

## OSL 연대측정법의 고고학적 적용

양동윤<sup>1\*</sup>, 김주용<sup>1</sup>, 신숙정<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 제4기질환경연구팀

<sup>2</sup>연세대학교 원주박물관

## Applications of OSL method in Archeology

Dong-Yoon Yang<sup>1\*</sup>, Ju-Yong Kim<sup>1</sup>, Sook-Chung Shin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Quaternary Geology and Environment Research Team, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

<sup>2</sup>Wonju Museum of Yonsei University

**요약:** 1896년 Becquerel에 의해 우라늄의 방사능이 발견된 후, 방사붕괴 원리를 이용한 수많은 연대측정법이 개발되었고, 분석기기도 정밀화되면서 그 정확도도 날로 높아지고 있다. 방사성동위원소 연대측정법 중에서 <sup>14</sup>C 측정분야는 고고학에 있어서 최적의 연대측정법으로서 고고학 발전에 많은 도움이 되어왔다. 그러나 <sup>14</sup>C 측정법에 이용되는 유기물을 포함하는 시료가 문화층에 존재하지 않는 경우도 있어 다른 연대측정법이 필요하다. 이러한 문제의 해결을 위해 현재 OSL연대측정법 (Optically Stimulated Luminescence dating method) 이 고고학 분야에서 자주 응용되고 있다. 본 연구 목적은 OSL의 고고학적 적용을 위한 시료채취와 적용상 문제점 등에 대해 검토하는데 있다.

**주요어:** OSL 연대측정법, 고고학

**Abstract:** Since the radioactivity of U was discovered by Becquerel in 1896, a number of radiometric dating techniques based on radioactive decay have been developed with the help of precise and accurate instruments. Among them, radiocarbon dating was introduced as the most effective method in archeology in Korea. However, though the radiocarbon methods have contributed greatly to the development of archeology in Korea, it is limited to organics in a matrix of soil and sediment, including organic carbon, charcoal, bone and so on. If there are no organics in some paleolithic sites, other methods are required for dating. Therefore, we introduced OSL (Optically Stimulated Luminescence) dating method in this paper. The method is mainly based on quartz grains or other particles. The aim of this paper is to discuss about sampling method and the limitation of its application in archeology.

**Key Words:** Optically stimulated luminescence dating method, Archeology

### 1. 서 론

지구과학이나 고고학에 있어서 개개의 현상이 발생한 시점으로서의 연대값은 매우 중요한 기본적 데이터이다. 이러한 연대값을 근거로 하여

\* Corresponding author: Dong-Yoon Yang, Tel. 042-868-3031, E-mail. ydy@kigam.re.kr

지구 및 인류의 진화 등을 탐구할 수 있기 때문이다.

과학적인 절대연대측정법이 개발된 계기는 1896년 Becquerel에 의해 우라늄의 방사능이 발견된 사건으로 볼 수 있다. 그 후 1906년 U-He의 정량을 이용한 연대측정법을 시작으로 수많은 연대측정법이 개발되었고, 계속기기도 정밀화되면서 그 신뢰성은 날로 높아지고 있다고 볼 수 있다.

고고학분야에서는 20세기 초반까지만 하더라도 형식학적 방법, 순서배열법, 교차연대법 등의 상대연대결정법에 의존하여 오다가, 1950년대 이후에 방사선 연대측정법 등의 자연과학적 방법이 적용되기 시작하면서 급속한 학문의 발전이 이뤄졌다고 봐도 과언이 아니다. 지질학분야에서도 절대연대 결정법이 나오기 전까지는 지질 편년법, 빙하점토층 편년법 및 화분학 등의 다양한 상대연대 결정법에 의존해 왔다.

지질학분야에서 주로 이용하는 다양한 방사성 동위원소 연대측정법 중에서  $^{14}\text{C}$ 법은 역사학 및 고고학 분야에 있어서도 최적의 연대측정법으로 알려지면서 고고학분야에 도입되었고 이를 이용한 매우 활발한 연구가 수행되어 왔다. 그러나  $^{14}\text{C}$ 법에 이용되는 시료는 유기물에 제한되므로 문화층에 유기물이 존재하지 않는 경우에는 다른 방법으로 연대측정이 이뤄져야 한다. 이 밖에도 여러 가지 연대측정법이 개발되어 왔지만 사용범위가 제한적이거나 오차가 크다는 이유로 크게 각광을 받지 못했다. 따라서 연대측정 대상물질이 어디에나 흔히 존재하고 정밀도가 보장되는 연대측정법이 있다면 활용범위가 매우 커질 것이다. 이러한 의미에서 여기에서는 OSL (Optically Stimulated Luminescence dating method)을 소개하고 고고학 분야에서의 적용성에 대해 토론해 보고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 연대측정법의 소개

표 1에서처럼, 많이 이용되고 있는 주요 연대결정법을 절대연대측정법과 상대연대측정법으로 나누어 분류할 수 있다(兼岡一郎, 1998). 이처럼 여러 가지 원리를 이용한 연대측정 방법들이 개발되어 왔는데, 절대연대측정법은 크게 나누어 물리적 원리에 의한 방법, 화학적 원리에 의한 방법, 전지구 공통으로 발생한 현상의 연대변화를 구하고 그 연대교정곡선을 이용하는 방법들을 들 수 있다. 물리적 원리에 의한 방법으로는, 방사성 핵종의 방사붕괴를 이용하는 방법, 우주선 조사 및 광물 중의 방사성동위원소로부터의 방사선 조사에 의한 핵반응생성물을 이용하는 방법 등이 있다. 또한 화학적 원리에 기인한 방

