

중성자방사화분석에 의한 인체 6개 조직 내 기능성원소 함량 분포 조사

강상훈 · 문중화 · 정용삼* · 조승연* · 이한영**
한국원자력연구소 방사화분석연구실,
*연세대학교 환경공학과, **국립과학수사연구소 법의학부
(2002. 3. 20 접수)

Investigation of Dynamic Elemental Distribution in Six Human Tissues by Neutron Activation Analysis

Sang-Hoon Kang, Jong-Hwa Moon, Yong-Sam Chung, Seung-Yeon Cho*, Han-Young Lee**

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Dukjin-dong, Yusong, Daejeon, Korea, 305-600

*Yonsei University, Wonju-si, Kangwon-do, Korea, 222-701

**National Institute of Scientific Investigation, 331-1 Sinwol-dong, Yangchun-gu, Seoul, Korea, 158-707

(Received Mar. 20, 2002)

요약 : 본 연구에서는 한국 성인의 인체 조직인 늑골, 폐, 간, 근육, 신장 및 갑상선에 함유된 무기원소들의 함량을 조사하였다. 이 조직들은 48시간 이내의 사망자들로부터 IAEA 권고방식에 따라 채취하여 동결건조 시킨 후 분말상태로 만들었다. 중성자 방사화분석법을 이들 시료에 적용하여 5개 다량원소인 Ca, Mg, Na, K, Cl과 12개 미량원소인 Mn, I, Sr, As, Br, Co, Cr, Cs, Fe, Rb, Se, Zn의 함량을 분석하였다. 측정결과의 정확도 확인용으로 3가지 표준물질을 이용하였으며, 대부분의 원소에서 10% 이내의 상대오차를 나타냈고, 분석값의 수용기준인 Z값은 2 이내였다. 다량원소들은 인체조직에 일정량 이상 고르게 분포하고 있었으며, 미량원소들은 조직별, 연령별 특정 농도를 나타내었다. 특히, 갑상선에서 I은 1000 $\mu\text{g/g}$ 이상 집중적으로 분포하였으며, Ca과 Sr은 늑골에서 각각 15.9%와 84.4 $\mu\text{g/g}$ 으로 나타났다.

Abstract : In this study, inorganic elemental distribution in Korean adult human tissue of liver, lung, muscle, kidney, rib and thyroid has been investigated. These tissues were collected from human's body within 48 hours after their death according to IAEA's recommended method, dried by freeze drying method and then pulverized. Neutron activation analysis was applied to these samples to determine the concentrations of 5 major elements of Ca, Mg, Na, K, and Cl and 12 trace elements of Mn, I, Sr, As, Br, Co, Cr, Cs, Fe, Rb, Se, and Zn. To confirm accuracy of analytical result was performed using three kinds of standard reference materials and resulted that the relative error is within 10% for the most of elements and the Z-score indicating a performance of analysis is within 2. The elemental distribution shows that the major elements are distributed homogeneously with a specific concentration and that the

★ Corresponding author

Phone : +82+(0)42-868-8412 Fax : +82+(0)42-868-8448

E-mail : yschung@kaeri.re.kr

trace elements shows a distribution of different concentration with kinds of tissue and their age. Particularly, iodine shows higher concentration with 1000 $\mu\text{g/g}$ in thyroid, and calcium and strontium show the concentration with 15.9% and 84.4 $\mu\text{g/g}$ in rib, respectively.

Key words : Neutron Activation Analysis, human tissue, human health, trace analysis

1. 서 론

모든 생물체는 여러 성분원소들로 이루어져 있으며, 인체 내에는 31종의 유익한 원소가 인체항상성 유지 및 생체촉매 역할 등 다양한 대사작용을 하는 것으로 현재까지 밝혀져 있다¹. 이 중 모든 생물체에서 함량이 비교적 많고 생물체 구조의 안정성 유지에 필요한 원소를 다량원소(1 mg/g 이상)로 분류하며 H, C, N, O, S, P를 제외한 Ca, Na, K, Cl, Mg 등을 무기 다량 원소로 분류한다². 그리고 생물체에서 다양한 활성효소 및 호르몬 작용에 관여하는 등 주로 생체촉매로서의 역할을 하는 원소를 미량원소(1 $\mu\text{g/g}$ 이하)로 분류하며 Fe, Zn, Mn, Co, Cu 등의 기본 미량원소와 I, Rb, Se, As, Cr 등의 일반 미량원소가 있다. 인체 내 구성성분 중에는 약 3.5%의 무기원소가 있으며, 미량원소의 함량은 약 0.35% 정도로 알려져 있다³. 그러나, 미량원소들은 함량에 비해 그 역할이 매우 중요하며 생명의 유지와 항상성을 위한 생리학적·생화학적 측면에서 커다란 비중을 차지하고 있다⁴. 최근 30년간의 연구결과에 의하면 토양의 노후화와 환경오염으로 인해 토양 및 생물체의 주요 영양소들이 20~30% 가량 줄어들고 있으며, 먹이사슬 관계에 있는 인체에까지 영향을 미치고 있다¹. 따라서 세계 각국에서는 자국의 표준인(Reference Man) 설정을 위한 식품 및 인체 내 미량원소의 분포 연구를 수행하고 있으며, 지속적으로 모니터링을 통한 데이터 확보를 위해 노력하고 있다^{5,6}.

