

Simple and rapid method for homogeneity test of reference samples for some metals in blood

Jeong-Sun Yang, Mi-Young Lee, In-Jeong Park
Industrial Health Research Institute, KISCO

Summary. To perform the inter-laboratory analytical quality control(AQC) program on the biological monitoring, well qualified reference samples were prepared at first. Korean analytical quality assurance(KAQUA) program on the biological monitoring that was started on 1995 spring choosed the first items as lead in blood (PbB) and hippuric acid in urine (HAU). The basic items for this program are toxic metals in blood and organic solvents' metabolite in urine. Reference samples were made from human blood and urine by spiking standard stock solution. Preparation method was simple and the matrix of reference sample was well matched with original sample. The homogeneity and stability for reference samples were checked by isotope dilution method using some isotope metals such as cadmium-109, chromium-51, mercury-54, manganese-203. The validation method for homogeneity is very simple and clear compared with using atomic absorption spectrometry(AAS). The random error occurred by γ -irradiation was removed by statistic analysis. In the range of 5.0 - 40 ug/L, the variation coefficient was 0.55 - 1.49% for cadmium, 1.90 - 2.62% for chromium, 0.54 - 1.85% for manganese, 0.66 - 1.93% for mercury. These values are much less than values got by AAS.

key word: analytical quality control program, biological monitoring, reference sample, homogeneity test, isotope dilution method

생체지표물질의 표준시료 개발에 관한 연구

- 동위원소희석법에 의한 혈액 현탁액중 중금속 분포에 관한 실험

양정선, 이미영, 박인정

한국산업안전공단 산업보건연구원

1. 서론

본 연구자들은 시료중에 중금속을 균질하게 분포하여 각 시료마다 편차를 최소화하고 신뢰성 높은 혈중 중금속 측정용 표준시료를 제공하고자, 혈액을 냉동-해동(freeze-thawing)공정을 반복하여 적혈구를 용혈시킨후 여과하여 혈액 현탁액을 제조하는 과정을 통하여 상기 목적을 달성할 수있음을 보고한 바 있다(양 정선, 1995) 이번 연구는 혈액중 중금속이 안정하고 균질하게 분포되어 있어 신뢰성을 높일 수 있는 혈중 중금속 분석용의 표준시료에 대한 균질성을 검증하는 방법에 관한 것이다. 혈중 중금속의 농도를 측정하여 평가하는 방법은 정밀도, 정확도, 재현성 면에서 신뢰받을수 있어야 한다. 혈중 중금속을 분석하는데 있어서 정확도가 문제가 되는 이유는 혈액이 단백질, 다른 여러 가지의 중금속등 매우 복잡한 조성으로 구성되어 있으며 그중 분석하고자 하는 대상 중금속은 소량 존재하기 때문이다. 혈중 납, 카드뮴, 망간등 일반적인 중금속의 경우 흑연로-원자흡광기를 이용한 비불꽃법(Graphite Furnace Atomic Absorbance Spectrometry, P&CAM 214, U.S.Department of Health, Education and Welfare, Publ. 1977 :이하 GF-AAS로 약함.)이 시료 소요량도 적고 비교적 정확하여 많이 사용되고 있는 방법이며, 유도결합플라즈마 질량분석기를 이용한 동위원소 희석법 등이 혈액중 소량의 중금속들을 분석하는데 쓰여지기도 한다. 혈중 납의 경우 불꽃-원

자흡광기를 이용하는 방법(Flame Atomic Absorbance Spectrometry, NIOSH method 8003: 이하 FL-AAS로 약함.), 디티존법이 사용기도 하며, 혈중 수은의 경우 냉각증기 발생장치(Cold Vapor Generator)가 부착된 원자흡광기(Flameless Cold Vapor Atomic Absorbance Spectrometry, EPA-600/4-79-020, Method 245.1: 이하 VGA-AAS로 약함)를 이용한다. 그러나 위에서 언급한대로 혈액에 공존하는 방해물질들의 영향과 미량 분석이라는 점 때문에 분석값들의 실험실간 편차가 크다.

이러한 실험실간의 편차를 줄이기 위하여 같은 농도의 중금속을 균질하게 함유하고 있는 혈액 중금속 표준물질이 필요하게 되었으며, 이러한 표준물질을 사용하여 여러 실험실에서 분석한 분석값을 비교하여, 분석기기 조건등을 검토하여 정확한 분석 조건을 이끌어 내게 되는 것이다. 지금까지는 이러한 목적으로 제조된 표준시료의 균질도를 검증하려면, 표준시료를 이용하여 피검혈액중의 중금속을 측정하는 통상의 방법, 즉 GF-ASS법에 의한 혈중 중금속 분석이라는 매우 일반화된 방법에 따라 실시할 수 있다. 그러나 이 경우 분석법 자체에서 오는 재현성의 편차가 5%-10%로 비교적 높은 편이다. 시료의 불균질성에서 오는 오차를 파악하기 위해서는 분석법에서 오는 오차를 최소한으로 줄여야 한다. 또한 수은, 셀레늄과 같이 휘발성 금속들은 VGA-AAS를 이용한 혈중 수은 및 셀레늄 분석법에 의해 분석하는데 이 경우 5 cc이상의 혈액이 요구되며 분석법에서 오는 오차는 10%-20%로 이 방법에 의한 시료의 균질성 검증은 매우 어렵다.

따라서 실험의 정밀도를 최대한 높이고 측정에서 오는 오차를 최소화하는 방법으로 시료의 균질성 검증이 이루어져야 하며, 이는 방사성 동위원소를 사용한 동위원소 희석법(isotope dilution analysis)을 통해서 매우 간편하고 정밀하게 이루어 질 수 있다. 표준시료의 조제시 외부에서 분석 대상 중금속을 실험실적으로 첨가하는데, 이때 해당 중금속 원소의 안정동위원소(stable isotope, 이하 SI 또는 cold라 함.)와 함께 해당 중금속 원소의 방사성 동위원소(radioisotope, 이하 RI 또는 hot라 함.)를 극소량 첨가하여 이들 hot 원소가 방출하는 감마선이나 베타선의 양을 측정함으로써 각 바이알간의 중금속 분포의 균질성을 매우 간단하고 신속, 정밀하게 분석할 수 있다. 따라서 본 연구를 통해 납 이외의 기타 중금속에 대하여 각각 동위원소를 사용하여 감마 카운터 측정

치의 비교를 통해 신속, 정밀하고 고감도의 균질도를 비교할 수 있으며 임의로 취한 간바이알에 대한 각각 금속의 분포는 감마 및 베타 카운터 측정치의 상대적 비교를 통해 드러날 것이다.

5 - 7개의 기준실험실을 동원한 매우 지루한 검증과정을 거쳐야 하는 기존의 AAS법 대신 소량의 동위원소를 사용하여 매우 빠르고 간단하게 표준시료중의 중금속 분포를 검증할 수 있다는 기대효과가 있다. 혈중 수은과 같이 VGA-AAS법에서는 다량의 시료를 필요로하여 사실상 검증이 불가능한 경우도 매우 소량의 시료로 검증이 가능하다. 따라서 포괄적 의미의 본 연구수행의 기대효과는 매우 단시일내에 간단히 다양한 종류의 산업보건 관련 표준시료의 균질도 검증이 가능하여 다양한 종류의 표준시료에 대한 검증자료들을 제공하게 될 것이다.

2. 본론

2.1. 원자력 기초 이론

1) 원자핵

원자핵은 $+Ze$ 의 전하를 가지며, 양자(proton)과 중성자(neutron)로 구성되어 있다. 이들 구성입자를 핵자(nucleon)라 한다. Z 개의 양자를 갖는 원자의 원자번호는 Z 이므로 이 원자핵의 전하는 Ze 이다. 따라서 중성원자의 전자수는 원자번호 Z 와 같다. 핵속에있는 양자의 수 Z 와 중성자의 수 N 과의 합(핵자의 수)을 그 원자의 질량수라 하고 이것을 A 로 표시한다. 즉, $A = Z + N$ 이다. Z 와 N 가 주어지므로써 결정되는 원자핵의 종류를 핵종(nuclide)이라 한다. 지금까지 알려져 있는 핵종중 안정한 핵종은 약 300 종 정도이고 불안정(방사성) 핵종까지 합하면 약 2,800여종이 된다. 여러 가지 핵종중 원자번호 Z 가 같은 핵종을 동위체(isotope)라 한다. 수소의 동위체(또는 동위원소)에는 $Z=1$, $N=0$ 인 ^1H 수소, $Z=1$, $N=1$ 인 ^2H 중수소 및 $Z=1$, $N=2$ 인 ^3H 삼중수소가 있다. ^3H 는 불안정하여 방사선을 방출하며 반감기 12.3년으로 붕괴한다. 이와같은 동위체를 방사성 동위체 또는 방사성 동위원소(radioisotope, RI)라 한다. 이에 대하여 ^1H 및 ^2H 와 같이 안정한 것을 안정동위원소라 한다(서두환, 1990).

