

중성자 방사화분석의 산업보건학적 이용

연세대학교 산업보건과학대학 산업보건학과

조 승 연

— Abstract —

Industrial Hygienic Study by Neutron Activation Analysis

Seung-Yeon Cho

Department of Industrial Health, Yonsei University

Principles and advantages of neutron activation analysis which is one of widely using nuclear techniques are introduced. The importance of neutron activation analysis in occupational health study is discussed. The industrial hygienic study of the samples like human hair, blood, urine, organs, tissues and airborne contamination of the working environment can be enhanced by the technique.

Statistical treatments of the acquired data are also emphasized.

Key Words: Industrial hygiene, Neutron activation analysis

1. 서 론

중성자 방사화분석(Neutron Activation Analysis: NAA)은 1936년(Hevesy and Levi : 1936) 그 방법이 최초로 원소 분석에 응용되었으며 1940 년대의 원자로 개발 및 1950년대 초의 Nal scintillation 검출기의 개발로 다양한 분야의 미량 원소 분석에 이용되기 시작하였다. 과거 50여년 동안 NAA는 신속한 다원소 동시 정량분석 뿐만 아니라 다른 분석법에 의한 결과의 검증에도 활용되어 현재 분석방법의 한 분야로서 확고히 자리잡고 있다. NAA의 장점은 미량의 시료를 고감도로 분석할 수 있으며 시료의 전처리가 간단하고 비 파괴 다원소 동시분석 및 화학적 성질이 유사한

원소의 분석이 가능하며 또한 방사능이 감쇄된 후 동일 시료를 타 분석법에 이용 가능하다는 것이다. 이상의 여러 장점은 산업보건 연구를 위한 다양한 시료-대기분진, 혈청, 모발, 뇨, 신체기관 및 조직 등의 분석에 가장 적극적으로 이용될 수 있다. NAA의 발달과정과 그 활동 분야는 정기적 국제회의인 'Modern Trends in Activation Analysis'의 회보에 잘 정리되어 있고 그 기본 원리 및 실험방법은 여러 책들에서(De Soete : 1974, S. Amiel : 1981, Z.B. Alfassi : 1990) 찾아볼 수 있다.

초기에는 다른 원소들의 방해 작용을 없애기 위하여 관심있는 원소들은 화학적으로 분리해야 하는 일이 많아서 분석화학자들의 성역으로 인식되었지만 물리 및 공학자들의 참여로 측정기기가

지속적으로 개발되었고 최근에는 우수한 분해능을 가진 High Purity Germanium γ -ray 검출기의 출현으로 화학적 분리 없이도 30종 이상의 극미량 원소 분석이 가능해졌으며 중성자 조사 기술 및 방사선 계측 기술의 향상과 함께 분석 가능한 원소의 수는 계속 증가하고 있다. 방사화분석의 광범위한 응용에는 보문에서(M. Pinta : 1978) 찾아볼 수 있으며 다양한 분야에 보편화된 분석 방법으로 자리 잡고 있다. 국내의 경우 1962년과 1972년에 각각 준공한 한국원자력연구소의 연구용원자로 TRIGA MARK II와 III를 이용하여 지금까지 여러 분야(환경공학, 의약학 및 생물학, 핵공학, 재료과학, 지질학, 법과학 등)에 응용하고 있으며 특히 최근에는 환경 및 보건 연구에 중점을 두어 다양한 환경 물질과 모발 시료의 방사화 분석법 연구를 지속적으로 수행하고 있다.

본 총설의 목적은 방사화분석의 기본 원리를 설명하고 산업보건 연구에 어떻게 응용할 수 있는가를 소개하는데 있다.

2. 원리 및 방법

1) 원리

Nuclear analytical technique의 원리는 반응단면적(reaction cross section)이 알려져 있고 입사체의 flux를 알 수 있을 때 입사체와 분석하고자 하는 원소가 핵반응을 일으킨 후, 반응생성물의 수득율을 측정하는 것이다. 중성자가 분석 목적에 어떻게 이용될 수 있는가 하는 것은 Fig. 1에 나타내었다. Nuclear analytical technique에는 방사화(activation)와 즉발(prompt)이라는 중요한 접근 방법이 있는데 현재 방사화법이 훨씬 광범위하게 쓰여지고 있다.

