

방사선사고시 피폭선량평가를 위한 휴대전화 부품의 전자상자성공명(EPR) 특성에 대한 예비 연구

박병룡, 하위호, 박선후, 이진경, 이승숙
한국원자력의학원

2015년 4월 21일 접수 / 2015년 7월 31일 1차 수정 / 2015년 9월 17일 2차 수정 / 2015년 9월 17일 채택

본 연구에서는 전자상자성공명(electron paramagnetic resonance, EPR) 장치를 사용한 휴대전화 부품들의 EPR 특성 측정을 통해 방사선사고시 회구적 선량평가용 선량계로써 활용가능성에 대하여 확인하였다.

화면표시 방식이 다른 두 스마트폰에서 12개의 시료를 선정하여 실험에 사용하였고, 시료의 방사선조사에는 ¹³⁷Cs 감마선 그리고 EPR 측정은 실온에서 Bruker사의 ELEXSYS E500 X-Band EPR spectrometer를 사용하여 수행하였다. 먼저 각 시료에 대하여 비조사시료와 조사시료의 EPR 스펙트럼을 측정하여 방사선에 의한 라디칼 생성 여부를 확인하였고, 그 후 선량반응곡선과 시간에 따른 시그널 크기 변화를 측정하였다. 측정결과 유심 플라스틱과 IC 칩을 제외한 모든 시료에서 방사선에 의한 EPR 시그널 증가를 확인할 수 있었다. 시료 중에서 덮개유리, 카메라렌즈, 도광판, 확산시트는 결정계수 R²=0.93이상의 좋은 선형상관관계를 보였다. 특히 도광판은 선량에 따른 시그널 증가량이 가장 크고 백그라운드 시그널이 없기 때문에 선량평가에 이상적인 특성을 가지고 있었지만, 72 시간 이내에 시그널이 약 50% 감소하는 약점이 있었다. 확산시트 또한 도광판과 유사한 페이딩 특성을 나타내었고, 덮개유리와 카메라렌즈는 단기간 동안에는 시그널이 안정적으로 보존되었다.

휴대전화 부품을 이용한 EPR 선량평가를 실제 대규모 방사선 사고에서 신속하게 적용하기 위해서는 더 많은 휴대전화 기종의 같은 부품에 대한 시그널 차이, 페이딩, 시료 전처리 방법 등에 대한 추가연구가 진행될 필요가 있다. 그러나 현재 결과를 바탕으로 소규모 방사선사고시 피폭환자가 소지하고 있던 휴대전화와 동일한 제품을 구입하여 비교하는 방법 또는 추가조사법을 이용한 선량평가는 가능할 것으로 판단된다.

중심어 : 방사선사고, 전자상자성공명, 전자스핀공명, 회구적 선량평가, 외부피폭선량평가

1. 서론

대한민국은 원자력산업 상위국으로 현재 20호기 이상 원자로가 가동 중이고 의료방사선 및 방사선 이용 산업체 수의 증가로 인해 방사선사고의 발생확률이 증가하고 있으며, 또한 대내외적으로 핵 테러의 위험도 잠재되어 있는 현실이다. 이러한 방사선사고시 피폭환자의 예후를 판단하고 치료계획을 수립하기 위해서는 신속 정확한 피폭선량평가가 요구된다. 따라서 국내·외 방사선피폭환자 전문 진료기관에서는 다양한 선량평가기법을 보유하고 또한 발전시킬 수 있는 연구를 진행 중이다.

회구적 선량평가(retrospective dosimetry)는 피폭 이후 시점에서 선량을 재평가하는 기법으로, 대중에 대한 만성적 과피폭이 의심되는 경우, 선량계(dosimeter) 미착용시의 피폭사고, 선량계 착용부위 이외의 국부피폭 및 직업적 피폭선량의 재평가가 필요한 경우 등에 이용할 수 있다. 전자상자성공명(electron paramagnetic resonance, EPR) 장치는 물리적 선량평가 장비 중 하나로써 방사선조사 및 피폭과 관련하여 방사선조사식품의 검지[1-3], 표준시료를 이용한 선량 검증 및 건전성 평가[4], 치아 에나멜(enamel)을 이용한 외부피폭선량평가[5] 등의 분야에서 국제적으로 권고하는 방법으로 채택되어 있다. 또한 치아 에나멜 이외 다른 생체시료(손톱, 모발 등) 및 휴대물품 등에 대한 피폭선량평가 연구가 이루어지고 있다[6, 7]. 그 중 많은 사람들이 휴대하고 다니는 품목으로서 손목시계나 휴대전화의 유리(glass)를 사용한 EPR 선량평가 가능성이 지속적으로 제기되어 왔다.

휴대물품에 사용된 유리의 경우 구성성분이 일정하지 않아 유리의 색이나 재질에 따른 측정의 불확도가 발생하는 단점이 있지만 비용이 저렴하고 특별한 전처리 없이 빠른 시간 내에 측정이 가능하다는 장점이 있다. 초기 연구에서는 안경이나 시계 유리가 주로 사용되었고 [8-10], 최근에는 휴대전화의 발전과 함께 액정유리 등에 대한 연구결과도 보고되고 있다[11, 12].

유리시료의 EPR 특성에 대한 이전 연구결과에 따르면 시계유리의 검출하한치는 약 2 Gy이고 50 Gy 이내에서

책임저자 : 하위호, lovin@kirams.re.kr
서울시 노원구 노원길 75 한국원자력의학원 보건물리팀

선량에 대한 선형성이 있으며 방사선조사 후 약 24시간 이내에 80% 이상 시그널이 보존되어 있는 것으로 보고되었으며[8], 스마트폰 터치스크린을 이용한 최근 발표에서는 1 Gy 이하 선량에 대한 평가도 가능한 것으로 보고되었다[12]. 그러나 이러한 내용은 소수의 논문에서 발표된 결과로서 실제 피폭선량평가용 EPR 선량계로 유리를 사용하기 위해서는 더 많은 연구 결과가 필요하다.

