한국산업위생학회지 제11권 제3호(2001년 12월)
J Korean Soc Occup Environ Hyg 2001;11(3):235-240

휴대용 X-Ray 형광기기(XRF)를 이용한 공기중 납농도 평가

안규동‡ · 이종천 · 조광성 · 김남수 · 김진호 · 이성수 · 이병국

순천향대학교 산업의학연구소

Evaluation of Lead levels in Airborne by a Portable X-Ray Fluorescence Instrument

Kyu Dong Ahn‡ · Jong Chun Lee · Kwang Sung Cho · Nam Su Kim · Jin Ho Kim · Sung Soo Lee · Byung Kook Lee

Institute of industrial Medicine, Soonchunhyang University

This study was performed to compare the lead levels of 20 quality control standard samples(KOSHA:18-2000) and 72 field samples in lead-acid battery manufacturing plant between ICP and portable-XRF methods.

1. While the proficiencies of 20 quality control standard samples by ICP were 100%, those of analytic result values by XRF were 75%.
2. The correlation coefficient(r) between the reference values for quality control (REF) and the analytic result values by ICP (ICP) was 1.0($p<0.05$), and simple linear regression equation and the coefficient(R2) were REF = -0.0009 + 1.016 ICP and 0.9997, respectively.
3. The correlation coefficient(r) between the analytic result values of quality control standard samples by ICP (ICP) and by XRF (XRF) was 0.975($p<0.05$), and simple linear regression equation and the coefficient(R2) were ICP = -0.0003 + 1.002 XRF and 0.950, respectively.
4. The correlation coefficient(r) between the analytic result values for lead samples of a lead-acid battery manufacturing plant by ICP (ICP) and by XRF (XRF) was 0.993($p<0.05$), and simple linear regression equation and the coefficient(R2) were ICP = -2.058 + 0.996 XRF and 0.987, respectively.
5. While the frequency distributions of XRF /ICP(Ratio) for each ICP concentration levels in a lead-acid battery manufacturing plant revealed high proportion in ratio range of 0.876-1.125 than in ration range of 1.126-1.375. Also, ICP concentration level in ration range of 0.786-1.125 was increased with increase of frequency distribution of XRF/ ICP.
6. The limit of detection of XRF on lead was determined to be 6.11μg/filter

The data presented in this study indicated that relationship for lead level of quality control samples and field samples in a lead -acid battery manufacturing plant by ICP and portable-XRF methods was proved. The practicing industrial hygienist can use portable-XRF to produce a rapid on-site determination of lead exposure that can immediately be communicated to workers and help identify appropriate levels of personal protection.

Key Words : Lead levels, ICP, XRF

I. 서 론

중금속분석에 대한 다양한 연구와 새로운 분석기기의 등장으로 공기중 오염물질의 농도를 분석하는 방법도 많이 발달되고 있다. 이전까지는 중금속 분석에 있어서 Inductively Coupled Plasma(ICP)와 Atomic Absorption Spectrometer(AAS)을 이용한 분석법 등 시료전처리를 통한 방법이 주를 이루었지만 미국에서 시판되는 형광 X-선을 이용한 X-Ray Fluorescence (XRF)는 시료의 전처리 없이 다양한 종류의 중금속을 분석할 수 있고, 현장에서 바로 분석할 수 있는 장점이 있으며 공기중 중금속 측정, 낡은 건물의 페인트 납성분 측정, 토양의 중금속 측정 등 활용 분야가 다양하다. 따라서 이 기법을 이용하여 공기중 납시료를 분석한다면 낮은 비용으로

접수일 : 2001년 11월 25일, 채택일 : 2001년 12월 20일
‡ 교신저자 : 안규동(충남 천안시 봉명동 23-20 순천향의대 산업의학연구소
Tel : 041-570-2481, Fax : 041-573-4521, E-mail : akdong@sch.ac.kr)

신속하고 간편하게 측정할 수 있다는 장점이 있다.

