

# 화학물질의 측정결과에 대한 평가방법의 개선

## 1. 목적 및 배경

우리나라의 작업환경 측정은 1960년대에 민간기관에서 처음 도입하여 실시된 이후, 1983년에 산업안전보건법에 따른 관련고시의 마련으로 본격적인 법적 측정체도로 자리를 잡았으며, 그 후 수 차례 수정·보완을 거쳐 오늘날에 이르고 있다. 잘 알려진 바와 같이 우리나라의 작업환경측정체도는 초기에 일본의 노동안전위생법과 관련 고시 등을 근간으로 마련되었으나 1980년대 중반 이후 미국의 개인시료채취 개념이 도입되면서 현재는 일본제도와 미국제도가 혼합되어진 형태를 띄고 있다 (윤명조 등, 1993).

일본의 작업환경측정체도가 측정 측면에서만 보아 우리나라의 기준에 아직까지 남아 있는 것으로는 “단위작업장소”의 개념이 측정 대상작업장의 기본이라는 점과 지역시료채취 방법이 부차적이기는 하지만 없어지지 않고 있다는 점이다. 그러나 전반적으로는 구미의 개인시료채취 방법이 우리나라 작업환경 측정체도의 주요 근간을 이루고 있다고 말할 수 있다.

작업환경 측정결과의 평가에 있어서는, 노동부 고시 (작업환경측정 및 정도관리규정; 노동부, 2001)에서 개인시료채취방법의 경우 미국산업안전보건청(OSHA : Occupational Safety and Health Agency)의 안전보건감독관(CSHO : Compliance Safety and Health Officer) 들이 사용하고 있는 허용기준초과여부를 감시하기 위한 목적의 평가방법을 거의 그대로 적용하고 있다. 그러나 한편으로는 지역채취시료와 단시간채취시료를 허용하고 있으면서도 이들 방법에 대해서는 적절한 평가방법을 정하지 못하고 있다. 또한 지역시료채취결과와 단시간시료채취결과를 장시간 개인시료채취결과와 어떻게 차별화 하여 평가하고 관리할 것인가에 대해서도 뚜렷한 기준의 제시가 없는 실정이다.

작업환경측정·평가의 목적과 실시 방법에 대해서는 국제적으로도 미국의 제도와 같이 개인시료채취와 평가가 보편화되어 있기는 하나, 현재로서는 미국과 일본 제도의 장단점이 어디에서도 학문적으로나 실증적으로 충분히 비교 검증되고 있지 못하다. 또한 이론적으로 완벽한 측정·평가 방법은 어느 나라에도 확립된 것이 없다는 관점에서 볼 때 우리나라 나름대로 통계

적으로 근거를 가진 접근방안을 찾아서 적용하고 이를 지속적으로 개선시켜 나가는 것이 필요하다고 할 수 있다. 10여 년 전에 이미 Ross가 지적한 바와 같이, 한 작업장소에 대해 여러 개의 측정치가 있는 경우 미국 OSHA나 ACGIH 어느 기관도 노출기준을 적용함에 있어 시간가중평균치를 어떻게 적용할 것인가를, 예를 들면 다수의 측정치 있는 경우 이들 전체자료의 산술평균이나 기하평균을 적용할 것인가 또는 여러 측정치의 분포를 고려하여 통계학적으로 계산된 95%수준을 기준으로 할 것인가 등, 이론적 근거를 가지고 충분히 설명하고 있지 못하다 (한국산업안전공단, 1993).

우리나라의 경우 현재 법적으로는 산업안전보건법 제 24조에서 정한 근로자의 건강관리의 목적과 법 제 42조에서 정한 작업환경측정 목적이 상이하여 상당한 혼란이 있기는 하나 작업환경측정이 근로자의 건강을 확보하기 위한 한가지 수단이라는 점에 있어서는 전문가간에도 이의가 거의 없는 실정이다. 따라서 현재로서는 측정결과를 적절히 평가할 수 있는 방법을 우선적으로 정립하여 시행하고 추후에 법적인 제도 정비를 통해 우리나라의 실정에 맞는 작업환경 측정제도를 충분한 시간을 가지고 확립시켜 나가는 것이 필요한 것으로 판단된다.

따라서 산업보건기준에 관한 규칙의 개정예에 발 맞추어 현행 작업환경측정 관련 고시 상에서 화학물질의 측정결과를 평가하는 방법상의 문제점을 파악하고 이의 재정립을 목적으로 이 글을 작성하였다.

## 2. 범위 및 대상

본 보고서는 현행 작업환경측정 및 정도관리규정기준 (노동부 고시 제 2001-39호; 이하 “관련고시”라 함)에 있어서 화학물질의 평가와 관련된 부분을 중심으로 작성되었다. 기타 관련고시 상에서 물리적 인자의 측정과 평가방법에 대해서는 (예를 들면 소음의 측정·평가 부분) 언급하지 않았다.

## 3. 현행 평가방법에 대한 고찰

### 3-1. 관리목표치 설정의 필요성

여기에서 “관리 목표치”란 용어는 작업환경측정결과를 평가하고 관리하고자 하는 경우 통계학적으로 신뢰성 검정에 적용될 수 있는 결정된 신

뢰수준(confidence limit)의 크기를 말하며 이 수치는 측정·평가결과를 바탕으로 한 작업환경관리의 목표를 의미할 수도 있다. 예를 들면 일본의 경우에는 작업환경개선의 목표를 단위사업장 별로 측정된 결과로부터 계산된 95% 상한치(제1관리수준)와 산술평균치(제2관리수준)에 근거를 두고 있으며, 미국 OSHA 감독관의 사업장 감독을 위한 기준은 대개 95% 하한치(1회 측정치에 SAE를 뺀 값)에 근거를 두고 있다.

우리나라의 경우 8시간 동안 1회 측정된 경우와 8시간동안 수회 측정된 화학물질의 평가방법에 대하여는 관련고시에서 미국 OSHA 감독관의 평가방법을 이미 대부분 받아들이고 있기 때문에 묵시적으로는 95% 신뢰수준의 개념이 작업환경관리의 목표치로 적용되고 있다고 말할 수는 있다. 그러나 이는 시간적, 공간적 및 근로자 개인간의 편차를 고려한 일본의 작업환경관리를 위한 통계적 기준과는 매우 다른 것으로 단순히 동일농도(대개는 노출기준의 50%~200%에서 수 회 정도 실시)에 대한 측정·분석오차만을 고려한 것이다. 따라서 95% 신뢰수준에 대한 관리가 국내에서 적용되고 있다고 하여도 어디를 기준으로 95%를 정하고 있는가에 대한 문제에 대해서는 논란의 여지가 있다. 즉 단위작업장소의 여러 측정치들로부터 계산된 평균치와 표준편차에서 계산된 신뢰수준인지, 각각의 결과에 대해 단순한 시료채취 및 분석오차(SAE) 만을 고려한 신뢰수준인지, 또는 최대노출근로자를 기준으로 하고 SAE를 고려한 신뢰수준인지에 대한 개념 정립을 확실하게 해둘 필요가 있다.

앞에서 잠깐 언급된 바와 같이 Ross는 다수의 측정 결과(이 경우의 측정결과들은 시간적, 공간적 및 근로자들간의 편차를 모두 포함하고 있는 것으로 보아짐)를 근거로 작업환경노출기준을 사업장에 적용함에 있어서 다음의 3가지 기준 중 어느 것을 국가가 적용하여야 할 지에 대해 논의하고 있다 (한국산업안전공단, 1993).

- 시간가중평균치들 중 어느 하나도 기준치를 초과하지 않게 관리한다.
- 시간가중평균치들의 95%가 기준치를 초과하지 않게 관리한다.
- 시간가중평균치들의 평균치가 기준치를 초과하지 않게 관리한다.

여기에서 우리나라의 적용에 관해 답을 하기 위해서는, 현행 관련고시 제19조에서 시료포집 근로자수를 결정함에 있어서 “최고노출근로자 2인

이상에 대하여”라는 표현을 쓰고 있음에 주의할 필요가 있다. 이는 Ross가 제시한 위의 3가지 안 중에서 우리나라는 첫째에 가까운 안을 채택하고 있는 것으로 보아야 할 것으로 판단된다. 다시 말하면, 최고노출근로자를 적용토록 함으로써 시간적, 공간적 및 개인근로자간의 차이를 고려한 측정결과와 관리목표(여기서는 기준초과를 선언할 수 있는 “제I관리수준”)를 95%로 정하고 있는 일본에 비해 측정결과와 평가가 엄격하게 이루어지고 있는 것처럼 보인다. 다만 SAE를 기준초과 선언에 적용하도록 함으로써 사실상으로는 최고노출농도보다 다소 낮은 측정치가 노출기준 미만 여부를 판정하는 기준이 되고 최고노출농도보다 다소 높은 측정치가 노출기준 초과만 여부를 판정하는 기준이 되고 있다. 즉, SAE의 값이 대개 노출기준의 15%~30%의 범위에 있으므로 노출기준보다 이 정도 낮은 수치가 기준미만의 판정근거가 되고 노출기준보다 그 정도 높은 수치가 기준초과의 판정근거가 되고 있다고 할 수 있다. 예를 들면 노출기준이 100ppm으로 정해진 톨루엔의 경우 SAE가 0.132이므로 최고노출근로자의 95%신뢰도를 가지는 표준화지수(Y)가 0.868(86.8ppm에 해당)이었다면 노출기준 미만으로 적용을 받게 되고 Y가 1.132(113.2ppm에 해당) 이상이어야만 노출기준초과로 판정을 받게 되는 셈이다.

현재 최고노출근로자에 대하여 SAE를 적용하여 평가하도록 되어 있는 관련고시의 틀을 그대로 유지한다면, 우리나라의 경우 일본처럼 한 단위작업장소에서 다수의 시료에 대하여 평균(기하평균 포함)과 표준편차(기하표준편차 포함)를 적용하고 국가적 관리수준에 따라 평가를 실시하고 있는 일본식 모델을 따르기는 어려울 것으로 보인다. 다시 말한다면 Ross가 제시한 위의 3가지 관리안 중에서 두번째나 세번째 안을 우리나라에 적용하기 위해서는 것은 통계학적 평가의 도구뿐만 아니라 시료의 채취의 시기와 수, 그리고 방법을 크게 바꾸지 않으면 안 된다. 따라서 현행 관련고시의 틀을 바꾸지 않는 경우를 전제로 한다면 최고노출가능 농도와 SAE를 근간으로 관리목표를 설정할 수밖에 없게 된다.

### 3-2. 한일간의 평가방법 비교

앞에서 언급된 관리목표 수준의 설정을 위하여 우리나라 관련고시 상에서 최고노출근로자의 상·하한치와 일본의 관리수준의 관계를 평가방법

비교를 통해 살펴보기로 한다. 사실 이들 변수들의 관계는 노출기준, 측정치의 수, 측정결과의 분포와 편차 등에 따라 매우 상이한 결과를 보이므로 수많은 경우를 검토해야 하지만 편의상 한 단위작업장소를 기준으로 톨루엔에 대해 하루에 8시간을 측정한 경우로 노출기준과 최대치가 100ppm이고 기하표준편차가 2이며 측정근로자의 수가 20인 경우에 대한 결과를 예로 하였다 ([표 1] 참조).

[표 1]. 가상작업장에서의 톨루엔 측정결과에 대한 기술통계 I

시료수 (n)	최대치 (ppm)	최소치 (ppm)	범위 (ppm)	산술평균 (ppm)	표준편차 (ppm)	기하평균 (ppm)	기하표준편차
20	100	5	95	40.0	25.7	32.7	2.0

※ 측정치가 5, 12, 21, 22, 22, 25, 27, 32, 32, 32, 32, 33, 33, 38, 41, 59, 65, 74, 95, 100ppm인 경우의 자료임.

[표 1]의 자료가 원칙적으로 대수정규분포를 한다고 가정하고, 우리나라의 관련고시에 따른 평가를 하여 보면 최고노출 근로자에 대한 수치가 100ppm이고 SAE가 0.132이므로,

$$\text{표준화값} = 100\text{ppm} / 100\text{ppm} = 1.000$$

$$95\% \text{신뢰도를 가지는 하한치} = 1.000 - 0.132 = 0.868$$

$$95\% \text{신뢰도를 가지는 상한치} = 1.000 + 0.132 = 1.132$$

따라서 LCL이 1.0 이하이고 UCL이 1.0 초과이므로 이 작업장은 “노출기준 초과가능”으로 판정된다. 이와 동일한 작업장이 일본의 작업환경 측정기준에 의해서는 어떻게 판정되어지는지 살펴보자.

