

## 장반감기 우주선유발 동위원소, $^{10}\text{Be}$ 과 그 응용

김경자<sup>1,2</sup>, A. J. Tim Jull<sup>2</sup>, 유형주<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원

<sup>2</sup>미국애리조나대학교

## Long-lived cosmogenic nuclide, Beryllium-10 and its applications

K. J. Kim<sup>1,2</sup> and A. J. T. Jull<sup>2</sup>, H. J. Woo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

<sup>2</sup>NSF ArizonaAMS Laboratory, University of Arizona, USA.

**요약:** 반감기가 긴  $^{10}\text{Be}$  (Beryllium-10)은 지구의 대기뿐만 아니라, 지구의 표면 그리고 다른 행성의 대기와 표면에서도 생성된다. 가속기질량분석기술(AMS)이 1970년 후반기에 개발되면서 지질분야 연구에서 매우 중요한 추적자 중의 하나인  $^{10}\text{Be}$  측정이 가능해졌으며, 이후 지구와 지구의 시료를 이용한 다양한  $^{10}\text{Be}$  응용연구가 방사성탄소 응용연구와 함께 이루어져 왔다. 본 논문은 지구와 행성의 대기와 표면에서의  $^{10}\text{Be}$  생성에 관한 메카니즘과 지형학, 해양학, 고고학, 빙하학, 우주방사화학, 기후학, 그리고 행성학 등의 여러 학문 분야에서의  $^{10}\text{Be}$ 의 응용연구들에 대하여 정리하였으며, 아울러  $^{10}\text{Be}$  가속기질량분석을 이용한 향후 연구과제들을 고찰하였다.

**주요어:** 베릴륨-10, 우주선유발 동위원소, 우주선, 가속기질량분석

**Abstract:** The long-lived radionuclide,  $^{10}\text{Be}$ , is produced by cosmic-ray effects in the atmosphere of the earth as well as its surface and that of other planetary surfaces and atmospheres. Accelerator mass spectrometry (AMS) was developed in late 1970s, which made  $^{10}\text{Be}$  terrestrial measurements more feasible. Since then, many research applications of  $^{10}\text{Be}$  for both terrestrial and extraterrestrial applications have been developed, which parallel the wide range of radiocarbon ( $^{14}\text{C}$ ) research applications. This paper summarizes production mechanisms of  $^{10}\text{Be}$  both in the atmosphere and on the surface of terrestrial and extraterrestrial environments and also provides numerous  $^{10}\text{Be}$  research applications in the fields of geomorphology, oceanography, archaeology, glaciology, cosmochemistry, climatology, and planetary science. We also review some  $^{10}\text{Be}$  AMS research applications.

**Key Words:** Beryllium-10, Aluminum-26, Carbon-14, cosmogenic nuclide, cosmic-ray, accelerator mass spectrometry

\*Corresponding author: K. J. Kim, Tel. 042-868-3669, E-mail. kjkim@rock25t.kigam.re.kr

## 1. 서 론

우주선은 태양으로부터 오는 solar cosmic rays (SCR)와 태양계 밖에서 오는 galactic cosmic rays (GCR)로 크게 나뉘며, 대부분 고에너지 양성자가 주를 이루고, 소량의 알파선 (<10%)과 무거운 핵들로 구성되어 있다. SCR은 상대적으로 저에너지(<200 MeV)로서, 입자 반응 범위가 고체상 물질의 상부 표면이나 대기권의 수 km 상층부에 제한된다. SCR은 대규모 태양면 폭발(solar flare)시에  $^{14}\text{C}$ 이나  $^{10}\text{Be}$  생성에 기여하기도 하나 (Lingenfelter and Ramaty, 1972), 일반적으로 그 중요도는 낮은 편이다. 반면, 평균 GCR의 에너지는 수 GeV에 달하며, 우주선유발 방사성핵종 (cosmogenic radionuclides) 생성에 기여하는 양성자 에너지 범위는 0.1~1 GeV이다. GCR 양성자는 고체상 물질의 수 미터 깊이까지 침투할 수 있으며, 하드론 (양성자 및 중성자), 렙톤 (전자, 뮤온 및 중성미자) 그리고 광자 등 이차입자들을 생성한다 (Reedy and Arnold, 1972). 지표면에서 침투력이 큰 우주선 성분들은 주로 파이온과 케이온의 붕괴 생성물인 고에너지 뮤온들이며, 대기권이나 지각표면에서 이차 중성자는 우주선유발 동위원소 생성에 중요하다 (Menon et al., 1965). 지구권에서 발견되는 우주선유발 방사성핵종들은 생성 위치 또는 수단에 따라 1) extraterrestrial, 2) atmospheric, 3) *in situ*, 4) radiogenic, 또는 5) anthropogenic 등으로 구분할 수 있다. 근래, 고감도의 우주선유발 방사성핵종 측정기술인 가속기질량분석기술 (Accelerator Mass Spectrometry: AMS)은 지형학, 고기후학, 고고학 및 해양학 등 다양한 분야에 활용되고 있으며, 특히  $^{10}\text{Be}$ 은 충분히 긴 반감기 (150만년), 생성 메카니즘, 자연계에서의 거동 및 다양한 활용성으로 인해 가장 보편화된 핵종 중의 하나이다. 본 논문에서는 대기 및 지각에서의  $^{10}\text{Be}$  생성과 지질학적인 활용에 관해 기술하고자 하였다.

## 2. 우주선유발 핵종들의 생성률 변화

대기권 및 지표면에서의 우주선유발 핵종들의 생성률은 지자기 위도, 고도 및 우주선 선속에 따라 달라진다. 지구의 지자기장은 우주선의 입사방향을 휘게 하여 우주선유발 동위원소 생성률에 영향을 준다. 이러한 휨 정도는 입사각과 우주선의 자기강성(magnetic rigidity),  $r$  ( $=pc/q$ )에 의해 결정되며 (O'Brien, 1979), 여기서,  $p$ 는 운동량,  $q$ 는 입자 전하량, 그리고  $c$ 는 광속을 나타낸다. 수직 차단(cutoff) 강성은 지자극에서 가장 낮고 (Shea and Smart, 1985; 2001), 지자기적도에서 가장 높으므로, 대부분의 우주선은 지자극에 도달하며 감쇄길이(attenuation length)는 고위도에서보다 저위도 지방에서 길다 (Simpson, 1953; Desilets and Zreda, 2003).

지자기 위도 효과가 우주선유발 동위원소의 생성률에 직접적으로 영향을 주므로, 지자기장 세기의 시간에 따른 변화를 파악하는 것이 중요하다. Laj 등 (1996; 2002)은 과거 5만년간의 지자기 세기와 대기 및 태양의  $^{14}\text{C}$  함량을 보고한 바 있다. 이들은 지구의 쌍극자 모멘트가 감소하면  $^{14}\text{C}$  생성률이 증가하는 방향으로 지자기가  $^{14}\text{C}$  생성률에 영향을 주고 있음을 보이고 있다.  $^{10}\text{Be}$  생성률과 지자기 세기 사이에도 이와 유사한 경향이 있음이 심해저 퇴적물 연구를 통해 밝혀져 있다 (Carcaillet et al., 2004; Robinson et al., 1995). 지자극은 항상 변하므로, 우주방사성원소와 관련된 피폭연대측정이나 생성률을 이해하는데 있어서는 어떤 경우는 지리위도와 지자기위도간의 보정이 요구되기도 한다. 대부분의  $^{10}\text{Be}$  및  $^{26}\text{Al}$  연대측정에서 연대측정범위는 수 천 년에서 수 백 만년에 이르므로, 지자기 쌍극자모멘트의 변화에 의한 생성률의 변화를 고려해야 한다 (Frank et al., 1997; Champion, 1980; Ohno and Hamano, 1992). Masarik 등은 과거 80 만년간의 지자기 변화에 의한 우주선유발 핵종들의 생성률 보정의 필요성을 논증하였다. 저자들은 적도지방에서 4 만년에

서 80 만년 전의 생성률은 현재 값보다 10~12% 높은 반면, 40° 이상의 고위도 지방에서는 지자기 변화가 동위원소 생성에 큰 영향을 주지 못한 것으로 파악하고 있다.

위도 및 고도에 따른 우주방사성원소의 생성률은 꾸준히 연구되어 왔다. Lal과 Peters (1967), 그리고 Lal (1988)의 초기 모델은 동위원소 생성률의 산정지수(scaling factor)로 널리 사용되어 왔다. Lal이 1991년도에 제안한 3차 다항식은 지자기 위도 및 고도에 따른  $^{10}\text{Be}$ 과  $^{26}\text{Al}$ 의 생성률 계산을 가능하게 했으며, 개선된 계산식이 2000년도에 Stone에 의해 발표되었다. 또한, 지자기의 우주선 선속에 대한 비쌍극자 기여 및 측정된 감쇄 길이를 이용한 산정지수에 대한 재평가작업이 이루어졌으며 (Dunai, 2000), 지자기장의 비쌍극자 성분은 20%에 이르므로 우주선의 단기효과에는 반드시 고려되어야 한다. 새로운 산정지수와 Lal의 값은, 특히 고도가 높거나 저위도에서, 30%까지 차이가 난다. 현재, 다른 몇몇 그룹들이 지자기 위도 및 고도에 따른 우주선유발 핵종들의 생성률이나 중성자 선속에 관한 연구를 계속하고 있으며, 보다 정확한 산정지수에 관한 모델 출현이 기대 된다 (Stone, 2000; Desilets et al., 2006; Graham et al., 2005 a, b, c, 2000; Lifton et al., 2001).

### 3. $^{10}\text{Be}$ 의 대기권 생성

#### 3.1 대기권에서의 생성률

대기 중에서  $^{10}\text{Be}$ 은 우주선과 산소 및 질소 간의 핵반응에 의해 생성된다.  $^{10}\text{Be}$ 은 대기 중에서 파쇄 (spallation) 반응에 의해 생성되며 (Peters, 1955; Masarik and Beer, 1999; Nagai et al., 2000), 생성 후 1 년보다 훨씬 짧은 기간에 대기분진에 부착된 형태로 강우에 쓸려 육지나 해양에 떨어지게 된다. 대류권 (10.7 km)과 성층권 (19.2 km)에서의  $^{10}\text{Be}$  농도는 각각  $7 \times 10^6$  atoms/m<sup>3</sup>,  $1.3 \times 10^7$  atoms/m<sup>3</sup>로 알려져 있다. Nagai 등 (2000)에 의해 산정된 평균 대기중  $^7\text{Be}$ 과  $^{10}\text{Be}$  생성률

(atoms/cm<sup>2</sup>/s)은, solar minimum시, 성층권에서 0.041 ( $^7\text{Be}$ ) 및 0.018 ( $^{10}\text{Be}$ ), 대류권에서 0.027 ( $^7\text{Be}$ ) 및 0.018 ( $^{10}\text{Be}$ ) 수준이다. 대기권의 범지구적  $^{10}\text{Be}$  생성률은  $(1.21 \pm 0.70) \times 10^6$  atoms/cm<sup>2</sup>/yr로 알려져 있다 (Monaghan et al., 1985). 한편, 아이스 코어, 호소 퇴적물 및 심해저 퇴적물로부터 측정된  $^{10}\text{Be}$  생성률은  $(0.35 \sim 1.89) \times 10^6$  atoms/cm<sup>2</sup>/yr이다. Castagnoli 등 (2003)은 Solanki에 의해 제안된 열린 태양자속 (open solar magnetic flux)으로부터 태양 변조변수를 재건하였는데, 이 결과는 Dye3 빙하코어시료의  $^{10}\text{Be}$  농도와 잘 맞는 것으로 알려졌으며, 또한 기구와 우주선 (spacecraft)에서 측정한 GCR 스펙트럼으로부터 계산된 실험값들이 상호 일치함을 보였다. 이들이 추산한  $^{10}\text{Be}$  생성률은  $(0.015 \sim 0.025)$  atoms/cm<sup>2</sup>/s 이다 (Castagnoli et al., 2003).