NAA와 관련된 물리적 현상은 원자핵의 성질, 방사능 및 방사선과 물질과의 상호 반응에 기초를 둔다. 전형적인(n, γ) 반응이 어떻게 연속적으로 일어나는가를 Fig. 2에 나타내었다. 중성자가 표적핵종과 비탄성충돌을 하게 되면 아주 여기된 상태의 compound nucleus가 형성된다. 중성자가 핵과 결합할 때의 결합에너지에 의해 compound nucleus는 약 8 MeV 정도의 여기에너지를 갖게

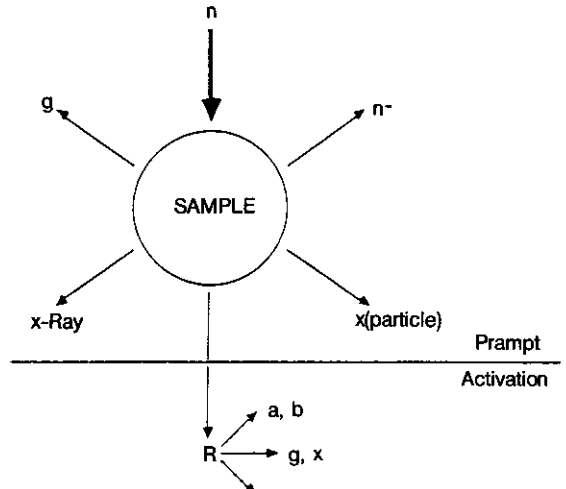


Fig. 1. Interactions of Neutron with Sample

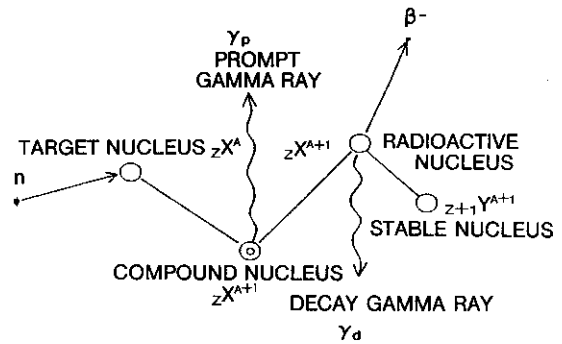


Fig. 2. Schematic diagram illustrating the sequence of events for a typical (n, γ) reaction

된다. Compound nucleus는 보통 10^{-16} 초에서 10^{-11} 초 정도 존재하며 이 시간 내에 relax 되어 형성과정의 추적이 불가능하게 되고 곧 바로 즉발 γ 선이나 입자를 방출하면서 좀더 안정한 상태로 가게된다. 대부분의 경우 새로운 방사성 핵종이 만들어지고 이는 계속 붕괴하여 특성 γ 선을 방출하게 된다. NAA 법은 이러한 특성 γ 선을 측정함으로써 시료 내의 원소를 정성 및 정량 분석하는 방법이다. 약 70%의 원소가 NAA에 적당한 핵적 성질을 갖고 있다. 각 원소 중 NAA로 검출 가능한 것들을 Fig. 3에 대략적인 감도와 함께 나타내었다.

방사화법에서는 붕괴할 때 방출하는 방사선을 측정함으로써 생성된 recoil product의 양을 결정

H ※	◎ 고감도(ppb-ppt), 비파괴 분석 가능 ● 감도 양호(ppm-ppb), 비파괴 분석 가능 ○ 고감도, 화학분리 필요 △ 저감도(ppm 이하), 타 분석법 유리 ※ 타 방법 이용 가능(PGAA, PIXE) * 방사성 원소, 자체 측정																He ※
Li ※	Be ※											B ※	C ※	N ※	O ※	F ※	Ne ○
Na ◎	Mg ○											Al ◎	Si ○	P ○	S △	Cl ○	Ar ◎
K ○	Ca ○	Sc ◎	Ti ○	V ◎	Cr ○	Mn ◎	Fe △	Co ◎	Ni △	Cu ○	Zn ○	Ga ◎	Ge ◎	As ◎	Se ○	Br ◎	Kr ○
Rb ○	Sr ◎	Y ●	Zr ○	Nb ○	Mo ○	Tc *	Ru ◎	Rh ◎	Pd ○	Ag ◎	Cd ○	In ◎	Sn ○	Sb ◎	Te ◎	I ◎	Xe ○
Cs ◎	Ba ○	RE	Hf ◎	Ta ◎	W ◎	Re ◎	Os ○	Ir ◎	Pt ○	Au ◎	Hg ○	Tl ※	Pb ※	Bi ※	Po *	At *	Rn *
Fr *	Ra *	Ac *	Th ○	Pa *	U ◎	Np *											
Rare Earth	La ◎	Ce ○	Pr ◎	Nd ○	Pm ○	Sm ◎	Eu ◎	Gd ○	Tb ◎	Dy ◎	Ho ◎	Er ◎	Tm ○	Yb ◎	Lu ◎		

Fig. 3. Detectable elements with NAA

할 수 있다. 감마선을 측정하기 위해 시료를 준비하기 편하고 고감도 검출기와 파고분석장치(pulse height analyzer) 및 관련 PC와 software의 발달로 감마선 분광학(γ -spectrometry)은 순수한 β -방출체를 제외하고는 activation product를 검출하고 정량하는 주요한 수단이 되었다. activation product의 full energy peak area는 바로 그 activation product를 중성자와의 핵반응으로 부터 유도한 시료내 원소의 양과 다음의 관계를 갖고 있다.