2) 방사성동위원소란

원소란 같은 원자번호(Z)의 원자만으로 된 물질을 말하는데 현재 104종의 원소가 알려져있다. 같은 원소라도 양자의 수(Z)는 같지만 원자핵 속의 중성자의 수(N)는 각각 달라 양자(Z)와 중성자의 합(N)으로 나타나는 원자의 질량(A)이 다른 원자들이 있을 수있다. 이와 같이 원자핵 속의 양자 수는 같으나 중성자 수가 달라 질량이 다른 원자로 된 원소들을 서로 동위원소(isotope)라 한다.

동위(同位)란 원자번호가 같아서 원소의 주기율표에서 같은 자리에 있음을 뜻한다. 동위원소는 약 2,000종이나 알려져 있으며, 간단히 표시하기 위하여 원소기호의 원편 아래쪽에 원자번호, 원편 위쪽에 원자 질량을 적는다. 동위원소 중에는 원자핵이 안정하여 방사선을 내며 붕괴하지않는 안정동위원소(stable isotope, SI)와 핵이 불안정하여 스스로 방사선을 내며 붕괴하는 방사성동위원소(radioisotope, RI)가 있다. 생화학과 관련하여 가장 많이 쓰이는 핵종은 Tritium($H-3$), Carbon-14($C-14$), Sulfur-35($S-35$), Phosphorus-32($P-32$), Iodine-125($I-125$)이다(NIH, 1990).

3) 원자핵 붕괴

방사선을 방출하여 원자핵으로 변하는 붕괴(disintegration)에는 다음 세가지가 있다.

- α 붕괴: 한 개의 원자핵이 2개이상의 원자핵으로 변하는 것으로 원자핵이 α 선을 방출하여 원자번호 Z 가 2, 질량수 A 가 4만큼 적은 원자핵으로 변하는 현상을 말한다. 예를들어 라듐의 원자핵이 붕괴하여 라돈으로 변할 때 α 선이 방출된다. α 입자는 에너지가 강하기 때문에 라듐이나 우라늄처럼 α 선을 방출하는 것을 삼키면 인체의 세포는 장해를 받는다. 그러나 α 입자는 무게가 무겁기 때문에 바로 다른 원자와 충돌하여 물질을 통과하는 것이 어렵다. 그러므로 종이 한 장으로도 막을 수 있고 공기속은 수 cm밖에 날아가지 못한다.

- β 붕괴: A 가 일정한 동종핵 중에서 (N , Z)가 변하여 보다 안정한 핵종으로 변하는 경우로 원자핵이 β 선을 방출하여 원자번호 한 개만 변하는 현상을 β 붕괴라 한다. 즉, 질량수는 변하지 않는다. β 선은 방사능을 띤 물질의 원자핵에서 튀어나오는데 그 정체

는 전자이며 마이너스 전기를 띄고 있다. ‘죽음의 재’에 함유되어 있는 코발트 60이나 스트론튬 90등은 β 선을 방출한다. 입자는 무게가 가볍고 작기 때문에 그 에너지는 α 선보다 훨씬 작지만 속도는 빨라서 광속에 가깝다. 공기중에서 수m, 물속에서도 수 cm 진행한다. 투과력은 α 선과 γ 선의 중간정도이다.

- γ 선 방출: 동일 핵종으로서 보다 에너지가 낮은 상태로 변하는 경우이며 α 붕괴 또는 β 붕괴후 원자핵이 여기 상태이면 γ 선이 방출되어 기저상태로 떨어지는 현상을 γ 선 방출(emission)이라 한다. 즉 원자핵의 여기준위가 보다 낮은 준위로 전이할 때 그 에너지 차가 γ 선으로 방출된다. 그 속도는 전파나 빛과 같아 1초에 30만 km를 갈수 있으며 라디오나 TV의 전파보다 파장이 짧다. 암세포에 쬐어 치료하거나 농작물의 유전자에 돌연변이를 일으켜 품종 개량을 하는데 이용된다. 보통의 빛은 도저히 지나갈 수 없는 두께 30cm의 철판도 관통할 수 있을 정도이며 파장은 X선의 수100분의 1로 에너지가 X선 보다 세다.

2.2. 방사선 측정(NIH, 1990)

1) 반감기

방사능이란 방사성 핵종의 단위시간당 붕괴수 이며 흔히 Ci(큐리)단위로 나타낸다. 방사성 핵종은 붕괴하여 방사선(α , β , γ 선) 등을 방출하여 다른 핵종으로 변하는데 이 방사능 현상은 시간을 따라 감소한다. 붕괴하는 어미핵종의 원자핵수를 N개라 하면 그 핵종이 단위시간에 감소하는 개수 dN/dt 는 어미핵종에 비례하므로

$$dN/dt = \lambda N \quad \text{식(1)}$$

이다. 비례상수 λ 를 붕괴상수라 한다. 즉 방사성 물질의 붕괴상수와 원자핵을 알면 그 방사능R, 즉 Ci수를 알 수있다. 식(1)을 적분하여 적분상수를 정해 주고, 반감기를 구하면,

$$T_{1/2} = 0.693/\lambda \quad \text{식(2)}$$

의 관계가 있다. 예를 들어 반감기가 5.2년인 1mg의 코발트 60은 구입할 때 10Ci였으나 2.6년 후에는 7.1Ci가 된다. 따라서 측정하고자 하는 동위원소의 반감기를 감안하여 구입시기와 실험 시기를 조정하여야 한다.

2) 계수효율(efficiency)

일반적으로 방사선 검출을 위한 측정기는 방사선의 일부분만 측정되기 때문에 전체 중 얼마만큼 측정되었는가를 효율을 알 필요가 있다. 방사선 측정의 효율은 방사선원의 모양이나 특성에 따라 달라지는 기하학적 효율이나 검출기의 검출특성에 따른 고유검출효율 등을 고려하여야 한다. 따라서 방사선 측정장치에 의하여 얻은 관측치(계수율)에서 선원의 방사능으로 환산하기 위하여는 검출효율을 알고 있어야 하며, 기기로부터 측정한 계수율로부터 다음 식에 의하여 계산한다.

$$\text{효율(efficiency)} = \text{계수율(cps)} / \text{표준선원의 붕괴율(dps)}$$

3) 계수치의 통계처리

계수형 검출기로 얻어지는 계수치는 측정시의 모든 조건이 같아도 측정 때마다 다른 값을 나타낸다. 이것은 측정조작에 따른 측정오차가 아니고 방사성 붕괴나 계수과정이 갖는 우연성(random)에 기인한 본질적인 변동으로서 이것을 계수의 통계적 변동이라 한다. 그러나 결과적으로는 측정오차와 같기 때문에 실험데이터를 통계적으로 처리할 필요가 있다.

4) 방사선 측정장치

검출기는 검출신호를 전기적인 형태로 직류형과 펄스형의 두가지 출력방식이 있으며 검출기로부터의 검출 신호를 충분히 증폭시킨 후 각각의 펄스파고에 따라 분류하는 장치, 에너지 스펙트로미터로 사용된다.

2.3. 실험부

1) 실험재료

본 실험에 사용된 혈액 현탁액은 이전에 보고된 방식으로 제조된 혈액 현탁액을 사용하였으며 동위원소희석법에 의한 균질성 시험의 재료로 쓰여진 수은, 카드뮴, 크롬, 망간의 안정동위원소의 시약조성은 표1에, 방사성동위원소의 성질은 표2에 실었다.

2) 실험기기 및 기구

동위원소 실험에 사용된 모든 측정기구는 1회용을 사용했으며, 자동피펫, 실험대 주위등은 GM계수관(Geiger-Muller counter)을 사용하여 방사능 오염을 체크했다(NIH,

1988). 표2에서 사용된 방사성동위원소는 Hg-203를 포함하여 모두 γ radiation을 방출하므로 γ counting system(Tm Analytic사)을 이용하여 계수하였다.