대기 중의  $^{10}\text{Be}$  생성률은 지구의 자기쌍극자장과 역관계를 가지고 있다. 이 관계는 퇴적물에서의  $^{10}\text{Be}$ 의 함량과 쌍극자장의 경사각 변화와의 상관성 (Frank et al., 1997; Frank, 2000; Masarik et al., 2001; Laj et al., 2000), 그리고 해저퇴적물에서의  $^{10}\text{Be}$  함량과 고지자기 세기와의 상관성을 통해 실증되었다 (Carcaillet et al., 2004; McHargue and Donahue, 2005).

#### 3.2 대기권 $^{10}\text{Be}$ 화학처리

McHargue 등은 퇴적물에서의  $^{10}\text{Be}$  화학처리법을 상세히 논하고 있다. 약 1 g의 퇴적물을 25% 아세트산과 하이드록실아민-염산 용액에 녹여, 육성 (terrigeneous) 성분으로부터 자생 (authigenic) 성분을 분리하며, 이 자생성분이 해수의 조성을 더 나타내고 있다 (McHargue et al., 2000). 이 성분은 대부분 교환성 이온, 탄산염, Fe-Mn 수산화물 등으로 구성되어 있으며, 침출액은 원소분석과  $^{10}\text{Be}$  용매추출에 사용된다. Be 부분은 Be(OH)<sub>2</sub> 형태로 침전 되었다가 BeO로 연소된다. 바탕시료(blank) 및 해양시료에서의  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  비율은 각각  $1 \times 10^{-14}$  및  $1 \times 10^{-11}$  수준이며, 이 때 측정오차는 대개 2-3% 정도이다. 황사, 강우 및 토양에 대한 화학처리 방법들

은 다음의 참고자료에 기술되어 있다 (Gu et al., 1996; Graham et al., 2003; Maejima et al., 2005).

### 3.3. 대기권 $^{10}\text{Be}$ 활용

#### 3.3.1 해양퇴적물층의 $^{10}\text{Be}$

서부 북극해의 빙하기와 해빙기에서의 퇴적물은, 방사성탄소 측정결과, 각각 0.5 cm/kyr와 1~2 cm/kyr로 밝혀졌다 (Darby et al., 1997). 퇴적물에서 총 퇴적물 질량에 대한  $^{10}\text{Be}$  자생성분 함량 비는 산소동위원소 곡선과 간접적으로 관련되어 있음을 최근 연구결과가 보여주고 있다 (McHargue and Donahue, 2005). 예를 들어,  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  비가 낮은 것은 해양  $^{10}\text{Be}$  보다 육상  $^9\text{Be}$  공급원이 더욱 증가했음을 의미한다. Blake Outer Ridge (DSDP site 72)에서 채취한 해양 퇴적물 층의  $^{10}\text{Be}$ 과  $\delta^{18}\text{O}$ 의 상관성은  $^{10}\text{Be}$ 에 대한 기후효과 뿐만 아니라 우주선 효과도 보여주고 있다. 연대가 보정된 퇴적물에서의  $^{10}\text{Be}$ 의 변화와 1에서 10까지의 기후단계에 대한 산소동위원소 층서학이 Aldahan 등에 의해 1977년도에 소개되었다. 과거 35만년간의 북극해 퇴적물로부터 얻은  $^{10}\text{Be}$ 자료는 간빙기/빙하기 기후 사이클과 잘 일치하는 경향을 보이고 있으며, 낮은 퇴적/축적률로 인해 간빙기의 퇴적률이 빙하기의 경우보다 낮음을 보여 주고 있다 (Aldahan et al., 1997).

노르웨이해로부터 Fram해협을 거쳐 북극해까지 횡단선상에서의 4개의  $^{10}\text{Be}$  측정기록을 살펴보면, 간빙기에서는 농도가 높고 빙하기에서는 농도가 낮음을 보여주고 있다. 기후단계 경계에서의  $^{10}\text{Be}$  농도의 높낮음의 급격한 대조는 기후와 퇴적변화와 관련된 독립적인 대용물(proxy)이므로 퇴적시료의  $^{10}\text{Be}$  층서연대학에 적용할 수 있다 (Eisenhauer, 1994).

또한, Carcaillet 등은 포르투갈 해안에서 떨어진 곳의 퇴적시료로부터 지난 30만년 이상의 고분해능  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  자료를 얻었다. 두 가지 시편에 대한  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  자료와 저생동물의  $\delta^{18}\text{O}$ 의 자료 비교결과는 쌍극자모멘트 저하가 간빙기

episode말기와 연관되어 있을 가능성을 제시하고 있다 (Carcaillet et al., 2004). 2005년 최근 연구에서 McHargue와 Donahue (2005)는  $^{10}\text{Be}$ 과 산소동위원소간에 밀접한 연관성이 있음을 밝히고 있다. 이러한 기후와  $^{10}\text{Be}$  침적간의 연관성은  $^{10}\text{Be}$ 이,  $\delta^{18}\text{O}$ 과 같이 또는  $\delta^{18}\text{O}$  대신에, 해양퇴적에 대한 기후의 영향연구에 활용될 수 있음을 시사하고 있다.

다른 고려대상들로는  $^{10}\text{Be}$  유입량과 밀접하게 관련되어 있는 탄산염 유입량과  $\delta^{18}\text{O}$  측정이 곤란한 비탄산염 퇴적물들이다. 아울러, Be의 두 동위원소들은 서로 발생원이 다르므로, 퇴적물 내에서  $^{10}\text{Be}$ 과  $^9\text{Be}$ 의 관계는 대기와 지상의 발생원들로부터의 상대적인 기여도와 해양에서의 교반시간의 함수가 된다. 심해저로부터 얻은 고지자기 세기에 대한 기록은 최근 발표자료에 잘 기술되어 있다 (Valet, 2001; Guyodo et al., 2000; Guyodo and Richter, 1999). 그렇지만, 대기 중의 생성변화가 무시될 정도로  $^{10}\text{Be}$  침적에 대한 기후영향이 클 수 있으므로 이는 반드시 고려 되어야한다 (Frank et al., 1997; Kok, 1999).

#### 3.3.2. 호수 퇴적물과 황토내 $^{10}\text{Be}$

현재, 호수퇴적물 연구에 대한  $^{10}\text{Be}$  활용 실적은 미미한 실정이다. 최근, Arizona대 연구원들은 Malawi호, Bosumtwi호(아프리카), Qinghai호(중국)와 Potrok Aike호(아르헨티나) 등 전세계 몇몇 호수 퇴적물층의  $^{10}\text{Be}$  연구를 개시한 바 있으며, 주로 고기후 및 고환경변화 연구가 대상이 된다. 해저퇴적물에 대한 전반적인 자료 중 최저  $^{10}\text{Be}$  농도는, 지자기장 세기가 최대일 때 대기 중 감쇄에 의해, 유사하게 나타나는 현상으로부터,  $^{10}\text{Be}$ 이 호수퇴적물 연대측정에 활용될 수 있음을 알 수 있다. 비록 호수퇴적물로부터의  $^{10}\text{Be}$  측정은 제한적인 지역에 관한 것이나  $^{10}\text{Be}$  층서학과 다른 화학적 추적자들 및 고지자기 세기를 같이 측정함으로써 상대적으로 장기간의 지역적 기후변화를 알 수 있다.  $^{10}\text{Be}$  층서학은 호수의 수문학적 균형, 퇴적률, 풍성(eolian) 침적과 아울러 지역적 고기후 변화 등 다양한 결정적인

단서들을 제공해 준다.

뉴질랜드 Wanganui 분지의 퇴적상에 대한 흥미로운 연구가 Graham 등 (1998)에 의해 이루어졌으며, 플라이오-플라이스토세 (Plio-Pleistocene)기의  $^{10}\text{Be}$  톱(spike) 현상은 빙상(ice sheet) 용해/생물체에 의한 제거 또는 지자기 세기 변화에 의한 것이 아니고, 해침(transgression)시 해저퇴적물의 결핍(starvation)에 기인함을 확인할 수 있었다. 농축된  $^{10}\text{Be}$ 농도는 바탕값의 대략 10배이다. 이는 국부적인 범람 표면의 추정지역에서 각 사이클의 바탕값을 약간 상회하는 수준에서 연달아 나타난다. Hodell 등 (2001)은 산소 동위원소와 석고침전(gypsum precipitation)을 이용하여 Maya Lowlands에서의 한발 주기에 대한 흥미로운 연구를 수행하였다. 연구결과 주(main) 주기는 208년으로 추산되었으며, 이는 태양활동 변화를 반영하는 우주선유발 핵종( $^{14}\text{C}$  and  $^{10}\text{Be}$ ) 생성 기록상의 주기인 206년과 유사한 결과이다.  $^{10}\text{Be}$ 은 호수계의 고수문학적 균형을 이해하는데 필요한 주요 동위원소중의 하나임이 틀림없으므로, 고고학적 가치가 있는 지역의  $^{10}\text{Be}$  퇴적층서학은 고환경 및 고기후학 연구 분야에서 잠재적인 연구영역중의 하나가 될 수 있을 것이다 (Hodell et al., 2001).

Gu 등 (1996)은 중국의 황토와 적점토(red-clay)의 5백만년의  $^{10}\text{Be}$  기록에 대해 연구하였다. 이 연구에 따르면, 적점토에는 모델 총적률이 중국의 Lingtai와 Baoji의 경우에 상부 고토양에 대하여 각각 5.8 과 8.7 m/Myr로 밝혀졌다. 이 연구는 토양성숙과정과 관련된 것으로  $^{10}\text{Be}$ 의 분포는 토양의 크기와 관여되며,  $^{10}\text{Be}$ 의 농도는 자생광물의 지역이 아래로 내려가는 것과 상관된다. 황토시료의 경우, 침적지에서의  $^{10}\text{Be}$  함량에는 분진원 지역의  $^{10}\text{Be}$ 이 상당량 포함되어 있다. 한편, 빙하기의 평균유역강우량이 간빙기 평균값의 약 2/3 가량으로 추산하고 있다. 아리조나대와 중국 연구원들은 Luochuan 지역의 황토를 연구하여, 8 만년 정도의  $^{10}\text{Be}$  생성률을 얻었으며, 이를 이용하여 지자기장 세기변화에 관한 고분해능 기록을 생산할 수 있다 (Zhou et al., in press). 이 지자기 세기기록은,

Guyodo와 Valet (1996) 그리고 Laj 등 (2002) 에 의해 퇴적층의 잔류자기측정에 의해 구해진 SINT200과 NAPIS75와 매우 유사하다. 황토에 대한 기록은 지난 260만년에 걸쳐 있으므로 이에 관한 연구는 제4기 전체에 대한 고분해능의 지자기세기기록에 관한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

### 3.3.3. 강우와 토양의 $^{10}\text{Be}$

1980년도 일년간 미대륙의 일곱 지역에서 강우를 조사한 바,  $^{10}\text{Be}$  유입량은  $(1.38 \pm 0.36) \times 10^6 \sim (3.96 \pm 0.35) \times 10^6$  atoms/cm<sup>2</sup>/yr 이었다 (Monaghan et al., 1985). 하와이의 경우 빗물에서의  $^{10}\text{Be}$  농도는  $1.9 \times 10^3 \sim 8.94 \times 10^4$  atoms/g 이었으며, 온대지방의 경우 평균  $1.53 \times 10^4$  atoms/g 으로 측정되었다.

