## 한국건 집인신중 단 산업안전보건연구원

# 한국산업안전공단

## 주물 주강공장 후처리공정 분진처리 시스템

2001 연구보고서

안전분여	냐 -	연구자료	ı î
연구원	200	1-00-00	)()
S-RD-I	-200	)1-00-00	)()

## 제 출 문

한국산업안전공단 이사장 귀하

본 보고서를 산업안전연구 사업의 일환으로 수행한 "주물 공장 후처리공정 분진처리 시스템 개발"의 최종보고서로 제출 합니다.

2001년 12월 일

연 구 기 관 : 산업안전보건연구원 안전공학연구실 연구책임자 손 두 익 (수 석 연 구 원)

공동연구기관: 인천대학교 안전공학과 연구책임자 이 동 호 (안전공학과 교수)

연구원 박종화(석사과정)

## 요 약 문

#### 1. 과 제 명

주물공장 후처리공정 분진처리시스템 개발

## 2. 연구기간

2001년 3월 - 2001년 12월 (10개월)

## 3. 연 구 자

주 관: 산업안전보건연구원 안전공학연구실연구책임자: 손 두 익 (안전공학연구실장 수석연구원)

#### 4. 연구목적

1차년도에 수행한 "주물, 주강공장의 후처리 작업공정에서 발생 되는 분진"에 대한 이론적 연구내용을 실험장치를 통해 성능에 대 한 검증을 실시함으로서 이를 채택하고자 하는 주물.주강 공장에서 의 의사결정을 용이하게 하기 위한 자료제공에 연구의 목적이 있 다.

## 5. 연구내용

< 1차년도 연구내용>

주물, 주강 공장의 보수, 후처리작업에서 발생되는 분진처리 방식은 지금까지의 상방후드 또는 측방후드에 의한 배출방식으로는 10 - 15%의 배출효과 밖에는 얻지 못하고 작업장에 확산되었음. 이를 바닥으로 배출 하는 방식으로 개선하여 발생분진의 90% 이상을 즉시 배출토록 하는 습식처리 방식과 건식처리 방식을 연구 개발하였음.

<2차년도 연구내용>

1차년도의 연구결과를 실제 실험을 통해 검증하기 위하여 1㎡실 험장치 모델을 설계, 제작하여 인천대학교 산업안전공학과 실험실 에 설치하여 실험을 수행하였으며, 분진배출효율 실험을 하기 위하 여 4㎡(2m×2m)의 실험장치를 제작하여 연구원 실험실에 설치하 여 실험을 통해 그 배출효율을 입증하였다.

#### 6. 활용계획

본 연구내용을 사업장에 보급하여 후처리 공정에서 발생, 작업장에 확산된 부유 분진을 제거함으로서 작업환경을 획기적으로 개선코자 함. 또한 이전 등 신규로 설치하는 주물공장의 공장신설 단계에서 본 시스 템을 적용토록 함으로서 Clean Casting Factory (CCF)실현을 유도한다. 이로 인한 기대효과로는;

- 발생되는 분진을 신속히 제거, 직업병 예방 등 건강보호에 기여.
- 깨끗한 작업환경 조성으로 노사분규의 직접적 요인 해소
- 작업기피로 인한 이직방지 및 새로운 일자리 조성
- 주물업종이 제조업의 기반산업으로서의 위치를 회복

## 7. 연구개요

- 분진발생요인 분석 및 거동특성 연구
- 분진처리 방식 개선; 습식방법, 건식방법 검토
- 하방향 처리방법에 따른 설비구조 연구 및 기술적 검토
- 처리방식별 배기성능 모의실험
- 기본모델 부스의 개념설계 및 설치비용 추정

## 8. 중심어

주물, 주강공장, 작업환경, 분진처리, 하방배기, 바닥배출공, 습식처리, 건식처리, 분진의 거동특성, 금속분진, 후처리 목

차
---

제출문 요약문 표목차 그림목차	
제 1 장 1. 연구의 2. 연구내 3. 연구추	서 론
제 2 장	PIV 이론
제 3 장 1. 가시화 2. 실험방	실험장치 및 방법
제 4 장 1. 실험결 2. 고찰…	실험결과 및 고찰
참고문헌 … <부록1: 실호	험관련 사진>23

