

## 가속기 질량 분광분석법을 이용한 환경 연구 Accelerator Mass Spectrometry in Environmental Research

문 창 범

호서대학교 물리학과

(1999년 11월 10일 접수, 2000년 2월 26일 채택)

Chang-Bum Moon

Department of Physics, Hoseo University

(Received 10 November 1999; accepted 26 February 2000)

### Abstract

Accelerator Mass Spectrometry (AMS) is presented for the applications to the environmental research. Traditionally, the radiocarbon ( $^{14}\text{C}$ ) measurements have been made for the purpose of dating the archaeological and geological samples.  $^{14}\text{C}$  measurements using AMS, however, have become the more useful methods for the study of environmental science, such as anthropogenic modification of atmosphere and the determination of mixing ratios of fossil and biomass products. Such  $^{14}\text{C}$  AMS measurements have been extended to the discovery of new chemical tracers for investigations of sources of excessive contributions of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ , and other carbon-bearing molecules in the atmosphere.

**Key words :** Accelerator Mass Spectrometry (AMS), radiocarbon ( $^{14}\text{C}$ )

### 1. 서 론

#### 1.1 AMS

가속기 질량 분광분석법 (Accelerator Mass Spectrometry ; AMS, 이하 AMS라고 부르기로 함)은 3백만 볼트(3 MeV) 규모의 정전기 가속기와 그 주변기 기인 질량분석 장치들로 구성되어 있다. 원자핵의 동위원소(Isotopes)를 분리하여 분석하는 초정밀 분석기기에 속한다. AMS는 불과 20여년전에 (Bennet *et al.*, 1977; Muller, 1997; Nelson *et al.*, 1977) 시작된 짧은 역사를 가진 유년기의 연구분야에 속하지만

빠른 속도로 성장을 하고 있다. 이전부터 연대측정에 있어서는 탄소 동위원소 중 탄소-14( $^{14}\text{C}$ )의 분석에 의해 이루어져 왔는데, 자연 상태의 탄소 시료 속에는 극소량으로  $^{14}\text{C}$ 가 함유되어 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 기존의 보통 방법의 질량 분광분석법 (Mass Spectrometry, 보통 질량분석법이라고 부르기도 함)으로는 시료의 양이 많지 않으면  $^{14}\text{C}$ 의 정확한 함유량을 측정하기는 어려운 문제였다. AMS에 의한  $^{14}\text{C}$ 의 정확한 연대 측정기는 기존의 질량 분석법에 따라 섬광 또는 기체 검출기 등을 이용한 계수 측정보다 시료의 크기를 1/1,000로 줄이는 효과를 가져다 주었다. 이러한 결과는 특히 고고

\* 이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단 연구사업비에 의하여 연구되었음.

학자나 환경 과학자들로부터 주목을 받아 풍부한 사용자 그룹이 형성되었으며, 이러한 사용자 사회로부터의 요구에 부응하여 AMS 기술은 핵물리학 사회로부터 학제간(interdisciplinary) 연구 형태로 급속히 확산되며 저변을 넓혀가고 있는 중이다. 일반적으로 AMS 연구는  $^{14}\text{C}$  측정에 의해 이루어지고 있는데,  $^{14}\text{C}$ 를 표본으로 삼아 AMS의 특징과 장점을 간단히 설명해 보기로 한다.

$^{14}\text{C}$  동위원소는 현재 유기물질내에  $^{12}\text{C}$ 에 비해 약 10~12 정도로 함유되어 있으며, 총탄소 1그램당 1분에 15번 붕괴되어 나온다.  $^{14}\text{C}$ 의 반감기( $T_{1/2}$ ; 이하 반감기를 이와같이 표기하기로 함)가 5,730년이기 때문에 1만년된 1g 시료로부터는 1분당 4개꼴로 붕괴되고, 1만개의 붕괴(1% 통계오차 범위)를 검출하는 데는 2일이 소요된다. 그런데 1g의 시료에는 탄소 원자가  $5 \times 10^{22}$ ,  $^{14}\text{C}$  원자는  $10^{10}$  정도 함유되어 있고, 결국 시료에 있는 원자 중  $10^6$  당 한 원자를 검출하는 것이 된다. 이는 매우 비효율적이라 할 수 밖에 없다. 이보다 더 좋은 방법으로 떠오른 것이

