

# EDXRF에 의한 용접흄 중의 중금속의 비파괴 정량

박승현<sup>†</sup> · 정지연 · 유장진 · 이나루 · 유일재 · 송경석 · 이용학 · 한정희 · 김성진 · 박정선 · 정호근

한국산업안전공단 산업안전보건연구원

## The Non-Destructive Determination of Heavy Metals in Welding Fume by EDXRF

Seunghyun Park<sup>†</sup> · Jee Yeon Jeong · Jang Jin Ryoo · Naroo Lee · Il Je Yu · Kyung Seuk Song  
Yong Hag Lee · Jeong Hee Han · Sung Jin Kim · Jungsun Park · Ho Keun Chung

Occupational Safety and Health Research Institute, Korea Occupational Safety and Health Agency

The EDXRF(Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer) technique was applied to the determination of heavy metals in welding fume. The EDXRF method designed in this study was a non-destructive analysis method. Samples were analyzed directly by EDXRF without any pre-treatment such as digestion and dilution. The samples used to evaluate this method were laboratory samples exposed in a chamber connected with a welding fume generator. The samples were first analyzed using a non-destructive EDXRF method. The samples subsequently were analyzed using AAS method to verify accuracy of the EDXRF method. The purpose of this study was to evaluate the possibility of the non-destructive analysis of heavy metals in welding fume by EDXRF. The results of this study were as follow:

1. When the samples were collected under the open-face sampling condition, a surface distribution of welding fume particles on sample filters was uniform, which made non-destructive analysis possible.
2. The method was statistically evaluated according to the NIOSH(National Institute for Occupational Safety and Health) and HSE(Health and Safety Executive) method.
3. The overall precision of the EDXRF method was calculated

at 3.45 % for Cr, 2.57 % for Fe and 3.78 % for Mn as relative standard deviation(RSD), respectively. The limits of detection were calculated at 0.46  $\mu\text{g}/\text{sample}$  for Cr, 0.20  $\mu\text{g}/\text{sample}$  for Fe and 1.14  $\mu\text{g}/\text{sample}$  for Mn, respectively.

4. A comparison between the results of Cr, Fe, Mn analyzed by EDXRF and AAS was made in order to assess the accuracy of EDXRF method. The correlation coefficient between the results of EDXRF and AAS was 0.9985 for Cr, 0.9995 for Fe and 0.9982 for Mn, respectively. The overall uncertainty was determined to be  $\pm 12.31 \%$ ,  $8.64 \%$  and  $11.91 \%$  for Cr, Fe and Mn, respectively.

In conclusion, this study showed that Cr, Fe, Mn in welding fume were successfully analyzed by the EDXRF without any sample pre-treatment such as digestion and dilution and a good correlation between the results of EDXRF and AAS was obtained. It was thus possible to use the EDXRF technique as an analysis method of working environment samples. The EDXRF method was an efficient method in a non-destructive analysis of heavy metals in welding fume.

**Key Words :** EDXRF, Energy dispersive X-ray fluorescence spectrometer, Heavy metal, Welding fume, Non-destructive determination

## I. 서 론

시료 중에 포함된 중금속의 분석방법은

산업사회의 발달과정에서 많은 발전을 이루어 왔으며, 대표적인 방법이 원자흡수 분광광도계(Atomic Absorption Spectropho-

tometer, AAS)와 유도결합플라즈마 분광광도계(Inductively Coupled Plasma Spectrophotometer, ICP)에 의한 방법이다. AAS 방법은 금속원소는 물론 준금속과 일부의 비금속 원소들까지 약 70 여개의 원소들을 정량 할 수 있는 분석방법으로 다른 방

접수일 : 2001년 11월 24일, 채택일 : 2001년 12월 19일

<sup>†</sup> 교신저자 : 박승현(인천시 부평구 구산동 344, 산업안전보건연구원 산업보건위생연구실  
Tel : 032-5100-903, E-mail : sh903@kosha.net)