일본의 작업환경측정기준은 원칙적으로 2일간 측정을 기준으로 하며 하루만 측정을 행한 경우에는 보다 엄격한 기준과 넓은 편차를 적용하도록 하고 있다. 2일 측정시의 관리수준의 구분을 위해 [표 1]의 기하평균( $M_1$

= 32.7)과 기하표준편차( $\sigma_1 = 2.0$ )가 2일간의 측정치로부터 구한 것이라고 가정(1일차의 측정결과와 2일차의 측정결과가 동일하다고 가정한 경우)하고 평가치 ( $E_1, E_2$ )를 구하면,

$$E_1 = 10 \text{ Exp } [\text{Log } M_1 + 1.645 \times (\text{Log} \sigma)] \\ \approx 102.3 \text{ ppm}$$

$$E_2 = 10 \text{ Exp } [\text{Log } M_1 + 1.151 \times (\text{Log} \sigma)^2] \\ \approx 41.6 \text{ ppm}$$

관리농도를 우리나라의 노출기준과 동일하게 100 ppm으로 보면, 결과적으로 이 단위작업장소는 제1관리수준과 제2관리수준사이에 떨어져 관리구분 II(우리나라의 경우의 노출기준 초과가능과 유사)에 해당되나 관리구분 I(우리나라의 경우의 “노출기준미만”과 유사)에 매우 근접한 결과( $E_1$ 이 약 102 ppm으로 관리농도 100 ppm에 근접)를 보이고 있다.

우리나라의 판정기준과 일본의 판정기준을 비교하여 보면 하한치는 일본이 41.6 ppm, 우리나라가 86.8 ppm이고, 상한치는 일본이 102.3 ppm이고 우리나라가 113.20 ppm이 되어 우리나라의 기준이 일본보다 결과적으로 다소 엄격함을 알 수 있다. [표 1]에서 나타낸 바와 같이 이 가상 작업장의 산술평균과 기하평균은 노출기준치에 미치지 못하는 40.0 ppm과 32.7 ppm 임에 주의해 둘 필요가 있다. 여기에서 한가지 언급해두고 싶은 사항은 위의 계산 결과가 기하표준편차가 2.0인 경우를 말하고 있다는 사실이다. 만일 이 작업장의 기하표준편차가 5.0으로 증가한다면 어떻게 될까?

[표 1]과 산술평균치, 기하평균치 및 최대치가 같고 기하표준편차만 2.0에서 5.0으로 증가한 경우 (실제로 평균치의 변화가 없이 표준편차만 증가하는 이러한 경우는 거의 존재하지 않음), 우리나라의 평가 결과는 최대치(100 ppm)가 변하지 않았으므로 하한치가 86.8 ppm, 상한치가 113.2 ppm으로 변화가 없어 여전히 ‘노출기준 초과가능’에 해당된다. 일본의 경우를 앞의 식들에 따라 계산하여 보면 제1관리수준은 461.7 ppm, 제2관리수준은 119.5 ppm이 되므로 이 작업장은 관리구분이 제III이 되고 제1관리수준과 제2관리수준의 편차도 상당히 커지게 된다. [표 2]에서는 동일한 기하평균을 가진 작업장에서 표준편차가 변하는 경우에 일본의 관리수준이 어떻게 달라지게 되는가를 예시적으로 나타내었다.

[표 2] 기하표준편차와 일본 관리수준의 관계 (GM=32,7 ppm; 단위 ppm)

기하표준편차	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
E <sub>1</sub>	102.3	199.3	319.8	461.7	623.2	803.0	1000.3
E <sub>2</sub>	41.6	59.8	85.5	119.5	163.0	217.4	284.5
범위	60.7	139.5	234.3	342.2	460.2	585.6	715.8

※[표 1]과 동일 기하평균인 경우의 가상적 예이며 실제 측정결과는 아님.

[표 2]의 결과로부터 알 수 있는 사실은, 우리나라의 최고노출근로자 기준의 평가는 기하표준편차가 매우 큰 경우 일본보다는 덜 엄격한 기준을 적용 받게 되고 비교적 기하표준편차가 적은 경우에는 일본보다는 다소 엄격한 기준을 적용 받게 되는 것으로 보인다. 그러나 일본의 경우 사업주가 2일간 연속하여 측정을 실시하지 않고 단 1일만 측정을 실시한 경우에는 보다 엄격한 기준과 넓은 오차범위를 적용 받게되므로 (이를 기준으로 실제 계산하여 보면 기하표준편차가 2.0인 [표 1]에 해당하는 경우에는 E<sub>1</sub>이 159.2 ppm이고 E<sub>2</sub>가 51.9 ppm이 되어 제II관리구분에 확실하게 떨어지게 되며, 기하표준편차가 4.0인 경우에는 제1관리구분은 410.9 ppm, 제2관리구분이 106.8 ppm이 되어 제III관리구분에 해당됨) 기하표준편차가 아주 작은 경우를 제외하고는 반드시 우리보다 덜 엄한 기준을 적용 받고 있다고 볼 수는 없다. 다만 [표 2]에서와 같이 측정결과의 기하표준편차가 커지게 되면 최고노출근로자도 따라서 더 높은 농도에 노출될 가능성이 많으므로 우리나라의 평가결과도 “노출기준 초과가능”에 떨어질 가능성을 완전히 배제할 수는 없다.

주지하는 바와 같이 일본의 작업환경측정결과의 평가에서 또 한가지 주목할 사실은 최고노출농도의 개념(소위 B측정의 개념)이 도입되어 있다는 사실이다. 이 개념은 평균치만을 사용하여 작업환경을 평가하는 경우에 있어서 단점을 보완하기 위하여 추후에 도입된 것으로, 최고 노출가능 작업위치에서의 측정치가 관리농도를 1.5배를 초과하는 경우에 있어서는 해당 단위작업장소가 제III관리구분에 떨어지도록 규정하고 있다. [표 1]의 경우를 여기에서 다시 거론하면 최고농도가 100ppm이므로 (이 경우에는 동

일 농도가 지역시료에서도 검출된 것으로 가정) 역시 제II관리수준에 떨어지지만 제I관리수준에 가까운 값(관리농도가 최고농도 미만인 경우:  $C_B < E$ )을 보이고 있다. 일본의 B측정에 따른 평가결과를 적용하여 본 경우는 우리나라의 평가방법이 다소 엄격한 기준에 속하게 된다.

여기에서 한가지 강조하고자 하는 사항은 뒤에서 다시 거론되겠지만 우리나라 작업장의 경우 기하표준편차가 3을 초과하는 경우가 매우 많다는 사실이다. 또한 Conrad와 Soule은 산업위생분야에서 교과서적으로 널리 사용되고 있는 미국산업위생협회(AIHA) 발생 Whit Book(AIHA, 1998)에서 사업장에서 측정된 작업환경측정결과의 기하표준편차는 2~5, 또는 그 이상이라고 정의하고 있다. 따라서 기하표준편차가 큰 작업장의 관리에 있어서 우리나라의 평가방법이 일본의 평가방법보다 엄격하다고 보기는 어렵다.

동일한 작업장의 작업환경측정결과가 일본과 우리나라의 평가방법에 따라 어떻게 달라지게 되고 사업주 또는 근로자 측 누구에게 유리할 지에 대해서는 보다 심도 있는 연구가 있는 후에만 결론지을 수 있는 사항이나, 이 절에서의 결론은 관리목표치가 현행의 최고근로자에 대해 양측검정 90% 신뢰 수준의 SAE를 적용하는 경우 일본의 작업환경 관리수준에 다소 미치지 못하는 결과를 초래할 가능성이 있다는 점이다. 더욱 중요한 사실은 각 단위작업장소에서 최고노출근로자를 시료채취 시 반드시 포함시키는 방안을 반드시 마련하지 않으면 일본보다 훨씬 낮은 작업환경관리기준이 적용될 수도 있다는 사실이다.

### 3-3. 전시간 단일측정에 대한 평가

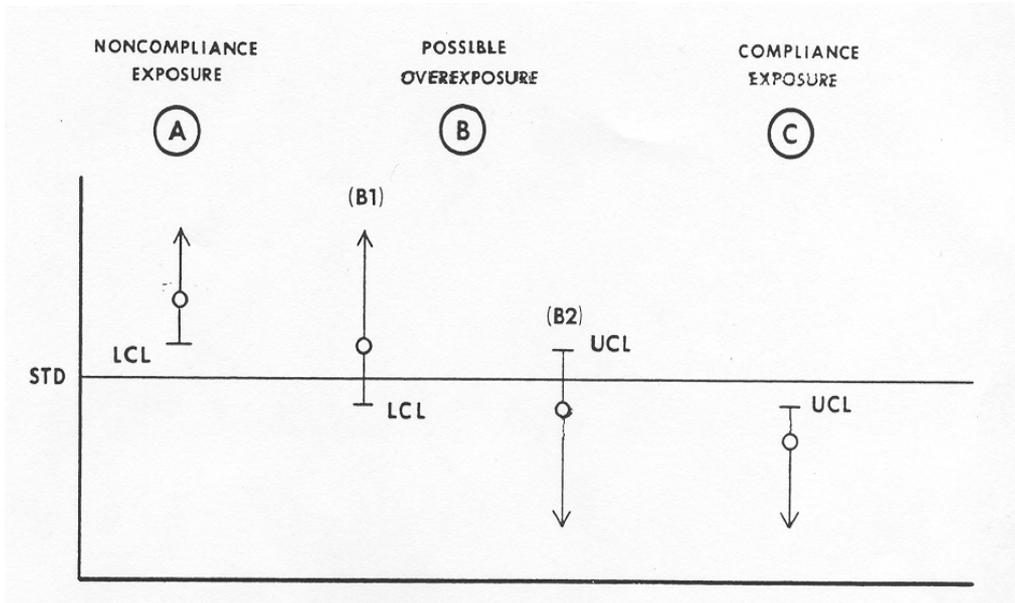
노동부의 관련고시에 정해져 있는 현행의 전시간 단일측정에 대한 평가방법은 미국 OSHA의 산업안전보건 감독관이 사업장에 대한 점검 시에 사용하고 있는 방법을 거의 그대로 준용하고 있다. OSHA 감독관이 사용하는 평가방법은 단 1회의 측정 결과로부터 허용기준을 초과하는 사업장을 적발할 목적으로 개발된 것으로 통계적으로 시료채취 및 분석오차 (SAE : Sampling and Analytical Error)를 적용한다는 면에서 사업장에서 적용하여 할 평가 방법과는 같은 맥락을 유지하고 있다. 다만 OSHA의 감독관용으로는 허용기준 초과여부 판단을 목표로 95% 신뢰도를 가진 하한치 (LCL : Lower Confidence Limit)를 근거로 한 단측검정(one-sided analysis) 실시를 원칙적으로 적용하도록 하고 있으며, 사업장을 관리하는 사업주 (또는

사업주를 대신한 산업위생전문가)에게는 95% 신뢰도를 가진 상한치 (UCL : Upper Confidence Limit)를 근거로 한 단측검정 실시를 권고하고 있다(Liedel et al., 1977).

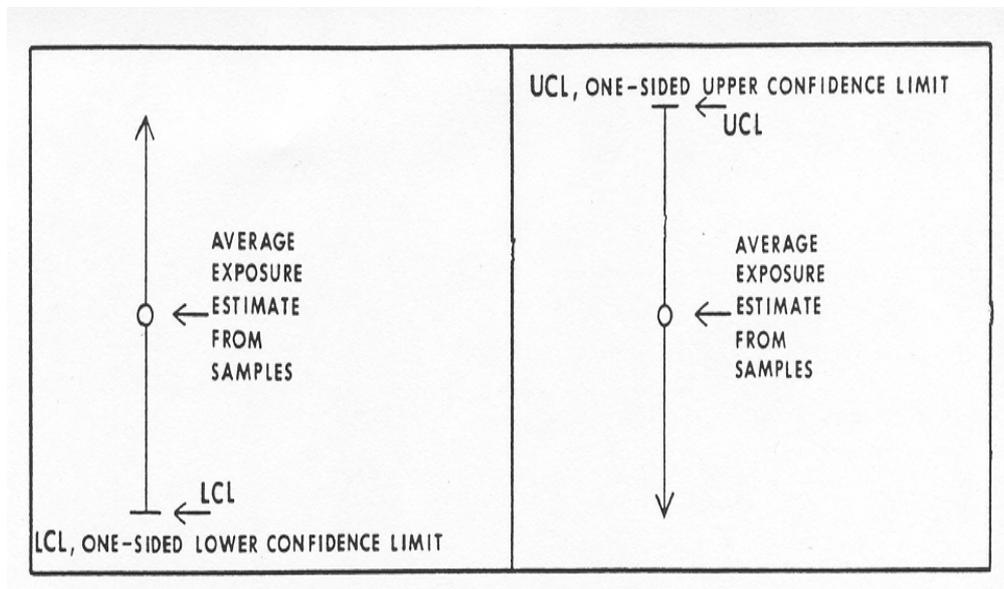
이러한 사실은 양쪽에 5%의 하한치와 상한치를 동시에 설정한 90% 신뢰수준(confidence limit)의 양측검정 (two-sided analysis)과 통계적으로는 크게 다를 바가 없으나 사용 목적은 엄연히 다르다고 할 수 있다. [표 3] 과 [그림 1] 및 [그림 2]에 정리되어 있듯이 사업장을 점검하는 감독관은 LCL하나 만을 사용하여 대상사업자의 기준초과 여부를 SAE만큼의 하향 가능성을 고려하여 확실하게 판정하고, 사업주는 UCL 하나만을 기준으로 자신의 작업장에 대해 SAE만큼의 상향 가능성을 염두에 두고 기준미만 여부를 평가한다는 의미로, 이는 각각 SAE 만큼의 여유를 고려해 둔 별개의 평가방법으로 개발된 것임을 이해해 둘 필요가 있다. 다만 우리나라의 경우는 이들 별개인 양자 목적의 평가방법을 혼용하여 일본식 작업환경관리의 목적과 같은 “노출기준 초과”, “노출기준 미만” 및 “노출기준 초과가능”의 3 개 관리영역으로 구분하여 사용하도록 하고 있다고 보아야 할 것이다. 한편 으로는 미국식 개인노출측정을 적용하면서 다른 한편으로는 일본식의 작업 환경관리 목적(미국의 TM에서도 단일측정 결과에 대한 평가에서는 이런 3 가지 구분을 두어 평가 결과를 설명함)에 측정결과를 활용하고 있다.