통계청에서 매년 발간되는 자료(2014 한국의 사회지표, Social Indicators in Korea)에 의하면 2014년 대한민국의 휴대전화 가입률은 약 113.5%이고 스마트폰 가입률은 약 80.4%이다. 여기에서 유아를 제외한 가입률은 더욱 높을 것으로 판단되며, 스마트폰 가입률은 2015년 현재 점점 더 높아지고 있는 것으로 보고되고 있으며 몇 회사의 기종이 점유율의 대부분을 차지하고 있다. 따라서 본 연구에서는 서로 다른 화면표시장치(display device)를 사용하는 두 개의 대표적인 스마트폰 기기를 이용하여 유리시료에 대한 EPR 특성을 확인하고 이전 연구결과와 비교해 보았으며 다른 새로운 부품들에 대한 EPR 스펙트럼 측정을 통해 선량평가 가능성 여부를 확인하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 시료 선정

본 연구에서는 두 종류의 스마트폰을 분해하여 대부분의 휴대전화에 공통으로 사용되고 규격화되어 있으며 전처리가 간단한 부품을 시료로 선정하였다. Fig. 1에 실험에 사용된 시료를 나타내었고 시료명은 임의의 약어를

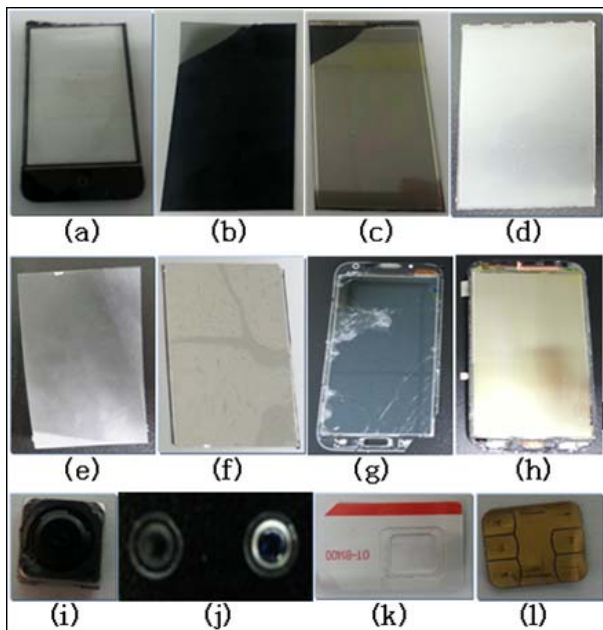


Fig. 1. Appearances of mobile phone components used in the present study. (a) cover glass-I (b) liquid crystal glass-I (c) liquid crystal glass-II (d) light guide plate (e) diffusion sheet (f) reflective sheet (g) cover glass-II (h) organic light emitting

사용하였다. 첫 번째로 액정(liquid crystal display, LCD)을 표시장치로 사용하는 스마트폰-A에 대하여 덮개유리-I (cover class, CG-I), 도광판(light guide plate, LGP), 확산시트(diffusion sheet, D-Sheet), 반사시트(reflective sheet, R-Sheet), 카메라렌즈-I(lens-I)와 액정유리를 시료로 선정하였다. 액정은 상판유리(color filter glass)와 하판유리(thin film transistor glass)가 서로 맞붙어 있는 형태인데 실험에서는 상판과 하판을 분리시켜 액정유리-I (liquid crystal glass-I, LCG-I)과 액정유리-II (liquid crystal glass-II, LCG-II)로 나누어 준비하였다. 두 번째 스마트폰-B는 표시장치로 유기발광다이오드(organic light emitting diodes, OLED)가 사용된 제품으로 덮개유리-II (CG-II), 유기발광다이오드(OLED), 카메라렌즈-II(lens-II)를 측정시료로 선정하였다. 여기에서 유기발광다이오드로 표현된 시료는 유기발광다이오드 상층부에서 분리시킨 encapsulation glass를 의미한다. 마지막으로 거의 모든 휴대전화에 삽입되어 있는 유심(universal subscriber identity module, USIM)을 플라스틱(USIM plastic) 부분과 IC 칩(USIM IC chip)으로 분리하여 준비하였다.

준비된 시료 중 덮개유리, 액정유리, 유기발광다이오드는 유리를 함유한 부품으로서 덮개유리는 일반적인 강화유리가 사용되고, 액정유리와 유기발광다이오드는 여러가지 물질들이 혼합된 재질로 구성되어있다. 카메라렌즈는 플라스틱 사출품으로 제작되어 있으며, 도광판 또한 플라스틱 사출품이며 주 재질은 아크릴이다. 확산시트는 대부분 폴리에스테르를 이용하여 얇은 막으로 만들어지고, 반사시트는 일반적으로 알루미늄, 폴리에틸렌 등의 기본물질 위에 은과 티타늄 코팅을 하여 제작되어 있다.

2.2 시료 전처리 및 방사선조사

덮개유리, 액정유리, 유기발광다이오드 등 유리부품은 동결분쇄기(Freezer Mill, SPEX 6770, USA)로 분말화하여 실험용 체(sieve)에서 100~500 μm 크기의 알갱이로 선별하여 100 mg을 EPR 튜브(내경 5 mm)에 넣어 측정하였다. 카메라 렌즈는 전처리 없이 사용하였고, 도광판, 확산시트, 반사시트, 유심 플라스틱 및 IC 칩은 가위를 이용하여 1 \times 1 mm 조각으로 제작하여 50 mg을 넣어 측정하였다.