법에 비해 신속, 정확하고 간편하며 비교적 시료의 전처리과정이 복잡하지 않아 여러 분야의 화학 분석에 이용되고 있다. 한편 ICP방법은 동시에 다원소 분석이 가능하며, 넓은 농도범위에서 직선성이 있고, 불활성가스를 사용하는 등 AAS의 단점을 보완한 중금속 분석방법으로 최근 들어 그 활용이 증대되고 있다(김선태, 1994). 그러나 AAS 및 ICP 두 방법 모두 물질의 정성이 용이하지 않다는 것이 가장 큰 단점 중에 하나이다. 즉 시료에 대한 정보가 없다면 분석은 거의 불가능하거나 매우 어려우며, 충분한 정보가 있어야만 신뢰성 있는 분석결과를 제공할 수 있다. 또한 작업환경평가시의 유해인자의 노출농도를 확인하기 위해서는 작업환경 측정 이후 시료의 전처리와 기기분석의 과정을 거쳐야하기 때문에 최소 몇 일의 시간이 소요된다는 점을 고려한다면 향후 작업환경평가에 있어 신속, 정확한 시료 분석방법의 도입을 위한 많은 연구, 검토가 필요할 것으로 판단된다. 실제로 작업환경 평가의 효율 향상을 위한 연구검토가 활발히 진행되고 있다. 이러한 예로 X-선 형광분석기(X-ray Fluorescence Spectrometer, XRF)를 이용하여 실시간으로 에어로졸을 모니터 할 수 있는 방법이나(Thomson 등 1997), Lead-Based Paint를 확인하기 위해 Chemical Test Kit나 Portable XRF를 이용한 실시간 노출농도 평가방법(Schmehl 등, 1999) 등을 들 수 있다. XRF는 C(원자번호 4)부터 U(원자번호 92)까지의 전 원소를 수십 %에서 미량까지 신속하게 분석할 수 있어 1950년대 후반에서 1960년대 초부터 널리 보급되기 시작하였다. 그 후 산업의 발달과 함께 제철, 비철제련, 금속가공, 시멘트, 요업, 유리공업 등에서 널리 사용되고 있으며, 품질보증을 위한 분석 방법 및 신제품 개발에 관한 연구를 뒷받침하기 위한 정밀화학분석 등에도 이용되고 있다. XRF방법은 X-선관에서 나오는 연속 복사선을 시료에 조사하여 전자 전이과정에서 발생하는 형광 X-선을 분석에 이용하는 것으로, 들뜬 원소로부터 방출된 X-선은 원소마다 독특한 파장을 가지고 있으며 그 세기

는 들뜬 원자수에 비례한다. 따라서 원소 고유의 형광에너지 및 파장의 차이로 원소를 정성할 수 있으며 그 강도를 이용하여 정량분석에 응용할 수 있다(김선태, 1994). 과거 XRF는 시료 중에 함유되어 있는 미지원소의 성분분석이나 품질관리 차원에서의 함량분석 등에 주로 활용하여 왔던 분석기기이나 산업의 발달과 함께 고감도, 고분해능의 장비의 개발이 가능하여 최근 들어 매우 다양한 분야의 많은 연구자들에 의해 원소의 정성은 물론 미량원소의 정량분석에도 활용이 증대되고 있다. Bandhu 등(1996)은 공기 오염원의 평가를 위해 EDXRF(Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer)를 활용하여 에어로졸 시료중의 원소들을 정량한 바 있고, YAP 등(1990)은 EDXRF를 이용하여 망간, 철, 코발트, 니켈, 구리, 아연 등의 중금속을 분석하였다. 그리고 Nguyen 등(1998)은 불꽃원자화 AAS 방법으로는 미량원소의 정량이 불가능한 수에 대해 EDXRF를 이용하여 환경시료 중의 농도를 정량한 바 있고, Hong 등(1996)은 작업자의 혈액중의 납, 구리, 아연 등의 미량원소의 정량에 EDXRF를 활용한 바 있다. 한편 미국 OSHA(Occupational Safety and Health Administration)의 경우 허용기준이 규정된 알루미늄 등의 총분진 및 호흡성분진의 평가에 있어 원소의 정성을 위한 방법으로 XRF에 의한 측정, 분석방법을 제시하고 있으며(OSHA Method ID-204, 1990), 영국의 HSE(Health and Safety Executive)에서는 작업환경의 모니터링을 위한 목적으로 XRF에 의한 공기