현재 국내에서는 의학 및 환경·보건학 분야에 반드시 필요한 인체 무기원소에 대한 기초적인 연구가 미비한 실정이다. 그 이유는 인체 내 각종 조직의 수집이 쉽지 않았고, 극미량 원소의 분석기술이 근래에 들어 발전하기 시작했기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 그 동안에 중성자 방사화분석법에 의해 수행한 한국인의 표준식품과 식품 원재료의 무기질 연구^{7,8}와 인체 모발 내 미량원소 분포 연구⁹에서 나아가 인체 내부조직 내의 기능성원소의 분포를 조사하고자 하였

다. 인체 조직은 질병이 없는 돌연사에 의한 20~60대 사망자 중 각 세대별로 1명씩 총 5명의 6개 조직(뇌, 골, 폐, 간, 근육, 신장, 갑상선), 총 30개의 시료를 IAEA 권고사항¹⁰에 따라 수집하여 동결건조의 과정을 거쳐 수분을 제거하여 수분함량을 구하였으며, 각 시료를 중성자 방사화분석법을 이용하여 5종의 다량원소와 12종의 미량원소 등 총 17종의 기능성원소를 정량하고자 하였다.

본 연구에 이용된 중성자 방사화분석법은 수십 mg 이하의 적은 시료량으로도 $\mu\text{g/g}$ 이하의 수준까지 분석이 가능하며, 동시 다원소 분석법으로 인체 조직 내 20여종의 원소 분석이 가능하며, 비파괴적인 방법으로 전처리시의 오차를 최소화 할 수 있으며, 분석시에 O (62.8%), C (19.4%), H (9.3%), N (5.1%), S (0.25%) 등의 인체 주성분에 의한 간섭현상이 없기 때문에 인체조직을 비롯한 각종 생체 시료 내의 원소분포 연구에 가장 적합한 방법중의 하나라고 할 수 있다.

실제시료의 최적 분석조건을 설정하기 위하여 3종의 생체관련 인증표준물질(NIST SRM)을 같은 조건으로 분석하였고, 상대오차, 검출한계, 측정불확도 및 측정값의 수용기준인 Z 값을 제시하여 분석법의 객관성 확보와 신뢰성을 확인하고자 하였다.

2. 실험

2.1. 시료 준비

2.1.1. 표준물질

인체조직시료에 대한 중성자 방사화분석법의 신뢰성 확인 및 비교검증을 위해 실제시료와 가장 유사한 조성의 표준물질인 미국 NIST의 비교표준물질(SRM 1486, Bone Meal; SRM 1566b, Oyster Tissue; SRM 8414, Bovine Muscle) 등을 건조기에서 4시간 이상 건조시킨 후, 분석조건에 따라 10-300 mg을 화학저울(Mettler, readability 1 μg)로 칭량하여 미리 아세톤과 증류수로 반복 세척한 조사용 폴리에틸렌 용기에 넣고

캡슐 윗 부분을 가열 밀봉하여 준비하였다.

2.1.2. 인체조직시료

특별한 질병이 없는 48시간 이내의 돌연사에 의한 20-60대 사망자 중 각 연령별로 1명씩 총 5명의 늑골, 간, 폐, 근육, 신장, 갑상선 등 6개 인체조직에 대해 IAEA의 생체시료 수집절차¹⁰에 따라 각 조직 외부의 혈액 및 오염물질을 제거한 후 Table 1과 같이 수집하였다. 외적으로 인체조직에 대한 세대별 특징은 발견되지 않았지만, 수집된 폐를 살펴보면 순수한 홍적색을 띠는 시료도 있고 부분적으로 검은색을 띠는 시료도 발견되었는데 그것은 흡연에 의한 영향이 가장 크기 때문이다. Table 2는 표준인 연구에 참여한 한국을 비롯한 아시아 국가들의 성인에 대한 6개 조직 각각의 평균 무게를 나타내고 있으며, 차후에 각 조직의 수집 및 분석결과 산정을 위한 각 국가의 비교 데이터로 활용될 것이다.

Table 1. The sampling condition of human tissue samples

| Tissue | Sampling condition |
|---------|---|
| Bone | < 20g at the rib |
| Liver | < 50g at the light liver |
| Lung | < 50g at the lower side of left or light upper lobe |
| Muscle | < 50g at the left or light psoas muscle |
| Kidney | left or right kidney |
| Thyroid | left and right thyroid |

Table 2. Mean weight of six tissues in total human body of 5 Asian countries

| | Korea | China | India | Japan | Philippine |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|------------|
| Thyroid (g) | 19.0 | 27.4 | 19.0 | 18.8 | 22.0 |
| Kidney (g) | 252 | 279 | 230 | 324 | 295 |
| Lung (g) | 1201 | 1065 | 870 | 1170 | 1049 |
| Liver (g) | 1864 | 1357 | 1175 | 1599 | 1472 |
| Muscle (g) | 25520 | 23320 | 22500 | 25000 | 22640 |
| Bone (g) | 8932 | 8162 | 7500 | 8400 | 7924 |
| Total body weight (kg) | 63.8 | 53.8 | 53.0 | 63.6 | 56.6 |

