

MA7(SL2) 가속기 질량 분광분석법을 이용한 대기 환경 연구* Accelerator Mass Spectrometry in Atmospheric Environment*

문창범** · 채수조 · 정준오¹⁾ · 정진도¹⁾
호서대학교 물리학과, ¹⁾호서대학교 환경공학과

1. 서론

가속기 질량분광분석법(Accelerator Mass Spectrometry; AMS)은 동위원소 분석에 있어 초정밀 질량 분석 기술에 속한다. 시료(Samples)의 원자를 이온화 시켜 가속시키고, 에너지, 운동량 그리고 전하 상태를 분석하여 최종 얻고자 하는 원자핵의 동위원소, 예를 들어 탄소-14(¹⁴C),의 수를 정확하게 측정하는 분광분석 기술이다. 본 논문을 통하여 AMS를 소개하고 대기 환경 연구에 AMS가 어떻게 응용될 수 있는지 살펴 보기로 한다. AMS는 3백만 전자볼트 (3 MV) 규모의 정전기 가속기와 그 주변기기인 질량 분석 장치들로 구성되어 있다. 이전부터 연대측정에 있어서는 탄소 동위원소 중 탄소-14 (¹⁴C; 반감기, $T_{1/2} = 5730$ 년)의 분석에 의해 이루어져 왔다. ¹⁴C는 우주선(Cosmic Ray)로부터 유발된 중성자가 대기 중의 질소와 만나 ¹⁴N(n,p)¹⁴C 반응에 의해 형성된다. 여기서 p는 양성자를 뜻한다. 이렇게 형성된 ¹⁴C는 대기 중에서 이산화탄소로 변화하며 기존의 이산화탄소와 섞이게 된다. 이 과정에서 ¹⁴C는 탄소와 일정한 비율을 유지하는 것으로 알려져 있는데 그 비율, 즉 ¹⁴C/¹²C은 약 1.2×10^{-12} 이다. 이러한 이산화탄소는 탄소동화 작용을 거쳐 식물에 축적되고 2차적으로 동물에게까지 그 비율이 그대로 축적되게 된다. 결국 식물이나 동물이 더 이상 생존해 있지 않으면 그 이후로는 ¹⁴C는 축적되지 못하고 일정한 율로 방사성 붕괴를 하게 되어 연대 측정이 가능하게 된다. 그런데 ¹⁴C의 함유량이 극소수이다 보니 기존의 보통 방법의 질량 분광분석법(Mass Spectrometry, 간단히 질량분석법이라고 부르기도 함)으로는 시료의 양이 많지 않으면 ¹⁴C의 정확한 함유량을 측정하기가 어려웠다. 가속기를 사용한 질량분광분석법, 즉 AMS에 의한 ¹⁴C의 정확한 함유량 측정은 기존의 질량 분석법에 따라 섭광 또는 기체 검출기 등을 이용한 계수 측정보다 연대 측정을 하는데 시료의 크기를 1/1000 로 줄이는 효과를 가져다 주었다. 이러한 결과는 특히 고고학자나 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.

¹⁴C 외에, 베릴륨-10 (¹⁰Be ; $T_{1/2} = 150$ 만년), 염소-36 (³⁶Cl; $T_{1/2} = 30$ 만년), 알루미늄-26 (²⁶Al; $T_{1/2} = 72$ 만년), 요오드-129 (¹²⁹I; $T_{1/2} = 1600$ 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 ¹²⁹I의 추적 결과 북극 (North Pole) 해류의 움직임을 관측하는 커다란 성과를 거두기도 하였다.