## 제 1 장 서 론

#### 1. 연구의 배경

기류의 형태와 환기성능과는 밀접한 관계가 있다. 공장 내에서의 공기 유동은 명확히 규정지을 수 없으며, 환기방식에 따라서 각기 다른 흐름 을 유발하여 전체적으로 복잡한 기류장 (氣流場)이 형성된다. 이와 같은 복잡한 공장 내 기류의 전모를 파악하기 위해서는 모형실험, 또는 수치 시뮬레이션 등에 의존하지 않을 수 없다. 하지만 수치계산이 예측기법이 되기 위해서는 아직 해결해야 할 문제도 많고 신뢰할 수 있는 결과를 제공하기 위해서는 실험치와의 비교가 필요하다. 실험적 연구는 실측에 근거한 연구와 모형실험에 의한 연구가 있는데 실측연구는 많은 제약이 따르므로 기류속도나 온도 측정의 용이함, 실험조건의 설정 변경이 용이 함, 실험인자의 제어성 등에서 장점을 지닌 모형실험의 역할이 커졌다. 여기서는 대표적인 몇 가지 조건으로만 모형실험을 실시해서 그 결과를

주물공장의 작업환경 개선을 위한 2000년 연구보고서에서 배기 성능 에 대한 모의 실사를 통해 그 성능을 평가하였으나 비교할 실험결과가 없어 정확도 검증에 어려움이 따르고 있고, 사업장 여건상 시범사업장을 통한 개선효과의 검증이 이루어지지 못했다.

- 1 -

따라서 주물공장 후처리공정에서 발생되는 분진처리 방식으로 바닥 배출방식의 배출특성에 대한 검토를 실시하여 설계의 타당성을 입증하 고 새로운 배출방식에 맞는 최적배출량을 선정하는데 본 연구의 목적과 필요성이 있다.

#### 2. 연구내용

연구의 특성상 주물공장의 1:1 Scale을 대상으로 바닥배출 특성에 대 한 실험이 불가능하므로 본 연구에서는 축소모형실험을 채택하였다. 작 업장내의 후처리 작업시 발생되는 용접 흄 및 부유 분진의 거동을 모사 하기 위한 방법으로 스모크와 주물공장에서 입수된 (분진35µm이하)을 트레이서로 사용하였다. 본 연구에서는 풍량의 변화에 따른 트레이서의 공간벡터를 분석함으로서 물질배출 포착성능에 대한 평가를 실시하였다. 가시화 실험에서는 기상의 스모크와 고상의 분진으로 구분하여 트레이 서로 적용하였으며, high density법을 고상의 경우는 low density법을 가시화의 방식으로 적용하였다. 따라서 종합적인 주물공장 후처리 공정 의 작업환경개선이 이루어질 수 있는 배풍량의 조건을 도출하기 위해 종합적으로 유해물질이 배출 가능한 최소 배풍량 선정을 시도하였다.

모형실험은 상사측을 적용하고 유동장의 해석은 비접촉계측방식인 PIV(Particle Image Velocimetry, 입자영상유속계)실험으로 속도분포를

- 2 -

정성적, 정량적으로 분석하여 새로운 분진배출 방식에 대한 방향성과 효 율성을 제시하고자 한다.

PIV(Particle Image Velocimetry, 입자영상 유속계)는 원리적으로 3성 분의 속도를 동시에 전 영역에 걸쳐 연속으로 계측할 수가 있으며 이 값들을 NS방정식에 대입하여 압력구 배항을 공간적분하면 벽면의 정압 까지를 포함한 순시의 압력장을 구할 수가 있다.

