

# 한국 중부지역 청동기시대 전기 유적의 광 여기 루미네선스를 이용한 연대측정

김명진 | 홍덕군\*

충청문화재연구원

\* 강원대학교 물리학과

## Optically stimulated luminescence dating of heated materials from the early Bronze age in central Korea

Myung-Jin Kim | Duk-Geun Hong\*

Chungcheong Cultural Properties Research Institute, 233, Bonggok-ri, Banpo-myeon, Gongju, Korea

\* Research Institute for Basic Science, Dept. of Physics, Kangwon National University, Hyocha2-dong, Chuncheon, Korea

**요약** 루미네선스 연대측정법은 자연계에 일반적으로 존재하는 석영과 장석 같은 무기결정 내에 축적된 루미네선스가 주위 환경방사능과 상관관계에 있어 축적된 루미네선스를 자연선량계로 이용할 수 있음을 전제로 한다. 이 연구에서는 청동기시대 전기 유적인 충남 아산 명암리 유적과 충북 진천 사양리 유적에서 발굴된 토기와 화덕자리 시료를 광 여기 루미네선스 연대측정법으로 연대를 계산하였고 그 결과들을 고고학적인 견해와 비교하였다. 산출된 연대는 고고학적 연대와 잘 일치하였다. 그러므로 광 여기 루미네선스 연대측정법은 앞으로 고고학 유물의 연대측정에 크게 기여할 것으로 판단된다.

**ABSTRACT** Luminescence dating is based upon the premise that several commonly occurring minerals (e.g. quartz and feldspar) can be used as natural dosimeters, recording the amount of radiation to which they have been exposed. We report results of optical dating on quartz samples separated from archaeological remains (burnt soils and potteries), which were excavated at Myungam-Ri, Asan, and Chungnam province and at Sayang-Ri, Chinchun, Chungbuk province, considered as the cultural site of the early Bronze Age. The resultant dates were in good agreement with the ages derived by archaeological assessment. It is concluded that the optical dating introduced in here should contribute significantly to future archaeological dating work.

### 1. 서론

최근 고고학에서 청동기시대의 편년(編年)에 관한 연구는 토기와 같은 개별유물의 속성연구를 바탕으로 한 편년설정에서, 고고학 자료의 유형을 정의하고 개별유물의 속성과 유형을 상호 대비하여 이로부터 편년을 설정하는 방향으로 바뀌어 가고 있다. 유형(cultural assem-

blage)의 개념은 동질적 문화전통을 가지고 있으면서 고고학적 동시공간대로 포괄될 수 있는 제작·사용집단에 의해 제작·사용된 일련의 유구 및 유물군<sup>1</sup>을 의미한다. 그러므로 청동기시대의 편년은 전기-선동검기, 중기-비파형동검기, 후기-세형동검기<sup>2</sup>의 기본틀 위에 가락동 유형, 역삼동·혼암리 유형<sup>3</sup>, 미사리 유형, 그리고 송국리형 유형 등의 유형개념의 조합<sup>4</sup>으로 정의되어진다.

중부지역의 청동기시대 전기는 한반도 이남의 무문토기문화 형성이 서북지역의 문화와 동북지역의 문화라는 두 계열의 전파와 흡수라는 복합성 때문에 간단한 청동도구 및 장신구 등이 무문토기와 공반되거나 아직 비파형 동검이 출현하지 않은 단계인 선동검기의 가락동 유형, 역삼동·혼암리 유형으로 구분하는 것이 일반적인 시각이다. 가락동 유형의 대표적인 특징은 대부분의 주거구조가 장방형주거지에 위석식(圍石式)화덕자리를 비롯하여 초석, 저장공 등의 세 요소를 전부 또는 부분적으로 공유하고 이중구연(二重口緣)과 단사선문(短斜線紋)으로 대표되는 가락동식 토기의 존재, 석기는 이단병(二段柄) 또는 유혈병(有血溝) 마제석검을 비롯한 삼각만입석촉(三角灣入石鏃), 이단경석촉(二段莖石鏃), 양인석부(兩刃石斧), 반월형석도 등의 마제석기가 공반된다는 점 등이다. 이와 비교하여 역삼동·혼암리 유형의 특징은 주거구조가 장방형 또는 세장방형 평면에 도광형 또는 무시설식의 화덕자리와 주공식(柱孔式) 기둥배치방식을 중심으로 하고, 토기는 공열(孔列)토기(口脣刻目토기), 적색마연(赤色磨研)토기(역삼동식 토기)로만 구성되거나 이중구연, 단사선 등과 결합(혼암리식 토기) 혹은 공반되는 것 양자를 포함하며 (혈구)이단병식석검, 삼각만입·이단·일단경석촉, 반월형석도 등의 마제석기가 대부분인 점 등이다<sup>4</sup>.

고고학 유물과 유적에 대한 편년 설정의 기본적이며 필수적인 작업은 연대결정을 통한 시간적 선후관계를 밝히는 것이다. 고고학 자료의 연대결정법은 유물이 문헌 퇴적층의 선후관계, 유물의 기형과 문양 등의 형식학적 선후관계 등 상대적인 비교·고찰을 통해 판단하는 상대연대측정법(relative dating method)과 유물과 유적에 대한 자연과학적 분석에 근거한 절대연대측정법(absolute dating method)으로 나누어지며, 주로 한 시대의 상한과 하한의 연대나 유적의 연대는 절대연대측정법으로 결정하고 한 시대 내에서의 시기구분은 상대연대측정법에 의해 판단하는 방식으로 활용된다.

고고학 현장에서 주로 활용되는 절대연대측정법은 유물이나 유적과 관련이 있는 유기물 시료에 대한 방사성 탄소 연대측정법(radiocarbon dating)과 석영과 장석 등과 같은 무기결정을 대상으로 하는 루미네선스 연대측

정법(luminescence dating)이 있다. 루미네선스 연대측정법은 토기편과 수전(水田)경작층, 가마벽체 등과 같이 석영이나 장석을 추출하는 대상시료가 유물이나 유적 그 자체라는 점과 대상시료의 주성분 광물이 석영과 장석이므로 시료의 제한이 없다는 점, 그리고 연대측정의 상한과 하한 폭이 고고학의 관심영역인 현재부터 구석기시대까지를 모두 포함한다는 점 등의 장점이 있다.