XRF기기에 대한 납의 분석원리를 보면, 기기에 내장되어 있는 방사선 동위원소는 일반적으로 Cadmium109(^{109}Cd)와 Cobalt57(^{57}Co)이 있으며 shutter가 열렸을때 방사선 동위원소가 붕괴되면서 X-ray와 gamma-ray 형태의 전자기력을 방사한다.

^{109}Cd와 ^{57}Co의 붕괴현상은 방사선 동위원소의 핵이 궤도에 있는 전자를 포획할 때 일어나고, 양성자가 중성자로 바뀌면서 전자기력을 잃어버린다.

^{109}Cd와 ^{57}Co의 핵이 K껍질(shell)의 전자를 포획할 때 ^{109}Cd원소가 잃어버리는 에너지는 88.037 kiloelectron volt(keV)의 gamma ray이며, ^{57}Co원소는 2개의 gamma-ray 형태로 122.06135keV, 136.47434keV이다. 이때 원자는 K껍질의 전자 빈공간을 가진 여기상태가 되며, 곧이어 X- ray 형태의 전자기력을 잃어버리면서 전자가 있던 빈공간은 바깥 껍질(L껍질)의 전자로 채워지게 되면서 2차적인 방사가 이루어지게 된다. ^{109}Cd원소가 붕괴될 때 X-ray 형태로서 두가지 수준인 22.1과 25.0keV의 에너지를 방사하고 ^{57}Co 원소가 붕괴될 때 14.41302keV의 에너지를 방사한다.

방사선 동위원소의 전자기력은 분석대상이 되는 납 원소들을 여기상태로 만드는 원인이 되며 여기상태가 되면, 납의 원소들은 X-ray 형태의 전자기력 방사선을 방사하면서, 처음의 에너지상태(기저상태)로 되고 fluorescence(형광성)로 불리는 원자의 이완작용을 하게된다.

원자의 여기상태는 K 또는 L껍질에서 일어나며, 원자의 전자결합력과 전자기력의 강도에 따라 달라 질 수 있다.

납의 K껍질 전자는 88.005keV의 전자결합에너지를 가지고 있고, ^{109}Cd와 ^{57}Co의 gamma-ray방사는 납의 K껍질의 전자결합력보다 더 크며, 여기상태의 원인이 될 수 있다. 여기상태의 K껍질 전자는 기저상태로 되돌아오면서 74.2keV와 85.45 keV의 X-ray를 방출한다.

여기상태 L껍질의 전자들은 기저상태로 되돌아오면서 10.5, 12.6, 14.8keV의 X ray를 방출하며, 공기중 필터샘플에 대한 납의 분석은 L껍질의 전자들의 여기상태, 이온화과정, 그리고 10.5, 12.6, 14.8keV의 전자기력에 대한 방사를 detector가 감지함으로서 이루어진다.

L껍질의 XRF가 공기중의 필터샘플을 위해 이용되는 이유는 간섭현상이 없는 얇은 층의 샘플을 위하여 매우 효율적이며 L껍질의 XRF는 signal /noise 비가 매우 높기 때문에 XRF기기의 배경 noise가 작으므로 피크를 잘 나타낼 수 있기 때문이다.

detector는 여기상태가 된 납의 원소로부터 각각 3가지의 에너지 수준에 있는 X-ray 방사선수를 계산하고, 비어의 법칙을 원리로 하여 fluorescence power와 분석농도에 대한 점의 분포는 낮은 농도에서 직선모양이 이루어지게 되며, XRF의 기기에 있는 소프트웨어로 계산되어 분석결과에 대한 단위를 ug of lead/cm^{2}으로 나타내었다(Morley등, 1999).

