

## 적외선 여기 루미네센스를 이용한 조간대 퇴적층의 연대추정

홍덕균\* · 최만식 · 한정희 · 최정헌<sup>1</sup> · 정창식

한국기초과학지원연구원 동위원소분석팀, <sup>1</sup>서울대학교 지구환경과학부

### Infrared Stimulated Luminescence (IRSL) Dating of a Tidal Flat, West Coast of Korea

DUK-GEUN HONG\*, MAN SIK CHOI, JEONG-HEE HAN, JEONG-HEON CHOI<sup>1</sup>, CHANG-SIK CHEONG

*Isotope Research Team, Korea Basic Science Institute, Daejeon 305-333, Korea*

<sup>1</sup>*School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*

장석을 적외선으로 조사하여 측정된 루미네센스를 이용하여 서해안 지역에 최근 퇴적된 갯벌 퇴적층의 연대를 산출하였다. 연대를 결정하기 전 조사된 표층시료의 시험에서 시료채취 장소의 환경은 루미네센스 연대 측정법을 적용하기에 매우 적합한 것으로 나타났다. 산출된 연대는 퇴적층에 따라 비교적 순차적으로 나타났으며, 각 층에서 산출된 연대의 중심연대를 기준으로 볼 때 시료 채취장소의 퇴적율은 100년 동안 약 50 cm 정도를 보였다. 또한, 사용된 시료의 열적전환에 의한 회귀현상에 대한 연구가 기술되었다. 광 여기 루미네센스 연대 측정법은 앞으로 갯벌의 퇴적환경을 연구하는데 크게 기여할 것으로 생각된다.

Optical dating, using infrared stimulation of K-feldspar grains, was undertaken to determine the sedimentation rate of a recently deposited tidal flat on the western coast of Korea. Very low luminescence of the natural surface sample confirms that the materials we investigated were well bleached at deposition. The five IRSL ages obtained show a reasonable stratigraphic correlation with the expected sedimentation rate of approximately 50 cm/100 yr. In addition the recuperation effect due to thermal transfer was discussed. We conclude that the optical dating used here shows a great promise to determine the sedimentation rates of tidal flats.

## 서 론

조간대는 간조선과 만조선 사이의 지역으로 육상으로부터의 물질 공급이 풍부하며 증조차 혹은 대조차 환경에서 잘 발달한다 (Hayes, 1975). 조간대는 육상에서 가장 인접한 연안 퇴적 환경으로 하천에서 배출된 육상 기원 물질들이 외해로 유출되기 전 일차적으로 퇴적되는 장소이기도 하다. 따라서 육상기원 오염물질들이 일차적으로 여과되는 장소이기도 하다. 한편, 그 퇴적작용은 유입 퇴적물의 종류, 조차, 조간대 지형, 취송거리, 해안지형, 기후 및 해수면 변화 등에 의해 지배받아 시·공간적인 많은 변화를 보인다 (Klein and Scanders, 1964). 그러므로 환경 변화에 대한 기록들도 퇴적층 내에 보관되어 오염 역사 규명 (Horowitz, 1991) 및 기후 변화에 따른 해수면 변동 (Park and Bloom, 1984)에 관한 연구 대상이 되는 지역이다.

한반도 서해안은 증조차 내지는 대조차 환경으로 세계적으로 규모가 큰 조간대 환경이 발달해 있다. 지금의 조간대는 19세기 초 부터 추진되어온 조간대의 농지화 정책으로 대부분이 방조제 건설 이후에 변형된 것이다. 현재도 여러 지역에서 간척 사업이 진행되고 있어 환경 및 생태계 파괴에 대한 우려와 농지 개발에

따른 경제적 이익에 대한 상반된 의견들이 논란이 되고 있다. 이와 같이 조간대는 인간의 실생활 및 환경 변화에 밀접히 관계 있는 지역이므로 퇴적작용 및 퇴적층에 대한 자세한 연구들이 수행되어야 하는 장소이다. 그 중에서도 모든 연구들에 기본이 되고 핵심적인 역할을 하는 것이 조간대 퇴적층의 연대 측정이라 할 수 있다.

기존의 연구들에서 주로 사용하였던 연대 측정 방법은 <sup>210</sup>Pb과 <sup>14</sup>C을 이용하는 방법이 있었다. 그러나 <sup>210</sup>Pb법은 주로 세립물질에 서만 결과를 줄 수 있었고, <sup>14</sup>C은 분석 시료에서 한계가 있고 1000년 이상의 연대에만 사용가능 하기 때문에 적용하기 어려웠다. 한반도 서해안 조간대 퇴적물에는 조립질 물질이 우세하기 때문에 조립질 물질을 이용한 퇴적물의 연대 측정법이 절실히 요구된다. 광 여기 루미네센스 (photoluminescence: PL) 연대 측정법은 빛에 노출된 퇴적층이 퇴적으로 인해 빛으로 부터 차단되는 시점을 알려줄 수 있는 방법으로 한반도 조간대 퇴적물과 같이 빛에 충분히 노출되며 조립질 물질이 우세한 지역에서 매우 적합한 방법이다. 또한 퇴적물의 주성분 광물인 석영이나 장석을 이용하기 때문에 시료의 제한이 없으며 수십 년 이상 수십만 년 이하의 연대에 주로 적용될 수 있어 연대 범위도 적절할 뿐 아니라, 대상이 되는 층의 절대 연령을 산출할 수 있어 조간대 퇴적작용 및 퇴적층 연구에 적합한 연대 측정 방법이라 할 수 있다.