중 금속 및 준금속의 측정방법을 제시하고 있다(HSE MDHS 91, 1998). XRF가 장점을 가지는 것은 비파괴 분석이 가능하며 시료조제가 용이하고 신속하며, 동시에 많은 원소의 분석이 가능하며 분석시간이 짧고, 재현성이 우수하다는 것이다. 본 연구에서는 작업환경중의 중금속 노출농도 평가의 효율 향상을 위해 EDXRF를 이용하여 측정시료의 전처리 없이 시료 중에 포함된 중금속의 농도를 정량할 수 있는 분석방법을 연구하고자 하였다. 이를 위해 크롬, 철, 망간 등의 중금속 성분이 포함되어 있는 용접흙을 대상으로 EDXRF에 의한 분석 방법을 연구하여 현재 보편적으로 활용되고 있는 AAS 방법과의 비교분석을 통해 분석방법의 신뢰성을 평가하였다.

## II. 연구방법

### 1. 시료제조

#### 1) 용접흙 발생장치

연구에 필요한 용접흙 시료의 제조를 위해 Figure 1과 같이 용접흙 발생장치를 이용하여 시료를 제조하였다. 시료제조에 사용된 모재는 스테인레스 디스크(SUS 304, 직경×두께 : 500 mm×10 mm)였으며, 용극은 스테인레스 용접봉(KST308, 직경×길이 : 3.2mm×300mm)을 사용하였다. 용접 전압 및 전류는 각각 26 V, 220 A이었으며, 용접극성은 모재인

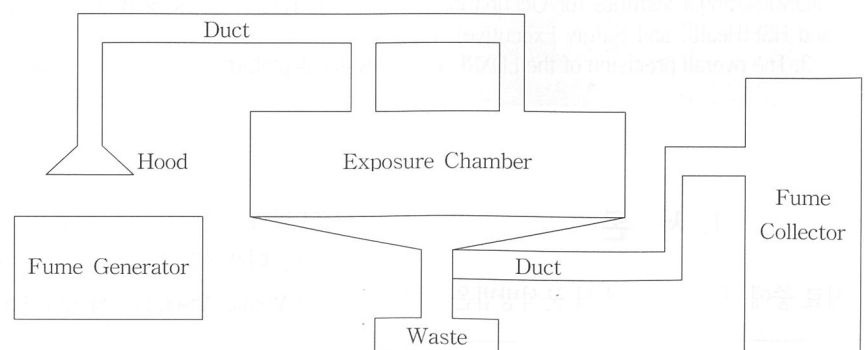


Figure 1. Diagram of welding fume generating system

스테인레스 디스크가 음극, 용접봉이 양극이었다. 동 용접흡 발생장치는 유일재 등(Toxicology Letters, 2000)이 제작을 한 것으로 본 연구를 위한 시료 제조에 활용하였다. 장치는 회전하는 모재에 용극인 용접봉이 자동으로 이동되면서 용접이 이루어지도록 설계되어 있다. 이렇게 자동 용접을 통해 발생한 흡은 그림 1에서와 같이 덕트를 통해 챔버내로 모이도록 되어 있으며 챔버의 상층에는 fan이 달려있어 챔버내로 유입된 흡이 균일하게 퍼지도록 설계되어 있다. 챔버내의 흡은 챔버에 연결되어 있는 분진채취기와 덕트를 통해 최종 배출되도록 설계되어 있다.