휴대용 XRF를 이용한 공기중 납농도 측정과 관련된 논문은 외국에도 거의 찾아보기 힘들며 국내에는 아직 전무한 실정이다. 따라서 본 연구는 정도관리시료에 대한 휴대용 XRF를 이용하여 기준값에 대한 적합여부를 판정하고 납을 주로 사용하고 있는 모 축전지 회사에 대한 XRF와 ICP의 분석치를 비교하여 관련성을 조사함으로써 향후 현장에서 XRF기기를 사용하여 납사업장에 대한 공기중 납농도의 평가시 신속하고 정확한 결과를 얻기 위한 방법으로서 적용하는데 기초자료를 마련하고자 하였다.

II. 연구대상 및 방법

연구대상은 2000년도 상반기 납에 대한 정도관리시료 20개와 모 축전지회사 72개의 시료를 대상으로 실시하였다.

1. 측정방법

현장 시료샘플은 모 축전지회사의 전 공정에 대하여 개인시료를 원칙으로 총 72개의 시료를 대상으로 하였다. 시료채취 방법은 개인시료 채취기(Gillian Air sampler, USA)를 이용하여 직경 37mm, 공경 0.8㎛의 cellulose ester membrane filter를 3-piece cassette에 장착하고 2(±0.1) L/min 의 유속으로 6시간 이상 시료채취하였으며, 시료채취 전·후에는 비누거품을 사용하는 유량보정계(Gillian calibrator)를 이용하여 유량을 보정하였다.

2. 분석방법

1) XRF분석법

분석기기는 납 금속만 분석이 가능한 ^{109}Cd 방사성원소를 사용하는 휴대용 X-ray Fluorescence (XL-309 Lead analyser, NITON Corp, Bedford, Massachusetts)를 이용하였다.

XRF기기의 분석방법은 국립산업안전보건연구소(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)의 공정시험법(Manual of Analytical Methods)인 No.7702에 준하여 실시하였으며(NIOSH No 7702, 1998), 공시료 6개를 준비하여 분석값에 보정을 하였다. 채취된 시료와 정도관리시료는 특별히 고안된 Cardboard로 옮겨 acetate sleeve(NITON, Bedford, Massachusetts)로 덮고, 필터시료를 고정시켜 읽을 수 있도록 filter test platform (NITON, Bedford, Massachusetts)에 올려놓는다. Figure 1에 나타나 있는 필터의 M(Middle), T(Top), B(Bottom)부분을 읽을 수 있는 시간은 대략 86초이며 각각의 읽은 값들은 아래의 계산식에 대입하여 필터의 납 농도를 구한다.

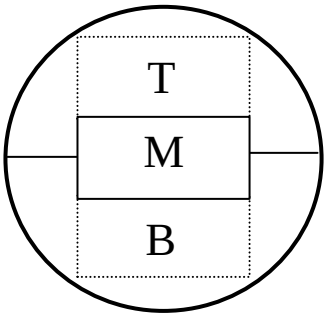

Figure 1. Three readings were taken using a 2cm×1cm aperture

식) ug of lead/filter
= 2.0 × M + 3.8 × T + 3.8 × B

식의 원리는 37-mm필터의 면적을 계산하면 약 10.75㎠이 되고 여기서 카세트 홀더의 둘레 면적을 빼면 기하학적으로 분진이 필터에 부딪히는 면적은 약 9.6㎠가 된다. 즉 총 면적인 9.6㎠에서 M의 면적인 2㎠(가로×세로= 2㎝×1㎝) 빼면 7.6㎠가 되며 이 남은 면적을 상. 하로 이등분하면 각각 3.8㎠의 면적이 남는다. 따라서 T와 B의 판독수치는 각각의 3.8㎠면적에 대표값이 되는 것이다. 각각의 면적에 대한 판독단위는 ug of lead/㎠이므로 M의 면적에 존재하는 납의 양에 대한 공식은 2㎠ × M의 판독값(ug of lead/㎠)이 된다. 동일한 방법으로 T의 면적에 대한 납의 양에 대한 식은 3.8㎠ × T의 판독값(ug of lead/㎠)이 되며 B의 면적에 대한 납의 양에 대한 식도 3.8㎠ × B의 판독수치(ug of lead/㎠)가 되어 M, T, B에 대한 납의 양을 모두 더하면 필터에 존재하는 납의 총 양이 되는 것이다. (Morley등, 1996).