**Table 1.** Classification of age dating methods (modified from Kaneoka, 1998).

<b>Absolute chronology</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Radiometric methods                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Isotope age</li> <li>- Decay age of nuclide produced by cosmic radiation</li> <li>- Disequilibrium methods of uranium series decay</li> <li>- Damage age induced by radiation</li> <li>- Chronology applying cosmic irradiation</li> </ul> </li> <li>2. Chronology applying chemical reaction</li> <li>3. Chronology applying astronomical phenomena</li> <li>4. Dendrochronology and varve chronology</li> </ol>
<b>Relative chronology</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Geological chronology</li> <li>2. Fossil chronology</li> <li>3. Microfossil chronology</li> <li>4. Palaeomagnetism</li> <li>5. Tephrochronology</li> <li>6. Chronology applying isotopic stratigraphy</li> </ol>

법으로는, 어떤 환경 하에서 진행되는 화학반응을 이용하여 그 생성량에서 연대를 구하는 방법 등이 해당된다. 한편 연대교정곡선을 이용한 절대 연대 측정법은 고지자기 층서 및  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  등의 동위체비의 변화를 이용하는 방법이 이에 해당한다(배기동, 2003).

## 2.2 절대연대 측정법의 소개

현재, 절대연대 측정법 중에서 가장 신뢰성이 높은 연대 측정법은 방사붕괴를 이용하는 방법이라 할 수 있다. 표 1에서처럼 다양한 측정 방법들이 있으며, 각각은 서로 다른 가정설정이 필요하고, 서로 다른 시료선택 및 서로 다른 연대 측정 범위를 가진다. 각 방법의 차이점은 각 연대 변화를 발생시키는 현상 중 서로 다른 특징을 시계로써 이용하는 것이다.

모핵종과 딸핵종의 수량비를 연대변화의 함수로 이용하는 방법을 표 2에 나타내었다. 대부분의 방법들은 비교적 오래된 지질연대를 측정하고자 할 때 주로 이용되고 있으나, 그 중 K-Ar 법은 측정방법의 개선으로 비교적 젊은 연대까지 측정이 되고 있다. 기반암이 현무암으로 이뤄진 전곡리 유적지의 연대를 추정하는데 이 방법이 이용되었다.

우주선에 의해 생성되는 핵종을 이용하는 대표적인 방법이  $^{14}\text{C}$ 을 이용하는 방법이다. 여기에 이용되는  $^{14}\text{C}$ 은 우주선에 의해 대기중의  $^{14}\text{N}$ 으로부터 만들어진 것이다. 생물 등이 호흡이나 먹이를 통해  $^{14}\text{C}$ 을 흡수하고 죽게 되면 이의 유입은 멈추고 붕괴만 발생하는 점을 이용하여 연대를 측정한다.  $^{10}\text{Be}$ 이나  $^{26}\text{Al}$  등을 이용한 연대 측정 방법이 최근에 이뤄지고 있으나 검증과정을 거쳐

**Table 2.** Age dating method using the ratio of parent nuclide and daughter nuclide (Kaneoka, 1998).

Method	P	D	Ds	(D/Ds)	Decay type	Half life (years)
K-Ar(Ar-Ar)	$^{40}\text{K}$	$^{40}\text{Ar}$	$^{36}\text{Ar}$	$=295.5$	Electron capture (EC)	$1.25 \times 10^9$
Rb-Sr	$^{87}\text{Rb}$	$^{87}\text{Sr}$	$^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$	$\beta^-$	$4.88 \times 10^{10}$
U-Pb(Pb-Pb)	$^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}$	$^{204}\text{Pb}$	$(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_0$	$\alpha, \beta^-$	$4.47 \times 10^9$
Th-Pb	$^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}$	$^{204}\text{Pb}$	$(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_0$	$\alpha, \beta^-$	$7.04 \times 10^8$
Th-Pb	$^{232}\text{Th}$	$^{206}\text{Pb}$	$^{204}\text{Pb}$	$(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_0$	$\alpha, \beta^-$	$1.40 \times 10^{10}$
Sm-Nd	$^{147}\text{Sm}$	$^{143}\text{Nd}$	$^{144}\text{Nd}$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_0$	$\alpha$	$1.06 \times 10^{11}$
Lu-Hf	$^{176}\text{Lu}$	$^{176}\text{Hf}$	$^{177}\text{Hf}$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_0$	$\beta^-$	$3.57 \times 10^{10}$
La-Ce	$^{138}\text{La}$	$^{138}\text{Ce}$	$^{142}\text{Ce}$	$(^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce})_0$	$\beta^-$	$9.87 \times 10^{10}$
La-Ba	$^{138}\text{La}$	$^{138}\text{Ba}$	$^{137}\text{Ba}$	$(^{138}\text{Ba}/^{137}\text{Ba})_0$	Electron capture (EC)	
Re-Os	$^{187}\text{Re}$	$^{187}\text{Os}$	$^{186}\text{Os}$	$(^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os})_0$	$\beta^-$	$4.23 \times 10^{10}$

\* P; parent nuclide, D; daughter nuclide, Ds; stable isotope of daughter nuclide.