Monaghan 등은 1985년도에, 표토와 하천 퇴적물에서의  $^{10}\text{Be}$  농도는  $10^7 \sim 10^9$   $^{10}\text{Be}$  atoms/g 정도임을 보이고 있으며, 연평균강우량과  $^{10}\text{Be}$  침적률이 상호 선형관계에 있음을 밝히고 있다 (Maejima et al., 2005).

2002에서 2003년도에 Tokyo와 Hachijo 섬에서의  $^7\text{Be}$ 과  $^{10}\text{Be}$ 의 계절별 변화는 유사한 경향을 보였으며, 피크값은 4월과 10월에 나타나고 있다 (Yamagata et al., 2005). 특히 성층권-대기권 교반이 일어나는 4월에는  $^{10}\text{Be}/^7\text{Be}$  동위원소비의 피크값이 나타난다. 여름(7~8월)에는  $^7\text{Be}$ 과  $^{10}\text{Be}$  동위원소 농도와  $^{10}\text{Be}/^7\text{Be}$  동위원소비 모두 낮은 값을 보인다. 도쿄의 대기분진 조성은 주변 토양의 조성과의 거의 동일하므로, 도쿄의 경우 재부양 토양오염에 영향을 받는다 할 수 있다. Yamagata 등은 대기 분진중 알루미늄 농도를 토대로, 재부양 토양오염에 의한  $^{10}\text{Be}$  농도 증가분은 약 30% 정도임을 밝힌 바 있다.

Maejima 등은 일본 남서부의 Kikai섬의 육상 산호초단구 (raised coral reef terrace)에서의 6개 토양시료 중의  $^{10}\text{Be}$  농도가  $(0.80 \sim 7.17) \times 10^9$  atoms/g이라고 보고한 바 있다. 이 섬의 2000~2002년도 대기로부터의 연가  $^{10}\text{Be}$  유입량은  $(2.0 \sim 3.5) \times 10^6$  atoms/cm<sup>2</sup>/yr 수준이다. 강우에 의한  $^{10}\text{Be}$  성분과 토양에 축적되는  $^{10}\text{Be}$  연

간 유입량으로부터 추산한 토양의 최소 절대연대는 8~136 kyr에 달한다 (Maejima et al., 2005).

남반구 남위 36도에서 45도 사이에서  $^7\text{Be}$  및  $^{10}\text{Be}$  농도가 각각  $(1.2\sim 14)\times 10^7$  atoms/kg과  $(2.1\sim 2.9)\times 10^7$  atoms/kg 정도임을 Graham (2003) 등이 보인 바 있다. 이 결과는 1986~1994년도에 미국 중위도를 가로질러 채취한 빙물에 대한 자료와 유사하다. 뉴질랜드 북부 Leigh와 Gracefield 지방의  $^7\text{Be}$ 과  $^{10}\text{Be}$  연간 유입률은 각각  $15\times 10^9$  atoms/m<sup>2</sup>와  $27\times 10^9$  atoms/m<sup>2</sup> 인 반면, 남부 Denidin 지방의 경우 낮은 강우량으로 인해  $9\times 10^9$  atoms/m<sup>2</sup>와  $19\times 10^9$  atoms/m<sup>2</sup>로서 현저히 낮은 값을 보인다. Graham 등은 (2003)  $^7\text{Be}/^{10}\text{Be}$  비율이 0.47~0.61 수준으로 미국에서의 수치 (0.69~0.78) 보다 낮은 값을 지적하고 있으며, 이는 뉴질랜드 강우시료에서, 원래 대기  $^{10}\text{Be}$ 성분에 재부유 분진이 가해졌기 때문이다. 세 지역의  $^7\text{Be}/^{10}\text{Be}$  비율이 0.70 (Leigh), 0.65 (Gracefield) 및 0.50 (Dunedin)라는 사실은 흥미로운 것이며, 이는 뉴질랜드 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 Be 동위원소들의 대기 중 체류시간이 증가하여 동위원소 비율이 감소하기 때문이다. 뉴질랜드 대기 중 동위원소들의 대기중 평균 체류시간은 77~109일 정도이며, 늦은 봄-초여름 기간 중 성층권 공기의 계면(성층권/대기권)으로의 이동 때문에 겨울 보다 여름에 낮은 값을 보인다.

남극 Roberts Massif의 36 cm 깊이의 토양 연대 깊이 분포에 관한 연구가 Graham 등 (1997)에 의해 이루어졌다. 시료채취는 동쪽 남극빙상 가장자리의 고도 2700 m 지점에서 이루어졌으며, 이 지점은 수 백 만년 정도의 매우 장기간 동안 얼음이 없었던 것으로 여겨지는 곳이다. 연구결과, 토양의 최소연대는 1200만년으로 나타났으며, 이는 Meserve 빙하에 덮인 토양과 연관된 화산 침적물, Scoria에 대한  $^{40}\text{Ar}-^{38}\text{Ar}$  연대측정결과인 800만년보다 상당히 오래된 것이다.

### 3.3.4. 빙상의 $^{10}\text{Be}$

Taylor Dome 빙상에서의  $^{10}\text{Be}$ 자료와  $\delta^{18}\text{O}$ ,

분진량 그리고 중수소 농도를 비교해 보면,  $^{10}\text{Be}$ 과 중수소농도와의 밀접한 연관성을 알 수 있다 (EPICA, 2004). 빙상에서,  $^{10}\text{Be}$ 농도에 대한 기후효과는 산소동위원소 자료, 분진 및  $^{10}\text{Be}$  농도 간의 연관성을 통해 관찰할 수 있다 (You et al., 1985; EPICA, 2004). 분진량은 건조 정도와 냉각기의 바람의 강도에 따라 달라지며, 얼음 내 분진량이 증가하면 얼음입자 성장률이 감소하게 된다. 결과적으로 평균 입자径의 현저한 감소는 간빙기에서 빙하기로의 전이를 의미한다. Steig (1996)는 산소동위원소 측정을 통해 남극의 Taylor Dome 빙상에 대한 연구를 수행하여, 마지막 간빙기 동안의 기후변동을 드러낸 바 있다. 이 연구는  $^{10}\text{Be}$ 분석이 Taylor Dome에서의 축적물 이력(554m)에 대한 지화학적 방법이 됨을 논증하고 있다. 고분해능 측정이 shallow fern (치밀하진 않은 얼음) 빙상과 눈구덩이에서 이루어져,  $^{10}\text{Be}$  농도와 습식-건식 침적기구와 강설 축적물간의 관계를 설정하는데 활용되었다. 과거 75 년간의 침적에 관한 이론과 실험적인 변화 추이에 대한 비교가 이루어져,  $^{10}\text{Be}$  침적률과 범지구적 생성물간의 관계를 설정하는데 활용되었다. 연구결과는 지자기적으로 변조된 생성물은 Taylor Dome에서의  $^{10}\text{Be}$  침적률에 큰 영향을 주지 못했음을 지적하고 있다. 비록 생성물에 관한 태양 변조는 수세기에 걸친 시간대에서는 중요하나, 더 긴 시간에서는 강설 침적률이 빙상의  $^{10}\text{Be}$  농도결정에 주된 요인이 된다는 것이다. Taylor Dome 빙상에 대한 결과는, Dry Valley, Trans Antarctic Mountains 및 서부 Ross 해로부터의 육상 및 해상 지질학적 기록을 보완하면서, 과거 13만년 간의 지역적 기후에 관한 새로운 정보를 제공한다고 할 수 있다 (Steig, 1996).

### 3.3.5. 기타 $^{10}\text{Be}$ 연대측정의 활용

대기 중의  $^{10}\text{Be}$ 을 이용한 연대측정 기술은 토양, 망간단괴, 산호, 오팔, 동굴암석 및 퇴적물 등 다양한 대상에 대해 개발되었다.  $^{10}\text{Be}$ 의 반감기가 길며 자연계에서 화학적인 유용성 때문에 자연계의 다양한 물질에 대한 연대측정 수단이

되었다. 1970년대 말 AMS기술개발 이후, 해양 퇴적물 및 망간단괴에 대한  $^{10}\text{Be}$  연대측정이 활용되었다 (Tanaka and Inoue, 1979; Bourles et al., 1989; Segl et al., 1984; Sharma and Somayajulu, 1982; Moore et al., 1980). 근래, 일본의 산호초 토양 연대측정에  $^{10}\text{Be}$ 이 활용되었으며 (Maejima et al., 2005), Lal 등은 2005년도에 산호의 침식률을 최초로 연구했으며, 매우 오래된 산호 연대측정법을 확립하였다.  $^{10}\text{Be}$  농도는  $10^4 \sim 10^8$  atoms/g 이었으며, 피폭연대 (exposure age)는 125~200 kyr의 좁은 범위로서,  $^{10}\text{Be}$  대부분이 현장에서 (*in situ*) 생산된 것이 아니라 해수에서 온 것이라는 것을 말해준다. 다섯 개의 산호시료에 대한  $^{36}\text{Cl}$ 과  $^{26}\text{Al}$ 측정결과 침식률이  $(7.18 \pm 2.14) \times 10^{-4} \sim (4.75 \pm 0.21) \times 10^{-3}$  cm/yr 정도로 측정되었다. 따라서, 이 방법이 연대측정이나 해수에서의 침식률 산정에 중요한 수단이 될 수 있으며, 토양이나 생물기원 물질내  $^{10}\text{Be}$  흡수물질들은 연대측정과 고기후와 고지자기 변화 연구에 활용될 수 있음을 보여 준다. 또한,  $^{10}\text{Be}$ 과 다른 화학적 추적자의 고기후변화나 고지자기 세기변화에 대한 층서학적 정보를 제공할 수 있다 (D. Lal, private communication).

#### 4. $^{10}\text{Be}$ 의 현장(*in situ*) 생성

##### 4.1. $^{10}\text{Be}$ 의 현장 생성률

우주선유발 동위원소들의 현장생성은 주로 이차 중성자의 지각과의 반응에 의존한다. 과거에는,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  및  $^{41}\text{Ca}$  등 몇몇 우주선유발 동위원소들이 지형학연구에 활용되어 왔다. 지난 수 십 년간 석영 내의 우주선유발  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{26}\text{Al}$  생성에 관한 연구가 이루어졌으며, 이들 동위원소들은 지질학적 시간과 고환경 연구에 요구되는 표면피폭연대 측정에 중요하다. 특히,  $^{10}\text{Be}$ 과  $^{26}\text{Al}$ 는 지질학적으로 가장 널리 활용되는 동위원소로서, 모두 암석 내에 흔하고 부식률이 매우 낮은 석영 내에서 생성된다. 산소로부터의  $^{10}\text{Be}$  생성, 그리고 Si으로부터의  $^{26}\text{Al}$  생

성률이 가속기 반응단면적 측정실험 (Sisterson et al., 1997; Reedy et al., 1994), 전산모사 (numerical simulation) (Masarik and Reedy, 1995), 그리고 암석조사를 통해 연구되었다 (Kubik and Ivy-Ochs, 2004).