본 연구에서 사용된 PIV system은 기류분포 화상계측의 pattern추적 알고리즘으로 개발된 Flow-Vec32를 사용하였다

#### 3. 연구추진 방법 및 체계

가. 연구추진 방법

- (1) 국내학회 정보 수집
- (2) 국외 문헌조사 및 공장환기 정보수집

(3) 국내(경인지역) 주물/주강 공장을 대상으로 작업방식 및 분진 발생의 정보수집

- (4) 최적 조건을 기준으로 모형모델 제작
- (5) 분진거동 모형 scale 실험
- (6) 배기량별 분진 제어 조건 계산
- (7) 설계타당성 입증 및 검토
- (8) 최적 배풍량 선정

나. 연구추진 체계

(1) 연구형태: 공단과 인천대학교 안전공학과와 협동연구

(2) 역할분담 및 추진체계: 1차 연도의 연구결과를 바탕으로하여 PIV 실험을 통해 분진의 배출성능을 실험하였으며, 모의실험을 위한 장치 제 작은 공단에서 담당하고, 실험 및 측정장비는 인천대학교의 보유장비를 활용하였다.

## 제 2 장 PIV 이론

지금까지의 대부분의 유동장 해석 연구는 컴퓨터를 이용한 수치해석 에 의해 수행되었으며, 컴퓨터 용량이 증가함에 따라 공간분해능이 향상 되고 계산시간이 크게 단축되었으나, 비교할 실험결과가 없어 정확도 검 증에 어려움이 따르고 있다. 실험적 연구에 있어서 LDV나 열선 유속계 와 같은 기존의 점측정(point-wise measurement)방법들은 국부적인 몇 몇 위치에서의 속도 및 압력 값만을 제공하고 있다. 따라서 이와 같은 기존의 계측기법을 이용하여 시간에 따라 변화하는 비정상 유동이나 난 류유동의 공간변화를 해석하고 정확하게 예측한다는 것은 거의 불가능 하다. 따라서 이 문제를 해결하기 위해서는 전체 유동장(flow field)에 대한 유동정보를 시간의 함수로 얻을 수 있어야 한다.

유동장 정보를 가장 손쉽게 얻을 수 있는 방법중 하나가 유동가시화 (flow visualization)이다. 유동장가시화는 전달현상(transport pheno -mena)과정을 가시화 하는 것으로, 속도, 압력, 밀도, 온도 등과 같이 우 리 눈에는 보이지 않는 유동정보의 공간분포를 시간과 공간의 어떤 범 위 안에서 눈에 보이도록 하는 실험방법을 말한다. 유동가시화는 대부분 비접촉 방식으로 유동 자체를 교란시키지 않으면서 어떤 순간의 전체 유동장을 가시화 함에 따라 측정하고자 하는 유동에 대한 공간적인 유 동정보를 제공한다.

- 5 -

유동가시화는 정성적인 유동가시화 기법과 정량적인 유동가시화 기 법으로 나눌 수 있으며, 유동형태(flow pattern) 및 streamline을 눈으로 보거나 사진으로 찍어서 관찰하여 유동장의 정성적 정보를 파악하는 방 법이 정성적 유동가시화 이다. 정량적 유동가시화는 가시화된 유동 영상 (flow image)을 컴퓨터나 video카메라를 이용하여 정량적으로 즉 유체 역학적 정보를 디지털화하여 수치적으로 변환 표시하는 방법을 나타낸 다.

PIV에서 속도를 구하기 위한 기본적인 개념은 임의의 추적입자운동에 요하는 시간 간격 및 벡터 변위 사이의 관계로부터 구해진다.

어느 한 점을 통과하는 추적입자가 미소 시간 간격동안 이동한 미소 직선거리 및 방향을 계산함으로서 이 때 추적입자의 궤적은 직선성과 등간격성을 보장한 상태라는 가정이 있어야 한다. 따라서 입자 유동의 시간 간격 Δt는 이동거리 Δx가 직선형태를 보장할 수 있도록 충분히 작아야 한다.

그림. 1은 PIV의 기본 원리도를 나타낸다.



t<sub>1</sub> 에 서 의 입 자

Velocity vector of X-direction :  $u = \lim_{t_2 \to t_1} \frac{X_2 - X_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta X}{\Delta t}$ Velocity vector of Y-direction :  $v = \lim_{t_2 \to t_1} \frac{Y_2 - Y_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta Y}{\Delta t}$ 

그림. 1 Principle of Particle Tracking Velocimetry

## 제 3 장 실험장치 및 방법

#### 1. 가시화 모델

본 연구의 모델로 채택된 하방 배기 방식의 성능을 PIV로 검토하고자 부스의 규격(5M×5M×4M=100m<sup>3</sup>)을 상사측<sup>(5)(6)</sup>을 이용하여 1/5(1000mm ×1000mm×800mm)로 축소제작 하였다.