[표 3]. UCL과 LCL을 기준으로 한 감독관과 사업주의 평가기준

구분	정의	감독관 적용	사업주 적용	비고
A. 기준 초과	근로자가 허용기준 이상에 노출되었다고 95% 확신.	해당 사업주를 법규의 위반으로 의법 조치함.	사업주가 자율적으로 재측정 실시. 또는 판단에 따라 작업환경 개선도 병행 실시	LCL 기준
B. 판정 불가	기준초과나 기준미만 모두에 해당되지 않는 경우.	감독관 필요시 재측정을 실시. 또는		
C. 기준 미만	근로자가 허용기준 이하에 노출되고 있다고 95% 확신.	사업장에 대한 법적인 조치를 취할 수가 없음.	사업주가 자신의 작업환경에 문제가 없음을 확신할 수 있음.	UCL 기준



[그림 1]. 작업환경 측정결과의 단측검정을 위한 LCL(감독관용)과 UCL(사업주용)



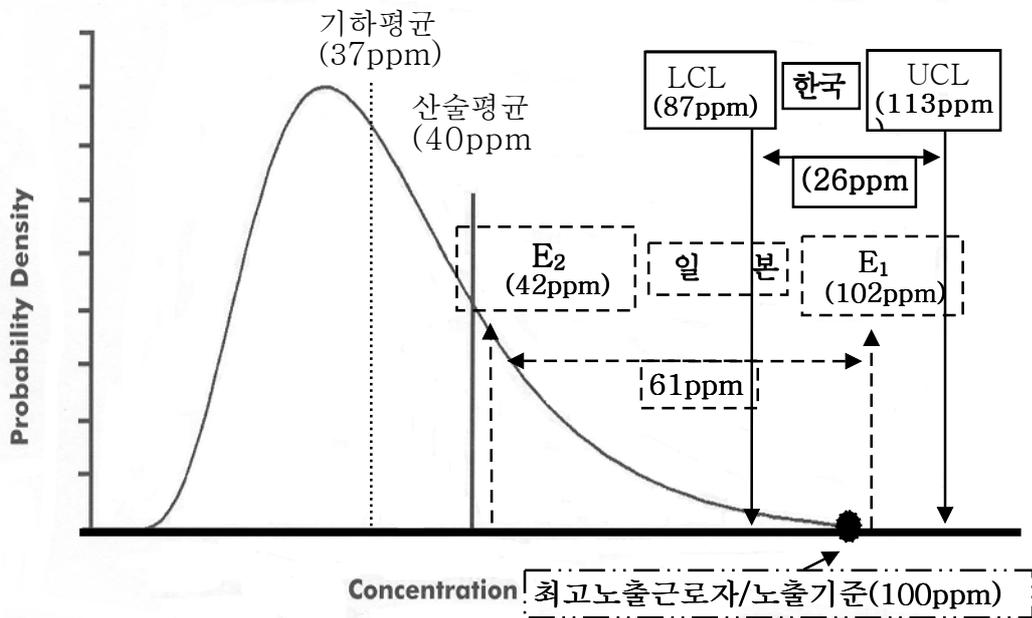
[그림 2]. 단측 신뢰수준을 사용한 작업환경 평가방법의 분류 예시

현행 관련고시 상에서 “상한치≤1일때 노출기준 미만”, “하한치> 1일때 노출기준 초과”라고 정의된 기준이 실제 OSHA의 감독관 기술지침 (TC :Technical Manual)에는 “상한치 <1일때 노출기준미만”, “하한치> 1일때 노출기준초과”로 되어 있는 것도 사용 목적을 혼용한 것에서 연유한 것으로 보인다. 즉 우리나라의 경우에는 실제로는 단측검정인 OSHA 감독관의 평가기준을 양측검정의 개념으로 받아 들이다보니 평가결과가 1과 일치하는 경우를 명확히 하여야만 분쟁의 소지가 없으므로 이를 위하여 상한치 (UCL)가 1과 일치하는 경우가 노출기준 미만의 판정기준에 들어가게 조정된 것이라고 할 수 있다. 엄격히 이야기하면 1을 상한치 기준에 포함시킬 것인가 말 것인가 하는 문제는 소수점의 계산 단위를 충분히 늘려서 판정하면 1과 정확하게 일치되는 경우는 거의 발생하지 않을 것이므로 논의의 대상이 될 수 없는 문제이다. 그러나 굳이 법적인 분란예방 차원의 정확성을 위해서라면 1을 상한치에 포함시켜 평가하도록 한 현행기준도 통계학적으로나 사업장의 작업환경관리 차원에서는 문제가 되지 않는 것으로 보인다.

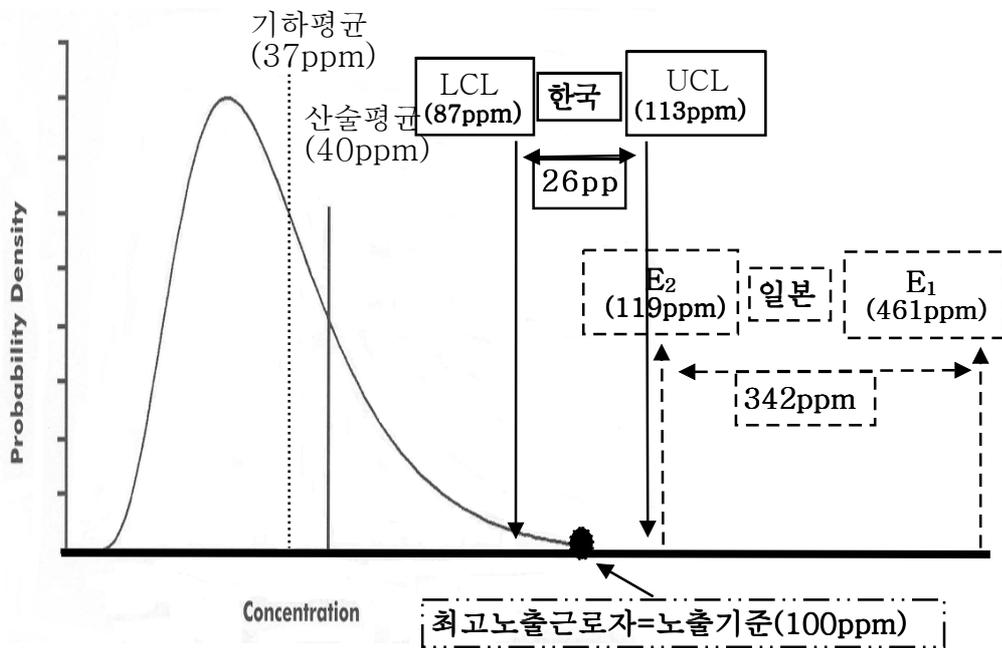
또 한가지 사실은 [표 1]의 예에서 언급된 바와 같이 측정결과의 기하표준편차가 2.0인 경우 일본의 관리수준이 60.7 ppm의 범위를 보이고 있음에 반하여 우리나라의 상·하한치의 범위는 26.4 ppm (SAE의 2배에 해당)을 보이고 있어 2배 정도의 차가 있다는 점이다. 기하표준편차가 3.0인 경우는 우리나라 상·하한치의 범위가 변함이 없는 것에 비해 일본 관리수준의 차는 139.5 ppm으로 넓어지게 된다 ([표 2]참조). 따라서 기하표준편차가 큰 측정대상 작업장의 경우에는 최고노출근로자와 SAE만을 적용하는 우리나라의 경우가 상대적으로 좁은 “노출기준 초과가능”의 작업환경 관리 범위를 가지게 된다. 좁은 환경관리 범위를 가지게 된다는 의미는 표준편차가 큰 작업장의 경우 우리나라의 평가기준에 따르면 자칫 근로자의 건강관리에 불리한 평가결과를 초래할 가능성도 있다는 의미이다. 기하표준편차가 큰 경우 일본의 평가방법에서 따르면 동일한 측정결과에 대하여 우리나라에서 보다 엄격한 판정결과가 나올 수 있다는 앞의 설명도 참조할 필요가 있다. [그림 3, 4]에는 기하표준편차가 2.0과 5.0인 경우를 도식화하였다.

#### 3-4. 전시간 수회측정에 대한 평가

이 경우에도 우리나라의 기준은 OSHA 감독관용의 평가기준을 거의 그대로 준용하고 있다. 즉 시간가중 평균치의 표준화값 (시간가중평균



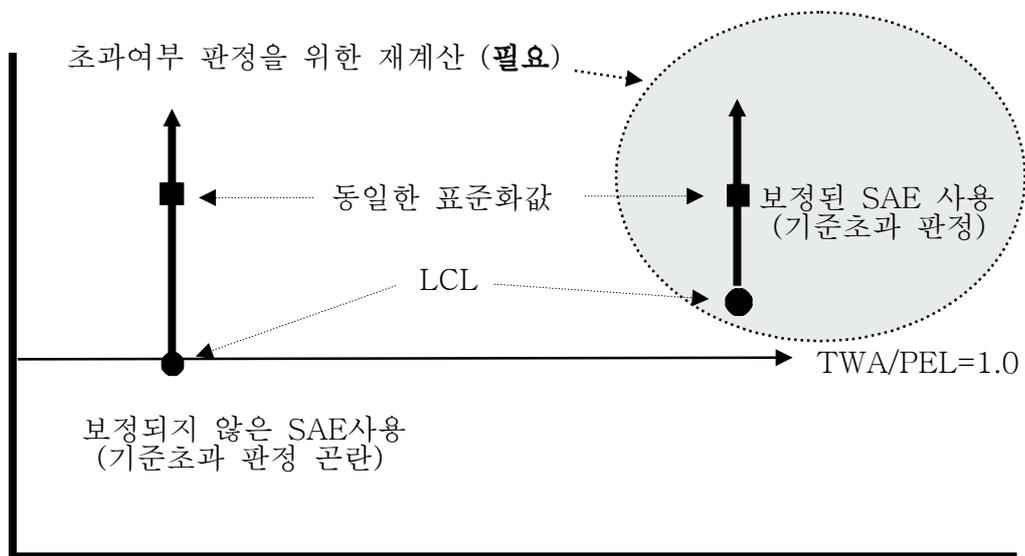
[그림 3]. 기하표준편차 2.0인 작업장에 대한 한·일간의 노출평가 결과



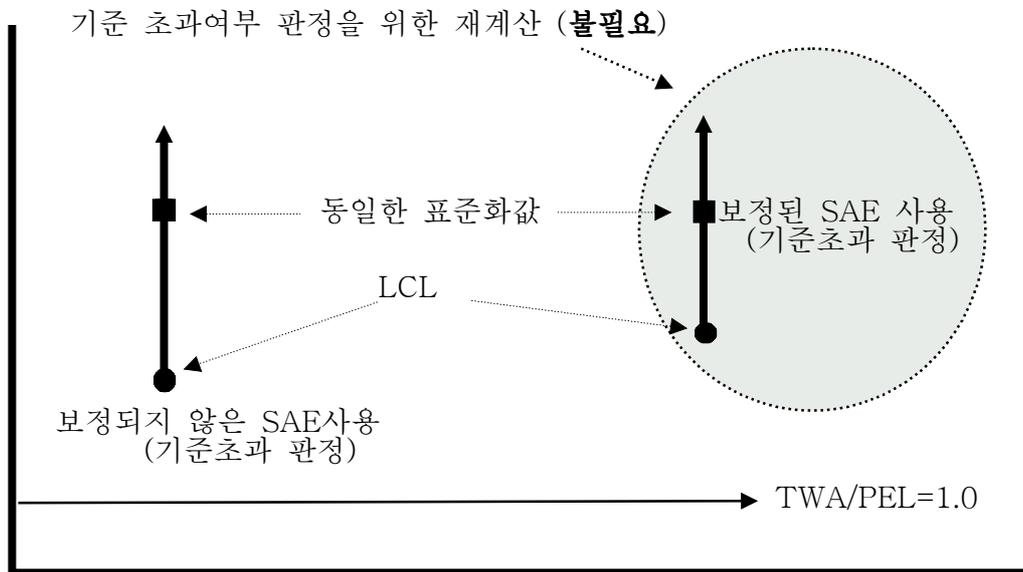
[그림 4]. 기하표준편차 5.0인 작업장에 대한 한·일간의 노출평가 결과

치를 OSHA의 허용기준인 PEL로 나눈 값)에 SAE를 가감하여 평가를 실시하고 있다. 이 경우 관련고시에서 다소 문제가 될 수 있는 부분은 통계학적으로 하지 않아도 될 계산을 우리나라에서는 하도록 하고 있다는 점이다.