## 2) 시료채취

용접흡 발생장치에서 발생되어 챔버내에 유입된 흡을 셀룰로스 에스테르 막여과지(pore size 0.8 $\mu$ m, diameter 37mm, milipore, USA)를 이용하여 개인시료채취기(MSA, Model Escort ELF, USA)로 2~3 L/min의 유량으로 5분~60분의 범위에서 채취시간을 조절하여 가면서 농도별로 시료를 제조하였다. 시료는 흡 입자의 여과지 표면의 균일한 분포를 위해 open face 상태로 채취하였다.

## 3) 제조시료의 균일성 평가

본 연구는 시료에 대한 전처리 없이 여과지 자체에 직접 X-ray를 조사하여 여과지에 채취된 흡 중의 중금속을 정량하기 위한 방법을 연구하는 것으로 신뢰성 있는 분석결과를 얻기 위해서는 여과지 표면에 채취된 입자의 분포가 균일해야 한다. 따라서 용접흡 발생장치에서 제조한 시료표면의 입자 분포의 균일성을 평가하기 위해 여과지의 정 중앙과 중앙을 중심으로 전, 후, 좌, 우 등 총 5지점에 X-ray를 조사하여 시료 중에 함유되어 있는 중금속 각각에 대한 X-ray 형광에너지의 강도(Intensity)를 구하여 상대표준편차를 확인하였다.

## 4) 표준시료 제조

용접흡 챔버내에서 농도별로 시료를 제조한 후 시료의 농도를 간접적으로 정량

하여 표준시료로 활용하였다. 즉 시료를 제조할 때 각 농도수준별로 동시에 2~3 개씩을 제조한 후 모두 EDXRF로 분석하여 형광에너지의 강도를 확인하고, 각 농도수준별 1개를 표준시료로 선택하고 나머지는 AAS로 분석하여 시료의 량에 따른 강도에 대한 검량선을 작성하여 표준시료로 선택한 시료의 농도를 간접적으로 정량하는 방법이다.

## 2. 시료분석

### 1) EDXRF(에너지분산형 X-ray 형광분석기) 방법

시료는 별도의 전처리 없이 시료표면에 X-ray를 조사하여 시료에 함유되어 있는 중금속 성분 각각에 대한 X-ray 형광에너지의 강도를 평가하여 분석하였다. 미지 시료의 정량을 위해 표준시료의 농도에 따른 EDXRF의 강도에 대한 검량선을 작성하여 상대적인 농도를 평가하였다. EDXRF 분석에 사용된 모든 시료는 데스크레이터내에서 하루이상 건조한 후 분석하였다. 연구에 사용된 EDXRF는 Shimadzu사의 Model EDX-800이었으며 시료분석을 위한 기기분석 조건은 표 1과 같다.

Table 1. Instrument parameters of EDXRF

Parameters	Conditions
X-ray tube power	50kV, 1mA
Anode	Rh
Detector	Si(Li)
Spectrum Analysis	MCA(2048 channel)
Resolution	155 eV at Mn K $\alpha$
Measurement time	100 sec
Analysis Line	K $\alpha$ Line

### 2) AAS(원자흡수분광광도계) 방법

EDXRF에 의한 시료 분석결과의 비교평가를 위해 AAS(Varian사 SpectrAA 880)를 이용하여 시료의 농도를 확인하였다. 시료 분석을 위해 크롬, 철, 망간 등의 중금속을 분석할 수 있는 방법인 NIOSH 측정분석방법

을 참고하였으며(NIOSH, 1994), 마이크로파회화기(CEM사 MDS 2000, USA)로 시료를 전처리 한 후, AAS를 이용하여 정량 분석을 실시하였다.