이들 세가지 동위원소들은 석영내에서 중성자 파쇄반응 뿐만 아니라, 뮤온유발반응에 의해서도 생성된다. 중성자유발반응은 표면으로부터의 깊이에 따라 지수함수적으로 감소하므로,  $^{10}\text{Be}$  생성이 지각의 상부 수 미터 깊이에 제한된다 (Brown et al., 1994). 따라서, 일정한 깊이에 있는 시료의 경우 연대산출시 깊이 보정이 따르게 된다. 그러나, 뮤온의 경우 중성자에 비해 침투력이 크므로, 침식률이 10 m/Myr보다 큰 경우, 뮤온유발  $^{10}\text{Be}$ 생성이 중요해 지게 된다 (Nishiizumi et al., 1994). 뮤온유발 동위원소들의 이러한 특성을 고려하지 않으면, 특히 이전 피폭기간이 긴 시스템이 최근에 피폭되거나 굴착 깊이가 얇은 경우, 표면 피폭연대 측정상을 바르지 않은 결과를 낼 수 있게 된다. 이와 관련된 측정오차는 뮤온이 상대적으로 중요한 역할을 하는 동위원소나 표적조성을 갖는 경우 더욱 더 커지게 된다 (Stone et al., 1998). 따라서, 차폐 깊이가  $600 \text{ g/cm}^2$ 를 넘는 경우 중성자와 뮤온의 상대적인 기여 정도를 면밀히 조사해야 한다. 뮤온유발 동위원소 농도가 파쇄에 의한 표면농도보다 침식에 덜 기여함을 고려하는 것이 중요하며, 이는 뮤온유발 동위원소 농도구배가 중성자파쇄에 의한 것보다 가파르지 않기 때문이다 (Stone et al., 1998). 현재, 가용한 중성자 반응단면적은 제한적이며, 고속 뮤온에 대한 자료는 없으므로 이들에 의한 반응량을 어렵히는 데는 불확실성이 따르는 실정이다.

지하에서의 총 동위원소 생성은 중성자와 뮤온유발 반응뿐만 아니라 방사선유발 (radiogenic) 반응에도 기인한다. 지하 깊이  $x$  ( $\text{g/cm}^2$ )에서의 연간 피폭암석 내에 생성되는 우주선유발 동위원소 수는 다음의 식으로 나타낼 수 있다 (Brown et al., 1995).

$$N(t, x) = \{ \{P_o / (M\varepsilon + \lambda) \} [e^{-Mx}] [1 - e^{-t(M\varepsilon + \lambda)}] \}_n + \{ \{P_o / (M\varepsilon + \lambda) \} [e^{-Mx}] [1 - e^{-t(M\varepsilon + \lambda)}] \}_\mu + \{ \text{Production by U and Th} \}_r \quad (1)$$

여기서, P는 암석표면에서의 생성률 (atoms/g/yr), M은 감쇄상수, ε은 침식률, 그리고 λ는 동위원소 붕괴상수이다. 첫 번째와 두 번째 항은 중성자와 뮤온유발 반응에 의한 생성률이며, 총 생성률에서 뮤온과 여타 방사선유발 성분을 제하고 남은 중성자유발 성분만으로서 신뢰할만한 표면피복연대를 알아낼 수 있다. 석영 내의 방사선유발 <sup>10</sup>Be생성에 관한 연구가 이루어진 바 있으며 (Sharma and Middleton, 1989; Brown et al., 1991; Nishiizumi et al., 1989), Th이나 U 함량이 수십 ppm이상이 되는 경우 <sup>10</sup>Be 생성에 상당히 기여하게 된다.

뮤온유발에 의한 이들 동위원소 생성률은 중성자 유발성분의 수 %에 이르는 것으로 알려져 있다 (Gosse and Phillips, 2001; Heisinger et al., 2002). 이는, 식 1에서, 중성자와 뮤온에 대한 감쇄길이 165 및 300 g/cm<sup>2</sup>를 적용하여 계산할 수 있다. 가속기 실험에 의한 <sup>10</sup>Be의 중성자에 의한 생성률과 뮤온에 의한 생성률을 보면 이들의 생성률은 거의 비슷하다. 표면에서 측정된 감쇄길이가 중성자 감쇄길이 보다 길면 이는 뮤온의 기여도가 있음을 의미한다. 대기중 반응 길이가 160~1030 g/cm<sup>2</sup> 범위에서 뮤온의 감쇄길이는 247 g/cm<sup>2</sup>로 알려져 있다 (Lal, 1958). 그러나, 암석중 10 m 깊이에서 감쇄길이는 1,500 g/cm<sup>2</sup>로 측정되었다 (Middleton and Klein, 1987). Braucher 등 (2003)은 브라질 Mato Grosso 지역에서 2000~5000 g/cm<sup>2</sup> 깊이 범위에 대한 <sup>10</sup>Be 측정결과, 뮤온의 감쇄길이는 (5,000±300) g/cm<sup>2</sup>임을 보이고 있다. 뉴질랜드 Macraes 금광에서 <sup>10</sup>Be과 <sup>26</sup>Al에 대한 광범위한 (183 m) 깊이 분포가 얻어졌으며 (Kim and Englert, 2004), 본 논문에서 표면과 심부까지 측정된 감쇄길이 분포를 보이고 있다.

우주선 입자에 대한 감쇄길이는 다음의 식으로부터 얻을 수 있다.

$$P_a = P_b * e^{(b-a)/L} \quad (2)$$

여기서, P<sub>a</sub> 및 P<sub>b</sub>는 깊이 a, b (in g/cm<sup>2</sup>)에서의 생성률을, L은 감쇄길이를 의미하며 (Brown et al., 1991), 감쇄길이의 역수는 감쇄상수, M이 된다. 감쇄길이는 우주선 중성자 스펙트럼의 변이성 때문에 지자기 위도와 고도의 함수가 된다. 지자기 저위도에서는, 지자기적 차단 에너지가 10 GeV나 그 이상이므로, 감쇄길이 길다. Simpson (1951)은 100 MeV 이상의 에너지를 갖는 전방향(omni-directional) 핵자들을 감지할 수 있는 중성자 모니터로서 감쇄길이를 측정하여, 현저한 위도 의존성을 확인하였다. 핵자 세기의 위도효과는 대기 깊이 600 g/cm<sup>2</sup> 이상에서는 깊이에 무관 하며, 이 깊이에서는 감쇄길이가 위도와 무관 하다 (Simpson, 1953; Desilets and Zreda, 2003).

#### 4.2. 현장 생성 <sup>10</sup>Be 화학처리

현장 생성 <sup>10</sup>Be 처리를 위한 화학처리법으로는 Kohl and Nishiizumi의 표준방법이 사용된다 (Kohl and Nishiizumi, 1992). 시료는 150~300 μm 크기로 분쇄하는데, 화강암의 경우, 운모와 장석의 함량이 높으므로 별도의 정화 과정이 요구된다. 화강암 시료로부터 다량의 장석을 제거하기 위해서는 상온에서 4시간 가량의 약한 불산 (48% 불산:순수:시료=1:5:1) 교반처리(100~150 rpm)가 요구 된다 (Kim and Sutherland, 2004).

암석으로부터 순수한 석영을 얻기 위해서는 다음의 두 단계 정화과정이 요구된다. 첫 번째는 탄산염, 철분과 유기성분을 제거하는 것이다. 분쇄된 시료를 6N 염산과 소량의 과산화수소를 가해 비등점 이하에서 12시간 가량 침출시킨 다음 탈이온수로 세정하고 건조 시킨다 (Kohl and Nishiizumi, 1992). 두 번째 공정에서는 석영의 순도와 수득률을 극대화하면서, 다른 모든 규산



염들, 특히 운모와 장석을, 제거한다. 이를 위해, 시료는 1% 불산, 1% 암모니아수와 순수의 혼합 용액에서 9시간 동안 90°C에서 처리하며, 최종 탈이온수 세정과정으로 종료된다. 이 과정은 모든 불순물이 제거될 때까지 반복된다.  $^{10}\text{Be}$ 과  $^{26}\text{Al}$  모두 석영 내에서 생성되므로, 석영이 용해된 다음, Be과 Al은 양이온 및 음이온 크로마토 그래피에 의해 다른 이온들로부터 분리된다. 최종, Be은  $\text{Be}(\text{OH})_2$  형태로 침전되며, 이 수산화물은 750°C에서 산화되어 AMS측정에 사용된다.

#### 4.3. 표면 피폭연대 계산

표면 피폭연대측정기술로서 피폭연대를 추정하기 위해서는 생성률, 지자기 위도 의존성, 고도 의존성, 침식률과 지형학적 조건 등 몇 가지 변수들이 요구되며, 신뢰할만한 피폭연대를 얻기 위해서는 이러한 변수들을 적절히 제어할 수 있어야 한다. 우주선유발 동위원소들의 현장 생성률을 결정하는데도 이 기술이 활용될 수 있으며, 이 경우, 지속적인 피폭, 해당 동위원소 초기량이나 이송량이 없을 것, 침식효과가 무시될 것 등의 조건이 전제되어야 한다.

방사성핵종을 이용한 연대측정은 시간  $t=0$ 에서의 초기농도와 관련되며, 이 값은 암석의 특정 표적원소에 대한 우주선 조사에 의한 생성률을 아는 경우 어렵이 가능하다. 시간  $t$ 에서의 방사성동위원소 농도  $C(t)$ 는,

$$C(t) = P/\lambda (1 - \exp(-\lambda t)) \quad (3)$$

로 기술되며,  $\lambda$ 는 붕괴상수로서  $\lambda = \ln 2/t_{1/2} = 1/\tau$  (평균 수명)이다. 식 (3)으로부터, 방사성동위원소 시료의 나이는 다음 식과 같다 (Tuniz et al., 1998)

$$T = \tau \ln(C_0/C) \quad (4)$$

여기서,  $C_0$ 는 초기 농도이다. 그러나, 생성률, 우주선 선속 변화 또는 시료 위치 등 다양한 변화 요인으로 인해 참 나이는 식 (4)와 같은 단순한 식의 결과와는 다를 수 있다. 피폭연대는 방사성

동위원소 생성과 아울러 침식이나 붕괴에 의한 손실과 관련되므로, 우주선유발 동위원소에 대한 피폭연대는 다음과 같이 쓸 수 있다 (Lal, 1991).

$$T_{\text{exp}} = -\ln[1 - (\lambda + \rho \varepsilon/\Lambda) * (C/P)] / (\lambda + \rho \varepsilon/\Lambda) \quad (5)$$

여기서,  $\varepsilon$ 은 침식률( $\text{cm/yr}$ ),  $\rho$ 는 밀도( $\text{g/cm}^3$ ), 그리고  $\Lambda$ 는 우주선 흡수길이( $\text{g/cm}^2$ )이다. 침식률이 크거나 반감기가 짧은 경우 유효연대범위가 제한된다 (Tuniz et al., 1998).

#### 4.4. 활 용

##### 4.4.1. 피폭연대측정기술

가장 널리 활용되는 우주선유발 핵종기술은 현장  $^{10}\text{Be}$  피폭연대 측정기술이다.  $^{10}\text{Be}$ 과  $^{26}\text{Al}$  모두 지구상에서 가장 흔한 광물인 석영 내에 생성되고, 반감기가 상대적으로 길기 때문에, 피폭연대측정기술들이 해안단구, 지진, 해빙연대, 육교 (land bridges), landscape evolution 및 산사태 등의 연대측정이 요구되는 지질학적 활용 분야에서 잘 개발되어 있다 (Tuniz et al., 1998). 피폭연대 측정기술에서 한 발 나아가면, 퇴적물 또는 암석의 매몰연대를 알고자 하는 매몰연대측정(burial dating)과 같은 더욱 정교한 연대측정기술이 종종 요구 된다 (Granger and Smith, 2000). OSL (optically stimulated luminescence) 연대측정과 유사한 개념으로, 발굴 당시의  $^{10}\text{Be}$ 과  $^{26}\text{Al}$ 의 최종 농도로부터 매몰 기간을 추정하게 된다. 이러한 매몰연대측정은 정밀한 매몰연대를 알기 위해 수치해석이 요구되는 등 다소 어려움이 따른다 (Granger and Muzikar, 2001; Partridge et al., 2003). Kim과 Imamura 등은 Bering해 육교연구에 대한 이와 같은 시료 사용가능성을 조사하기 위해 수중 매몰 암석을 조사하였으나, 이를 위해서는 해수면 증가후의 수중  $^{10}\text{Be}$  생성이 고려되어야 함을 알 수 있었다 (Kim and Imamura, 2004). 근래, 기후변화는 극빙의 용해 및 부피 감소를 초래하고 있으며, 새로운 수로가 형성되고, 극빙 용해속도

가 급증하고 있다.