표1. 사용된 안정동위원소의 시약조성

SI	Composition
Cadmium	$\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 1025 ug Cd/ml in 1% HNO_3
Chromium	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ in 0.02N HCl (1mL=1mG)
Mercury	HgCl_2 in 0.02N HCl (1mL=1mG)
Manganese	MnCl_2 in 1N HCl (1mL=1mG)

표2. 사용된 방사성동위원소

RI	Amersham catalog #	Unit	Radiation	Half life
Cadmium-109	CUS 1	37MBq, 1 mCi	γ	453 days
Chromium-51	CJS 2	37MBq, 1 mCi	γ	27.8 days
Mercury-203	MBS	37MBq, 1 mCi	β , γ	46.9 days
Manganese-54	MFS 2	37MBq, 1 mCi	γ	303 days

3) 시료 조제 및 효율(efficiency) 측정

1000 ppm의 수은, 카드뮴, 크롬, 망간(알드리치사 제품) 표준액을 사용하여 계열 희석하여 최종 혈액 현탁액 중의 농도를 5, 10, 20, 40 ug/L를 만들기 위한 4가지 중금속 수용액을 만들었다. 이 cold 수용액에 감마선으로써 최종 80,000,000 cpm이 되도록

수는 203, 크롬51, 카드뮴109, 망간54의 각 hot원소들을 수 uCi(마이크로 큐리)씩 가했다.

수 uCi로서 표선을 맞춘 날짜(lift day)를 기준으로 activity를 측정하여 식(2)로부터 예상 카운트 수를 구하여 최종 80,000,000 cpm이 되는 양을 다음과 같이 계산하였다.

예를 들어 Chromium-51의 경우 식 (2)로부터

$$27.8 = 0.693/k \quad k = 0.0249$$

$$\ln C = \ln C_0 - kt \text{에서, } \log C = \log C_0 - kt/2.303,$$

$$\log C_0/C = kt/2.303 = 0.0249/2.303 \times \text{lift day}$$

수 uCi로 표선을 맞춘 날짜로부터 실험일까지 소요일이 16일 이라면

$$\log C_0/C = 0.173 \quad C/C_0 = 0.762$$

그러므로 Chromium-51의 경우 0.762mCi/mL, 즉 7.62 uCi/ uL가 된다.

$$80 \text{ uCi} = 80,000,000 \text{ cpm} = 10.5 \text{ uL}$$

즉 80,000,000 cpm의 카운트를 얻기 위해서는 10.5 uL의 hot원소를 cold에 섞어 주어야 한다. 방사성 붕괴나 계수과정이 갖는 우연성(random)에 기인한 변이가 생기므로 데이터의 통계처리가 필요한데 1%이하의 상대표준편차를 얻으려면 최소 10,000counts의 계수치가 되어야 한다. 따라서 각 원소의 최초 첨가 counts는 specific activity와 lift day를 고려하여 계산할 때 최초 80,000,000 cpm이 되게 efficiency를 조정하였다.

4) 검액조제 및 측정조건

Cold standard 용액은 각각 표 1)의 조성을 가진 Aldrich사 AAS용 표준시약을 사용하였다. 1000ppm표준용액을 희석하여 800 ug/L가 되게 4가지 standard stock solution을 조제하였다. 이 standard stock solution 10 mL에 각 RI별로 Efficiency를 고려해 최종 검액의 농도가 40, 20, 10, 5 ug/L가 되었을 때 count수가 80,000 counts에서 10,000 counts가 되는 양의 hot 시약을 가하였다(검액 1*). 즉, Mercury-203의 경우 $0.92 \text{ uL} = 1 \text{ uCi}$ 이므로 $1 \text{ uCi} = \text{약 } 1,000,000 \text{ cpm}$ 이라면 80,000,000 cpm 이되는 양

으로 86 uL를 가했다. Chromium-51의 경우 상대적으로 낮은 efficiency를 보였으므로 절대량을 높여 80 uL를 첨가했다.

표 3. RI의 specific activity 및 첨가량

RI	Specific activity(uL/uCi)	Added amount(uL/10mL)	Efficiency
Cadmium-109	5	16	153 %
Chromium-51	7.62	11	13 %
Mercury-203	0.92	16	114 %
Manganese-54	5	86	76 %

위에서 조제한 cold와 hot이 혼합된 각 중금속 수용액(검액 1*) 500 uL를 취하여 표준시료를 조제하는 방식과 같은 방식으로 혈액 현탁액에 첨가해 최종 부피를 10 mL로 맞추었다(40 ug/L, 검액 2*). 마찬가지로 방법으로 계열희석하여 각각 5, 10, 20 ug/L의 혈액 표준시료를 제조했다.

표4. Specific activity and the condition of measurement.

RI	Specific activity(uL/uCi)	Range	Base	Window
Cadmium-109	5	x 1	100	800
Chromium-51	7.62	x 5	500	300
Mercury-203	0.92	x 5	400	450
Manganese-54	5	x 10	100	850

4개 원소별로 4개 농도당 100 uL씩 각 10개의 시료를 취하여 감마 카운터용 바이알에 담고 각각의 원소들에 대한 감마 카운터양을 측정했다. 데이터의 통계처리를 위하여 실험은 같은 batch내에서 한 농도 수준당 10개의 바이알에 대해 3회 반복 측정하여 within run의 상대표준편차를 구했으며 다른 batch의 시료에 대해 마찬가지로 반복실험하여 between runs의 상대표준편차를 구하였다. 반감기가 비교적 짧은 Chromium-51과 Mercury-203의 경우 매회 별도로 efficiency를 측정하여야 하나 본 실험과 같이 상대측정의 경우 그럴 필요가 없어 그대로 측정하였다. 원소별 specific activity와 최대 효율을 보이는 감마카운터 측정조건은 표4와 같다.

3. 결과 및 토론

각 중금속 동위원소의 표준시료내 분포는 안정원소의 분포 성질을 반영하며 임의로 취한 10개 바이알내의 각 동위원소에 대한 감마카운터 측정치의 비교를 통해 균질도 시험이 가능하다. 혈액 현탁액내의 공존하는 다른 성분들에 의한 간섭(quenching)을 확인하고, 혈액내 중금속 분포의 background치로서 표준액 조제시와 측정시 발생하는 우연오차(random error)의 양을 비교하기 위하여 위에서 조제한 cold와 hot이 혼합된 각 중금속 수용액(검액 1*) 500 uL를 취하여 검액 2*를 조제하는 것과 같은 방법으로 계열 희석하여 각각 20, 10, 5 ug/L의 용액을 만들었다. 표5에 4가지 원소에 대한 efficiency test 결과를 실었다.

표5. The result of efficiency test for 4 RI

RI	1st run		2nd run		3rd run		AVG _{btrun}	Efficiency
	-background		-background		-background			
Cadmium-109	1247900	1247837	1211600	1211541	1217100	1217034	1225471	1 5 3
Chromium-51	754050	753925	744700	744581	737100	736975	745160	12

Manganese-54	606250	605730	607500	607000	600650	600610	604447	7	6
Mercury-203	979450	979300	885650	885531	893350	893225	919352	115	

표6-13에 4가지 원소에 대한 수용액상에서 및 혈액표준액에서의 임의로 취한 바이알간의 감마카운트치를 비교했다. 수용액 40 ug/L 및 혈액표준액 40, 20, 10, 4ug/L의 농도에서 한 농도당 10개 바이알씩 취하였으며 한 바이알당 3회 반복 실험하였다. 같은 실험과정을 제 3일에 반복실험하여 'between run'간의 실험오차를 비교하였다.

표6. Cadmium-109의 수용액상에서의 background counts(40 ug/L)

- First run

Vial	1		2		3		AVG _{btrun}	STD	CV%
	-background		-background		-background				
1	91863	91800	90416	90357	89608	89542	90566	934	1.03
2	90791	90728	91945	91886	91536	91496	91370	481	0.53
3	93963	93900	92854	92795	91536	91496	92730	982	1.06
4	89716	89653	90233	90174	92790	92750	90859	1354	1.49
5	92681	92618	93318	93259	92463	92423	92767	357	0.38
6	91490	91427	91072	91013	92536	92496	91645	625	0.68
7	90150	90087	91690	91631	92418	92378	91365	954	1.04
8	90408	90345	89533	89474	89333	89293	89704	459	0.51
9	94763	94700	92536	92477	91436	91396	92858	1375	1.48
10	90183	90120	92263	92204	93790	93750	92025	1487	1.62
AVG	91600.8	91537.8	91586	91527	92509	91702	91589	901	0.98
STD	1630	1630	1174	1174	1320	1325	986		
CV%	1.78	1.78	1.28	1.28	1.43	1.44	1.08		1.50