실험에 사용된 시료의 방사선조사는 실온에서 감마선 조사장치 Biobeam8000 (STS Steuerungstechnik & Strahlenschutz GmbH, Braunschweig, Germany, ^{137}Cs , 3.16 Gy \cdot min $^{-1}$)을 이용하여 수행되었다.

2.3 EPR 측정

시료의 EPR 측정은 실온에서 X-Band EPR Spectrometer(ELEXSYS E500, Bruker, Germany)를 이용하여 수행되었다. 측정 파라미터(parameter)는 microwave frequency: 9.85 GHz, modulation frequency: 100 kHz, conversion time: 30 s, time of sweep: 30 s, number of scan: 5로 설정하였고, 다른 파라미터들은 각 시료의

Table 1. EPR Measurement Parameters for Components of Mobile Phone.

Sample name	Measurement parameters				Radiation induced signal
	Microwave power (mW)	Center field (G)	Sweep width (G)	Time constant (ms)	
CG	1.002	3520	200	327.68	○
LCG-I	1.002	3520	200	327.68	○
LCG-II	1.002	3530	200	655.36	○
LGP	1.002	3510	200	163.84	○
D-Sheet	1.002	3510	100	327.68	○
R-Sheet	1.002	3510	200	655.36	○
Lens	1.002	3500	100	655.36	○
OLED	1.002	3520	200	327.68	○
USIM-P	10.02	3470	200	163.84	×
USIM-IC	10.02	3470	200	327.68	×

스펙트럼을 확인 한 후 결정하였다. 측정 파라미터 중에서 마이크로웨이브 파워는 시그널 크기에 큰 영향을 주고 너무 높을 경우 포화현상에 의한 시그널감소를 야기하므로 중요한 요소이다. 따라서 먼저 50 Gy 조사된 각 시료에 대하여 파워를 0.1 mW(33 dB)에서 최대 100 mW(3 dB)까지 1 dB 간격으로 단계적으로 변화시켜가면서 측정하여 적정 파워를 먼저 설정한 후 다른 파라미터들을 조절하여 최적 조건을 결정하였다. 결정된 파라미터로 먼저 각 시료의 0 Gy와 50 Gy 선량에 대응되는 스펙트럼을 측정하여 방사선에 의한 EPR 시그널 생성유무를 확인하였고, 그 다음으로 시그널이 생성되는 시료에 대하여 선량(0, 1, 3, 5, 7, 10, 20, 30 Gy) 증가에 따른 시그널 크기 변화를 측정하여 선량과 시그널 크기의 상관관계를 확인하였다. 각 시료에 대한 시그널 크기는 중심피크의 진폭(peak-to-peak)값을 사용하였다. 마지막으로 선형적 상관관계가 강한 시료에 대하여 3일정도 단기간과 6개월 이상 장기간의 실온 상태에서 페이딩(fading)을 측정하여 각 시료의 EPR 외부피폭선량평가용 선량계로써의 적합성을 확인하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 각 시료의 EPR 스펙트럼

Table 1에 각 시료의 나머지 측정 파라미터와 방사선에 의한 시그널 유무를 표시하였고 비조사시료(0 Gy)와 50 Gy 조사시료의 EPR 스펙트럼을 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 측정결과 유심 플라스틱과 IC 칩을 제외한 모든 시료에서 방사선에 의한 EPR 시그널의 형태변화 또는 시그널 크기 증가를 확인할 수 있었다. 유심 플라스틱과 IC 칩은 넓은 sweep width 에서 마이크로웨이브 파워를 최대 100 mW(3 dB)까지 증가시키면서 측정하였으나 방사선에 의한 특성 스펙트럼이 확인되지 않았으며 Fig. 2에는 Table 1에 제시한 파라미터로 측정된 스펙트럼을 나타내었다.

유리성분으로 구성된 시료 중에서 덮개유리의 경우 두 종류의 휴대전화에서 공통적으로 시료로 선정하여 측

정하였는데 비조사시료는 3520 G 위치의 피크를 중심으로 양 옆에 두 개의 보조 피크를 가진 비대칭형의 스펙트럼을 보였다. 이러한 스펙트럼 형태는 덮개유리에 대하여 0.8 ~ 10 Gy 구간에서 진행된 이전 연구와 일치하는 결과를 나타내었으며[12], 현재 결과에서는 조사선량이 증가함에 따라 중심피크가 커지면서 3540 G 위치의 피크가 서서히 사라지며 50 Gy 시료에서는 중심피크와 3500 G의 보조피크로 이루어진 스펙트럼으로 변화하는 현상을 추가로 확인할 수 있었다. 그러나 실험에 사용된 두 종류 덮개유리는 스펙트럼 형태는 유사하지만 50 Gy 조사시료에서 중심피크의 시그널 크기는 유기발광다이오드를 사용하는 휴대폰이 액정을 사용하는 휴대폰보다 약 4배정도 크게 측정되었다. 액정유리-I과 액정유리-II의 경우에는 조사시료의 중심피크 위치는 덮개유리와 유사하지만 보조피크의 모양이나 크기, 비조사시료의 스펙트럼 형태는 서로 조금씩 차이가 있었고 이전 연구에서 나타난 액정유리 스펙트럼과도 차이가 있었다[11]. 또한 다른 연구에서 상업적 유리제품에 대하여 측정된 EPR 스펙트럼도 유리제품의 종류에 따라 서로 차이가 있는 것을 확인할 수 있었다[13]. 이러한 결과는 각 유리 부품별로 방사선에 의해 EPR 시그널을 생성시키는 라디칼(radical) 성분의 종류와 함량이 조금씩 다르기 때문일 것으로 판단된다. 특히 유기발광다이오드의 경우 비조사시료는 3510 G 근방의 singlet 시그널을 나타내고, 방사선조사된 시료는 3530 G 위치에서 새로운 피크의 추가를 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 실험에 사용된 나머지 유리부품들의 스펙트럼과는 많은 차이가 있었는데 원인을 확인하기 위해서는 정확한 성분분석이 필요할 것으로 판단된다.

