

논문 2001-10-5-05

**CaSO<sub>4</sub>:Tm-PTFE TLD를 이용한 고에너지 전자선의 흡수선량 측정**

박명환\*, 김도성\*\*, 도시홍\*\*\*, 김 원\*\*\*\*, 강희동\*\*\*\*

**Measurement of Absorbed Dose for High Energy Electron using CaSO<sub>4</sub>:Tm-PTFE TLD**

Myeong-Hwan Park\*, Do-Sung Kim\*\*,

Sih-Hong Doh\*\*\*, Wan Kim\*\*\*\*, Hee-Dong Kang\*\*\*\*

**요 약**

CaSO<sub>4</sub>:Tm 열형광체 분말 20wt%를 PTFE와 혼합하여 직경 8.5mm, 두께 90mg/cm<sup>2</sup>로 압축·성형한 후 중합하여 디스크 형태의 CaSO<sub>4</sub>:Tm-PTFE TLD소자를 제작하였다. <sup>60</sup>Co 원격조사장치를 이용하여 0.5Gy의  $\gamma$ -선을 조사한 TLD 소자의 균일성은 3.1%로 우수하였다. 이 중에서 선별한 TLD를 이용하여 고에너지 전자선에 대한 polystyrene 팬텀에서의 흡수선량 분포를 측정하여 최대선량깊이, 50%선량깊이 및 실용비점의 값을 구할 수 있었으며, 조사야 내의 beam 평탄도는 4.5%로 나타났다. 이들 값은 dosimetry system으로 측정한 결과와 비교하여 다소 증가하는 경향을 나타내었다.

**Abstract**

In this study, the highly sensitive CaSO<sub>4</sub>:Tm-PTFE TLDs has been fabricated for the purpose of measurement of high energy electron. CaSO<sub>4</sub>:Tm phosphor powder was mixed with polytetrafluoroethylene(PTFE) powder and moulded in a disk type(diameter 8.5mm, thickness 90mg/cm<sup>2</sup>) by cold pressing. The batch uniformities were average deviation 3.1%. The TLDs were applied to measurement of absorbed dose distribution for high energy electron, the ranges were determined to be R<sub>100</sub>=14.5mm, R<sub>50</sub>=24.1mm and R<sub>p</sub>=31.8mm, respectively. The beam flatness were 4.5% as the variation of dose relative to the central axis over the central 80% of the field size at a maximum dose depth in a plane perpendicular to the central axis.

**I. 서 론**

열형광선량계(TLD)는 방사선에 대한 감도와

안정성이 좋고, 측정 가능한 선량범위가 넓으며 재사용과 집적선량의 측정이 가능하므로 현재 국내의 방사선 작업종사자중 90% 이상의 개인피폭선량 측정 뿐 만 아니라, 의료기관에서 방사선 치료 계획시의 흡수선량 측정에도 TLD가 많이 이용되고 있다<sup>[1, 2]</sup>. 특히 TLD는 다른 선량계로는 측정이 불가능한 인체의 조직내라든가 공동내(空洞內)의 선량측정이 가능하며, 얇은 TLD를 사용하면 비교적 간단하게 표면선량도 측정할 수 있고, 두께가 얇을수록 다른 선량계로서는 측정이 어려운 선량 변화가 극심한 영역에서의 선량측정이 가능한 장점이 있다.

현재 주로 사용되고 있는 TLD용 열형광체는

\* 대구보건대학 방사선과 (Dept. of Radiologic Technology, Taegu Health College)

\*\* 대구대학교 과학교육학부 (Devision of Science Education, Taegu University)

\*\*\* 부경대학교 물리학과 (Dept. of Physics, Pukyong National University)

\*\*\*\* 경북대학교 물리학과 (Dept. of Physics, Kyungpook National University)