**Table 3.** Decay age of nuclide produced by cosmic radiation (Kaneoka, 1998).

Methods	P	P <sub>0</sub>	Nuclides after decay	Half life(years)
<sup>14</sup> C	<sup>14</sup> C	<sup>14</sup> C is constant in the atmosphere	<sup>14</sup> N	$5.73 \times 10^3$
<sup>10</sup> Be	<sup>10</sup> Be	<sup>10</sup> Be is constant in production rate	<sup>10</sup> B	$1.51 \times 10^6$
<sup>26</sup> Al	<sup>26</sup> Al	<sup>26</sup> Al is constant in production rate	<sup>26</sup> Mg	$7.16 \times 10^5$
<sup>3</sup> H	<sup>3</sup> H	<sup>3</sup> H is constant in the atmosphere	<sup>3</sup> He	$1.24 \times 10$
<sup>32</sup> Si	<sup>32</sup> Si	<sup>32</sup> Si is constant in production rate	<sup>32</sup> P → <sup>32</sup> S (β decay 14.3d)	$1.05 \times 10^2$
<sup>36</sup> Cl	<sup>36</sup> Cl	<sup>36</sup> Cl is constant in production rate	<sup>36</sup> Ar	$3.01 \times 10^5$
<sup>41</sup> Ca	<sup>41</sup> Ca	<sup>41</sup> Ca is constant in production rate	<sup>41</sup> K	$1.03 \times 10^5$
<sup>53</sup> Mn	<sup>53</sup> Mn	<sup>53</sup> Mn is constant in production rate	<sup>53</sup> Cr	$3.7 \times 10^6$
<sup>129</sup> I	<sup>129</sup> I	<sup>129</sup> I is constant in production rate	<sup>129</sup> Xe	$1.57 \times 10^7$
<sup>39</sup> Ar	<sup>39</sup> Ar	<sup>39</sup> Ar is constant in production rate	<sup>39</sup> K	$2.69 \times 10^2$
<sup>81</sup> Kr	<sup>81</sup> Kr	<sup>81</sup> Kr is constant in production rate	<sup>81</sup> Br	$2.13 \times 10^5$

**Table 4.** Damage age induced by radiation (Kaneoka, 1998).

Method	Principles	Half life of related nuclides (years)
FT(fission track)	The number of tracks, produced during spontaneous fission of <sup>238</sup> U, a function of both uranium content and time.	Spontaneous fission of <sup>238</sup> U : $(0.8-1) \times 10^{16}$
TL (Thermoluminescence)	The number of captured electrons stimulated by the energy of the decay radioactive nuclides is a function of time. Measuring the phenomenon of thermoluminescence by heating.	<sup>238</sup> U: $4.47 \times 10^9$ <sup>235</sup> U: $7.04 \times 10^8$ <sup>232</sup> Th: $1.41 \times 10^{10}$ <sup>40</sup> K: $1.25 \times 10^9$
ESR (Electron spin resonance)	The relative amounts induced energy states in electrons of produced by the rupturing of electron bonding during radioactive decay is a function of time. The amounts are measured by ESR	The same as those of TL

높은 신뢰성을 얻기까지는 앞으로 시간이 걸릴 것으로 예상된다.

방사성 핵종이 에너지가 큰 방사선을 방출할 경우, 그로 인해 주위에 여러 유형의 방사성 손상을 입히게 된다. 이러한 방사성 손상이 발생하는 비율이 연대의 함수가 되는 원리를 이용한 연대 측정법을 표 4에 나타낸다. 그 중에서도 루미네선스에 의한 방법은 다음 절에서 그 원리 및 방법 등에 대해 좀 더 자세히 기술하고자 한다.

위에서, 방사붕괴를 이용한 다양한 연대 측정 방법을 소개하였다. 이러한 측정방법들은 각 방법의 특징을 살려 지질연대 측정에 다양한 형태로 유용하게 이용되고 있다. 그러나 제4기동안의 비교적 짧은 연대를 측정하고자 하면, 상당히 선택의 폭이 좁아진다(그림 1). 더욱이 흔히 최근에 발굴되고 있는 유적지는 수 만년 이내의 연대를 갖는 것이 대부분이므로 연대 측정 시료로 이용하는 대상물질을 고려한다면 선택의 폭은 더욱 좁아져, 경우에 따라서는 마땅한 연대 측정법을 선택하기 어려워진다.

### 2.3 루미네선스를 이용한 연대 측정

위에서 언급한 것처럼, 매우 다양한 연대 측정법이 있음에도 불구하고 실제 고고학 분야에 연대 측정법을 적용하려고 하면 적절한 연대 측정법을 선택하기 어려워진다. 따라서 연대 측정 재료가 어디에나 흔히 존재하고 정밀도가 보장되는 연대 측정법이 있다면 고고학 분야에서의 활용범위가 매우 커질 것이다. 이러한 의미에서 여기에서는 OSL 연대 측정법(Optically Stimulated Luminescence dating method)을 소개하고자 한다.