- Second run

1	91454	91403	91418	91358	90091	90027	90929	638	0.70
2	89633	89582	90927	90867	91236	91172	90540	689	0.76
3	91854	91803	91390	91330	91809	91745	91626	211	0.23
4	93200	93149	92590	92530	91509	91445	92375	704	0.76
5	89566	89515	91009	90949	89991	89927	90130	603	0.67
6	93045	92994	90608	90548	91018	90954	91499	1070	1.17
7	89883	89832	91136	91076	89583	89519	90142	672	0.75
8	91936	91885	87866	87806	90125	90061	89917	1668	1.86
9	92854	92803	93218	93158	91181	91117	92359	890	0.96
10	89100	89049	88891	88831	89500	89436	89105	250	0.28
AVG	91253	91202	90905	90845	92509	90540	90862	740	0.81
STD	1497	1497	1488	1488	794	794			
CV%	1.64	1.64	1.64	1.64	0.86	0.88	1.14		1.39

표7-1. Cadmium-109 혈액표준액상에서의 counts(40 ug/L)

- First run

Vial	1		2		3		AVG _{btrun}	STD	CV%
	-background		-background		-background				
1	90166	90103	88941	88869	89341	89271	89414	514	0.57
2	94081	94018	95190	95118	94309	94239	94458	475	0.50
3	95500	95437	96500	96428	97600	97530	96465	855	0.89
4	94700	94637	94154	94082	94827	94757	94492	294	0.31
5	95000	94937	96727	96655	95354	95284	95625	742	0.78
6	95390	95327	95227	95155	95009	94939	95140	159	0.17
7	94818	94755	95709	95637	92854	92784	94392	1193	1.26
8	96136	96073	95972	95900	95445	95375	95783	297	0.31
9	95500	95437	95936	95864	96081	96011	95771	243	0.25
10	95763	95700	95545	95473	95681	95611	95595	93	0.10
AVG	94705	94642	94990	94918	94650	94580	94714	486	0.51
STD	1612	1612	2130	2130	2113	2113	1882		
CV%	1.70	1.70	2.24	2.24	2.23	2.23	1.99		2.06

- Second run

1	91700	91639	90591	90530	88866	88812	90327	1163	1.29
2	95390	95329	92463	92402	94490	94436	94056	1225	1.30
3	95181	95120	94409	94348	93736	93682	94383	588	0.62
4	97945	97884	95418	95357	96209	96155	96465	1055	1.09
5	95827	95766	97590	97529	93318	93264	95520	1750	1.83
6	96981	96920	94918	94857	95972	95918	95898	842	0.88
7	93236	93175	94472	94411	92836	92782	93456	694	0.74
8	94581	94520	92418	92357	93890	93836	93571	903	0.96
9	96372	96311	95245	95184	97881	97827	96441	1083	1.12
10	95909	95848	93118	93057	94745	94691	94532	1145	1.21
AVG	95312	95251	94064	94003	94194	94140	94465	1045	1.11
STD	1714	1714	1868	1868	2291	2291			
CV%	1.80	1.80	1.99	1.99	2.43	2.43	1.84		2.07

표7-2. Cadmium-109의 혈액표준액상에서의 counts(20 ug/L).

- First run

Vial	1		2		3		AVG _{btun}	STD	CV%
	-background		-background		-background				
1	46500	46443	45672	45608	45030	44966	45672	605	1.32
2	48557	48500	48709	48645	47938	47874	48340	335	0.69
3	48700	48643	48542	48478	47847	47783	48301	373	0.77
4	48814	48757	48928	48864	47436	47372	48331	680	1.41
5	48519	48462	47980	47916	48609	48545	48308	279	0.58
6	49014	48957	48976	48912	48380	48316	48728	292	0.60
7	47728	47671	48085	48021	48214	48150	47947	202	0.42
8	48228	48171	47704	47640	48219	48155	47989	247	0.51
9	48319	48262	48142	48078	48923	48859	48400	333	0.69
10	48461	48404			50190	50126	49265	861	1.75
AVG	48284	48227	48082	48018	48079	48015	48128	421	0.87
STD	681	681	948	948	1239	1239	892		
CV%	1.41	1.41	1.97	1.97	2.58	2.58	1.85		1.99

- Second run

1	45513	45454	45082	45027	45459	45395	45292	189	0.42
2	47459	47400	47842	47787	48019	47955	47714	232	0.49
3	47445	47386	47522	47467	47636	47572	47475	76	0.16
4	48133	48074	47914	47859	48285	48221	48051	149	0.31
5	49852	49793	48514	48459	49366	49302	49185	551	1.12
6	48585	48526	48185	48130	49214	49150	48602	420	0.86
7	46650	46591	47359	47304	48123	48059	47318	599	1.27
8	48166	48107	47190	47135	47000	46936	47393	512	1.08
9	49971	49912	49180	49125	48857	48793	49277	469	0.95
10	48923	48864	47990	47935	49609	49545	48781	660	1.35
AVG	48070	48011	47678	47623	48157	48093	47909	386	0.80
STD	1308	1308	1024	1024	1188	1188			
CV%	2.72	2.72	2.15	2.15	2.47	2.47	2.33		2.45

표7-3. Cadmium-109 혈액표준액상에서의 counts(10 ug/L)

- First run

Vial	1		2		3		AVG _{btun}	STD	CV%
	-background		-background		-background				
1	23651	23591	22859	22796	23113	23049	23145	332	1.43
2	23923	23863	23938	23875	24485	24421	24053	260	1.08
3	24271	24211	23857	23794	24597	24533	24179	303	1.25
4	24590	24530	24404	24341	25250	25186	24686	362	1.47
5	24350	24290	23876	23813	24097	24033	24045	195	0.81
6	24512	24452	24095	24032	24033	23969	24151	214	0.89
7	25172	25112	23686	23623	24578	24514	24416	612	2.51
8	24076	24016	23769	23706	23527	23463	23728	226	0.95
9	24685	24625	24314	24251	24159	24095	24324	222	0.91
10	24276	24216	24451	24388	24846	24782	24462	237	0.97
AVG	24351	24291	23925	23862	24269	24205	24119	296	1.23
STD	404	404	437	437	594	594	410		
CV%	1.66	1.66	1.83	1.83	2.45	2.45	1.70		1.98

- Second run

1	23231	23171	22852	22791	22806	22746	22903	191	0.83
2	24166	24106	23367	23306	23961	23901	23771	339	1.43
3	24856	24796	24226	24165	24276	24216	24392	286	1.17
4	24016	23956	24226	24165	24066	24006	24042	89	0.37
5	24050	23990	23904	23843	24035	23975	23936	66	0.28
6	24114	24054	24568	24507	23900	23840	24134	278	1.15
7	24541	24481	24104	24043	24943	24883	24469	343	1.40
8	23767	23707	24242	24181	23586	23526	23805	276	1.16
9	24004	23944	24724	24663	24045	23985	24197	330	1.36
10	23674	23614	24050	23989	24233	24173	23925	233	0.97
AVG	24042	23982	24026	23965	23985	23925	23957	243	1.01
STD	425	425	524	524	513	513			
CV%	1.77	1.77	2.18	2.18	2.14	2.14	1.73		2.03

표7-4. Cadmium-109 혈액표준액상에서의 counts(5 ug/L)

- First run

Vial	1		2		3		AVG _{6trun}	STD	CV%
	-background		-background		-background				
1	11808	11734	11396	11324	11558	11501	11520	168	1.46
2	12128	12054	12077	12005	11847	11790	11950	115	0.96
3	12136	12062	12533	12461	12423	12366	12296	170	1.38
4	12034	11960	12207	12135	12051	11994	12030	76	0.63
5	12334	12260	12315	12243	12317	12260	12254	8	0.07
6	12226	12152	12254	12182	12166	12109	12148	30	0.25
7	12613	12539	12518	12446	12512	12455	12480	42	0.34
8	12718	12644	12555	12483	12307	12250	12459	162	1.30
9	12256	12182	12247	12175	12131	12074	12144	49	0.41
10	12014	11940	12062	11990	12566	12509	12146	257	2.12
AVG	12227	12153	12216	12144	12188	12131	12143	108	0.89
STD	261	261	322	322	295	295	262		
CV%	2.13	2.14	2.63	2.65	2.42	2.43	2.16		2.41

- Second run

1	11473	11411	11581	11527	11537	11472	11470	47	0.41
2	12112	12050	11864	11810	11804	11739	11866	133	1.12
3	12206	12144	12210	12156	11907	11842	12047	145	1.21
4	11944	11882	11928	11874	12113	12048	11935	80	0.67
5	12023	11961	12160	12106	12095	12030	12032	59	0.49
6	12097	12035	12084	12030	12243	12178	12081	69	0.57
7	12165	12103	12131	12077	12250	12185	12122	46	0.38
8	12265	12203	12053	11999	12060	11995	12066	97	0.80
9	12229	12167	12089	12035	12061	11996	12066	73	0.61
10	12260	12198	12226	12172	12505	12440	12270	121	0.98
AVG	12077	12015	12033	11979	12058	11993	11996	87	0.72
STD	224	224	186	186	252	252			
CV%	1.86	1.87	1.54	1.55	2.09	2.10	1.69		1.84