현재 한반도 중부지역에서는 청동기시대 전기에 해당하는 많은 유적이 발굴되고 있다. 이 연구에서는 한반도 중부지역 청동기시대 전기 가락동 유형의 대표적인 특징을 포함하고 있는 충남 아산 명암리 유적과 역삼동·혼암리 유형의 대표적인 특징을 포함하고 있는 충북 진천 사양리 유적으로부터 시료를 채취하고 석영을 분리한 후, 이로부터 관측된 광 여기 루미네선스를 연대측정에 이용하였다<sup>1)</sup>. 또한 아산 명암리 유적에서 공반되는 송국리형 주거지에서도 시료를 채취하여 연대측정을 실시하였다.

## 2. 이론

루미네선스(luminescence)는 물질이 어떠한 형태의 에너지를 외부에서 받아 흡수된 에너지를 빛으로 바꿔 외부에 방출하는 물리적인 현상으로 에너지 띠 이론(band theory)을 이용하여 어느 정도 설명이 가능하다. 즉, 전리성 방사선(ionization radiation)에 의해 이온화된 전자(electron)들은 원자가 띠(valance band)로부터 전도 띠(conduction band)로 여기되어 전자-정공(hole)의 쌍을 형성하고, 극히 짧은 시간( $10^{-8}$ sec) 후 금지된 띠(forbidden band) 내의 트랩(trap)에 포획된다. 이 에너지 간격(energy gap)보다 큰 에너지로 포획된 전자를 여기(stimulation)하면 포획된 전자들은 다시 전도 띠로 이동하고 반대부호를 갖는 정공들과 재결합(recombination)하여 루미네선스를 방출한다.

Bailey<sup>2)</sup>는 여기를 통해 전도 띠 내에 증가된 전자들이 정공과 재결합하여 루미네선스를 내는 현상과 다시 금지된 띠로 포획되는 현상(retrapping)을 모두 고려하기 위하여 금지된 띠 내에 서로 다른 두 개의 에너지 준위를

1) 이하 충남 아산 명암리 유적을 아산 명암리 유적, 충북 진천 사양리 유적을 진천 사양리 유적으로 약칭한다.

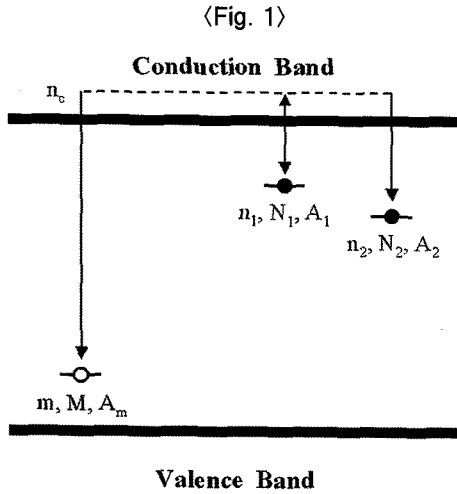


Fig. 1. The simplified energy band model for the optically stimulated luminescence involving two electron trapping levels and one luminescence center. The  $n_1$  and  $n_2$  are of the concentration of trapped electrons with trap concentration  $N_1$  and  $N_2$ . Also the trapped hole concentration  $m$  is related to the recombination center concentration  $M$ . Each electron and hole concentration is changed by the relative probability of electron capture  $A_1$ ,  $A_2$  and  $A_m$  during stimulation.

설정된 에너지 여 모델로부터 루미네선스가 지수적으로 감소함을 이론적으로 증명하였다. Fig. 1은 이러한 에너지 여 모델을 도식화하여 나타낸 것이며 루미네선스의 방출은 다음과 같은 방정식으로부터 유도된다.

$$\frac{dn_1}{dt} = -B \cdot n_1 n_c \cdot (N_1 - n_1) \cdot A_1 \quad (1)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = n_c \cdot (N_2 - n_2) \cdot A_2 \quad (2)$$

$$\frac{dn_c}{dt} = B \cdot n_1 n_c \cdot (N_1 - n_1) \cdot A_1 - n_c \cdot (N_2 - n_2) \cdot A_2 + n_c \cdot m \cdot A_m \quad (3)$$

$$\frac{dm}{dt} = -n_c \cdot m \cdot A_m \quad (4)$$

여기서  $n_c$ 는 전도 띠 내의 자유전자의 밀도를 의미한다. 또한 전자밀도가  $n_1$ 인 금지된 띠 내의 트랩은 열적으로는 안정하지만 빛에 의해 계수 B의 비율로 여기 되었고, 전자밀도가  $n_2$ 인 금지된 띠 내의 트랩은 열과 빛에 대하여 모두 안정하다.

일반적으로 석영의 경우  $N_1 \gg n_1$ ,  $N_2 \gg n_2$ 이고 재결합 준위의 밀도는  $m \gg 1$ 인 상수로 취급되어진다. 또한 결정구조 내에서 빛에 의해 여기 되어지는 전자의 밀도

는 총 전하의 밀도에 비해 매우 작다는 사실( $n_2 \gg n_1$ )로부터,  $m \gg n_1$ 이고 ( $N_2 - n_2 \gg n_1$ )이다. 그러므로 전도 띠 내의 자유전자의 밀도  $n_c$ 는 트랩에 포획된 전자의 밀도와 트랩의 밀도에 비해 대단히 작다. 이와 같은 조건을 적용하면 식(1)-(4)로부터 자유전자의 밀도  $n_c$ 는 다음과 같다.

$$n_c = \frac{B \cdot n_1}{A_{n1} + A_{n2} + A_m} \quad (5)$$

위 식에서  $A_{n1}$ ,  $A_{n2}$ ,  $A_m$ 은 방정식을 간단히 표현하기 위하여 새롭게 정의된 상수들로 각각  $A_{n1} = [(N_1 - n_1) \cdot A_1]$ ,  $A_{n2} = [(N_2 - n_2) \cdot A_2]$ ,  $A_m = [m \cdot A_m]$ 이다.