## 3. 결과의 신뢰성 평가

### 1) 검출한계 및 정량한계 평가

검출한계와 정량한계는 미국 NIOSH에서 시료채취 및 분석방법의 평가를 위해 권고하고 있는 방법에 준하여 평가하였다(NIOSH, 1995). 시료는 1000 ppm의 표준용액을 일정 농도별로 희석한 후 0.1 mL를 여과지표면에 Loading하여 데스크레이터에서 하루 이상 건조하여 제조하였다. 시료당 1.25~20  $\mu$ g 범위에서 시료를 분석하여 회귀분석에 의한 표준오차를 이용하여 검출한계와 정량한계를 구하였다.

### 2) 정밀도 평가

영국 HSE에서는 WDXRF(Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer)를 이용한 중금속 분석방법의 정밀도 평가를 위해 반복 분석시의 상대표준편차를 이용하여 평가하였다. 시료 농도는 OELs(Occupational Exposure Limits)을 기준으로 최소 채취량을 60L로 하였을 때의 OEL의 0.1배에서 2배의 범위에서 평가를 하였다(HSE, 1998). 본 연구에서는 시료 채취부피 100L(2 Lpm에서 50분간 채취)를 기준으로 노출기준(TLV)의 0.5~2배의 범위를 포함할 수 있도록 용접흡 시료를 제조하였다. 다만 철의 경우는 다른 물질에 비해 TLV가 높아 노출기준의 1배의 농도 수준까지 시료를 제조하였다.

정밀도 평가에 사용된 시료농도(mg/sample)는 표 2와 같다. 정밀도는 시료당 3회 이상의 반복분석을 실시하여 상대표

Table 2. Concentration range of samples used to evaluate precision

Element	Range(mg/sample)	TLV(mg/m <sup>3</sup> )	TLV(mg/100L)
Cr	0.020~0.250	0.5	0.050
Fe	0.030~0.600	5	0.500
Mn	0.020~0.200	1	0.100

준편차를 구하여 평가하였다.

### 3) 정확도 평가

EDXRF에 의한 분석결과와 정확도를 확인하기 위해 EDRXF와 AAS 두 분석방법에 의한 분석결과간의 상관분석을 실시하였으며, 이와 함께 영국 HSE 방법에서 정확도 평가에 있어 사용하고 있는 종합 불확실도(Overall Uncertainty)를 평가하였다.

#### (1) 분석방법간의 상관성 평가

EDXRF와 AAS에 의한 분석 결과간의 상관분석을 위해 SPSS 7.5.2K(SPSS Inc.) 통계프로그램과 Excel 97(Microsoft Corporation) 프로그램을 사용하였으며, 상관분석결과를 그림으로 표현하기 위해 Sigma-Plot 3.02 프로그램(Jandel Corporation)을 사용하였다.

#### (2) 종합불확실도(Overall Uncertainty) 평가

실험값과 이론값의 차이와 반복분석결과의 표준편차를 종합하여 백분율(%)로 표현한 것을 종합불확실도(Overall Uncertainty, OU)라 하는데, 이것은 결국 EDXRF에 의한 분석결과와 정밀도와 정확도를 종합적으로 평가하는 것을 의미한다. 종합불확실도는 다음의 식으로 표현된다.

$$OU = \frac{|X_{\text{result}} - X_{\text{ref}}| + 2\sigma(n-1)}{X_{\text{ref}}} \times 100\%$$

..... Equation 1

- OU : Overall Uncertainty
- $X_{\text{result}}$  : n회 반복분석한 결과의 평균값
- $X_{\text{ref}}$  : 참값 또는 신뢰할 수 있는 참고 값
- $\sigma(n-1)$  : n회 반복분석 결과의 표준편차

Equation 1은 다음과 같이 다시 표현될 수 있다.

$$OU = [|\text{bias}| + (2 \times \text{RSD})] \times 100\%$$

..... Equation 2

본 연구에서는 AAS에 의한 결과 값을  $X_{\text{ref}}$ 로 사용하였으며, EDXRF에 의한 분석결과를  $X_{\text{result}}$ 로 사용하여 평가하였다.

있다(HSE, 1998).