시료에 있는  $^{14}\text{C}$  원자를 직접 측정하는 것이다. 이를 위해서는 질량 분광분석법이 필요한데, 여기서의 문제점은 질량수 14에 해당되는 다른 부산물, 특히  $^{14}\text{N}$ 와  $\text{CH}_2$ 가 시료에 많이 함유되어 있는 경우 이를  $^{14}\text{C}$ 와 분리하는데 무척 힘들다는 데 있다. 즉 보통의 질량 분석법으로는 사실상 분리가 불가능하다는 것이다.

가속기(보통 tandem Van de Graaff)는 이온빔을 방출할 때 질량과 전하 상태를 선택할 수 있는데, 보통의 질량 분석방법에 따른 같은 기능을 또한 수행할 수 있다. 더욱이 가속기는 두 가지의 큰 장점을 가질 수가 있다.

첫째, 이온샘(Ion Source)에서 음이온을 만들 수 있다는 점이다. 이러한 음이온에 의해 다른 불필요한 이온 들 즉 백그라운드를 근본적으로 줄일 수 있다. 특히  $^{14}\text{N}$ 인 경우가 대표적인데, 이 원자는 안정된 음이온을 생성하지 못하는 것으로 알려져 있어 결국 이온샘으로부터 완전히 제거시킬 수가 있다.

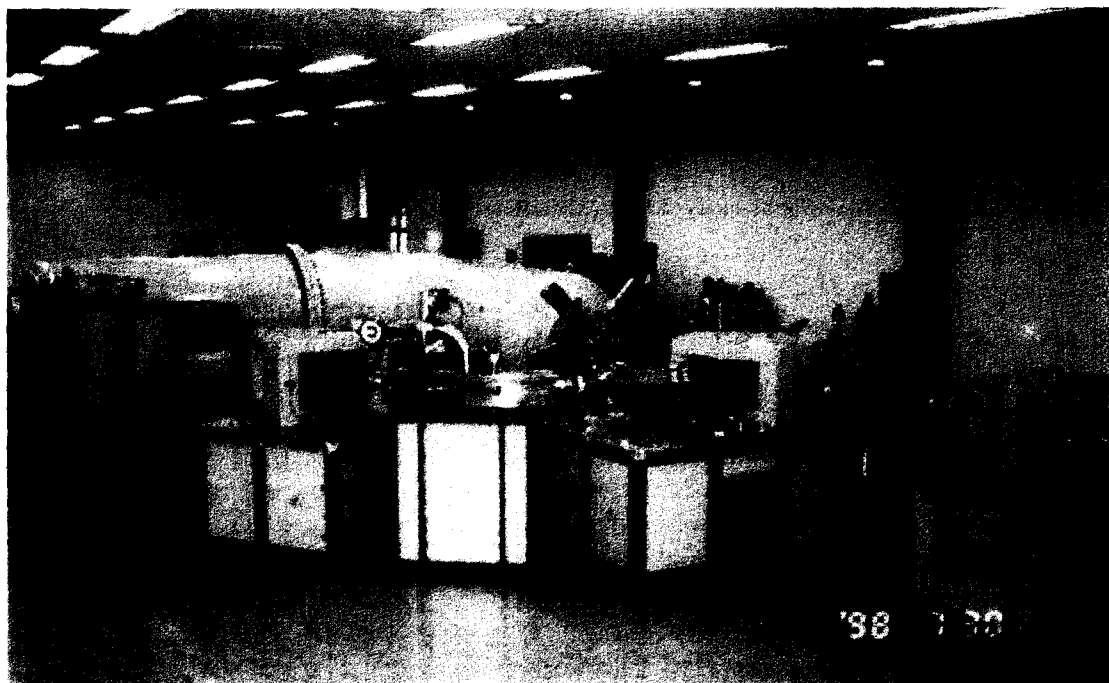


Fig. 1. The Accelerator Mass Spectrometry (AMS) facility at Inter-University Center for Natural Science Research Facilities of Seoul National University.