#### 4.4.2. 해빙 연대측정

빙하진전(glacial advance) 연대측정은 피폭 연대측정의 좋은 본보기이다. 빙퇴석(moraine boulders) 또는 암상 표면의  $^{10}\text{Be}$  및  $^{26}\text{Al}$ 를 이용함으로써, 피폭연대와 침식률을 얻을 수 있다. 피폭표면의 구조가 시간에 따라 바뀌면 국부적인 침식률이 변하고 피폭이력이 복잡해지므로, 연관된 침식률로서는 최저 또는 최대의 피폭연대가 얻어진다. 평균 피폭연대를 알기 위해 수십 개의 빙퇴석을 사용하는 것 보다, 낮은 깊이의 분포를 이용하여 피폭연대와 침식률을 얻는 방법이 바람직할 수 있으며, 이 경우, 적절한 수치 해석 모델 사용이 권장된다.

마지막 빙하진전 또는 마지막 빙하 최성기(last glacial maximum: LGM) 연구의 주요 예로는, 뉴질랜드 북서 Nelson에서의 마지막 빙하진이 연구 (Shulmeister et al., 2005), Schaefer의 뉴질랜드에 대한 이와 유사한 연구 (Schaefer et al., 2006), 북극 Wrangle섬에 대한 Karhu의 마지막 빙하진전연구 (Krhu et al., 2001) 그리고, Bringer의 캐나다 북극에서의 LGM 빙상역학 연구 등을 들 수 있다 (Bringer et al., 2003). Schaefer (2006)는 중위도 각지의  $^{10}\text{Be}$  피폭연대들을 비교하여, 뉴질랜드에서의 LGM의 거의 동시대의 inter-hemispheric 종말을 확인하였으며, 이들  $^{10}\text{Be}$  피폭연대 평균값은  $(16.3 \pm 1.2) \sim (19.3 \pm 1.8)$  kyr이다. 극빙에 대한 동위원소 기록은 마지막 빙하기 종반에 범세계적인 온난화가 비동시적으로 일어났음을 암시하고 있는 반면,  $^{10}\text{Be}$  피폭연대 측정 자료는 대규모 중위도 LGM 빙하 후퇴가 남반구-북반구 할 것 없이 동시에 개시되었음을 보여 주고 있다. 또한, 이 연구는 후퇴시기가 온도와 북극빙상내의  $\text{CO}_2$ 양의 증가 개시시점과 일치함을 확인하고 있다 (Schaefer, 2006). 남반구에서 보면, 뉴질랜드 Cascade Plateau ( $44^\circ\text{S}$ )의 마지막 해빙연대가 (Sutherland et al., 2006) 아르헨티나 Lago Buenos Aires ( $46.5^\circ\text{S}$ )에서의 값과 매우 유사하다 (Douglass et al., 2006). 이 연대는

뉴질랜드와 아르헨티나에서 각각  $(13.8 \pm 1.7) \sim (22.4 \pm 2.5)$  kyr와  $(14.4 \pm 0.9) \sim (22.7 \pm 0.7)$  kyr의 범위를 보인다. Douglass (2006) 등은  $(14.4 \pm 0.9)$  kyr에서의 LGM은 남극의 차별화된 특성으로서, 남극 Cold Reversal과 동시대이며 한냉기 (Younger Dryas Chronozone)보다 앞선 사건임을 지적하고 있다.

#### 4.4.3. 매몰연대 및 수중피폭연대 측정

일본열도에서의 인간 이동과 극동아시아 신석기 문화의 근원과 전파에 관한 새로운 연구가 수중 암석시료 중의 현장 우주선유발 핵종을 이용하여 이루어 졌다. 예비연구는, 지난 빙하기에서의 한국과 일본간의 육교 조사에 요구되는 연대측정수단으로서 우주선유발 핵종을 사용하는 것에 관한 타당성을 결정하고자 하는 의도로 수행되었다 (Kim and Imanura, 2004). 해수면 변화 (Shackleton et al., 1990), 용기울 및 침식률에 따른  $^{10}\text{Be}$  및  $^{26}\text{Al}$ 의 예상되는 지하 생성률 (Kim and Englert, 2004)을 이용한 모델계산이 이루어져 실험값과 비교되었다. 일본의 주요 섬인 Honshu (Aomori)와 Hokkaido (Hakodate)간의 Tsugaru 해협에서 채취한 수중 암석시료의  $^{10}\text{Be}$ 과  $^{26}\text{Al}$  농도 측정이 이루어졌으며, 시료 깊이 (물+암석) 범위는  $3,760 \sim 6,140 \text{ g/cm}^2$ 이다.  $^{10}\text{Be}$  농도는 동일한 깊이에서 안정상태의 농도보다 매우 크게 나타났으며, 이는 해수면이 낮은 빙하기 동안 중성자 파쇄에 의한 사전 피폭이 있었음을 암시 한다 (Kim and Imamura, 2004). 이 결과는 해수 깊이가 증가에 따른 명백한 피폭연대의 감소를 보여 주며, 해수면 변화에 따른 중성자 파쇄에 의한 사전피폭을, 수중 암석 중의 우주선유발 핵종들의 농도측정을 통해 감지할 수 있음을 확인시켜 준다. 이러한 예비연구를 통해, 우주선유발 핵종들의 생성량을 조사함으로써 지구상의 육교 조사가 가능함을 알 수 있었다.

또한, 매몰연대측정기술은 퇴적물 이송 연구에도 활용되고 있다. 고고학시료의 지하매장연대 측정에  $^{10}\text{Be}$  및  $^{26}\text{Al}$  등이 종종 사용된다. 이 경우, 매몰연대는 표면과 화석잔류 퇴적물 위치에서의

$^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  농도비로서 구해진다. Partridge 등 (2003)은 Lower Pliocene (선신세)의 원시인류 화석이 모여 있는 아프리카 Sterkfontein에서 구한 토양연대측정에 이 기술을 사용하였다.  $^{10}\text{Be}$ 과  $^{26}\text{Al}$  매몰연대는 뼈 StW573과 Jacovec 동굴에서 최근에 발굴한 시편의 연대가 약 4백만 년 정도로 동일하게 나왔으며, 이는 동아프리카 오스트랄로피테쿠스 아나멘시스 (*Australopithecus anamensis*)의 연대와 유사하다.

#### 4.4.4. 해안단구 연대측정

현장  $^{10}\text{Be}$ 을 이용한 해안단구 연대측정에 관한 연구는 드문 편이다. Perg 등 (2001)은 피폭 모래를, Kim과 Sutherland 등 (2004)은 피폭된 표석이나 기반암 시료를 이용하였다. Perg 등은 대륙연변부 (continental margins)를 따라 형성된 해안단구는 해수면변동과 용기율을 반영한다. 이 연구를 통해, 우주선유발 핵종 ( $^{10}\text{Be}$  및  $^{26}\text{Al}$ )들은 후퇴하는 해수에 의해 형성된 토양에 의해 쌓여 있으므로 이전에는 연대측정이 불가능했던 단구에 대한 새로운 연대측정 수단을 제공하였다. 이 연구에서는, 단구 연대와 용기율 산정에, 깊이에 대해 누적한  $^{10}\text{Be}$ 과  $^{26}\text{Al}$  농도를 사용하였다. Kim과 Sutherland 등 (2004)은 표면피폭연대측정이 보다 젊은 단구에 적용될 수 있음을 증명하였으며, 아울러 관련 용기율도 측정하였다. 강우에 의한 풍화작용과 이에 의한 침식은 해안단구의 형상을 변화시킬 수 있으므로, 이에 대한 이해가 중요하다. 특히, 기반암이나 표석 표면의 짧은 깊이분포 조사는 침식률 뿐만 아니라 오래된 단구의 정확한 피폭연대측정을 위해서도 필요하다 할 수 있다.

독특한 해안단구들이 전세계 침강경계 (subduction boundary)를 따라 형성되어 있으므로, 해안단구 연대측정을 통한 과거의 해수면 변화 해석기술은 미래의 해수면변화를 예측에 매우 중요한 수단이 된다. 종종 해안단구들은 단층대와 만나게 되며, 용기율 산정과 고지진활동 연대측정에는  $^{14}\text{C}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$  등의 우주선유발 핵종 측정법과 OSL 연대측정 등 기타 수단들이 복합된 다양한 방법들이 동원될 수 있다.

#### 4.4.5. 침식률 연구

현장 연대측정법은 동위원소들의 반감기나 침식률(0.1~10 mm/kyr)에 따라 5 kyr ~ 5 Myr 범위에서 잘 들어 맞는다 (Tuniz et al., 1998). 표면암석의 침식률 조사에는  $^{10}\text{Be}$ 과  $^{26}\text{Al}$ 이 활용되는데, 두 동위원소들의 반감기의 차이가 현저하므로  $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$  비율을 이용하기도 한다 (Nishiizumi et al., 2005, 1991). 또한, 두 동위원소들의 반감기가 매우 길어 100 kyr 이하의 피폭조사는 곤란하므로, 반감기가 짧은  $^{14}\text{C}$  농도를 이용하여  $^{14}\text{C}/^{26}\text{Al}$  또는  $^{14}\text{C}/^{10}\text{Be}$  동위원소비를 측정함으로써 최근 피폭이력조사를 용이하게 할 수 있다. 이로서, 수 백년 정도의 석영의 피폭연대와 침식률을 결정할 수 있다.

얕은 암석표면의 깊이분포를 통해 침식률을 얻을 수 있다 (Kim and Englert, 2004; Braucher et al., 1998; Strack et al., 1994; Heisinger et al., 1997). Kim과 Englert 등은 표면에서 183 m 심부까지의 단일 동위원소 깊이분포를 통해 침식률을 산정할 수 있음을 보인 바 있으며, Braucher 등 (1998)에 의해 브라질 홍토 (laterite)의 침식률에 관한 유사연구가 이루어 졌다. Schaller 등 (2002)은 토양 절단면에 대한  $^{10}\text{Be}$ 을 이용하여 주빙하(periglacial) cover beds의 영향을 조사하였으며, 이러한 접근법은 산사태, 지진과 같은 자연재해와 최근 피폭표면에 대한 연구에 유용하다.

### 5. MCNPX코드를 이용한 전산모사

#### 5.1. 우주선유발 핵종 생성

우주선과 지구 대기와 우주물질간의 반응 연구가 LAHET/MCNP 코드로서 이루어졌으며 (Masarik and Reedy, 1994;1995), 유사한 연구가 최근에 Monte Carlo N Particle eXtended (MCNPX) 코드로서 이루어 졌다 (Kim and Reedy, 2004, 2003). 또한 행성표면 (Kim et al., 2003; Swindle et al., 2005) 및 운석에서의 우주선유발 핵종들의 이동과 생성률에 대한 연구

가,  $^4\text{He}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{21}\text{Ne}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{36}\text{Ar}$ ,  $^{38}\text{Ar}$  등, 다양한 장반감기 및 안정 동위원소들에 대해 이루어 졌다.

아폴로 15호 시추코어에 대한  $^{10}\text{Be}$  및 기타 핵종들의 깊이분포 측정 후, 계산값과 비교함으로써 우주공간에서의 우주선 선속에 대한 이해를 넓힐 수 있었다 (Nishiizumi et al., 1984; 1991b). MCNPX를 이용한 최근의 모델계산과 남반구의 다양한 위도, 고도에서의 중성자 선속 측정값과의 비교를 통해 (Graham et al., 2005a, 2005b, 2005c, 2000), 다양한 위치 및 차폐구조에서의 생성률 모델계산에 관한 새로운 통찰력을 갖게 되었다 (Kim et al., 2006). 이와 같은 모델계산은 암석의 차폐효과 연구 및 노출암석의 위치선정에 중요하며, 비평탄 지역의 산사태 및 지형변화 연구가 특히 모델계산에 유익하다. 대기나 표면암석에서의  $^{10}\text{Be}$  생산량 산출이 이 기술로서 이루어 졌다 (Masarik and Reedy, 1995, 1994; Masarik et al., 2001; Kim et al., 2006; Reedy et al., 1993).