* Bone mass was based on ~14% of body weight except Japan

** Data on organ weights are obtained from Phase-I report IAEA-TECDOC-100512

*** Muscle mass was assumed to be ~40% of body weight

2.2. 인체조직시료의 세척 및 전처리

각 인체조직에 묻어있는 혈액 등 오염물질을 제거하기 위해 증류수를 이용하여 반복 세척하였으며, 특별히 뼈조직 내에는 지방함량이 많기 때문에 동결건조 과정 전에 클로로포름과 메탄올을 2 : 1의 비율로 섞고, 시료와 앞의 섞은 용매를 1 : 3의 비율로 1일 이상 방치하여 위에 층이 나뉘진 지방성분을 제거하였다. 세척 후 준비된 시료는 순수한 수분성분 제거를 위해 냉동기에서 -80 °C로 24시간 동안 냉동시킨 후에 동결건조기에서 -80 °C로 5일간 건조시켰다. 동결건조방법은 원소의 증발이나 손실을 최소화할 수 있는 건조방법으로 건조 전후에 무게를 칭량하여 수분함량 산정에 이용하였으며, Table 3에 각 시료의 수분함량을 나타냈다. 늑골시료의 평균 수분함량은 약 30%로 개인마다 뼈조직 내 수분함량과 골밀도의 차이가 크기 때문에 편차가 크게 나타났다. 나머지 5가지 조직의 평균 수분함량은 70~75%로 비교적 일정하였다. 건조된 시료는 고순도 티타늄 날이 달린 믹서와 막자사발을 이용하여 분말상태로 만들고, 100 mesh짜리 체를 이용하여 균일한 입자의 시료로 만들었다. 특히 갑상선은 건조 후 한 시료당 전체 무게가 8 g 이내로 작기 때문에 반복 실험 및 보관을 위해서 특별한 주의를 필요로 한다. 건조가 완료된 시료는 미리 세척한 폴리에틸렌 캡슐에 넣고 가열 밀봉하여 준비하였다.

Table 3. Moisture content obtained by freeze-drying of human tissue samples

| (unit : %) | | | | | | |
|------------|-------|-------|-------|--------|--------|---------|
| Ages | Rib | Liver | Lung | Muscle | Kidney | Thyroid |
| 20's | 40.9 | 75.4 | 79.0 | 77.3 | 80.4 | 77.4 |
| 30's | 25.0 | 72.1 | 81.0 | 72.1 | 75.7 | 75.8 |
| 40's | 25.0 | 69.4 | 78.7 | 74.9 | 65.4 | 74.8 |
| 50's | 24.1 | 70.5 | 56.0 | 69.4 | 58.2 | 74.4 |
| 60's | 32.2 | 73.7 | 85.2 | 74.7 | 73.6 | 75.9 |
| Mean | 28.75 | 71.85 | 73.67 | 73.42 | 69.92 | 75.60 |

2.3. 시료조사 및 방사능 계측

한국원자력연구소의 연구용 원자로인 HANARO의 공압이송장치 (Pneumatic Transfer System, PTS)를 이용

Table 4. Analytical conditions of human tissue for INAA

| Nuclide | Sample weight | Irradiation time | Cooling time | Counting time | Nuclide detected |
|-------------|---------------|------------------|--------------|---------------|---|
| Short-lived | 10 mg | 2 min | 5 min | 300 sec | ⁴⁹ Ca, ²⁷ Mg, ⁸⁰ Br, ⁶⁶ Cu |
| | | | 60 min | 800 sec | ³⁸ Cl, ¹²⁸ I, ⁵⁶ Mn, ^{87m} Sr |
| Long-lived | 300 mg | 3 hr | 5 day | 1000 sec | ⁷⁶ As, ⁸² Br, ²⁴ Na, ⁴² K, ^{69m} Zn |
| | | | 15 day | 4000 sec | ⁶⁰ Co, ⁵¹ Cr, ¹³⁴ Cs, ⁵⁹ Fe, ⁸⁶ Rb, ⁷⁵ Se, ⁶⁵ Zn |

하여 시료를 조사하였으며, 방사성 핵종의 반감기와 핵적 특성에 따라서 조사, 냉각, 계측시간을 조절하였다. Table 4와 같이 본 실험의 분석 조건은 단수명 핵종과 장수명 핵종에 대해 각각 시료량은 10 mg과 300 mg으로 2분과 3시간씩 조사시켰으며, 시료의 반감기와 원자핵 반응을 고려하여 설정한 냉각시간 후에 각각 2번씩의 계측을 통해 분석하였다. 열중성자 속밀도는 $2.8 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 였으며 동일한 조사위치를 유지하기 위해 표준시료와 실제시료 모두 용기 바닥에서 동시 조사하였다. 시료조사 후에는 일정한 냉각시간을 거쳐 감마분광분석 시스템인 HP Ge Detector와 MCA (Multichannel Analyzer, Gamma Vision, EG&G ORTEC)을 이용하여 계측하였으며, 방사능 생성식에 따라 자체 제작한 계산용 프로그램인 Labview graphical code를 이용하여