AMS는 전세계 20 여개국의 40 여개 대학과 연구소에서 가동되고 있으며 다양한 연구에 이용되고 있다. 초기의 AMS는 기존의 핵물리학 소형 정전기가속기(tandem Vande Graaff)의 밑라인 일부를 변환하여 시행되었으나, 1981-1983년경 소형 탄데트론 가속기를 사용한 AMS 전용의 제 1세대 탄데트론 AMS가 제작되어 미국, 캐나다, 영국, 프랑스, 일본 등에 보급되었다. 이들 AMS 전용기들은 매우 안정되고 뛰어난 성능을 보였으며 불과 몇대의 장치들이 측정할 ¹⁴C의 분석량이 전 세계 데이터의 과반수 이상을 차지하였다. 1991년 이후 그 규모는 종래의 탄데트론 AMS와 같으나 최신의 초 진공기술, 컴퓨터에 의한 자동화 및 제어 기술의 적용으로 고성능의 신형 탄데트론 AMS가 개발되었다(High Voltage Engineering Europa; HVEE).

* 1997년도 한국학술진흥재단 연구 사업비에 의해 연구되었음.

** Corresponding Author: <http://nuclina.hoseo.ac.kr/~moon/>

이들 신행은 미국의 우즈홀 해양연구소(Woods Hole Oceanographic Institution) [von Reden et al., 1994], 네덜란드의 그로닝겐 대학(University of Groningen) [Wijma et al., 1997], 독일의 킬 대학 [Nadeau et al., 1997], 일본의 나고야 대학 [Nakamura et al., 1999]에 보급되었고, 이어 다섯번 째로 우리나라의 서울대학교 기초과학교육연구공동기공원에 1998년 2월에 도입되었다 [Kim et al., 1999]. 이 기기는 1998년에 무사히 설치되어 시운전에 성공하였으며, 1999년도부터는 시료의 분석에 들어가 우리나라에서도 본격적인 AMS시대가 열리게 되었다. 표 1에 전 세계적으로 설치되어 있는 주요 AMS 시설들을 열거해 놓았다.

Table 1. AMS facilities in the world (1998).

Country	Accelerator	Location
Australia	8 MV FN Tandem	Nucl.Sci. and Technol. Organ., Sydney
	2.5 MV Tandetron	Comm. Sci. and Industr. Res. Organ., Sydney
	14 MV Pelletron	Australian National University, Canberra
Austria	3 MV Pelletron	University of Vienna, Vienna
Canada	2.5 MV Tandetron	University of Toronto, Toronto
China	6 MV Tandem	Shanghai Inst. of Nucl. Res., Shanghai
	6 MV EN Tandem	Peking University, Beijing
England	2.5 MV Tandetron	University of Oxford, Oxford
	5 MV Pelletron	University of York, Sand Hutton
France	2.5 MV Tandetron	Nat. Sci. Research Center, Gif-sur-Yvette
Germany	3 MV Tandetron	University of Kiel, Kiel
	6 MV EN Tandem	Univ. of Erlangen-Nuernberg, Erlangen
Israel	14 MV Pelletron	Weizmann Institute of Science, Rehovot
Japan	3 MV Tandetron	Japan Atomic Energy Res. Ins., Mutsu
	2.5 MV Tandetron	Nagoya University, Nagoya
	3 MV Tandetron	Nagoya University, Nagoya
	5 MV Pelletron	Nat. Inst. for Environ. Studies, Tsukuba
	5 MV Pelletron	University of Tokyo, Tokyo
Korea	3 MV Tandetron	Seoul National University, Seoul
Netherlands	3 MV Tandetron	University of Groningen, Groningen
New Zealand	6 MV EN Tandem	Inst. of Geolog. and Nucl. Sci., Lower Hutt
Sweden	6 MV EN Tandem	University of Uppsala, Uppsala
	3 MV Pelletron	University of Lund, Lund
	6 MV EN Tandem	Swiss Federal Inst. of Technology, Zurich
Switzerland	0.5 MV Pelletron	Swiss Federal Inst. of Technology, Zurich
	2.5 MV Tandetron	Woodshole Oceanographic Institution
USA	ATLAS Linac	Argonne National Laboratory, Chicago
	2.5 MV Tandetron	University of Arizona, Tucson
	9.5 MV FN Tandem	Lawrence Livermore Nat. Lab., Livermore
	9 MV FN Tandem	Purdue University, West Lafayette

2. AMS 원리

가속기(보통 tandem Van de Graaff)는 이온빔을 방출할 때 질량과 전하 상태를 선택할 수 있으며, 아울러 보통의 질량 분석방법에 따른 기능을 동시에 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}N 인 경우가 대표적인데, 이 원자는 안정된 음이온을 생성하지 못하는 것으로 알려져 있어 결국 이온샘으로부터 완전히 제거시킬 수가 있다.