<접수일자 : 2001년 5월 21일>

실효원자번호가 인체조직과 등가인 LiF 계열과 뼈조직과 등가인 CaSO<sub>4</sub> 계열이 있고, Yamashita 등에<sup>(3)</sup> 의해 처음으로 개발된 CaSO<sub>4</sub>:Tm 및 CaSO<sub>4</sub>:Dy는 방사선에 대한 감도가 LiF:Mg, Ti보다 약 30배 높을 뿐 만 아니라<sup>(4)</sup> 감쇠율이 매우 적어 이를 이용한 선량측정 및 개인피폭선량계 개발의 연구가 활발히 진행되어 왔다. 이들 열형광체는 X선과  $\gamma$ 선에 대한 감도가 매우 높고 TL감도가 넓은 선량영역에서 선형적이며 측정 가능한 에너지 영역이 넓고 감쇠율이 적은 장점이 있는 반면 저에너지 영역에서 TL감도의 에너지 의존성이 비교적 큰 단점이 있다<sup>(5-11)</sup>. 또한 실효원자번호 적은 LiF계 열형광체를 이용한  $\beta$ 선의 선량분포, 고에너지 전자선의 흡수선량 측정 및 n- $\gamma$  혼합장에서 상대적 중성자 감도 측정에 관한 연구<sup>(12)</sup>는 보고되지만 실효원자번호가 큰 고감도의 CaSO<sub>4</sub>계 TLD에 관한 연구 내용이 미흡하기에 이에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 디스크 형태의 CaSO<sub>4</sub>:Tm-PTFE TLD를 직접 제작하여 TLD 소자의 균일성과 인체 팬텀 물질인 polystyrene 내에서의 고에너지 전자선의 최대흡수선량 깊이(R<sub>100</sub>), 50%선량깊이(R<sub>50</sub>), 실용비정(R<sub>p</sub>), beam 평탄도를 측정하였다. 이때 보다 정확한 선량 평가를 위해 각 TLD 소자의 개별적인 소자보정인자(Sample Correction Factor, SCF)를 구하여 소자별 열형광감도의 차이를 보정하였다.

## II. 실험 재료 및 방법

본 실험에 사용한 CaSO<sub>4</sub>:Tm-PTFE TLD는 다음과 같이 제작하였다<sup>(3,6,13)</sup>. 먼저 CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O와 Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 묽은 황산에 용해시키고 황산증류장치를 사용하여 황산을 수거하고, 공기 중에서 600°C로 2시간 동안 소성한 후 200mesh (<75  $\mu$ m)의 분말로 만들어 열형광체로 사용하였다. 그리고 제작한 CaSO<sub>4</sub>:Tm 열형광체 분말을 PTFE(polytetrafluoroethylene) 분말과 잘 혼합하기 위하여 액체질소 온도에서 분쇄한 후 혼합하였으며, 혼합시 열형광체의 최적함량은 20wt%로 하였다. 또한 직경 8.5mm, 두께 90mg/cm<sup>2</sup>(0.4mm)로 압축·성형된 디스크 형태의 소자를 370°C에서 1시간 동안 공기중에서

열처리함으로써 PTFE와 열형광체를 중합시켰다.

제작한 각 TLD의 SCF를 구하기 위해 <sup>60</sup>Co 원격조사장치(Buchluer)를 이용하여 0.5Gy의  $\gamma$ -선을 조사한 후 각각의 열형광강도를 측정하고, 측정된 열형광강도의 평균값으로부터 각 소자의 SCF를 구하였다. 그리고 먼저 TLD 소자의 균일성을 측정하기 위해 다시 동일한 조건으로 두 번째 열형광강도를 측정하여 앞서 구한 SCF를 곱한 후 보정된 열형광강도를 구하였다. 그리고 보정한 열형광강도의 평균값에서 %편차를 구한 후 이를 평균값으로 소자의 균일성을 평가하고, 또한 각 TLD 소자의 %편차가 3% 이내인 소자를 선택하여 고에너지 전자선의 흡수선량 분포 측정에 사용하였다.

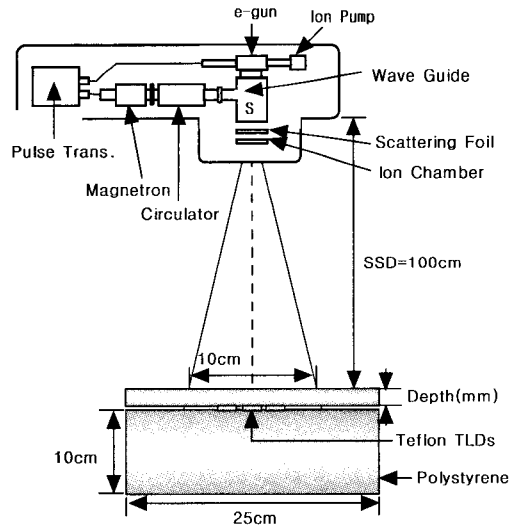


그림 1. 고에너지 전자선의 흡수선량 측정 개략도  
Fig. 1. Schematic diagram for the absorbed dose Measurement of the high energy electron.

