

X-선에 조사된 설탕의 전자 상자성 공명 연구

부산대학교 물리학과 · 부산대학교 대학병원* · 동아대학교 대학병원**
옥치일 · 손필국 · 허경찬 · 손종기* · 이 인** · 김장환

- Abstract -

A Study of Electron Paramagnetic Resonance of Sugar Irradiated X-ray

Chi Il Ok · Phil Kook Son · Kyoung Chan Heo · Jong Gi Shon* · In Lee** · Jang Whan Kim
Dept. of Physics, Pusan National University
*Pusan National University Hospital**
*Dong-A University Hospital***

When ordinary sugar is exposed to ionizing radiation, a number of free radical are created in sugar, and Electron Paramagnetic Resonance (EPR) signal appears from the sugar because of the paramagnetic property of free radical. In this paper, EPR signal intensity has been measured in x-ray irradiated sugar for various absorbed doses, irradiated dose up to 50 Gy. The EPR intensity signals are increased as the x-ray irradiation increases. Also, the fading value decreased to about 3% in 30day after the irradiation. Therefore, the sugar is a useful material for emergency dosimeter as the free radical dosimetry with the EPR equipment.

I. 서 론

최근 산업체, 연구소 등 방사선을 이용하는 기관이 급속하게 증가함에 따라 방사선에 관련된 사고의 가능성도 커지고 있다. 정상적인 방사선 작업의 경우에는 방사선 피폭이 적절한 절차에 따라 관리되고 있지만 방사선 사고의 경우에는 방사선 피폭이 제어되지 않는다. 따라서 방사선에 관련된 사고의 경우, 방사선작업과 관계가 없는 사람들이 방사선에 피폭이 될 가능성이 많고, 또한 방사선 관련 작업의 종사자들도 피폭량을 정확하게 측정할 수단이 없어지는 경우가 많다.

1986년 구소련에서 발생한 체르노빌(Chernobyl) 원자력 발전소의 사고는 막대한 인명과 재산상의 피해를 가져왔고, 특히 이 사고의 경우에는 방사선 선량계를 착용하지 않은 다수의 일반인들까지도 많은 양의 방사선에 피폭되었다. 방사선 피폭량을 정확하게 평가하는 것은 정상적인 방사선 작업이나 사고시 모두 아주 중요하다. 특히 방사선 사고시에는 방사선에 과다 피폭될 가능성이 많으므로 과다 피폭된 사람들의 피폭량을 최대한 정확하고 빨리 평가하여 이에 대한 적절한 치료방법을 선택하여야 한다. 그러나 기존에 사용되고 있는 선량의 평가 방법이 사고시에는 그 기능을 발휘하지 못할 가능성이 크기 때문에 방사선 피폭량을 평가하기 위한 새로운 방법

들이 많이 연구되고 있다. 이러한 방법들로는 방사선 조사에 의한 변화된 생물학적 지표를 이용하는 것과 물리적 특성 변화를 이용하는 것이 있다. 생물학적 지표를 이용하는 것은 방사선에 조사된 말초혈액을 배양하여 핵분열 때 발생한 염색체 이상의 빈도를 조사하여 선량을 평가하는 방법¹⁻³⁾으로서 피폭된 사람의 방사선에 의한 생물학적효과를 직접 측정할 수 있는 장점이 있으나 시료를 배양하는데 어느 정도의 시간이 소요될 뿐 아니라 염색체 이상의 빈도를 조사하기 위한 전문적인 기술이 필요하다.

방사선 조사에 의한 변화된 물리적 특성을 이용하는 방법으로는 방사선 조사에 의해 물질내에 생성된 free radical을 전자 상자성 공명(Electron Paramagnetic Resonance : EPR)으로 측정하여 피폭량을 간접 평가하는 방법으로서, 특히 체르노빌 원자력 발전소의 사고 후에 측정방법이 비교적 간단한 여러 재료의 방사선에 의한 조사 효과를 EPR로 측정하기 위한 방법에 대해 많은 연구가 시작되었다⁴⁻⁸⁾. EPR에 의한 조사효과 측정은 시료를 특별히 조제할 필요가 없으며 수 mg 정도의 아주 적은 시료량으로도 측정이 가능할 뿐 아니라 측정에 소요되는 시간도 아주 짧아 사고시의 피폭량을 평가하는데 아주 좋은 방법이 될 수 있다. 그 중에서도 설탕의 조사 효과에 대한 연구가 많이 진행되고 있는데, 특히 1980년