## 5.2. 계 산

Ahluwalia 와 Wilson (2003)은 자기강성에 대한 자기변조에는 멱승법칙 (power law) 의존성이 있으며, 태양풍에 의한 태양권 (heliosphere)으로부터의 GCR 입자들의 convective 제거가 태양활동주기 (solar cycles) 중의 변조에 대한 주된 요인이 됨을 보이고 있다 (Castanoli and Lal, 1980; Davis et al., 2001). 따라서, 태양활동극대기 (solar maximum) 동안 지구상에서의 우주선 세기는 감소한다. Masarik과 Beer 등 (1999)은 11년간의 태양활동주기 내의 solar minimum ( $\phi = 300$  MeV)과 solar maximum ( $\phi = 900$  MeV) 기간의, 중성자포획반응에 의한  $^{10}\text{Be}$ 과  $^{14}\text{C}$  생성률 비는 각각 1.34와 1.46이 됨을 보이고 있다. Usoskin 등 (2004)은  $^{10}\text{Be}$  자료를 이용하여 지난 천 년간의 태양활동에 대해 발표한 바 있으며, Masarik, Reedy 및 Kim 등은 모델계산에 유관 GCR 스펙트럼 ( $\phi = 550$  MeV)을 사용하였다. 지구는 하나의 거대한 쌍극자석으로서 자

기강성과 입사각에 따라 하전입자들의 입사방향을 휘게 하며, 비수직 차단강성 (non-vertical cutoff rigidity)은 수직 차단강성에 비해 1.6 배 가량 크다 (Ziegler, 1998; Shea and Smart, 1983). MCNPX 코드를 이용한, 다양한 지자기 위도상에서의 일차 우주선 스펙트럼 산정에 IGRF95 기반의 수직차단강성 자료가 이용되었다.

모델계산시 일반적으로 1:1 스케일의 구형 지구모델이 사용된다. 지각 두께증가분은 0.5 cm~수십 cm 까지 점증하며, 토양내 (밀도를 2 g/cm<sup>3</sup>로 가정) 300 cm 깊이에 이른다 (Masarik and Beer, 1999). 또한, 대기 질량두께는 1,033 g/cm<sup>2</sup> 값을 사용하고, 이를 질량두께가 같은 20개의 셀로 나누어 취급하였다 (Masarik and Reedy, 1995; Masarik and Beer, 1999).

## 6. 지구밖 물질과 화성 귀환시료중의 $^{10}\text{Be}$

우주에서의 GCR은 운석중의 우주선유발 핵종들의 생성을 해석함으로써 이해가 가능하다. 운석은 지구에 도달하기 전에 수 백만년간 우주 공간에서 우주선에 노출되어 있게 되므로, 장반감기 또는 안정 동위원소 농도 측정을 통해 우주에서의 피폭기록을 살펴 볼 수 있다 (Kim and Reedy, 2004; Nishiizumi et al., 1991b; Nagai et al., 1993; Zoppi et al., 1997).

근래, 다양한 운석들에 대한 지구상 나이를  $^{14}\text{C}/^{10}\text{Be}$  비율로서 측정된 연구결과들이 소개된 바 있으며, 이러한 시도로서, 지구상 나이뿐만 아니라 과거 우주공간에서의 모양과 크기에 대한 정보를 얻을 수 있을 것으로 기대된다 (Jull et al., 2004). Nishiizumi와 Caffee 등 (2001)은 달 표면토양 (78481) 중의  $^{10}\text{Be}$  농도가 현장 우주선 파쇄반응에 의한 예상 값 보다 높음을 알아냈으며, 여분의  $^{10}\text{Be}$  양은  $(1.9 \pm 0.8) \times 10^8$  atoms/cm<sup>2</sup> 정도로서, 이를 위해서는 달 표면의  $^{10}\text{Be}$  유입율이  $(2.9 \pm 1.2) \times 10^{-6}$  (atoms/cm<sup>2</sup>/s) 정도 되어야 한다. 이러한 여분의  $^{10}\text{Be}$ 은 대부분 태양대기에서 생성된  $^{10}\text{Be}$ 이 태양풍을 따라 달표면까지 운송된 것으로 여겨진다 (Nishiizumi and Caffee, 2001).

몇몇 아폴로 시추코어와 월석 조사를 통해 SCR과 GCR에 의한 우주선유발 핵종들의 생성률에 관한 연구가 이루어 졌다 (Nishiizumi et al., 1984). 달과는 다르게, 과거의 화성은 지구와 같은 행성이었을 것으로 추정된다. 그러나, 현재 지구의 대기에 비해 화성의 대기는 약 1/100 정도로 얇으므로 화성의 지질학적 진화에 대한 연구는 미래 세대들에게는 도전해 볼 만한 과제중의 하나라 할 수 있다. 지구에서와 마찬가지로,  $^{10}\text{Be}$ 과 같은 우주선유발 핵종들은 지자기 세기, 고기후 변화, 피폭이력 및 지형변화 등을 이해하는데 널리 활용될 수 있는 수단이다.  $^{10}\text{Be}$ 은 극지방 퇴적층, 사구, 토양, 노출암석 및 오래된 호수퇴적물 등을 이용한 화성의 지질학적 이력을 조사하는데 매우 중요한 수단이며, 특히 AMS를 이용한 화성 연구의 가능성은 활짝 열려 있다고 할 수 있다.

## 7. 결 론

첫번째 AMS장비가 가동이 되기 시작한지 거의 30 년 동안, 빙하학, 지형학, 기후학, 고고학, 우주론 연구, 지질재해 및 우주화학 등 AMS 유관 연구 분야는 크게 성장되어 왔다. 특히,  $^{10}\text{Be}$ 은 AMS분야에서 가장 중요한 우주선유발 핵종 중의 하나이다. AMS 장비의 규모가 작아지면서, 각국의 AMS장비수도 증가추세에 있다. 국내의 경우, 서울대 장비 (3 MV Tandem) 뿐만 아니라 두 번째 장비 (1 MV Tandetron)가 2007년도 중반에 한국지질자원연구원에 설치될 예정이다. 이로서, 그 동안 비교적 침체상태에 있던 국내에도 본격적인 AMS 활용연구 분위기가 조성되고 있으며, 고기후, 고고학, 육교, 해안단구 연대측정, 해안형성, 침식, 환경변화 및 고지진활동 등 다양한 연구 분야 활성화가 크게 기대되는 바이다.

## 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인

‘07-3412-11’ 과제의 일환으로 수행 되었습니다.

## References

- Ahluwalia, H. S. and Wilson, M. D., 2003, Understanding Cosmic Ray Solar Modulation for Cycle 20. Proceedings of the 28<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference, 4035-4040.
- Aldahan, A., Ning, S., Possnert, G., Backman, J. and Bostrom, K., 1997,  $^{10}\text{Be}$  records from sediments of the Arctic Ocean covering the past 350 ka. *Marine Geology*, 144, 147-162.
- Briner, J. P., Miller, G. H., Davis, P. T., Bierman, P. R. and Caffee, M., 2003, Last Glacial Maximum ice sheet dynamics in Arctic Canada inferred from young erratics perched on ancient tors. *Quaternary Science Review*, 22, 437-444.
- Bourles, D., Raisbeck, G. M. and Yiou, F., 1989,  $^{10}\text{Be}$  and  $^9\text{Be}$  in marine sediments and their potential for dating. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 53, 443-452.
- Braucher, R., Brown, E. T., Bourles, D. L. and Colin, F., 2003, In situ produced  $^{10}\text{Be}$  measurements at great depths: implications for production rates by fast muons. *Earth Planetary Science Letters*, 211, 251-258.
- Braucher, R., Bourles, D. L., Colin, F., Brown, E. T. and Boulange, B., 1998, Brazilian laterite dynamics using in situ-produced  $^{10}\text{Be}$ . *Earth Planetary Science Letters*, 163, 197-205.
- Brown, E. T., Bourles, D. L., Colin, F., Raisbeck, G. M., Yiou, F. and

- Desgarceaux, S., 1995, Evidence for muon-induced production of  $^{10}\text{Be}$  in near-surface rocks from the Congo. *Geophysical Research Letters*, 22, 703–706.
- Brown, E. T., Bourles, D. L., Colin, F., Sanfo, Z., Raisbeck, G. M. and Yiou, F., 1994, The development of iron crust lateritic systems in Burkina Faso, West Africa examined with in-situ-produced cosmogenic nuclides. *Earth Planetary Science Letters*, 124, 19–33.
- Brown, E. T., Edmond, J. M., Raisbeck, G. M., Yiou, F., Kurz, M. D. and Brook, E. J., 1991, Examination of surface exposure ages of Antarctic moraines using in situ produced  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$ . *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, 2269–2283.
- Carcaillet, J., Bourles, D., Thouveny, N. and Arnold, M., 2004, A high resolution authigenic  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  record of geomagnetic moment variation over the last 300 ka from sedimentary cores of the Portuguese margin. *Earth Planetary Science Letters*, 219, 397–412.
- Castagnoli, G. C., Cane, D., Taricco, C. and Bhandari, N., 2003, GCR Flux Decline during the last Three Centuries: Extra terrestrial and Terrestrial evidences. the 28<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference, 4045–4048.
- Castagnoli, G. C. and Lal, D., 1980, Solar modulation effects in terrestrial production of carbon-14. *Radiocarbon*. *Radiocarbon* 22, 133–158.
- Champion, D. E., 1980, Holocene geomagnetic secular variation in the western United States: implications for the global geomagnetic field. U. S. Geological Survey, Open-file Report 80-824, 1–314.
- Darby, D. A., Bischof, J. F. and Jones, G. A., 1997, Radiocarbon chronology of depositional regimes in the western Arctic Ocean. *Deep-Sea Research II*, 44, 1745–1757.
- Davis, A. J., Mewaldt, R. A., Binns, W. R., Christian, E. R., Cohen, C. M. S., Cummins, A. C., George, J. S., Hink, P. L., Leske, R. A., Stone, E. C., von Rosenvinge, T. T., Wiedenbeck, M. E. and Yansak, N. E., 2001, The Evolution of Galactic Cosmic Ray Element Spectra from Solar Minimum to Solar Maximum: ACE Measurements. *Proceedings of the International Cosmic Ray Conference*, 1–4.
- Desilets, D., Zreda, M. and Prabu, T., 2006, Extended scaling factors for in situ cosmogenic nuclides: New measurements at low latitude. *Earth Planetary Science Letters*, 246, 265–276.
- Desilets, D. and Zreda, M., 2003, Spatial and temporal distribution of secondary cosmic-ray nucleon intensities and applications to *in situ* cosmogenic dating. *Earth Planetary Science Letters*, 206, 21–42.
- Douglass, D. C., Singer, B. S., Kaplan, M. R., Mickelson, D. M. and Caffee, M. W., 2006, Cosmogenic nuclide surface exposure dating of boulders on last-glacial and late-glacial moraines, Lago Buenos Aires, Argentina: Interpretive strategies and paleoclimate implications. *Quaternary Geochronology*, 1, 43–58.
- Dunai, T. J., 2000, Scaling factors for production rates of in situ produced cosmogenic nuclides: a critical reevaluation. *Earth Planetary Science*