전자선의 조사는 그림 1과 같이 선형가속기(Mevatron MD 67, Siemens Co.)를 이용하여 6MV 전자선을 조사하였으며, 흡수선량 분포를 측정하기 위한 배치는 아래의 polystyrene판(25×25cm<sup>2</sup>) 중앙에 TLD 소자 3개를 1조로 얹고 polystyrene판의 두께를 0~50.7mm 범위 내에서 판의 두께를 변화시키며 반복하여 전자선을 조사하였다. 이때 SSD=100cm, 조사면의 넓이는 10×10cm<sup>2</sup>의 크기로 일정하게 하였으며, 전자선의 beam 평탄도는 6MV 전자선의 최대흡수선량 깊이인 polystyrene 1.3cm에

TLD를 사이에 두어 측정한 후 동일 조건에서 dosimetry system(Wellhöfer, Germany)로 측정한 결과와 비교하였다. 각 TLD소자의 열형광강도는 선형적인 가운데율로 변화시킬 수 있는 TLD 판독장치(Teledyne Brown Engineering, System 310)로 10 psi 압력의 질소를 흘려서 주로 10°C/sec로 glow 곡선을 측정하였다. 이때 보다 정확한 열형광강도를 측정하기 위해 방사선 조사 후 glow peak I이 완전히 fading되는 6시간에 glow 곡선을 측정하여 전체 적분한 면적으로부터 열형광강도를 구하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 열형광 Glow 곡선 측정

그림 2는 제작한 CaSO<sub>4</sub>:Tm-PTFE TLD를 10°C/sec의 가운데율로 측정한 전형적인 glow 곡선으로서 113°C(peak I), 164°C(peak II), 251°C(peak III) 근처에 형성된 3개의 중첩된 glow peak로 구성되었다.

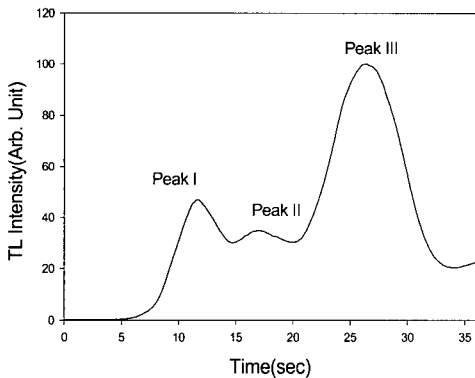


그림 2. 전형적인 CaSO<sub>4</sub>:Tm-PTFE TLD의 glow 곡선

Fig. 2. The typical glow curves of CaSO<sub>4</sub>:Tm-PTFE TLD.

#### 2. 균일성 측정

각 TLD 소자의 균일성은 그림 3과 같이 나타났으며, SCF로 보정한 열형광강도의 균일성은 3.1%로 이는 상용화된 LiF:Mg,Ti(TLD-100)의 7.9%(Solon), 13.8%(Teledyne)<sup>(14)</sup>와 비교할 때 매우 우수하였다.

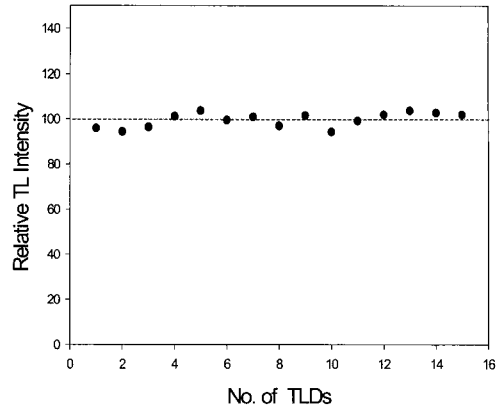


그림 3. CaSO<sub>4</sub>:Tm-PTFE TLD의 열형광 강도의 균일성

Fig. 3. The variation of relative TL intensity of CaSO<sub>4</sub>:Tm-PTFE TLD in a batch.