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

다음 그림은 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}C 를 이용한 분석이 주류를 이루고 있을 뿐만 아니라 현재 서울대학교의 AMS 역시 ^{14}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 탄소

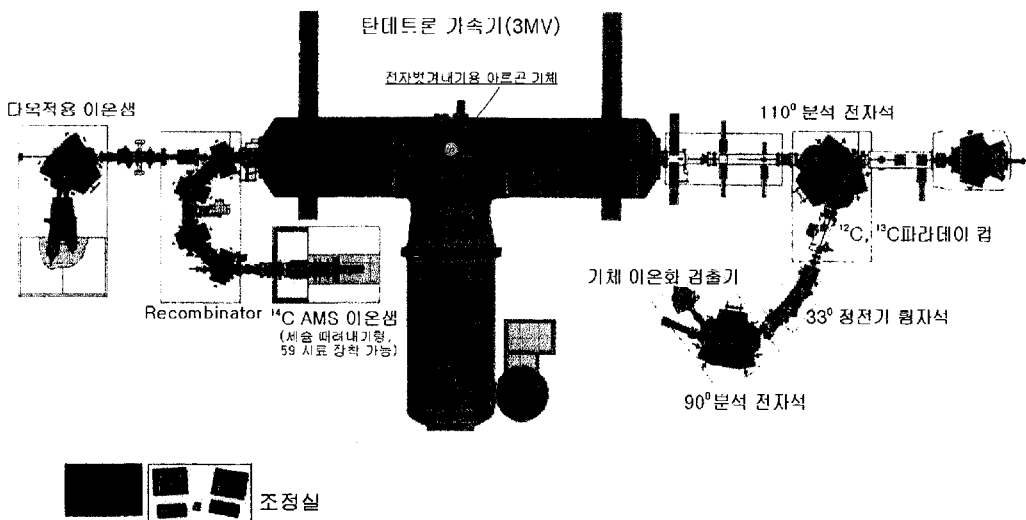


Fig. 1. Schematic layout of the AMS system at Inter-University Center for Natural Science Facilities of Seoul National University (<http://npl3.snu.ac.kr/ams1>).

이온이 방출하게 된다. 이렇게 음전하를 띤 이온은 이온샘의 방출판을 향하여 약 20 kV의 에너지로 가속되며 첫 분석전자석으로 들어 간다. 이곳에서 이온 빔의 질량에 따른 분석이 이루어진다. 이렇게 1차적으로 걸러진 이온이 가속기 내부로 들어가게 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 +3 가($q=+3$)의 양의 이온으로 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}C), 탄소-13(^{13}C), 탄소

-14(¹⁴C)가 분리되어 나온다. 이어 전기장으로 이루어진 분석기와 자기장의 분석자석을 통과하면서 다른 이온들이 전혀 포함되지 않은 순수 ¹⁴C을 얻게 된다. 이러한 ¹⁴C는 이온 기체 검출기(ion gas detectors)에서 검출되어 컴퓨터 화면에 스펙트럼으로 나타난다.

3. AMS와 대기 환경 연구

국토가 좁고 인구가 많은 우리나라의 여건을 고려해 볼 때 체계적인 환경 측정은 대단히 중요하다. 여기에는 대기 환경의 오염 측정뿐만 아니라 바다의 환경, 지질학적인 환경 측정도 포함되어야 함은 물론이다. 더구나 우리나라는 급속한 자동차 증가에 따른 대기오염 확산, 일관성 없는 환경정책과 지방자치정부의 무분별한 자연과괴성 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 ¹⁴C가 포함되지 않기 때문이다.