2) ICP분석법

XRF분석이 끝난 필터시료와 필터시료를 덮고 있는 아세테이트 필름을 핀셋으로 Glass tube에 옮기고 10ml 피펫(No. 7100, PYREX)을 이용하여 10% 질산용액(MERCK KGaA, Germany)을 넣고 50-60℃의 물에 중탕하여 4-5시간 정도로 충분히 담가둔다. 휴대용 XRF기기로 시료필터를 분석할 때 시료필터를 고정시킨 아세테이트에 납 분진이 묻을 수 있으므로 분석오차를 줄이기 위하여 시료필터와 같이 전처리를 하였으며 회수율은 99%로 확인되었다. 분석방법은 공정시험법인 No.7300에 준하여 실시하였고(NIOSH, 1994), 분석기기는 ICP(ICPS-7500, Shimadzu, Japan)를 이용하였다.

3. 자료의 처리

자료의 분석은 SPSS 10.0을 이용하였으며 ICP와 XRF기기의 분석방법간의 차이를 검정하기 위하여 paired t-test를 하였고, 정도관리시료와 모 축전지 회사의 시료에 대한 ICP와 XRF 분석결과의 상관성분석(Correlation analysis)을 실시하였으며 ICP분석결과의 수준별 농도에 따른 XRF/ICP(Ratio)의 분포에 대한 교차분석(Cross tab analysis)을 실시하였다.

III. 결 과

한국산업안전공단의 2000년도 18회 정도관리시료 20개를 대상으로 ICP와 XRF기기를 이용하여 분석결과에 대한 적합성 여부를 판정하였으며, ICP와 XRF기기를 이용한 정도관리 시료분석결과는 Table 1과 같이 나타났다. ICP는 총 20개 시료중 모두 적합으로 나타나 100%의 적합율을 보였고, XRF는 15건이 적합으로 판정되어 75%의 적합율을 보임으로써 ICP의 적합도가 높게 나타났다.

Figure 2에 보면 정도관리시료의 기준값과 ICP의 분석값에 대한 상관성을 분석한 결과를 나타내었다. R-square는 0.9997이고 상관계수(Correlation)는 1.000로서 유의성이 있었다($p<0.05$).

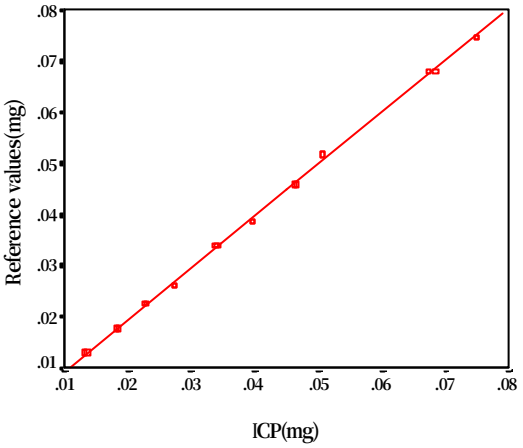

Figure 2. Relationship of reference values and ICP values for lead of quality control samples

R^2 = 0.9997
Correlation = 1.000($p<0.05$)
Reference values = -0.0009+1.016×ICP

Table 1. Results of analysis for lead of quality control samples by ICP and XRF
(unit : mg)