Full energy peak area(counts)

$$= \frac{m \theta N_A}{A_w} \Phi \sigma (1 - \exp(-\lambda t_i)) \exp(-\lambda t_c) \epsilon \Omega b$$

여기서,

m=Mass of the element present in the sample

θ =Fractional abundance of the isotope giving rise to the product

N_A =Avogadro's Number

A_w =Atomic weight of the element

Φ =Flux of projectiles(neutron)

σ =Cross section for activation

λ =Decay constants of the product nuclide
(= 0.693/half life)

t_i =Duration of irradiation

t_c =Duration of cooling(조사 후 측정할 때까지 경과 시간)

ϵ =Full energy peak efficiency of the detector for that energy

Ω =Solid angle subtended by the sample, being counted, at the detector

b=Fractional abundance of that energy γ -ray in the decay of the product

성분 원소의 질량, m을 계산하는 방법에는 윗식의 모든 parameter를 측정하거나 알고 있어야 하는 절대법(absolute method)과 미지 시료와 원소의 양을 알고 있는 기지시료(비교체 : standard or reference)를 함께 조사하는 비교체법(comparator method)이 있다. 비교체법에서는 조사 후 미지시료와 standard의 측정된 특정에너지 γ -선의 방사능(counts rate)을 비교하여 계산하며 방법이 간단하고 핵자료나 실험에서 수반되는 계통오차 등을 최소화 시킬 수 있어 불확실도가 낮다.

2) Neutron Source

방사화분석을 위한 주요한 중성자 source는 연구용 원자로의 thermal neutron이지만 분석 목적에 따라 ^{252}Cf 및 '14MeV' 중성자 generator도 쓰

이고 있다.

3) Irradiation Position and Duration

중성자 스펙트럼의 고에너지 중성자와 matrix를 구성하는 다른 원소와의 문턱 에너지 이상에서 일어나는 핵반응을 통해(n, γ)반응 때와 동일한 핵종이 생겨날 수 있다. 그러한 방해반응을 이론적으로 예측하기 위해서는 중성자 스펙트럼과 여기함수(excitation function)를 자세히 이해하고 있어야 하므로 어느 조사위치에서 속중성자(fast neutron)가 얼마만큼 반응에 영향을 미치는지를 실험적으로 결정해야 한다. 또한 시료와 비교체, 또는 하나 이상의 시료를 동시에 조사시킬 때 조사용기 내 각 시료의 기하학적 위치에 주의해야 한다. 특히 유기 시료의 경우에는 조사할 때 시료의 온도 변화에 유의하고, 분석하고자 하는 핵종에 맞게 조사 기간을 선정해 주어야 하며, 다원소 분석의 경우 조사 기간을 둘 또는 세 가지로 선정해야 하는 것이 필수적이다.

4) Activity Measurement

필요한 경우에는 계측 전에 방사화학적 분리(radiochemical separation)를 하며 다원소를 개별 분리하여 측정할 때 한 원소의 분리 yield가 적으면 측정할 다른 부분으로 유출된 것이 명백하므로 특히 정량적인 문제가 중요시 된다. 효율이 높고 분해능이 좋은 검출기와 다채널 과고분석기 및 computer의 발달로 인해 계측 작업이 많이 쉬워졌지만 냉각 시간, 계측 위치, 계측 기간 등은 많은 주의를 기울여 설정해야 한다. 계측을 오래 할수록 통계적으로 좋은 데이터를 얻을 수 있지만 계측장비가 아주 안정(stability)해야 하고 주변이 인공 동위원소에 노출되어 있는 상황에서는 특히 background의 변화를 고려해야 한다. 한번의 계측으로 아무리 좋은 스펙트럼을 얻었다 해도 원소를 정량하기 위해서는 각 반감기 그룹마다 두 번 이상의 측정을 해야하고 가능하면 두개 이상의 다른 γ -ray 에너지를 계측하여 비교 검토해야 한다. 비교체법에서는 특히 반감기가 긴 핵종의 경우 시료와 비교체의 방사능을 직접 비교하여 시료내 원소의 양을 계산할 수 있지만 모든