## 2. 시료분석의 신뢰성 평가결과

### 1) 검출한계 및 정량한계 평가결과

시료당 1.25~20  $\mu\text{g}$  범위에서 시료량에 따른 EDXRF 강도에 대한 회귀방정식을 구하였다. 회귀방정식의 Y축(Intensity)의 표준오차(Sy)와 기울기를 이용하여 검출한계( $3 * \text{Sy/기울기}$ )와 정량한계(검출한계의 3.3배에 해당하는 값)를 구하였다. 표 4는 회귀방정식으로부터 구한 검출한계와 정량한계이다.

### 2) 정밀도 평가결과

시료채취량 100 L를 기준으로 하여 노출기준의 0.5~2배의 범위를 포함할 수 있도록 용접용 시료를 제조하여 반복분석을 통해 EDXRF에 의한 시료분석의 정밀도를 평가하였다. 표 5~7은 각각 크롬, 철, 망간에 대해 정밀도를 평가한 결과이다. 평가결과 모든 농도수준에서 반복분석에 의한 정밀도가 우수한 것으로 평가되었다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 시료의 균일성 평가결과

시료채취량 100L를 기준으로 노출기준의 0.5~2배의 범위를 포함한 5개의 농도수준에서 균일성을 평가하였다. 철은 크롬이나 망간보다 상대적으로 노출기준이 높아 노출기준의 1 배의 수준까지 평가하였다. 표 3은 평가결과를 요약하여 정리한 것이다. 전체적으로 상대표준편차가 4% 이하로 평가되어 시료가 균일하게 분포되어 있다고 판단할 수 있었다. 본 연구결과 시료당 1 mg 이상의 분진무게에서도 재현성 있는 분석결과를 얻을 수 있었으나 영국 HSE 방법에서는 메트릭스에 의한 X-선 흡수의 영향으로 인해 분석의 오차를 가져올 수 있기 때문에 직경 37 mm 여과지를 이용한 경우에는 분진의 무게가 1 mg 이하(25 mm의 경우 0.5 mg 이하)가 되도록 시료채취 할 것을 권고하고

Table 3. Uniformity of particle distribution on surface of sample filter

Cr			Fe			Mn		
Amount (mg)	Intensity (mean)	RSD (%)	Amount (mg)	Intensity (mean)	RSD (%)	Amount (mg)	Intensity (mean)	RSD (%)
0.027	0.183	3.73	0.032	0.345	2.81	0.018	0.170	3.49
0.059	0.354	3.29	0.090	0.831	2.95	0.038	0.318	3.69
0.091	0.524	1.57	0.164	1.451	2.17	0.055	0.450	1.39
0.118	0.668	3.00	0.232	2.027	2.30	0.073	0.586	2.67
0.281	1.527	1.84	0.560	4.781	1.74	0.177	1.377	1.81

Table 4. Limit of Detection(LOD) and Limit of Quantification(LOQ)

Sample No.	Cr		Fe		Mn	
	$\mu\text{g}$	Int	$\mu\text{g}$	Int	$\mu\text{g}$	Int
S1	1.25	0.012	1.25	0.017	1.25	0.017
S2	2.50	0.019	2.50	0.028	2.50	0.023
S3	5.00	0.036	5.00	0.051	5.00	0.042
S4	10.00	0.070	10.00	0.099	10.00	0.082
S5	20.00	0.133	20.00	0.192	20.00	0.168
Reg. Equation	Y= 0.006X+0.004		Y= 0.009X+0.005		Y= 0.008X+0.003	
Sy	0.001		0.001		0.003	
LOD	0.46		0.20		1.14	
LOQ	1.53		0.65		3.77	



Table 5. Precision of Cr analysis by EDXRF

	(unit : Intensity)				
Amount(mg)	0.023	0.069	0.106	0.132	0.286
Mean	0.164	0.405	0.602	0.741	1.555
SD	0.004	0.013	0.008	0.008	0.013
RSD(%)	2.44	3.23	1.32	1.12	0.86