OSHA의 TL에 따르면, 감독관은 사업장에 대한 점검에 따른 측정 결과의 평가 시 시간가중평균치와 채취시료의 수 (8시간 동안 여러 개의 측정을 실시한 경우 수) 및 각 측정치의 상대적 농도를 고려하지 않은 단일 측정치에 적용하는 해당물질의 SAE를 먼저 사용하여 기준 초과여부를 판정하되 하한치 (LCL)가 1미만인 경우 보정된 SAE를 사용하여 재판정을 실시하도록 하고 있다. 이 경우 보정된 SAE란 통계학적으로 보정되지 않은 SAE보다  $1/(\text{시료의 수})^{0.5}$ 에 비례하여 대부분 작은 값을 가지게 되므로 감독관은 LCL이 1을 약간 밑도는 경우 보다 정확한 판정을 내릴 필요가 있게 된다 ([그림 5] 참조). 감독관이 보정되지 않은 SAE를 먼저 적용하여 기준 초과를 확실히 결정할 수 있는 경우에는 복잡한 식에 따라 보정된 SAE를 재 계산을 할 필요가 없도록 배려한 것([그림 6] 참조)을 우리는 반드시 별도로 해야하는 것처럼 고시에 규정하고 있다. 여기에서 보정된 SAE의 계산에는 통계학적으로 각 측정치의 상대적 크기와 측정시간도 고려되고 있다.



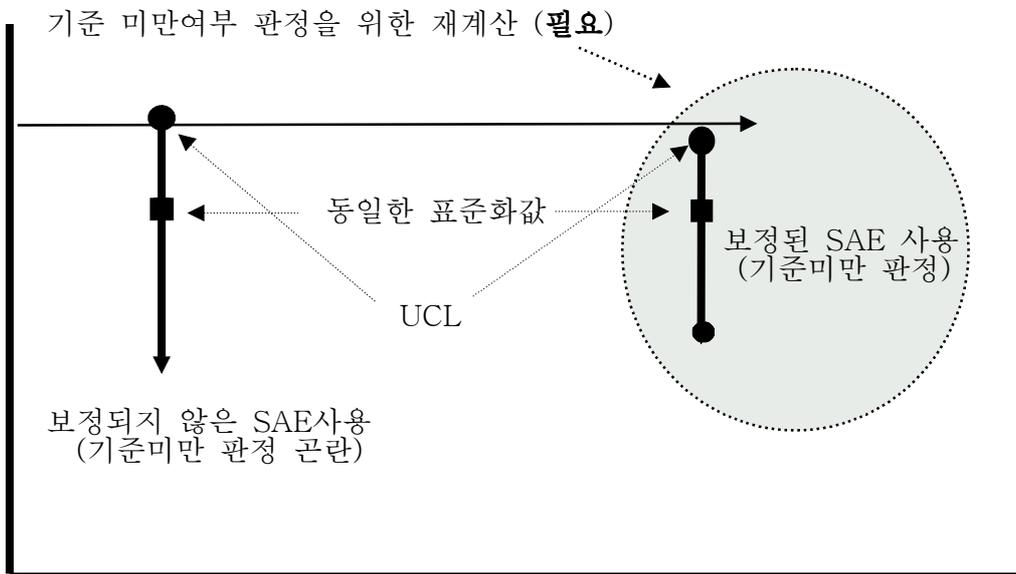
[그림 5] SAE의 보정여부에 따른 OSHA 감독관의 기준초과 판정여부 (LCL이 1.0보다 약간 작은 경우 SAE의 재계산이 필요함)



[그림 6] SAE의 보정여부에 따른 OSHA 감독관의 기준초과 판정여부  
(LCL이 1.0을 초과 시 SAE의 재계산 없이 초과 판정가능)

현행 고시상의 또 다른 문제점은 기준미만으로 판정할 수 있는 평가방법이 정확하지 못하다는 점이다. 즉 보정되지 않은 SAE를 사용하여 “상한치 $\geq$ 1일 때 노출기준 미만”으로 판정하도록 된 지금의 방법이 통계학적으로 정확한 표현이 아니라는 점이다. 즉 보정된 SAE를 사용하여 상한치를 계산하고 이를 기준으로 판정하는 방법을 사용하는 것이 보다 정확한 방법에 해당된다. 보정된 SAE를 사용하는 경우에는 동일한 표준화값에 대하여 상한치가 대부분 낮아지므로 보정되지 않은 SAE를 사용하는 경우(상한치가 1.0을 약간 넘게되는 경우에 해당)보다 사업주에게 유리한 판정결과가 나온다([그림 7]참조).

또한 관련 고시에서는 SAE를 사용하여 수정된 하한치를 계산하는 식은 제시되어 있으나 수정된 상한치를 계산하는 방법이 제시되지 못하고 있다. 따라서 작업환경관리를 위해 우리나라에서 일본식으로 구분한 “노출기준 초과”, “노출기준초과 가능” 및 “노출기준 미만”의 관리구분이 의미를 잃고 있다. 보정된 SAE를 사용한 상한치의 계산은 8시간에 단 1개의 시료를 채취한 앞에서의 경우처럼 표준화값에 보정된 SAE를 더해주는 방법으



[그림 7] SAE의 수정여부에 따른 사업주의 기준미만 판정여부  
(UCL이 1.0을 약간 초과 시 SAE의 재계산으로 기준미만 판정가능)

로 어렵지 않게 통계적으로 계산이 가능하다. 8시간동안 다수시료의 채취를 사업장에 권장하기 위한 측면에서도 보정된 SAE를 사용한 상한치의 계산이 꼭 필요하고 판단된다.

### 3-5. 일부작업시간 만을 측정한 경우

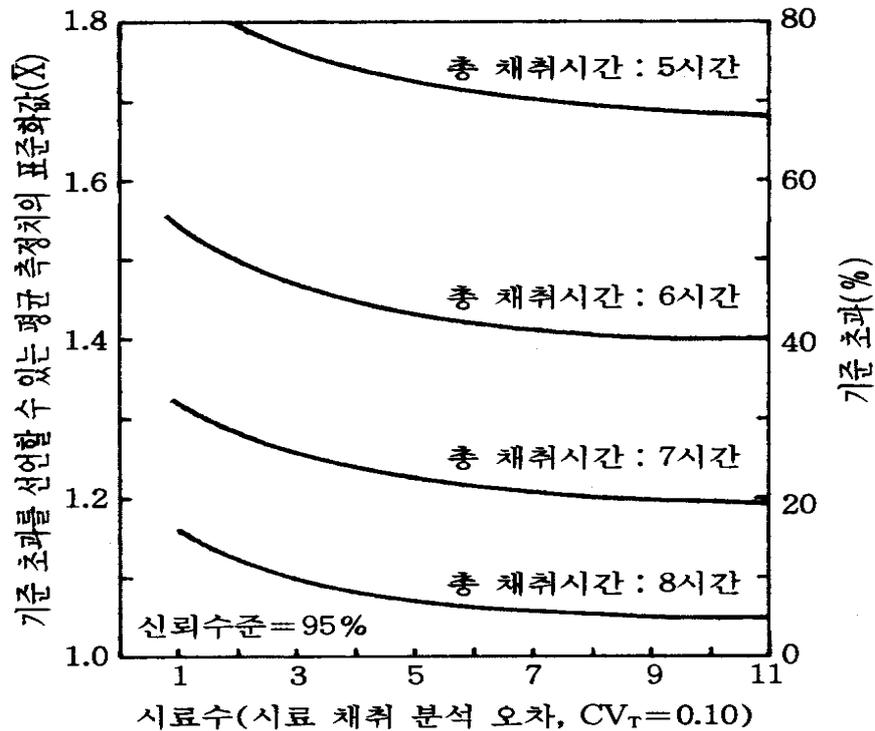
기존의 고시에 따르면 일부작업시간 만을 측정한 경우의 평가는 8시간을 기준으로 한 작업에 대해 가중치를 적용하여 측정하지 못한 시간을 벌충하도록 되어 있는 OSHA 기준을 역시 준용하고 있다. 이는 OSHA 감독관이 보다 정확한 측정을 원한다면 그리고 사업장의 허용기준 초과여부를 확실히 판단하려면 8시간 전체를 측정하도록 적극 권고한다는 의미를 포함할 수도 있고, 또한 통계적으로는 미 측정된 시간에 대해서는 노출이 없다는 감독관에게는 불리한 가정 하에서 출발한 평가방법이다. 즉 8시간 미만을 측정 한 경우 우리나라의 현행기준에 “부분적인 측정에 대한 노출기준 (PPL : Partial Period Limit)”으로 명명된 판정기준은 항상 1보다 커지므로

감독관의 입장에서 보면 기준초과를 선언할 수 있는 영역이 1을 기준으로 할 때 보다 좁아져서 불리하게 되고 감독을 받는 사업주의 입장에서는 기준초과를 선언 당할 범위가 좁아지므로 유리해 지는 결과를 초래하게 된다는 의미이다. 다시 말하면 8시간 전시간 측정의 경우에는 1과 PPL 사이의 범위에서 기준초과를 감독관이 선언할 수 있었으나 8시간 미만 측정 시는 1과 PPL 사이의 범위에서 감독관이 기준초과로 판정을 할 수 없도록 하고 있다. 이러한 결과가 초래된 것은 감독관과 사업주가 기준초과 여부를 놓고 산업안전보건재심위원회 (OSROC: Occupational Safety and Health Review Commission)나 미국 법정에서 다툼을 벌일 경우 OSHA가 패소하게 되는 것을 미연에 방지하기 위하여 자체적 규정으로 만든 것으로 보여진다. 즉 OSHA는 측정하지 않은 시간에 대하여 확신을 할 수 없으므로 차라리 그 해당시간의 농도를 "0"으로 처리하여 확실히 하겠다는 뜻이다.

현행 제도에서 PPL을 사용하는 경우의 다른 문제점은 앞의 8시간 전시간 동안을 측정한 경우에 적용되는 “기준미만”이나 “노출기준 초과가능”이라는 판정기준이 존재하지 않고 “노출기준 초과”와 “통계적방법 적용불가”라는 기준만이 존재하여 이를 노출기준 초과 가능으로 해석하여야 할지 노출기준 미만으로 해석하여야 할지가 불분명하다는 점이다. 따라서 관련고시 상에서 “노출기준 초과”, “노출기준초과 가능” 및 “노출기준 미만”의 구분에 따라 작업환경관리를 하겠다는 의도가 앞 절에서와 같이 여기에서도 의미를 잃고 있다. 현재 사업장에서는 8시간 전시간에 대한 작업환경측정이 이루어지는 경우가 거의 없는 것이 우리의 현실이므로 이러한 경우를 위해서라도 적절한 판정기준을 수립하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

적절한 판정기준의 수립은 현행 PPL의 개념과 8시간 전시간 측정에 대한 SAE를 적용하는 방법을 혼용하여 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 다만 이 경우에는 전체작업시간에 대한 측정 (8시간)을 기준으로 측정시간이 짧아질수록 비례적으로 “노출기준 초과가능”의 관리범위가 상대적으로 넓어진다는 점에 특히 유의해둘 필요가 있다([그림 8 ]참조). 반대로 이야기 하면 8시간 전시간에 가깝게 측정할수록 좁은 오차범위에서 보다 정확히 노출기준 초과나 노출기준 미만을 판정할 수 있는 결과를 얻을 수 있어서 감독기관이나 사업주에게 모두에게 이익이 될 수 있다.

다만 현재 우리나라의 경우 8시간 미만의 측정에 대해 이렇게 엄격한 기준을 적용하여야 하는지에 대해서는 논란의 여지가 있을 수 있다. 현



[그림 8] 부분시간에 대한 시료채취가 노출기준초과 판정에 미치는 영향

재 우리나라의 측정인력과 측정수가로 볼 때 8시간 전체를 측정하는 것이 거의 불가능하다는 현실을 무시하고 평가방법 만을 강화한다고 하여 효율적인 제도로 운영될 지에 대해서는 심각히 고민해 볼 여지가 있다고 생각된다. 또한 시료채취시간이 8시간 미만인 경우 결과의 판정에 PPL을 적용하게 되면 “노출기준 초과가능”의 영역만이 상대적으로 넓어지는 결과만을 초래하므로 사업주가 작업환경의 개선을 하기보다는 재측정을 반복하여 노출기준 미만으로 맞추려는 쪽으로 결과를 악용할 가능성도 있음을 충분히 고려할 필요가 있다.