식(5)를 식(1)과 식(4)에 대입한 후 각 상수들을 정리하기 위하여 새로운 양의 상수 C를 도입하면

$$C = B \cdot \left( -1 + \frac{A_{n1}}{A_{n1} + A_{n2} + A_m} \right)$$

이며, 빛에 의해 여기되는 트랩의 전자밀도  $n_1$ 와 루미네선스의 세기 I는

$$n_1(t) = n_{10} \exp(-C \cdot t) \quad (6)$$

$$I(t) = I_0 \exp(-C \cdot t) \quad (7)$$

이다. 여기서  $n_{10}$ 과  $I_0$ 는 금지된 띠 내의 트랩 I의 전자의 초기 밀도와 초기 루미네선스의 세기이다. 그러므로 빛에 의해 여기되는 트랩의 전자밀도와 루미네선스의 세기는 시간상수 C값에 따라 지수적으로 감소함을 알 수 있다. 또한 상수 C로부터 재트랩 확률  $A_{n1}$ 이 증가하면 루미네선스가 천천히 감소됨을 알 수 있다.

루미네선스는 물질에 가해지는 에너지와 여기 방법에 따라 다양한 형태로 존재한다. 트랩에 포획된 전자를 여기시키는 에너지원이 열인 경우에 방출되는 루미네선스를 열 루미네선스(thermoluminescence; TL)라 하고, 빛인 경우에 방출되는 루미네선스를 광 여기 루미네선스(photoluminescence; PL)라 한다. 일반적으로 연대측정을 목적으로 한 루미네선스 연구에서, 석영을 청색 파장의 빛으로 여기하였을 때 발생하는 루미네선스를 OSL(optically stimulated luminescence)이라 하고 장석을 적외선 파장 영역의 빛으로 여기하였을 때 발생되

는 루미네선스를 IRSL(infrared stimulated luminescence)이라 한다.

루미네선스를 이용한 연대측정법은 시료로부터 방출되는 루미네선스를 적당한 온도에서 관측하고, 관측된 루미네선스의 크기를 시간적으로 조절하여 고고학적, 지질학적 연대를 산출하는 방법<sup>6,7</sup>이며, 루미네선스 연대측정법이 성립하기 위해서는 다음의 가정들이 만족되어야 한다. 첫째, 연대측정에 이용되는 시료에 포함된 석영과 장석 등은 땅 속에 묻히기 전에 충분히 빛에 노출되거나 높은 온도의 열로 인하여 금지된 띠 내에 포획된 전자가 모두 제거되어야 한다. 즉 연대측정의 대상시료가 퇴적 전에 루미네선스의 양이 0이 되는 절대 영년이 이루어진 후에 퇴적되어야 한다. 둘째, 전리성 방사선의 영향으로 전자들은 금지된 띠 내의 여러 에너지 준위에 포획될 수 있다. 연대측정에 사용되는 전자들은 포획된 전자들 중에서 오랜 세월 동안 외부로부터 어떠한 에너지를 받지 않는 한 여기되지 않는 안정한 전자들이어야 한다. 셋째, 시료에서 관측된 루미네선스의 양이 외부로부터 받은 방사선과 상관관계를 보여야 한다. 석영과 장석이 루미네선스 연대측정에 주로 쓰이는 이유는 이러한 상관관계가 좋기 때문이다. 넷째, 광 여기 루미네선스 연대측정법의 경우 여기광원의 파장과 시료로부터의 루미네선스 파장을 분광할 수 있어야 한다.

루미네선스 연대측정법에서 연대는 다음 식으로부터 산출된다.

$$\text{연대(Age)} = \frac{\text{자연축적선량 (Equivalent dose)}}{\text{연간선량율 (Annual Dose-rate)}} \quad (8)$$

여기서, 자연축적선량은 시료로부터 루미네선스를 측정하여 얻어지고, 연간선량율은 시료와 시료가 채취된 장소의 토양으로부터 알파, 베타, 감마선 및 우주선량을 측정하여 얻어진다.

열 루미네선스와 달리 광 여기 루미네선스 연대측정은 빛에 민감한 전자들만 여기시킬 수 있어서 지질학적인 시료를 열 루미네선스 연대측정법으로 연대를 산출하는 경우 반드시 고려해야 되는 빛에 민감하지 않은 부분을 실험실에서 다시 보정할 필요가 없다. 또한, 부분 파괴본

석이 가능해 적은 양의 시료로도 연대를 산출할 수 있는 단일 시료 분석법(single aliquot method)<sup>9</sup>을 이용 할 수 있다. 단일 시료 분석법은 소량의 시료만으로 연대산출이 가능하므로 토기편과 같이 크기가 작은 유물의 경우에도 분석이 가능하고, 기존의 열 루미네선스 연대측정법에 의한 결과와 비교할 때 오차를 크게 줄일 수 있기 때문에, 특히 고고학적 시료에 있어서 큰 의미를 갖는다.

### 3. 실험

아산 명암리 유적<sup>10</sup>에서 발굴된 청동기시대 주거지들은 구순각목에 공열문이 시문된 토기 등 역삼동·혼암리 유형의 특징이 잘 나타나는 전기의 유구이다. 또한 이 유적에서는 구릉의 정상부에서 송국리형 주거지로 불리는 내부에 타원형의 구덩이와 기둥구멍이 있는 원형 수혈주거지도 발굴되었다. 이 유적에서는 총 10개의 고고학 시료를 채취하였다. 채취된 시료는 역삼동·혼암리 유형의 주거지에서 4개의 화덕자리(爐址, burnt-soil)시료와 4개의 토기시료, 송국리형 주거지에서 2개의 토기시료이다.

진천 사양리 유적<sup>11</sup>에서는 위석식 화덕자리와 초석, 이 중구연에 단사선이 시문된 가락동식 토기 등 가락동 유형의 특징이 잘 나타나는 청동기 시대 전기 주거지가 발굴되었다. 이 주거지들의 위석식 화덕자리 내부에서 총 3개의 시료를 채취하였다. Fig. 2는 아산 명암리 유적과

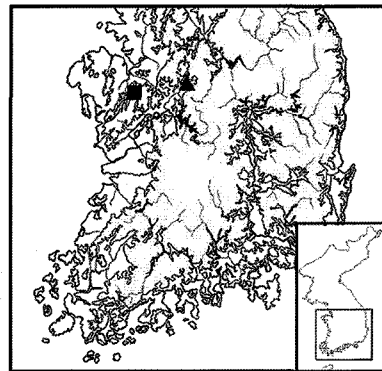


Fig. 2. Location of the sampling sites: The cultural site of Myungam-Ri, Asan, in Chungnam province(■) and Sayang-Ri, Chinchun, in Chungbuk province(▲).