Table 6. Precision of Fe analysis by EDXRF

	(unit : Intensity)				
Amount(mg)	0.027	0.103	0.192	0.265	0.567
Mean	0.305	0.943	1.686	2.301	4.843
SD	0.004	0.009	0.008	0.015	0.019
RSD(%)	1.31	0.96	0.45	0.67	0.39

Table 7. Precision of Mn analysis by EDXRF

	(unit : Intensity)				
Amount(mg)	0.016	0.042	0.065	0.082	0.184
Mean	0.153	0.353	0.530	0.655	1.429
SD	0.006	0.013	0.012	0.009	0.006
RSD(%)	3.59	3.68	2.23	1.30	0.45

Table 8. Overall Uncertainty of EDXRF Analysis

	(unit : %)		
	Cr	Fe	Mn
bias	5.41	3.51	4.35
RSDprecision	2.00	0.83	2.58
RSDdistribution	2.81	2.43	2.76
RSDtotal	3.45	2.57	3.78
OU	12.31	8.64	11.91

Table 9. Overall Uncertainty of XRF Analysis by HSE Method

	(unit : %)		
	Cr	Fe	Mn
OU	25.4	27.4	25.3

## 3) 정확도 평가결과

(1) EDXRF AAS 가 (2) 가 (Overall Uncertainty, OU) 가 RSD RSD<sub>precision</sub> RSD<sub>distribution</sub> AAS EDXRF 가 12.31 (Table 8). HSE NIOSH 가 EDXRF 가 AAS 가

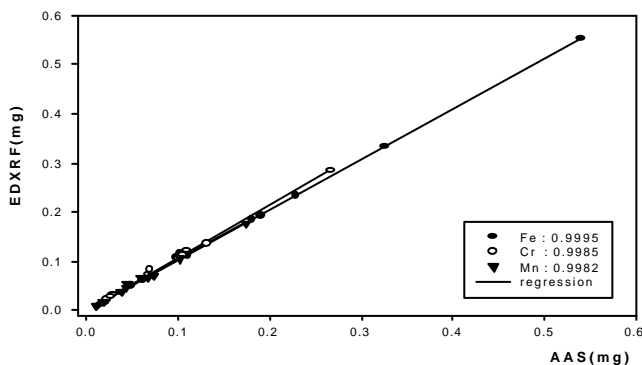


Figure 2. Correlation between results of EDXRF and AAS

가 , 가 가 25 ~ 27% (Table 9),  $\pm 25\%$  EDXRF , , . EDXRF 12.31 (Table 8). HSE NIOSH 가 EDXRF 가 AAS 가

1. 가 open face 가 EDXRF 2. EDXRF , , 0.46  $\mu\text{g}/\text{sample}$ , 0.20  $\mu\text{g}/\text{sample}$ ,

1.14  $\mu\text{g/sample}$  이었고, 정량한계는 크롬 1.53  $\mu\text{g/sample}$ , 철 0.65  $\mu\text{g/sample}$ , 망간 3.77  $\mu\text{g/sample}$  이었다.

3. EDXRF에 의한 시료분석의 정밀도를 알아보기 위해 시료채취량 100 L를 기준으로하여 노출기준의 0.5~2배의 범위에서 시료를 제조하여 정밀도를 평가한 결과 상대표준편차가 4 %를 초과한 경우가 없어 전체적으로 반복분석에 의한 정밀도가 우수한 것으로 평가되었다.

