

## **Reliability Evaluation of ACP Components under a Radiation Environment**

### **방사선환경에서 ACP 주요부품의 신뢰도 평가**

**Hyo-Jik Lee**, Kwang-Ho Yoon, Kwang-Mook Lim, Byung-Suk Park and Ji Sup Yoon

Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeokdaero, Yuseong-gu, Daejeon

[hvojik@kaeri.re.kr](mailto:hvojik@kaeri.re.kr)

이효직, 윤광호, 임광목, 박병석, 윤지섭  
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

(Received June 3, 2007/Approved August 28, 2007)

#### **Abstract**

This study deals with the irradiation effects on some selected components which are being used in an Advanced Spent Fuel Conditioning Process (ACP). Irradiation test components have a higher priority from the aspect of their reliability because their degradation or failure is able to critically affect the performance of an ACP equipment. Components that we chose for the irradiation tests were the AC servo motor, potentiometer, thermocouples, accelerometer and CCD camera. ACP facility has a number of AC servo motors to move the joints of a manipulator and to operate process equipment. Potentiometers are used for a measurement of several joint angles in a manipulator. Thermocouples are used for a temperature measurement in an electrolytic reduction reactor, a vol-oxidation reactor and a molten salt transfer line. An accelerometer is installed in a slitting machine to forecast an incipient failure during a slitting process. A small CCD camera is used for an in-situ vision monitoring between ACP campaigns. We made use of a gamma-irradiation facility with cobalt-60 source for an irradiation test on the above components because gamma rays from among various radioactive rays are the most significant for electric, electronic and robotic components. Irradiation tests were carried out for enough long time for total doses to be over expected threshold values. Other components except the CCD camera showed a very high radiation hardening characteristic. Characteristic changes at different total doses were investigated and threshold values to warrant at least their performance without a deterioration were evaluated as a result of the irradiation tests.

---

**Keywords** : Irradiation test, AC servo motor, Potentiometer, Thermocouple, Accelerometer, CCD camera

## 요 약

이 논문은 사용후핵연료 차세대관리공정(ACP)에 사용되는 주요부품에 대한 방사선영향에 대하여 다룬다. 평가대상 부품으로는 중요도가 높은 것들 중에서 선택하였는데, AC 서보모터, 포텐쇼미터, 열전대, 가속도계, CCD 카메라를 그 대상으로 하였다. AC 서보모터의 경우 ACP 핫셀 내 조작기에 여러개가 사용되고 있고, 공정장치의 일부에 사용되고 있다. 포텐쇼미터는 조작기 관절의 절대 각도를 측정하기 위해 사용된다. 열전대는 급속전환장치 등의 반응기 온도 측정을 위해 사용된다. 가속도계는 탈피복시 발생하는 이상을 사전에 감지하기 위한 용도로 탈피복장치에 부착되어 있고, CCD 카메라는 조작기와 함께 공정 휴지기간에 영상 In-situ 이상감시를 하기 위한 용도로 사용된다. 다양한 방사선 중 감마선은 전기, 전자 및 로봇 부품에 가장 치명적이라고 알려져 있으므로 본 연구에서는 Co-60선원을 사용하는 감마조사시설을 이용해 방사선영향을 평가하였다. 방사선조사결과 CCD 카메라를 제외한 다른 부품들은 방사선에 매우 강한 특성을 보였다. 누적조사선량에 대한 각 대상 부품의 고유한 특성변화 데이터를 얻었고, 대상 부품의 성능을 보장할 수 있는 기준인 손상분기점에 대한 평가 자료를 얻을 수 있었다.

**중심단어** : 방사선영향평가, AC 서보모터, 포텐쇼미터, 열전대, 가속도계, CCD 카메라

## I. 서 론

ACPF (Advanced spent fuel Conditioning Process Facility)[1]는 사용후핵연료 차세대 관리종합공정(ACP)의 실증을 위한 시설로 탈피복, 분말화, 전해환원, 영입공계조, 급속잉공계조 장치와 같은 사용후핵연료를 처리하기 위한 기계 장치 및 화공정 장치들이 설치되어 있다. 이러한 공정장치들은 사용후핵연료를 직접 다루기 때문에 사용후핵연료에서 발생하는 방사선에 대한 내방사선 요건을 만족해야 한다. 내방사선 기능이 없거나 수명이 짧은 공정장치의 부품들은 간단히 원격으로 유지, 보수 또는 교체가 용이해야 한다[2]. 특히 장치의 구동에 관여하거나 장치의 공정상태를 모니터링하는 센서 부품 등은 공정의 생산성 및 효율성 측면에서 그 신뢰도가 매우 중요하다. ACPF는  $\alpha$ - $\gamma$  핫셀로 알파선, 베타선, 감마선, 중성자 등의 방사선이 발생할 수 있는 시설이다. 알파 및 베타선은 간단한 차폐가 가능하므로 그 영향이 크지 않으며, 중성자보다는 감마선이 전자부품 및 로봇 관련 부품 등에 훨씬 더 위협적이라고 알려져 있다