표8. Chromium-51의 수용액상에서의 background counts(40 ug/L)

- First run

Vial	1		2		3		AVG _{6trun}	STD	CV%
		-background		-background		-background			
1	41883	41796	41708	41611	38196	38099	40502	1701	4.20
2	37892	37805	38546	38449	37966	37869	38041	290	0.76
3	38140	38053	38244	38147	38534	38437	38212	163	0.43
4	38553	38466	38429	38332	38370	38273	38357	81	0.21
5	37800	37713	37862	37765	37862	37765	37748	25	0.06
6	40728	40641	41516	41419	38077	37980	40013	1472	3.68
7	38466	38379	38615	38518	37807	37710	38202	353	0.92
8	38734	38647	38314	38217	41966	41869	39578	1630	4.12
9	37833	37746	38634	38537	38281	38184	38156	324	0.85
10	41228	41141	41160	41063	38118	38021	40075	1453	3.63
AVG	39126	39039	39303	39206	38518	38421	38888	749	1.89
STD	1464	1464	1434	1434	1169	1169	976		
CV%	3.74	3.75	3.65	3.66	3.03	3.04	2.51		3.48

-Second run

1	41008	40891	40424	40310	40556	40434	40545	250	0.62
2	36814	36697	37455	37341	36446	36324	36787	420	1.14
3	37388	37271	36960	36846	37177	37055	37057	174	0.47
4	39450	39333	40316	40202	40392	40270	39935	427	1.07
5	36571	36454	36832	36718	36732	36610	36594	108	0.30
6	40384	40267	40404	40290	40400	40278	40278	9	0.02
7	37159	37042	36996	36882	37240	37118	37014	98	0.27
8	36717	36600	36775	36661	36764	36642	36634	25	0.07
9	37039	36922	37329	37215	36985	36863	37000	154	0.42
10	37637	37520	37144	37030	37233	37111	37220	214	0.58
AVG	38017	37900	38064	37950	37993	37871	37907	188	0.49
STD	1551	1551	1530	1530	1626	1626	1553		
CV%	4.08	4.09	4.02	4.03	4.28	4.29	4.10		4.14

표9-1. Chromium-51의 혈액표준액상에서의 counts(40 ug/L)

- First run

Vial	1		2		3		AVG _{btrun}	STD	CV%
	-background		-background		-background				
1	57677	57590	59264	59145	57711	57586	58107	734	1.26
2	60035	59948	59423	59304	59176	59051	59434	378	0.64
3	60982	60895	61076	60957	60588	60463	60772	220	0.36
4	61229	61142	60894	60775	60488	60363	60760	318	0.52
5	60217	60130	59117	58998	59458	59333	59487	475	0.80
6	60464	60377	61241	61122	59852	59727	60409	570	0.94
7	63343	63256	62537	62418	63112	62987	62887	349	0.56
8	60835	60748	59535	59416	60394	60269	60144	551	0.92
9	60300	60213	59894	59775	59252	59127	59705	446	0.75
10	60970	60883	61458	61339	60082	59957	60726	575	0.95
AVG	60605	60518	60444	60325	60011	59886	60243	462	0.77
STD	1318	1318	1094	1094	1312	1312	1178		
CV%	2.18	2.18	1.81	1.81	2.19	2.19	1.96		2.06

- Second run

1	58852	58757	58858	58774	58038	57945	58492	387	0.66
2	57655	57560	57166	57082	57044	56951	57198	262	0.46
3	58255	58160	56922	56838	58016	57923	57640	576	1.00
4	56733	56638	57105	57021	56088	55995	56551	423	0.75
5	58716	58621	58533	58449	59305	59212	58761	327	0.56
6	58227	58132	57911	57827	58266	58173	58044	154	0.27
7	58855	58760	58438	58354	57972	57879	58331	360	0.62
8	62706	62611	62587	62503	62405	62312	62475	124	0.20
9	58876	58781	58594	58510	58505	58412	58568	156	0.27
10	55777	55682	55563	55479	54978	54885	55349	338	0.61
AVG	58465	58370	58168	58084	58062	57969	58141	311	0.54
STD	1718	1718	1759	1759	1873	1873	1760		
CV%	2.94	2.94	3.02	3.03	3.23	3.23	3.03		3.07

표9-2. Chromium-51의 혈액표준액상에서의 counts(20 ug/L)

- First run

Vial	1		2		3		AVG _{btun}	STD	CV%
	-background		-background		-background				
1	29131	29004	29140	29054	29428	29335	29131	146	0.50
2	32246	32119	29847	29761	30108	30015	30632	1057	3.45
3	30247	30120	30205	30119	30185	30092	30110	13	0.04
4	32128	32001	31525	31439	31725	31632	31691	233	0.74
5	30235	30108	30463	30377	30578	30485	30323	159	0.52
6	30736	30609	32990	32904	32134	32041	31851	946	2.97
7	30366	30239	30214	30128	30038	29945	30104	121	0.40
8	30067	29940	31290	31204	30942	30849	30664	532	1.74
9	30848	30721	30912	30826	30232	30139	30562	302	0.99
10	29685	29558	30696	30610	29932	29839	30002	445	1.48
AVG	30569	30442	30728	30642	30530	30437	30507	395	1.28
STD	933	933	1000	1000	798	798	758		
CV%	3.05	3.06	3.25	3.26	2.61	2.62	2.48		2.98

- Second run

1	31709	31618	31831	31731	30690	30604	31318	507	1.62
2	29485	29394	29538	29438	29340	29254	29362	78	0.27
3	29552	29461	29550	29450	30079	29993	29635	253	0.86
4	29735	29644	29694	29594	29405	29319	29519	143	0.48
5	29641	29550	29140	29040	29894	29808	29466	319	1.08
6	31615	31524	30812	30712	30984	30898	31045	347	1.12
7	29137	29046	29573	29473	28891	28805	29108	276	0.95
8	28931	28840	29417	29317	29517	29431	29196	256	0.88
9	28797	28706	28516	28416	29205	29119	28747	288	1.00
10	29908	29817	30457	30357	29629	29543	29906	338	1.13
AVG	29851	29760	29853	29753	29763	29677	29730	281	0.94
STD	965	965	893	893	626	626	786		
CV%	3.23	3.24	2.99	3.00	2.10	2.11	2.64		2.79

표9-3. Chromium-51의 혈액표준액상에서의 counts(10 ug/L)

- First run

Vial	1		2		3		AVG _{btrun}	STD	CV%
	-background		-background		-background				
1	14490	14363	14752	14661	15903	15818	14947	628	4.20
2	15369	15242	15293	15202	15157	15072	15172	73	0.48
3	15165	15038	15380	15289	15089	15004	15110	127	0.84
4	15547	15420	15620	15529	15272	15187	15379	143	0.93
5	15401	15274	16483	16392	16235	16150	15939	480	3.01
6	15396	15269	15360	15269	15168	15083	15207	88	0.58
7	15165	15038	15406	15315	15500	15415	15256	159	1.05
8	15476	15349	15458	15367	15618	15533	15416	83	0.54
9	16735	16608	16395	16304	16468	16383	16432	129	0.78
10	16028	15901	16306	16215	14861	14776	15631	618	3.95
AVG	15477	15350	15645	15554	15527	15442	15449	253	1.64
STD	555	555	535	535	500	500	422		
CV%	3.59	3.62	3.42	3.44	3.22	3.24	2.73		3.43

- Second run

1	14620	14516	14617	14525	14465	14368	14470	72	0.50
2	16351	16247	16431	16339	14885	14788	15791	710	4.50
3	16267	16163	16369	16277	16014	15917	16119	150	0.93
4	14946	14842	15023	14931	14826	14729	14834	83	0.56
5	14832	14728	14644	14552	14810	14713	14664	80	0.54
6	15079	14975	15097	15005	14732	14635	14872	168	1.13
7	15092	14988	14652	14560	15368	15271	14940	292	1.96
8	15687	15583	15837	15745	15687	15590	15639	75	0.48
9	14867	14763	14741	14649	14447	14350	14587	174	1.19
10	13980	13876	14149	14057	13951	13854	13929	91	0.65
AVG	15172	15068	15156	15064	14919	14822	14985	189	1.24
STD	697	697	747	747	584	584	636		
CV%	4.59	4.62	4.93	4.96	3.92	3.94	4.24		4.51