둘째, 분석계로써 전하와 질량을 결정할 수 있는 에너지 대 에너지감소 기술( $\Delta E$  vs  $E$ ) (Goulding (1985))을 이용할 수 있고 따라서 더 높은 원자 번호를 갖는 이온의 투과도를 효과적으로 제어할 수 있다. 이러한 AMS 방법으로  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  비율에 있어 10~15까지 분리가 가능하며, 이는 수 mg의 시료만으로도 10만년의 연대 측정을 가능하게 한다.

AMS는 전세계 20여개국의 40여개 대학과 연구소에서 가동되고 있으며 다방면 연구에 급속도로 확산되고 있다. 초기의 AMS는 기존의 핵물리용 소형 정전가속기(tandem Van de Graaff)의 빔라인 일부를 변환하여 시행되었으나, 1981~1983년경 소형 탄테트론 가속기를 사용한 AMS 전용의 제1세대 탄테트론 AMS가 제작되어 미국, 캐나다, 영국, 프랑스, 일본 등에 보급되었다. 이들 AMS 전용기들은 매우 안정되고 뛰어난 성능을 보였으며 불과 몇대의 장치들이 측정할  $^{14}\text{C}$ 의 분석량이 전 세계 데이터의 과반수 이상을 차지하였다.

1991년 이후 그 규모는 종래의 탄테트론 AMS와 같으나 최신의 초 진공기술, 컴퓨터에 의한 자동화 및 제어 기술의 적용으로 고성능의 신형 탄테트론 AMS가 개발되었다(High Voltage Engineering Europa; HVEE). 이 신형 탄테트론 AMS는 측정 오차  $\pm 0.3\%$ (연대치의 오차  $\pm 20$ ~ $\pm 30$ 년에 해당)로서 연간 3,000개 이상의 시료(samples)를 측정할 수 있는 능력을 갖고 있다. 이들 신형은 미국의 우즈홀 해양연구소(von Reden *et al.*, 1994), 네덜란드의 그로닝겐 대학(Wijma와 Plicht, 1997), 독일의 쾰 대학(Nadeau *et al.*, 1997), 일본의 나고야 대학(Nakamura *et al.*, 1999)에 보급되었고, 이어 다섯번 째로 우리나라의 서울대학교 기초과학교육연구공동기기에 1998년 2월에 도입되었다(Kim *et al.*, 1999). 이 기기는 1998년에 무사히 설치되어 시운전에 성공하였으며, 1999년도부터는 시료의 분석에 들어가 우리나라에서도 본격적인 AMS시대가 열리게 되었다. 그림 1은 서울대학교 기초과학공동연구기기에 설치된 AMS 시설 모습이다.

## 1.2 AMS와 환경 연구

환경의 오염 등으로 인한 변화는 경제적 측면으로서 대단히 중요한 요인으로 자리잡고 있다. 즉 원하지 않는 변화를 피하고 생물학적 그리고 지질학

적 샘(source)의 적정 수준의 이용이 필요하다. 아울러 환경파괴의 경감과 그 회복을 위한 적정 수준의 경비와 위험 요인의 회복을 위한 환경 오염 측정의 연구는 필수적이며 다가오는 21세기에는 더욱 급속도로 연구가 진행되어 갈 것이다.

특히 국토가 좁고 인구가 많은 우리나라의 여건을 고려해 볼 때 체계적인 환경 측정은 대단히 중요하다. 여기에는 대기 환경의 오염 측정 뿐만 아니라 바다의 환경, 지질학적인 환경 측정도 포함되어야 함은 물론이다. 더구나 우리나라는 급속한 자동차 증가에 따른 대기오염 확산, 일관성 없는 환경정책과 지방자치정부의 부분별한 자연과피성 오락시설 허가에 따른 환경파괴, 인구의 집중화에 따른 환경 오염 등이 계속 확산되고 있는 중이다. 이 중에서도 대도시에서의 자동차 배기에 의한 환경오염은 위험 수위를 넘고 있는 실정이다. AMS는 자동차 배기에 의한 이산화 탄소의 양을 측정하는데도 이용될 수 있다. 만약 자동차 배기에 의한 영향이 두드러진다면 일반적으로 알려진  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = 10^{-12}$  보다 작게 나타날 것으로 기대된다. 왜냐하면 자동차 배기가스에서 발생하는 탄소에는  $^{14}\text{C}$ 가 포함되지 않기 때문이다.