[3]. 그래서 보통 방사선의 영향을 고려할 때 감마선에 의한 영향을 주 관심 대상으로 고려한다. 예외적으로 중성자의 영향을 고려해야만 하는 대상으로는 원자로의 코어 관련 부품들이 있지만 이는 본 연구의 범위를 벗어난다. 본 연구는 로봇, 전자, 계측 시스템 등에 가장 위험이 되는 감마선을 대상 부품에 조사시켜 그 영향을 평가하고자 하는 데에 목적이 있다. 이번 연구에서 방사선영향평가의 대상 부품으로 우선 선정한 것으로는 AC 서보모터, 포텐쇼미터, 열전대, 가속도계, 그리고 CCD 카메라이다.

서론 이후의 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 방사선영향평가를 수행했던 감마조사시험의 시설에 대한 설명과 대상부품에 대한 용도 및 예상 손상분기점에 대한 설명을 하였고, 오프라인 및 온라인 조사방안에 대한 설명을 하였다. III 장에서는 방사선영향평가를 수행하기 위한 계측장비 구성 및 계측프로그램 구성 그리고 방사선영향평가 기준에 대한 설명을 하였다. 각 부품에 대한 실험결과를 수록하고 특성변화 및 손상분기점에 대한 분석을 수행하였다. IV 장에서는 방사선영향평가 결과에 대해 요약하였다.

## II. 감마조사시험

### 가. 감마조사시설

방사선영향평가를 수행하기 위해 정읍 방사선과 학연구소의 감마조사시설을 이용하였다. 감마조사 시설은 고준위와 저준위 시설로 나뉘어져있고, CCD 카메라를 제외한 대상부품들은 방사선에 강한 부품들이므로 단시간에 결과를 얻기 위해서 고준위 조사시설을 이용하였고, CCD 카메라는 저준위시설을 이용하였다. 고준위 감마조사시설의 조건과 구조는 아래와 같다.

- 제작사: MDS Nordion, Canada
- 허가량: 490 kCi
- 형식: 습식
- 선원
  - 핵종: Co-60
  - 유형: Pencil Type

- Pencil 직경: 11.1 (mm), 길이: 41.56 (mm)
- 형태: C-188 밀봉
- 차폐체: 물
- 선원 모듈 (6개): 49.5 (cm) × 47.5 (cm)
- 선원 랙: 150 (cm) × 100 (cm)
- 수조: 1.9 (m) × 3.5 (m) × 5.15 (m)
- 조사시료대
  - A 면: 1.9 (m) × 3.5 (m) × 1.3 (m)
  - B 면: 1.9 (m) × 1.9 (m) × 1.3 (m)
- 차폐벽: 183 (cm)

### 나. 방사선영향평가 대상부품

ACPF 내에 설치되어 있는 공정장치의 유지보수 주요 부품 중 방사선 영향평가의 대상은 AC 서보모터, 포텐쇼미터, 열전대, 가속도계, CCD 카메라이고 각각의 용도 및 예상손상분기점을 아래 Table 1 과 같이 정리하였다. AC 서보모터의 예상손상분기점은 참고문헌 [4]으로부터 얻었다.