표9-4. Chromium-51의 혈액표준액상에서의 counts(5 ug/L)

- First run

Vial	1		2		3		AVG _{btrun}	STD	CV%
	-background		-background		-background				
1	7487	7366	7542	7460	7401	7302	7376	65	0.88
2	7582	7461	8105	8023	8200	8101	7862	285	3.63
3	8424	8303	8568	8486	8370	8271	8353	95	1.13
4	7921	7800	7814	7732	7812	7713	7748	37	0.48
5	7885	7764	7711	7629	7800	7701	7698	55	0.72
6	7816	7695	7851	7769	7702	7603	7689	68	0.88
7	8295	8174	7842	7760	7755	7656	7863	224	2.85
8	7685	7564	8237	8155	8116	8017	7912	252	3.19
9	7669	7548	7789	7707	7732	7633	7629	65	0.85
10	7947	7826	7883	7801	7913	7814	7814	10	0.13
AVG	7871	7750	7934	7852	7880	7781	7794	116	1.47
STD	283	283	279	279	266	266	237		
CV%	3.60	3.66	3.52	3.56	3.38	3.42	3.04		3.55

- Second run

1	8064	7977	8169	8071	7562	7471	7840	263	3.36
2	7474	7387	7583	7485	7593	7502	7458	51	0.68
3	7411	7324	7289	7191	7447	7356	7290	71	0.98
4	7739	7652	7494	7396	7603	7512	7520	105	1.39
5	8082	7995	8065	7967	8104	8013	7992	19	0.24
6	7562	7475	7414	7316	7651	7560	7450	101	1.36
7	7489	7402	7502	7404	7457	7366	7391	17	0.24
8	7839	7752	7521	7423	7594	7503	7559	140	1.85
9	8075	7988	7878	7780	7790	7699	7822	122	1.56
10	7881	7794	7865	7767	7918	7827	7796	25	0.31
AVG	7762	7675	7678	7580	7672	7581	7612	91	1.20
STD	252	252	280	280	197	197	221		
CV%	3.24	3.28	3.65	3.70	2.57	2.60	2.90		3.19

표10. Manganese-54의 수용액상에서의 background counts(40 ug/L)

- First run

Vial	1		2		3		AVG _{btrun}	STD	CV%
	-background		-background		-background				
1	45609	45089	49195	48695	46213	46173	46652	1511	3.24
2	46954	46434	46313	45813	46372	46332	46193	272	0.59
3	46800	46280	46213	45713	46754	46714	46236	410	0.89
4	47861	47341	48333	47833	46954	46914	47363	375	0.79
5	47004	46484	47213	46713	47554	47514	46904	442	0.94
6	46027	45507	46181	45681	46486	46446	45878	408	0.89
7	46013	45493	48652	48152	46459	46419	46688	1102	2.36
8	46813	46293	47050	46550	46454	46414	46419	105	0.23
9	45859	45339	46627	46127	47395	47355	46274	830	1.79
10	47957	47437	45990	45490	45781	45741	46223	865	1.87
AVG	46690	46170	47177	46677	46642	46602	46483	632	1.36
STD	770	770	1095	1095	510	510	406		
CV%	1.65	1.67	2.32	2.35	1.09	1.09	0.87		1.70

- Second run

1	45890	45402	46227	45710	46822	46300	45804	373	0.81
2	46390	45902	46622	46105	46895	46373	46127	193	0.42
3	45822	45334	45595	45078	45804	45282	45231	110	0.24
4	46059	45571	45663	45146	48076	47554	46090	1049	2.28
5	46609	46121	47068	46551	47063	46541	46404	200	0.43
6	46859	46371	45981	45464	46522	46000	45945	372	0.81
7	48404	47916	48952	48435	46195	45673	47341	1199	2.53
8	45986	45498	46345	45828	45217	44695	45340	476	1.05
9	46290	45802	46204	45687	46718	46196	45895	218	0.47
10	45718	45230	46159	45642	46281	45759	45544	227	0.50
AVG	46403	45915	46482	45965	46559	46037	45972	442	0.95
STD	750	750	919	919	731	731	571		
CV%	1.62	1.63	1.98	2.00	1.57	1.59	1.24		1.74

표11-1. Manganese-54의 혈액현탁액상에서의 counts(40 ug/L)

- First run

Vial	1		2		3		AVG _{btrun}	STD	CV%
	-background		-background		-background				
1	46018	45623	46331	45923	45026	44601	45382	566	1.25
2	50280	49885	48047	47639	48228	47803	48442	1022	2.11
3	48423	48028	50080	49672	51625	51200	49633	1295	2.61
4	48128	47733	47695	47287	48466	48041	47687	310	0.65
5	47857	47462	49414	49006	49042	48617	48362	656	1.36
6	48838	48443	47054	46646	47723	47298	47462	743	1.56
7	48152	47757	48709	48301	48414	47989	48016	223	0.46
8	49100	48705	48376	47968	48209	47784	48152	398	0.83
9	48238	47843	47952	47544	47790	47365	47584	197	0.41
10	48461	48066	47513	47105	47895	47470	47547	396	0.83
AVG	48350	47955	48117	47709	48242	47817	47827	581	1.21
STD	1016	1016	1042	1042	1520	1520	1017		
CV%	2.10	2.12	2.16	2.18	3.15	3.18	2.13		2.49

- Second run

1	44904	44495	46059	45646	45768	45364	45168	490	1.08
2	48495	48086	47966	47553	46981	46577	47405	625	1.32
3	50915	50506	50755	50342	50005	49601	50150	394	0.79
4	48276	47867	48261	47848	48419	48015	47910	75	0.16
5	48338	47929	47554	47141	47876	47472	47514	323	0.68
6	47536	47127	47838	47425	47240	46836	47129	240	0.51
7	49666	49257	48404	47991	48328	47924	48391	613	1.27
8	48076	47667	47990	47577	48033	47629	47624	37	0.08
9	48519	48110	48933	48520	48238	47834	48155	282	0.59
10	47809	47400	47704	47291	48104	47700	47464	173	0.36
AVG	48253	47844	48146	47733	47899	47495	47691	325	0.68
STD	1455	1455	1121	1121	1043	1043	1168		
CV%	3.02	3.04	2.33	2.35	2.18	2.20	2.45		2.53

표11-2. Manganese-54의 혈액현탁액상에서의 counts(20 ug/L)

- First run

Vial	1		2		3		AVG _{6trun}	STD	CV%
	-background		-background		-background				
1	24497	24101	24116	23712	24624	24238	24017	223	0.93
2	24653	24257	24580	24176	24719	24333	24255	64	0.26
3	24397	24001	24364	23960	24133	23747	23903	111	0.47
4	24646	24250	24497	24093	24456	24070	24138	80	0.33
5	24417	24021	24509	24105	24328	23942	24023	67	0.28
6	23964	23568	24492	24088	25025	24639	24098	437	1.81
7	24782	24386	24982	24578	24636	24250	24405	135	0.55
8	25666	25270	24592	24188	24465	24079	24512	538	2.19
9	24404	24008	24061	23657	23990	23604	23756	179	0.75
10	24121	23725	24150	23746	24050	23664	23712	35	0.15
AVG	24555	24159	24434	24030	24443	24057	24082	187	0.77
STD	437	437	262	262	309	309	246		
CV%	1.78	1.81	1.07	1.09	1.26	1.28	1.02		1.39

- Second run

1	24465	24048	24480	24085	24497	24082	24072	17	0.07
2	25060	24643	24240	23845	24404	23989	24159	347	1.44
3	24817	24400	24352	23957	24228	23813	24057	250	1.04
4	24302	23885	24551	24156	24373	23958	24000	114	0.48
5	24614	24197	24395	24000	24409	23994	24064	94	0.39
6	24276	23859	23971	23576	23966	23551	23662	140	0.59
7	24543	24126	24726	24331	24502	24087	24181	107	0.44
8	24600	24183	24500	24105	24878	24463	24250	154	0.63
9	24347	23930	23997	23602	24164	23749	23760	134	0.56
10	23686	23269	24128	23733	24269	23854	23619	252	1.07
AVG	24471	24054	24334	23939	24369	23954	23982	161	0.67
STD	347	347	235	235	230	230	211		
CV%	1.42	1.44	0.96	0.98	0.94	0.96	0.88		1.13

표11-3. Manganese-54의 혈액현탁액상에서의 counts(10 ug/L)