최근 AMS 연구는 특히 환경 및 지구 과학 분야에 급속히 확산되고 있다. 대기 속의  $^{14}\text{C}$ 의 측정은 대기의 환경오염 연구에 적합하며, 저수지나 해저 퇴적물 속의 유기물에 함유된  $^{14}\text{C}$ 의 측정은 지각의 변동과 고기후의 연구에, 바닷물속에 녹아 있는 탄산가스 중의  $^{14}\text{C}$ 의 측정은 해양의 순환과 지구기온의 변동 등에 대한 정보를 가져다 준다. 아울러 지하수의 연령 측정은 지하수의 개발과 보전을 위한 중요한 자료가 될 수 있다. 특히 나무의 나이테(tree rings), 남극과 북극의 얼음층, 퇴적물 등은 지나간 지구의 환경 상태를 웅변해 줄 수 있다. 사실 AMS는 나이테라든지 얼음층에 포획된 이산화탄소로부터  $^{14}\text{C}$ 의 측정을 가능하게 하여 이로부터 과거의 기후 및 태양활동도 밝혀지고 있다(Tuniz *et al.*, 1998). 또한 나이테의 분석에 의해 지금으로부터 9600년 전까지의  $^{14}\text{C}$  변화를 알 수 있게 되었는데, 그 변화의 특징은 지구의 자기장의 변화로 밝혀지기도 했다(Stuiver, 1990).

AMS의 등장은 특히 나무들의 나이테에 축적된 이산화탄소와 화석연료, 발전소, 자동차 및 소각 등

에서 나오는 이산화탄소를 적은 양으로도 분석이 가능하게 하여 계절적 변화의 흐름까지 알 수 있게 하였다. 더구나 대기 기체 또는 분진에 함유된  $^{14}\text{C}$ 의 분석은 대기환경 오염원 추적에 상당한 공헌을 하고 있다.

$^{14}\text{C}$  외에, 베릴륨-10 ( $^{10}\text{Be}$ ;  $T_{1/2} = 150$ 만년), 염소-36 ( $^{36}\text{Cl}$ ;  $T_{1/2} = 30$ 만년), 알루미늄-26 ( $^{26}\text{Al}$ ;  $T_{1/2} = 72$ 만년), 요오드-129 ( $^{129}\text{I}$ ;  $T_{1/2} = 1,600$ 만년) 동위원소 등이 AMS에 의해 그 특성에 따라 다양하게 이용되고 있다. 더욱이, 최근 들어서는 생의학, 화학동력학, 재료과학 등에도 그 응용이 이루어지고 있다. 특히 요오드의 경우 핵 재처리 시설의 배출액의 추적자로 각광을 받고 있는데, 프랑스의 La Hague, 영국의 Sellafield 핵 재처리 시설로부터의  $^{129}\text{I}$ 의 추적 결과 북극(North Pole) 해류의 움직임을 관측하는 커다란 성과를 거두기도 하였다(Tuniz *et al.*, 1998). 표 1에 AMS를 이용하여 연구할 수 있는 다양한 학문분야를 정리해 놓았다. 앞에서 강조했듯이, 오늘날은  $^{14}\text{C}$ 는 연대측정으로서의 역할보다 추적자(Tracer)로서의 역할이 더욱 각광 받고 있으며, 이러한 추적자로서의 역할에 의해 AMS의 활용 범위가

점차 넓어져 가고 있다.

## 2. AMS의 원리

AMS는 동위원소 분석에 있어 초정밀 질량 분석 기술에 속한다. 시료(Samples)의 원자를 이온화 시켜 가속시키고, 에너지, 운동량 및 전하 상태를 분석하여 최종 얻고자 하는 동위원소( $^{14}\text{C}$ )의 수를 정확하게 측정하는 분광분석 기술이다.