### 3-6. 혼합물질에 대한 평가

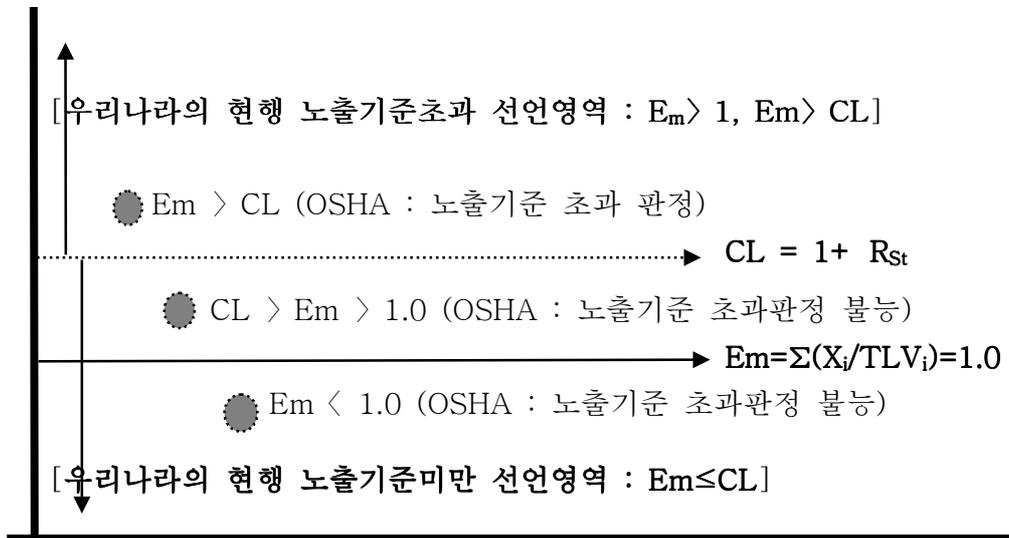
현행 고시상의 혼합물질에 대한 측정결과의 평가방법도 OSHA 감독관용 기준을 준용한 것이다. 이를 우리나라에 평가 기준에 적용함에 있어서의 문제점은 우선적으로 "혼합물의 노출기준 (CL : Control Limit)"으로

표현된 기준이 다소 애매 모호하다는 점이다. “ $CL = 1 + Rst$ ”라는 식에서 유추하여 보면 CL은 항상 1보다 커지므로 이는 결국 8시간 측정 시의 상한치(노출기준초과 판정에 사용)와 유사한 의미로 받아들여 질 수 있다. 그럼에도 불구하고 하한치(노출기준미만 판정에 사용)의 개념은 현 기준에 전혀 존재하지 않고 있다. 또한 CL의 적용에 있어서  $Em > CL$ 인 경우에는 당연히 감독관이 기준초과를 선언할 수 있으나,  $EM \leq CL$ 이지만 EM이 1과 CL 사이에 존재하는 경우 기준미만으로 판정하기에는 무리가 따를 것으로 판단되나 현행 관련고시에서는 이를 명확히 설명하고 있지 못하다.

OSHA의 TM에서도  $EM < CL$ 인 경우 “95% 신뢰수준에서 기준초과를 선언할 수 없다 (Overexposure has not been established at the 95% confidence level)”고 명시되어 있으며 우리나라와 같이 “기준미만”으로 판정하도록 되어 있지는 않다. 이는  $Em > 1$  그리고(and)  $Em > CL$ 의 경우에만 기준초과로 판정하고 그 이외 영역에서는 기준초과를 선언 할 수 없는 경우로 바로 이 영역 안에 실제로 기준미만으로 판정될 수 있는 영역이 필히 존재하는 것으로 보아야만 할 것으로 판단된다. 그래야만 작업환경관리를 위한 “노출기준 초과”, “노출기준초과 가능” 및 “노출기준 미만”의 구분이 역시 의미를 가지게 된다. OSHA의 TL에서는 감독관의 편의를 위해 예를 들기 위하여  $Em$ 이 1을 초과한 경우로서  $Em$ 이 CL 보다 큰 경우만을 제시하고 있으나 이를 우리나라에서는 다소 오해가 있을 수 있는 방향으로 받아들이고 있는 것으로 보인다. 혼합물질에 대한 평가에 대한 지금까지의 설명을 이해하는 데에 도움을 주기 위하여 [그림 9]에 우리나라와 미국의 현행 초과판정 기준을 도시하였다.

### 3-7. 단시간채취시료에 대한 평가

단시간 작업환경측정(Grab samples)결과를 평가하는 방법은 우리나라의 관련고시에 현재 기준이 전혀 제시되어 있지 않다. 실제로 흔히 Bar-Shalom 등이 1976년에 제시한 것으로 알려진 평가방법 (백남원, 2001; Bar-Shalom et al., 1976)은 Bar-Shalom 등이 1975년에 NIOSH를 통해 발표한 보고서에서 이미 제시된 것으로 단시간측정결과에 대해 OSHA의 감독관이 PEL의 초과 여부를 판정하는 데 도움을 주기 위하여 개발된 것이다. 그러나 그래프를 사용하여 결과를 판정하도록 되어 있으므로 판정결과에 대



[그림 9] 한·미의 혼합물질의 노출지수(Em)에 따른 평가결과 비교

하여 논란의 여지가 있을 수 있어 국내 기준으로는 적용이 어려웠던 것으로 보인다. 즉 기준초과와 그렇지 않은 경우에 대한 구분이 완전한 정량성을 띄지 못하여 수치적으로 판정되는 것이 아니므로 감독자와 사업주 사이에 다툼의 여지를 제공할 수도 있기 때문이다. 또한 신뢰수준에 따라 한가지 이상의 그래프가 사용되어야 하는 단점도 가지고 있다.

그러나 현행 고시 상에서 예외적인 경우이긴 하지만 엄연히 검지관 등을 사용한 단시간측정이 인정되고 있고, 또한 5인 미만의 사업장에 대해 작업환경측정이 의무화됨에 따라 비용상의 문제 등으로 중소기업의 사업장에서는 검지관을 사용한 측정이 이루어질 가능성도 있으므로 이 부분에 대한 정량적 평가방법을 정립할 필요가 대두되었다고 판단된다.

### 3-8. 지역시료에 대한 평가

지역시료채취(Area sampling)는 미국에서도 노출기준초과 여부의 판정에는 사용될 수 없지만 국소배기장치 등 시설의 개선에 대한 평가에 사용될 수 있으며, 일본에서는 법적 작업환경측정 방법으로 적용되고 있음은

널리 알려진 사실이며 이 글에서도 이미 언급되었다. 다만 문제가 되는 것은 지역시료채취결과와 개인시료채취결과 사이에 어떠한 상관 관계가 있는지가 현재로서는 충분히 연구되어 있거나 연구되지 못하고 있으며, ACGIH의 TLV와 같은 작업환경노출기준(OEL : Occupational Exposure Limit)이 지역시료에도 적용이 가능한지에 대한 확실한 검증도 없다. 일본에서 법적으로 사용되는 관리농도가 ACGIH의 TLV와 매우 유사하다는 점은 과연 이 기준이 그대로 지역시료에 대해 사용되어도 좋은가와 관련지어 적지 않은 의문을 남기고있다.

지역시료 채취결과를 개인시료의 채취결과와 비교하는 데 있어서 가장 중요한 사항은 두 결과간에 평균적인 차이가 있을 수 있다는 점이다. NIOSH의 한 보고서(Leidel 등, 1977)에 따르면 지역시료는 개인시료보다 50%정도 낮은 결과를 보일 수 있다고 지적되고 있으며, 최근에 공단에서도 작업장을 대상으로 근로자의 분진노출 실태를 조사한 결과 개인시료가 지역시료 보다 약 30% 정도 높은 결과를 보이기도 하여 지역시료채취결과를 개인시료채취결과로 변환시키기 위해서는 적절한 가중치를 적용하는 방안을 검토해 볼 필요가 있다고 판단된다. 가중치의 적용은 이러한 관점이 외에도 우리나라에서는 작업환경측정 시 지역시료채취를 권장하지 않는다는 사용상의 제한적인 측면에서도 어느 정도는 도입의 필요성이 있다고 할 수 있다.

하지만 근로자의 작업상황과 작업장내에 머무르는 시간 등등의 변수가 워낙 다양하므로 일률적으로 모든 경우에 대해 가중치를 주어 지역시료결과를 개인시료결과로 환산하는 방법의 적용에는 다소 무리가 따를 수 있다. 작업자가 정상적으로 8시간 동안 작업장내에서 작업을 하는 경우에는 지역시료채취가 개인시료채취 보다 높은 농도를 보일 가능성이 높으므로 가중치의 적용을 고려해 볼 필요가 있는 것으로 보이나 작업자가 작업장내에 머무르는 시간이 8시간 미만인 경우에는 근로자의 개인시료 측정 농도가 낮아질 가능성도 충분히 있으므로 작업장내에 머무르는 실 작업시간도 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

또한 화학물질의 종류와 지역시료의 측정위치 등에 따라서도 개인시료와의 편차정도가 달라질 수도 있다. 그러므로 이 분야에 대해서는 지속적인 연구가 필요하다는 전제 하에 이 글에서는 개선 안을 뒤에서 제시하지 않았음에 양해가 있기를 바란다.

### 3-9. 일일 8시간 이상 작업자에 대한 평가

하루 8시간 이상 작업을 실시하는 근로자에 대한 측정결과를 평가하는 방법은 현행 고시에 역시 적용되지 않고 있다. 이는 현재 우리나라가 거의 그대로 적용하고 있는 ACGIH의 TLV가 일일 8시간, 주 40시간을 기준으로 하고 있으므로 국내 근로자가 주당 44시간을 근무하는 현실에서 산업위생분야에서 당연히 적용되어 왔어야 할 기준으로 보이며 특히 일일 작업시간이 8시간을 초과하는 경우에 대해서는 더욱 그 필요성이 강조되어야 할 것으로 판단된다.

이 부분에 대해서는 OSHA의 감독관이 사용하는 기준이나 Brief와 Scala의 보정방법(백남원, 2002; Brief and Scala, 1975)이 독성학적으로 어느 정도 수용이 가능한 근거를 가지고 있는 것이므로 국내에 적용하는 데에 큰 어려움은 없을 것으로 보인다. 또한 근로자 보호차원에서도 그 필요성이 어느 정도는 있다고 판단된다.

## 4. 측정결과에 대한 평가방법의 통계학적 개선의 기본방침

지금까지 살펴 본 화학물질에 대한 국내 작업환경측정 평가에 대한 문제를 해결하기 위해서는 이들 문제를 종합적으로 해결할 수 있는 작업환경측정결과에 대한 기본적 평가 틀을 우선적으로 정립하는 것이 필요한 것으로 보인다. 이러한 틀은 또한 국가적인 작업환경관리 모델과도 추후에 당연히 연계되어야 할 것이다. 여기에서 또 한가지 간과되어서는 안 되는 중요한 다른 문제는 앞에서 언급된 바와 같이 제시된 기본 틀이 통계학적으로나 과학적으로 설명될 수 있는 것이어야 할 뿐만 아니라 현장에서 작업환경 측정을 행하고 있는 산업위생전문가와 관련 학계에서 필요성과 당위성을 인정받아야 한다는 점이다.

일본의 지역시료채취·평가 방법이 다른 나라에서는 문제가 있다는 시각으로 볼 수도 있지만 통계적으로는 충분한 근거를 가지고 설명될 수 있는 기초 하에서 설정된 것이므로 자국 내에서는 커다란 이견이 없이 지켜지고 있으며 그들은 오히려 자랑스럽게 생각하고 있다는 점을 우리도 본받을 필요가 있다고 생각된다. 또한 일본도 나름대로 발견되는 문제점을 해결하기 위하여 초기에 설정한 기본 틀을 지속적으로 개선해 나가고 있다는 점(최고노출근로자를 찾기 위한 B 측정의 도입 등)도 염두에 둘 필요가 있다.

여기 제시하고자 하는 작업환경평가의 통계학적 개선의 기본골격은 [그림 10]에 종합적으로 도시되어 있으며 이를 요약하면 다음과 같다.

- 현행 관련고시에서 적용하고 있는 화학물질의 측정결과에 대한 평가방법에 큰 문제가 없는 한 현재의 기본 틀을 유지한다.
- 우리나라 작업환경측정결과와 관리목표치는 통계학적으로 95% 신뢰수준(양측검정 기준)을 적용하도록 한다.
- 측정결과와 노출기준 초과여부 평가는 기본적으로 모든 측정대상 근로자에 대해서 하위 해당 단위작업장소에 대한 최종적인 결과 판정은 최고노출근로자를 기준으로 실시한다. 측정근로자의 선정도 최고노출근로자가 반드시 대상에 포함되도록 하는 데에 초점을 두고 이를 지키도록 한다.
- 전시간 1회 측정결과에 대해서는 양측검정 시 95% (단측검정의 경우에는 97.5%에 해당) 신뢰수준에서의 시료채취 및 분석오차 (SAE)를 적용하여 평가한다.
- 전시간 수회측정결과에 대해서는 다수시료와 측정치의 가중치를 고려한 현행 틀을 유지하되 수정 SAE의 계산 시에는 양측검정에서의 95% 신뢰수준을 적용하여 평가한다.
- 8시간 미만의 측정에 대해서는 이의 실행 억제를 위하여 현행과 같이 부분적인 측정에 대한 노출기준의 표준화값(PPL)을 상한기준과 하한기준으로 세분화하여 SAE를 사용하고 양측검정 95% 신뢰수준에서 평가를 실시한다(제1안). 그러나 현실적으로 8시간 측정이 어려운 점을 감안하여 측정되지 않은 시간을 측정시간과 동일한 농도로 가정한 평가방법의 적용도 고려한다(제2안).
- 단시간채취시료에 대하여는 Bar-Shalom 등의 기준을 적용하되 그림에 의한 판정을 수치화 한 도표에 의한 평가방법으로 바꾸어 시비의 소지 가없도록 한다. 이 평가방법을 소규모사업장이 검지관을 사용하여 측정하는 경우에도 평가방법으로 사용하도록 한다. 단기간측정결과가 “기준초과”로 판정된 경우에는 장시간측정시의 “기준초과”와 같은 수준의 조치를 취하도록 하고, 단시간 측정결과가 “기준초과 가능”으로 판정되는 경우에는 장시간 측정방법으로 재측정을 반드시 실시한 후 결과에 따른 조치를 취하

도록 한다. “기준미만”으로 판정된 경우에는 정식 작업환경측정 결과로 인정·같음한다. 단시간 측정의 신뢰성을 높이기 위하여 시료채취의 수를 충분히 크게 하도록 한다. 단시간 시료의 수가 26개를 넘는 경우에는 장시간 측정과 같이 계산에 의한 판정이 가능하도록 한다.