관련 핵자료 및 정해진 분석조건을 입력시켜 함량계산을 자동적으로 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 표준물질의 분석

생체관련 표준물질인 NIST SRM 1486 (Bone Meal) 과 NIST SRM 1566b (Oyster Tissue)를 3-5회 분석하여 Ca, Mg, Mn, Cu, Sr, Cl 등 6개의 단수명 핵종 원소에 대해 인증값과 비교하였으며, Table 5에 분석결과를 나타냈다. 그리고, NIST SRM 1566b (Oyster Tissue)과 NIST SRM 8414 (Bovine Muscle)를 5회 분석하여 As, Co, Fe, K, Na, Rb, Se, Th, Zn 등의 중·장수명핵종 원소를 비교하였으며, Table 6에 분석결과를 나타냈다.

Table 5. Evaluation for the analytical data by NAA of short-lived nuclides in NIST SRMs

| Short-lived element | | Ca | Mg | Mn | Cu | Sr | Cl |
|---------------------------|-----------------------|----------|----------|-----------|----------|--------|----------|
| SRM 1566b (Oyster Tissue) | Certified V.±SD | 838±20 | 1085±23 | 18.5±0.2 | 71.6±1.6 | | 5140±100 |
| | Mean±SD | 900±87 | 1239±108 | 18.8±0.5 | 70.1±9.1 | | 5595±89 |
| | Relative Error (%) | 7.41 | 14.19 | 1.65 | -2.07 | | 8.86 |
| | Z-score | 0.7 | 1.4 | 0.6 | 0.2 | | 2.0 |
| | Total Uncertainty (%) | 7.84 | 10.16 | 4.28 | 9.77 | | 3.67 |
| SRM 1486 (Bone Meal) | Certified V.±SD | 26.6±0.2 | 4660±170 | [1.0] | [0.8] | 264±7 | |
| | Mean±SD (%) | 26.1±0.2 | 4853±135 | 1.00±0.14 | | 294±18 | 244±21 |
| | Relative Error (%) | -1.81 | 4.14 | [1.00] | | 11.36 | |
| | Z-score | 1.4 | 0.9 | | | 1.6 | |
| | Total Uncertainty (%) | 3.49 | 4.42 | 14.1 | | 6.77 | 8.69 |

* [] : reference or information values

Table 6. Evaluation for the analytical data by NAA of long-lived nuclides in NIST SRMs

| | | (unit : $\mu\text{E/g}$) | | | | | | | | |
|------------------------------------|----------------------|---------------------------|-----------|-----------|----------|-------------|------------|-------------|------------|------------|
| Long-lived element | | K | Na | Fe | Zn | Co | Rb | Th | As | Se |
| SRM 1566b (Oyster Tissue) | Mean | 7087 | 3377 | 199 | 1434 | 0.369 | 3.45 | 0.039 | 7.20 | 2.23 |
| | \pm SD | \pm 953 | \pm 457 | \pm 2 | \pm 22 | \pm 0.008 | \pm 0.35 | \pm 0.004 | \pm 0.87 | \pm 0.10 |
| | Certified V. | 6520 | 3297 | 206 | 1424 | 0.371 | 3.26 | 0.037 | 7.65 | 2.06 |
| | \pm SD | \pm 90 | \pm 53 | \pm 7 | \pm 46 | \pm 0.009 | \pm 0.15 | \pm 0.004 | \pm 0.65 | \pm 0.15 |
| | Relative Error(%) | 8.71 | 2.43 | -3.43 | 0.70 | -0.66 | 5.66 | 5.51 | -5.84 | 8.37 |
| | Z-score | 0.59 | 0.17 | 0.99 | 0.19 | 0.20 | 0.49 | 0.35 | 0.41 | 0.96 |
| Uncertainty (%) | 7.21 | 6.99 | 3.94 | 3.84 | 3.81 | 7.34 | 12.3 | 7.98 | 5.89 | |
| SRM 8414 (Bovine Muscle) | Mean | 15995 | 2130 | 73.2 | 157 | 0.007 | 32.5 | | | |
| | \pm SD | \pm 513 | \pm 58 | \pm 2.3 | \pm 2 | \pm 0.002 | \pm 0.2 | | | |
| | Certified V. | 15170 | 2100 | 71.2 | 142 | 0.007 | 28.7 | | | |
| | \pm SD | \pm 370 | \pm 80 | \pm 9.2 | \pm 14 | \pm 0.003 | \pm 3.5 | | | |
| | Relative Error(%) | 5.44 | 1.43 | 2.81 | 10.6 | 1.00 | 13.2 | | | |
| | Z-score | 1.3 | 1.3 | 0.2 | 1.0 | 0.03 | 1.1 | | | |
| Uncertainty (%) | 4.46 | 4.38 | 7.75 | 6.03 | 28.6 | 7.01 | | | | |