다음의 그림 2는 서울대학교 기초과학연구공동기원에 설치되어 운용되고 있는 AMS 시설의 개요도이다. 앞에서 언급하였듯이 이 시설은 가장 뛰어난 성능을 지닌 신세대형 AMS에 해당하고 AMS만을 위해 설계된 장치이다. 또한 AMS의 용도 중  $^{14}\text{C}$ 를 이용한 분석이 주류를 이루고 있을 뿐만 아니라 현재 서울대학교의 AMS 역시  $^{14}\text{C}$  분석만을 하고 있으므로 이에 맞추어 원리를 설명하고자 한다.

우선 분석하고자 하는 시료의 표적을 이온샘(Ion Source)에 넣는다. 이온샘은 세슘 때려내기(Cs sputtering)형태인데, 시료 표적을 세슘 원자가 강하게 때리게 되면 음으로 대전되며 -1가를 갖는 탄소이온이 방출하게 된다. 이렇게 음전하를 띤 이온은 이온샘의 방출관을 향하여 약 20 kV의 에너지로 가속되며(이를 사전가속(preacceleration)이라고 한다) 첫 분석전자석으로 들어 간다. 이곳에서 이온 빔의 질량에 따른 분석이 이루어진다. 이렇게 1차적으로 걸러진 이온이 가속기 내부로 들어 가게 되면 가속기 내의 고전압(2000 kV)에 의해 에너지를 얻으면서 급속도로 속도가 증가하게 된다. 가속기 내부 가운데에는 아르곤 기체가 채워져 있으며, 이 아르곤 기체는 이온이 지나갈 때 이온으로부터 전자를 빼앗는 역할을 한다. 처음 -1가의 이온이었던 이온빔은 이 아르곤 기체를 지나면서 4개의 전자를 잃어 버려 결국 +3가( $q = +3$ )의 양이온으로 탈바꿈하게 된다. 이렇게 양으로 대전된 이온빔은 가속기 터미널의 척력을 받아 더욱 가속하게 되면서 110도 분석 전자석으로 들어 간다. 이 전자석의 분석에 의하여 탄소 동위원소 중 탄소-12( $^{12}\text{C}$ ), 탄소-13( $^{13}\text{C}$ ), 탄소-14( $^{14}\text{C}$ )가 분리되어 나온다. 탄소 동위원소 중  $^{12}\text{C}$ 가 99%를  $^{13}\text{C}$ 이 1% 정도를 차지하는데 이러한 동위원소들의 수는  $^{14}\text{C}$ 에 비해 월등히 많은 것이 되므로 직접 수를 세는 것이 아니라 전류를 측정하

Table 1. AMS를 이용할 수 있는 연구 분야.

	학문분야	연구 분야
$^{14}\text{C}$ 연대측정 및 추적자(tracer)로서의 응용 분야	핵 물 리	핵실험 생성 $^{14}\text{C}$ 농도 측정 우주선 유발 $^{14}\text{C}$
	환경 및 대기과학	대기 오염 경로 측정 배기가스 오염도 대기중 메탄의 기원 대기중 에어로졸의 기원 퇴적물의 $^{14}\text{C}$ 농도-퇴적속도 대류권대기 $\text{CO}_2$ -대기의 혼합 성층권대기 $\text{CO}_2$ -대기의 혼합
	역사, 사료학	역사사료, 문화자료의 연대측정
	수 문 학	지하수의 연대-기원, 유동
	지구과학 및 대기, 수권 과학	고기후 측정 태양 활동 지구환경 변동 지진, 원소순환 지진, 화산활동 추적 홍수발생 연대
	생 물 학	수목생장능력 세포형성속도 토양생성속도
	고 고 학	사람(동물)뼈, 곡물 등의 연대측정