많은 광물은 열을 가하면 스스로 빛을 내는 현상을 볼 수 있다. 그 중에서도 형석에 불을 지피면 육안으로도 쉽게 알 수 있을 정도로 강한 청백색의 빛을 낸다. 이를 열루미네선스(TL; Thermoluminescence)라 한다. TL 현상은 고대에서부터 알려져 있었지만 문헌기록에 의하면 17세기에 Robert Boyle이 다이아몬드의 발광을 본 것이 처음이라고 전해진다 (Aiken & Fleming, 1972). 이러한 현상에 대해 방사선을 이용하여 과학적으로 연구하기 시작한 것은,

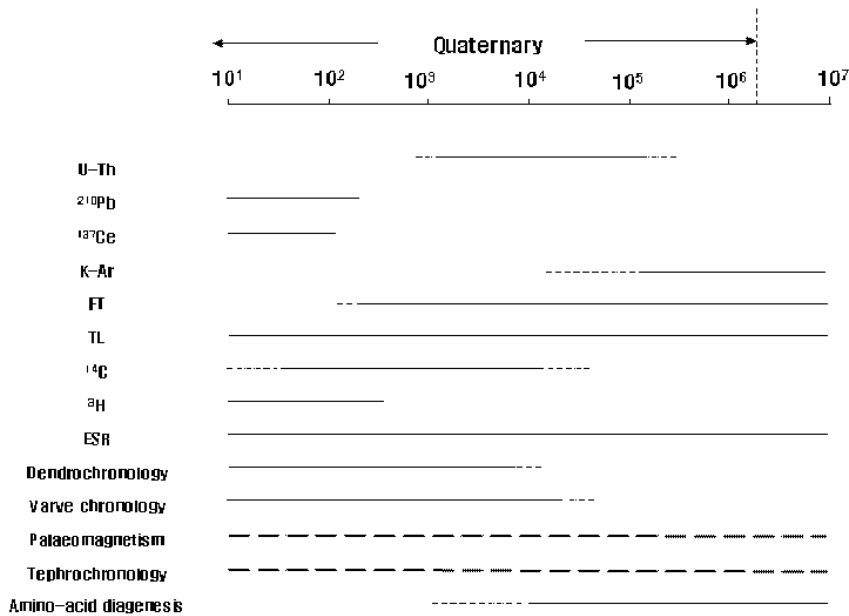


Fig. 1. Age ranges of the various dating methods. Dotted lines show possible extensions with improvements in techniques; dashed lines indicate that is limited to specific intervals within the Quaternary time scale (Modified from Lowe & Walker(1983)).

전자선 및 X 선이 발견된 19세기 이후이다. TL 현상은, 방사선에 대해서도 민감하고 정량적 방사선량 측정이 간편하기 때문에, 핵무기가 사용되었던 세계2차대전 이후에는 광범위하게 연구되어 왔다.

Daniel *et al.*(1953)은 자연방사선 측정량을 측정함으로써 연대측정이 가능하다는 것을 최초로 생각해 내었고, 3,000 개 이상의 광물을 대상으로 TL 현상을 연구한 결과, 지질학적 응용으로써의 연대측정 가능성을 시사하였다. TL 강도는 광물이 흡수한 방사선량에 비례하기 때문에 일반적으로 발광량이 많을수록 광물의 연대는 오래된 것이다. 1960년대에 Kennedy and Knopff(1960)는 고대 그리스 토기에 TL을 적용하여 연대를 결정하였다. 그 후, 이러한 측정 방법은 일시적으로 소강상태에 들어갔으나, Higashimura *et al.*(1963)이 기와를 대상으로 히로시마 원자폭탄 투하로 인한 방사선량 측정에 성공하였다. 이는 기와의 석영과 장석을 골라내어 측정한 것이 성공의 원인이었고, 토기에 대한 연대측정도 1963년에 성공적으로 이뤄졌다(Ichikawa, 1963). 그 후, 옥스퍼드대학 고고미술연구소의 Fleming은 Ichikawa에 의한 방법을 개선하여 석영 조립자법에 의한 연대측정방법을 확립하였다(Fleming, 1970). 그 외에 동연구소의 연구팀에 의해 미립자법(Zimmerman, 1971), 슬라이스법(Götsu *et al.* 1974) 등의 TL 연대측정법이 확립되었다.

TL 법이 토기, 태워진 암석, 테프라 등 가열되었던 광물을 시료로 한 것에 반하여, 최근, loess 등의 연대측정에는 열 대신 빛으로 발광시키는 광발광(또는 광여기(光勵起) 발광 : OSL; Optically Stimulated Luminescence) 현상이 연대측정에 이용될 수 있다는 연구가 많이 이뤄졌다(Ugumori and Ikeya, 1980; Huntly *et al.*, 1985). OSL 법은 유적지 문화층의 거의 대부분의 퇴적물 연대측정에 적용할 수 있다. OSL 연대측정법이 확립되면 고고학 및 지질학

등에서의 응용범위는 비약적으로 넓어질 것이다.

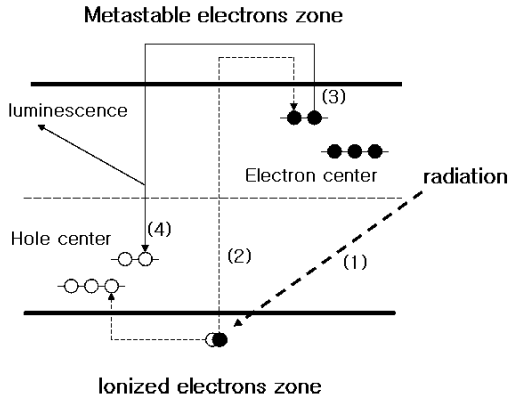
여기에서 長友恒人(1999)의 저서내용을 주로 인용하여 측정원리를 소개한다. 우리는 자연방사선 속에서 생활하고 있다. 자연방사선은 (1) 우라늄 (U), 토륨 (Th) 의 붕괴계열을 구성하는 방사성 동위원소, (2) 수명이 긴 칼륨-40 (K-40) 및 루비듐-87 (Rb-87) 등의 방사성 동위원소, (3) 우주선, (4) 탄소-14 (C-14) 와 같은 우주선에 의해 생성되는 방사성 동위원소에 의해 발생한다. 그 중에서 발광연대측정에 있어 중요한 것은 C-14를 제외한 모든 자연방사선이다.