표준물질의 분석 결과로부터 선택된 실험절차의 상대 오차를 확인하였다. 측정값과 인증값의 평균과 표준편차로부터 아래의 Z-score¹¹ 계산법에 의해 표준시료에 대한 측정값의 수용기준을 정하는데 이용한다. Z-score는 측정값과 보증값과의 편차의 절대값을 측정값의 표준편차와 보증값의 표준편차와의 제곱근으로 나누어 선형변환하여 점수화 함으로서 측정값의 수용기준에 대해 채택, 재검토, 기각의 의미로 쉽게 파악할 수 있도록 수식화한 계산법으로 표준점수분석이라고도 한다.

$$Z = \frac{|X_{cert} - X_{exp}|}{\sqrt{\sigma_{cert}^2 + \sigma_{exp}^2}}$$

$Z \leq 2$: 측정값 채택
 $2 < Z \leq 3$: 수용 또는 재검토
 $3 < Z$: 측정값 기각

분석결과로부터 측정값의 상대오차와 상대표준편차는 대부분의 원소에서 $\pm 10\%$ 이내였으며, 측정값의 수용기준인 Z값도 모두 2 이내로서 정해진 분석조건에서 생체시료에 대한 중성화 방사화분석법의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 중성자 방사화분석법에서 측정 불확도¹¹는 계측통계 (U_{ST})와 반복측정 (U_{OB})에 의해 생길 수 있는 A형 불확도와 시료칭량 (U_{BW}), 시료조사 (U_{NF}), 검출효율 (U_{EF}), 표준물질 (U_{RM}), 핵적상수 (U_{PA}) 및 보정에서 생길 수 있는 B형 불확도를 모두 고려한 합성불확도 (combined uncertainty, U_c)의 산정이 가능

하며 다음의 간단한 수식의 설정에 의해 평가하였다.

$$U_c = \sqrt{(U_{ST})^2 + (U_{OB})^2 + (U_{BW})^2 + (U_{NF})^2 + (U_{EF})^2 + (U_{RM})^2 + (U_{PA})^2}$$

A형 불확도인 계측통계와 반복측정에 의한 표준불확도는 각각 5%와 0.3% 이내였고, B형 불확도인 표준물질, 검출효율, 시료칭량, 시료조사, 핵적상수 등에 의한 표준불확도는 각각 2.0%, 2.0%, 0.01%, 0.85%, 2.5% 이내로서, 이것들을 모두 고려한 합성불확도는 보증값에 대한 오차가 크거나, 감마선 피크 면적이 작아서 정밀도가 높지 않은 일부 원소를 제외하고는 10% 이내로 평가됨으로서 분석시 발생할 수 있는 모든 불확도 요인의 합을 수량화하여 제시하였다.

3.2. 인체조직의 분석

표준시료 분석에서 정해진 실험조건에 따라 국내 성인 20 - 60대의 늑골, 간, 폐, 근육, 신장, 갑상선 등 6개 인체 조직에 대해 중성자 방사화분석법으로 분석한 결과 Ca, Mg, Mn, I, Sr, Cl 등의 단수명 핵종 원소와 Na, K, As, Br 등의 중수명 핵종 원소, 그리고 Co, Cr, Cs, Fe, Rb, Se, Zn 등의 장수명 핵종 원소 등 총 18종의 주요 미량원소를 정량하였으며, Table 7에 분석결과를 나타냈다. 또한 Fig. 1에서는 분석된 모든 결과에 대한 원소별 최대값과 최소값, 중앙값의 관계