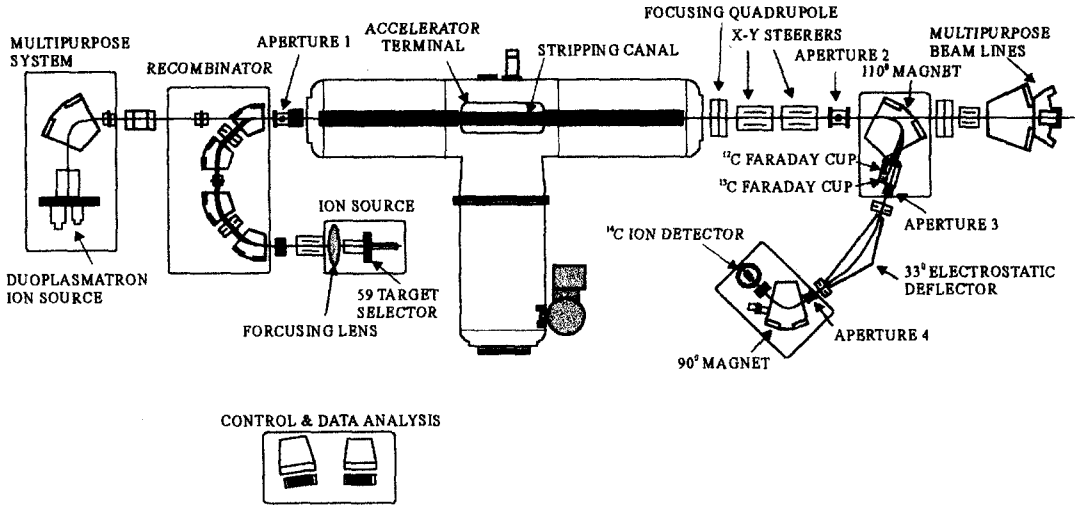


Fig. 2. Schematic diagram of 3MV Tandetron AMS system at Inter-University Center for Natural Science Research Facilities of Seoul National University.

여 그 수를 헤아리게 된다. 이렇게 이온의 전류를 모으는 곳을 파라데이 컵(Faraday Cup)이라고 부른다. 그림 2를 보면  $110^\circ$  전자석 다음에  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  이온들의 전류를 측정하기 위한 파라데이 컵들이 있다는 것을 알 수 있다. 이어 전기장으로 이루어진 분석기와 자기장의 분석자석을 통과하면서 다른 이온들이 전혀 포함되지 않은 순수  $^{14}\text{C}$ 을 얻게 된다. 이러한  $^{14}\text{C}$ 은 이온 기체 검출기(ion gas detectors)에서 검출되어 컴퓨터 화면에 스펙트럼으로 나타난다.

### 3. 방사성 탄소-14( $^{14}\text{C}$ )

$^{14}\text{C}$ 은 우주선(Cosmic Ray)에서 유발된 중성자가 대기 중의 질소와 만나  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$  반응에 의해 형성된다. 여기서 n은 중성자, p는 양성자를 뜻한다. 이렇게 형성된  $^{14}\text{C}$ 은 대기 중에서 이산화탄소로 변화하며 기존의 이산화탄소와 섞이게 된다. 이 과정에서  $^{14}\text{C}$ 은  $^{12}\text{C}$ 과 일정한 비율을 유지하는 것으로 알려져 있는데 그 비율, 즉  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 은 약  $1.2 \times 10^{-12}$ 이다. 이 결과는 인간의 산업화 활동에 의해 인위적인  $^{14}\text{C}$ 가 발생되기 전인 1860년경의 나무에서 얻은 결과이다. 이러한 이산화탄소는 탄소동화 작용을 거쳐 식물에 축적되고 2차적으로 동물에까지 그 비율이 그대로 축적되게 된다. 결국 식물이나 동물이 더

이상 생존해 있지 않으면 그 이후로는  $^{14}\text{C}$ 은 축적되지 못하고 일정한 비율로 방사성 붕괴를 하게 되어 연대 측정이 가능하게 된다.  $^{14}\text{C}$ 은 지구상에서 평균 약 2 atoms/cm<sup>2</sup> · min (Lal, 1988)율로 발생하는 것으로 알려져 있으며, 이는 지구 전체로 보았을 때 약 70톤에 달한다. 이중 90%는 해양, 8%가 생물권 및 땅에 그리고 2%가 대기에 분포한다. 다른 우주선 유발 동위원소와 마찬가지로  $^{14}\text{C}$  역시 발생률이 일정하지 않고 2배 내외에서 변하는데, 그 원인은 주로 지자기장과 태양활동의 상태와 연관된다.