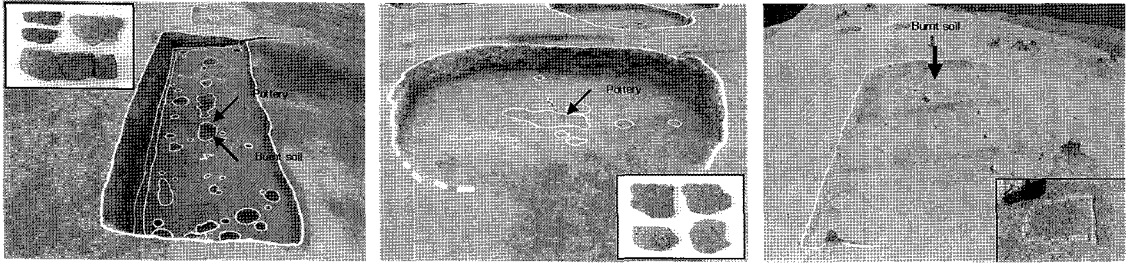


Fig. 3. Photograph of a dwelling site of Youksam-Dong & Heunam-Ri cultural assemblage in the cultural site on Myungam-Ri, Asan, in Chungnam province. Pottery samples and fire-place samples are collected for the OSL dating. The pottery styles are enclosed in left-above picture.

Fig. 4. Photograph of a dwelling site of the Sonkuk-Ri style and pottery samples used OSL dating in the cultural site on Myungam-Ri, Asan, in Chungnam province. The pottery styles are enclosed in right-below picture.

Fig. 5. Photograph of a dwelling site of Karak-Dong cultural assemblage on Sayang-Ri, Chinchun, in Chungbuk province. Fire-place samples surrounding with stones are collected for the OSL dating. The fire-place surrounding with stones are enclosed in right-below picture.

진천 사양리 유적의 위치를 나타내며, Fig. 3-5는 시료가 채취된 유구의 전경과 토기편의 모습 등을 나타낸 사진이다.

시료를 현장에서 채취할 때 가장 주의해야 할 사항은 시료가 빛에 노출되지 않도록 하는 것이다. 화덕자리 시료의 경우 소토(燒土)부는 화덕자리의 범위에서 고르게 분포하고 있었으나 두께가 상당히 얇았다. 따라서 화덕 자리의 일정부분을 채취하고 암실에서 빛에 노출되지 않은 부분을 시료로 선별하는 것이 불가능했기 때문에 어두운 밤을 이용하여 빛에 노출되었던 화덕자리의 겉부분을 충분히 제거한 후, 자연축적선량(equivalent dose) 측정을 위한 시료를 채취하였다. 또한 연간선량율(annual dose-rate) 측정과 수분함량 측정을 위한 시료의 채취는 자연축적선량 측정 시료를 채취한 주변 30cm 이내의 위치에서 등방성을 고려하여 채취하였다. 토기 시료의 경우 더 이상의 빛에 대한 노출과 수분증발을 막기 위하여 알미늄 호일과 검은 비닐로 감싼 후 암실로 운반하였다. 암실에서 빛에 노출되어 있던 토기의 겉면을 2mm 정도 제거하고 빛에 노출되지 않았던 안쪽 부분을 자연축적선량(equivalent dose)시료로 선택하였다. 토기의 나머지 부분은 토기 자체의 베타 연간선량을 측정과 수분함량 측정을 위해 사용하였다. 또한 등방성을 고려하여 토기 주변 30cm 이내의 위치에서 토양을 채취하여 토양의 감마 연간선량율과 수분함량을 측정하였다.

자연축적선량 측정에 필요한 석영은 다음과 같은 화학처리로 얻어졌다. 먼저 얻어진 시료 내의 자성을 띠는 광물들을 Sm-자석을 이용하여 제거하였다. 이 후 물로 세척하여 진흙 등을 제거한 뒤 표준 그물망체(standard sieve)를 이용하여 90 - 250 $\mu$ m 크기의 시료만을 얻었다. 시료 내의 석회나 유기물을 제거하기 위해 10% 염산(HCl)과 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)로 시료를 처리하고, 비중액을 사용하여 석영보다 무거운 입자들을 2.70 g/cm<sup>3</sup>의 비중액으로 먼저 제거한 후 2.63 - 2.70 g/cm<sup>3</sup> 비중 사이에서 석영을 분리하였다. 하지만 비중액만으로 분리된 석영은 장석에 오염될 수 있으므로 48% 불산으로 약한 시간 정도 처리하였다. 약 한 시간 정도의 불산 처리는 장석의 오염을 제거할 수 있을 뿐 아니라, 석영입자의 바깥층을 약 10 $\mu$ m 정도 에칭(etching)하므로 알파입자의 영향으로 인한 석영 입자에 축적된 루미네선스를 무시할 수 있게 한다<sup>12</sup>. 이러한 경우 연대산출에 필요한 연간선량율을 구할 때 알파입자에 의한 연간선량율을 고려하지 않아도 되는 장점이 있다(이를 quartz inclusion technique 이라 한다). 따라서 이 실험에서는 연대산출에 필요한 연간선량율을 구할 때 알파입자에 의한 연간선량율은 고려하지 않았다. 최종적으로 얻어진 시료는 후방산란 전자영상(Back-scattered Electron Image, EPMA(Electron Probe Micro Analyzer)을 통하여 석영임을 확인하였다. 또한 석영은 적외선 여기에 대해서는 루미네선스가 발생되지 않으므로 약간의 시료를 임의로 채취하여 적외선을 조사한 후 루미네선스가 검출되지 않음에 의해 장석의 오염이 없음을 확인하였다<sup>13</sup>.

## 4. 결과

모든 루미네선스의 측정은 자동화된 Riso TL/OSL 시스템(Riso TL/OSL-DA-15)에 의해 이루어졌다<sup>4</sup>. 여기광원으로는  $470 \pm 20 \text{nm}$ 의 파장을 가진 청색 발광 다이오드(Nichia type NSPB-500S)가 사용되었으며 광원의 세기는  $28 \text{mW/cm}^2$  정도이다. 또한 시료의 장식 오염도를 측정하기 위하여  $830 \text{nm}$ 의 파장을 가진 적외선 레이저가 사용되었다. 여기광원과 루미네선스의 분광을 위하여 GG420 필터가 여기광원의 앞에 부착되었으며 루미네선스는 Hoya U-340 필터와 결합된 광전자 증배관(EMI 9635QA photomultiplier)으로 검출되었다. 검출기의 전기적 잡음(electric noise) 및 시간에 독립적인 루미네선스 신호(background signal)의 계수는 10 counts/0.1sec 이하였다. 상온에서 시료에 조사되는 전리성 에너지는  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  배타선원으로 부터 제공되었으며 시료가 받는 흡수선량율은  $90 \text{mGy/sec}$ 이다.