\*Corresponding author: dghongkorea@hamail.net

그 동안 이 방법으로 주로 해양 퇴적물(주로 해안사구)의 연대 측정(Huntley *et al.*, 1993; Ollerhead *et al.*, 1994 are two examples)에 많이 응용되고 있어 조간대 퇴적층에도 적용이 가능할 것이라고 생각된다. 이 연구에서는 새만금 해역 계화도 앞에서 시추 시료를 채취하여 층 별로 루미네센스를 측정, 광 여기 루미네센스 연대 측정법이 한반도 서해안 조간대 퇴적층에 적용될 수 있는지에 대한 가능성을 점검하였고 실험 시 필요 조건들을 제시하였다.

## 광 여기 루미네센스 연대측정의 원리

루미네센스는 석영이나 장석 등과 같은 무기결정이 외부에서 어떠한 형태의 에너지를 받았을 때, 전리성 방사선(ionization radiation)에 의해 결정내의 격자결함(lattice imperfection)에 포획(trapping)된 전자들이 결함에서 빠져 나오면서 빛을 동반하는 과정이다. 물질에 주는 에너지 방법에 따라 여러 가지 루미네센스가 존재하며, 그 중 빛의 여기로 발생하는 것이 광 여기 루미네센스(photoluminescence; PL)이다. 이 루미네센스를 적당한 온도에서 관측하고, 관측된 루미네센스의 크기를 시간적으로 조절하면 퇴적층의 연대를 산출할 수 있다(Aitken, 1998). 예를 들면, 자연계의 석영 또는 장석 입자는 주위의 환경 방사선 등으로 인해 어느 정도의 루미네센스를 가진 채로 존재한다. 이후, 강물이나 바닷물에 의해 운반되어 퇴적될 때 햇빛에 노출될 수가 있는데, 이 과정은 이들 입자의 광 여기 루미네센스를 0으로 만든다(이를 bleaching 이라 한다). 퇴적 후, 이들 입자들은 빛으로부터 차단되고, 주변 토양의 환경방사선(알파입자, 베타입자, 감마선)과 우주선(cosmic ray)의 영향으로 루미네센스가 시간에 비례하여 증가되는데, 이 증가된 루미네센스 신호는 퇴적층의 퇴적 시기에 대한 정보를 제공하게 된다.

광 여기 루미네센스가 연대측정에 사용되기 시작된 것은 Huntley *et al.*(1985)가 퇴적층에서 분리한 석영을 514 nm 파장의 레이저로 조사하여 이로부터 검출된 루미네센스를 지층의 연대 계산에 응용한 것이 그 시초이다. 그 후, Hutt *et al.*(1988)은 Xe 램프를 광원으로 장석으로부터 관측된 루미네센스도 연대측정에 사용될 수 있음을 보고하였다. 장석은 석영에 비해 방사선에 대한 루미네센스 민감도가 매우 높기 때문에 아주 젊은 연대의 시료인 경우는 석영에 비해 우월성을 갖는다.

광 여기 루미네센스 연대 측정법은 빛에 민감한 덩어리 포획된 전자들만 여기 시키는 것이므로 열 루미네센스(thermoluminescence; TL) 연대 측정법(Aitken, 1985)으로 퇴적층의 연대를 산출하는 경우 반드시 고려해야 되는 빛에 민감하지 않은 부분을 실험실에서 다시 보정 할 필요가 없다. 또한, 부분 파괴분석이 가능해 적은 양의 시료로도 연대를 산출할 수 있는 단일 시료 분석법(single aliquot method)이 가능하다(Duller, 1991). 일반적으로 연대측정을 목적으로 한 루미네센스 연구에서, 석영을 청색 또는 녹색 파장의 빛으로 여기하였을 때 발생하는 루미네센스를 OSL(optically stimulated luminescence)이라 하고 장석을 적외선 파장의 빛으로 여기하였을 때 발생하는 루미네센스를 IRSI(infrared stimulated luminescence)이라 한다.

광 여기 루미네센스를 이용한 연대 측정은 다음 식에 의하여 연대가 산출된다.

연대(Age) = 자연축적선량(Equivalent dose)연간선량(Dose rate)

여기서, 자연축적선량은 시료로부터 루미네센스를 측정하여 얻어지고, 연간선량은 시료가 채취된 장소의 토양으로부터 알파, 베타, 감마선 및 우주선량을 측정하여 얻어진다.

광 여기 루미네센스 연대 측정법이 성립하기 위해서는 다음 몇 가지 가정이 필수적이다. 첫째, 연대측정에 이용되는 시료(주로 석영과 장석)가 퇴적되기 전에 빛의 노출로 인해 결정내의 격자결함이 빈 상태로 존재해야 된다(즉, 퇴적 전에 루미네센스 양이 0으로 된 후 퇴적되어야 한다.). 둘째, 전리성 방사선의 영향으로 전자(electron)들이 여러 에너지준위의 격자결함에 포획될 수 있는데, 이 포획된 전자들 중에서 오랜 세월동안 외부에서 어떠한 에너지를 주지 않는 한 여기 되지 않는 안정한 전자(약 300°C 이상의 온도에서 안정한 전자)들만의 여기로부터 관측된 루미네센스만이 연대측정에 사용되어야 한다. 셋째, 시료에서 관측된 루미네센스 양이 외부로부터 받은 방사선의 양과 상관 관계를 보여 주어야 한다. 넷째, 여기광원의 파장과 시료로부터 발생하는 루미네센스 파장을 분광할 수 있어야 한다.