유리성분을 함유하지 않은 시료 중에서, 도광판은 비조사시료(0 Gy)에서 백그라운드 시그널이 없었고 방사선 조사된 시료는 3510 G를 중심으로 독특한 형태의 스펙트럼을 나타내며, 크기도 가장 크게 나타났다. 따라서 1 Gy 조사시료에서도 스펙트럼의 형태만으로 명확하게 조사 유무를 판별할 수 있었으며 1 Gy 이하에서의 판별도 가능할 것으로 기대된다. 확산시트는 조사시료와 비조사시료 모두 3510 G 위치에서 singlet 형태의 스펙트

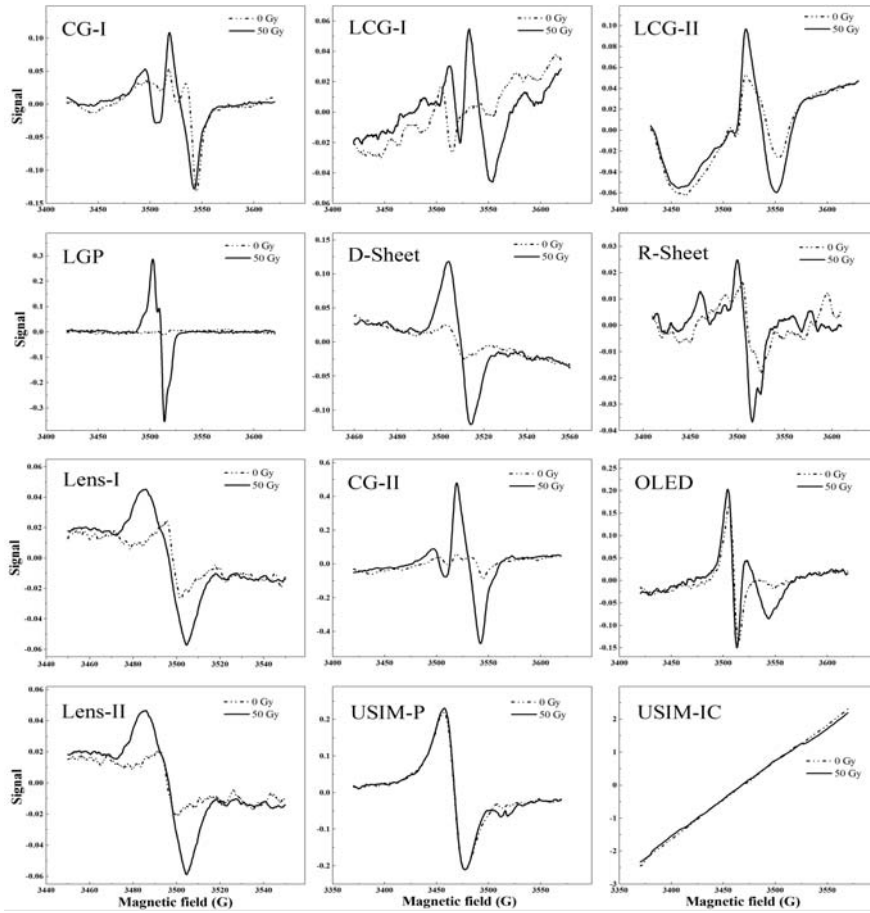


Fig. 2. EPR spectra obtained from irradiated (50 Gy) and unirradiated mobile phone components, respectively.

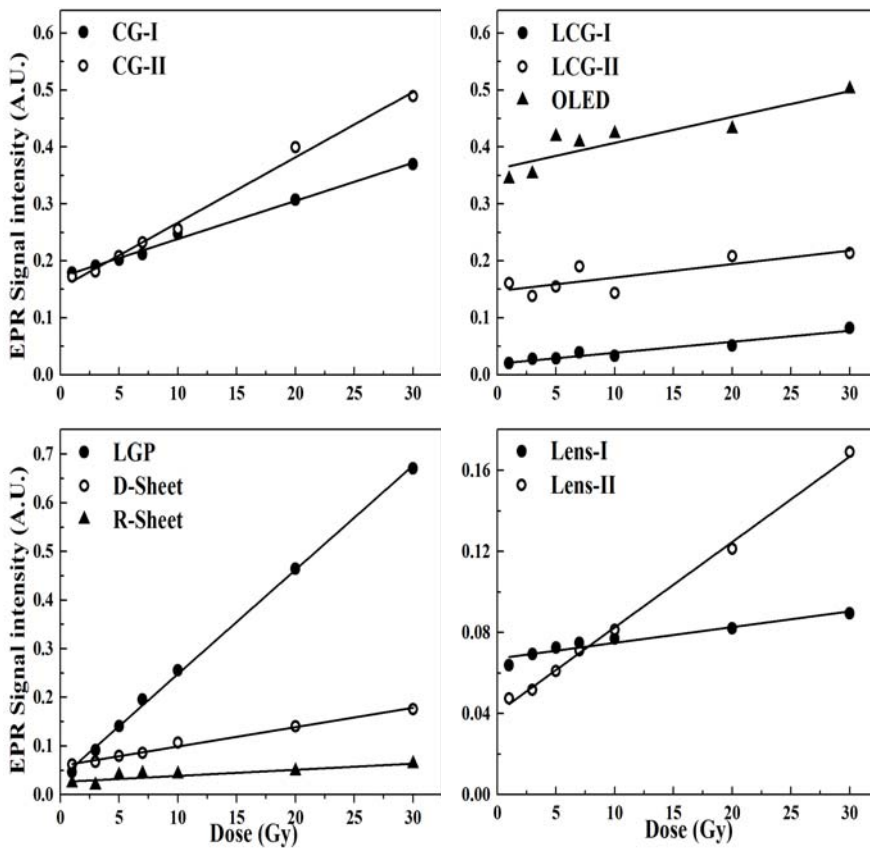


Fig. 3. Dose-response curve of samples with ^{137}Cs gamma ray.

