

가속기 질량분석법에 의한 화석연료 기원 이산화탄소의 농도 분포: 대전지역을 중심으로

박중헌* · 홍 완 · 박지연 · 성기석 · 음철현

한국지질자원연구원 지질특성분석센터
(2007. 11. 2. 접수, 2008. 1. 14. 승인)

Distribution of CO₂ produced from fossil fuel by accelerator mass spectrometry: in Daejeon

Junghun Park*, Wan Hong, Ji Youn Park, Ki Seok Sung and Chul-Hun Eum

*Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 30 Gajeong-dong,
Yuseong-gu, Daejeon, 305-350, Korea*

(Received December 2, 2007; Accepted January 14, 2008)

요 약: 대전시내에서 화석연료로부터 발생된 이산화탄소의 분포를 파악하기 위하여 주요 교차로와 비교배경지역을 대상으로 나뭇잎 시료를 채취하였다. 나뭇잎 시료들은 전처리를 거친 후에 가속기 질량분석기(AMS)를 이용하여 $\Delta^{14}\text{C}$ 를 측정하였다. 측정결과, 대전 시내 나뭇잎 시료의 $\Delta^{14}\text{C}$ 값은 비교배경지역보다 27-102 % 정도 낮은 값을 보였다. 이로부터 대전 시내 대기 중의 이산화탄소 중에서 자동차 배기가스 등으로부터 배출된 화석연료 기원의 이산화탄소 비율을 구하였다. 비교배경지역으로 선정한 계룡산에서의 $\Delta^{14}\text{C}$ 값은 $35 \pm 8 \%$ 이었고 이 값은 미국에서 측정된 66.3 % 보다는 다소 낮은 값이다.

Abstract: We have collected a batch of leaf samples at several main crossroads in Daejeon and a background site to obtain distribution of CO₂ (greenhouse gas) due to fossil fuel combustion. The leaf samples were treated with AAA method and $\Delta^{14}\text{C}$ values of them were measured using AMS. $\Delta^{14}\text{C}$ values of downtown sites were found to be lower by 27-102 % than that of the background site, and the ratio of CO₂ originated from fossil fuel combustion in the atmosphere of Daejeon could be calculated from the differences of $\Delta^{14}\text{C}$ values. The average $\Delta^{14}\text{C}$ of the background site, around Kyeryong mountain, was measured to be $35 \pm 8 \%$, and this value is lower than 66.3 %, which have been known as the background values in USA.

Key words: AMS, Greenhouse gas, CO₂, ¹⁴C, fossil fuel

★ Corresponding author

Phone : +82-(0)42-868-3391 Fax : +82-(0)42-868-3393

E-mail : junghun@kigam.re.kr

1. 서 론

온실가스에 의해 지구 온난화 현상이 나타난다는 것이 밝혀지면서 이와 관련된 연구들이 활기를 띠고 있다. 이산화탄소와 같은 온실가스의 분포를 모니터링하기 위한 방법으로 최근에 AMS를 이용하여 대기 중의 ^{14}C 농도를 측정하는 연구가 시도되고 있다.¹ AMS를 이용할 경우, 대기 중의 이산화탄소 중에서 화석연료에 의해 만들어진 이산화탄소만을 구분해서 그 양을 측정하는 것이 가능하기 때문이다. 이러한 연구는 대기 중에 증가된 이산화탄소의 발생 원인을 알아내기도 하고 그 발생 원인이 되는 화력발전소나 산업단지,² 대도시³⁻⁵ 주변의 화석연료로부터 발생된 이산화탄소의 분포나 이동경향을 알아내기도 한다.

가속기 질량분석 장치(AMS)는 시료의 원자를 이온화시켜 가속시키고, 에너지와 운동량 그리고 전하상태를 분석하여 최종 얻고자 하는 원자핵의 동위원소, 예를 들면 방사성탄소(^{14}C)의 수를 정확하게 측정하는 분광기술이다.⁶ 이 기술은 동위원소 분석에 있어서 현재 최고 수준의 분해능을 가지고 있으며 측정할 수 있는 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 비율의 분해능은 10^{-15} 까지이다.⁷ 이 때문에 이 장치를 이용한 연구들이 다양한 방면에서 이루어지고 있으며 대기 중의 이산화탄소에서 화석연료에 의해 생성된 이산화탄소만의 비율을 측정하여 그 지역적인 분포를 구하는 연구들이 진행되고 있다.⁸

대기 중에 있는 이산화탄소들은 ^{12}C , ^{13}C , ^{14}C 와 같은 3가지의 동위원소들로 이루어져 있으며 그 비율은 $1.2 \times 10^{12} : 1.3 \times 10^{10} : 1$ 정도이다. 그리고 대기와 상호작용하는 식물과 식물을 먹고사는 동물의 몸을 구성하는 탄소의 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 비율도 1.2×10^{-12} 이다. 그러나 식물이나 동물이 죽고 땅속에 묻혀서 대기와 상호작용을 하지 않게 되면 불안정 동위원소인 ^{14}C 는 5730년의⁹ 반감기를 가지고 시간에 따라 감소하고 5만년이 이상이 지나가면 ^{14}C 가 거의 측정되지 않는다. 이러한 원리를 이용하여 탄소연대측정을 하기도 한다.