방사능 측정을 'zero time'—시료와 비교체의 방사능을 비교하기 전에 적절한 decay correction을 거친 조사 직후의 시간—으로 표준화 시키는 것이 매우 효과적이다. 비교체와 시료의 양, 중성자 속의 변화, 기하학적 위치 및 조사 시간 등을 통해 얻는 zero time 방사능 측정은 생성 핵종의 붕괴 뿐만 아니라 조사 조건, 계측 장비의 상태, 표준체 및 계산의 정확도를 검토하는데도 효과적이다. 이러한 방법을 간혹 수행함으로써 모든 변수를 항상 측정할 수 없는 기기적 방법을 보완할 수 있다. 1NAA 방법의 개념도를 Fig. 4에 나타내었고 Table 1에는 결과에 영향을 주는 여러 변수를 정리하였다. 기기적 방법에서 표준시료(Standard Reference Material: SRM)는 분석 결과를 확인함에 있어서 중요하게 인식되고 있으며 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency: IAEA)와 NIST(National Institute of Standards

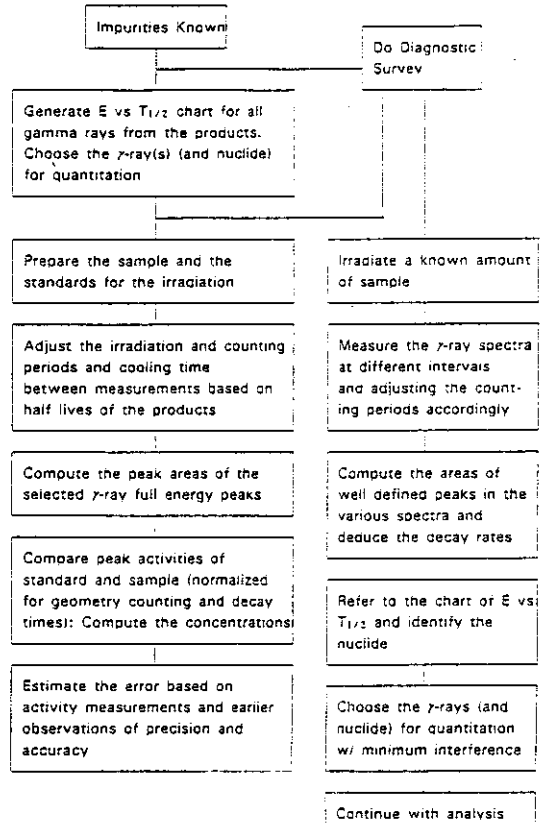


Fig. 4. Flow chart for NAA.

Table 1. Variables affecting the analytical results

Counting Statistics	Quality of measurements
Irradiation	Position characterisation
	Diect interferences
	Geometry
Radiation Measurement	Identification
	Quantitation
	Spectral background
	Indirect interference
	System behaviour
Standards	Mono, Multielement
Sample	Collection, Preparation

and Technology) 같은 기관이 그러한 결과의 상호 비교에 큰 역할을 해오고 있다.

3. 산업보건 연구에의 응용

고도의 산업화가 진행되면서 인간의 복지와 안녕에 대한 관심이 고조되었으며 이에 일선 산업 근로자들의 보건 및 작업환경 개선을 위해 비파괴 중성자 방사화분석의 적극적 활용이 요구되고 있다. NAA는 단 하나의 적은 양의 시료를 가지 고도 다원소 분석이 가능하므로 특히 산업보건 분야에 유용한 방법으로 인식되고 있으며 특히 NAA는 근로자들의 모발, 혈액, 뇨, 신체기관 및 조직의 이상 유무, 작업장 내외 주변의 공기 오염 등의 연구에 더욱 효과적으로 이용될 수 있다.

1) 모 발

유해 원소의 작업장 및 환경으로부터 인체로의 오염 가능성 연구를 위해 NAA에 의한 모발의 미량원소 분석은 계속 증가하고 있다. 그 이유는 모발내 미량 원소의 농도는 내부 및 외부 오염원과 밀접한 관계가 있으며 다른 인체 조직에 비해 쉽게 시료를 수집할 수 있기 때문이다. 방사화분석에 의한 건강한 사람들의 모발내 미량원소 분포의 연구가 이미 20개국 이상에서 행해졌으며(Y.S. Ryabukhin : 1978) 그 연구에서 전체 40개의 원소를 분석하였고 이를 통해 미량원소의 인체 오염에 관한 연구(Y.S. Ryabukhin : 1980)가 발표되었으며, 또한 모발 내의 수은을 NAA에 의해 연구(Al-Shahristani 등 : 1973)하기도 하였다.

methylbromide에 노출된 근로자(S.Ohmori와 M. Hirata : 1982)와 광업 근로자(J Akashi 등 : 1982)의 모발 분석 등, 작업환경의 미량 원소 오염에 대한 indicator로써 모발을 이용하려는 노력이 계속되고 있다.