Table 2. Regression Equation and Coefficient of Determination for Each Sample.

Sample name	Regression equation (I: EPR signal intensity)	Coefficient of determination (R ²)
CG-I	$I=0.0067 \times \text{Dose} + 0.1717$	0.9951
LCG-I	$I=0.0019 \times \text{Dose} + 0.0196$	0.9423
LCG-II	$I=0.0024 \times \text{Dose} + 0.1471$	0.6453
LGP	$I=0.0214 \times \text{Dose} + 0.0338$	0.9989
D-Sheet	$I=0.0037 \times \text{Dose} + 0.0620$	0.9923
R-Sheet	$I=0.0008 \times \text{Dose} + 0.0301$	0.7146
Lens-I	$I=0.0008 \times \text{Dose} + 0.0672$	0.9324
CG-II	$I=0.0115 \times \text{Dose} + 0.1515$	0.9941
OLED	$I=0.0053 \times \text{Dose} + 0.3470$	0.7876
Lens-II	$I=0.0042 \times \text{Dose} + 0.0407$	0.9978

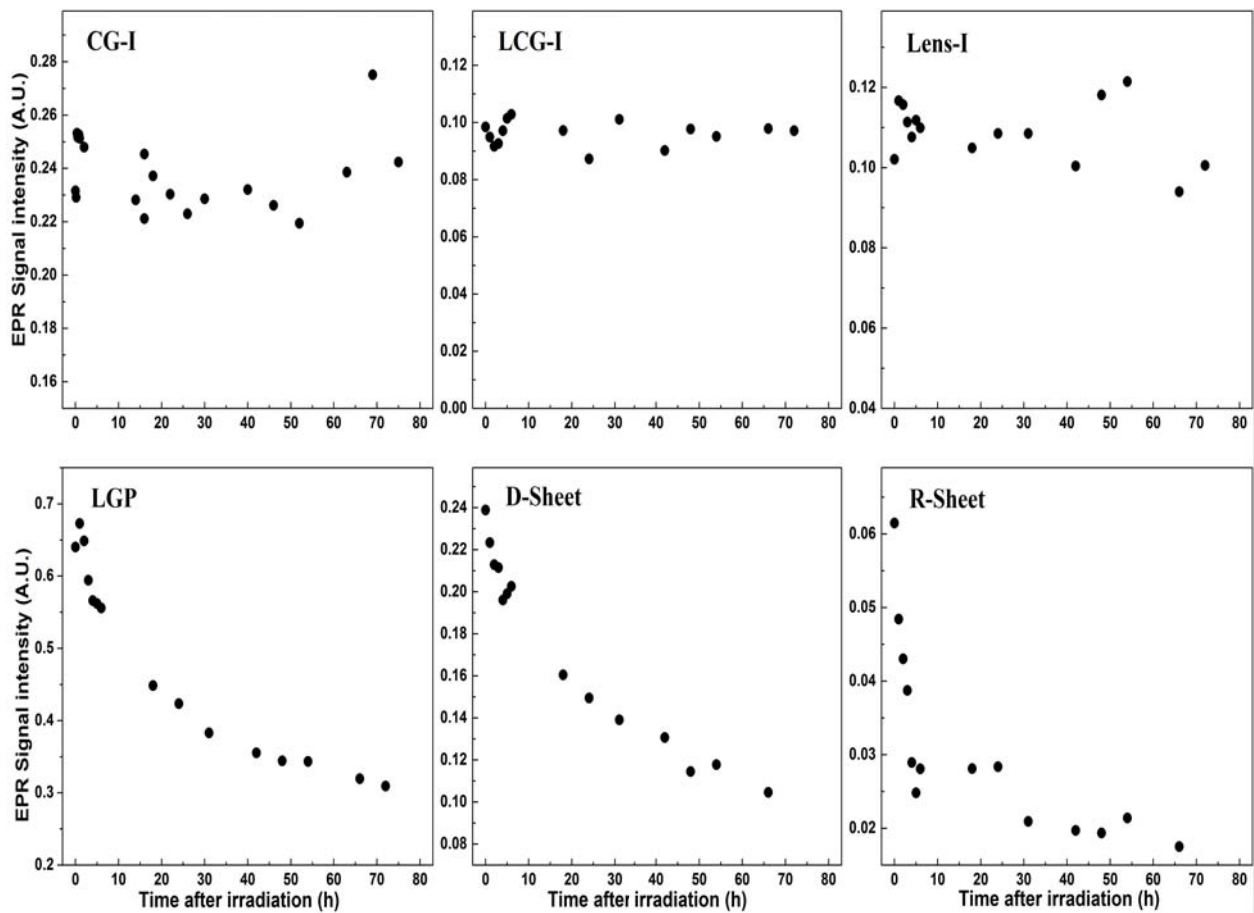


Fig. 4. EPR signal intensity changes of six components during the 72 hours after irradiation.

