면에 에어가 급기되는 튜브를 부착하고 용접자 쪽으로 고압의 공기를 이용하여 240 l/min 유량으로 분사했을 때, 흡은 74.3% 망간 농도는 67.8%가 감소하였다.
- 공기를 분사하는 방법은 송풍기를 가지고 이동하지 않아도 되기 때문에 작업자가 이동하기 쉽고, 겨울철 송풍기 급기에 의한 추위 문제 해소 등 많은 장점이 있기 때문에 현장 적용성을 높이면 충분히 용접흡(망간)저감 방안으로 효과적인 대안이 될 수 있다고 판단된다.

## (2) 배기송풍기 또는 플렉시블 덕트를 이용하여 용접점에서 발생된 고농도의 흡을 직접 배기시키는 방법과 급기에 의한 희석 방법

컴퓨터 시뮬레이션과 현장 실험 그리고 실험실 실험 등을 통해 급배기 방법에 따른 환기 효율을 평가하였다.

- 밀폐공간 또는 제한공간의 경우 용접흡(망간)을 가장 효율적으로 환기시키는 방법은 배기팬을 용접위치에 근접하고 플렉시블 덕트를 이용하여 블록 외부로 용접흡을 배기시키는 방법인데, 현장 실험 결과 85% 정도의 저감 효율을 보이고 있었다.(<표 16>참조)
- 하지만 현장에서 이동하면서 용접을 할 때 플렉시블 덕트를 이용하여 환기시키는 것은 작업자가 많은 관심을 가져야 하는데, 대부분은 소형팬을 블록 내외부에 작업자 임의로 두고 환기를 실시하는 경우가 많다. 이와 같이 블록 내부의 흡 농도를 감소시키기 위해 소형팬을 이용하여 환기를 실시할 경우에 배기보다는 급기가 효과적인 것으로 나타났다. 또, 플렉시블 덕트를 블록 내부에 위치하고 용접위치로 공기를 급기시키는 경우의 환기 효율이 가장 우수한 것으로 조사되었다.
- 실험실 실험 결과 밀폐 공간의 경우 환기를 하지 않을 때보다 환기

(급배기 모두 포함)를 실시할 경우 용접흡 농도가 20% 이내로 급감하고, 특히, 플렉시블 덕트를 이용하여 효율적으로 급배할 경우 환기를 실시하지 않을 때 보다 10% 이내의 낮은 농도를 기록하였다(<표 22> 참조).

- 이상의 결과에서 볼 때 밀폐 공간이라고 하여도 효율적으로 급배기를 실시한다면 현재 환기를 실시하지 않을 때 보다 최소 50% 이상의 용접흡 저감 효율을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.
- 이렇게 소형 송풍기를 이용하여 급배기를 실시하기 위해서는 무엇보다도 개인용 송풍기를 지급하는 것이 우선되어야 한다.
- 개인용 송풍기 보급실태(<표 9> 참조)를 보면 현재 용접 근로자의 50% 정도 보급된 것으로 파악되었다. 따라서, 효율적인 환기를 위해서는 모든 용접 작업자가 개인용 송풍기를 지급 받아서 적절한 환기를 실시할 수 있도록 해야 될 것으로 판단된다. 이를 위해서는 각 조선소에서 용접작업자보다 많은 수의 개인용 송풍기 확보가 우선되어야 될 것으로 판단된다.

### (3) 밀폐 공간 내부에 정체된 고농도의 흡은 송풍기 급배기를 이용한 전체환기를 통해 저감 하는 방법

용접점에서 발생된 고농도의 용접흡이 작업자 호흡영역으로 이동하지 못하게 하여도 밀폐공간내부에서 전체환기가 없으면 작업자가 고농도 용접흡(망간)에 노출되는 것을 막기가 어렵다. 따라서, 블록과 같은 밀폐 공간이 있는 경우에는 반드시 적절한 전체환기가 병행되어야 한다.

- 블록 내부에 환기를 실시하지 않을 경우에 용접자 수가 증가할수록 용접흡 농도는 크게 증가하지만, 환기방법에 상관없이 적절한 유량으로 급배기를 실시해주면 용접자 수가 증가하여도 용접흡 농도는 크게 증가하지 않은 것으로 평가되었다(<표 22>, [그림 68], [그림 69] 참조).