No	ICP	XRF	Reference values	Acceptable range	Results	
					ICP	XRF
1A	0.0748	0.0634	0.0749	0.0659 - 0.0839	P*	N.P†
1B	0.0749	0.0688			P	P
2A	0.0132	0.0092	0.0130	0.0103 - 0.0157	P	N.P
2B	0.0137	0.0074			P	N.P
3A	0.0462	0.0455	0.0459	0.0404 - 0.0514	P	P
3B	0.0465	0.0517			P	N.P
4A	0.0228	0.0256	0.0225	0.0189 - 0.0261	P	P
4B	0.0229	0.0247			P	P
5A	0.0342	0.0371	0.0339	0.0291 - 0.0387	P	P
5B	0.0337	0.0379			P	P
6A	0.0397	0.0402	0.0386	0.0335 - 0.0437	P	P
6B	0.0397	0.0380			P	P
7A	0.0273	0.0274	0.0261	0.0213 - 0.0309	P	P
7B	0.0274	0.0332			P	N.P
8A	0.0684	0.0731	0.0680	0.0598 - 0.0762	P	P
8B	0.0672	0.0667			P	P
9A	0.0184	0.0193	0.0178	0.0124 - 0.0232	P	P
9B	0.0182	0.0203			P	P
10A	0.0508	0.0502	0.0519	0.0457 - 0.0581	P	P
10B	0.0508	0.0561			P	P

* P : Proficient
† N.P : Not Proficient

	N	Mean(㎎)	SD
ICP	20	0.0395	0.0200
Reference values	20	0.0393	0.0203

정도관리시료에 대한 ICP와 XRF의 분석값에 대한 상관성을 분석한 결과는 Figure 3에 나타냈으며 R-square는 0.950이고 상관계수(Correlation)는 0.975로서 통계적으로 유의하였다($p<0.05$).

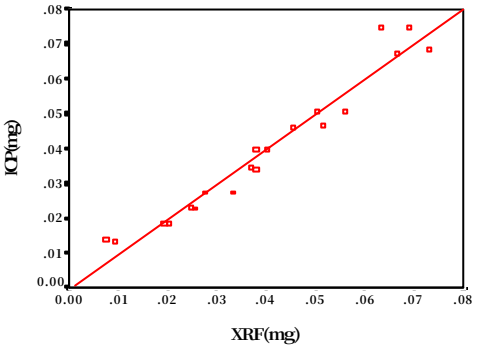

Figure 3. Relationship of XRF values and ICP values for lead of quality control samples

R^2 = 0.950

Correlation = 0.975($p<0.05$)

ICP = -0.0003 + 1.002 × XRF

	N	Mean(㎎)	SD
ICP	20	0.0395	0.0200
XRF	20	0.0503	0.0247

모 축전지회사의 72개 시료에 대한 ICP와 XRF기기의 분석결과는 Table 2와 같이 나타내었다.

모 축전지회사에 대한 ICP와 XRF기기의 상관성을 조사한 결과는 Figure 4와 같다. 상관성 분석에서 R-square는 0.987이고 상관계수(Correlation)는 0.993으로 나타났으며 통계적으로 유의하였다($p<0.05$).

R^2 = 0.987

Correlation = 0.993($p<0.05$)

ICP = -2.058 + 0.966 × XRF

	N	Mean	SD
ICP	72	91.23	89.51
XRF	72	96.62	87.03

모 축전지회사에 대한 ICP 수준별 농도에 따른 XRF/ICP (Ratio)의 분포를 분석한 결과는 Table 3에 나타내었다. ICP 수준별 농도가 0.025보다 작은 수준에서는 총 12건중 0.876-1.125에서 5건(41.7%), 1.126-1.375에서 3건(25.0%), 0.626-0.875에서 3건(25.0%), 1.625보다 큰 비(Ratio)에서는 1건(8.3%) 순으로 나타났다. ICP 수준별 농도가 0.025-0.049범위에서는 총 12건중

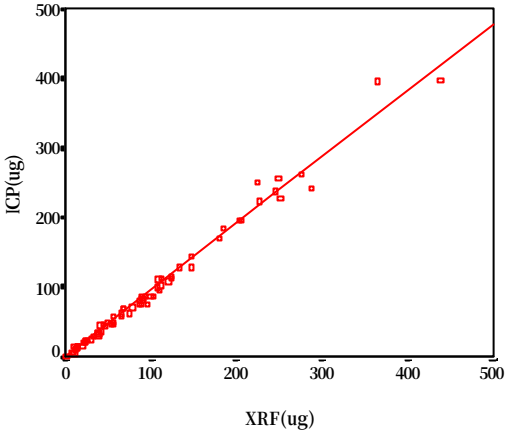

Figure 4. Relationship of XRF values and ICP values for lead of lead-acid battery manufacturing plant