#### 3. 흡수선량 분포 측정

TLD를 이용한 polystyrene의 깊이에 있어서 흡수선량 분포를 dosimetry system과 비교하여 그림 4에 나타내었으며, 이때 측정값은 동일 깊이에서 소자 3개씩을 측정하여 평균값을 취하였다. 그림 4에서 볼 때 최대선량깊이(R<sub>100</sub>)는 14.1mm, 50%선량깊이(R<sub>50</sub>)는 23.5mm, 그리고 실용비정(R<sub>p</sub>)은 31.0mm였다. 측정된 polystyrene 팬텀에서의 비정값들은 물팬텀에서의 비정값으로 다음의 식을 이용하여 환산하였다<sup>(15)</sup>.

$$\frac{R_{pl}}{R_w} = \frac{\left(\frac{r_0}{\rho}\right)_{pl}}{\left(\frac{r_0}{\rho}\right)_w} \quad (1)$$

여기서 R<sub>pl</sub>과 R<sub>w</sub>는 각각 플라스틱과 물에서의 R<sub>100</sub>, R<sub>50</sub>, R<sub>p</sub> 등과 같은 비정을 나타내며, r<sub>0</sub>/ρ는 ICRU 37<sup>(14)</sup>에서 에너지의 함수로 보고한 바 있는 선연속감속비정(linear continuous slowing down range)으로 물과 플라스틱에 대한 r<sub>0</sub>/ρ의 값이다. 표 1에서는 식 (1)에 의해 환산된 물등가의 비정값들과 전리조로 측정한 물팬텀에 대한 깊이-흡수선량 분포 곡선으로부터 얻은 비정 값들과 비교하여 나타내었다. 따라서 TLD로 측정한 경우가 선량분포의 깊이가 다소 증가함을 알 수 있었다.

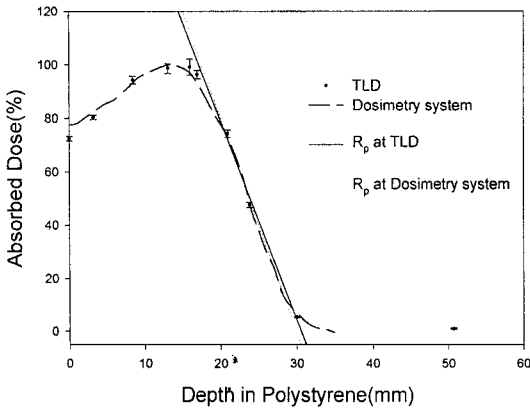


그림 4. 고에너지 전자선의 폴리스틸렌에서 흡수선량 분포

Fig. 4. The absorbed dose distribution in the polystyrene of the high energy electron.

표 1. 고에너지 전자선에 대한 흡수선량 분포의 비정

Table 1. The ranges of the absorbed dose distribution for high energy electron.

	CaSO <sub>4</sub> :Tm-PTFE TLD		dosimetry system
	Ranges in polystyrene(mm)	Corresponding ranges for water(mm)	Ranges in water(mm)
R <sub>100</sub>	14.1	14.5	13.0
R <sub>70</sub>	23.5	24.1	23.7
R <sub>p</sub>	31.0	31.8	30.0

#### 4. Beam 평탄도 측정

그림 5는 6MV 전자선 조사에 있어서 조사면의 크기 10×10cm<sup>2</sup>일 경우의 beam 좌우의 평탄도를 나타내었다. 이때 평탄도의 평가는 조사면의 80% 영역내에서 결정<sup>16)</sup>하였으며, dosimetry system(Wellhofer, Germany)로 측정할 경우는 허용기준 3%를 초과하지 않았으나, CaSO<sub>4</sub>:Tm-PTFE TLD로 측정할 경우는 전자선 cone에 의한 산란선의 추가로 그림과 같이 좌우 대칭으로 선속의 중심보다 다소 흡수선량이 증가한 모양을 나타내며, 평탄도는 4.5% 이었다. 그러나 이상적인 선량 분포의 모양은 조사야 내에서는 평탄하고 경계부근에서 선량은 바로 0이 되어야 하나 실제 선량분포에 관한 평탄도는

조사야 경계부근에서 지수함수 형태를 나타내고 있는데 이런 지수함수 형태 부분을 반음영(penumbra)이라고 하며, 반음영의 폭은 beam 중심축의 선량을 100%로 규격화 했을 때 20~90%사이이다. 반음영이 생기는 원인은 표적의 크기 및 SSD 등에 의한 기하학적 원인과 전자선의 산란 성분 등에 의한 물리적인 요인 때문이라고 생각된다<sup>16,17)</sup>.