- 일일 8시간 이상을 작업하는 작업자에 대한 평가는 노출시간과 회복시간을 고려하여 설정된 Brief와 Scala의 방법을 준용한다. 주 40시간 이상 작업을 행하는 작업자에 대하여도 동일한 기준을 적용하여 평가한다.

## 5. 개인시료채취에 대한 현행 평가방법의 통계적 개선

### 5-1. 시료채취대상 근로자수의 조정

현행 관련고시 제19조상에서 최고노출근로자 2인 이상에 대하여 동시에 측정하도록 되어 있는 기준은 짧은 시간에 작업장과 근로자에 대한 파악이 어려운 경우나 비교적 근로자수가 많고 작업장이 넓은 경우에는 최고노출근로자를 포함시키지 못하고 측정을 행하게 할 수도 있는 다소 느슨한 조항이다. 미국 산업안전보건연구원(NIOSH)에서는 이를 방지하기 위하여 최고노출가능 근로자를 시료채취대상에 포함시킬 수 있는 구체적인 방법을 제시하고 있다 (백남원, 2002; Leidel et al., 1977).

이 방법의 주요 골자는 지정된 확률(90 또는95%)을 가지고 최고 상위의 10% 또는 20%에 해당(예를 들면, 20명의 근로자가 있는 경우 상위 10%는 최고노출근로자와 다음 근로자 2명이며 상위 20%는 최고노출근로자로부터 4번까지의 4명임)하는 근로자를 반드시 1명 이상 대상에 포함시킬 수 있는 최소 시료수를 명시하고 있다. 무작위로 이 수치 이상의 근로자를 선정하여 작업환경측정을 하게되면 확률적으로 최상위 10~20%의 근로자를 최소 1명 이상 반드시 포함하게되므로 최고노출근로자를 대상으로 평가를 실시하고자 하는 경우에는 어느 정도는 이 기준을 따라야 할 필요성이 있는 것으로 판단된다. [표 4]에는 최상위 10%의 근로자를 90%의 확률로 포함시킬 수 있는 최소 시료수를 예로서 나타내었다.

[표 4] 최상위 10%를 90%확률로 포함시킬 수 있는 최소 시료수

근로자 수	7이하	8	9	10	11~12	12~14	15~17	18~20	21~24
최소 시료수	전원	7	8	9	10	11	12	13	14
근로자 수	25~29	30~37	38~49	50~51	52~79	80~129	130~250	251이상	
최소 시료수	15	16	17	18	19	20	21	22	

NIOSH의 기준에 따르면 최상위 10%의 근로자 1명 이상을 95%의 확률로 포함시키기 위한 경우에는 최소 11개, 그리고 최대로는 29개의 시료가 필요하다. 그러나 이 기준은 우리의 현실 상 사업주나 작업환경측정기관에서 준수하기가 매우 어려울 것으로 보여 여기에서는 권고안으로 제시하지 않았다. 또한 [표 4]에서 나타낸 최소시료채취 근로자수는 최상위 근로자의 범위와 포함시킬 확률에 따라 최소 인원이 5명 ~ 11명 (최상위 20% 중 1명 이상을 90%확률로 찾을 경우)까지의 범위로 조정이 가능하다.

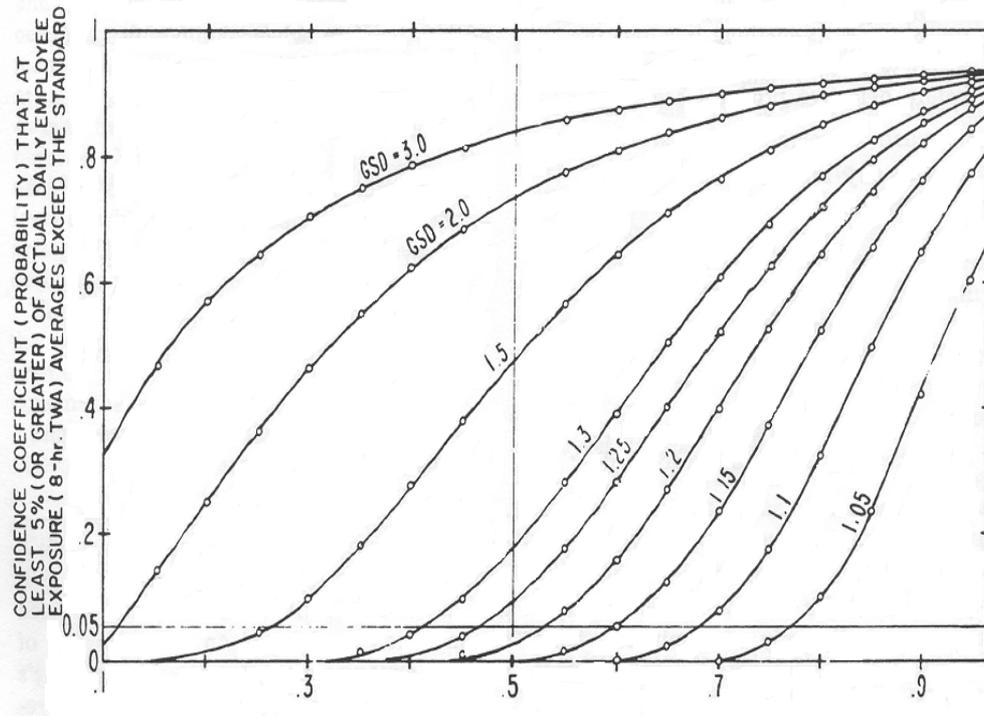
## 5-2. 최고노출근로자를 기준으로 한 평가의 유지 및 보완

학문적으로 산업위생분야에서는 대부분의 측정결과가 대수정규분포(Log-normal distribution)를 하고 있다고 알려져 있다 (백남원 등, 2002). 또한 단시간측정자료의 경우 기하표준편차가 1.5내지 2정도이고, ACGIH의 허용농도 상한치 (ER : Excursion Limit)도 기하표준편차 2.0을 기준으로 설정되어 있으며 (ACGIH, 2003), OSHA가 설정하고 있는 소위 Action Level이라는 개념도 대수정규분포와 기하표준편차의 개념을 근거로 하고 있다 (Leidel et al., 1977).

국내의 작업환경측정결과에 대해서는 충분한 검증이 되어 있지는 않지만 자료가 대개 대수정규분포를 할 것이라 것에 대해서는 이의가 많지 않을 것으로 생각된다. 그러나 측정결과와 기하표준편차가 2정도에 머물 것 인지에 대해서는 앞에서 언급된 바와 같이 의문의 여지가 많다. 덧붙이는 예로, 2002년 중에 국내에 있는 14개의 DOP를 취급하는 공정에 대한 한국

산업안전공단과 가톨릭대학의 합동 조사에서는, 노출 근로자들의 현 작업공정을 고려한 유사노출군(HEG : Homogeneous Exposure Group)에 대한 측정·평가 결과(n=71), 공정별로 기하표준편차가 3.3 ~ 10.2를 나타내었다. 이는 국내 사업장에 대한 작업환경관리의 기본 모델의 설정 시 기하표준편차가 2.0정도일 것이라는 가정의 수립이 얼마나 많은 모순을 낳을 수 있는가를 보여 주는 또 다른 단면이라고 할 수 있다.

산업위생분야의 통계처리 시 교과서에서 기본적으로 널리 인용하고 있는 Leidel 등의 연구(1974)에 따르면 일간변이(Day-to-day variation)를 나타내는 기하표준편차가 2.0이면 어떤 무작위로 추출된 측정일의 측정치가 기준치의 50%에 머물렀다고 하여도 5%이상의 미 측정된 날(이 경우는 모집단을 의미함)이 기준치를 초과할 확률이 약 72%가 된다고 한다([그림 11] 참조).



[그림 11] 기하표준편차에 따라 측정결과가 노출기준을 초과할 확률의 분포

[그림 11]에서는, OSHA가 action level을 설정한 근거로, 기하표준 편차가 약 1.22가되는 경우에 특정한 날의 측정치가 기준치의 50%가 되면 모집단의 5%가 기준치를 초과할 확률이 5%정도에 해당되게 됨을 보여주고 있다. 그러나 실제로 우리나라의 경우 앞의 한 예에서 살펴본 바와 같이 기하표준편차가 1.22인 작업장은 거의 없을 것으로 판단되므로 이 기준을 우리나라에 적용하게 되면 작업환경관리 상 문제가 발생할 우려가 극히 높다고 할 수 있다.

Leidel 등(1977)이 수차 지적인 바와 같이 근로자에 대한 개인시료 채취 결과는 시간적, 공간적 및 근로자간의 변이가 시료채취·분석오차보다 훨씬 크므로 우리나라에서와 같이 측정치들의 기하표준편차가 큰 경우에는 특정한 날의 최고노출근로자를 기준으로 하고 SAE를 적용하는 경우에도 근로자보호라는 목적이 충분하게 달성되지 않을 가능성이 상존하고 있다고 판단된다. 특히 현행 작업환경측정제도 하에서는 사업주가 요구하여 측정기관이 측정치를 임의로 하향조정 할 가능성도 배제할 수 없으므로 다소 엄격한 기준의 적용이 어느 정도는 필요하다고 할 수 있다.

이 경우 엄격하게 적용하여야 할 기준으로 제시 될 수 있는 것으로는 8시간 측정치의 경우 95% 단측검정에 해당되는 현재의 SAE (표준편차의 1.645배에 해당되는 값)를 표준편차의 1.96배에 해당되는 값(95% 양측검정에 적용되는 기준 또는 97.5% 신뢰수준의 단측검정 기준)이나 그이상의 값으로 상향시켜 사용하는 방법이 제시될 수 있다. 이미 최고노출근로자를 기준으로 한 평가방법이 국내에 적용되고 있으므로 이를 근간으로 한 평가의 틀을 유지하면서 기준을 강화하기 위하여는 SAE의 범위를 통제하는 방법이 통계학적으로 어느 정도는 근거를 가진 것으로 판단되기 때문이다. 구체적인 예는 다음 절에서 하기로 한다.

### 5-3. 전시간 단일측정에 대한 평가의 통계적 개선

단일시료를 8시간동안 채취한 경우에는 평가방법에 있어 현행 관련 고시와 이 글에서 제시하고자 하는 안의 차이는 앞 절에서 언급된 바와 같이 최고노출근로자에 적용하는 단측검정의 신뢰수준을 95%에서 97.5%(양측검정의 경우에는 95%에 해당함) 확대하는 데 있다. 그리고 “상한치 $\leq$ 1일때 노출기준미만”과 같이 표준화값이 1인 경우가 노출기준미만의 판정에 포함

된 것에 대하여는 이미 충분히 설명된 바와 같이 현행기준을 유지하여도 문제가 없는 것으로 판단된다.

앞의 [표 1]에서의 예가 상기와 같이 적용되는 경우를 살펴보면, 툴루엔의 SAE 값인 0.132가 표준편차에 1.645배(표준정규분포에서 95% 단측검정 시의 z값)를 한 것으로 가정한 경우의 95% 양측검정 (97.5%의 단측검정)에 해당하는 SAE는,  $0.132/1.645 \times 1.960 = 0.157$ 이 된다. 따라서 상한치는 115.7ppm이 되고 하한치는 84.3ppm이 된다. 실제로는 상한치와 하한치가 각각 이전의 경우보다 약 2.5ppm 정도 차이가 나게 된다. 받아들이기에 따라서는 큰 값의 차이가 아닐 수도 있으나 만일 95% 단측검정 기준의 SAE가 약 0.300이 되고 노출기준이 동일하게 100ppm 이라면 95% 단측검정 기준시와 97.5% 단측검정 시의 차이는 약 6ppm으로 확대되게 된다. 다음과 같이 관련고시의 평가방법 개정이 권고될 수 있다.

#### ■ 작업시간 전체를 1개의 시료로 측정할 경우

- ① 측정농도(X), 노출기준 (OEL) 및 시료채취분석오차 (SAE)를 구한다.
- ② 측정농도 X를 노출기준으로 나누어 표준화값(Y)을 구한다.

$$Y = \frac{X(\text{측정농도})}{OEL(\text{노출기준})}$$

- ③ 97.5%의 신뢰도를 가진 상한치(UCL)를 계산한다.

$$\text{상한치} = Y + \text{SAE}$$

- ④ 97.5%의 신뢰도를 가진 하한치(LCL)를 계산한다.

$$\text{상한치} = Y - \text{SAE}$$

- ⑤ 다음과 같이 노출결과를 구분한다.
  - 상한치 ≤ 1 일때 노출기준미만
  - 하한치 ≤ 1, 상한치 > 1일때 노출기준초과 가능
  - 하한치 > 1일때 노출기준 초과

#### 5-4. 전시간 다수 측정에 대한 평가의 통계적 개선

현행 관련고시 상의 평가 틀은 전시간 단일 측정 시와 같이 거의 그대로 유지된다. 다만 SAE의 적용은 현재와 같은 보정되지 않은 SAE의 사용은 없애고 각 측정치와 해당 측정시간을 가중한 보정된 SAE만을 고려하여 상한치와 하한치를 계산하도록 한다. 다음과 같이 관련고시의 평가방법 개정이 권고될 수 있다.