대부터 설당을 방사선 사고시 체외 피폭선량을 평가하는데 이용하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다⁴⁻⁸⁾. 설당은 방사선에 조사되면 free radical이 생성되고 상자성의 성질을 가지게 되어 EPR 신호가 나타난다. 또한 조사량의 증가에 따라 EPR 신호가 무려 10 kGy까지 선형적으로 증가할 뿐만 아니라, fading값이 아주 낮아 실용성이 상당히 높고, 그리고 전자파 방사선의 에너지(100 keV 이상)에 거의 영향을 받지 않는다. 특히 설당은 우리가 항상 사용하고 있는 유기물로서 보통 거의 모든 가정에서 있으므로 그 시료를 구하기 쉬운 뿐 아니라 사람이 거주하는 장소에 보관되고 있기 때문에 체르노빌 같은 원자력 발전소 사고의 경우 사람의 방사선 피폭량을 거의 정확하게 평가할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 일반 가정에서 일상적으로 사용되고 있는 설당을 연속 X-선으로 조사하여 설당에 생성된 free radical을 EPR로 측정함으로써 EPR을 이용한 방법이 피폭량을 반영할 수 있는지에 대해 평가하였다.

II. 실험 방법

1. 시료준비 및 방사선 조사

본 실험에서 사용한 시료는 일반가정에서 널리 사용하는 설당을 대상으로 하였고, 시료의 질량은 100 mg, 설당의 평균직경은 약 200 μm 였다. 설당의 X-선 조사량에 따른 EPR 신호의 변화를 알아보기 위하여 설당에 X-선을 조사하였는데, Clinac 1800(Barian, 미국)으로 4 Gy/min의 선량률로 X-선을 조사하였으며, X-선 발생장치에서 발생하는 연속X-선의 최대에너지는 15 MeV, 평균에너지는 약 5.5 MeV였다. X-선의 조사량은 최소 0.1 Gy에서 최대 50 Gy의 범위였으며 조사량에 따른 시료의 종류는 12종류였다. 실험은 X-선을 조사하지 않은 시료와 조사량을 달리한 시료의 EPR 신호를 각각 분석하는 방법으로 하였다.

2. EPR 측정

시료 내에 짝을 이루지 않는 스핀들로 형성된 자기 모멘트(magnetic moment)는 고정된 자기장 내에서 Lamor 회전을 하는데 이때 자기장과 수직으로 입사하는 마이크로파와 Lamor 진동수와 일치할 때 자기공명 현상이 일어나고 입사파의 흡수가 일어난다. Fig. 1에 표시된 EPR 실험장치는 이 흡수모양을 분석하여 시료의 물성을 조사하는 기기이다.

유기물이 방사선에 조사되면 방사선의 에너지를 받은 물질은 전리가 일어나고 시료에는 free radical이 생성된다. free radical은 짝을 짓지 않는 전자이므로 EPR기기로 관찰할 수 있다. 마이크로파의 흡수되는 전력은 시료 내에 있는 짝을 이루지 않는 전자수에 비례하여 나타나

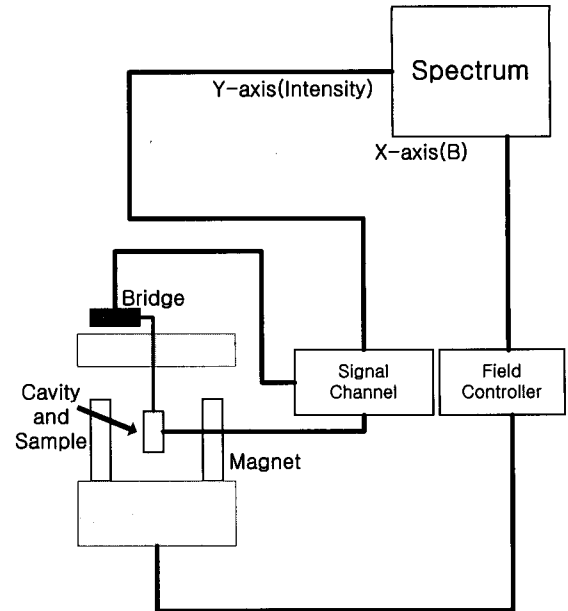


Fig. 1. EPR equipment.