### 4.1. 자연축적선량 측정

자연축적선량은 연대측정의 대상시료가 열이나 빛에 의한 노출로 루미네선스를 모두 잃고 퇴적된 후 주변 토양으로부터 받은 환경 방사선의 양을 의미한다. 이는 시료로부터 측정된 자연 루미네선스(natural luminescence)와 시료를 실험실에서 방사선 조사하여 얻어진 루미네선스를 비교하여 구할 수 있다. 열 루미네선스 연대 측정법이 완전 파괴 분석법(complete destructive method)인 반면 광 여기 루미네선스 연대 측정법은 부분 파괴 분석법(partial destructive method)이므로 하나의 시료 디스크(aliquot)만을 사용하여 자연축적선량을 구할 수 있는 단일시료 분석법(single aliquot method)이 가능하다. 단일시료 분석법의 장점은 다음과 같다. 첫째, 하나의 시료 디스크만을 사용하여 자연축

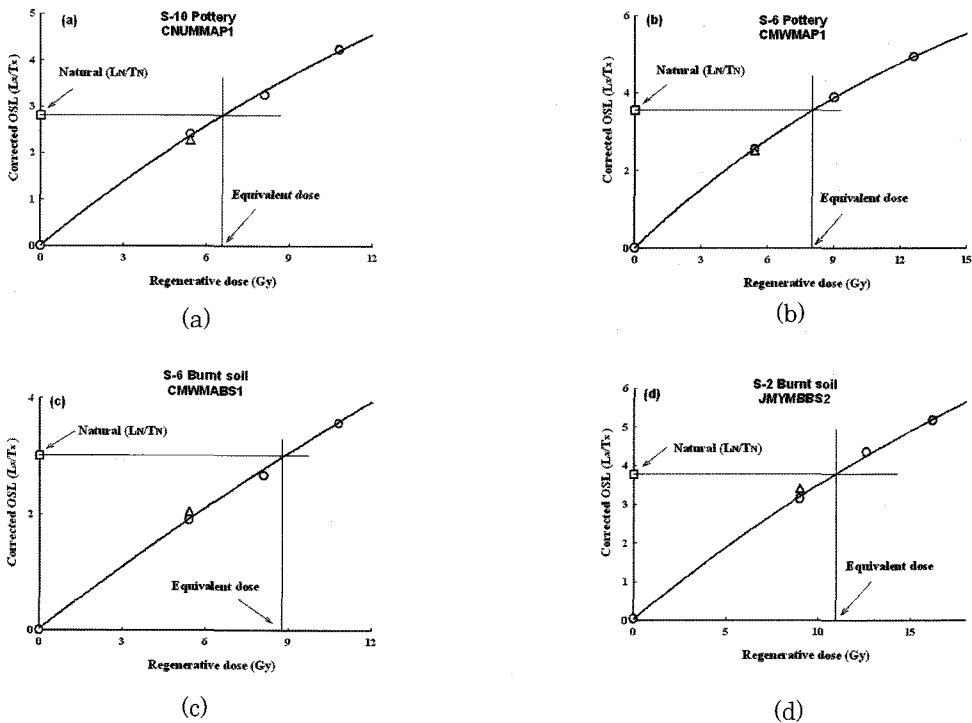


Fig. 6. (a), (b), (c) and (d) are the typical examples of equivalent dose determination based on single aliquot regeneration dose(SAR) protocol. Three regeneration doses( $L_i, n=1,2,3$ ) were given. For sensitivity changes the regenerative OSL data were corrected by dividing the test doses( $T_i, n=1,2,3$ ) OSL data, and the ratios( $L_i/T_i$ ) are shown as open circles. The curves are fitted to the single saturation exponential(SSE) function. Each equivalent dose is obtained for intersection between the sensitivity corrected natural OSL response( $LN/TTN$ , open square) and SSE fitting curve. A preheat of  $260^\circ\text{C}$  for 10sec was used.

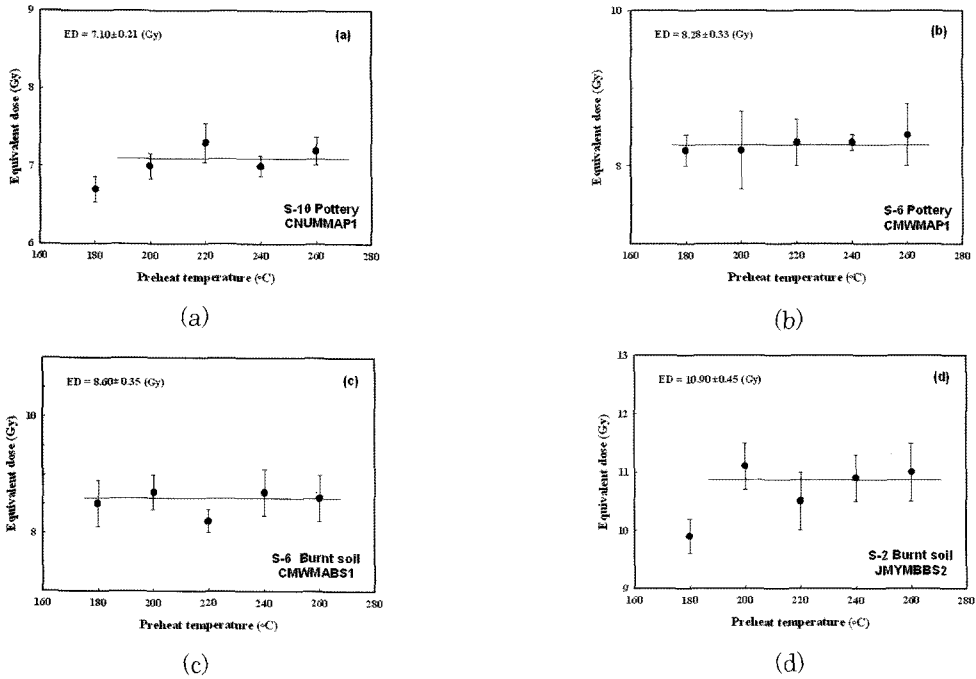


Fig. 7. (a), (b), (c) and (d) are the typical examples of the plateau test for equivalent doses. The preheating are used from 180°C to 260°C by increasing 20°C, and Each is kept during 10sec at a fixed temperature. Each equivalent dose is obtained from the average in the plateau range and the error limit is of 1σ Standard error.