4. EDXRF와 AAS에 의한 정량분석 결과간의 상관성 분석결과 원소별 상관계수  $r$  값은 크롬 0.9985, 철 0.9995, 망간 0.9982로 평가되어 두 분석방법간의 상관계수가 높았다.

5. EDXRF 방법에 의한 정량분석결과와 신뢰성을 평가하기 위해 AAS에 의한 분석결과를 참고값으로 하여 정확도를 평가한 결과 종합불확실도는 크롬이 12.31 %, 철이 8.64 %, 망간은 11.91 % 이었다.

이상의 결과를 종합하여 평가할 때 EDXRF에 의한 용접흡 시료중의 크롬, 철, 망간의 비과파 정량분석 방법은 비록 분석결과와 신뢰성 면에서 기존의 AAS에 의한 분석방법을 대체할 수 있는 수준은 아니더라도 90% 정도의 정확도를 가지고 복잡한 전처리 없이 시료농도를 평가할 수 있는 방법이었다. 따라서 사업장 자율 작업환경관리의 목적이나, 작업환경 평가를 위한 예비조사, 작업환경 개선을 위한 국소배기장치 개선효과 평가 연구 등에 활용한다면 그 효용가치가 높을 것이라 판단되었다.

## REFERENCES

- 노동부. 작업환경측정 및 정도관리규정 (노동부 고시 제2001-39호); 2001.
- 노동부. 화학물질 및 물리적 인자의 노출 기준(노동부 고시 제97-65호); 1998.
- 김선태. 기기분석지침. 한국과학기술연구원; 1994.
- Thomson GM, Pochan CA, Markland RA, Thomson SA. Near Real-Time Mass Concentration Measurement of Medium and Heavy Elements in Aerosols Using X-ray Fluorescence. *American Industrial Hygiene Association Journal* 1997; 58:98~104
- Schmehl RL, Cox DC, Dewalt FG, Haugen MM, Koyak RA et al. Lead-Based Paint Testing Technologies: Summary of an EPA/HUD Field Study. *American Industrial Hygiene Association Journal* 1999;60:444~451
- Bandhu HK, Puri S, Shahi JS, Mehta D, Garg ML et al. An Evaluation of the Sources of Air Pollution in the City of Chandigarh, India: A Study using EDXRF Technique. *Nuclear Instrument & Methods in Physics Research B* 1996;114:341~344
- YAP CT, VIJAYAKUMAR V. Principal Component Analysis of Trace Elements from EDXRF Studies. *Applied Spectroscopy* 1990;44(6):1080~1083
- Nguyen TH, Boman J, Leermakers M, Baeyens W. Mercury Analysis in Environmental Samples by EDXRF and CV-AAS. *Fresenius J Anal Chem* 1998;360:199~204
- Hong NT, Ha HV. Application of EDXRF to the Determination of Lead and Other Trace Elements in the Body Fluids of Industrial Workers in Vietnam. *X-ray Spectrometry* 1996;25:3~14
- Occupational Safety and Health Administration(OSHA). Qualitative X-ray Fluorescence Analysis of Workplace Substances. Sampling and Analytical Methods, Method ID-204. OSHA, Salt Lake, Utah; 1990. Available from: URL:<http://www.osha-slc.gov/dts/sltc/methods/inorganic/id204/id204.html>
- Health and Safety Executive(HSE). Metals and Metalloids in Workplace Air by X-ray Fluorescence Spectrometry. Methods for the Determination of Hazardous Substances (MDHS), MDHS 91. HSE Books, HSE; 1998.
- Yu IJ, Kim KJ, Chang HK, Song KS, Han KT et al. Pattern of Deposition of Stainless Steel Welding Fume Particles Inhaled into the Respiratory Systems of Sprague-Dawley Rats Exposed to a Novel Welding Fume Generating System. *Toxicology Letters* 2000; 116: 103~111
- Yu KN, Miao JM. Non-destructive and Quantitative Investigation of Jingdezhen Blue and White Porcelains Using EDXRF. *Journal of X-ray Science and Technology* 1996;6:167~171
- National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH). Method 7300. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), 4th ed., NIOSH, Cincinnati, OH; 1994.
- National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH). NIOSH Technical Report: Guidelines for Air Sampling and Analytical Method Development and Evaluation. DHHS(NIOSH) Pub. No. 95-117, NIOSH, Cincinnati, OH; 1995.