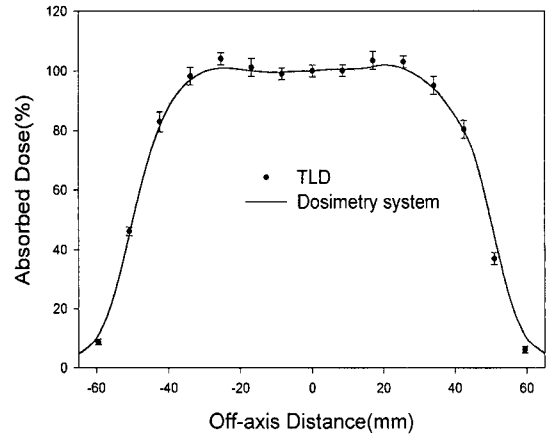


그림 5. 고에너지 전자선의 빔 평탄도

Fig. 5. The beam flatness of high energy electron.

#### IV. 결 론

제작한 디스크 형태의 CaSO<sub>4</sub>:Tm-PTFE TLD 각 소자의 소자보정인자로 보정했을 때 TLD의 균일성은 3.1%로 매우 우수하였다. 선별한 TLD를 이용하여 고에너지 전자선에 대한 polystyrene 팬텀에서의 흡수선량 분포 곡선을 측정하여 최대선량깊이, 50%선량깊이 및 실용비정의 값을 구할 수 있었으며, 또한 조사야 내의 beam 평탄도를 측정할 결과 4.5%로 측정되어 이는 dosimetry system를 사용하여 측정할 결과와 비교했을 때 산란선의 영향으로 평탄도가 다소 높게 나타났다. 따라서 이와 같은 결과로부터 디스크 형태의 얇은 고감도의 CaSO<sub>4</sub> 계열 TLD를 이용하여 비교적 간단하게 선량 평가가 가능함을 확인하였으며, 특히 다른 선량계로는 측정이 곤란한 흡수차가 큰 경계부근에서의 선량 측정시에 더욱 유용하게 적용할 수 있을 것으로 기대한다.

## 참고 문헌

- [1] 장시영, "개인방사선량 측정용 TL 선량계" 동위원 소회보, 제13권, 제4호 pp. 56~61, 1998.
- [2] 유명진, "Magnesium borate 열형광체의 제작과 photon, beta 및 고에너지 전자선에 대한 특성", 박사학위논문, 경성대학교, pp.9~14, 1992.
- [3] T. Yamashita, N. Nada, H. Onishi and S. Kitamura, "Calcium Sulfate Activated by Thulium or Dysprosium for Thermo-luminescence Dosimetry", Health Phys., Vol. 21, pp. 295~300, 1971.
- [4] A. R. Lakshmanan, "Editorial-Recent Improvement in CaSO<sub>4</sub> and BaSO<sub>4</sub> Thermo-luminescence Dosimetry Materials", Rad. Protec. Dosim., Vol. 40, No. 4, pp. 219-223, 1992.
- [5] M. Prokic, "Improvement of the Thermo-luminescence Properties of the Non-Commercial Dosimetry Phosphors CaSO<sub>4</sub>:Dy and CaSO<sub>4</sub>:Tm, Nucl. Instrum. Methods, Vol. 151, pp. 603~608, 1978.
- [6] C. M. Sunta, "Thermoluminescence of Calcium-Based Phosphors", Nucl. Tracks, Vol. 10, No.1/2, pp. 47~53, 1985.
- [7] A. R. Lakshmanan, S. S. Shinde and R. C. Bhatt, "A Comparative Study of Some CaSO<sub>4</sub> Thermoluminescent Phosphors for Radiation Dosimetry", Rad. Protec. Dosim., Vol. 16, No. 3, pp. 237~241, 1986.
- [8] A. S. Pradhan and R. C. Bhatt, "Metal Filters for the Compensation of Photon Energy Dependence of the Response of CaSO<sub>4</sub>:Dy-Teflon TLD Discs", Nucl. Instrum. Methods, Vol. 166, pp. 497~501, 1979.
- [9] L. L. Campos and M. F. Lima, "Thermo-luminescent CaSO<sub>4</sub>:Dy Teflon Pellets for Beta Radiation Detection", Rad. Protec. Dosim., Vol.18, No. 2, pp. 95~97,1987.
- [10] I. Kasa, "Dependence of Thermoluminescence Response of CaSO<sub>4</sub>:Dy and CaSO<sub>4</sub>:Tm on Grain Size and Activator Concentration", Rad. Protec. Dosim., Vol. 33, No. 1/4, pp. 299~304, 1990.
- [11] 강희동 외, "TLD 방사선 센서 및 판독장치의 개발(II)", 센서기술연구소, pp.47~82, 1993.
- [12] 남영미, "LiF:Mg,Cu,Na,Si Teflon TLD의 특성 및 응용에 관한 연구", 박사학위논문, 부산대학교, pp. 109~117, 1997.
- [13] 김도성, 박강수, 강희동, "CaSO<sub>4</sub>:Tm-PTFE TLD의 제작과 선량계 특성", 세물리, 제 33권 제5호", pp. 517~522, 1993.
- [14] ICRU, Report 37, "Stopping Powers of Electrons and Positrons", Bethesda, pp. 42~75, 1984.
- [15] IAEA Technical Reports Series No.277, "Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams", Vienna, pp. 22~52, 1987.
- [16] F. M. Khan, "The Physics of Radiation Therapy", Williams & Wilkins, Baltimore, pp.366~380, 1994.
- [17] ICRU, Report 24, "Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beams of X or Gamma Rays in Radiotherapy Procedures", Bethesda, pp.52~75, 1976.