적선량을 결정하므로 시료 디스크 간의 규격화(normalisation) 과정이 필요 없다. 둘째, 결정된 여러 자연축적선량 값으로부터 통계적 과정을 통하여 신뢰도 높은 자연축적선량 값을 얻을 수 있고, 시료가 퇴적되기 전 어느 정도 빛에 노출(bleaching)되었는지를 판단 할 수 있다. 셋째, 소량의 시료로도 분석이 가능하다. 이는 많은 양의 석영이나 장석을 얻을 수 없는 특별한 고고학 시료의 경우 대단히 유용하다. 넷째, 분석시간과 분석에 필요한 수고를 줄일 수 있다. 단일시료 분석법은 단일시료 부가선량법(single aliquot additive dose method)<sup>9</sup>와 단일시료 재현법(single aliquot regeneration dose method)<sup>15</sup>으로 구분된다. 단일시료 재현법은 자연축적선량이 내삽(interpolation)에 의해 결정되어 오차를 줄일 수 있다는 장점 때문에 이 연구에서는 단일시료 재현법을 이용하여 시료들의 자연축적선량을 결정하였다.

이 연구에서 사용된 단일시료 재현법의 과정은 다음과 같다. 먼저 하나의 고고학 시료에 대하여 10개의 시료 디스크를 만들었다. 자연 루미네선스를 측정하기 위하여 260°C에서 10초간 열 전처리 후, 125°C에서 40초

동안 여기시키며 루미네선스를 측정하였다. 루미네선스 민감도의 변화를 보정하기 위하여 같은 시료에 시험 방사선을 주고 시간적으로 불안정한 트랩에 포획된 전자 제거를 위해 160°C 까지 가열한 후, 시험 방사선의 조사로 인한 루미네선스를 측정하였다. 이 후 실험실 방사선 조사, 열 전처리 및 루미네선스 측정을 여러 번 반복하여 성장곡선을 만들고, 시험 방사선 조사로부터 얻어진 보정 인자로 성장곡선을 보정하였다. 빛에 민감한 루미네선스와 보다 덜 민감한 루미네선스를 모두 고려하기 위하여 0.16초, 0.32 초, 0.48 초와 0.64초 동안 방출된

Table 1. Sequences of the single aliquot regeneration method for archaeological samples

step	Sequence	OSL signal
1	Preheat at (T °C) <sup>1</sup> for 10 sec	
2	Stimulate for 40 sec at 125 °C	Lx
3	Give test dose	
4	Heat to 160°C	
5	Stimulate for 40 sec at 125°C	Tx
6	Give regenerative dose and repeat from step 1	

1) For the plateau test of equivalent doses, five preheat temperatures(T °C) varied from 180°C to 260°C with 20°C intervals were used.

Table 2. Age determination of the cultural sites of the early bronze age in central Korea using optically stimulated luminescence

Sample	Equivalent dose (Gy)	Gamma dose rate (mGy/yr)	Beta dose rate (mGy/yr)	Cosmic dose rate (mGy/yr)	Total dose rate corrected (mGy/yr)	Age (yrs, 1 $\sigma$ StDev)
S-6 burnt soil CMWMABS1	8.60 $\pm$ 0.35	0.91 $\pm$ 0.02	3.11 $\pm$ 0.11	0.15 $\pm$ 0.01	3.17 $\pm$ 0.08	BC 710 $\pm$ 130
S-7 burnt soil CMWMABS2	13.60 $\pm$ 0.55	1.53 $\pm$ 0.03	4.76 $\pm$ 0.17	0.15 $\pm$ 0.01	4.84 $\pm$ 0.13	BC 780 $\pm$ 135
S-14 burnt soil CNUMMABS1	8.40 $\pm$ 0.40	1.49 $\pm$ 0.04	2.74 $\pm$ 0.08	0.15 $\pm$ 0.01	3.21 $\pm$ 0.07	BC 620 $\pm$ 140
S-17 burnt soil CNUMMABS2	10.90 $\pm$ 0.45	1.58 $\pm$ 0.03	3.68 $\pm$ 0.14	0.15 $\pm$ 0.01	3.93 $\pm$ 0.10	BC 780 $\pm$ 100
S-6 pottery CMWMAP1	8.28 $\pm$ 0.33	0.92 $\pm$ 0.03	2.77 $\pm$ 0.09	0.15 $\pm$ 0.01	3.01 $\pm$ 0.08	BC 750 $\pm$ 130
S-7 pottery CMWMAP2	8.60 $\pm$ 0.31	1.53 $\pm$ 0.03	2.66 $\pm$ 0.09	0.15 $\pm$ 0.01	3.18 $\pm$ 0.06	BC 700 $\pm$ 110
S-9 pottery CNUMMAP1	7.10 $\pm$ 0.21	1.74 $\pm$ 0.06	2.15 $\pm$ 0.08	0.15 $\pm$ 0.01	2.80 $\pm$ 0.07	BC 540 $\pm$ 100
S-12 pottery CNUMMAP2	8.17 $\pm$ 0.38	1.81 $\pm$ 0.03	2.82 $\pm$ 0.09	0.15 $\pm$ 0.01	3.37 $\pm$ 0.06	BC 420 $\pm$ 120
S-14 pottery CNUMMAP3	7.80 $\pm$ 0.14	1.49 $\pm$ 0.04	2.64 $\pm$ 0.10	0.15 $\pm$ 0.01	2.95 $\pm$ 0.07	BC 650 $\pm$ 80
S-17 pottery CNUMMAP4	9.40 $\pm$ 0.27	1.97 $\pm$ 0.09	2.89 $\pm$ 0.10	0.15 $\pm$ 0.01	3.37 $\pm$ 0.09	BC 790 $\pm$ 110
S-1 burnt soil JMYMBBS1	11.50 $\pm$ 0.25	1.88 $\pm$ 0.04	2.67 $\pm$ 0.10	0.15 $\pm$ 0.01	3.75 $\pm$ 0.09	BC 1070 $\pm$ 100
S-2 burnt soil JMYMBBS2	10.90 $\pm$ 0.45	1.92 $\pm$ 0.04	2.60 $\pm$ 0.10	0.15 $\pm$ 0.01	3.66 $\pm$ 0.08	BC 980 $\pm$ 140
S-3 burnt soil JMYMBBS3	11.90 $\pm$ 0.46	2.05 $\pm$ 0.05	2.65 $\pm$ 0.10	0.15 $\pm$ 0.01	3.84 $\pm$ 0.09	BC 1100 $\pm$ 140

1) Total dose rate is corrected for water content using the formula of Zimmerman<sup>19</sup> and takes account for beta attenuation through the grains by a factor of 0.9.