모형과 원형간에 물리적 현상이 서로 동일하기 위해서는 기하학적 상 사. 동력학적 상사. 열 수송 및 물질 수송에 관한 상사가 성립되지 되어 야 한다.

기하학적 상사에 있어서, 수리학(水理學)분야 등에서는 수평방향의 축 율(縮率)과 수직방향의 축율(縮率)을 변형시킨 변형모형이 이용되지만, 실험 결과에 대한 해석의 어려움으로 산업환기에 관한 모형실험에서는 수평 방향과 수직방향의 축율을 동등하게 함으로서 변형되지 않은 모형 을 이용하는 것이 좋다. 따라서 축소모델은 기하학적 상사를 만족시키되 축율을 동등하게 하였다.

배기량을 상사시키기 위하여 강제 환기시 무차원 지배인자인 Gr수와 Re<sup>2</sup>의 비인 Ar수를 이용하였다.

본 상사측에는 온도차에 관한 사항과 경계조건의 상사를 무시하였다. 모델과 실제부스의 배기량의 관계는 상사측으로 부터 다음과 같이 구 할 수 있다.

본 실험에 도입된 Ar수는 식 (1)로 표기된다.

$$Ar = \frac{Gr}{RE^2} = \frac{\frac{g\beta H^3 \Delta T}{v^2}}{\left(\frac{UH}{v}\right)^2} = \frac{g\beta H\Delta T}{U^2}$$
(1)

실제모델과 축소모델의 상관관계는 다음의 식(2), (3)과 같다.

$$Ar_{actual} \left[ = \frac{g\beta H\Delta T}{U^2} \right] = Ar_{mod el} \left[ = \frac{g\beta H\Delta T}{U^2} \right] \quad (2)$$

$$\Delta T_m = \Delta T_a \qquad H_a = 5 H_m \tag{3}$$

따라서, 식(2), (3)을 이용하여 축소모형의 배기량을 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$V_m = \frac{V_a}{\sqrt{5}} \tag{4}$$

$$Q_{m} = \frac{V_{a}}{\sqrt{5}} A_{m} = \frac{V_{a}}{\sqrt{5}} \frac{A_{a}}{25} = \frac{Q_{a}}{25\sqrt{5}}$$
(5)

#### 2. 실험방법

본 실험에서 풍량을 제어하기 위한 방법으로 인버터를 사용하였다. 본 실험에 앞서 Fan Tester를 사용하여 인버터로 주파수를 제어하면서 분 진배출 system에 적용되는 팬의 풍량을 측정하였다.

그림. 2는 fan tester로 계측한 결과로서 주파수에 따른 풍량을 나타낸 다. 주파수와 풍량과의 관계식은 최소자승법을 이용하여 1차식으로 정리 될수 있으며 주파수 변화에 따른 표준풍량이 결정된다.

본 실험에서 적용된 실험장치는 주물공장 하방 배기 방식의 성능을 실시간 공간정보로 종합적으로 파악하는데 효과적인 PIV를 적용함으로 서 부유분진 및 흄의 이동특성을 가시화 하였다.



속도장 계측은 유체의 기본물리량을 동시다점으로 계측할 수 있는

PIV(Particle Image Velocimetry)를 이용하였다.

그림. 3은 PIV의 광학적 배치를 나타낸다.

PIV는 입자의 미소 직선 거리 운동을 분석함으로서 속도를 계산하게 된다. PIV의 전제조건인 입자가 그리는 궤적에 대한 직진성과 등 간격 성, 그리고 입자의 등속운동이 보장되어야 하므로 미소시간 Δt 는 매우 작아야 하며 미소 변화량을 계측할 수 있는 장비가 필요하다.

광원으로는 5W의 Ar-ion laser을 사용하였으며 파장은 457.9~514.5nm의 가변 파장이다. 표. 1은 Ar-ion laser의 특성을 나타낸다.

laser에서 발진한 빔은 spatial filter를 통과하면서 확산되고 cylindrical lens를 통과하면서 2차원 단면으로 바뀌게 된다. 이 때 이 2차원단면의 두께는 정확한 유동 분석을 위하여 2mm 이하로 조절하였다.