Table 7. Analytical results of Korean human tissue by NAA

| | Rib | | | | | | Liver | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 20's | 30's | 40's | 50's | 60's | Mean | 20's | 30's | 40's | 50's | 60's | Mean |
| Ca(%) | 12.3 | 17.8 | 23.1 | 12.5 | 13.8 | 15.9 | < 0.04 | < 0.04 | < 0.04 | < 0.04 | < 0.04 | < 0.04 |
| Mg | 1665 | 2413 | 2251 | 1716 | 1561 | 1921 | 670 | 609 | 649 | 738 | 707 | 675 |
| Na | 2187 | 3630 | 4228 | 2323 | 2354 | 2944 | 4730 | 3308 | 2157 | 4357 | 3365 | 3585 |
| K | 989 | 687 | 693 | 382 | 205 | 591 | 9103 | 7745 | 8834 | 6375 | 7859 | 7983 |
| Cl | 354 | 311 | 237 | 248 | 265 | 283 | 6219 | 4943 | 3483 | 6042 | 4795 | 5096 |
| Mn | 7.14 | 1.66 | 1.25 | 0.63 | 1.85 | 2.50 | 4.87 | 2.88 | 4.85 | 3.01 | 4.07 | 3.93 |
| I | < 1.0 | < 1.0 | 2.26 | < 1.0 | < 1.0 | | 1.80 | 1.75 | < 1.0 | < 1.0 | < 1.0 | |
| Sr | 43.9 | 98.5 | 179 | 49.7 | 51.0 | 84.4 | 44.5 | < 30.0 | 52.7 | < 30.0 | < 30.0 | |
| As | | | | | | | 0.509 | 0.643 | | 1.413 | | 0.855 |
| Br | 1.66 | 1.09 | 1.43 | 1.48 | 40.7 | 9.27 | 6.59 | 9.50 | 7.43 | 8.56 | 9.36 | 8.29 |
| Co | | | | | | | 0.183 | 0.172 | 0.225 | 0.088 | 0.186 | 0.171 |
| Cr | 3.15 | 2.13 | | 2.10 | | | | | | | | |
| Cs | | | | | | | 0.044 | 0.030 | 0.066 | 0.033 | 0.066 | 0.048 |
| Fe | 102 | 64 | 99 | 75 | 37 | 75 | 466 | 581 | 456 | 635 | 132 | 454 |
| Rb | | | | | | | 22.4 | 19.2 | 18.9 | 12.2 | 15.4 | 17.6 |
| Se | | | | | | | 1.64 | 1.55 | 1.25 | 0.77 | 1.19 | 1.28 |
| Zn | 170 | 137 | 97 | 164 | 175 | 149 | 154 | 129 | 262 | 95 | 125 | 153 |
| | Lung | | | | | | Muscle | | | | | |
| | 20's | 30's | 40's | 50's | 60's | Mean | 20's | 30's | 40's | 50's | 60's | Mean |
| Ca(%) | < 0.06 | < 0.06 | < 0.06 | < 0.06 | < 0.06 | < 0.06 | < 0.02 | < 0.02 | < 0.02 | < 0.02 | < 0.02 | < 0.02 |
| Mg | 543 | 231 | 578 | 237 | 681 | 454 | 757 | 764 | 720 | 1043 | 761 | 809 |
| Na | 5720 | 7604 | 7684 | 8053 | 9812 | 7775 | 2332 | 2064 | 2363 | 2522 | 2599 | 2376 |
| K | 9869 | 9859 | 8517 | 7637 | 11211 | 9419 | 13759 | 11211 | 10212 | 11809 | 11015 | 11601 |
| Cl | 9472 | 9824 | 9048 | 10248 | 13472 | 10413 | 2284 | 2165 | 2386 | 3298 | 2902 | 2607 |
| Mn | 0.337 | 0.959 | 0.908 | 0.682 | 0.744 | 0.720 | 0.154 | 0.253 | 0.270 | 0.382 | 0.277 | 0.260 |
| I | | | | | | | 0.987 | < 1.0 | < 1.0 | < 1.0 | 2.69 | |
| Sr | | | | | | | | | | | 53.7 | |
| As | | | | | | | | | | | | |
| Br | 13.6 | 25.3 | 43.9 | 19.2 | 39.1 | 28.2 | 3.96 | 5.34 | 5.82 | 4.36 | 6.03 | 5.10 |
| Co | 0.021 | 0.065 | 0.185 | 0.089 | 0.124 | 0.097 | 0.982 | 0.215 | 0.040 | | | 0.412 |
| Cr | 0.188 | 9.200 | 0.858 | 0.212 | 0.587 | 2.209 | 53.80 | 11.90 | 0.147 | 0.255 | | 16.53 |
| Cs | 0.020 | 0.116 | 0.054 | 0.066 | 0.082 | 0.056 | 0.114 | 0.112 | 0.133 | 0.125 | 0.075 | 0.112 |
| Fe | 1135 | 1514 | 437 | 1400 | 1445 | 1186 | 381 | 176 | 106 | 210 | 142 | 203 |
| Se | 0.636 | 0.693 | 1.220 | 0.738 | 0.715 | 0.800 | 0.797 | 0.902 | 0.865 | 1.264 | 0.404 | 0.846 |
| Zn | 31.2 | 38.2 | 58.2 | 48.1 | 42.9 | 43.8 | 201 | 132 | 157 | 199 | 141 | 166 |
| | Kidney | | | | | | Thyroid | | | | | |
| | 20's | 30's | 40's | 50's | 60's | Mean | 20's | 30's | 40's | 50's | 60's | Mean |
| Ca(%) | | | | | | | | | | | | |
| Mg | 283 | 273 | 246 | 213 | 276 | 258 | 204 | 230 | 213 | 163 | 288 | 220 |
| Na | 6845 | 5953 | 3516 | 5681 | 6545 | 5708 | 5733 | 5964 | 7313 | 8611 | 7588 | 7042 |
| K | 9449 | 6701 | 3352 | 6037 | 6071 | 6957 | 5591 | 5881 | 4541 | 3541 | 5509 | 5013 |
| Cl | 10269 | 8532 | 5151 | 80069 | 9072 | 8206 | 5716 | 6119 | 6100 | 7361 | 7103 | 6480 |
| Mn | 3.97 | 2.81 | 1.77 | 2.05 | 2.15 | 2.55 | 1.01 | 0.85 | 0.77 | 1.03 | 1.12 | 0.95 |
| I | < 2.0 | < 2.0 | < 2.0 | < 2.0 | < 2.0 | < 2.0 | 1693 | 1956 | 1810 | 4613 | 2735 | 2561 |
| Sr | | 38.3 | | | | | | | | | | |
| As | | | | | | | | | | 0.717 | 0.706 | |
| Br | 22.0 | 25.9 | 17.0 | 21.8 | 22.4 | 21.8 | 7.75 | 10.9 | 14.7 | 9.03 | 11.4 | 10.8 |
| Co | 0.086 | 0.116 | 0.034 | 0.051 | 0.259 | 0.109 | 0.018 | 0.028 | 0.028 | 0.027 | 0.025 | 0.025 |