자연방사선의 종류는 알파선( $\alpha$ 선), 베타선( $\beta$ 선), 감마선( $\gamma$ 선)과 우주선이다.  $\alpha$ 선,  $\beta$ 선,  $\gamma$ 선은 각각 He의 원자핵, 전자, 단파장 전자파이고, 이들은 물질 중에서의 투과도 및 발광에 기여하는 성질이 다르다. 지상에 방사되는 우주선의 발광에 관한 성질은 전체적으로는  $\gamma$ 선과 같다. 왜냐하면 물질 내에서의 투과력이  $\alpha$ 선은 얇은 종이 한 장도 투과하지 못하며,  $\beta$ 선은 수 mm 이내인 반면에  $\gamma$ 선은 수십 cm에 이르기 때문이다(長友恒人, 1999). 발광효율(같은 방사선량으로 발생하는 발광량)은 연대측정에서 매우 중요한데,  $\alpha$ 선은  $\beta$ 선과  $\gamma$ 선 발광효율의 15-20%에 해당된다.

발광연대측정에 이용되는 광물은 발광강도가 좋을 뿐만 아니라 결정구조가 견고하여야 하고, 발광강도가 흡수한 방사선량에 비례하는 것이 좋다. 이러한 측면에서 볼 때, 적절한 시료는 석영이고 다음이 장석이며, 형석이나 방해석, 아라곤나이트 등은 불안정하여 발광연대측정에는 부적절하다.

에너지 상으로 격자 근방을 가전자대(價電子帶), 격자와 격자 사이를 전도대(傳導帶)로 부른다. 천연의 석영은 이상적인 순수한 결정은 없고, Al이나 Ge이 Si를 치환하거나 O가 결손된 격자 결함이 있어서 가전자대와 전도대 사이에 전자가 존 안정적으로 머무는 에너지 영역(禁止帶)이 형

성되어 전자포획중심(電子捕獲中心, electron center 또는 electron trap)과 정공포획중심(正孔捕獲中心, hole center 또는 hole trap)이 형성되어 있다. 이러한 모델을 에너지 다이어그램 또는 에너지 밴드 모델이라고 한다(그림 2).



**Fig. 2.** Energy diagram of crystal and luminescence; (1) Formation of electrons and holes by radiation (2) Electrons and holes capturing in the center, (3) Stimulated by heat or light, (4) recombination of electrons and holes (Nagatomo, 1999).

광물이 자연방사선을 흡수하면 결정중의 가전자대에서 전자대와 정공(hole)대가 형성되고, 전자는 가전자대에서 여기(勵起)된 후, 전자포획중심에, 정공은 정공포획중심에 각각 포획된다. 포획된 전자는 전자포획중심에 머무는데, 그 수명은 전자포획중심의 성질에 따라 초 단위 것에서 1,000만년 단위의 것까지 다르게 나타난다. 연대측정에서는 장수명의 전자포획중심에 포획된 전자 발광을 이용하고 오래된 것일수록 포획된 전자의 수가 많다.

결정에 여기에너지를 가하면 전자포획중심에 포획되어 있던 전자는 전도대를 경유하여 정공포획중심에 재결합하면서 발광하게 된다. 발광현상은 여기에너지의 부여방법에 따라 열발광, 광발광, 기계자극발광, 화학발광 등으로 나뉘는데, 연대측정에 이용되는 것은 열발광과 광발광이다.

열이나 빛의 여기에너지를 받아 발광한 광물은 원래의 에너지 상태로 되돌아가고, 다시 열이나 빛 에너지를 가해도 발광하지 않는다. 이처럼 인위적 또는 자연현상에 의해 가열되거나 또는 빛에 노출되어 발광이 발생하고 원래의 에너지로 돌아온 상태를 타임제로잉(time zeroing) 또는 제로잉(zeroing)이라 한다. 토기, 탄 암석, 탄 흙 등은 과거의 인위적 가열에 의해, 테프라는 화산 분화에 의해, 황토(loess) 등의 퇴적물은 각각 태양광에 노출되어 제로잉되었다. 연대측정을 그러한 제로잉 이벤트에서 현재까지의 시간을 재는 타이머라고 한다면, 제로잉은 각각의 이벤트에 의해 타이머를 리셋팅(resetting) 하는 것에 해당한다.

광물의 발광강도는 흡수한 방사선량에 비례하므로 광물에 쏘인 방사선 환경이 변하지 않았다면, 광물의 발광강도는 과거 제로잉된 이후의 연대에 비례하게 된다.

일반적으로 “연간선량이 일정”하다는 조건은 만족시키지만, 지하수가 장기간에 걸쳐 변동하였거나 수몰되어 함수율의 변화가 컸다고 한다면 이는 무시할 수 없다. 연간선량에 영향을 주는 우주선 비율은 높지 않으므로 우주선 강도의 변화에 따른 영향은 무시해도 된다.

연간선량(Dose rate) × 연대 = 자연축적선량(Equivalent dose)이므로, 발광연대는 자연축적선량을 연간선량으로 나누면 얻어진다.