- Letters, 176, 157–169.
- Eisenhauer, A., 1994,  $^{10}\text{Be}$  records of sediment cores from high northern latitudes: Implications for environmental and climatic changes. *Earth Planetary Science Letters*, 124, 171–184.
- EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica) community members, 2004, Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 429 (6992), 623–628.
- Frank, M., 2000, Comparison of cosmogenic radionuclide production and geomagnetic field intensity over the last 2000,000 years. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London*, A 358, 1089–1107.
- Frank, M., Shwarz, B., Baumann, S., Kubik, P. W., Suter, M. and Mangini, A., 1997, A 200 kyr record of cosmogenic radionuclide production rate and geomagnetic field intensity from  $^{10}\text{Be}$  in globally stacked deep-sea sediments. *Earth and Planetary Science Letters* 149, 121–129.
- Granger D. E. and Muzikar, P. F., 2001, Dating sediment burial with in situ-produced cosmogenic nuclides: theory, techniques, and limitations. *Earth Planetary Science Letters*, 188, 269–281.
- Granger D. E. and Smith, A. L., 2000, Dating buried sediments using radioactive decay and muogenic production of  $^{26}\text{Al}$  and  $^{10}\text{Be}$ . *Nuclear Instruments and Methods*, B172, 822–826.
- Graham, I. J., Barry, B. J., Hemmingsen, I. D., Hutchinson, E. F., Pohl, P. K. and Zondervan, A., 2005, Validation of cosmogenic nuclide production rate scaling factors through direct measurement: Part 1 - Cosmic-ray flux measurements in the Southern Hemisphere, 1998–2001. GNS science report, 2005/01, 43 p. Institute of Geological and Nuclear Sciences, Lower Hutt, New Zealand.
- Graham, I. J., Barry, B. J., Ditchburn, R. G., Zondervan, A., 2005, Validation of cosmogenic nuclide production rate scaling factors through direct measurement: Part 2 - Production of  $^7\text{Be}$  and  $^{10}\text{Be}$  in water targets deployed in the Southern Hemisphere, 1997–2001. GNS science report 2005/02, 29 p.
- Graham, I. J., Barry, B. J., Ditchburn, R. G., Shea, M. A., Smart, D. F., Whitehead, N. E., 2005, Validation of cosmogenic nuclide production rate scaling factors through direct measurements: Part 3 - Field data and site parameters. GNS science report 2005/03, 32 p.
- Graham I., Ditchburn, R. and Barry, B., 2003, Atmospheric deposition of  $^7\text{Be}$  and  $^{10}\text{Be}$  in New Zealand rain (1996–98). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67 (3), 361–373.
- Graham, I. J., Barry, B. J., Ditchburn, R. G. and Whitehead, N. E., 2000, Validation of cosmogenic nuclide production rate scaling factors through direct measurement. *Nuclear Instruments and Methods* B172, 802–805.
- Graham, I. J., Ditchburn, R. G. and Whitehead, N. E., 1998,  $^{10}\text{Be}$  spikes in Plio-Pleistocene cyclothem, Wanganui Basin, New Zealand: identification of the local flooding surface (LFS). *Sedimentary Geology*, 122, 193–215.
- Graham, I. J., Ditchburn, R. G., Sparks, R. J. and Whitehead, N. E., 1997,  $^{10}\text{Be}$  investigations of sediments, soil, and loess at GNS. *Nuclear Instruments and*

- Methods, B123, 307–318.
- Goess, J. C. and Phillips, F.M., 2001, Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. *Quaternary Science Review* 20, 1475–1560.
- Gu, Z. Y., Lal, D., Liu, T. S., Southon, J., Caffee, M. W., Guo, Z. T. and Chen, M. Y., 1996, Five million year  $^{10}\text{Be}$  record in Chinese loess and red-clay: climate and weathering relationships. *Earth Planetary Science Letters*, 144, 273–287.
- Guyodo, Y., Gaillot, P. and Channell, J. E. T., 2000, Wavelet analysis of relative geomagnetic paleointensity at ODP Site 983. *Earth Planetary Science Letters*, 184, 109–123.
- Guyodo, Y. and Richter, C., 1999, Paleointensity record from Pleistocene sediments (1.4–0 Ma) off the California Margin. *Journal of Geophysical Research*, 104, B10, 22,953–22,964.
- Guyodo, Y. and Valet, J–P, 1996, Relative variations in geomagnetic intensity from sedimentary records: the past 200,000 years. *Earth Planetary Science Letters*, 143, 23–36.
- Heisinger, B., D. D., Jull, A. J. T., Kubik, P., Ivy–Ochs, S., Knie, K. and Nolte, E., 2002, Production of selected cosmogenic radionuclides by muons: 2. Capture of negative muons. *Earth Planetary Science Letters*, 200, 357–369.
- Heisinger, B., Niedermayer, M., Hartmann, F. J., Korshinek, G., Nolte, E., Morteani, G., S. Neumaier, S., Petitjean, C., Kubik, P., Synal, A. and Ivy–Ochs, S., 1997, In-situ production of radionuclides at great depths. *Nuclear Instruments and Methods*, B123, 341–346.
- Hodell, D. A., Brenner, M., Curtis, J. H. and Guilderson, T., 2001, Solar Forcing of Drought Frequency in the Maya Lowlands. *Science* 292, 1367–1370.
- Jull, A. J., Kim, K. J., Reedy, R. C., McHargue, L. R. and Johnson, J. A., 2004, Modeling of  $^{14}\text{C}$  and  $^{10}\text{Be}$  production rates in meteorites and lunar samples. *Lunar Planetary Science Conference*, abstract # 1191.
- Karhu, J. A., Tschudi, S., Saarnisto, M., Kubik, P. and Shluchter, C., 2001, Constraints for the latest glacial advance on Wrangel Island, Arctic Ocean from rock surface exposure dating. *Global and Planetary Change* 31, 447–451.
- Kim, K. J., Graham, I. J., Masarik, J. and Reedy, R. C., 2007, Numerical simulations with the MCNPX and LAHET Code Systems compared with direct measurement of neutron fluxes in terrestrial environments. *Nuclear Instruments Methods B* 259, 637–641.
- Kim, K. J. and Englert, P. A. J., 2004, Production depth profiles of  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  underground at Macraes Flat, East Otago, New Zealand. *Earth and Planetary Science Letters* 223, 113–126.
- Kim, K. J. and Imamura, M., 2004, Exposure Dating of Underwater Rocks – Potential Application to Studies of Land Bridges during the Ice Ages. *Nuclear Instruments and Methods B* 223–224, 608–612.
- Kim, K. J. and Sutherland, R., 2004, Uplift rate and landscape development in southwest Fiordland, New Zealand, determined using  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  exposure dating of marine terraces. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68 (10), 2313–2319.
- Kim, K. J. and Reedy, R. C., 2004,



- Production rates of cosmogenic nuclides in the Knyahinya L-chondrite. Lunar Planetary Science Conference, abstract #1359.
- Kim, K. J., Drake, D. M. and Reedy, R. C., 2003, Numerical simulations of cosmogenic neutron production and transport in planetary surfaces. Lunar and Planetary Science Conference, XXXIV, Abstracts #1532.
- Kohl, C. P. and Nishiizumi, K., 1992, Chemical isolation of quartz for measurement of in-situ-produced cosmogenic nuclides. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 56, 3583–3587.
- Kok, Y. S., 1999, Climatic influence in NRM and  $^{10}\text{Be}$ -derived geomagnetic paleointensity data. *Earth Planetary Science Letters*, 166, 105–119.
- Kubik, P. W. and Ivy-Ochs, S., 2004, A re-evaluation of the 0–10 ka  $^{10}\text{Be}$  production rate for exposure dating obtained from the Kofels (Austria) landslide. *Nuclear Instruments and Methods*, 223–224, 618–622.
- Laj, C., Kissel, C., Mazaud, A., Michel, E., Muscheler, R. and Beer, J., 2002, Geomagnetic field intensity, North Atlantic Deep Water circulation and atmospheric  $\Delta^{14}\text{C}$  during the last 50 kyr. *Earth Planetary Science Letters*, 200, 177–190.
- Laj, C., Kissel, C., Mazaud, A., Channell, J. E. T. and Beer, J., 2000, North Atlantic palaeointensity stack since 75 ka (NAPIS-75) and the duration of the Laschamp event. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London*, A 358, 1009–1025.
- Laj, C., Mazaud, A. and Duplessy, J-C., 1996, Geomagnetic intensity and  $^{14}\text{C}$  abundance in the atmosphere and ocean during the past 50 kyr. *Geophysical Research Letters*, 23 (16) 2045–2048.
- Lal, D., Gallup, C. D., Somayajulu, B. L. K., Vacher, L., Caffee, M. W. and Jull, A. J. T., Finkel, R. C., Speed, R. C. and Winter, A., 2005, Records of cosmogenic radionuclides  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  and  $^{36}\text{Cl}$  in corals; First studies on coral erosion rates and potential of dating very old corals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69 (24), 5717–5728.
- Lal, D., Charles, C. D., Vacher, L., Jull, A. J. T. and McHargue, L., 2002, Paleo-ocean chemistry based on records in marine sedimentary opal: implications for effect of Fe and other trace elements on biological productivity. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 86(18) (2005) Jt. Assem. Suppl.
- Lal, D., 1991, Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ production rates and erosion models. *Earth Planetary Science Letters*, 104, 424.
- Lal, D., 1988, In Situ-Produced Cosmogenic Isotopes in Terrestrial Rocks. *Ann. Rev. Earth Planetary Science, Letters*, 16, 355–388.
- Lal, D., 1958, Investigations of nuclear interactions produced by cosmic rays. PhD. thesis, Tata Institute of Fundamental Research, Bombay, India, 90 pp.
- Lal, D. and Peters, B., 1967, Cosmic Ray Produced Radioactivity on the Earth, *Handbuck der Physik*, XLVI/2, 551.
- Lifton, N. A., Jull, A. J. T. and Quade, J., 2001, A new extraction technique and production rate estimate for in situ cosmogenic  $^{14}\text{C}$  in quartz. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65, 1953–1969.
- Lingenfelter, R. E., Canfield, E. H. and

- Hampel, V. E., 1972, The lunar neutron flux revisited. *Earth and Planetary Science Letters*, 16, 355–369.
- Maejima, Y., Matsuzaki, H. and Higashi, T., 2005, Application of cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  to dating soils on the raised coral reef terraces of Kikai Island, southwest Japan. *Geoderma* 126, 389–399.
- Masarik, J., Frank, M., Shafter, J. M. and Wieler, R., 2001, Correction of in situ cosmogenic nuclide production rates for geomagnetic field intensity variations during the past 800,000 years. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65 (17), 299–3003.
- Masarik, J. and Beer, J., 1999, Simulation of particle fluxes and cosmogenic nuclide production in the Earth's atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 104, 12,099–13,012.
- Masarik, J. and Reedy, R. C., 1995, Terrestrial cosmogenic-nuclide production systematics calculated from numerical simulations. *Earth Planetary Science Letters*, 136, 381–395.
- Masarik, J. and Reedy, R. C., 1994, Effect of meteoroid shape on cosmogenic-nuclide production rates. *Lunar and Planetary Science Conference*, XXV, 843–844.
- McHargue, L. and Donahue, D. J., 2005, Effects of climate and the cosmic-ray flux on the  $^{10}\text{Be}$  content of marine sediments. *Earth Planetary Science Letters*, 232, 193–207.
- McHargue, L. R., Donahue, D., Damon, P. E., Biddulph, D., Sonett, C. P. and Burr, G., 2000, Geomagnetic modulation of the late Pleistocene cosmic-ray flux as determined by  $^{10}\text{Be}$  from Blake Outer Ridge marine sediments. *Nuclear Instruments and Methods*, B172, 555–561.
- Menon, M. G. K. and Ramana Murthy, P. V., 1965, *Cosmic ray intensities deep Underground*. Amsterdam, North-Holland Publishing Company, 163–239.
- Middleton, R. and Klein J., 1987,  $^{26}\text{Al}$ : Measurement and applications. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 323, 121–143.
- Monaghan, M. C., Krishnaswami, S. and Turekian, K. K., 1985, The global-average production rate of  $^{10}\text{Be}$ . *Earth Planetary Science Letters*, 76 (1985/86) 279–287.
- Moore, W., Dean, W. E., Krishnaswami, S. and Borole, D. V., 1980, Growth rates of Manganese nodules in Oneida Lake, New York. *Earth Planetary Science Letters*, 46, 191–200.
- Nagai, H., Tada, W. and Kobayashi, T., 2000, Production of  $^7\text{Be}$  and  $^{10}\text{Be}$  in the atmosphere. *Nuclear Instruments and Methods*, B172, 796–801.
- Nagai H., Honda, M., Imamura, M. and Kobayahi, K., 1993, Cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  in metal, carbon, and silicate of meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57, 3703–3721.
- Nishiizumi, K., Caffee, M. W., Finkel, R. C., Brimhall, G. and Mote, T., 2005, Remnants of a fossil alluvial fan landscape of Miocene age in the Atacama Desert of northern Chile using cosmogenic nuclide exposure age dating. *Earth Planetary Science Letters*, 237, 499–507.
- Nishiizumi K. and Caffee, M. W., 2001, Beryllium-10 from the Sun, *Science* 294, 352–354.
- Nishiizumi, K., Finkel, R. C., Caffee, M. W., Kohl, C. P., Arnold, J. R., Olinger, C. T.,