Wavelength	457.9 ~ 514.5 [nm]	
Output Power	5.0 W, CW	
Matrix	Argon	
Ion	Krypton	
Voltage	208 V	
Efficiency	0.005 ~ 0.02 %	
Cooling System	Water Cooling	
Beam Diameter	1.2 mm	
Beam Divergence	2.0 mrad	

표. 1 Specification of Ar-ion laser

본 연구에서 적용된 PIV 가시화 실험의 알고리즘은 Flow-Vec32를 사용하였다. 그림. 3은 PIV의 광학적 배치를 나타낸다



그림. 3 Optical setup for particle image velocimetry.

그림. 4는 본 실험에 사용된 test section을 나타낸다.



그림. 4 Test section.

표. 2는 상사측에 의한 실제 배기량과 그에 따른 축소모델에서의 배풍 량을 나타낸다.

가시화 실험은 가시화 대상에 따라 high density법과 low density법으 로 나누어서 실험하였다.

또한 국부적 유동특성을 엄밀히 파악하기 위해 배출공이 설치된 바 닥면을 기준으로 상부공간과 하부공간으로 분리하여 가시화 실험을 실 시하였다.

	실 제	축소모델
배풍량(CMM)	1000	17.9
	400	7.15
	180	3.25
	140	2.5

표. 2 실제 배풍량과 상사측이 적용된 배풍량

## 제 4 장 실험결과 및 고찰

## 1. 실험결과

배출규정속도를 기준으로 스모크를 트레이서로 하방배출 실험 결과를 Fig. 4-(1),(2)에 나타낸다. 노동부고시에는 바닥 면에서 2m부근을 1m/s 로 규정하고 있으며 본 연구에서는 작업자 주변(바닥면에서 1.5m부근)의 제어속도를 0.7m/s로 하였고, 상사측을 적용한 제어속도는 0.3m/s로 하 였다



그림. 5 17.9 CMM (실제배풍량 1000CMM)에서의 속도벡터



그림. 6 17.9 CMM (실제배풍량 1000CMM)에서의 유적

실험결과에서 17.9CMM(실제풍량 1000CMM)에서 제어속도를 크게 초 과해 과 풍량 임을 확인하였다.

본 실험에서 최적배출 특성을 규명하고자 이론풍량에서와 그 이하의 조건에서도 충분한 배출특성이 발휘될 수 있는지를 검토하기 위하여 배 풍량을 400, 180, 140CMM으로 낮추어 실시하였다.

그림. 7, 8, 9, 10은 스모크를 트레이서로 사용한 공간벡터와 유적을 나타내며 그림. 11은 분진을 트레이서로 사용한 공간벡터와 유적을 나타낸다.



그림. 7 7.15 CMM (실제배풍량 400CMM)에서의 속도벡터



그림. 8 7.15 CMM (실제배풍량 400CMM)에서의 유적

그림. 7, 8의 결과로부터 이론풍량에서 제어속도를 만족하여 원활한 배출 특성이 나타남을 확인하였다.



그림. 9 3.25 CMM (실제배풍량 180CMM) 에서의 속도벡터 와 유적

그림. 9의 결과로부터 배풍량 400CMM이하의 조건인 180CMM에서는 포착제어속도(0.3m/s)를 만족하지 못하지만 발생 즉시 제거되어 원활한 배출특성이 나타남을 확인하였다.



그림, 10 2.5 CMM (실제배충량 140CMM) 에서의 속도벡터 와 유적

그림. 10은 배풍량 140CMM 조건으로 낮추어 실험한 결과로 상부에 서 선회류가 발생함에 따라 전체적인 배출특성을 나타내지 못함을 확인 하였다.

그림. 11의 분진 배출실험은 그림. 9의 스모크의 배출실험 과는 달리 유동장 상부에서 선회류 발생하여 분진배출이 원활히 이루어지지 못한 결과를 확인할 수 있었다.