### 3. 토론 및 결론

지질학분야에서 주로 이용하는 방사성동위원소 연대측정법은 매우 다양하다. 이러한 여러 방법은 방사성동위원소의 반감기에 따라 결정할 수 있는 연대의 범위도 차이를 보이고 연대측정 재료에도 차이가 있으므로 연대측정 목적에 따라 선택을 달리 해야 한다. 즉, 100만년 이상의 연대측정에는 Ru/Sr법과 U/Pb법이 있으며 Ru/Sr법은 주로 화강암의 연대측정에, U/Pb법은

화강암을 포함한 다양한 암석의 연대측정에 이용된다. K/Ar법은 보통 10만년 이상의 연대측정에 이용되며 현무암의 전암 시료, 화성암 및 변성암 중의 각섬석 등이 측정재료로 쓰인다. Th/Ra법은 40만년 이하의 연대측정에 이용되며 주로 산호초와 석회동굴의 동굴생성물을 대상으로 연대를 측정한다. 이러한 연대측정법들은 고고학분야 등과 같이 수 만년 이내의 비교적 짧은 연대를 많이 다루는 학문분야에서는 일부를 제외하면 적용하기가 어렵다.

이러한 의미에서 볼 때, 지질학분야에서 이용하고 있는 방사성동위원소 연대측정법 중에서,  $^{14}\text{C}$ 법은 5-6만년 이하의 연대측정에 이용되므로, 호소퇴적물이나 심해퇴적물 등을 이용한 지구환경변화 연구 분야뿐만 아니라 역사학 및 고고학 분야에 있어서도 최적의 연대측정법으로 알려지면서 고고학분야에 도입되었고 이를 이용한 연구가 매우 활발히 수행되어 왔다. 그 이유를 든다면, 연대측정 대상이 생물체를 구성하는 주요원소인 탄소이므로 지구상에 넓게 분포하여 적용되는 시료 종류가 다양하다는 점, 다른 방법에 비교하여 측정정도가 높고, 더구나 가속기질량분석계를 이용하면 상대 오차가 0.5%의 정도로 측정이 가능하여 10,000년에 대한 오차는 50년 정도라는 점 등이다.

그럼에도 불구하고 고고학분야의 문화층 연대를 결정할 때 어려움에 봉착하는 일이 많다. 즉,  $^{14}\text{C}$ 법을 이용하여 연대를 측정하려면 반드시 유기물 탄소가 존재하여야 하는데, 많은 경우에 연대측정이 필요한 문화층이나 지층에 유기물탄소가 보존되어 있지 않다는데 문제가 있다. 다른 하나는 유기물이 많이 보존되어 있어도 퇴적물의 이동이 활발한 지역에서는 유기물이 다른 곳에서 이동되어 와서 쌓이는 일이 있고, 이때는  $^{14}\text{C}$  연대측정 결과가 하위층에서 상위층보다 짧게 나오는 경우도 발생하기 때문이다.

따라서 연대측정이 가능한 재료가 문화층을 포함한 어느 지층이나 보편적으로 포함되어 있

고 비교적 짧은 연대까지 측정 가능한 방법이 개발되면  $^{14}\text{C}$  연대측정법과 상호 보완적으로 이용할 수 있어 이상적이라 할 수 있을 것이다. 그러한 의미에서 루미네선스연대측정법 중 OSL법은 최근에 크게 주목받고 있는 방법 중의 하나이다.

루미네선스연대측정법 중, 석영조립자법에 의한 TL측정에서는, 측정시료의 조건에 따라 짧은 시료에서는 70년(기와), 오래된 시료에서는 80만년(테프라)까지 측정이 가능하다(長友恒人(1999)). 측정에는 석영이 매우 적절하지만, (1) 석영이 다른 광물과 완전분리가 가능하고, (2) 제로잉(zeroing)이 완전하며, (3) 현장에서 연간선량 측정이 가능하고, (4) 지하수변동 등 매물환경의 변화가 없는 조건 등이 만족되면 100만년을 넘는 연대 측정도 가능하다.

미립자법에 의한 연대측정은 광물 종을 선택하지 않으므로 적용연대를 명확히 하기는 어렵지만 유기물과 탄산염광물을 제외한 모든 광물의 발광을 동시에 측정하므로 포화가 低선량에서 시작되는 경향이 있다. 경험적으로는 30만년 보다 짧은 시료에 적용 가능하다.

OSL 연대측정법은 1980년대에 들어와 본격적으로 연구되기 시작하였기 때문에, TL법에 비해 적용사례가 많지 않다. 그러나 단일시료재현법 (Single aliquot regenerative dose법)이 Murray와 Wintle(2000)에 의해 제안된 후, 풍성, 하성, 해성 등 다양한 환경에서 퇴적된 지층의 연대측정에 이용되고 있으며 그 신뢰성이 높아지고 있다. 국내에서는 정창식(2002)이 해안단구에의 적용가능성을 소개한 바 있다. 최근에 고해빈층, 하성퇴적층, 풍성퇴적층에 대한 연대측정 예들을 국내에서는 최형원 등(2004)과 홍덕균 등(2002)이, 국외에서는 Kemp 등(2003), Owen 등(2002)과 Goedicke(2003)가 소개한 바 있다. 이들에서 OSL법을 이용한 연대측정이 수백 년에서 수십만 년까지 이뤄진 것으로 소개되었으며, 조건이 갖추어지면



젊은 시료로는 수십 년에서 오래된 시료로는 수백만 년까지 측정이 가능할 것으로 전망하였다. 따라서 유기물 등이 존재하지 않아 지금까지 연대측정이 어려웠던 문화층 등 지층의 연대측정이 머지않아 OSL법에 의해 어느 정도 가능해질 것으로 보인다.