럼을 나타내었고 반사시트는 복잡한 형태의 다중피크를 가진 스펙트럼을 확인할 수 있었다. 또 다른 공통시료인 카메라렌즈는 두 종류 휴대폰 모두 3490 G를 중심으로 50 G 넓이의 시그널 모양을 나타내었고 시그널 크기도 거의 일치하였다. 마지막으로 유심 플라스틱은 3470 G 위치에서 singlet 시그널이 있었지만 방사선조사에 의한 시그널의 변화가 없었고, IC 칩은 아무런 시그널이 나타나지 않았다.

3.2 선량에 따른 EPR 시그널 크기

각 시료에 대한 선량-반응 곡선을 Fig. 3에 나타내었고, 최소자승법(least squares method)을 이용하여 계산된 선형회귀방정식과 결정계수를 Table 2에 표기하였다. 유심을 제외한 모든 시료가 적용선량 범위(1 ~ 30 Gy) 내에서 선량이 증가함에 따라 시그널 크기의 유의적 증가를 확인할 수 있었다. 덮개유리는 결정계수 0.99 이상으로 아주 좋은 선형성을 가지며 회귀방정식의 기울기도 상대적으로 크지만 두 종류의 휴대전화에서 기울기는 서

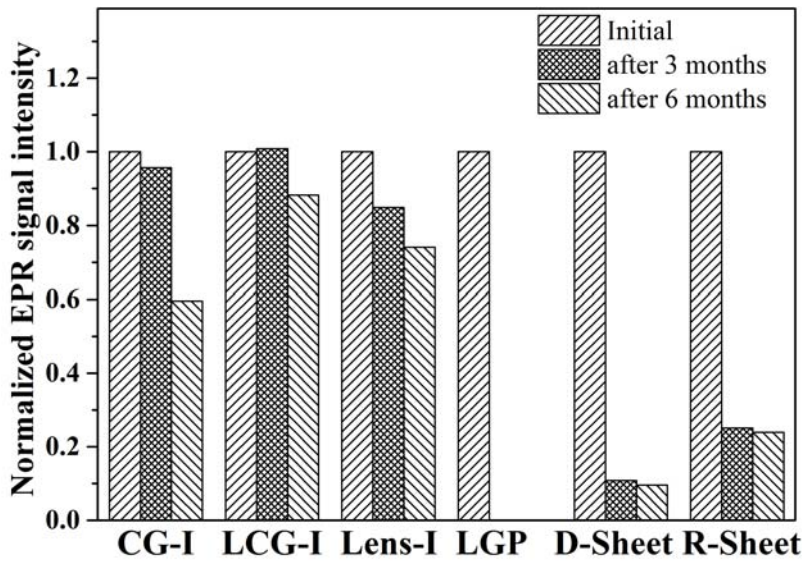


Fig. 5. The EPR signal intensity of six components after irradiation (0, 3 and 6 months).

로 달랐다. 액정유리는 덮개유리에 비해 회귀식의 기울기도 작고 결정계수도 낮았다. 특히 액정유리-II는 0.65의 결정계수로 선량평가에 사용하기에는 적합하지 않은 결과를 보여주었다. 유기발광다이오드 시료 또한 액정유리-II와 비슷한 결과를 나타내었다. 도광판의 경우 회귀식의 기울기와 결정계수가 가장 좋았으며, 확산시트 또한 결정계수 0.99 이상의 아주 좋은 선형성을 보여주었다. 반면 반사시트는 결정계수 0.71 정도로 앞선 두 시료보다 좋은 결과를 얻지 못하였다. 카메라렌즈도 결정계수 0.93 이상으로 좋은 선형성을 나타내었지만 회귀식의 기울기는 상대적으로 작았으며 두 시료의 결과는 서로 달랐다.

3.3 방사선조사 후 경과시간에 따른 시그널 크기 변화 (fading)

실험에 사용된 휴대폰 부품 중에서 덮개유리-I, 액정유리-I, 렌즈-I, 도광판, 확산시트, 반사시트에 대하여 방사선조사 후 72시간 동안 시간에 따른 EPR 시그널 크기 변화를 Fig. 4에 나타내었고, Fig. 5에 초기값과 비교하여 6개월 후 남아있는 시그널 크기를 비율로 나타내었다. Fig. 4에서 각 시료에 대하여 방사선조사 10분 후 최초 측정하였고 1시간까지는 10분 간격, 이후 점차 시간 간격을 늘리면서 72시간까지 측정하였다. 본 연구의 목적은 각 휴대폰 부품의 페이딩 특성에 대한 대략적 추세 확인을 통한 선량평가 적합 시료의 선정이기 때문에 Fig. 4의 결과에서는 측정 불확도 평가 및 이상치 제거 등의 통계적 처리는 하지 않고 측정결과만을 나타내었다. Fig. 5의 초기값은 Fig. 4의 최초 측정값을 사용하였다.

유리부품에 대한 이전 연구에서 Wu K 등이 4가지 종류의 시계 유리를 활용하여 측정한 결과에서는 방사선조사 후 24시간 동안 약 20%의 시그널이 감소하고 이후 100시간 동안은 약간 더 감소하거나 유지하는 결과를 나타내었다[8]. 또한 Trompier F 등이 액정의 유리기관을