2) Cosmic ray contribution was considered as 0.15 mGy/yr<sup>20</sup>.

루미네선스를 각각 흡산하고 통계적으로 안정된 흡산시간을 결정한 후, 이를 성장곡선과 보정에 이용하였다. Fig. 6은 단일시료 재현법을 이용하여 얻어진 고고학 시료에 대한 성장곡선들이다. 보정의 성공 여부는 성장곡선을 만든 후, 성장곡선을 만들기 위하여 시료에 준 처음 방사선 양을 시료에 다시 주어(Fig. 6에서 “△”) 처음의 측정값과 같은지를 비교하여 판단하였다. Table 1에 이 연구에서 사용된 실험과정을 요약하였다.

플래토우 테스트(plaetau test)는 열전처리 조건에 대한 자연루미네선스의 안정성을 평가하는 방법이다. 각각의 시료들에 대하여 180℃부터 260℃까지 열전처리 온도를 20℃씩 증가시키면서 위와 동일한 방법으로 자연측적선량을 측정하였다. Fig. 7에서 보는 것과 같이 200℃부터 260℃까지의 조건에서 일정한 자연측적선량 값을 갖는 구간이 존재하였다. 열전처리 조건의 변화에도 자연측적선량 값이 일정하게 유지됨은 열전처리로 인한 루미네선스의 민감도 변화가 발생하지 않음을 의미한다. 따라서 자연측적선량은 이 구간을 평균하여 결정하였다(Table 2).

## 4.2. 연간선량률(Annual dose rate) 측정

연간선량률은 자연측적선량과 함께 연대를 결정하기 위한 필수 요소이다. 일반적으로 시료채취 장소에서 토양을 채취한 후, 시료와 토양 각각의 방사성 핵종 <sup>238</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K 등의 농도를 구하고 변환인자(conversion factor)를 사용하여 계산한다<sup>16</sup>. 이는 연간선량률에 영향을 주는 방사선의 최대 비정(range) 범위에서 매질이 균일할 경우, 단위 질량 당 에너지 흡수비(absorption rate)는 에너지 보존법칙에 의해서 단위 질량 당 에너지 방출비(emission rate)와 같다는 무한매질(infinite matrix) 가정을 기초로 한다.

방사성 동위원소의 농도는 주로 원소분석, 중성자방사화 분석(neutron activation analysis, NAA), 감마선 분광분석 등을 통해 구해지고, 각각의 분석을 통해 얻어진 값들로부터 계산된 연간선량률은 오차범위 내에서 서로 잘 일치됨<sup>17</sup>이 보고되었다. 그러므로 이 연구에서 연간선량률은 시료의 양이 적어 감마선 분광분석이 어려운 토기시료의 경우 원소분석을 통하여 방사성 동위원소의



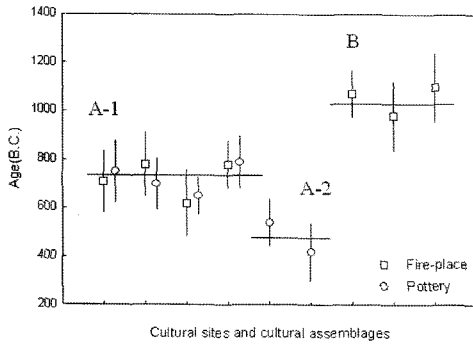


Fig. 8. Plot of ages versus cultural sites and cultural assemblages: 'A-1' is of Youksam-Dong & Heunam-Ri cultural assemblage in Myungam-Ri cultural site and 'A-2' is of a dwelling site of the Songkuk-Ri style in the same place. Also 'B' is of Karak-Dong cultural assemblage in Sayang-Ri cultural site. In A-1, the fire-place's ages have a good agreement with potteries. Almost the ages of each cultural assemblages are similar.

밀도를 구하였고, 시료채취 주변의 토양은 채집된 시료 주위 30cm 이내에서 등방성(homogeneity)을 유지한 토양을 채취하여 감마선 분광분석을 하였다. Table 2에 인용된 전체 연간선량은 베타, 감마 연간선량을 값과 우주선에 의한 연간선량을 값을 합산한 것이다. 실험실에서 석영을 불산으로 한 시간 정도 처리하여 표층을 약 10 $\mu$ m정도 에칭(etching)시켰기 때문에 알파입자에 의한 연간선량은 전체 연간선량 계산에서 고려하지 않았다. 우주선량(cosmic ray)은 0.15 mGy/yr로 추정하였으며<sup>16</sup> 최종적인 연간선량은 시료의 수분 함량에 대한 보정과 불산의 에칭으로 손실된 선량을 고려하여 결정되었다<sup>19</sup>.

이 연구에서는 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP/MS: PQ3 model, Thermo Elemental Ltd.)와 유도결합 플라즈마 분광분석기(ICP/AES: SHI-MADZU ICPS-1000III)에 의한 원소분석과 감마선 분석기(GCW3523-7915-30/ULB well-type HPGe detector, Canberra Ltd.)를 이용하여 방사성 동위원소의 농도를 구하였다.

### 4.3. 연대 결정

단일시료 재현법과 플래토우 테스트를 통하여 얻어진 자연축적선량과 원소분석, 감마선 분석으로부터 산출된 연간선량을 식(8)에 대입하여 연대를 결정하였다

(Table 2). 모든 시료들의 연대는 5% 이내의 작은 오차를 보였으며, 이는 토기를 포함한 화덕자리 시료들이 광 여기 루미네선스 연대측정에 매우 적합한 시료임을 의미한다. 또한 화덕자리 시료의 경우에도 토기 시료처럼 기존의 열 루미네선스를 모두 잃어버릴 정도의 높은 온도의 열에 의해 일정기간 동안 사용된 후 폐기·퇴적되었음을 알 수 있었다.