루미네선스 연대측정법에서의 시료의 선택은 TL법에서 보다 OSL법에서 더 광범위하다. 우선 TL법에서는 석영/장석을 포함하고, 가열에 의해 제로잉된 이력이 있는 유물이면, 원리상으로 연대측정이 가능하다. 여기에서 제로잉 가열온도는 약 500℃ 이상이어야 한다. 토기 등과 같이 점토를 소성하여 만들어진 유물 외에, 탄 암석, 탄 흙, 탄 모래, 테프라 등이 TL 연대 측정시료로 적합하다. 토기의 경우, 적당한 입도의 석영을 포함하고 있으므로 조립자법으로 측정이 가능하나, 도기나 자기 등은 입도가 잘라서 미립자법 또는 슬라이스법이 적용된다. 일반적으로 테프라도 TL 연대측정법 적용이 가능하지만 적당한 입도의 석영이 없는 경우 미립자법을 적용한다. 탄 암석의 경우, 육안으로는 탄 것으로 보이나 실제로는 내부까지 충분한 열이 가해지지 않아 제로잉에 도달하지 못한 경우가 많다. 그 밖에 각종 요업 흔적으로 노상(爐床)과 노벽(爐壁)의 흙과 모래, 가마유적의 흙, 주형(鑄型) 등도 대상이 된다.

한편 OSL법에서는, TL법으로 측정 가능한 시료는 모두 측정 가능하고, 그 외에 태양광에 의해 제로잉된 광물을 포함한 시료가 측정 대상이 되며, 원리상으로는 모든 퇴적물이 대상이 된다. 따라서 유적의 문화층도 연대측정이 가능하지만, 제로잉이 완전한지가 문제로 된다. 태양광에 의한 제로잉 측면에서 볼 때, 황토 등 풍성퇴적물 시료가 OSL 연대측정에 가장 알맞고, 수성 퇴적물은 제로잉이 가능한 퇴적과정을 거쳤는지에 대해 퇴적전문가와 논의과정을 거쳐야 하고, 자연축적선량 측정 시에는 제로잉 여부에 대한 예비 테스트가 필요하다.

시료를 채취할 때, 발광연대 측정 시료는 빛에

노출되면 축적된 에너지의 일부가 소실되므로 시료채취 시에 빛에 노출되지 않도록 주의해야 한다. 발굴 시에 빛에 노출되지 않게 하기는 어려우므로 일몰 이후에 표면을 긁어내고 내부의 시료를 채취해야 한다. 또한 시료채취 시에 다른 부분의 토양이 혼입되지 않도록 유의해야 한다. 토기나 탄 암석은 시료처리 전에 암실에서 다이아몬드 커터(cutter) 등으로 표면을 잘라내든가, 불산 등으로 용해시켜 내부의 것만을 시료로 쓴다. 테프라나 퇴적토양을 OSL법으로 연대 측정하고자 할 때는 퇴적층 단면에 파이프 등을 이용하여 시료를 채취하거나 밝은 시간대에 측정 지점을 정해 놓고, 일몰 후에 회충전등 등의 약한 빛을 이용하여 시료를 채취한다.

연간선량은 현지에서 측정하는 것이 이상적이지만, 발굴이 완료되어 현장이 보존되어 있지 않은 경우라도 주변의 토양을 분석하여 평가할 수 있다. 토기 등 출토유물의 연대측정의 유무에 관계없이 유물토층의 신선한 토양을 수백 g 채취해 수분이 증발하지 않도록 밀봉하여 보관하면 현장정리 후에 연대측정을 하고자 할 때 측정이 가능해진다. 발광 연대측정이 필요하다면, 연대 측정 담당자가 매몰상황, 자연방사능의 환경, 건조의 여부 등 현장 상황을 조사해야 하므로 발굴 조사 중에 행하는 것이 좋다.

다른 연대측정법에서와 같이 발광연대 값은 시료의 연대 값이다. 연대측정 결과를 고고학적으로 어떻게 해석할 것인가는 많은 논의가 필요하다. 여러 유적의 예에서처럼, 단구층에 문화층이 존재한다면, 단구층은 수만 년에서 수십만 년 전에 형성된 것으로, 단구층의 형성시기와 인간이 단구층이라는 평지를 활용하여 살았던 시기와는 서로 일치하지 않은 경우가 대부분이다. 그렇지만 그러한 문화층이 당시에 빛에 노출되어 제로잉 상태로 있었기 때문에, 어느 날 홍수나 산사태 등으로 매몰되어 현재까지 보존되어 있다면, 매몰된 이후의 방사선 축적선량을 측정하는 OSL법을 적용하여 매몰된 연대를 알 수 있

을 것이다. 이는 단구층의 형성연대가 아니라 단구층이 매몰된 시점의 연대인 것이다. 그러나 지형변화 이벤트 중, 충분한 제로잉 조건을 갖추지 못한 퇴적층, 즉 사면붕괴, 산사태, 홍수 등 다량의 퇴적물이 빠른 시간 안에 한꺼번에 이동하여 쌓인 퇴적층에서는 대부분 OSL법에 의한 연대측정이 큰 의미가 없을 것이다. 다른 예로, 하천 유역에서 여러 겹의 홍수퇴적층에 문화층이 몇 개 끼여 있는 경우가 있다. 인간이 그러한 층에서 활동했던 동안에 홍수퇴적층 표면은 충분히 제로잉 되어있었으므로 다른 홍수이벤트로 매몰된다면 매몰당시의 해당 층에 대한 연대측정이 가능하겠지만, 하천주변 환경에서는 함수율의 심한 변동이 반복되어 발생하는 것이 일반적이므로 OSL 연대측정 결과에는 상당한 오차가 포함될 것이다.