현재, 실험 방법적으로(Wintle, 1997), 실험 기기적으로(Botter-Jensen, 1997) 활발한 연구들이 수행되어 광 여기 루미네센스 연대 측정법을 이용한 퇴적층의 연대측정 및 퇴적환경에 관련된 연구 결과들이 상당수 보고되고 있다(Prescott and Robertson, 1997).

## 방법 및 토의

### 시료 채취

시료는 전라북도 김제시 광활면에 있는 방조제로부터 바다 쪽으로 약 500 m 지점의 갯벌에서 채취되었다(Fig. 1). 시료를 채취할 때 시료가 빛에 노출되지 않도록 하기 위해서 약 70 cm 길이의 PVC관을 수직으로 박아 시료를 채취한 후, 파이프의 양끝을 검은색 비닐로 감싼 후 암실로 운반하였다. 그 후 암실에서 PVC관의 중앙 부분을 가로로 절단, 상부 20 cm 지점으로부터 10 cm

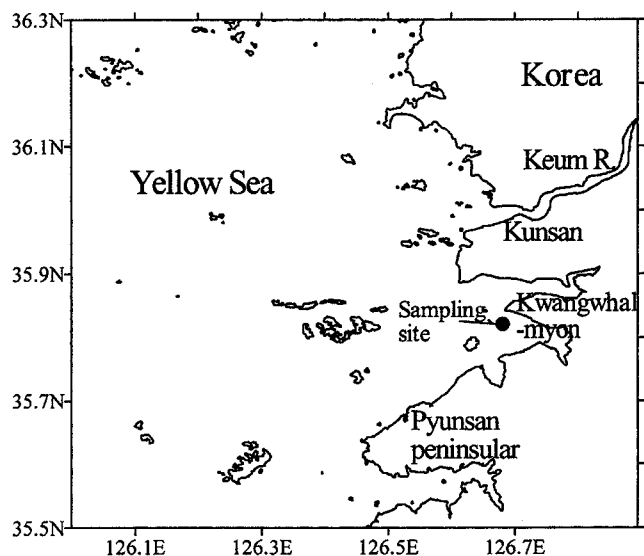


Fig. 1. Location of the sampling site.

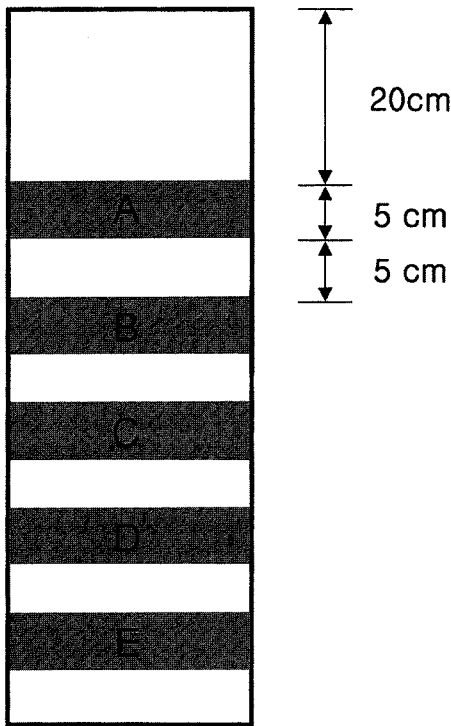


Fig. 2. Stratigraphic sections sampled for equivalent dose determination(black color) and dose rate(white color).

간격으로 5개의 시료를 채취하고, 이들을 시료 A, B, C, D, E로 구분 하였다. 채취된 각각의 시료를 2등분 하여 상부 5 cm의 시료는 자연축적선량(equivalent dose)의 측정을 위하여, 나머지 5 cm 부분의 시료는 연간선량(dose rate) 측정을 위해 사용하였다(Fig. 2).

자연축적선량(equivalent dose) 측정에 필요한 석영과 장석은 다음과 같은 화학처리로 얻어졌다. 먼저 물로 세척하여 진흙 등을 제거한 뒤 그물망(sieve)을 이용하여 90~150  $\mu\text{m}$  크기의 시료만을 얻었다. 이 후 시료내의 석회나 유기물을 제거하기 위해 10% 염산(HCl)과 과산화수소( $\text{H}_2\text{O}_2$ )로 시료를 처리하였다. 처리된 시료는 비중액을 사용하여 석영과 장석을 분리하게 되는데, 우선 이들 보다 무거운 입자들을 2.70  $\text{g}/\text{cm}^3$ 의 비중액으로 먼저 제거하고, 석영인 경우 2.63~2.70  $\text{g}/\text{cm}^3$  사이에서 장석은 2.58~2.63  $\text{g}/\text{cm}^3$  사이의 비중에서 분리되었다. 비중액에 의해 분리된 석영은 장석에 오염될 수 있으므로, 분리된 석영을 40% 불산으로 약 한 시간 정도 처리하였다. 약 한 시간 정도의 불산 처리는 분리된 석영시료 내의 장석의 오염을 제거할 수 있을 뿐 아니라, 석영입자의 바깥층을 약 10  $\mu\text{m}$  정도 에칭(etching) 하므로 석영내의 알파입자에 의해 축적된 루미네센스를 무시할 수 있게 한다(Aitken, 1985). 따라서 이 경우, 연대산출에 필요한 연간선량을 구할 때 알파입자에 의한 연간선량 값을 고려할 필요가 없다(quartz inclusion technique)(Fleming, 1970). 위의 과정은 시료에서 장석을 분리할 때에도 사용되었으나, 불산의 농도 및 처리시간은 석영과 다르게 하였다(Mejdahl and Christiansen, 1994). 즉, 알파입자에 의해 유도된 루미네센스만을 제거하기 위해 10% 불산으로 40분 정도 처리하였다. 불산으로 처리된 장석 및 석영시료들은 10% 염산과 물로 세