##### ■ 작업시간 전체를 n개의 시료로 측정한 경우

① 작업시간동안에 얻어진 연속적인 n개의 시료의 분석결과  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , 측정시간  $T_1, T_2, \dots, T_n$ , SAE 및 노출기준 (OEL)을 준비한다.

② 시료의 수와 측정치를 고려한 시료채취분석오차 (보정 SAE)를 구한다.

$$\text{보정 SAE} = \frac{\text{SAE} \times \sqrt{X_1^2 \times T_1^2 + X_2^2 \times T_2^2 + \dots + X_n^2 \times T_n^2}}{\text{OEL} \times (T_1 + T_2 + \dots + T_n)}$$

③ 전체시료에 대한 시간가중 평균농도(TWA)를 구한다.

$$TWA = \frac{X_1 \times T_1 + X_2 \times T_2 + \dots + X_n \times T_n}{T_1 + T_2 + \dots + T_n}$$

④ 표준화값 Y를 구하기 위하여 TWA를 노출기준으로 나눈다.

$$Y = \frac{TWA(\text{시간가중평균농도})}{OEL(\text{노출기준})}$$

⑤ 97.5%의 신뢰도를 가진 상한치(UCL)를 계산한다.

$$\text{상한치} = Y + \text{보정 SAE}$$

⑥ 97.5%의 신뢰도를 가진 하한치(LCL)를 계산한다.

$$\text{하한치} = Y - \text{보정 SAE}$$

- ⑦ 다음과 같이 노출결과를 구분한다.
- 상한치 $\leq$ 1 일때 노출기준미만
  - 하한치 $\leq$ 1, 상한치 $>$  1일때 노출기준초과 가능
  - 하한치 $>$  1일때 노출기준 초과

#### 5-5. 일부시간 다수 측정에 대한 평가의 통계적 개선

##### 5-5-1. 제1안(PPL을 적용하는 안)

기본적으로는 8시간동안 다수의 시료를 채취한 경우와 유사한 개념의 평가방법을 적용하되 현행 관련고시 상의 부분측정에 따른 노출기준(PPL)의 개념도 함께 적용한다. 즉 PPL에 상·하한선의 개념을 도입하여 “통계적 방법 이용불가”라는 표현을 없애고 8시간 측정 시와 같이 “기준미만”의 개념을 도입한다. 이 경우 부분노출 상한기준(PPUL : Partial Period Upper Limit)은 현행 관련고시 상의 PPL과 같고 부분노출 하한기준(PPLL : Partial Period Upper Limit)은 PPL의 역수로 제안된다. PPL의 역수가 하한선으로 제안되는 이유는 8시간 미만을 측정할 경우 PPL이 1보다 크게되므로 역시 1보다 작은 개념의 하한기준을 두어 이선 이하를 유지하는 경우 기준미만으로 평가를 실시한다는 의미이다([그림 12] 참조). 다만 이 제안은 PPL이 통계적으로 충분한 설명이 불가능 한 것과 같이 학문적으로 증명되지 않는 부분이므로 논란의 여지는 가지고 있다. 다음과 같이 관련고시의 평가방법 개정이 권고될 수 있다.

#### ■ 작업시간 일부에 대한 n개의 측정치가 있는 경우

① 작업시간동안에 얻어진 연속적인 n개의 시료의 분석결과  $X_1, X_2, \dots, X_n$ 과 측정시간  $T_1, T_2, \dots, T_n$  및 노출기준 (OEL)을 준비한다.

② 시료의 수와 측정치를 고려한 시료채취분석오차 (보정  $SAE_p$ )를 구한다.

$$\text{보정 } SAE_p = \frac{SAE_p \times \sqrt{X_1^2 \times T_1^2 + X_2^2 \times T_2^2 + \dots + X_n^2 \times T_n^2}}{OEL \times (T_1 + T_2 + \dots + T_n)}$$

③ 부분측정 시료에 대한 시간가중 평균농도(TWA<sub>p</sub>)를 구한다.

$$TWA_p = \frac{X_1 \times T_1 + X_2 \times T_2 + \dots + X_n \times T_n}{T_1 + T_2 + \dots + T_n}$$

④ 부분측정의 표준화값 Y<sub>p</sub>를 구하기 위하여 TWA<sub>p</sub>를 노출기준으로 나눈다.

$$Y_p = \frac{TWA_p(\text{시간가중 평균농도})}{OEL(\text{노출기준})}$$

⑤ 97.5%의 신뢰도를 가진 상한치(UCL)를 계산한다.

$$\text{상한치} = Y_p + \text{보정 } SAE_p$$

⑥ 97.5%의 신뢰도를 가진 하한치(LCL)를 계산한다.

$$\text{하한치} = Y_p - \text{보정 } SAE_p$$

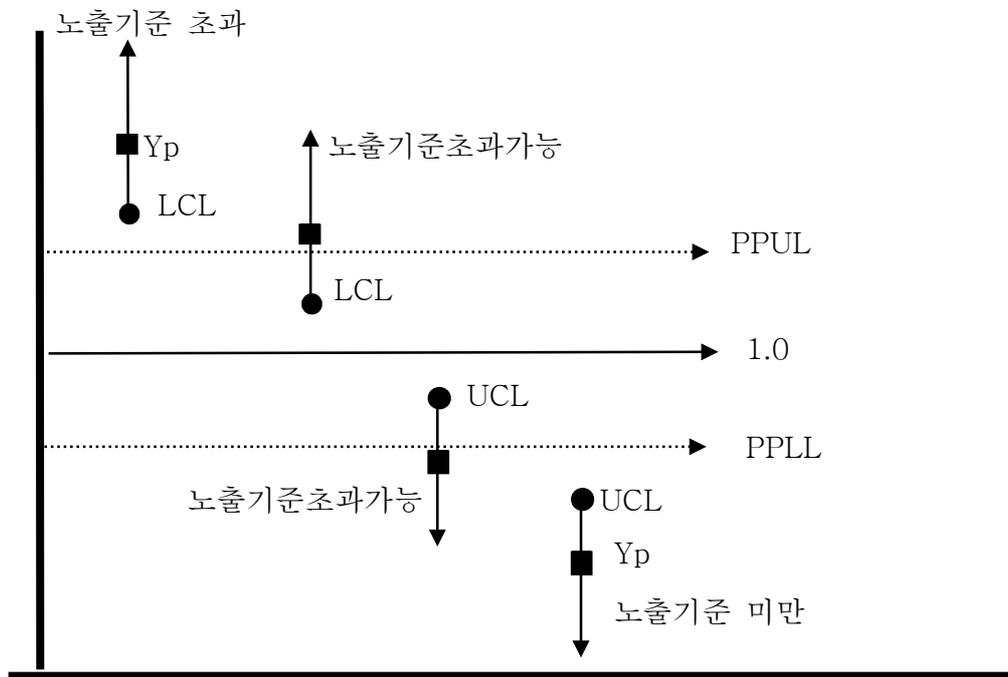
⑦ 부분노출 상한기준(PPUL : Partial Period Upper Limit)과 부분노출 하한기준(PPLL : Partial Period Lower Limit)을 구한다.

$$PPUL = \frac{8\text{시간}}{\text{측정시간}}$$

$$PPLL = \frac{\text{측정시간}}{8\text{시간}}$$

⑧ 다음과 같이 노출결과를 구분한다([그림 12]참조)

- 상한치 ≤ PPLL 일때 노출기준미만
- 하한치 ≤ PPUL, 상한치 > PPLL 일때 노출기준초과 가능
- 하한치 > PPUL 일때 노출기준 초과



[그림 12] 8시간 이하 부분측정에 따른 평가안의 도해

#### 5-5-2. 제 2안 (PPL 대신 미보정 SAE만을 적용하는 안)

현행 관련고시의 8시간 다수시료채취에 대한 평가방법을 준용하고 부분측정에 대한 노출기준(PPL)의 개념은 삭제한다. 즉 “**작업시간 전체를 n개의 시료로 측정 한 경우**”와 동일하게 평가를 실시한다. 다만 8시간 측정을 권고하는 의미에서 “보정 SAE”를 적용하지 않고 8시간 단일시료의 경우에 사용하는 미보정 SAE를 적용하여 평가하는 것을 원칙으로 제시한다. 다음과 같이 관련고시 평가방법의 개정이 권고될 수 있다.

#### ■ 작업시간 일부에 대한 n개의 측정치가 있는 경우

① 작업시간동안에 얻어진 연속적인 n개의 시료의 분석결과  $X_1, X_2, \dots, X_n$ 과 SAE 그리고 측정시간  $T_1, T_2, \dots, T_n$ , 시료채취분석오차 ( $SAE_i$ ) 및 노출기준 (OEL)을 준비한다.

② 전체 시료에 대한 시간가중 평균농도(TWA)를 구한다.

$$TWA = \frac{X_1 \times T_1 + X_2 \times T_2 + \dots + X_n \times T_n}{T_1 + T_2 + \dots + T_n}$$

③ 표준화값 Y를 구하기 위하여 TWA를 노출기준으로 나눈다.

$$Y = \frac{TWA(\text{시간가중평균농도})}{OEL(\text{노출기준})}$$

④ 97.5%의 신뢰도를 가진 상한치(UCL)를 계산한다.

$$\text{상한치} = Y + SAE$$

⑤ 97.5%의 신뢰도를 가진 하한치(LCL)를 계산한다.

$$\text{하한치} = Y - SAE$$

⑥ 다음과 같이 노출결과를 구분한다.

- 상한치 ≤ 1 일때 노출기준 미만
- 하한치 ≤ 1, 상한치 > 1일때 노출기준초과 가능
- 하한치 > 1일때 노출기준 초과

#### 5-6. 혼합물질에 대한 평가방법의 통계적 개선

기본적으로 현행의 평가방법을 유지하되 하한치의 개념을 도입하고 “노출기준 초과”와 “노출기준 초과가능”의 구분을 명확히 한다. 8시간 동안 시료가 채취된 경우에 적용하는 개념과 유사한 방법을 사용한다. 다음과 같이 관련고시 평가방법의 개정이 권고될 수 있다.

① 혼합물질 각각의 시료에 대한 분석결과  $X_1, X_2, \dots, X_n$  ( $X_i$ )와 노출기준( $OEL_i$ ) 및 각각의 시료채취분석오차 ( $SAE_i$ )를 준비한다.

② 각 물질별 표준화값( $Y_i$ )을 구한다.

$$Y_i = \frac{X_i(\text{노출농도})}{OEL_i(\text{노출기준})}$$

③ 혼합물질노출계수( $E_m$ )를 구한다.

$$E_m = \frac{X_1}{OEL_1} + \frac{X_2}{OEL_2} + \dots + \frac{X_n}{OEL_n}$$

④ 각 물질별로 노출비율지수( $R_i$ )를 구한다.

$$R_i = \frac{Y_i(\text{노출계수})}{OEL_i(\text{노출기준})}$$

⑤ 혼합물질에 대한  $SAE_t$ 를 구한다.

⑥ 97.5%의 신뢰도를 가진 혼합물질상한치 (MUCL: Mixed Upper Confidence Limit)를 계산한다.

$$SAE_t = (R_1^2 \times SAE_1^2 + \dots + R_n^2 \times SAE_n^2)^{0.5}$$

⑦ 97.5%의 신뢰도를 가진 혼합물질하한치 (MLCL: Mixed Lower Confidence Limit)를 계산한다.

$$\text{혼합물질하한치} = Y_p - \text{보정 } SAE_t$$

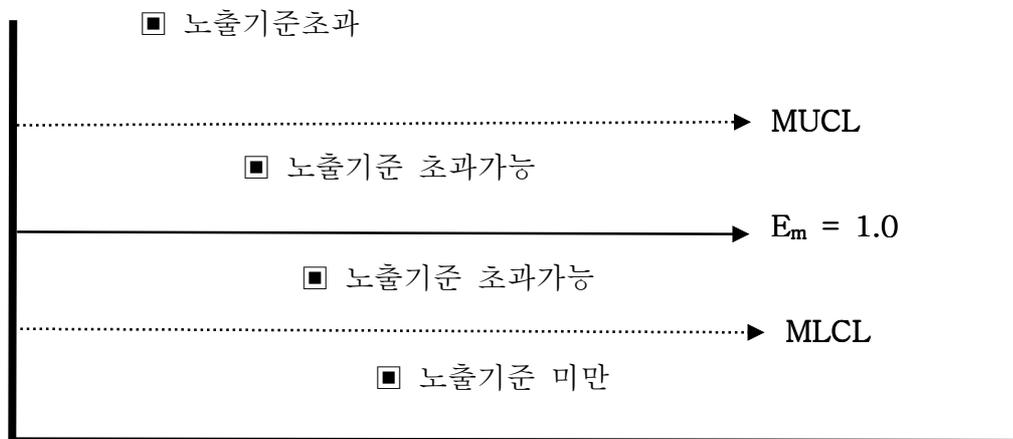
⑧ 다음과 같이 노출결과를 구분한다([그림 13]참조).