므로 흡수모양을 분석하면 방사선에 의해 생성된 free radical의 상대적인 크기를 알 수 있다. 본 실험에서 사용한 EPR 측정 기기는 독일 Bruker사의 EMX-300이고 공명주파수는 9.7 GHz, 공명 자기장은 345 mT였다. 또한 실험에 사용한 Tube의 직경은 3 mm였고, modulation frequency는 100 kHz였다.

III. 결과 및 고찰

Fig. 2는 설당 100 mg의 흡수선량에 따른 실온에서 측정한 EPR 신호를 나타낸 것이다. 그림에서 흡수선량이 많을수록 EPR 신호가 커지는 것을 알 수 있고 흡수선량

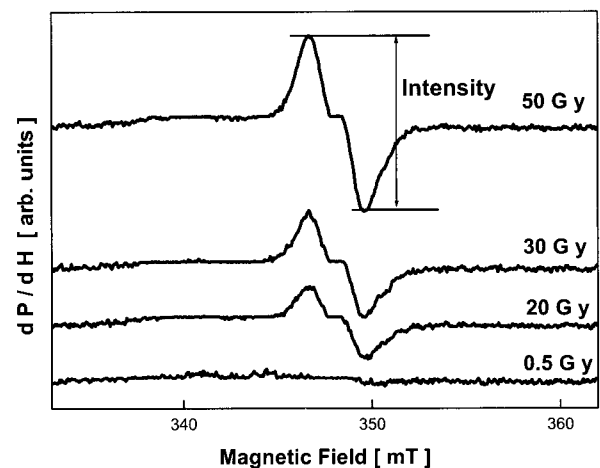


Fig. 2. EPR spectra of irradiated sugar with the various doses of X-ray.

이 0.05 Gy 이하에서는 EPR 신호가 나타나지 않았다. 흡수선량이 많을수록 EPR 신호가 커진다는 것은 시료 내에 흡수선량에 따라 짝을 짓지 않는 전자수가 증가한다는 것을 의미한다. 따라서 엑스선과 설탕과의 상호작용으로 설탕에 전달된 에너지에 의해 분자내의 에너지를 얻은 전자가 본래 위치를 벗어남으로서 설탕의 분자에 free radical이 생성된다는 것을 알 수 있고, 흡수선량이 증가함에 따라 free radical의 양도 증가한다는 것을 알 수 있다. Fig. 2는 EPR의 신호가 복잡한 것을 보여주는데 이것은 free radical이 주위의 많은 수소와의 상호작용으로 나타나는 현상이다.

Fig. 3은 설탕의 분자구조를 나타낸 것이다. 설탕이 방사선에 조사되어 free radical이 생성되는 곳은 carbon-bound hydrogen이라는 것이 다른 연구자들의 연구에서 밝혀졌고, 이 free radical이 상자성(paramagnetic)의 성질을 나타내기 때문에 EPR 신호가 나타난다⁹⁻¹¹⁾.

Fig. 4는 흡수선량에 따른 EPR 신호의 intensity를 나타낸 것이다. 그림에서 흡수선량에 따라 EPR 신호의 intensity가 거의 완벽하게 선형적으로 증가한다는 알 수 있다. 이것은 흡수선량에 따라 설탕에 생성되는 free radical의 수도 선형적으로 증가한다는 것을 의미한다. 어떤 물리적 측정 방법이 선량계로 사용되기 위해서는 선량에 따라 신호의 크기가 선형적으로 나타나야 한다. 따라서 EPR을

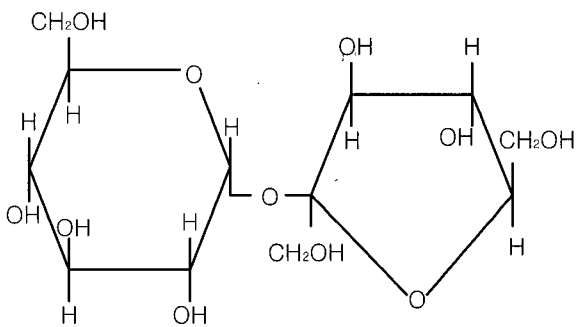


Fig. 3. The structure of a single molecule of sugar.