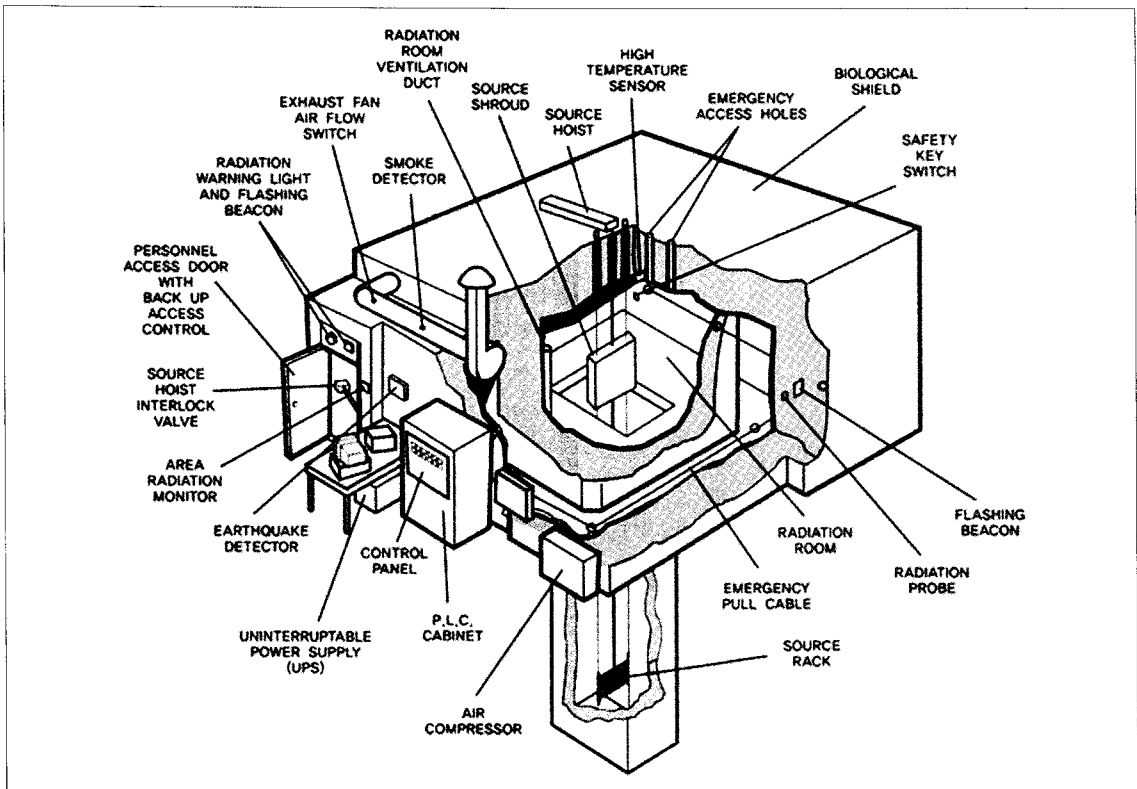


Fig. 1. Structure of the high-level gamma irradiation facility

AC 서보모터의 경우 BTSM의 슬래이브 매니플레이터에 총 7개, 브릿지 transporter에 3개가 사용되고 있으며, 탈피폭장치, 분말화장치 등에 걸쳐 많이 사용되는 부품이므로 방사선 영향평가가 필요한 부품이다. Table 1에 의하면 AC 서보모터의 경우  $1.0 \times 10^7$  Gy까지 실험결과 어떤 특성변화도 없는 것으로 보고되고 있다. 포텐쇼미터는 BTSM의 슬래이브 매니플레이터 관절의 절대각도를 측정하기 위한 목적으로 사용되는 각도센서이다. 이는 저항의 변화에 의해 각도를 측정하는 아날로그 방식을 취하고 있고, 다른 전자소자가 없기 때문에 예상손상분기점은 상당히 높을 것으로 예측된다. 열전대는 모두 K-type 열전대로서 금속전환장치 반응용기 내부의 용융염의 온도를 측정하는 용도와 금속전환공정이 끝난 후 염잉곳제조장치로 염이송을 할 때 염이송관의 온도를 측정하는 열전대로 나뉜다. 열전대 또한 서로 다른 두 금속으로 이루어져 있을 뿐 어떠한 전자소자도 없으므로 예상손상분기점이 상당히 높을 것으로 예측된다. 가속도계의 경우 탈피복장치의 로드컷 탈피복 시 블레이드 모듈과 펠릿/피복 분리대 사이에 끼임현상을 사전에 감지하기 위한 용도로 사용되며, 제작사의 사양으로 미루어 손상분기점은  $1.0 \times 10^6$  Gy 정도로 예상된다. CCD 카메라의 경우 공정의 휴지기간인 캠페인 간에 영상 In-situ 이상검사 용도로 사용된다. CCD 촬상소자가 방사선에 매우 취약한 것으로 알려져 있고, 손상분기점은 대략 100 Gy 내외로 보고되고 있다.

**다. 방사선영향평가 방안**

감마조사시설의 주변 여건상 장기간 일정한 선량율로 한 부품을 조사하는 것은 불가능하였다. 그러나 대상부품의 조사선량률의 범위를 가능한 좁혀 조사실험을 수행하였다. 방사선 영향평가 수행시 AC

**Table 1. Estimated threshold values of selected components**

주요부품	용도	예상손상분기점
AC 서보모터	BTSM, 탈피복장치, 분말화장치 구동	$1.0 \times 10^7$ Gy [4]
포텐쇼미터	BTSM 관절 각도 측정	-
열전대	금속전환장치, 염이송장치 온도측정	-
가속도계	탈피복장치 이상감시	$1.0 \times 10^6$ Gy
CCD 카메라	캠페인 간 영상 이상검사	100 Gy

서보모터는  $7.0 \times 10^3 \sim 2.0 \times 10^4$  Gy/h 선량률 범위 내에서, 포텐쇼미터는  $7.0 \times 10^3 \sim 2.4 \times 10^4$  Gy/h 선량률 범위 내에서, 그리고 열전대는  $2.4 \times 10^4$  Gy/h의 고정 선량률로 조사시켰으며, 가속도계의 경우는  $3.1 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^4$  Gy/h 선량률 범위 내에서, CCD 카메라의 경우는 100 Gy/h의 고정 선량률로 조사실험을 수행하였다.