대기 중 탄소의 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 비율인 1.2×10^{-12} 은 5만년 이상을 두고 오랜 세월 동안 크게 변하지 않았다.¹⁰ 그러나 세 가지의 인위적인 이유로 그 비율이 급격하게 변화하게 된다. 그중 두 가지 인위적인 이유는 ^{14}C 농도를 증가시키고 다른 한 가지 인위적인 이유는 ^{14}C 농도를 감소시킨다.

^{14}C 농도를 증가시키는 두 가지 인위적인 이유를 살펴보면 첫 번째 이유는 1945년에 행해진 최초의 핵실험 이후에 1964년까지의 대규모 핵실험이다. 이 때문에 다량의 ^{14}C 가 생성되어 대기 중의 ^{14}C 농도는 급격히 증가하며 정상적인 값의 거의 두 배가 된다.¹¹ 그 이후로는 핵실험금지조약이 체결되면서 ^{14}C 농도가 감소한다. 두 번째 이유는 핵발전소에서 나오는 ^{14}C 로 인한 것이다. 이 때문에 1964년 이후 빠르게 감소하던 ^{14}C 의 농도는 그 감소 속도가 둔화되고 있다.¹²

마지막으로 ^{14}C 의 농도를 감소시키는 다른 한 가지 이유는 생성 후 최소한 수십 번의 반감기가 지나간 화석연료는 ^{14}C 가 전혀 측정되지 않는데 이러한 화석연료를 산업혁명이래로 대량으로 연소시키면서 ^{14}C 가 없는 이산화탄소가 대량으로 배출되는 것이다. 이로 인해 대기 중 ^{14}C 의 농도가 낮아진다. 이러한 현상은 산업혁명이래로 전 세계적으로 나타나고 있으며 이러한 현상을 Suess effect¹³라고 한다. 이와 같은 현상은 국부적으로도 나타나는데 예를 들자면 대도시나 산업단지 주위에서만 국부적으로 ^{14}C 의 농도가 낮아지기도 하며 이러한 현상을 regional Suess effect^{14,15}라고 하기도 한다. 또 이와 같이 ^{14}C 의 농도가 낮아진 정도를 주변 청정지역(비교배경지역)의 ^{14}C 농도와 비교하여 그 차이를 알아낸 후 대기 중의 이산화탄소 중 화석연료로부터 만들어진 이산화탄소의 비율을 알아내기도 한다.

이러한 연구는 대기시료를 직접 채취하여 하기도 하지만 나뭇잎 시료나 나이트 시료를 이용해서 하기도 한다. 나무는 광합성을 통해서 대기 중의 CO_2 를 흡수하여 탄소를 축적하고 산소를 배출하는 활동을 한다. 그리고 축적된 탄소 등을 이용하여 나뭇가지와 잎사귀를 만들므로 대기 중의 CO_2 와 같은 탄소 동위원소 비율을 가지게 된다. 따라서 대기시료를 대신해서 나뭇잎이나 나이트 시료를 사용해서 대기의 이산화탄소 중 화석연료로부터 만들어진 이산화탄소의 비율을 알아낼 수 있다.

본 연구에서는 대전 시내 주요 교차로에서 나뭇잎 시료를 채취하여 탄소의 동위원소 비를 측정하고, 그 결과로부터 regional Suess effect의 유무를 확인하였다. 또 이로부터 화석연료의 연소에 의해 생성된 이산화탄소의 양을 추정하였다. 이러한 양을 구하기 위한 비교배경지역으로는 계룡산을 선정하였다. 계룡산은 산업단지가 거의 없고 인구밀도도 낮으며 대전 서쪽에 있으므로 우리나라의 주된 공기 흐름인 서풍의 대전에서 불 때의 출발점이므로 비교배경지역으로 적당하다.