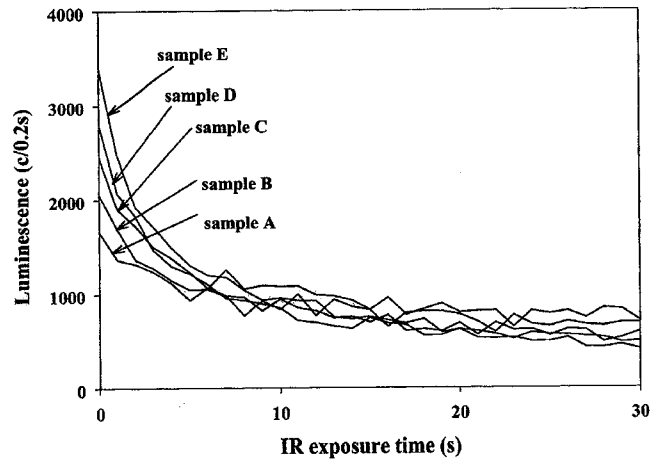


Fig. 3. Luminescence intensity corresponding to infrared exposure time for the five samples showing the increase in luminescence with depth. All aliquots were preheated at at 220°C for 10 min. and measurements were for 0.2s exposure to the infrared radiation. Each curve is the mean of the two measurements from a normalized set.

척하여 최종적으로 얻어졌다. 마지막으로 석영시료의 경우, 약간의 시료를 임의로 채취하여 적외선 조사에 의해 장석의 오염이 없음을 확인하였다(Spooner *et al.*, 1990). 석영은 적외선 여기로 루미네센스가 발생하지 않으므로 만일 적외선 조사시 루미네센스가 관측되면 석영시료내에 장석이 오염되었음을 의미한다.

각 층에서 얻어진 소량의 석영과 장석에 대하여 연대추정에 필요한 루미네센스를 얻을 수 있는지 석영은 청색 발광다이오드로, 장석은 적외선 레이저로 각각 여기시켰다. 관측 결과 석영에 대해서는 연대추정에 필요한 루미네센스를 얻을 수 없었는데, 이는 이 지역의 조간대가 최근에 형성되었음을 암시한다. 따라서, 이 연구에서는 석영에 비해 방사선에 대한 루미네센스 효율이 높은 장석만을 이용하여 연대를 산출하였다. Fig. 3은 각 층에서 분리된 장석을 적외선으로 50초 조사하여 얻어진 루미네센스이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 루미네센스 신호가 시간에 따라 감소하는 것을 볼 수 있고, 각각의 시료에 대한 초기 루미네센스 신호의 크기는 상부 시료에서 하부 시료로 감에 따라 증가하는 것을 보여준다. 각각의 루미네센스 신호는 두 번 측정하여 평균한 값이며, 선량 규격화(dose normalisation) 방법(Galloway and Hong, 1996)으로 규격화 하였다.

모든 루미네센스 측정은 한국기초과학지원연구원에 설치된 덴마크 Riso 연구소의 TL/OSL 자동화 시스템(Automated Riso TL-OSL Reader)에 의해 이루어졌다. 830 nm 파장의 적외선 레이저가 여기광원으로 사용되었고, 루미네센스는 U-340 필터와 결합된 광 전자 증배관(EMI 9635QA photomultiplier)으로 검출되었다.

**자연축적선량 측정**

자연축적선량(equivalent dose)은 시료로부터 분리된 장석을 단일시료 부가 선량법(single aliquot additive dose method)(Duller, 1991)에 응용하여 결정되었다. 즉, 한 개의 시료를 이용하여 처음 시료가 가지고 있는 자연 루미네센스(natural luminescence)를 측정 한 후, 연속적으로 같은 시료에 베타 조사 및 시간적으로 불안