Table 2. Results of analysis for airborne lead in a lead-acid battery manufacturing plant by ICP and XRF

(unit : ㎍)

No	XRF	ICP	No	XRF	ICP
1	23.9	19.8	37	133.3	127.7
2	13.2	24.5	38	49.5	48.4
3	24.5	22.0	39	32.9	31.0
4	30.4	26.0	40	77.8	71.6
5	37.2	34.8	41	111.2	102.6
6	42.2	36.6	42	85.8	80.9
7	13.9	14.5	43	86.2	76.2
8	20.9	20.3	44	38.1	31.5
9	8.1	7.1	45	1.6	2.4
10	11.7	12.6	46	74.3	61.8
11	66.5	63.3	47	38.0	30.6
12	123.2	115.5	48	26.2	23.8
13	67.2	68.9	49	68.2	69.4
14	226.9	223.3	50	124.7	113.4
15	179.9	170.0	51	12.4	10.7
16	88.3	86.3	52	10.8	15.4
17	251.5	227.8	53	46.6	43.5
18	57.0	46.8	54	52.4	46.9
19	95.3	76.3	55	11.1	5.8
20	109.1	111.3	56	19.7	15.1
21	113.1	112.7	57	223.6	249.6
22	107.1	99.5	58	103.6	85.9
23	205.8	195.5	59	88.6	76.5
24	14.4	13.8	60	246.0	238.9
25	275.2	262.0	61	439.3	396.8
26	249.6	256.4	62	99.8	85.6
27	23.5	23.2	63	90.3	84.2
28	41.7	45.7	64	93.3	87.0
29	366.5	396.0	65	43.8	47.0
30	90.9	81.1	66	13.3	15.3
31	57.4	48.5	67	15.2	15.6
32	65.2	57.5	68	57.4	57.5
33	120.6	108.8	69	38.8	33.1
34	204.8	195.6	70	147.7	128.8
35	146.7	145.8	71	287.6	241.3
36	184.5	184.2	72	110.4	96.6

0.876- 1.125에서 6건(50.0%), 1.126-1.375에서 6건(50.0%)으로 나타났다. ICP 수준별 농도가 0.050-0.099범위에서는 총 16건 중 0.876-1.125에서 11건(68.8%), 1.126-1.375에서 5건(31.2%) 순으로 나타났다. ICP 수준별 농도가 0.100이상의 범위에서는 총 32건중 0.876-1.125에서 25건(78.1%), 1.126 -1.375에서 7건(21.9%)순으로 나타났다.

최소검출한계인 LOD(Limit of Detection)는 공시료 6개를 가지고 NIOSH의 Standard Operating Procedure(SOP)018 의 방법에 의하여 공시료 평균값에 3을 배수로 한 공시료 표준편차 값을 더하여 LOD를 구하였으며(NIOSH SOP 018, 1991). 그 결과 5.11㎍으로 확인되었고, Morely등(1999)의 연구결과에서는 휴대용 XRF (700XRF, NITON Corp, Bedford., Massachusetts)기기를 가지고 NIOSH SOP 018방법에 의하여 LOD를 구한 결과 6.2㎍나타남으로써 본 연구결과와 비슷한 수준을 보였다.

Ⅳ. 고 찰

휴대용 XRF기기를 이용한 납의 측정은 휴대하기가 간편하고 전처리없이 현장에서 바로 분석결과를 알 수 있기 때문에 활용범위가 매우 넓다. 미국에서는 공기중 납농도나 토양의 중금속, 그리고 건물내부의 페인트에 함유되어 있는 납의 농도를 파악하기 위하여 휴대용 XRF기기가 사용되고 있다.