본 연구에서는 대전 시내 주요 교차로에서 나뭇잎 시료를 채취하여 탄소의 동위원소 비를 측정하고, 그 결과로부터 regional Suess effect의 유무를 확인하였다. 또 이로부터 화석연료의 연소에 의해 생성된 이산화탄소의 양을 추정하였다. 이러한 양을 구하기 위한 비교배경지역으로는 계룡산을 선정하였다. 계룡산은 산업단지가 거의 없고 인구밀도도 낮으며 대전 서쪽에 있으므로 우리나라의 주된 공기 흐름인 서풍의 대전에서 불 때의 출발점이므로 비교배경지역으로 적당하다.

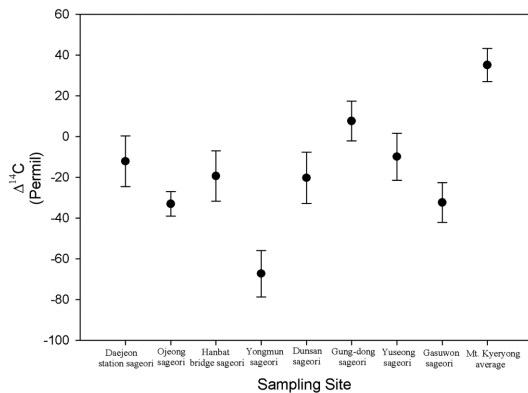


Fig. 2. $\Delta^{14}\text{C}$ of leaves samples which were collected at main cross roads in Daejeon city using AMS.

C_f : 측정대상지역 대기의 CO_2 중 화석연료에 의해 생긴 CO_2 의 양

C_s : 측정대상지역 대기의 CO_2 의 양

우선 $\Delta^{14}\text{C}$ 값들을 보면 대전 시내 주요 교차로의 $\Delta^{14}\text{C}$ 값이 비교배경지역인 계룡산의 $\Delta^{14}\text{C}$ 값보다 작으므로 regional Suess effect가 나타나고 있음을 알 수 있다. 교차로별 비교를 해보면 용문 4거리의 $\Delta^{14}\text{C}$ 값을 제외하고는 다른 지역의 $\Delta^{14}\text{C}$ 값들은 오차 범위 안에서 비슷하다고 할 수 있겠다.

비교배경지역으로 선정한 계룡산의 $\Delta^{14}\text{C}$ 값의 평균은 $35 \pm 8 \%$ 인데 이 값은 2005년에 미국에서 측정된 66.3%에 비하면 다소 낮은 값이다.⁸ 아마도 서해안 지역의 대규모 공업단지라든가 화력발전소 혹은 중국의 공업단지에서 오는 오염된 공기로 인한 효과가 아닌가 생각된다. 그렇지만 $\Delta^{14}\text{C}$ 값이 비교적 낮게 측정되었어도 대전 주변의 $\Delta^{14}\text{C}$ 값에 영향을 주는 여러 요인들을 background로 생각하고 대전시내만의 regional Suess effect를 알아보기에는 계룡산의 $\Delta^{14}\text{C}$ 값을 이용하는 것이 적절하다고 생각한다.

용문 4거리는 교통량이¹⁶ 다른 지역에 비해서 많지는 않지만 Fig. 1에서 알 수 있는 바와 같이 광범위한 인구밀집지역의 중심부에 위치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 $\Delta^{14}\text{C}$ 값을 낮추는 쪽으로 영향을 주는 주변 환경에 위치하고 있다. 즉 용문 4거리의 교통량은 조금 작을 지라도 주변의 도로 밀도가 높으므로 주변의 교통량까지 고려하면 전체적인 교통량은 좀 더 많을 수 있다. 게다가 대전 북쪽의 신도시 부근과 달리 출퇴근 시간에는 차가 막히는 지역이므로 자동차의 주차 시간이 길어질 수 있다. 이러한

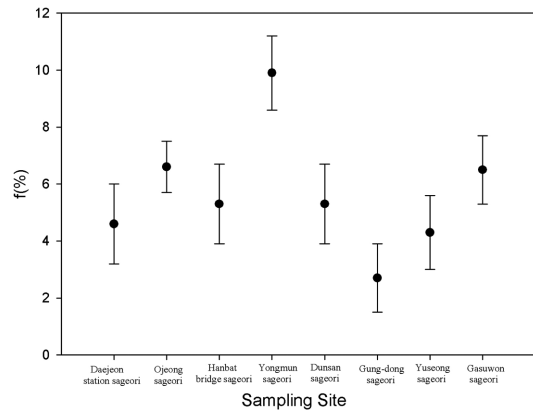


Fig. 3. The content graph of CO_2 produced from fossil fuel in Daejeon city in CO_2 of atmosphere.