2) 혈 액

혈액은 혈청, 적혈구, 백혈구, 혈소판 등 여러 가지로 구성되어 있으며 이 중 혈청은 각종 영양 분 등의 주요 운반체이므로 NAA를 이용한 혈청 내의 미량원소 농도의 연구(D.Behne와 H. Jürgensen : 1978, H. Nakahara 등 : 1979, K. Kasperek 등 : 1981, P. Brätter 등 : 1987)가 가장 활발하다. 혈청 내의 18개 미량원소의 정상 분포에 관한 연구(J. Versieck와 R. Cornelis : 1980) 및 개인의 건강과 질병에 대한 혈청 내 미량원소의 역할에 관한 연구(J. R. W. Woittiez : 1984) 또한 NAA에 의해 수행되었다. 그의 NAA를 이용한 혈액의 분석 및 관련 연구가 많이 보고(J. Kiem 등 : 1979, K. Kasperek 등 : 1979, N. I. Ward와 D.E. Ryan : 1979, V. Krivan 등 : 1981, S.M. Lin : 1983, L.M. Mosulishvile 등 : 1985) 되었다.

NAA에 의해 혈액 내 극미량원소를 분석할 때 가장 주의해야할 것은 주원소에 의한 방해반응이다. Al이나 As를 분석할 때 (n, γ) 반응이 아닌 P이나 Br으로부터 (n, α) 반응에 의해 생긴 ^{26}Al 과 ^{76}As 를 반드시 고려해야 한다. 또한 $^{54}\text{Fe}(n, \alpha)$ ^{51}Cr , $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ 의 방해반응을 제대로 교정하지 않으면 Cr이나 Mn의 농도를 정확히 알 수 없다.

3) 뇨, 신체기과 및 조직

뇨 내의 원소 구성을 통해 콩팥이 신체의 전해 질이나 수분등의 신진대사 등의 기능을 제대로 수행하는가를 알 수 있다. 뇨에는 다량의 As, Br, Ca, Cl, Co, F, Mg, Na, P, Rb 등이 함유되어 있고 NAA에 의해 뇨 내의 17개 주요 및 미량원소가 분석되기도 하였으며 뇨를 분석할 때의 여러 문제점들, 즉 시료의 채취, 준비 및 중성자를 조사할 때의 오염 문제 등도 고찰 되었다(R. Cornelis 등 : 1975, M. Dermelj 등 : 1992).

NAA는 지속적으로 각종 신체기관 및 조직 내의 미량원소 분석 연구에 응용되어 왔으며 많은 원소가 인간의 건강과 질병에 밀접히 관련이 있다는 것이 알려졌다. 관련된 보문들을 기관 및 조직별로 정리하면 다음과 같다.

- Brain(N.A. Larsen 등 : 1979, W.D. Ehmann 등 : 1982)
- Bone(P. Brätter 등 : 1977, V.M. Kalashnikov 와 V.E. Zaichik : 1980, P.M. Kidd 등 : 1982)
- Dental tissue(R.J. Draskovic 등 : 1982)
- Eye(M. Ördógh와 P. Rácz : 1977, T. Yamaguchi 등 : 1980)
- Kidney(L. De Reu 등 : 1979, E. Damsgaard 등 : 1982)
- Lung(C. Vanoeteren 등 : 1982)
- Nail(E.L. Kanabrocki 등 : 1979)
- Pancrea(M. Terai 등 : 1984)
- Pineal body(M. Nathan 등 : 1982)
- Placenta(E. Damsgaard 등 : 1983)
- Skin(T. Parkinson 등 : 1979)

4) 작업장 내외 주변의 공기오염

먼저, 용접 가스 등 작업 환경의 대기오염 연구는 산업보건 연구의 중요한 부분을 차지하고 있다. 이를 위해 NAA를 응용한 예로써는 대기 중의 미량 금속 성분 원소(Co, Ta, W 등)에 의해 야기된 폐질환의 연구(Brune 등 : 1972), 용접 가스 내의 독성 원소(Co, Cr, Fe, Sb, Zn 등)의 연구(Hewitt 등 : 1975), 탄광 근로자의 규폐증(silicosis)의 연구(Orban 등 : 1969)와 환경에 의한 좀 더 광범위한 영향의 연구로서 폐 내의 미량 원소와 산업 오염에 의한 원소(Al, Co, Cr, Cs, Fe, Rb, Sb, Sc, Se, Zn 등)와의 관계 연구(Kasperek 등 : 1974) 등이 있다.