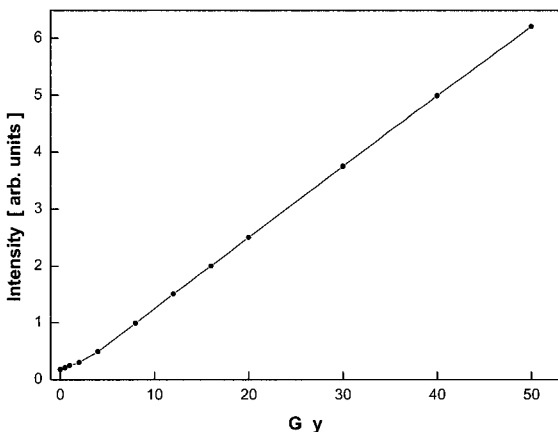


Fig. 4. The intensities EPR signal of sugar as a function of the x-ray doses.

이용한 방법이 선량계로 이용 가능하다는 것을 알 수 있다.

그림에서 낮은 선량에서는 EPR 신호의 intensity가 거의 변화하지 않는 것을 알 수 있는데, 즉 그림은 0.05 Gy 이하의 흡수선량에서의 측정결과는 EPR 신호의 변화가 거의 없다는 것을 보여준다. 0.05 Gy의 흡수선량은 정상적인 방사선 작업에서는 피폭되지 않는 높은 선량이다. EPR의 신호는 시료 내에 존재하는 짝을 짓지 않는 전자수와 측정온도에 관계한다. 따라서 EPR 신호를 크게 할 수 있는 기술을 향상시킨다면 이보다 낮은 선량에서도 흡수선량에 따른 신호의 변화도 측정할 수 있을 것으로 생각된다. EPR을 이용한 선량의 측정 방법이 정상적인 방사선 작업에서의 선량계로 이용되기에는 아직 한계가 있다는 것을 보여 주지만, 방사선 사고 같은 비정상적인 작업이나 선량계를 착용하지 않은 상황에서 작업자가 높은 선량에 노출되었을 경우에는 이 방법이 작업자의 피폭선량을 평가하는데 유용한 도구가 될 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 시료에 방사선을 조사시킨 후 실온에서 시료를 보관하여 시간 경과에 따른 신호 크기의 감소, 즉 fading값을 나타낸 것이다. fading값은 조사 후 즉시 수행한 신호의 크기와 어느 특정한 시간이 경과한 후에 측정된 신호크기의 상대적인 비이다.

시간 경과에 따라 EPR 신호의 크기는 약간 감소하였는데, 구체적인 EPR 신호의 감소 크기는 조사 후 30일이 경과했을 때 약 3% 정도 나타났다. 이것은 시료 내에 생성된 free radical이 시간 경과에 따라 그 수가 감소한다는 것을 의미한다. 그러나 30일 동안 실온에서 보관하여도 fading값이 3% 정도라는 것은 시료 내에 생성된 free radical이 대단히 안정하다는 것을 의미한다. 좋은 선량계는 fading값이 적어야 한다. 가정에서 사용되는 설탕은 보통 실온에서 보관되고 있으며, 조사 후 제법 많은 시간인 30일이 경과한 후에도 약 3% 정도의 fading을 나타낸다는 것은 EPR기기를 이용한 방법이 흡수선량을 평가하는데 좋은 방법이 될 수 있다는 것을 의미한다.