여러 가지 요인들이 $\Delta^{14}\text{C}$ 값을 낮추는 쪽으로 영향을 주는 것으로 생각된다. 즉 $\Delta^{14}\text{C}$ 값은 교통량 뿐 아니라 주변의 자동차 주차시간, 바람, 공장지대의 유무 등과 같은 여러 가지 요인들이 많은 영향을 주는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 대기 중 CO_2 에서 화석연료에 의해 만들어진 CO_2 의 함량을 보여주는 그래프이다. 이 그래프로 부터 화석연료에 의해 만들어진 CO_2 의 함량은 2-10% 정도의 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 이 정도의 값은 정의된 식이 조금 다르지만 천안의 6-13%와 비슷하거나 조금 작다⁶. 대전 시내 교차로별 경향은 $\Delta^{14}\text{C}$ 와 같다.

4. 결 론

대전 시내 주요 교차로의 $\Delta^{14}\text{C}$ 값은 비교배경지역인 계룡산의 $\Delta^{14}\text{C}$ 값보다 27-102% 정도 낮았고, regional Suess effect가 나타나고 있음을 알 수 있었다. 이로부터 대기 중의 CO_2 중 대전 시내에서 방출된 화석연료 기원의 CO_2 의 함량은 2-10% 정도임을 알 수 있었다.

계룡산에서 측정된 대전 주변의 background $\Delta^{14}\text{C}$ 값도 미국에서 2005년도에 측정된 값보다 31% 정도 낮게 측정되고 있음을 알 수 있었다.⁸ 어떤 요인이 이와 같은 효과를 가져왔는지 알기 위하여 첫 번째로 주변의 공업단지라든가 화력발전소들을 파악하고 그 주변 $\Delta^{14}\text{C}$ 값의 분포를 조사할 필요성이 있고 두 번째로는 서해안 지역의 $\Delta^{14}\text{C}$ 값을 측정하여 중국에서 넘어오는 오염된 대기로 인한 영향인지 알아보아야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘지질물질 특성분석 시스템 구축 및 표준화(08-3412-11)’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Ingeborg Levin, Vago Hesshaimer, *Radiocarbon*, **42(1)**, 69-80(2000).
- G. Quarta, G.A. Rizzo, M. D'Elia and L. Calcagnile, *Nucl. Instr. Meth., B* **259**, 421-425(2007).
- T. Kuc, K. Rozanski, M. Zimnoch, J. M. Necki and A. Korus, *Applied Energy*, **75**, 193-203(2003).
- Andrzej Rakowski, Toshio Nakamura and Anna Pazdur, *Nucl. Instr. Meth. B*, **223-224**, 507-510(2004).
- Ingeborg Levin, K.O. Münnich and Wolfgang Weiss, *Radiocarbon*, **22**, 379-391(1980).
- 문창범, 박중현, 김인철, 김종찬, 이창학, 천명기, 강진, *새물리*, **40**, 332-338(2000).
- Claudio Tuniz, John R Bird, David Fink, Gregory and F. Herzog, “Accelerator Mass Spectrometry”, 3, CRC Press, USA (1998).
- Diana, Y. Hsueh, Nir Y. Krakauer, James, T. Randerson, Xiaomei Xu, Susan, E. Trumbore and John, R. Southon, *Geophysical research letters*, **34**, L02816(2007).
- H. Godwin, *Nature*, **195**, 984(1962).
- W. F. Libby, *Phys. Rev.*, **69**, 671-672(1946).
- J. H. Park, J. C. Kim, M. K. Cheoun, I. C. Kim, M. Youn, Y. H. Liu, E. S. Kim, *Radiocarbon*, **44(2)**, 559-566(2002).
- P. L. Leung, M. J. Stokes, S. H. Qiu, L. Z. Cai, *Radiocarbon*, **37(2)**, 505-508(1995).
- Hans E. Suess, *Science*, **122**, 415-417(1955).
- ROMUALD AWSIUK and MIECZYSLAW F PAZDUR, *Radiocarbon*, **28**, 655-660(1986).
- TADEUSZ KUC and MIROSLAW ZIMNOCH, *Radiocarbon*, **40**, 417-423(1998).
- 육동일, “교통 조사 및 분석 보고서”, 18, 한국, 2006.
- J. S. Vogel, J. R. Southon and D. E. Nelson, *Nucl. Instr. Meth. B*, **29**, 50-56(1987).
- J. C. Kim, C. H. Lee, I. C. Kim, J. H. Park, J. Kang, M. K. Cheoun, Y. D. Kim and C. B. Moon, *Nucl. Instr. and Meth. B*, **172**, 13-17(2000).
- 박중현 박사논문, “치악산과 계룡산의 ^{14}C level들과 경북공지역의 Suess effect”, 71, 서울대, 한국 (2003).