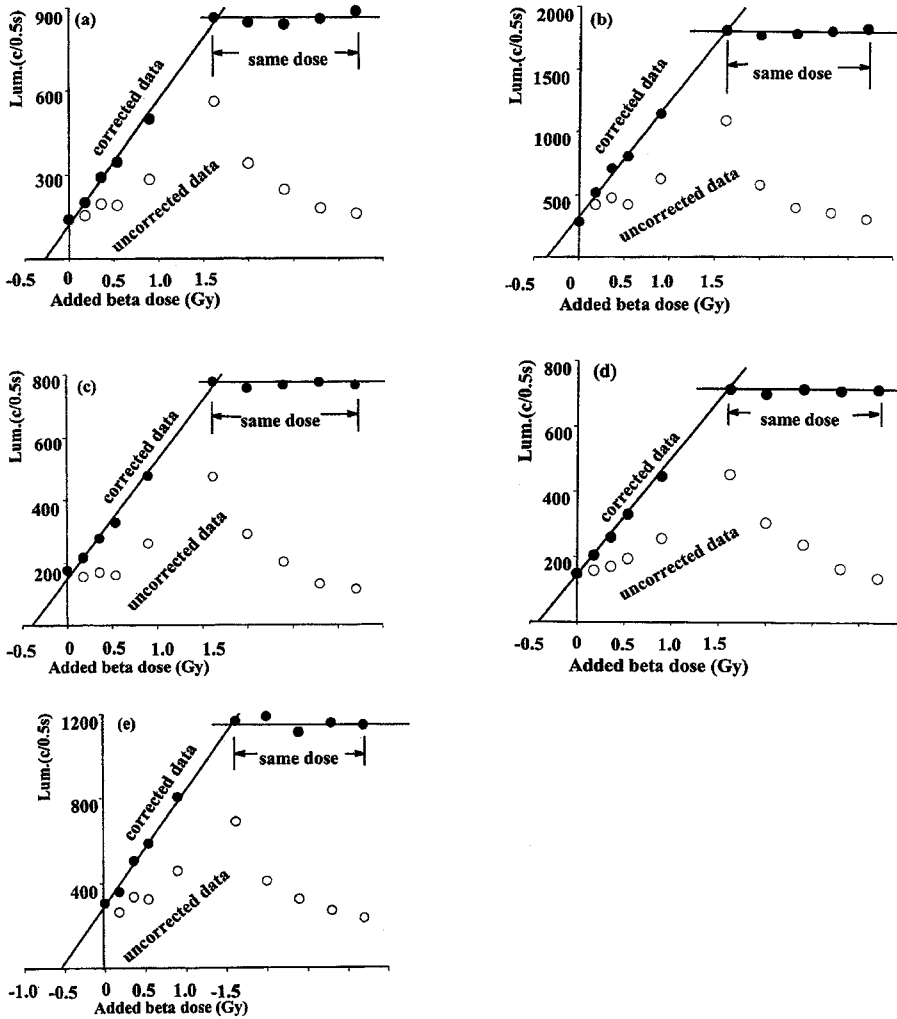


Fig. 4. Examples of equivalent dose determination based on single aliquot measurements for feldspar from sample A((a) in figs.), sample B((b) in figs.), sample C((c) in figs.), sample D((d) in figs.), and sample E((e) in figs.) in fig. 2 which were corrected by the iterative fitting procedure(Galloway, 1996), along with uncorrected data. Also shown, to the right of the figure, are the repeated preheat and read cycles which give the mean correction ratio and the result of correcting these points by the mean ratio, which should ideally give a horizontal line. Preheating was at 220°C for 10 min. and measurements were for 0.5s exposure to the infrared radiation. The curve is the linear fit to the corrected data points.

정한 결함에 포획된 전자(electron)들의 제거를 위하여 220°C에서 10분 간(Li, 1991) 열 전처리(preheating) 후 루미네센스를 측정하였다. 각각의 방사선 조사에 대하여 0.5초 동안 측정된 루미네센스를 합산하여 성장곡선을 만들고 이 성장곡선을 외삽하여 자연 측정선량을 결정하였다(Fig. 4). 같은 시료의 반복적인 여기, 열 전처리는 시간적으로 안정한 덧에 포획된 전자들에게도 영향을 주어 실제 루미네센스 보다 낮은 루미네센스가 관측되는데, 이는 성장곡선을 만들기 위한 측정이 끝난 후 사용된 시료를 방사선 조사 없이 연속적으로 열 전처리 및 여기로 보정인자를 구해 손실된 루미네센스를 보정하였다(Galloway, 1996; Hong *et al.*, 2000). Fig. 4에서 보는 바와 같이 실험실 조사가 없이 연속적인 여기 및 열 전처리만 한 부분이 보정 후 일직선으로 표시된 것은 보정이 만족스럽게 된 것이며, 대상시료의 열 전처리 및 여기로 인한 루미네센스 신호가  $f(n)=1-a \ln(n)$  식의 형태로 감소된 것을 의미한다. 여기서  $n$ 은 시료의 열 전처리 및 루미네센스 측정 횟수이며,  $f(n)$ 은 잔류 루미네센스 신호,  $a$ 는 열 전처리 및 측정시간에 대한 상수이다. 각각의 층으로부터 10개의 시료를 만들어, 측정된 각각의 자연측정선량을 평균하여 연대계산에 이용하였고, 평균 자연측정선량에 대한 표준 오차를 결정된 연대의 오차로 하였다(Table 1).