- 18 -



그림. 11 3.25 CMM (실제배풍량 180CMM) 에서의 속도벡터 와 유적

## 2. 고찰

본 실험을 토대로 주물공장 후처리 작업 시 발생되는 부유 분진 및 흄을 동시에 배출시키기 위해 배풍량은 180CMM이상에서 가능한 것으 로 나타났으며 추후 다양한 조건의 배풍량을 기준으로 최적조건의 도출 이 가능할 것으로 예상된다.

- 19 -

## 제 5 장 결 론

본 연구를 수행하기 위한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 하방배출 배출 배풍량 400CMM의 조건하에서는 흄 및 분진 동 시 발생시 원활한 배출이 가능함을 확인하였다.

2. 흄을 대상으로 모사된 스케일 실험결과 180CMM미만에서는 효 과적인 배출이 불가능함을 확인하였다.

3. 흄을 대상으로 최소 배풍량은 180CMM이 됨을 밝혔다.

4. 분진을 대상으로 배출성능검토 결과 흄과 동일한 180CMM에서 는 효과적인 배출이 불가능함을 확인하였다.

5. 주물공장 후처리작업을 고려한 최적조건은 400CMM~180CMM 사이에 존재함을 알 수 있었으며 실제로 400CMM보다 낮아질 가능성 을 확인하였다.

- 20 -

	배출효율		
배중당 (CMIM)	스모크(흄)	분진	
1000	0	0	
400	0	0	
180	0	×	
140	×	×	

표. 3 배풍량에 따른 배출효율

## 참고문헌

1. Doo Ik Son. et al, 2001, A Study of Reformation about Working Condition Foundry Postprocess(1), Proceedings of the SAREK summer Annual Conference(II), pp.919~923.

2. K.J. Hammad, M.V. Ötügen, E.B. Arik, 1999, A PIV study of the laminar axisymmetric sudden expansion flow, Experiments in Fluids 26, pp.266~272.

3. J.D. Luff, T. Drouillard, A.M. Rompage, M.A. linne, J.R. Hertzberg, 1999, Experimental uncertainties associated with particle image velocimetry (PIV) based vorticity algorithms, Experiments in Fluids 26, pp.36<sup>~</sup>54.

4. D.H. Doh, 1998, Flow visualization techniques for industrial machines, Technical Lecture Note, Korea Maritime Univ. (Maritime Engineering Research Institute(MERI), 10, 23, Vol.1, pp.289-311.

5. Miung Jo Yoon, 1998, Industrial Ventilation theory and practice ,pp.13~32.

6. Kwang Hyup An. et al, 2000, Visualization of the Air Conditioner Discharge Flow, Proceedings of the SAREK summer Annual Conference(Π), pp.613<sup>~</sup> pp.617.

7. Sang Joon Lee, 2001, PIV/PTV VELOCITY FIELD MEASUREMENT TECHNIQUE -THEORY AND PRACTICE- <부록1: 실험관련 사진>



[사진 1 ] 축소모델 및 CCD Camera



[사진 2] 배기장치



[사진 3] Ar-ion laser 장치 (1)



[사진 4] Ar-ion laser 장치 (2)



[사진 5] Ar-ion laser 장치 (3)



[사진 6] 스모크 분진 사용시 실험(1)



[사진 7] 스모크 분진 사용시 실험(2)



[사진 8] Ar-ion laser 장비



[사진 9] Ar-ion laser 및 광학기기(1)



[사진 10] Ar-ion laser 및 광학기기(2)



[사진 11] 방진 table 및 수압식 인터록 장치



[사진 12] Ar-ion laser



[사진 13] Ar-ion laser 장치 및 test section



[사진 14] fan & inverter



[사진 15] test section









연구과제명 : 주물 주강공장 후처리공정 작업환경개선 연구

연구자료 (연구원 2001 - 00 - 000 )

발 행 일 : 2001년 12월 31일발 행 인 : 원 장 정 호 근연구책임자 : 수석연구원 손 두 익발 행 처 : 한국산업안전공단 산업안전보건연구원주 소 : 인천광역시 부평구 구산동 34-6전 화 : (032) 5100-850팩 스 : (032) 518-0867E - Mail : sondi@kosha.net

인 쇄 처 :