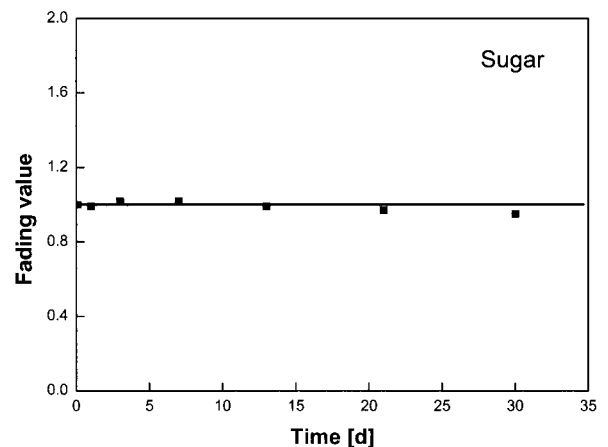


Fig. 5. The fading value of free radicals in the sugar irradiated with 50 Gy at room temperature.

IV. 결 론

설탕에 X-선을 조사하여 조사량에 따른 EPR 측정을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 설탕을 X-선으로 조사시키면 X-선의 에너지를 받은 설탕에는 free radical이 생성되고 그 양은 조사선량에 비례하여 선형적으로 증가한다. 일반적으로 방사선이나 기타의 요인에 의하여 물질에 free radical이 생성되면 빠른 시간 안에 화학결합으로 free radical이 소멸되는데 비하여 방사선 조사에 의해 설탕에 생성된 free radical은 상온에서 제법 긴 시간 동안 안정하다는 것도 알 수 있었다. 설탕에 생성된 free radical은 EPR기기로 측정이 가능하고, EPR 신호도 선량에 따라 선형적으로 증가할 뿐만 아니라, fading값도 적기 때문에 설탕을 이용한 EPR 측정이 방사선 사고시 선량계를 착용하지 않은 상황에서 많은 양의 방사선 피폭 발생 등 기존의 선량평가 방법이 정상적으로 수행될 수 없을 경우에 피폭자의 선량을 신속하고 정확하게 평가할 수 있는 방법이 될 수 있다.

참 고 문 헌

1. 손종기 : 체외 X-선에 조사에 의한 생물학적 선량평가, 대한 방사선 학회지, 25(1), 253-263, 1999.
2. 안용찬, 하성환 : 체외 방사선 조사시 인체 말초혈액 임파구의 염색체이상 빈도에 관한 연구, 방사선 방어 학회지, 18(2), 1-16, 1993.
3. 김미숙, 이춘자, 하성환, 송명재, 김희근 : 방사선 치료 후 시간경과에 따른 염색체 이상 빈도의 변화, 방사선방어학회지, 19(1), 51-67, 1994.

4. Francisco Americo, Marcelino Silveira and Oswaldo Baffa : Lyoluminescence and ESR Measurements on Alanine and Sucrose Dosimeters, Appl. Radiat. Isot. 46(8), 827, 1995.
5. Toshiyuki Nakajima : Sugar as an Emergency Dosimeter, Health Physics, 55(6), 951, 1988.
6. Toshiyuki Nakajima : ESR of Sugar as a Personnel Monitor for Radiation Emergencies, Appl. Radiat. Isot. 46(8), 819, 1995.
7. Toshiyuki Nakajima and Toshiko Otsuki : Dosimetry for Radiation Emergencies : Radiation-induced Free Radicals in Sugar of Various Countries and the Effect of Pulvering on the ESR Signal, Appl. Radiat. Isot. 41(4), 359, 1990.
8. Toshiyuki Nakajima : Estimation of Absorbed Dose to Evacuees at Pripjat-city Using ESR Measurements of Sugar and Exposure Rate Calculations, Appl. Radiat. Isot. 45(1), 113, 1994.
9. H. C. Box, E. E. Budzinski and H. G. Freund : Electrons Trapped in Single Crystals of Sucrose, J. Chem. Phys. 93(1), 55, 1990.
10. E. E. Budzinski, W. R. Potter, G. Potienko and H. C. Box : Characterization of Trapped Electrons and Electron Traps in Single Crystals, J. Chem. Phys. 70(11), 5040, 1979.
11. E. Sagstuen, A. Lund, O. Awaldelkarim, M. Lindgren and J. Westerling : Free Radicals in X-irradiated Single Crystals of Sucrose : a Re-examination, J. Phys. Chem. 90, 5584, 1986.