어느 연구에서나 시료 채집(sampling)이 가장 중요하나 소홀하기 쉬우며 특히 분진을 채집할 때는 여러 사항을 고려하여야 한다. 먼저 시료는 시간적, 공간적으로 주변 system을 대표(homogeneity)해야 하며 목적에 맞는 채집 장치(sampler)

및 여과지(filter)를 사용하여야 한다. 예를 들면 Hg, Se 등의 원소는 휘발성이 강하므로 back-up filter나 trap을 사용해야 한다. 또한 여과지마다 불순물 함량이 틀리고 장단점이 있으므로 잘 선택하여야 한다. Fiber type은 여과지 전·후의 압력 변화가 크지 않아 많은 부피를 채집할 때 적당하며 이중에서 glass나 quartz는 입자를 붙드는 능력은 좋으나 blank value가 높아서 선택에 주의해야 하며 불순물도 적고 가격이 싼 cellulose 여과지가 많이 쓰인다. organic membrane 같은 pore type 여과지는 가격은 비싸지만 불순물도 적고, 작은 입자를 채집할 때의 효율이 좋은 특징이 있다. 일반적으로 약 $10\mu\text{m}$ 이하의 입자만이 인체 내로 흡입 가능하며, 이 중 약 $0.1\mu\text{m}$ 이하의 입자가 폐포 내로 통과하는 것이 가능하므로 multi-stage cascade impactor 등으로 입자의 크기에 관한 정보를 얻은 후 분석하는 것 또한 중요하다.

이상 NAA가 산업보건 연구에 응용될 수 있는 분야를 개략적으로 알아 보았다. NAA를 통한 연구는 많은 양의 데이터를 생산하므로 가장 효과적으로 목적하는 결과를 이끌어 내려면 데이터의 정확한 통계 처리가 무척 중요하다. 이는 측정과정 보다 더 많은 시간이 소비될 수도 있으므로 분석 과정, 데이터의 수집, 처리 및 결과 발표 과정이 가능한한 전산화 될 필요가 있다. 먼저 데이터의 분포 형태를 판별하고 outlier elimination, data transformation, noise removal, data reconstruction, curve fitting 등을 통해 데이터를 concentration 및 reduction한 후에 얻어진 데이터를 해석하는 것이 바람직하다. 다양한 통계적 검증(t-test, Mann-Whitney test, Wilcoxon or Kruscal-Wallis test, F-test, Friedman test 등)을 통해 결론을 도출해 내고, regression과 correlation analysis, 즉 Gaussian normal ditribution 데이터의 linear correlation coefficient, distribution-free 데이터 집단에 대한 Spearman rank-order correlation coefficient, Kendals τ coefficient를 통해 변수를 예측하고 factor analysis를 하여 변수간 상호의존성도 검사하여야 한다(B. Sansoni 등 : 1981). 나아가 요즘 화학의 한 분야로 점차 자리잡고 있는 Chemometrics-컴퓨터 등을 이용하여 많은 양의 과학

데이터를 분석, 중요한 과학적 정보를 이끌어 내는 다양한 방법— 및 pattern recognition(B.R. Kowalski:1984, M Glick와 G.M. Hieftje : 1992) 기술에도 관심을 기울여 다양한 산업보건 연구에 응용할 필요가 있다.

4. 결 론

핵기술의 일종인 중성자 방사화분석의 기본 원리 및 이의 산업보건학적 이용에 대해 알아 보았다. NAA는 다양한 시료 내의 많은 미량원소를 비파괴 다원소 동시 분석 할 수 있는 매우 유용한 기술이며 여러 나라에서 산업보건 연구에 활발히 이용하고 있다. 이외에도 입자 가속기를 이용한 Charged Particle Activation Analysis, 선형가속기나 Betatron, Synchrotron으로부터의 γ -photon을 이용한 Photon Activation Analysis 등 여러 핵기술을 이용한 방사화분석법이 있으나 이들은 그 이용 cost가 높고 일상 분석에 이용된다기 보다 학문적 연구를 위해 이용되는 경우가 많다. NAA는 이미 확립된 기술로써 일상적 이용이 가능하며 또한 기존의 다른 분석 방법과 상호 보완적인 측면이 많다. 따라서 산업보건 연구에 NAA를 활발히 이용한다면 국내 산업보건 연구의 활성화와 그 발전에 크게 공헌할 수 있을 것이다. 또한 데이터를 효과적이고 정확하게 해석하기 위해서는 통계 처리의 올바른 이해와 응용 또한 중요하다.