1996년에 미국의 미네소타주에 소재한 어느 병원내부에 칠해진 페인트의 납 농도를 조사하기 위하여 휴대용XRF기기가 사용된 보고서가 발표되었으며(Kiefer & Morley, 1996), 같은 해인 10월에는 미국의 필라델피아의 어느 학교에서 페인트의 납 농도를 파악하기 위하여 휴대용 XRF기기를 이용한 연구보고서가 발표되었다(Malkin & Decker, 1996).

또한 NMAM(NIOSH Manual of Analytical Methods, Forth Edition)에서는 Morely등(1999)의 연구결과를 배경으로 Potable XRF기기를 이용한 납의 측정방법을 게재함으로서 휴대용 XRF기기의 사용은 편의성에 따라서 많은 연구가 진행되고 있음을 보여주고 있다. 본 연구결과인 Figure 3의 정도관리시료에 대한 ICP와 XRF기기의 관련성에서 R-square의 값이 Figure 4의 모 축전지 회사에 대한 ICP와 XRF기기의 R-square의 값 보다 낮게 나타난 것은 모 축전지 회사의 시료는 분진이 필터 가운데 부분을 중심으로 골고루 분포가 되어있는 반면, 정도관리 시료는 시료투입(Spike)시에 필터 가운데를 중심으로 골고루 분포가 되지 않기 때문이다 . 따라서 정도관리시료는 XRF기기 분석시 필터를 90°방향으로 돌려가며 분석한다면 분석오차는 다소 줄어들 것으로 생각된다.

Morley등(1999)은 교량의 페인트를 제거하는 과정에서 블라스팅 작업시 발생하는 분진의 납 농도를 파악하고자 65개의 시료를 채취하여 XRF기기로 분석한 뒤 Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrophotometry (GFAAS)로 분석하여 비교한 결과 시료의 농도 범위는 0.1 - 1514㎍/sample 이며, R-square는 0.985를 나타내었다. 또한 0 - 250㎍/sample의 저농도 범위에서는 R-square가 0.884로 나타남으로서 저농도의 범위보다는 고농도의 범위가 관련성이 높다는 것을 보여주었으며, 본 연구결과의 Figure 4를 보면 R-square가 0.987로 확인됨으로서 위의 연구결과와 비슷한 수준을 나타내었고, Table 3의 모 축전지회사에 대한 ICP 수준별 농도에 따른 XRF/ICP(Ratio)의 분포를 보면 XRF/ICP비가 0.876-1.125에서 ICP 수준별 농도가 높아질수록 분포비율이 높았으며 저농도(<0.025)에서는 XRF와 ICP의 일치도가 낮게 나타났다. 측정 또는 분석작업시 간섭영향을 주는 브롬의 존재는 없었으며 XRF기기에 대한 분석방법이 체계화되고 숙달된다면 저농도에서의 일치도는 더욱 높아질 것으로 기대되며. 앞으로 저농도에서의 신뢰성을 높이기 위한 다각적인 조사와 많은 연구가 필요하다.

Table 3. Frequency distribution of XRF/ICP(Ratio) for each of ICP concentration levels in a lead-acid battery manufacturing plant

Range* (㎎/㎥)	XRF/ICP(Ratio) 0.626-0.875	0.876-1.125	1.126-1.375	1.376-1.625	1.625<	Total
<0.025(%)	3(25.0)	5(41.7)	3(25.0)	0(0.0)	1(8.3)	12
0.025 - 0.049(%)	0(0.0)	6(50.0)	6(50.0)	0(0.0)	1(0.0)	12
0.050 - 0.099(%)	0(0.0)	11(68.8)	5(31.2)	0(0.0)	0(0.0)	16
0.100≤(%)	0(0.0)	25(78.1)	7(21.9)	0(0.0)	0(0.0)	32

* Range : Range of ICP concentration levels

Ⅴ. 결 론

본 연구에서는 한국산업안전공단의 2000년도 18회 정도관리시료 20개와 모 축전지회사의 72개 시료필터를 대상으로 ICP와 휴대용XRF기기의 실험결과를 비교분석 하였다.