#### 4. 용접면 내부에서 용접흠(망간) 측정이 가능하도록 기술적인 개선 방안 수립

용접면 내부에서 용접흠을 측정할 경우 환기 유무에 상관없이 50~70% 정도의 용접흠 차단 효과가 있는 것으로 조사되었다(<표 14>, <표 19> 참조). 하지만, 용접시 수시로 용접면을 벗고 용접부위를 확인 하는 등의 이유로 인해 용접면 내부에서 용접흠을 측정하는 것이 매우 어렵고, 이 때문에 거의 모든 조선소에서 용접면 외부에서 작업환경 측정을 시행하고 있다.

실제 용접면 내부에서 시료 채취를 한다면 용접흠과 망간 농도를 현재보다 50% 이상 줄일 수 있기 때문에 망간 허용기준을 50% 강화하여도 현재 노출수준을 유지할 수 있고, 약간의 환기만 병행해주면 현재 노출 수준보다 크게 감소할 수 있을 것으로 판단된다. 기술적인 개선 방안은 다음과 같다

##### (1) 용접면 내부 용접흠 측정 방안 개발

- 용접면 내부에서 용접흠을 측정할 수 있도록 용접면 내부 용접흠 측정 방법 또는 용접 흠 측정 전용 용접면 개발이 필요하다.

##### (2) 용접면 내외부 용접흠(망간) 농도 보정계수 개발

- 현재 작업 여건상 용접면 내부에서 용접흠 농도를 측정할 수 없거나 측정 방법 개발에 시간이 많이 소요된다면, 현재와 같이 용접면 외부에서 용접흠(망간)을 측정하고 보정계수를 이용하여 용접면 내부 농도로 보정해 주는 방법을 생각해 볼 수 있다
- 이 방법을 적용하기 위해서는 우선 조선소 각 공정별로 용접면 내외 농도 측정이 우선되어야 하는데, 연구 목적으로 용접면 내부에서 측정할 경우에는 연구자가 작업자를 지켜보면서 용접면 내부에 카세트 홀드가 위치하도록 지속적인 수정이 필요할 것으로 판단된다.
- 이 연구를 통해 보정계수가 개발되면, 현재와 같이 과대평가된 채로 작업환경 측정 결과서를 작성하는 경우도 없어지고, 전체적인 용접흠(망간) 노출량도 크게 감소할 것으로 판단된다.

## V. 결 론

국내 5대 대형 조선소와 경남 지역 7개 중소형 조선소의 용접흡 및 망간 노출 실태를 조사하였다. 현재 용접흡 및 망간 노출 기준을 크게 초과하고 있는 상황에서 망간 노출 기준을 강화하다면 초과율이 급증하는 것으로 조사되었다. 하지만, 현장 환기 실태 조사결과 조선소에서 적극적인 용접흡 및 망간 저감 방안(환기 및 기타 방법)을 수립하지 않고 있는 것으로 판단되었다.

본 연구를 통해 현장 실험, 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험실 실험을 통해 밀폐된 블록이라 할지라도 적절한 환기 시스템을 가동한다면 현재보다 50% 이상의 용접흡(망간) 저감 효율을 거둘 수 있는 것으로 나타났다. 특히, 여러 가지 현장 여건에 의해 용접면 외부에서 측정된 결과를 바탕으로 작업환경 측정결과서를 작성하고 있는데, 노동부 고시에 따라 용접면 내부에서 용접흡(망간)을 측정한다면, 50~70%의 용접흡 저감 효과를 거둘 수 있는 것으로 조사되었다. 용접점에 발생되어 작업자 호흡영역으로 이동하는 고농도의 용접흡을 고압기류나 환기팬을 이용하여 적절하게 차단해 주고, 소형(또는 중대형) 팬을 이용하여 밀폐공간 내부에 급배기를 실시해 주고, 작업환경 측정시 용접면 내부에서 샘플링을 한다면, 현재 작업환경측정 결과서에 있는 노출량보다 최소 50% 이상의 용접흡(망간) 저감 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

다음 내용은 본 연구의 결론 부분을 정리한 것이다.

### 1. 용접흡 저감 방안

조선업종의 용접 작업자의 용접흡(망간) 노출량을 감소를 위한 작업환경 개선 방법으로는 1) 고농도 용접흡이 작업자 호흡영역으로 직접 이동하지

못하게 하고, 2) 밀폐 공간 내부에서 용접흡이 정체 하지 못하도록 전체환기를 병행해야 한다. 또, 작업환경 측정 개선 방법으로는 3)용접면 내부에서 용접흡을 샘플링 할 수 있는 방법 개발 등이 있다.