참 고 문 헌

Akashi J, Fukushima I, Imahori A, Shiobara S, Takahashi Y, Tomura K: *Multielement analysis of the hair of mining industry workers. J. Radioanal. Chem.* 1982; 68 : 59.

Acta 1992; 259.

esy G, Levi H: *Mat. Phys. Medd. Dan. Vid. Selsk* 1936; 15 (5) : 3.

itt PJ: *J. Environ. Mana.* 1975; 3 : 133.

shnikov VM, Zaichik VE: *Instrumental neutron activation determination of scandium, chromium, iron, balt, zinc, selenium, rubidium, silver, antimony, terum, and mercury in bone tissue. Zh. Anal. Khim.* 1980; 35 : 530.

abrocki EL, Kanabrocki JA, Greco J, Kaplan E,

ibution of trace elements in human skeletons. J. Radioanal. Chem. 1977; 37 : 393.

Brätter P, Negretti de Brätter VE, Rosick U, Stockhausen HBV: *Trace element concentration in serum of infants in relation to dietary sources. Trace Element Anal. Chem. Med. Biol.* 1987; 4 : 133.

Brune D, Bivered B, Mattsson S, Zetterstrom O: *Nuclear Activation Techniques in the Life Sciences (Proc. Symp. Bled), Vienna, IAEA, 1972, 213.*

Cornelis R, Speecke A, Hoste J: *Neutron activation analysis for bulk and trace elements in urine.* 1975; 78 : 317.

Damsgaard E, Heydom K, Horn N: *Trace elements in the placenta of normal fetuses and male fetuses with Menkes disease determined by neutron activation analysis. Trace Elements Anal. Chem. Med. Biol.* 1983; 2 : 499.

Damsgaard E, Ostergaare K, Heydom K: *Concentrations of selenium and zinc in human kidneys. J. Radioanal. Chem.* 1982; 70 : 67.

De Reu L, Cornelis R, Hoste J, Ringoir S: *Instrumental neutron activation analysis of minor and trace elements in human kidneys. Radiochem. Radioanal. Lett.* 1979; 40 : 51.

De Soete, Gijbels R, Hoste J: *Neutron Activation Analysis, Wiley Int. Sci., 1974.*

Dermelj M, Slejkovec Z, Byrne AR, Stegnar P, Hojker S, Porenta M, Sestakov G: *Rapid Radiochemical Neutron Activation Analysis in Urine by Different Separation Techniques. Analyst* 1992; 117 : 443.

Draskovic RJ, Jacimovic L, Stojicevic M, Pajic P, Filipovic V: *Investigations of some elements distribution in aretal tissues by INAA as a function of ecological and some other parameters. J. Radioanal. Chem.* 1982; 70 : 117.

Ehmann WD, Markesbery WR, Hossain TIM, Alauddin M, Goodin DT: *Trace elements in human brain tissue by INAA. J. Radioanal. Chem.* 1982; 70 : 57.

Glick M, Hieftje GM: *Stereoscopic data visualization: Pattern recognition in three dimensions. Anal. Chim. Acta* 1973; 15 : 59.

Alfassi ZB: *Activation Analysis, CRC Press, 1990.*

Amiel S: *Nondestructive Activation Analysis, Elsevier Sci. Pub. Com., 1981.*

Behne D, Jürgensen H: *Determination of trace elements in human blood serum and in the standard reference material Bovine Liver by instrumental neutron activation analysis. J. Radioanal. Chem.* 1978; 42 : 447.