이러한  $^{14}\text{C}$ 은 20세기에 들어 인간에 의해 다량 만들어지고 있다. 가장 큰 원인이 핵무기 실험과 원자력(핵)발전소 건설에 따른 것이다. 핵무기 실험에 의해 약 2.2톤이 대기중에 스며든 것으로 생각되고 있는데 그 양은 1950년대까지 계속 증가치를 보였으나 60년대 이후로는 계속 감소하는 추세이다. 이것은 60년대 이후 지상 핵실험이 거의 이루어지지 않았기 때문이다. 핵 발전소에서는 냉각수, 제어봉, 핵연료, 그 외 발전소내의 물질에 포함되어 있는 성분 중 탄소, 질소, 산소 등이 핵반응에서 나오는 중성자를 흡수하여  $^{14}\text{C}$ 가 만들어진다( $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ ). 1990년에 핵발전 산업에서 나오는  $^{14}\text{C}$ 의 양은 약 0.05톤으로 추산되고 있다(Finkel과 Suter, 1993).

#### 4. 표적 제작

AMS에서 가장 중요한 작업이 시료의 표적 제작이라고 할 수 있다. 조사하고자 하는 오염 지역에서 채집한 시료들 - 예를 들어 나뭇잎, 나무, 공기, 에어로졸, 매탄 등 - 은 AMS 분석을 위한 이온샘(Ion Source)으로 쓰여질 수 있도록 흑연(graphite)화 시켜 주어야 한다. 이중 가장 기본이 되는  $^{14}\text{C}$  시료의 표적 제작의 방법을 소개하고자 한다. 일반적으로 시료를 우선 이산화탄소( $\text{CO}_2$ )화시켜 이로부터 탄소를 분리시켜 얻는 방법이 널리 이용되는데 크게 Cracking (Gurfinkel, 1987) 방법과 Reduction (환원) 방법 (Cohen, 1994; Gagnon과 Jones, 1993; Verkoouteren, 1987; Vogel, 1987)으로 나눌 수 있다. Cracking 방법은 시료에서 추출된 이산화탄소로부터 아세틸렌을 추출한 다음 이 기체를 전기방전을 통하여 탄소와 산소를 분리해내는 방법이다. 전반적인 공정이 상대적으로 복잡하지만 제작 시간이 약 2시간 정도로 짧은다는 점과 때려내기(Sputtering) 이온샘에 장착하기 위한 별도의 고체 표적을 만들기 위한 압축성형 과정이 필요 없다는 잇점이 있다. 이와 반면 환원(Reduction) 방법은 이산화탄소로부터 환원법에 의해 직접 탄소분말을 추출하는 방법이다. 이때 금속 촉매로 철, 아연 코발트 등을 사용하며 고온(약  $600\sim 900^\circ\text{C}$ )에서 수소기체를 불어 넣어  $\text{H}_2\text{O}$  형태로 산소를 환원시킨다. 예를 들면, 약간의 철분말( $50\text{-}\mu\text{m}$ )을 촉매로 하여 다음과 같은 반응에 의해 흑연화 된 탄소를 얻을 수 있다.  $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2 \Rightarrow \text{C}(\text{graphite}) + 2\text{H}_2\text{O}$ . 이러한 환원 방법은 이미 상당한 기술 축적이 이루어져 있어 안정된 과정이 확립되어 있는데, 공정 시간은 약 10시간이다. 단위 시료당 공정시간은 길지만 여러개의 시료를 동시에 처리할 수 있는 장점이 있다.

#### 5. 전 망

우리나라에서의 AMS 연구는 이제 시작단계(1999년)라고 할 수 있다. 아직까지 AMS 사용자 그룹도 형성되지 않은 실정이지만 차츰 국내 과학자들이 AMS의 기능을 알기 시작하면 급속도로 이용자가 늘어날 것으로 생각된다. 이미 앞에서 언급이 되

었지만 AMS를 이용한 대기 환경 연구는 대단히 중요하다고 할 수 있다. 대도시에서의 대기오염, 고속도로 주변에서의 대기오염도 분포, 원자력발전소 부근의 방사능 오염도, 황해 상공에서의 에어로졸 발생원인 및 그 경로 측정 등은  $^{14}\text{C}$ 의 분석에 의해 쉽게 접근할 수 있는 과제들이다. 문제는 표적제작을 위한 장치 개발인데 학제간(Interdisciplinary) 연구가 활성화 되면 해결될 것으로 여겨진다. 이러한 표적제작 기구가 많이 만들어져 신뢰성 있는 표적이 만들어지면 AMS에 의한 환경 연구는 크게 발전하게 될 것이다.