- First run

Vial	1		2		3		AVG _{btrun}	STD	CV%
	-background		-background		-background				
1	12300	11925	12353	11967	12502	12090	11994	70	0.58
2	12597	12222	12627	12241	12471	12059	12174	82	0.67
3	12672	12297	12586	12200	12438	12026	12174	112	0.92
4	12364	11989	12304	11918	12273	11861	11923	52	0.44
5	12441	12066	12508	12122	12476	12064	12084	27	0.22
6	12942	12567	13340	12954	13131	12719	12747	159	1.25
7	12518	12143	12483	12097	12646	12234	12158	57	0.47
8	12663	12288	12541	12155	12566	12154	12199	63	0.52
9	12694	12319	13238	12852	13516	13104	12758	327	2.56
10	12433	12058	12485	12099	12503	12091	12083	18	0.15
AVG	12562	12187	12647	12261	12652	12240	12229	97	0.78
STD	181	181	335	335	358	358	274		
CV%	1.44	1.48	2.65	2.73	2.83	2.92	2.24		2.38

-Second run

1	12352	11971	12270	11864	12400	12019	11951	65	0.54
2	12383	12002	12627	12221	12600	12219	12147	103	0.85
3	12360	11979	12580	12174	12371	11990	12048	89	0.74
4	12300	11919	12930	12524	13009	12628	12357	313	2.53
5	12739	12358	12500	12094	12351	11970	12141	162	1.33
6	13290	12909	13178	12772	13242	12861	12847	57	0.44
7	12681	12300	12641	12235	12628	12247	12261	28	0.23
8	12493	12112	12555	12149	12706	12325	12195	93	0.76
9	13376	12995	13368	12962	13529	13148	13035	81	0.62
10	12523	12142	12265	11859	12314	11933	11978	120	1.00
AVG	12650	12269	12691	12285	12715	12334	12296	111	0.90
STD	368	368	344	344	395	395	345		
CV%	2.91	3.00	2.71	2.80	3.10	3.20	2.81		3.00

표11-4. Manganese-54의 혈액현탁액상에서의 counts(5 ug/L)

- First run

Vial	1		2		3		AVG _{btrun}	STD	CV%
	-background		-background		-background				
1	6709	6313	6669	6295	6782	6379	6329	36	0.57
2	6570	6174	6524	6150	6509	6106	6143	28	0.46
3	6772	6376	6816	6442	6681	6278	6365	67	1.06
4	6562	6166	6654	6280	6554	6151	6199	58	0.93
5	6521	6125	6355	5981	6472	6069	6058	59	0.98
6	6407	6011	6494	6120	6463	6060	6064	45	0.74
7	6494	6098	6580	6206	6498	6095	6133	52	0.84
8	6719	6323	6812	6438	6666	6263	6341	73	1.15
9	6529	6133	6652	6278	6460	6057	6156	92	1.49
10	6509	6113	6546	6172	6631	6228	6171	47	0.76
AVG	6579	6183	6610	6236	6572	6169	6196	56	0.90
STD	110	110	135	135	106	106	106		
CV%	1.68	1.78	2.04	2.16	1.61	1.72	1.72		1.89

- Second run

1	6772	6358	6880	6486	6766	6396	6413	54	0.84
2	6405	5991	6511	6117	6452	6082	6063	53	0.88
3	6836	6422	6419	6025	6540	6170	6206	164	2.64
4	6478	6064	6562	6168	6512	6142	6125	44	0.72
5	6370	5956	6374	5980	6392	6022	5986	27	0.46
6	6372	5958	6832	6438	6831	6461	6286	232	3.69
7	6368	5954	6503	6109	6541	6171	6078	91	1.50
8	6842	6428	6791	6397	6627	6257	6361	74	1.17
9	6525	6111	6457	6063	6454	6084	6086	20	0.32
10			6573	6179	6520	6150	6165	15	0.24
AVG	6552	6138	6590	6196	6564	6194	6177	77	1.25
STD	194	194	171	171	133	133	131		
CV%	2.97	3.17	2.59	2.76	2.02	2.14	2.13		2.69

표12. Mercury-203의 수용액상에서의 background counts(40 ug/L)

- First run

Vial	1		2		3		AVG _{btun}	STD	CV%
		-background		-background		-background			
1	71033	70867	69240	69143	69833	69686	69899	720	1.03
2	68126	67960	68060	67963	66846	66699	67541	595	0.88
3	68700	68534	67680	67583	67320	67173	67763	570	0.84
4	67746	67580	68700	68603	67366	67219	67801	586	0.86
5	72057	71891	68780	68683	72542	72395	70990	1644	2.32
6	68420	68254	69266	69169	71835	71688	69704	1452	2.08
7	68573	68407	72771	72674	67413	67266	69449	2328	3.35
8	67800	67634	68973	68876	72735	72588	69699	2105	3.02
9	67606	67440	72285	72188	68253	68106	69245	2099	3.03
10	68673	68507	68580	68483	67780	67633	68208	406	0.60
AVG	68873	68707	69434	69337	69192	69045	69030	1250	1.80
STD	1405	1405	1619	1619	2226	2226	1083		
CV%	2.04	2.05	2.33	2.33	3.22	3.22	1.57		2.53

- Second run

1	65000	64868	64331	64195	64693	64537	64533	275	0.43
2	69026	68894	63743	63607	62556	62400	64967	2820	4.34
3	63256	63124	62806	62670	63850	63694	63163	419	0.66
4	63406	63274	64050	63914	65268	65112	64100	762	1.19
5	65887	65755	65143	65007	63825	63669	64810	863	1.33
6	69200	69068	64300	64164	68300	68144	67125	2128	3.17
7	65368	65236	63356	63220	64681	64525	64327	835	1.30
8	65375	65243	63956	63820	65131	64975	64679	617	0.95
9	64937	64805	64750	64614	65275	65119	64846	208	0.32
10	65262	65130	65487	65351	62335	62179	64220	1446	2.25
AVG	65672	65540	64192	64056	64591	64435	64677	1037	1.59
STD	1899	1899	763	763	1592	1592	954		
CV%	2.89	2.90	1.19	1.19	2.47	2.47	1.48		2.19

표13-1. Mercury-203의 혈액현탁액상에서의 counts(40 ug/L)

- First run

Vial	1		2		3		AVG _{btrun}	STD	CV%
	-background		-background		-background				
1	66926	66839	72300	72159	67106	66981	68660	2475	3.60
2	73707	73620	72200	72059	74250	74125	73268	879	1.20
3	73285	73198	72392	72251	72821	72696	72715	387	0.53
4	76185	76098	71650	71509	76242	76117	74575	2168	2.91
5	78592	78505	78176	78035	72064	71939	76160	2991	3.93
6	76961	76874	76692	76551	72250	72125	75183	2167	2.88
7	77384	77297	72442	72301	75692	75567	75055	2071	2.76
8	71240	71153	70013	69872	71246	71121	70715	596	0.84
9	75707	75620	71180	71039	76042	75917	74192	2233	3.01
AVG	74443	74356	73005	72864	73079	72954	73391	1774	2.41
STD	3424	3424	2501	2501	2745	2745	2254		
CV%	4.60	4.60	3.43	3.43	3.76	3.76	3.07		3.93

- Second run

1	66050	65908	66720	66573	66275	66147	66209	275	0.42
2	68760	68618	69473	69326	70033	69905	69283	526	0.76
3	69266	69124	68600	68453	67920	67792	68456	544	0.79
4	69793	69651	67920	67773	69533	69405	68943	833	1.21
5	70786	70644	70346	70199	69193	69065	69969	665	0.95
6	68666	68524	68980	68833	69126	68998	68785	196	0.29
7	69460	69318	68866	68719	67686	67558	68532	731	1.07
8	71957	71815	72492	72345	71871	71743	71968	268	0.37
9	72071	71929	72785	72638	71120	70992	71853	674	0.94
AVG	69645	69503	69576	69429	69195	69067	69333	524	0.75
STD	1745	1745	1889	1889	1637	1637	1677		
CV%	2.51	2.51	2.72	2.72	2.37	2.37	2.42		2.53

표13-2. Mercury-203의 혈액현탁액상에서의 counts(20 ug/L)

- First run

Vial	1		2		3		AVG _{6trun}	STD	CV%
		-background		-background		-background			
1	33523	33396	33950	33809	33973	33824	33676	198	0.59
2	35262	35135	38496	38355	37774	37625	37038	1378	3.72
3	35120	34993	35434	35293	37625	37476	35921	1107	3.08
4	37044	36917	35558	35417	35662	35513	35949	686	1.91
5	35637	35510	38066	37925	35800	35651	36362	1107	3.04
6	36025	35898	35410	35269	37485	37336	36168	865	2.39
7	35864	35737	36410	36269	35900	35751	35919	248	0.69
8	37374	37247	38362	38221	36021	35872	37113	964	2.60
9	37259	37132	36964	36823	37744	37595	37183	317	0.85
AVG	35901	35774	36517	36376	36443	36294	36148	763	2.10
STD	1159	1159	1485	1485	1227	1227	1005		
CV%	3.23	3.24	4.07	4.08	3.37	3.38	2.78		3.57