Brätter P, Gawlik D, Lausch J, Rösick U: *On the distr-*

- Oester YT: *Instrumental analysis of trace element in thumbnails of human subjects*. *Sci. Total Environ.* 1979; 13: 131.
- Kasperek K, Iyengar GV, Kiem J, Borberg H, Feinendegen LE: *Elemental composition of platelets. Part III. Determination of Ag, Au, Cd, Co, Cr, Cs, Mo, Rb, Sb, and Se in normal human platelets by neutron activation analysis*. *Clin. Chem.* 1979; 25: 711.
- Kasperek K, Kiem J, Iyengar GV, Feinendegen LE: *Concentration differences between serum and plasma of the elements cobalt, iron, mercury, rubidium, selenium and zinc determined by neutron activation analysis*. *Sci. Total Environ.* 1981; 17: 331.
- Kasperek K, Persigehl M, Feinendegen LE: *Proc. First World Congress of Environmental Medicine and Biology, Paris, 1974*.
- Kidd PM, Nicolaou G, Spyrou NM: *Elemental composition and distribution of human tibia using nondestructive and destructive techniques of analysis*. *J. Radioanal. Chem.* 1982; 70: 489.
- Kowalski BR: *Chemometrics, Mathematics and Statistics in Chemistry, Dordrecht, Holland, 1984*.
- Kiem J, Borberg H, Iyengar GV, Kasperek K, Siegers M, Feinendegen LE, Gross R: *Elemental composition of platelets. II. Water content of normal human platelets and measurements of their concentrations of Cu, Fe, K and Zn by neutron activation analysis*. *Clin. Chem.* 1979; 25: 205.
- Krivan V, Geiger H, Franz HE: *Bestimmung von Fe, Co, Cu, Zn, Se, Rb, and Cs in NBS-Ochsenblut, Blutplasma und Erythrocyten durch INAA und AAS*. *Fresenius Z. Anal. Chem.* 1981; 305: 399.
- Larsen NA, Pakkenberg H, Damsgaard E, Heydorn K: *Topographical distribution of arsenic, manganese and selenium in the normal human brain*. *J. Neurol. Sci.* 1979; 42: 407.
- Lin SM: *Determination of trace elements in human whole blood by instrumental neutron activation analysis*. *Radioisotopes* 1983; 2: 483.
- Mosulishvili LM, Shonia NI, Ginturi EN, Efremova EY, Kharabadze NE: *INAA results for metal traces in human whole blood*. *J. Radioanal. Nucl. Chem. Articles* 1985; 88: 121.
- Nakahara H, Nagame Y, Yoshizawa Y, Oda H, Gotoh S, Murakami Y: *Trace element analysis of human blood serum by neutron activation analysis*. *J. Radioanal. Chem.* 1979; 54: 183.
- Nathan M, Hock A, Demmel U, Kasperek K, Feinendegen LE: *Elements in the human pineal body*. *J. Radioanal. Chem.* 1982; 70: 209.
- Ohmori S, Hirata M: *Determination of bromine contents in blood and hair of workers exposed to methylbromide by radioactivation analysis method*. *Jpn. J. Ind. Health* 1982; 24: 119.
- Orban E, Ordogh M, Szabo E, Miskovits G, Dubai: *Biochem. Med.* 1969; 3: 221.
- Ördögh M, Rácz P: *Investigations on inorganic elements in human lenses of normal and senile cataractous character*. *J. Radioanal. Chem.* 1977; 37: 451.
- Parkinson TF, Millikan LE, Anderson DF: *Manganese, copper and zinc concentrations in human skin lesions*. *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* 1979; 30: 411.
- Pinta M: *Modern Methods for Trace Element Analysis, Ann Arbor, Ann Arbor Science, 1978*.
- Ryabukhin YS: *Activation analysis of Hair as an Indicator of Contamination of Man by Environmental Trace Element Pollutions, Vienna, IAEA/R50, 1978*.
- Ryabukhin YS: *Nuclear-based methods for the analysis of trace element pollutions in human hair*. *J. Radioanal. Chem.* 1980; 60: 7.
- Sansonni B, Iyer RK, Kurth R: *Concentration of analytical data as part of data processing in trace element analysis*. *Fresenius Z Anal Chem* 1981; 306: 212.
- Terai M, Matumoto, Suzuki H, Tanizaki Y, Yukawa M: *Trace elements in human pancreas*. *Trace Elements Anal. Chem. Med. Bio.* 1984; 3: 183.
- Vanoeteren C, Cornelis R, Versieck J, Hoste J, De Roose J: *Trace element pattern in human lung tissues*. *J. Radioanal. Chem.* 1982; 70: 219.
- Versieck J, Cornelis R: *Normal levels of trace elements in human blood plasma or serum*. *Anal. Chim. Acta.* 1980; 116: 217.
- Ward NI, Ryan DE: *Multi-element analysis of blood for trace metals by neutron activation analysis*. *Radioisotope* 1983; 32: 155.
- Woittiez JRW: *Elemental analysis of human serum and serum protein fractions by thermal neutron activation, Netherlands, Netherlands Energy Research Foundation, 1984*.
- Yamaguchi T, Bando M, Nakajima A, Terai M, Suzuki-Yesumoto M: *An application of neutron activation analysis to biological materials. IV. Approach to simultaneous determinations of trace elements in human eye tissues with non-destructive neutron activation analysis*. *J. Radioanal. Chem.* 1980; 57: 169.