(continued)

| | Kidney | | | | | | Thyroid | | | | | |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 20's | 30's | 40's | 50's | 60's | Mean | 20's | 30's | 40's | 50's | 60's | Mean |
| Ca(%) | | | | | | | | | | | | |
| Cr | 0.320 | 5.910 | 0.105 | 0.092 | 0.892 | 1.464 | 0.374 | 0.163 | 0.211 | 1.369 | 0.364 | 0.496 |
| Cs | 0.127 | 0.105 | 0.023 | 0.056 | 0.208 | 0.104 | 0.051 | 0.103 | 0.074 | 0.040 | 0.047 | 0.063 |
| Fe | 632 | 588 | 76 | 534 | 105 | 387 | 242 | 360 | 118 | 184 | 181 | 217 |
| Rb | 17.9 | 15.2 | 7.22 | 9.70 | 38.5 | 17.7 | 8.44 | 10.8 | 5.91 | 6.22 | 5.85 | 7.44 |
| Se | 2.58 | 4.45 | 1.70 | 1.81 | 8.09 | 3.67 | 1.27 | 3.73 | 2.08 | 3.03 | 3.91 | 2.80 |
| Zn | 122 | 130 | 101 | 105 | 417 | 175 | 70 | 247 | 95 | 86 | 106 | 121 |

를 예시하는 분포도(box and whisker plot) 그림을 나타내었다. Box는 측정값의 50%를 포함하며 가운데 고딕선은 중앙값을, 수직선은 측정값의 범위를 나타낸다. Ca, I, K, Cl, Mg, Cr 등은 대수정규분포를 보였으며 조직에 따라 특성적으로 분포됨을 알 수 있었다. 나머지 미량원소들은 정규분포를 나타내어 인체조직에 고르게 함유되는 것을 알 수 있었다. 특히 I은 건조상태에서 감상선에 1000 µg/g 이상 집중적으로 축적되는 반면, 기타조직에서는 수 µg/g 이하로 분포함으로서 인체조직에서 80% 이상이 주로 감상선에 축적된다는 문헌적 사실과 일치하였다^{1,3}. 또한 Cr은 연령별로 차이가 크게 나타났으며 특히 근육에서 20-30대에 수십 µg/g씩 집중적으로 존재하였다. Cs과 Se은 뼈를 제외한 장기에 0.01 µg/g 이상 고르게 분포하였다. 뼈의 주구성물질로 알려진 Ca과 Sr은 늑골에 최대 90% 이상 축적되었는데, Ca의 함량이 높을수록 Sr의 함량도 높게 나타났으며 30대에서 가장 높은 수치를 보였다. 주요 기능성원소 중 Mg은 6개 조직 중 뼈에서 40% 이상 존재하였으며 30-40대에 가장 높게 나타났다. Fe은 인체 조직 중 폐에서 47% 가량 분포하였으며, Zn

은 폐에서 평균 44 µg/g으로 조금 낮고 나머지 조직에서는 120 µg/g 이상 고르게 분포하였다.

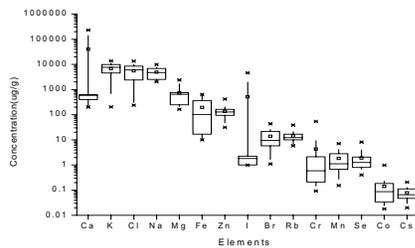


Fig. 1. Concentration distribution of trace elements in Korean human tissues by NAA

3.3. 분석결과와 비교

국내 식품 및 인체 미량원소 분포에서 Ca은 외국에 비해 조금 낮고, I은 높은 농도로 보고되고 있다. Table 8과 같이 연구 결과에서 나온 한국인의 6가지

Table 8. Mean content of main elements in human tissue by this work and reference

| Tissue | | (unit : µg/g) | | | | | | | | | |
|---------|-------------------------|---------------|-------|-------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|
| | | Ca(%) | K | Cl | Na | Mg | Fe | Zn | Se | Mn | Cr |
| Rlb | This work | 15.9 | 591 | 283 | 2944 | 1921 | 75 | 149 | | 2.50 | 2.46 |
| | Reference ⁹ | 19.5 | | | 5400 | 2650 | 50 | 162 | | 1.11 | 1.85 |
| | Mummy | 27.2 | | 200 | 5000 | 27600 | | | | 78.0 | |
| Liver | This work | < 0.04 | 7983 | 5096 | 3585 | 675 | 454 | 153 | 1.28 | 3.93 | |
| | Reference ⁴ | 0.016 | 7040 | 3280 | 3060 | 522 | 561 | 149 | 1.42 | 4.20 | |
| | Reference ¹¹ | 0.022 | | 3540 | 2800 | 616 | 1160 | 210 | 1.45 | 5.83 | 0.645 |
| Lung | This work | < 0.06 | 9419 | 10413 | 7775 | 454 | 1186 | 43.8 | 0.800 | 0.720 | 2.21 |
| | Reference ⁶ | 0.099 | 6005 | 10842 | 8340 | 1835 | 580 | 36.7 | 0.459 | 1.00 | 1.06 |
| | Reference ¹¹ | 0.069 | | 10700 | 9200 | 480 | 1250 | 55.0 | 0.900 | 1.97 | 3.74 |
| Muscle | This work | < 0.04 | 11601 | 2607 | 2376 | 809 | 203 | 166 | 0.846 | 0.26 | 16.5 |
| | Reference ³ | | | | | 325 | 340 | 188 | | 5.30 | 52.7 |
| Kidney | This work | < 0.04 | 6957 | 8206 | 5708 | 258 | 105 | 175 | 3.67 | 2.55 | 1.46 |
| | Reference ¹¹ | 0.029 | | 8050 | 8200 | 681 | 345 | 188 | 3.65 | 5.07 | 0.50 |
| Thyroid | This work | | 5013 | 6480 | 7042 | 220 | 217 | 121 | 2.80 | 0.95 | 0.50 |