1. 2000년도 상반기 정도관리시료 20개를 대상으로 ICP와 XRF기기를 이용하여 분석결과에 대한 적합성 여부를 판정하였으며, ICP와 XRF기기를 이용한 정도관리시료분석결과를 보면 ICP는 총 20개 시료 중 모두 적합으로 나타나 100%의 적합율을 보였고, XRF는 15건이 적합으로 판정되어 75%의 적합율을 보임으로써 ICP의 적합도가 높게 나타났다.

2. 정도관리시료의 기준값과 ICP의 분석값에 대한 상관성을 분석한 결과 R-square는 0.9997이고 상관계수(Correlation)는 1.000로서 유의성이 있었다($p < 0.05$).

3. 정도관리시료에 대한 ICP와 XRF의 분석값에 대한 상관성을 분석한 결과 R-square는 0.950이고 상관계수(Correlation)는 0.975로서 통계적으로 유의하였다($p < 0.05$).

4. 모 축전지회사에 대한 ICP와 XRF기기의 상관성 분석에서 R-square는 0.987이고 상관계수(Correlation)는 0.993으로

나타났으며 통계적으로 유의하였다($p < 0.05$).

5. 모 축전지회사에 대한 ICP 수준별 농도에 따른 XRF/ICP(Ratio)의 분포를 분석한 결과 XRF/ICP(Ratio)중에서 0.876 - 1.125가 가장 많은 분포를 나타냈고 그 다음으로 1.126 - 1.375 순이었다. 가장 많은 분포를 나타낸 0.876 - 1.125는 ICP 수준별 농도가 높아질수록 높은 분포를 나타내는 경향을 보였다.

6. 휴대용 XRF기기의 납에 대한 LOD는 6.11μg/filter로 확인되었다.

본 연구는 위 결과와 같이 정도관리시료에 대한 휴대용 XRF를 이용하여 기준값에 대한 적합 여부를 판정하고 납을 주로 사용하고 있는 축전기 회사 1곳을 선정하여 XRF와 ICP의 분석치를 비교한 결과 관련성이 높은 것으로 나타났다. 따라서 현장에서 XRF기기를 사용하여 납사업장에 대한 공기중 납 농도의 평가시 신속하고 정확한 결과를 얻기 위한 방법으로서 적용할 수 있으며 앞으로 본 연구가 더 진행된다면 기존의 분석방법을 XRF분석방법으로 대치 할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

Kiefer M, Morley JC. Cass lake indian Health Service Hospital Cass lake, Minnesota. Hazard Evaluations and Technical Assistance Report No96-209; 1996

Malkin R, Decker J. Philadelphia School district Franklin learning center Philadelphia, Pennsylvania. Hazard Evaluations and Technical Assistance Report No96-0140-2606 ;1996

Morley JC, Clark CS, Deddens JA, Ashely K, Roda S. Evaluation of portable x-ray fluorescence instrument for the determination of lead in workplace air samples. Applied Occupational and Environmental Hygiene 1999;14:306-314

National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH). Lead by field portable XRF. NIOSH Manual of Analytical Methods, Method No.7702. NIOSH, Cincinnati, OH:1998

National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH). Elements by ICP, NIOSH Manual of Analytical Methods, Method No.730, NIOSH, Cincinnati, OH:1994

NIOSH. SOP 018 Limits of detection and quantitation. Quality Assurance & Laboratory operation procedures of the Measurements Research Support Branch, Methods Research Branch. Cincinnati, OH: U.S Departments of Health and Human Service, Public Heath Service, center for Disease Control, National Institute for Occupational Safety and Health, Division of Physical Science and Engineering. Revision 6, December 1991