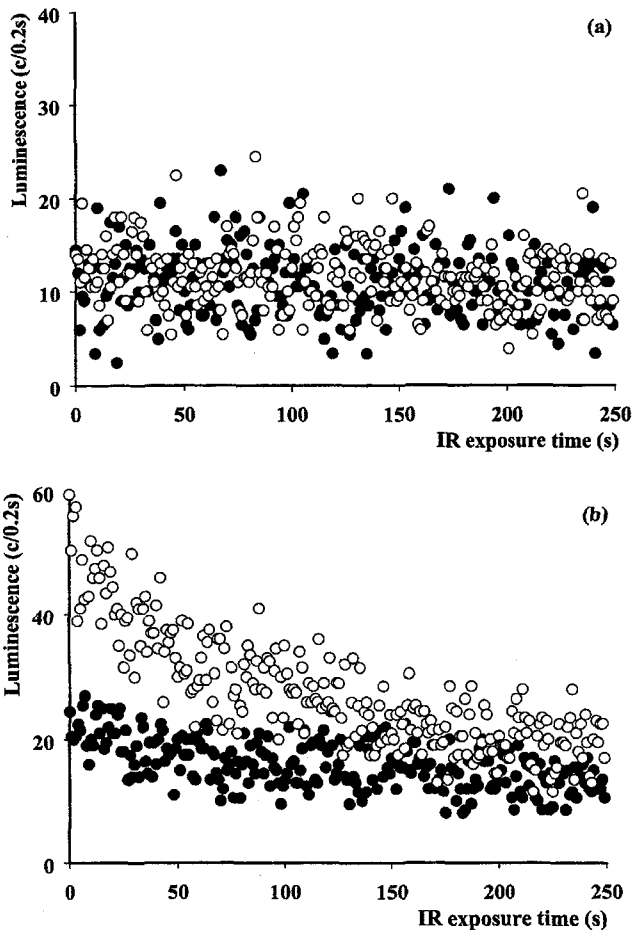
#### 회귀효과(recuperation effect)

시료를 빛에 노출(bleaching)시켜 매우 낮은 루미네센스 준위로 만든 후, 그 시료를 장시간 보관(storage)이나 열 전처리(preheating)하여 루미네센스를 관측하면 처음 루미네센스 준위보다 높은 루미네센스가 관측되는데 이를 회귀현상이라 한다. Ree-Jones and Tite(1994)는 장석에 대한 IRSL 연구에서 장석의 회귀 현상은 시료의 열 전처리로 인해 두드러짐을 보고했다. 이는 빛에 민감하지 않고 열적으로 불안정한 덧(300°C 이하의 열 에너지에 해당되는 덧)에 포획된 전자들이 열 전처리 동안 빛에 민감하고 열적으로 안정한 덧(300°C 이상의 열 에너지에 해당되는 덧)으로 재포획(retrapping)된 후, 빛으로 여기했을 때 덧으로부터 빠져 나와 정공과의 재결합으로 기인된 현상으로 설명되고 있다(이를 열적전환(thermal transfer)이라 한다)(Aitken, 1998). 회귀 현상은 시료마다 매우 다양한 차이를 보이며, 특히 젊은 연대의 시료에서는 시간에 독립적인 신호(background signal)가 연대계산에 상당한 영향을 미치므로 특히 중요성을 갖는다. 이 실험에서 사용한 시료의 회귀현상은 두 가지 다른 조건에서 준비된 시료로 조사되었다. 먼저 시료 채취장소의 표층 시료를 태양 모사기(solar simulator; Honle SOL<sub>2</sub>)에서 24시간 노출 시킨 후 열 전처리 전후의 루미네

**Table 1.** Luminescence dating results

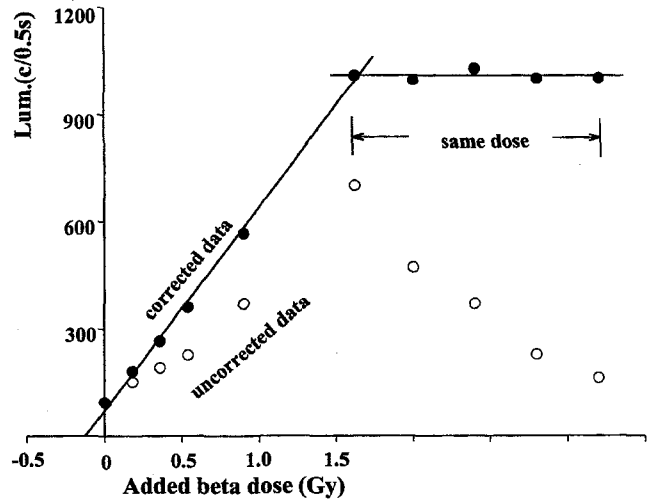
Sample	Equivalent dose (Gy)	Gamma dose rate (mGy/yr)	Internal beta dose rate (mGy/yr)	External beta dose rate (mGy/yr)	Cosmic radiation (mGy/yr)	Total dose rate corrected (mGy/yr)	Age (yr)
A	0.14 ± 0.02	1.53 ± 0.04	0.29 ± 0.03	2.42 ± 0.06	0.15 ± 0.01	3.35 ± 0.07	42 ± 6
B	0.20 ± 0.02	1.53 ± 0.04	0.29 ± 0.03	2.50 ± 0.06	0.15 ± 0.01	3.33 ± 0.07	60 ± 6
C	0.24 ± 0.04	1.50 ± 0.04	0.29 ± 0.03	2.38 ± 0.05	0.15 ± 0.01	3.29 ± 0.07	73 ± 12
D	0.25 ± 0.03	1.61 ± 0.05	0.29 ± 0.03	2.57 ± 0.06	0.15 ± 0.01	3.45 ± 0.08	72 ± 9
E	0.37 ± 0.03	1.35 ± 0.03	0.29 ± 0.03	2.25 ± 0.04	0.15 ± 0.01	3.01 ± 0.05	123 ± 10

- 1) Total dose rate corrected refers to the annual dose rate corrected for water content using the formulae of Zimmerman (1991).
- 2) Total dose rate corrected also takes account of beta dose attenuation through the grains by a factor of 0.9 (Aitken, 1985).
- 3) The cosmic ray contribution was taken as 0.15 mGy/yr (Prescott and Stephan, 1982).
- 4) Gy: a unit of the radiation absorbed dose



**Fig. 5.** (a) An example of recuperation measurements after(○) and before(●) preheating for the sample bleached for 24 hr in a solar simulator. Preheating was at 220°C for 10 min. and measurements were for 0.2s exposure to the infrared radiation. Each curve is the mean of the two measurements from a normalized set. (b) As fig. 5(a), but for the sample from surface.