사용한 연구에서도 방사선 조사 후에 서서히 시그널이 감소하기 시작하여 48시간 이후 기관 종류에 따라 약 20~40%의 시그널이 감소하였다[11]. 그러나 이번 실험에서 사용된 덮개유리와 액정유리-I의 경우 72시간의 단기간 동안에는 라디칼이 안정적으로 보존되어 있어서 의미 있는 시그널 크기 변화는 확인할 수 없었다. 또한 3개월 이후에도 큰 변화는 없었으나 6개월 이후 덮개유리의 시그널 크기는 처음의 약 60% 정도 남아 있었고, 액정유리-I은 약 90% 정도 남아 있었다. 렌즈의 경우에도 72시간 이내에는 큰 변화는 관찰되지 않았고, 3개월에 약 15% 정도씩 감소하여 6개월 후에는 최초값의 70% 정도로 측정되었다. 도광판은 방사선조사 후 1시간 간격으로 6시간 동안 측정결과 꾸준히 시그널이 줄어들어 약 20% 감소하였고 24시간 후 약 40%, 48시간 후 50%, 그리고 72시간 후에는 55%까지 감소하여 최초 시그널 크기의 약 45%만 남아있었다. 또한 확산시트도 도광판과 거의 비슷한 결과를 보여주었다. 마지막으로 반사시트의 경우에는 급격한 신호감쇠가 발생하여 최초 6시간 후 거의 대부분의 시그널이 사라졌고 24시간 후에는 백그라운드 시그널과 같아졌다. Fig. 5의 결과에서 보는 것과 같이 단기간의 페이딩이 큰 시료인 도광판, 확산시트, 반사시트는 3개월 후에는 방사선에 의한 시그널이 전혀 남아있지 않고 백그라운드 시그널과 유사한 스펙트럼이 측정되었다.

3.4 각 시료의 EPR 선량계로서 사용 가능성에 대한 논의

실험에 사용된 시료 중 유리부품은 측정 선량범위인 1~30 Gy에서 선량에 따른 선형성이 있었고 조사 후 72시간 내에 시그널이 안정적으로 보존되어 있었다. 특히 강화유리로 구성되어있는 덮개유리는 선량 증가에 따른 시그널 크기 증가율이 상대적으로 크고 선형 회귀방정식의 결정계수가 0.99 이상으로 아주 좋으며 페이딩이 크지 않기 때문에 선량평가에 적합한 특성을 가지고 있었다. 그러나 7 Gy 이하에서 비조사시료와 조사시료의 시

그늘 모양이 같고 휴대전화의 종류에 따라 시그널 크기 차이가 있다는 단점이 있었다. 이런 이유로 덮개유리를 이용하여 피폭선량을 평가할 때 단일 선량-반응 곡선을 적용하기 어렵기 때문에, 현재 상업적으로 유통되고 있는 전체 휴대전화 기종에 대한 데이터베이스 구축이 필요하나 이것은 현실적으로 어려움이 있다. 이런 문제를 극복하기 위해서는 대조군 구입 또는 추가 방사선조사에 의한 외삽법 등을 사용 할 수 있으며[6], 시료 전처리 방법의 개선을 통하여 기계적 처리에 의해 발생하는 백그라운드 시그널을 감소시켜 최소검출 하한치를 낮출 수 있을 것으로 기대된다. 액정유리도 선량계로 사용 가능한 수준의 결과를 나타내었지만 덮개유리와 비교하여 측정 불확도는 커질 것으로 판단된다. 유기발광다이오드의 경우 다른 유리 시료들과 스펙트럼 형태 및 특성이 다르며 결과가 좋지 않았는데, 원인 분석을 위하여 재질 및 성분에 대한 재확인이 필요할 것으로 사료된다.

유리로 구성되지 않은 부품 중에서, 도광판은 비조사시료와 조사시료의 스펙트럼 형태 차이, 선량에 따른 시그널 크기 증가율, 그리고 회귀식의 선형성 부분에서는 EPR 선량계로서 이상적인 특성을 가지고 있었다. 그러나 방사선조사 후 빠른 시간 안에 페이딩이 진행되어 72시간 후에는 시그널 크기가 약 50% 정도로 줄어드는 단점이 있었다. 페이딩에 대한 문제는 시간에 따라 감소하는 시그널 비율에 대한 함수를 만들어서 보정하는 방법을 사용 할 수 있는데, 이와 같은 보정을 위해서는 다양한 종류의 도광판에 대한 추가 측정 결과가 필요하다. 또한 상당수의 EPR 측정대상 시료에 대한 연구결과에서 보관 온도를 낮추면 페이딩을 지연시킬 수 있는 것으로 보고되어 있기 때문에 이에 대한 확인도 필요하다. 카메라 렌즈의 경우에는 회귀식의 선형성은 좋았으나 시그널 증가율이 덮개유리나 도광판에 비해 작고 비조사시료와 조사시료의 시그널 모양이 일치하기 때문에 낮은 선량의 판별에 약점이 있다. 이런 문제를 보완하기 위해서는 비조사시료의 백그라운드 시그널 처리에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 확산시트는 렌즈의 시그널 형태와 거의 비슷하였으며 추가로 도광판과 비슷한 페이딩 특성을 가지고 있었다. 반사시트는 페이딩이 너무 빨리 진행되고 유심 시료들은 방사선에 의한 시그널 자체가 없기 때문에 EPR 선량계로 활용이 불가능한 것으로 판단된다.