- Second run

1	34541	34397	35775	35628	34544	34398	34808	580	1.67
2	34093	33949	34353	34206	34606	34460	34205	209	0.61
3	33916	33772	33138	32991	34400	34254	33672	520	1.55
4	33943	33799	33406	33259	33916	33770	33609	248	0.74
5	34053	33909	34043	33896	34503	34357	34054	214	0.63
6	34700	34556	34166	34019	34893	34747	34441	308	0.89
7	34541	34397	34133	33986	34423	34277	34220	173	0.50
8	34568	34424	34682	34535	33513	33367	34109	526	1.54
9	34979	34835	34613	34466	34200	34054	34452	319	0.93
AVG	34370	34226	34257	34110	34333	34187	34174	344	1.01
STD	356	356	720	720	386	386	356		
CV%	1.04	1.04	2.10	2.11	1.12	1.13	1.04		1.43

표13-3. Mercury-203의 혈액현탁액상에서의 counts(10 ug/L)

- First run

Vial	1		2		3		AVG _{btrun}	STD	CV%
	-background		-background		-background				
1	17826	17656	16690	16551	17518	17371	17193	468	2.72
2	17529	17359	18112	17973	17386	17239	17524	321	1.83
3	18108	17938	17862	17723	17678	17531	17731	166	0.94
4	17325	17155	17610	17471	17451	17304	17310	129	0.75
5	18014	17844	18809	18670	17406	17259	17924	579	3.23
6	17624	17454	17596	17457	18524	18377	17763	434	2.45
7	18711	18541	17450	17311	18559	18412	18088	552	3.05
8	17585	17415	17678	17539	17638	17491	17482	51	0.29
9	17907	17737	17614	17475	17494	17347	17520	162	0.93
AVG	17848	17678	17713	17574	17739	17592	17615	318	1.80
STD	386	386	531	531	438	438	271		
CV%	2.16	2.18	3.00	3.02	2.47	2.49	1.54		2.56

- Second run

1	17306	17162	17235	17087	17250	17107	17119	32	0.19
2	16743	16599	16791	16643	16791	16648	16630	22	0.13
3	17253	17109	17116	16968	16886	16743	16940	151	0.89
4	16495	16351	16770	16622	16751	16608	16527	125	0.75
5	17057	16913	17027	16879	17106	16963	16918	34	0.20
6	17008	16864	16988	16840	17147	17004	16903	72	0.43
7	18033	17889	17932	17784	18153	18010	17894	92	0.52
8	16624	16480	16966	16818	16856	16713	16670	141	0.85
9	16686	16542	16593	16445	16710	16567	16518	53	0.32
AVG	17023	16879	17046	16898	17072	16929	16902	80	0.47
STD	445	445	362	362	422	422	401		
CV%	2.62	2.64	2.13	2.14	2.47	2.49	2.37		2.42

표13-4. Mercury-203의 혈액현탁액상에서의 counts(5 ug/L)

- First run

Vial	1		2		3		AVG _{btrun}	STD	CV%
	-background		-background		-background				
1	8276	8155	8436	8301	8288	8138	8198	73	0.89
2	8600	8479	8661	8526	8716	8566	8524	36	0.42
3	8325	8204	8642	8507	8440	8290	8334	127	1.53
4	8687	8566	9008	8873	8724	8574	8671	143	1.65
5	8833	8712	8829	8694	8577	8427	8611	130	1.51
6	8627	8506	8879	8744	8588	8438	8563	131	1.53
7	8826	8705	8903	8768	8799	8649	8707	49	0.56
8	8860	8739	8656	8521	8567	8417	8559	134	1.57
9	8768	8647	8673	8538	8550	8400	8528	101	1.19
10	8771	8650	8575	8440	8575	8425	8505	103	1.21
AVG	8657	8536	8726	8591	8582	8432	8520	103	1.21
STD	197	197	165	165	139	139	144		
CV%	2.27	2.30	1.89	1.92	1.62	1.65	1.69		1.96

- Second run

1	8070	7923	8053	7896	8164	8022	7947	54	0.68
2	8814	8667	8766	8609	8901	8759	8678	62	0.71
3	8067	7920	8178	8021	8127	7985	7975	42	0.52
4	8857	8710	9011	8854	8844	8702	8755	70	0.80
5	8291	8144	9200	9043	8201	8059	8415	445	5.29
6	8836	8689	8909	8752	9113	8971	8804	121	1.37
7	8270	8123	8280	8123	8285	8143	8130	9	0.12
8	8777	8630	8900	8743	8893	8751	8708	55	0.63
9	9014	8867	8882	8725	8971	8829	8807	60	0.68
10	8784	8637	8931	8774	8955	8813	8741	75	0.86
AVG	8578	8431	8711	8554	8645	8503	8496	99	1.17
STD	342	342	372	372	376	376	333		
CV%	3.99	4.05	4.28	4.35	4.35	4.42	3.92		4.28

표 14. 각 농도에서의 바이알간의 균질도 비교

RI	Media	Conc.(ug/L)	CV _{btrun}	CV _{btvial}	CV _{btvial-btrun}
Cd	water	40	0.90	1.45	0.55
	blood	40	0.81	2.07	1.26
	blood	20	0.84	2.22	1.39
	blood	10	1.12	2.01	0.89
	blood	5	0.81	2.13	1.32
Cr	water	40	1.19	3.81	2.62
	blood	40	0.67	2.57	1.90
	blood	20	1.11	2.89	1.78
	blood	10	1.44	3.97	2.53
	blood	5	1.34	3.37	2.03
Mn	water	40	1.16	1.72	0.56
	blood	40	0.95	2.51	1.56
	blood	20	0.72	1.26	0.54
	blood	10	0.84	2.69	1.85
	blood	5	1.08	2.29	1.21
Hg	water	40	1.70	2.36	0.66
	blood	40	1.58	3.23	1.65
	blood	20	1.56	2.50	0.94
	blood	10	1.14	2.49	1.35
	blood	5	1.19	3.12	1.93
Pb [*]	blood	426	2.65	2.12	
	blood	297	2.71	2.31	
	blood	194	2.66	2.98	
	blood	63	5.52	7.52	

* 한 농도당 3개 바이알씩 바이알당 3회 측정. 7개 기준실험실의 AAS 측정 평균치임.

4. 결론

감마선의 irradiation에 의한 random error를 제거한 변이계수는 카드뮴의 경우 4가지 중금속에 대하여 5 - 40 ug/L의 범위에서 0.55 - 1.49%, 크롬의 경우 1.90 - 2.62%, 망간은 0.54 - 1.85%, 수은은 0.66 - 1.93%였다. 5 - 7개의 기준실험실을 동원한 매우 지루한 검증과정을 거쳐야 하는 기존의 AAS법 대신 소량의 동위원소를 사용하여 매우 빠르고 간단하게 표준시료중의 중금속 분포를 검증할 수 있었다. 혈중 수은과 같이 VGA-AAS법에서는 다량의 시료를 필요로하여 사실상 검증이 불가능한 경우도 매우 소량의 시료로 검증이 가능했다.

5. 감사의 글

본 연구중 isotope와 관련된 실험은 원광대학교 의약자원연구소의 연구비 및 기술지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다. 또한 4종 중금속에 대한 isotope 사용 실험실 면허를 얻어 주시고 실험에 필요한 장비를 사용할 수 있도록 해 주신 미주리 대학교 의과대학 약리학교실의 김현주 주임 교수님과, isotope 실험용 시약의 준비, 폐기처리를 담당해준 Jane Burnette양께 감사를 드립니다.

6. 참고문헌

양 정선, 생물학적 모니터링에 관한 분석정도관리 프로그램, 산업보건연구원 연구자료, 센타 95-4-21, 1995

서 두환, 원자력 용어 해설집, 한국에너지 연구소, 1990

P&CAM 214, U.S.Department of Health, Education and Welfare, Publ. 1977

NIH(National Institute of Health), Radiation Safety in the Laboratory, U.S.

department of Health and Human Services, 1990

NIH(National Institute of Health), The National Institute of Health Radiation Safety

Guide, U.S. department of Health and Human Services, Radiation Safety Branch,

Division of Safety, 1988

NIOSH analytical method 8003, 1994

EPA analytical method, EPA-600/4-79-020, Method 245.1, 1979