### 1) 고농도 용접흡이 작업자 호흡영역으로 이동하지 못하도록 차단 또는 환기 실시

: 용접점에서 발생하는 고농도 흡이 작업자 호흡영역으로 이동하지 못하도록 개선할 경우 용접흡 노출량을 50% 이상 저감이 가능한 것으로 나타났다. 고농도 용접흡 차단 및 환기 방안은 다음과 같다.

- ① 용접점에서 발생한 고농도의 흡이 작업자 호흡영역으로 이동하지 못하도록 적절하게 급기 기류를 이용하여 차단/확산
- ② 배기송풍기 또는 플렉시블 덕트를 이용하여 용접점에서 발생한 고농도의 흡을 직접 배기시키는 방법과 급기에 의한 희석 방법

### 2) 밀폐 공간의 전체환기 실시

: 밀폐 공간 내부에 정체되는 흡은 전체환기를 이용하여 환기시키는 것이 가장 효율적이다. 전체환기가 부족할 경우 용접자 수가 증가 할수록 밀폐 공간 내부 용접흡이 급격하게 증가하는데 반해, 적절한 전체환기를 실시하면 용접자 수가 증가하여도 밀폐공간 내부의 용접흡 농도가 급격하게 증가하지 않는 것으로 조사되었다.

### 3) 용접면 내부에서 용접흡 측정 방법 개발

: 현재 용접면 외부에서 용접흡을 측정할 경우 용접흡 농도가 실제 용접면 내부에 비해 2~3배 정도 높게 측정되는 것으로 조사되었다. 즉, 용접흡 측정 위치를 용접면 내부로 변경만 하여도 50~70%의 용접흡 저감효과가 기대되는 것으로 조사되었다. 하지만, 현재 용접면 형태 및 측정 장비가 용접면 내부의 용접흡을 측정하기 부적합하기 때문에 용접면 내부에서 용접흡을 측정할 수 있도록 개선이 필요하다.

## 2. 노출기준 적용성 평가

망간 기준을 현재  $1\text{mg}/\text{m}^3$ 에서  $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 강화를 하여도 적극적인 환기 대책 수립과 용접흡(망간) 샘플링 위치를 용접면 내부로 바꾼다면 노출 기준 초과율은 증가하지 않을 것으로 판단되어, 망간의 강화된 노출 기준 적용은 충분한 가능성이 있다고 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 김태형, 최찬기, 하현철, 원정일. 흡토치 성능 평가에 관한 연구. 한국산업위생학회지 1999;9(2):90-99
- 하현철. 김태형, 김종철, 변세환. 공기분사노즐이 부착된 용접 토치를 이용한 용접흡 제어효율 평가. 한국산업위생학회지 2004;14(1):48-58
- 권호영, 정영석, 최성갑, 조성길. 일반 용접 기술. 형설출판사; 1998.
- 박성기, 정경동, 김두희. 국소배기 장치의 유무에 따른 용접흡 폭로량. 대한업의학회지 1993;5(1): 163-169
- 박용우. 정밀 용접공학. 일신사; 2007
- 변상훈, 박승형, 김창일, 박인정, 양정선, 오세민, 문영한. 일부 업종의 용접 분석 및 폭로농도에 관한 연구. 한국산업위생학회지 1995;5(2):172-183
- 백남원. 용접작업장의 작업환경 개선 대책. 한국산업안전공단 세미나자료; 1989.
- 심광진. 환기시설 효율 향상에 관한 연구. 한국산업안전공단; 1999.
- 오범석, 최병진. 원창출판사; 2006
- 이권섭, 백남원. 용접 작업 형태별 공기중 용접흡 농도와 금속 성분에 관한 조사연구. 한국산업위생학회지 1994;4(1): 71-80
- 이영세, 윤종국, 박종안, 이송권, 채종홍, 김억수. 철강용접자의 크롬 및 망간 노출평가와 산업위생관리 대책에 관한 연구. 2000;10(1):45-57

최호준, 김강윤, 안선희, 박화미, 김소진, 이영자, 정규철. 용접사업장 근로자의  
흡 및 금속 노출농도에 대한 평가와 혈중 금속 농도 1999;9(1): 56-72

한국산업안전공단. 조선업 분진작업지침;1996.