4. 결론

다양한 휴대전화 부품의 EPR 특성 측정을 통하여 외부피폭선량평가를 위한 선량계로서의 활용 가능성을 확인하였다. 화면표시 방식이 서로 다른 두 스마트폰에서 10 종류의 부품에 대하여 12 개 시료를 제작하여 조사시료와 비조사시료의 EPR 스펙트럼을 측정한 후 선량 증가에 따른 시그널 크기변화와 방사선조사 후 시간에 따른 시그널의 안정성을 조사하였다. 그 결과, 여러 가지 부품들이 선량평가에 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 특히 유리부품 중에서는 덮개유리, 비유리부품 중에

서는 도광판과 카메라렌즈가 선량계로서 좋은 특성을 보여주었다. 이와 같은 결과를 실제 선량평가에 적용하기 위해서는 같은 부품에 대한 더 많은 휴대전화 기종에 따른 시그널 차이, 페이딩, 불순물이 포함된 부품들의 전처리 방법 등에 대한 추가연구를 통해 불확도를 줄일 필요가 있다. 그러나 소규모 방사선사고시 피폭환자가 소지하고 있던 휴대전화와 동일한 제품을 구입하여 비교하는 방법 또는 추가조사법을 이용한 선량평가는 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국원자력의학원에서 수행중인 피폭손상 융합 평가 및 재생기술 개발 (No. 50586-2015) 사업의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Committee European de Normalisation(CEN). Detection of irradiated food containing bone, Method by ESR spectroscopy. European Committee for Standardization, EN 1786. 1996.
2. Committee European de Normalisation(CEN). Detection of irradiated food containing crystalline sugar, Method by ESR spectroscopy. European Committee for Standardization, EN 13708. 2001.
3. Committee European de Normalisation(CEN). Detection of irradiated food containing cellulose, Method by ESR spectroscopy. European Committee for Standardization, EN 1787. 2000.
4. International Organization for Standardization (ISO)/American Society for Testing and Materials (ASTM). Practice for use of an alanine-EPR dosimetry system. ISO/ASTM, ISO/ASTM 51607. 2013
5. International Atomic Energy Agency(IAEA). Use of electron paramagnetic resonance dosimetry with tooth enamel for retrospective dose assessment. IAEA, IAEA-TECDOC-1331. 2002
6. Swartz HM, Flood AB, Williams BB, Dong R, Swartz SG, He X, Grinberg O, Sidabras J, Demidenko E, Gui J, Gladstone DJ, Jarvis LA, Kmiec MM, Kobayashy K, Lesniewski PN, Marsh SDP, Matthews TP, Nicolalde RJ, Pennington PM, Reynolds T, Salikhov I, Wilcox DE, Zaki BI. Electron Paramagnetic Resonance dosimetry for a large-scale radiation incident. Health Phys. 2012; 103(3):255-267.
7. Kinoshita A, Calcina CSG, Sakamoto-Hojo ET, Camparato ML, Picon C, Baffa O. Evaluation of a high dose to a finger from a ⁶⁰Co, Health Phys. 2003;84(4):477-482.
8. Wu K, Sun CP, Shi YM. Dosimetric properties of watch glass: a potential practical ESR dosimeter for nuclear accidents. Radiat Prot Dosim. 1995;5:

- 223-225
9. Wu K, Guo L, Cong JB, Sun CP, Hu JM, Zhou ZS, Wang S, Zhang Y, Zhang X, Shi YM Researches and applications of ESR dosimetry for radiation accident dose. *Radiat Prot Dosim*, 1998; 77(1/2):65-67.
 10. Longo A, Basile S, Brai M, Marrale M, Tranchina L. ESR response of watch glasses to proton beams. *Nucl Instrum Meth A*, 2010;B 268:2712-2718.
 11. Trompier F, Della Monaca S, Fattibene P, Clairand I. EPR dosimetry of glass substrate of mobile phone LCDs. *Radiat Meas*, 2011;46:827-831.
 12. Fattibene P, Trompier F, Wieser A, Brai M, Ciesielski B, Angelis CD, Monaca SD, Garcia T, Gustafsson H, Hole EO, Juniewicz M, Krefft K, Longo A, Leveque P, Lund E, Marrale M, Michalec B, Mierzwinska G, Rao JL, Romanyukha AA, Tuner H. EPR dosimetry intercomparison using smart phone touch screen glass. *Radiat Environ Biophys*, 2014;53:311-320.
 13. Teixeira MI, Ferraz GM, Caldas LVE. EPR dosimetry using commercial glasses for high gamma doses. *Appl Radiat Isotopes*, 2005;62:365-370.

Preliminary Study on Electron Paramagnetic Resonance(EPR) Signal Properties of Mobile Phone Components for Dose Estimation in Radiation Accident

Byeong Ryong Park, Wi-Ho Ha, Sunhoo Park, Jin Kyeong Lee, and Seung-Sook Lee
Korea Institute of Radiological and Medical Sciences

Abstract - We have investigated the EPR signal properties in 12 components of two mobile phones (LCD, OLED) using electron paramagnetic resonance (EPR) spectrometer in this study. EPR measurements were performed at normal atmospheric conditions using Bruker EXESYS-II E500 spectrometer with X-band bridge, and samples were irradiated by ^{137}Cs gamma-ray source. To identify the presence of radiation-induced signal (RIS), the EPR spectra of each sample were measured unirradiated and irradiated at 50 Gy. Then, dose-response curve and signal intensity varying by time after irradiation were measured. As a result, the signal intensity increased after irradiation in all samples except the USIM plastic and IC chip. Among the samples, cover glass(CG), lens, light guide plate(LGP) and diffusion sheet have shown fine linearity ($R^2 > 0.99$). Especially, the LGP had ideal characteristics for dosimetry because there were no signal in 0 Gy and high rate of increase in RIS. However, this sample showed weakness in fading. Signal intensity of LGP and Diffusion Sheet decreased by 50% within 72 hours after irradiation, while signals of Cover Glass and Lens were stably preserved during the short period of time. In order to apply rapidly EPR dosimetry using mobile phone components in large-scale radiation accidents, further studies on signal differences for same components of the different mobile phone, fading, pretreatment of samples and processing of background signal are needed. However, it will be possible to do dosimetry by dose-additive method or comparative method using unirradiated same product in small-scale accident.

Keywords : Radiation accident, Electron spin resonance, Electron paramagnetic resonance, Dosimetry