센스 신호를 비교하여 회귀 현상을 조사하였다(Fig. 5(a)). Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이, 시료는 태양 모사기에서 24 시간 노출된 후 루미네센스가 관측되지 않았으며, 열 전처리 전후에 관측된 루미네센스에서 변화가 없는 것으로 미루어 볼 때 회귀현상은 무시할



**Fig. 6.** An example of equivalent dose determination due to thermal transfer for feldspar separated from surface sample. Preheating was at 220°C for 10min. and measurements were for 0.5s exposure to the infrared radiation. The curve is the linear fit to the corrected data points.

만한 것으로 여겨진다. 태양 모사기로 처리된 시료에 했던 것과 같은 방법으로 표층시료의 회귀현상이 조사되었다(Fig. 5(b)). 연대추정 결과에 크게 영향을 미칠 정도는 아니지만 표층시료에서 약간의 루미네센스가 관측되는데, 태양 모사기에서 처리된 시료에서 여기로 인한 회귀현상이 없는 것으로 볼 때 이는 여기에 의한 회귀현상이라기 보다는 생물교란작용(bioturbation)이나 빛에 덜 민감한 덩(hard to bleach trap)에 포획된 전자들로부터 기인된 것이라 생각된다. 또한, 열 전처리 후 루미네센스가 두드러지게 증가하였다. 처음 0.5초 동안의 열 전처리 전후 루미네센스를 합산하여 비교할 때 약 3배의 루미네센스가 열적전환에 의한 회귀로 증가를 보였다. 이 연구에서는 시료가 퇴적 전 표층과 같은 환경에서 퇴적되었을 것이라 가정하여 표층시료의 열적전환에 의한 루미네센스 증가를 연대추정 계산에서 고려하였다. Fig. 6은 회귀현상으로 증가된 루미네센스가 얼마 만큼의 자연축적선량에 대응되는지에 대한 성장곡선이며, 10개의 시료에 대한 측정에서 0.14±0.02 Gy 값을 얻었다.

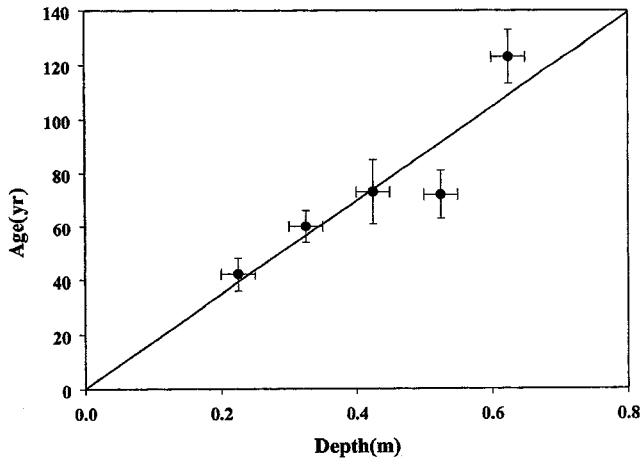


Fig. 7. Plot of age in years, versus sample depth below the surface in meters. The regression line fitted by a linear function passes the origin.

### 연간선량 측정

자연축적선량 이외에 시료 채취 장소의 연간 선량(dose rate)은 연대를 결정하기 위한 필수 요소이다. Table 1에 인용된 전체 연간 선량 값은 베타, 감마 연간 선량 값과 우주선에 의한 연간 선량 값을 합산한 것이다. 베타선량은 내부 선량과 외부 선량을 나누어 계산하였다. 내부 선량은 현미경을 이용하여 사용된 시료의 장식 함량을 구하고, 시료 중 K 함량을 정량하여 환산 인자(Mejdahl, 1979)를 통하여 계산하였다. 사용된 시료 중 90% 이상이 K을 가지고 있는 것으로 관찰되었고, 사용된 장식 시료에서  $10 \pm 1\%$ 의 K 양이 정량되었다. 외부 베타선량 및 감마선량은 한국기초과학지원 연구원의 감마 스펙트럼 분석기(Model GCW3523-7915-30/ULB Well-type HPGe detector, Canberra Ltd.)를 이용하여 얻어졌으며(Aitken, 1985), 우주선량은  $150 \mu\text{Gy/yr}$ 로 고려되었다(Prescott and Stephan, 1982). 최종적인 연간 선량은 시료의 수분 함량에 대한 보정과 불산의 에칭(etching)으로 손실된 선량을 고려하여 결정되었다(Zimmerman, 1971).

### 결 론

이 연구에서는 한국 서해안 지역의 갯벌에서 퇴적물을 채취, 그로부터 분리된 장석을 적외선으로 조사하여 관측된 루미네선스를 연대측정에 응용하였다. 산출된 연대는 40~50 cm 지역을 제외하면 퇴적층에 따라 순차적으로 나타났으며(Fig. 7), 각 층에서 산출된 중심연대를 기준으로 할 때 시료 채취장소의 퇴적율은 100년 동안 약 50 cm 정도를 보였다. Fig. 7에서 보는 바와 같이, 얻어진 연대를 깊이에 대하여 일차함수로 회귀하였을 때 회귀곡선이 원점을 통과하는 것은 상부로부터 퇴적된 20 cm 깊이의 갯벌도 이 실험에서 얻은 퇴적율과 비슷한 속도로 퇴적되었음을 시사한다.