- $E_m \leq MLCL$  일때 노출기준미만
- $MLCL \leq E_m \leq MUCL$  일때 노출기준초과 가능
- $E_m > MUCL$  일때 노출기준 초과

## 5-7. 단시간 측정결과에 대한 평가방법의 통계적 개선

### 5-7-1. 25개 이하의 시료를 채취한 경우의 평가

단시간 측정으로 25개 이하의 시료를 채취한 경우에 대한 평가방법은 기본적으로 Bar-Shalom 등이 제시한 그래프를 사용한 평가방법을 표로 작성하여 적용하도록 한다. 다만 시료의 채취는 전 작업시간을 단시간 시료



[그림 13] 혼합물질에 대한 평가안의 도해

채취에 소요되는 실시간으로 균등하게 나눈 뒤 원하는 수치의 시료수를 무작위로 추출하여야 한다. 이 경우 신뢰수준을 95%로 하고 단시간시료채취의 최소 시료수는 12개(통계적으로 의미 있는 수치는 아니며 현행의 관련고시 기준을 준용함)로 하며 시료채취·분석오차는 고려하지 않는다. 다음과 같이 관련고시에 평가방법의 추가가 권고될 수 있다.

■ 작업시간에 대해 n개(25개 이하)의 단시간측정치가 있는 경우

- ① 작업시간동안에 얻어진 n개의 단시간시료의 분석결과  $X_1, X_2, \dots, X_n$ 과 측정시간, 노출기준(OEL)을 준비한다.
- ② 각 측정치를 노출기준으로 나눈 표준화값( $X_i$ )을 구한다

$$X_i = \frac{X_i(\text{노출농도})}{OEL(\text{노출기준})}$$

- ③ 각 측정치에 대한 자연대수치(Y)를 구한다.

$$Y_i = \text{Log}(x_i)$$

- ④  $Y_i$ 의 평균치와 표준편차를 구한다.

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \times (Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} (Y_1 - \bar{Y})^2 + (Y_2 - \bar{Y})^2 + \dots + (Y_n - \bar{Y})^2}$$

⑤ 계산된  $\bar{Y}$  와 s를 사용하여 [표 5]를 이용 다음과 같이 판정을 실시한다.

- “기준미만”에 속하는 경우 노출기준 미만
- “판정불가”에 속하는 경우 노출기준초과 가능
- “기준초과”에 속하는 경우 노출기준 초과

#### 5-7-2. 26개 이상의 시료를 채취한 경우의 평가

단시간 시료채취의 경우에도 일반적으로 시료의 수가 30개를 초과하면 통계적으로 결과가 정규분포에 가까운 것으로 알려져 있으므로 시료수와 결정된 신뢰수준을 기준으로 평가가 가능하다(Leidel, et al. 1977). 앞 절에서는 시료의 수가 25개까지의 경우를 설명하였으므로 26개에서 29개까지는 이 기준에 적합하지는 않지만 30개에 근사하고 또한 Leidel 등이 제시한 그래프에서도 25개 이상의 경우 판정기준간에 거의 차이를 보이지 않을 정도여서 그래프가 제시되어 있지 않으므로 정규분포를 하는 것으로 가정한 평가를 실시하여도 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

이 경우 기본적인 평가의 기준은 근로자의 근무 전시간(8시간)에 다수의 시료를 채취한 경우와 유사한 방법을 사용하되 평균치와 표준편차는 바로 앞 절에서와 같이 채취된 시료의 결과로부터 구하여 사용하며 시료채취·분석오차는 평가에서 고려하지 않는다. 평가를 위한 신뢰수준은 양측검정의 95% (단측검정의 97.5%)를 적용한다. 다음과 같이 관련고시에 평가방법의 추가가 권고될 수 있다.

#### ■ 작업에 대한 n개(26개 이상)의 단시간 측정치가 있는 경우

- ① 작업시간동안에 얻어진 n개의 단시간시료의 분석결과  $X_1, X_2, \dots, X_n$ 과 측정시간, 노출기준(OEL)을 준비한다.
- ② 각 측정치를 노출기준으로 나눈 표준화값( $Y_i$ )을 구한다.

$$Y_i = \frac{X_i(\text{노출농도})}{OEL(\text{노출기준})}$$

③  $Y_i$ 의 평균치와 표준편차를 구한다.

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \times (Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} (Y_1 - \bar{Y})^2 + (Y_2 - \bar{Y})^2 + \dots + (Y_n - \bar{Y})^2}$$

④ 노출기준상한치(UCL)과 하한치(LCL)을 구한다.

$$\text{- 상한치} = \bar{Y} - \frac{1.960 \times s}{\sqrt{n}}$$

$$\text{- 하한치} = \bar{Y} + \frac{1.960 \times s}{\sqrt{n}}$$

⑤ 다음과 같이 노출결과를 구분한다.

- 상한치 ≤ 1 일때 노출기준 미만
- 하한치 ≤ 1, 상한치 > 1 일때 노출기준초과 가능
- 하한치 > 1 일때 노출기준 초과

### 5-7-3. 5인 미만사업장의 작업환경측정 및 장시간 측정결과와의 연계

단시간 시료채취는 시료수가 충분하지 않은 한 기본적으로 바람직한 방법은 아니며 통계적인 근거는 없지만 앞에서 제한 최소 시료수(12개)는 근로자 1인당에 해당하는 수치로 해석하는 것이 바람직하다. 따라서 해당작업장소에 근로자가 2인 이상인 경우에는 최고노출근로자를 찾아내기 위하여 적용되는 최소 시료수 ([표 4])를 적용하여 다시 12를 곱한 수치가 필요한 해당 작업자의 최종 최소 시료수가 된다.

그러나 현실적으로 근로자수를 기준으로 한 [표 4]의 해당 수치 만큼에 12를 곱한 시료수가 필요하고 각 시료의 채취가 전 작업시간을 균등하게 나눈 뒤 무작위로 선별된 시간에 채취되려면 거의 8시간이 소요되므로

결코 경제적인 방법이라고 볼 수 없다. 따라서 근로자가 다수인 사업장에서 단시간 시료채취방법이 시행될 가능성은 매우 낮다고 보아야 한다.

다만 해당 단위작업장소에서 최고노출가능성이 있는 지점을 확실하게 찾아서 측정이 가능한 경우에는 단일지점을 기준으로 측정을 실시하여 이를 최고노출근로자와 같은 개념으로 보아 평가가 가능해진다. 실제로 근로자가 5인 미만의 사업장의 경우 최고노출위치의 판정이 어렵지 않을 것으로 보이므로 2개 정도의 최고노출가능 지점에서 단시간 시료를 채취하도록 하여 그 중 높은 결과를 사용하여 평가를 실시하도록 하면 경제적인 방법으로 신뢰성 있는 결과가 얻어질 수 있다고 판단된다. 또한 8시간 동안의 시료채취를 요구하는 경우 인건비를 포함한 부대비용이 증가하여 바람직하지 않음으로 작업상황을 고려하여 하루 4시간 정도에서 시료채취가 가능하도록 규정(평가 시는 측정되지 않은 시간이 측정시간과 농도가 같다고 가정)하되 반드시 최악조건에서의 측정이 이루어지도록 규제할 필요가 있다.

상기의 조건에 적합하게 5인 미만 사업장에서 단시간 시료채취 방법에 의해 작업환경측정이 이루어지고 결과가 “기준미만”으로 판정된 경우에는 장시간 시료채취 시와 같이 작업장에 큰 문제가 없는 것으로 판단하여 지속적인 현재의 관리가 이루어지도록 조치하는 것으로 무리가 없을 것으로 보인다. 다만 기준을 초과한 것으로 판정되거나 기준초과가 가능한 것으로 판정된 경우에는 문제가 복잡해진다.

일단 단시간 측정결과가 “기준초과”로 판정된 경우에는 장시간측정 시의 “기준초과”와 같은 수준의 조치를 취하도록 정하되 다만 사업주가 결과에 이의가 있다고 판단하고 재측정을 원하는 경우에 한해서만 장시간 측정 방법에 의한 재평가와 그 결과에 상응하는 조치를 취하도록 하면 문제가 크지 않을 것으로 판단된다. 이 경우 사업주가 재측정을 원하지 않는다면 “기준초과”에 해당하는 것으로 보아 조치하도록 한다. 다만 단시간 측정결과가 “기준초과 가능”으로 판정되는 경우에는 반드시 장시간 측정방법으로 재측정을 실시한 후 결과에 따른 조치를 취하도록 하여야 할 것으로 보인다. “기준초과 가능”으로 판정되는 경우 동일한 단시간 측정방법으로 재평가를 실시하는 방안을 허용하는 경우 이는 장시간 측정보다 작의의 가능성이 커질 우려가 더욱 높기 때문이다. 현실적으로 작의에 의한 측정결과의 조정은 손쉽게 막을 방법이 마땅치 않지만 가능한 한도에서 근로자에게 불리한 방법으로 사용되지 않을 이론적 근거는 갖추어야 할 것으로 보이기 때문이다.

## 6. 8시간이상 작업에 대한 평가의 통계적 개선

기본적으로 Brief와 Scala의 보정방법(Brief & Scala, 1975)을 적용하는 것이 독성학적인 면에서 논란의 여지가 적으로 것으로 판단된다. OSHA의 보정법은 근로자가 독성물질에 노출되는 시간만을 보정하고 체내에 쌓인 독성물질의 배출시간을 고려하지 않고 있으므로 근로자의 보호측면에서 바람직하지 않을 수 있다. OSHA의 경우는 대개 부서와 감독관의 보호차원에서 과소 평가된 결과를 산출하는 것이 관례이므로 이론적으로는 바람직하지 않은 경우가 종종 있다. 다음과 같이 관련고시에 평가방법의 추가가 권고될 수 있다.

### ■ 일일 8시간 이상 주 40시간 이상 작업에 대한 보정

① 일일 실 작업시간(H)을 기준으로 다음과 같이 노출기준에 보정노출계수(F)를 곱한 수치를 수정 노출기준으로 하여 일일 단위로 평가한다.

$$\text{보정노출계수}(F) = \frac{8}{H} \times \frac{24-H}{16}$$

$$\text{보정노출기준} = \text{노출기준}(OEL) \times \text{보정노출계수}(F)$$

② 만성중독을 일으키는 물질은 주간 실 작업시간(h)을 기준으로 다음과 같이 노출기준에 보정노출계수(f)를 곱한 수치를 수정 노출기준으로 하여 주간 단위로 평가한다.

$$\text{보정노출계수}(f) = \frac{40}{h} \times \frac{168-h}{128}$$

$$\text{보정노출기준} = \text{노출기준}(OEL) \times \text{보정노출계수}(f)$$

①의 평가방법은 원칙적으로 급성중독을 일으키는 물질에 대한 기준이나 현재 모든 물질에 대한 측정결과의 평가가 일 단위를 기준으로 이루어지므로 모든 물질의 평가에 적용할 수 있다. ②의 경우는 현재 주단위로 근로자의 노출을 평가할 방법이 없으므로 필수 적용 권고사항은 아니다.

## 주요 참고 문헌

1. 윤명조 등 : 작업환경 측정대상 및 측정횟수 조정제도 개발에 관한 연구 보고서, 1993.
2. 노동부 : 작업환경측정 및 정도관리규정 9고시 제 2001-39호, 2001.
3. 한국산업안전공단 : 작업환경 측정제도 개선방안, 1993.
4. OSHA : Technical Manual, [www.osha.gov/](http://www.osha.gov/)
5. 백남원 : 산업위생학개론, 신광출판사, 2000.
6. 백남원 등 : 작업환경측정 및 평가, 신광출판사, 2002.
7. Leidel et al. : Occupational Exposure Sampling Strategy Manual, NIOSH, 1977.
8. Bar-Shalom et al. : handbook of Statistical Tests for Evaluating Employee Exposure to Air Contaminants. NIOSH, 1975.
9. Leidel and Busch : Statistical methods for the Determination of Noncompliance with Occupational health Standards, NIOSH, 1975.
10. Leidel et al. : Exposure Measurement Action Level and Occupational Environmental Variability, NIOSH, 1975.
11. 중앙노동재해방지협의회 : 유기용제업무의 위생관리, 1984.
12. 일본작업환경측정협회 : 작업환경측정 Q & A : 1985.
13. ACGIH : TLV & BEI, 2003.
14. AIHA: The Occupational Environment It's Evaluation and Control, 1998.
15. NIOSH : Manual of Analytical Methods, [www.cdc.gov/niosh/](http://www.cdc.gov/niosh/)
16. Mulhauzen and Damiano : A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposure, AIHA, 1988.
17. Brief and Scarf : Occupational Exposure Limits for Novel Work Schedule, AIHA Journal, Vol. 36, pp. 467-471, 1975.
18. US-OSHA. : 29 CFR 1910.95, Occupational Noise Exposure, 1997.
19. 노동부 : 화학물질 및 물리적인자의 노출기준(노동부고시 제2002-8호), 2002.
20. Bernard : Personal Dosimetry versus Environmental Monitoring, J. of Occupational Medicine, Vol. 15, pp. 639-641, 1973.

# 화학물질 측정결과에 대한 평가방법의 통계학적 개선

2003. 7

산업안전보건연구원

장재길, Ph.D., CIH