America Welding Society. Method for Sampling Airborne Particulates  
Generated by Welding and Allied Processes. ANSI/AWS F1.1-76

Burgess. Recognition of Health Hazards in Industry, 2nd Ed. New York:  
John Wiley and Sons, Inc.; 1995. p.167-203

Diane Liu, Hofer Wong, Patricia Quinlan, Paul D. Blanc. Welding Helmet  
Airborne Fume Concentrations Compared to Personal Breathing Zone  
Sampling. Am Ind Hyg Assoc J 1995; 56: 280-283

Ojima J, Shibata N, Iwasaki T. Laboratory Evaluation of Welder's Exposure  
and Efficiency of Air Duct Ventilation for Welder Work in a  
Confined Space. Ind Health 2000;38(1):24-9

Jun Ojima. Performance of a Fume-exhaust Gun System in CO<sub>2</sub> Arc  
welding. 2006; 48:207-209

Simcon NJ, Stebbins A, Guffey S, Atallah R, Hibbard R, Comp J. Hard  
metal exposures. Part 2: Prospective assessment. Appl Occup  
Environ Hyg 2000 ; 15(4): 342-353

Tum Suden KD, Flynn MR, Goodman R. Computer Simulation in the Design  
of Local Exhaust Hoods for Shielded Metal Arc Welding. Am Ind  
Hyg Assoc J 1990; 51(3): 115-126

## A study on applicability of exposure standard and improvement of work environment for reducing welding fume (Mn) exposure in shipbuilding industry

Hyun-Chul Ha<sup>1</sup>, Tae-Hyeung Kim<sup>2</sup>, Moo-Ryong Choi<sup>3</sup>, Sung-Chul Park<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Ven-Tech Co.Ltd*

<sup>2</sup>*Department of Environmental Engineering Chang-Won National University*

<sup>3</sup>*Shin-jin consulting*

<sup>4</sup>*DSME*

### 〈Abstract〉

This study was designed to evaluate the status of welding fume (Mn) exposure in shipbuilding industry. It was also evaluated whether Mn exposure standard could be tighten up from the current standard (1mg/m<sup>3</sup>) to the enforced (0.5mg/m<sup>3</sup>). To satisfy this objective, both experimental and computational works were performed in any aspects. The 5 large-sized shipbuilding companies and 7 small and medium sized companies were selected for evaluating the current status of welding fume exposure. The evaluation results showed that the workers's exposure level exceeds the current standard very much. If the standard is further tighten up, the excess level will be much much higher than before. But, it was thought that the companies did not make enough effort to reduce the exposure level, based on the ship yard visit survey about ventilation.

To verify whether there are some methods to reduce the welding fume exposure, the various techniques were applied. First of all, the ventilation efficiencies were evaluated for

the inside of ship blocks (enclosure and/or confined space). The

computational fluid dynamics modelling were simultaneously applied to evaluate the ventilation efficiencies of each control method. The control methods include 1) blocking the welding fume by welding mask, 2) the effective uses of ventilation fans and 3) the new and promising control methods.

Based on the above mentioned works, it is concluded that the enforced welding fume exposure standard could be satisfied if the personal ventilation fans are effectively used and the exposure level is measure inside the welding mask.

Key words : shipbuilding, welding fume, Mn exposure standard, fume(Mn) control, ventilation for confined space,

## 《 연 구 진 》

연 구 기 관 : (주) 벤틱

연구책임자 : 하 현 철 (대표이사, 공학박사, (주)벤틱)

연 구 원 : 김 태 형 (교수, 창원대학교 환경공학과)

최 무 룡 (대표이사, 공학박사수료,

신진보건환경컨설팅)

박 승 철 (사원, 공학석사, 대우조선해양(주))

연구상대역 : 이 광 용 (연구원, 안전위생연구센터)

## 《 연 구 기 간 》

2007. 5. 15 ~ 2007. 12. 14

본 연구는 산업안전보건연구원의 2007년도 위탁연구 용역사업에 의한 것임

본 연구보고서에 기재된 내용은 연구책임자의 개인적 견해이며, 우리 연구원의 공식견해와 다를 수도 있음을 알려드립니다.

**산업안전보건연구원장**

## **조선업종 응접홀(망간) 저감을 위한 작업환경 개선방안 및 노출기준 적용 가능성 연구**

(보건분야 - 연구자료 연구원 2008-4-5)

---

발 행 일 : 2007년 12월 31일  
발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 박 두 용  
연구책임자 : 하 현 철 (대표이사, 공학박사, (주)벤틱)  
발 행 처 : 한국산업안전공단 산업안전보건연구원  
주 소 : 인천광역시 부평구 구산동 34-4  
전 화 : (032) 5100-821  
F A X : (032) 502-7197  
Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>

---

인쇄 : 성문기획(2272-1977)

[비매품]