아직 고고학 분야에서의 루미네선스연대측정법의 적용 사례가 매우 적어 신뢰성 문제는 남아 있지만, TL법뿐만 아니라 OSL법은 고고학분야에서 유용하게 활용할 수 있는 잠재성이 매우 큰 툴(tool)이다. 따라서 앞으로 연대가 확실하게 정해진 문화층을 대상으로 하여 OSL 연대측정 적용사례를 많이 쌓아 신뢰성이 향상된다면, OSL법의 고고학분야에의 도입으로 인해  $^{14}\text{C}$  연대측정법이 고고학분야에 도입되었을 때만큼의 학문발전도 기대된다.

## 사 사

본 연구는 국가 R&D 과제 ‘석조문화재 재해 예방시스템 구축’ 연구의 일환으로 수행되었으며, 초고를 면밀히 검토해 주신 홍덕균 교수와 홍완 박사께 감사드리는 바이다.

## 참 고 문 헌

배기동, 2003, 전곡리유적의 연대관의 변화, 전곡리유적의 지질학적 형성과정과 동아시아 구석기, 2003년 제2회 전곡리 구석기 유적기념 국

- 제학술논문집, p.13-19  
 정창식, 2002, 해안단구에 대한 연대측정 (review), 지질학회지, 38, 2, 279-291  
 최정현, 정창식, 장호완, 2004, 석영을 이용한 OSL(Optically Stimulated Luminescence) 연대측정의 원리와 지질학적 적용 (review). 지질학회지, 40, 4, 567-583  
 홍덕균, 최정현, 한정희, 최만식, 정창식, 2002, 광여기 루미네선스를 이용한 신기퇴적층의 연대측정, 한국 암석학회지, 10, 3, 202-211  
 Aitken, M.J. and Fleming, S.J. (1972) Topics in Radiation Dosimetry. Academic Press, 3-4  
 Murray, A.S., and Wintle, A.G., 2000, Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative dose protocol. Radiation Measurements, 32, 57-73  
 Daniel, F., Boyd, C.A. and Saunders, D.F., 1953, Thermoluminescence as a Research Tool. Science, 117, 343p  
 Fleming, S.J., 1970, Thermoluminescence dating: refinement of quartz inclusion method. Archaeometry, 12(2), 133-148  
 Goedicke, C., 2003, Dating historical calcite mortar by blue OSL: results from known age samples, Radiation Measurements, 37, 4, 49-415  
 Götsu, H.Y., Fremlin, J.H. and Fryxell, R., 1974, Age determination of burnt flint by a Thermoluminescence method. Science, 183, 651-654  
 Higashimura, T., Ichigawa, Y. and Sidei, T., 1963, Dosimetry of Atomic Bomb Radiation in Hiroshima by Thermoluminescence of Roof Tiles. Science, 139, 1284-1285  
 Huntly, D.J., Godfrey-Smith, D.I. and Thewalt, M.L.W., 1985, Optical dating of sediments. Nature, 313, 105-107  
 Kemp, R.A., Toms, J.M., Derbyshire, E.,

- King, M. and Wagoner, L., 2003, Micromorphology and OSL dating of the basal part of the loess-paleosol sequence at La Mesada in Tucumán province, Northwest Argentina, *Quaternary International*, 11-117
- Kennedy K.J. and Knopff, L., 1960, Dating by thermoluminescence. *Archaeology*, 13, 147-148
- Lowe, J.J. and Walker, M.J.C., 1983, *Reconstructing quaternary environments*, Longman science & technical. 389p.
- Owen, L.A., Kamp, U., Spencer, J.Q. and Haserodt, K., 2002, Timing and style of Late Quaternary glaciation in the eastern Hindu Kush, Chitral, northern Pakistan: a review and revision of the glacial chronology based on new optically stimulated luminescence dating, *Quaternary International*, 41-55
- Ugumori, T. and Ikeya, M., 1980, Luminescence of CaCO<sub>3</sub> under N<sub>2</sub> laser excitation. *Jpn. J. Appl. phys.* 19, 459-465
- Zimmerman, D.W., 1971, Thermoluminescence dating using fine grains from pottery: a re-appraisal. *Archaeometry*, 13(1), 29-53
- 兼岡一郎, 年代測定概論, 東京大学出版会, 315p.
- 長友恒人 編, 1999, 考古學のための年代測定學入門, 古今書院, 161p.
- 
- 투 고 일: 2006. 5. 9.**  
**심 사 일: 2006. 5. 15.**  
**심사완료일: 2006. 6. 5.**
- 양동윤, 김주용**  
305-350, 대전광역시 유성구 가정동 30 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 (Geological and Environmental Hazards Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, 30 Gajeong-dong, Yuseong, Daejeon, 305-350, Korea)
- 신속경**  
220-701, 강원도 원주시 흥업면 매지리 234 연세대학교 원주박물관 (Wonju Museum of Yonsei University, Maeji-ri 234, HongEop-Myeon, Wonju city, Gangwon province, 220-710, Korea)