---

 著 者 紹 介
 

---

**박 명 환**

1966. 6. 26 생  
 1991. 2. 경일대학교 전기공학과 졸업(이학사)  
 1993. 2. 대구대학교 대학원 물리학과 졸업(이학석사)  
 2000. 2. 대구대학교 대학원 물리학과 졸업(이학박사)  
 1989. 3 - 현재 대구보건대학 방사선과 부교수  
 주관심 분야 : TLD 및 의료용 방사선장비 개발

**김 도 성**

1955. 11. 1 생  
 1978. 2. 경북대학교 문리대 물리학과 졸업(이학사)  
 1980. 9 경북대학교 대학원 물리학과 졸업(이학석사)  
 1987. 2. 경북대학교 대학원 물리학과 졸업(이학박사)  
 1981. 3 - 현재 대구대학교 과학교육학부 교수  
 주관심 분야 : 열형광선량계 개발, 환경방사능  
 평가

**도 시 홍**

1944. 9. 29 생  
 1969. 2. 경북대학교 문리대 물리학과 졸업(이학사)  
 1972. 2 경북대학교 대학원 물리학과 졸업(이학석사)  
 1988. 8. 경북대학교 대학원 물리학과 졸업(이학박사)  
 1980.11 - 현재 부경대학교 물리학과 교수  
 주관심 분야 : 열형광체 개발, 섬광체용 단결정  
 성장

**김 완**

1958. 10. 30 생  
 1982. 2. 경북대학교 문리대 물리학과 졸업(이학사)  
 1984. 2 경북대학교 대학원 물리학과 졸업(이학석사)  
 1997. 2. 부경대학교 대학원 물리학과 졸업(이학박사)  
 1986. 4. - 1997. 6 한국원자력연구소 선임연  
 구원  
 1997. 10 - 현재 경북대학교 방사선과학연구소  
 연구원  
 주관심 분야 : 방사선계측기 개발, 환경방사능  
 평가

**강 희 동**

1944. 5. 27 생  
 1966. 2. 경북대학교 문리대 물리학과 졸업(이학사)  
 1973. 2 경북대학교 대학원 물리학과 졸업(이학석사)  
 1980. 3. 프랑스 Paul Sabatier 대학 졸업(이학박사)  
 1968. 2. - 1989. 3. 한국원자력연구소 책임연구원  
 1989. 3 - 현재 경북대학교 물리학과 교수, 대  
 구지방방사능측정소장, 방사선과학연구소장  
 주관심 분야 : 방사선계측기 개발, 환경방사능  
 평가