#### 참 고 문 헌

- Bennet, C.L., R.P. Beukens, M.R. Clover, H.E. Gove, R.B. Liebert, A.E. Litherland, K.H. Purser, and W.E. Sonderheim (1977) Radiocarbon dating using electrostatic accelerators: negative ions provide the key, *Science* 198, 508.
- Cohen, G.J., D.L. Hutton, E.A. Osborne, K.F. von Reden, A.R. Gagnon, A.P. McNichol, and G. Jones (1994) Automated sample processing at the National Ocean Sciences AMS Facility, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B92*, 129-133.
- Finkel, R.C. and M. Suter (1993) AMS in the Earth Sciences: Technique and Applications. *Advances in Analytical Geochemistry*, 1, 1-114.
- Gagnon, A.R. and G.A. Jones (1993) AMS-graphite target production methods at the Woods Hole Oceanographic Institution during 1986~1991. *Radiocarbon*, 35(2), 301-310.
- Goulding, F.S. (1985) Heavy-ion identification using detector telescope, *Treatise on Heavy-Ion Science Vol. 7*, Plenum Press, 227-271.
- Gurfinkel, D.M. (1987) An assessment of laboratory contamination at the isotrace radiocarbon facility, *Radiocarbon* 29(3), 335-346.
- Kim, J.C., C. Lee, I.C. Kim, J.H. Park, J. Kang, M.K. Cheoun, Y.D. Kim, and C.-B. Moon (1999) A New AMS facility in Korea, *Proceedings of the 8th international conference on Accelerator Mass Spectrometry*, Vienna, Austria. To be published in *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*.
- Lal, D. (1988). Theoretically expected variations in the terrestrial cosmic-ray production rates of isotopes, in *Solar Terrestrial Relationships and the Earth Envi-*

- ronment in the Last Millennia. Edited by G.C. Catasgnoli. North-Holland, Amsterdam, XCV, 216-233.
- Muller, R.A. (1977) Radioisotope dating with a cyclotron, Science 196, 489.
- Nadeau, M.-J., M. Schleicher, P.M. Grootes, H. Erlenkeuser, A. Gott dang, D.J.W. Mous, J.M. Sarnthein, and H. Willkomm (1997) The Leibniz-Labor AMS facility at the Christian-Albrechts University, Kiel, Germany, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B123, 22-30.
- Nakamura, T., H. Oda, A. Ikeda, M. Minami, E. Niu, T. Ohta, H. Takahashi, M. Adachi, and L. Pals (1999) The  $^{14}\text{C}$  AMS facility of the Nagoya University: status and research program, Proceedings of the international workshop on frontiers in Accelerator Mass Spectrometry. National Institute for Environmental Studies (unpublished). 75-85.
- Nelson, D.E., R.G. Korteling, and W.R. Stott (1977) Carbon-14: direct detection at natural concentration, Science 198, 507.
- Stuiver, M., T.F. Braziunas, B.B. Becker, and B. Kromer (1990) Late-glacial and Holocene atmospheric  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  change: Climate, solar, oceanic and geomagnetic influences. Quat. Res., 35, 1-24.
- Tuniz, C., J.R. Bird, D. Fink, and G.F. Herzog (1998) *Accelerator Mass Spectrometry; Ultrasensitive Analysis for Global Science*, CRC Press..
- Verkouteren, R.M., A.J.T. Jull, and T.W. Linick (1987) Preparation of microgram samples on iron wool for radiocarbon analysis via accelerator mass spectrometry, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B29, 41-44.
- Vogel, J.S., D.E. Nelson, and J.R. Southon (1987)  $^{14}\text{C}$  background levels in an accelerator mass spectrometry system, Radiocarbon 29(3), 323-333.
- von Reden, K.F., R.J. Schneider, G.J. Cohen, and G.A. Jones (1994) Performance characteristics of the 3MV Tandetron AMS system at the National Ocean Sciences AMS facility, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B92, 7-11.
- Wijma, S. and J. van der Plicht (1997) The Groningen AMS tandetron, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B123, 87-92.