최근 AMS 연구는 특히 환경 및 지구 과학 분야에 급속히 확산되고 있다 [Tuniz et al., 1998]. 대기 속의 ¹⁴C의 측정은 대기의 환경오염 연구에 적합하며, 저수지나 해저 퇴적물 속의 유기물에 함유된 ¹⁴C의 측정은 지각의 변동과 고기후의 연구에, 바닷물속에 녹아 있는 탄산가스 중의 ¹⁴C의 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 ¹⁴C의 측정을 가능하게 하여 이로부터 과거의 기후 및 태양활동도 밝혀지고 있다 [Tuniz et al., 1998]. 또한 나이테의 분석에 의해 지금으로부터 9600년 전까지의 ¹⁴C 변화를 알 수 있게 되었는데, 그 변화의 특징은 지구의 자기장의 변화로 밝혀지기도 했다. [Stuiver, 1990]. AMS의 등장은 또한 나무들의 나이테에 축적된 이산화탄소와 화석연료, 발전소, 자동차 및 소각 등에서 나오는 이산화탄소를 적은 양으로도 분석이 가능하게 하여 계절적 변화의 흐름까지 알 수 있게 하였다. 더구나 대기 기체 또는 분진에 함유된 ¹⁴C의 분석은 대기환경 오염원 추적에 상당한 공헌을 하고 있다.

4. 전망

우리나라에서의 AMS 연구는 이제 시작단계(1999년도)라고 할 수 있다. 아직까지 AMS 사용자 그룹도 형성되지 않은 실정이지만 차츰 국내 과학자들이 AMS의 기능을 알기 시작하면 급속도로 이용자가 늘어날 것으로 생각한다. 이미 앞에서 언급이 되었지만 AMS를 이용한 대기 환경 연구는 대단히 중요하다 할 수 있다. 대도시에서의 대기오염, 고속도로 주변에서의 대기오염도 분포, 원자력발전소 부근의 방사능 오염도, 황해 상공에서의 에어로졸 발생원인 및 그 경로 측정 등은 ¹⁴C의 분석에 의해 쉽게 접근할 수 있는 과제들이다.

참고 문헌

- von Reden, K.F., Schneider, R.J., Cohen, G.J. and Jones, G.A. (1994) Performance characteristics of the 3MV Tandatron AMS system at the National Ocean Sciences AMS facility, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B92, 7-11.
- Wijma, S. and van der Plicht, J. (1997) The Groningen AMS tandetron, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B123, 87-92.
- Nadeau, M.-J., Schleicher, M., Grootes, P.M., Erlenkeuser, H., Gottang, A., Mous, D.J.W. Sarnthein, J.M. and Willkomm, H. (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., Oda, H., Ikeda, A., Minami, M., Niu, E., Ohta, T., Takahashi, H., Adachi, M. and

- Pals, L. (1999) The ^{14}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.
- Kim, J.C., Lee, C.H., Kim, I.C., Park, J.H., Kang, J., Cheoun, M.K., Kim, Y.D. and Moon, C.-B. (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.
- Tuniz, C., Bird, J.R., Fink, D. and Herzog, G.F. (1998) *Accelerator Mass Spectrometry; Ultrasensitive Analysis for Global Science*, CRC Press. AMS에 대한 전반적인 내용을 다루고 있으며, 참고문헌이 풍부하게 망라되어 있다.
- Goulding, F.S. (1985) Heavy-ion identification using detector telescope, Treatise on Heavy-Ion Science Vol. 7, Plenum Press, 227-271.
- Stuiver, M., Braziunas, T.F., B., Becker, B. and Kromer B. (1990) Late-glacial and Holocene atmospheric $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ change: Climate, solar, oceanic and geomagnetic influences. Quat. Res., 35, 1-24.