아산 명암리 유적의 역삼동·혼암리 유형(A-1) 주거지 내에서 채취된 화덕자리 시료들과 이에 대응되는 토기시료들의 연대는 Fig. 8에서 보듯이 오차 범위에서 정확하게 일치하며 서로 비슷한 범위 내에 있음을 알 수 있었다. 동일한 유적에서 발굴·조사된 송국리형 주거지(A-2)로부터 채취한 토기 시료의 연대는 역삼동·혼암리 유형의 연대보다 낮은 경향을 보인다. 또한 진천 사양리 유적의 가락동 유형(B) 주거지 내 화덕자리 시료의 연대들도 서로 비슷한 범위를 갖음을 알 수 있었다.

## 5. 결론

한국 중부지역 청동기시대 전기는 석기시대에서 금속기시대로의 기술적 발달과 토기상의 변화, 사회체계의 진보 등의 요인과 지역적 편재현상을 보이는 송국리 유형의 존재 등으로 인한 편년설정에 어려움이 존재한다. 일반적으로 수용되는 전기의 범위는 선동검기의 가락동 유형과 역삼동·혼암리 유형 등이며, 이 연구에서는 최근 발굴·조사된 아산 명암리 유적과 진천 사양리 유적에서 시료를 채취하여 연대측정을 실시하였다.

연대측정에 사용된 시료는 주로 화덕자리 시료였으며 산출된 연대의 오차 범위로 보아 광 여기 루미네선스 연대측정법에 매우 적합한 시료였다. 또한 토기시료의 연대 및 오차 범위와 정확히 일치함을 알 수 있었다. 이는 토기의 연대측정 뿐만 아니라 각 유형을 대표하는 주거지 자체에 대한 연대측정도 가능함을 의미한다. 그러므로 한 주거지 내에서 여러 유형의 토기상이 공반되어 발굴되는 고고학 유적의 경우에도 보다 정확한 편년설정이 시도되어질 수 있다.

아산 명암리 유적에서 발굴·조사된 역삼동·혼암리 유형과 송국리형 주거지의 연대측정 결과 이들 사이에 시간적 선후관계가 존재함을 알 수 있었다. 주거지 내 화

덕자리가 존재하지 않는 송국리형 주거지의 기능과 이러한 시간적 선후관계의 고고학적 의미에 대한 고찰이 필요하다. 또한 친전 사양리 유적에서 발굴·조사된 가락동 유형은 토기를 비롯한 유물상으로 보아 혼암리 유형의 구순각목토기 등이 추가된 시기와 비슷한 시기(용정동 7호 주거지, 전기 후기(後期))의 유적으로 보고되었으나, 화덕자리 시료에 대한 광 여기 루미네선스 연대 측정 결과 서로 일치하지 않았으며 이러한 차이에 대한 학제간 토의가 요구되어진다.

### 감사의 글

아산 명암리 유적은 충남대학교 박물관과 충청문화재 연구원이 발굴·조사한 유적이고 친전 사양리 유적은 중앙문화재연구원이 발굴·조사한 유적이다. 광 여기 루미네선스 연대측정 연구를 위한 시료의 제공과 상세한 고고학적 조언에 감사드린다. 이 연구는 강원대학교 기초과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었다.

### 참고문헌

- 1) 朴淳發, "欣岩里類型 形成過程 再檢討", *湖西考古學*, 創刊號, 81, (1999).
- 2) 朴淳發, "南韓地方 農耕文化形成期 聚落的 構造와 變化에 대하여", 제 25회 한국고고학전국대회 발표요지, (2001).
- 3) 金壯錫, "혼암리 유형의 재고:기원과 연대", *嶺南考古學*, 28, (2001).
- 4) 李亨源, *韓國 青銅器時代 前期 中部地方 無文土器 編年研究*, 석사학위논문, 충남대학교, (2002).
- 5) R.M. Bailey, B.W. Smith, E.J. Rhodes, "Partial bleaching and the decay form characteristic of quartz OSL", *Radiat. Meas.*, 27, 123-136 (1997).
- 6) M.J. Aitken, *Thermoluminescence dating*, Academic Press, (1985).
- 7) M.J. Aitken, *An introduction to optical dating*, Oxford University Press, (1998).
- 8) 홍덕균, 최만식, 한정희, 최정현, 정창식, "적외선여

- 기 루미네선스를 이용한 조간대 퇴적층의 연대추정", *Jour. of the Kor. Soc. of Oceanography*, 7, 1-7, (2002).
- 9) G.A.T. Duller, "Equivalent dose determination of single aliquots", *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, 18, 371-378, (1991).
- 10) 충남대학교박물관, *아산 명암리 유적, 현장설명회보고서*, (2001).
- 11) 중앙문화재연구원, *鎭川 思陽里 遺蹟, 발굴조사보고서*, (2001).
- 12) S.J. Fleming, "Thermoluminescence dating: refinement of the quartz inclusion method", *Archaeometry*, 12, 133-147, (1970).
- 13) N.A. Spooner, M.A. Aitken, B.W. Smith, M. Franks, C. McElroy, "Archaeological dating by infrared stimulated luminescence using a diode array", *Radiation Protection Dosimetry*, 34, 83-86, (1990).
- 14) L. Botter-Jenson, E. Bulur, G.A.T. Duller, A.S. Murray, "Advances in luminescence systems", *Radiat. Meas.*, 32, 523-528, (2000).
- 15) A.S. Murray, A.G. Wintle, "Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol", *Radiat. Meas.*, 32, 57-73, (2000).
- 16) K.S.V. Nambi, M.J. Aitken, "Annual dose conversion factors for TL and ESR dating", *Archaeometry*, 28, 202-205, (1986).
- 17) 홍덕균, 최정현, 한정희, 최만식, 정창식, "광 여기 루미네선스를 이용한 신기 퇴적층의 연대측정", *Jour. Petrol. Soc. Korea*, 10, 202-211, (2001).
- 18) J.R. Prescott, L.G. Stephan, "Contribution of cosmic radiation to environmental dose", *PACT*, 8, 205-213, (1982).
- 19) J. Zimmerman, "The radiation-induced increase of thermoluminescence sensitivity of fired quartz", *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 4, 3277-3291, (1971).