연대를 결정하기 전 표층시료와 태양 모사기로 처리된 시료에서 관측된 루미네선스를 비교할 때 채취된 시료의 환경은 루미네선스 연대 측정법을 적용하기에 매우 적합한 것으로 조사되었다. 이는 비슷한 환경의 갯벌시료는 광 여기 루미네선스 연대 측정법

으로 연대산출이 가능할 수 있음을 의미한다. 다만, 보다 많은 수의 시료로부터의 결과와 이 연구에서와 같이 매우 젊은 연대의 시료의 경우 표층 시료에 대한 잔류 루미네선스(residual luminescence) 및 회귀현상에 대한 정밀한 검토가 있어야 정확한 연대를 얻을 수 있으리라 생각한다. 앞으로 보다 오래된 시료뿐만 아니라 석영에 대한 OSL 연대측정법도 병행하여 수행된다면 광 여기 루미네선스 연대 측정법은 서해안 갯벌의 퇴적환경을 연구하는데 매우 기여할 것으로 생각된다.

### 참고문헌

- Aitken, M.J., 1985. Thermoluminescence dating. Academic Press, pp. 17-18.
- Aitken, M.J., 1998. An introduction to optical dating. Oxford University Press, pp. 1-36.
- Botter-Jensen, L., 1997. Luminescence techniques: instrumentation and methods. *Radiation Measurements*, **27**: 749-768.
- Duller, G.A.T., 1991. Equivalent dose determination of single aliquots. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, **18**: 371-378.
- Fleming, S.J., 1970. Thermoluminescence dating: refinement of the quartz inclusion method. *Archaeometry*, **12**: 133-147.
- Galloway, R.B., 1996. Equivalent dose determination using only one aliquot: alternative analysis of data obtained from infra red stimulation of feldspars. *Radiation Measurements*, **26**: 103-106.
- Galloway, R.B. and D.G. Hong, 1996. Concerning the normalization of additive dose optically stimulated luminescence data from quartz. *Ancient TL*, **14**: 1-5.
- Hayes, M.O., 1975. Morphology of sand accumulation in estuaries. In: *Estuarine Research 2*, edited by Cronin, L.E. pp. 3-22.
- Hong, D.G., Galloway, R.B. and T. Hashimoto, 2000. Additive dose single and multiple aliquot methods of equivalent dose determination compared for quartz luminescence stimulated by green light. *Japanese Journal of Applied Physics*, **39**: 4209-4216.
- Horowitz, A.J., 1991. A primer on sediment-trace element chemistry. Lewis Pub., USA, 136 pp.
- Huntley, D.J., Godfrey-Smith, D.I. and M.L.W. Thewalt, 1985. Optical dating of sediments. *Nature*, **313**: 105-107.
- Huntley, D.J., Hutton, J.T. and J.R. Prescott, 1993. Optical dating using inclusions within quartz grains. *Geology*, **21**: 1087-1090.
- Hutt, G., Jack, I. and J. Tchonka, 1988. Optical dating: K-feldspar optical response stimulation spectra. *Quaternary Science Reviews*, **7**: 381-385.
- Klein, G.deV. and J.E. Sanders, 1964. Comparison of sediments from Bay of Fundy and Dutch Waden Sea tidal flats. *J. Sed. Petrol.*, **34**: 19-24.
- Li, S.H., 1991. Removal of the thermally unstable signal in optical dating of K-feldspar. *Ancient TL*, **9**: 26-29.
- Mejdahl, V. and H.H. Christiansen, 1994. Procedures used for luminescence dating of sediments. *Quaternary Geochronology*, **13**: 403-406.
- Ollerhead, J., Huntley, D.J. and G.W. Berger, 1994. Luminescence dating of sediments from Buctouche Spit, New Brunswick. *Can. J. Earth Sci.*, **31**: 523-531.
- Park, Y.A. and A.L. Bloom, 1984. Holocene sea level history in the

- Yellow Sea. *Korea Geol. Soc.*, **20**(3): 189–194.
- Prescott, J.R. and L.G. Stephan, 1982. Contribution of cosmic radiation to environmental dose. *FACT*, **8**: 205–213.
- Prescott, J.R. and G.B. Robertson, 1997. Sediment dating by luminescence: a review. *Radiation Measurements*, **27**: 893–922.
- Rees-Jones, J. and M.S. Tite, 1994. Recuperation of IRSL after bleaching and consequences for dating young sediment. *Radiation Measurements*, **23**: 569–574.
- Spooner, N.A., Aitken, M.A., Smith, B.W., Franks, M. and C. McElroy, 1990. Archaeological dating by infrared stimulated luminescence using a diode array. *Radiation Protection Dosimetry*, **34**: 83–86.
- Wintle, A.G., 1997. Luminescence dating: laboratory procedures and protocols. *Radiation Measurements*, **27**: 769–817.
- Zimmerman, J., 1971. The radiation-induced increase of thermoluminescence sensitivity of fired quartz. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, **4**: 3277–3291.
- 

2001년 7월 25일 원고접수

2001년 12월 14일 수정본 채택

담당편집위원: 김경렬