- Poeths, J. and Klein, J., 1994, Cosmogenic production of  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  on the surface of the earth and underground. United States Geological Survey Circular, 1107.
- Nishiizumi, K., Elmore, D., Ma, X. Z. and Arnold, J. R., 1984,  $^{10}\text{Be}$  and  $^{36}\text{Cl}$  depth profiles in an Apollo 15 drill core. *Earth Planetary Science Letters* 70 (2), 157–163.
- Nishiizumi, K., Kohl, C. P., Arnold, J. R., Klein, J., Fink, D. and Middleton, R., 1991a, Cosmic-ray produced  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  in Antarctic rocks: exposure and erosion history. *Earth Planetary Science Letters*, 104, 440–454.
- Nishiizumi, K., Arnold, J. R., Klein, J., Fink, D. and Middleton, R., 1991b, Exposure histories of lunar meteorites: ALHA81005, MAC88104, MAC88105, and Y791197. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 55, 3149–3155.
- Nishiizumi, K., Lal, D., Klein, J., Middleton, R. and Arnold, J. R., 1989, Cosmic ray production rates of  $^{10}\text{Be}$  and  $\text{Al}$  in quartz from glacially polished rocks. *Journal of Geophysical Research*, 94, 17,907–15.
- O' Brien, K. A., 1979, Secular variations in the production of cosmogenic isotopes in the earth's atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 84, 423–31.
- Ohno, M. and Hamano Y., 1992, Geomagnetic poles over the past 10,000 years. *Geophysical Research Letters*, 19, 1715–18.
- Partridge, T. C., Granger, D. E., Caffee, M. W. and Clarke, R. J., 2003, Lower Pliocene Hominid Remains from Sterkfontein. *Science*, 300, 607–612.
- Perg, L. A., Anderson, R. S. and Finkel, R. C., 2001, Use of a new  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  inventory method to date marine terraces, Santa Cruz, California, USA. *Geology* 29 (10) 879–882.
- Peters, B., 1955, Radioactive beryllium in the atmosphere and on the earth. *Proceedings Indian Academy of Science*, 41, 67–71.
- Reedy R. C. and Arnold, J. R., 1972, Interaction of solar and galactic cosmic-ray particles with the moon. *Journal of Geophysical Research*, 77, 537–555.
- Reedy, R. C., Nishiizumi, K., Klein, J., Davis, R., Middleton, R., Lal, D., Arnold, J. R., Kubik, P., Jull, A. J. T., Englert, P. A. J. and Elmore, D., 1994, Production of cosmogenic nuclides by muons. The 8<sup>th</sup> International Conference on Geochronology, Cosmochronology, and Isotope Geology, United States Geological Survey Circular, 1107, 262.
- Reedy, R. C., Masarik, J., Nishiizumi, K., Arnold, J. R., Finkel, R. C., Caffee, M. W., Southon, J., Jull, A. J. T. and Donahue, D. J., 1993, Cosmogenic-radionuclide profiles in Knyahinya: New measurements and models. Lunar and Planetary Science Conference, XXIV, 1195–1196.
- Robinson, C., Raisbeck, G. M., Yiou, F., Lehman, B. and Laj, C., 1995, The relationship between  $^{10}\text{Be}$  and geomagnetic field strength records in central North Atlantic sediments during the last 80 ka. *Earth Planetary Science Letters*, 136, 551–557.
- Schaefer, J. M., Denton, G. H., Barrell, D. J. A., Ivy-Ochs, S., Kubik, P. W., Andersen, B. G., Phillips, F. M., Lowell, T. V. and Schluchter, C., 2006, Near-Synchronous Inter hemispheric Termination of the Last Glacial Maximum in Mid-Latitudes. *Science* 312, 1510–1513.

- Schaller, M., von Blanckenburg, F., Veit, H. and Kubik, P. W., 2002, Influence of periglacial cover beds on in situ-produced cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  in soil sections. *Geomorphology*, 49, 255–267.
- Segl, M., Mangini, A., Bonani, G., Hofmann, H. J., Nessi, M., Suter, M., Wolfi, W., Friedrich, G., Pluger, W. L., Wiechowski, A. and Beer, J., 1984,  $^{10}\text{Be}$ -dating of a manganese crust from Central North Pacific and implications for ocean paleocirculation. *Nature* 309, 540–543.
- Steig, E. J., 1996, Beryllium-10 in the Taylor Dome ice core: Applications to Antarctic glaciology and paleoclimatology, Report number, DOE/OR/00033-T698.
- Shackleton, N. J., Berger, A. and Peltier, W. A., 1990, An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene time scale based on ODP Site 677. *Transaction of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*, 81, 251–261.
- Sharma, P. and Middleton, R., 1989, Radiogenic production of  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  in uranium and thorium ores: Implications for studying terrestrial samples containing low levels of  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$ . *Geochimica et Cosmochimica Acta* 53, 709–716.
- Sharma, P. and Somayajulu, B. L. K., 1982,  $^{10}\text{Be}$  dating of large manganese nodules from world oceans. *Earth Planetary Science Letters*, 59, 235–244.
- Shea, M. A. and Smart, D. F., 2001, Vertical cutoff rigidities for cosmic ray stations since 1955. *Proceedings of International Cosmic Ray Conference*, 4063–4066.
- Shea, M. A. and Smart, D. F., 1983, World grid of calculated cosmic ray vertical cutoff rigidities for 1980. *Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference* 5, 415–418.
- Shulmeister, J., Fink, D. and Augustinus, P. C., 2005, A cosmogenic nuclide chronology of the last glacial transition in North-West Nelson, New Zealand – new insights in Southern Hemisphere climate forcing during the last deglaciation. *Earth Planetary Science Letters*, 233, 455–466.
- Simpson, J. A. and Uretz, R. B., 1953, Cosmic-Ray Neutron Production in Elements as a Function of Latitude and Altitude. *Physical Review* 90 (1), 44–50.
- Simpson, J. A., 1951, Neutrons Produced in the Atmosphere by the Cosmic Radiation. *Physical Review*, 83, 1175–1188.
- Sisterson, J. M., Kim, K., Englert, P. A. J., Caffee, M., Castaneda, C., Vincent, J. and Reedy, R. C., 1996, Measurement of proton production of cross sections of  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  from elements found in lunar rocks. *Nuclear Instruments and Methods*, B123, 324–329.
- Solanki, S. K., Usoskin, I. G., Kromer, B., Schussler, M. and Beer, J., 2000, Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. *Nature* 408, 445.
- Stone, J. O., 2000, Air pressure and cosmogenic isotope production. *Journal of Geophysical Research*, 105, 23,753–23,759.
- Stone, J. O. H., Evans, J. M., Fiffeld, L. K., Allan, G. L., and Cresswell, R. G., 1998, Cosmogenic chlorine-36 production in calcite by muons. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62 (3), 433–454.
- Strack, E. B., Heisinger, B., Dookh, B., Hartmann, F. J., Korshinek, G. and Noler,

- E., 1994, Determination of erosion rates with cosmogenic  $^{26}\text{Al}$ . Nuclear Instruments and Methods, B92, 317–320.
- Sutherland, R., Kim, K., Zondervan, A. and McSaveney, M., 2006, Orbital forcing of mid-latitude southern hemisphere glaciation since 100 ka, inferred from cosmogenic nuclides ages of moraine boulders from the Cascade Plateau, southwest New Zealand. Geological Society of America–Bulletin, 118 (3), 464–474.
- Swindle, T. D., Masarik, J., Kollár, D., Kim, K. J. and Reedy, R. C., 2005, Production of Noble Gases near the Surface of Europa and the Prospects for in situ Chronology, ICARUS. International Journal of Solar System Studies, 174, 205–214.
- Tanaka, S. and Inoue, T., 1979,  $^{10}\text{Be}$  dating of north Pacific sediment cores up to 2.5 million years BP. Earth Planetary Science Letters, 45, 181–187.
- Tuniz, C., Bird, J. R., Fink, D. and Herzog, G. H., 1998, Accelerator Mass Spectrometry. CRC Press, 199 p.
- Usoskin, I. G., Mursular, K., Solanki, S., Schussler, M. and Alanko, K., 2004, Reconstruction of solar activity for the last millennium using  $^{10}\text{Be}$  data. Astronomy and Astrophysics, 413, 745–751.
- Valet, J-P., 2001, Time Variations in Geomagnetic Intensity. Review of Geophysics, 41/1, 4–44.
- Yamagata, T., Saito, T., Nagai, H. and Matsuzaki, H., 2005, Seasonal variation for  $^7\text{Be}$  and  $^{10}\text{Be}$  concentrations in the atmosphere at Tokyo and Hachijo–Island during the period of 2002 and 2003. The 10<sup>th</sup> International Conference for Accelerator Mass Spectrometry, Sept. 5–10, 2005, Berkeley, CA. USA.
- Yiou, F., Raisbeck, G. M., Bourles, D., Lorius, C. and Barkov, N. I., 1985,  $^{10}\text{Be}$  in ice at Vostok Antarctica during the last climatic cycle. Nature 316, 616–617.
- Zhou, W., Priller, A., Beck, J. W., Wu, Z., Chen, M., An, Z. S., Kutschera, W., Yu, H. and Liu, L., 2007, Disentangling geomagnetic and precipitation signals in an 80,000 year Chinese loess record of Beryllium–10. submitted for publication.
- Ziegler, J. F., 1998, Terrestrial cosmic rays intensities. IBM Journal of Research and Development 42 (1), 117–139, IBM Corp.
- Zoppi, U., Matsuzaki, H., Kobayahi, K., Imamura, M., Nagai, H., Hatori, S., Nakano, C. and Sunohara, Y., 1997, New interpretation of the  $^{10}\text{Be}$  and  $^{26}\text{Al}$  content in cosmic spherules. Nuclear Instruments and Methods, B123, 319–323.

---

투 고 일: 2006. 11. 24.

심 사 일: 2006. 12. 4.

심사완료일: 2006. 12. 20.

**김경자, 우형주**

305–350, 대전광역시 유성구 가정동 30 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 (Geological and environmental hazard division, Korea Institute of Geology and Mineral Resources, Deajeon, Korea, 30 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305–350, Korea)

**A. J. Tim Jull**

미국애리조나대학교 (NSF ArizonaAMS Laboratory, University of Arizona, PO Box 210081, Tucson, AZ 85721, USA)