* < : tolerated limit value

인체조직에 대한 미량원소의 평균농도를 외국의 문헌 값과 비교해 볼 때 커다란 차이는 없었으며 일정한 분석농도범위에 포함되었다. 기원전 늑골시료에 대한 분석결과는 한국인의 시료 중에 Ca, Mg, Mn의 농도가 상당히 낮은 수준임을 보여주고 있다. 이러한 경향은 토양과 식품 뿐 아니라 인체 내에서도 지속적으로 주요 미량원소의 농도가 점차 낮아지는 것으로 볼 수 있다. 인체 갑상선의 결과를 소와 비교하면 인체 내에서는 Cl, K, Na의 농도가 수천 배 이상 높고, Fe, Mg, Zn, Se, Mn 등은 낮은 농도로 분포하였고, 생물의 종에 따른 유전적, 식이 습관별로 차이가 크게 나타난 것으로 추정된다.

4. 결 론

한국인의 인체조직 내 미량원소의 농도분포는 개인별, 장기별 특성을 나타냈으며, 기존의 모발분석을 통한 개인의 간접적인 미량원소 축적연구와 더불어 늑골, 간, 폐, 근육, 신장, 갑상선 등의 장기분석을 통한 직접적인 미량원소의 축적 및 분포를 확인함으로써 의학 및 환경보건학적 기초연구에 활용할 수 있는 기반을 마련하였다. 특히 비파괴 분석법인 중성자 방사화 분석의 활용도를 높이기 위해 시료전처리 및 최적의 분석조건을 확립하였고, 표준물질의 분석을 통한 데이터의 신뢰성을 확인하였다. 본 연구방법은 향후 다양한 생체시료분석에 이용할 수 있으며, 식품의 미량원소 분포연구를 통한 인체보건 및 영양에 미치는 기능성 미량원소의 상관성 연구에 적극적으로 활용되기 위해서는 정확한 데이터의 통계적 처리와 표본의 수를 증가시킬 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고 문헌

1. Paul Bergner, "The healing power of minerals", 46-51, 134-136, Prima Publishing 1997
2. 김종윤, "인체와 무기원소", 1-6, 영남대학교 출판부, 2000

3. P. Bratter, D. Gawlik, J. Lausch and U. Rosick, *J. of Radioanalytical Chemistry*, **37**, 393- 403(1977)
4. 요시자토 가쓰토시, "몸속 원소 여행", 13-16, 163-165, 아카데미서적 1998
5. G. Tanaka, H. Kawamura and E. Nomura, Reference Japanese Man-II, *Health Physics*, **40**, 601-614(1981)
6. C. Chen, X. Lu, P. Zhang, X. Hou and Z. Chai, *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **244**(1) 199-203(2000)
7. S. Y. Cho, J. K. Lee, S. H. Kang, Y. S. Chung, J. Y. Lee, *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **249**(1) 39-45(2001)
8. 강상훈, "중성자 방사화분석법을 이용한 한국표준음식의 미량원소 분포에 관한 연구", 연세대학교 대학원 석사논문 (1998)
9. 정용삼, 강상훈, 문중화, 강영환, 조승연, *Analytical Science & Technology* **14**(2) 131-139(2001)
10. IAEA Technical Document, IAEA-TECDOC-330 (1985)
11. K. Ishii, M. Sasaki, M. Matsui and S. Sakamoto, *J. Neuroradiology*, **42**(11) 787-794(2000)
12. J. Cucera, P. Bode and V. Stepanek, "Uncertainty evaluation in instrumental and radiochemical neutron activation analysis", IAEA, Vienna (1999)
13. IAEA Technical Document, IAEA-TECDOC-1005 (1998)
14. W. J. Altaf and N. M. Spyrou, *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **217**(2) 201-204(1997)
15. D. L. Samudralwar and J. D. Robertson, *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **169**(1) 259-267(1993)
16. W. Yinsong, Z. Gusiun, T. Mingguang, Z. Min and C. Yuandi, *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **151**(2) 301-311(1991)
17. W. David and R. Beth, "Trace elements ; Their distribution and effects in the environment", 161-164, Elsevier Science Ltd., 2000