AC 서보모터 및 가속도계의 경우 온라인으로 방사선영향평가를 수행할 수 있도록 하였고, 포텐쇼미터와 열전대의 경우 오프라인으로 방사선영향평가를 수행하였다. 여기서 온라인이란 대상 부품만을 조사실 안에 설치하고 다른 측정장비는 조사실 밖에 설치하여 원하는 시간에 데이터를 측정하고 평가하는 것을 의미하며, 오프라인이란 대상 부품을 조사실에서 일정시간 조사한 후 꺼내와 조사실 밖에 미리 설치된 측정장비에 연결하여 데이터를 측정하고 평가하는 것을 원하는 누적선량까지 반복하는 것을 의미한다. 온라인 계측을 하는 이유는 방사선영향평가 시간 절약 및 측정데이터의 신뢰성에 있다. AC 서보모터의 경우는 장거리 간에 연결된 레졸버 신호의 노이즈를 제거할 수 있도록 하여 온라인 계측을 가능하도록 하였고, 포텐쇼미터와 열전대는 노이즈 특성과 계측에 수반되는 부대장치의 특성을 고려하여 오프라인 계측을 수행하였다. 가속도계의 경우 부득이 가진기를 조사시설 안에 놓아야 하므로, 납벽돌로 가진기를 잘 차폐한 후 가속도계만 주로 조사되도록 하였다. CCD 카메라는 방사선영향평가 시간이 짧을 것으로 예측되므로, 저준위 조사시설에서 오프라인 계측을 수행하였다.

**III. 방사선영향평가**

**가. AC 서보모터**

본 실험에 사용된 AC 서보모터는 실제 ACPF 내에 설치된 천정이동서보조작기(Bridge Transported Servo Manipulator: BTSM)에 사용된 모터와 동일한 사양이며, 아래와 같다.

- 제조사: Tamakawa



현하였다. Fig. 3 에 LabVIEW로 작성한 프로그램의 유저인터페이스 화면을 보여주고 있다. 왼쪽 상단에 하드웨어(모터 컨트롤러와 해당 축)를 설정하는 컨트롤이 있다. 주어진 속도 궤적에 대한 AC 서보모터의 응답특성을 레졸버 신호와 모터의 아날로그 출력 신호를 통해 살펴보았다. 속도 궤적으로는 사다리꼴 파형과 정현파형을 사용하였다. 오른쪽 상단이 사다리꼴 파형에 대한 모터의 응답신호를 오른쪽 하단이 정현파에 대한 모터의 응답신호를 나타내주는 그래프 인디케이터이다. 왼쪽하단에는 정형파형의 주기 및 데이터 획득 샘플링 갯수 등을 설정할 수 있는 컨트롤을 배치하였다.

AC 서보모터는  $7.0 \times 10^3 \sim 2.0 \times 10^4$  Gy/hr 선량률 범위 내에서 최종 누적선량이  $1.6 \times 10^7$  Gy가 될 때까지 조사시험을 수행하였다. AC 서보모터가 조사시설에 놓이는 위치에 따라 선량률의 변화가 있었으므로, 선량률의 변화에 대한 영향은 본 실험에서 볼 수 없지만, 누적선량에 대한 결과는 Fig. 4, 5 와 같이 얻을 수 있었다. 실험결과로부터 최종 누적선량인  $1.6 \times 10^7$  Gy 이내에서는 아무런 특성변화가 없었다.

**나. 포텐쇼미터**

방사선영향평가에 사용된 포텐쇼미터는 실제 ACPF 내에 설치된 BTSM 슬레이브 조작기의 관절의 절대각도 측정에 사용되고 있는 것이며, 그 사양은 아래와 같다.

- 제조사: Copal Electronics
- 모델명: J40S-10K: PXI controller 8196
- Effective electrical angle:  $350^\circ \pm 1.5^\circ$
- 분해능: 0.07%

포텐쇼미터의 구조는 단순하게 회전량에 따라 저항값이 변하게 되는 원리를 이용하는 것이다. 내부에 저항 이외에는 어떠한 전기, 전자 소자도 포함되어 있지 않으므로 고방사선에도 큰 영향을 받지 않을 것으로 예상되는 아날로그 센서 중 하나이다. 각종재료의 저항에 대한 방사선 영향의 손상분기점을 살펴보면, 대부분의 저항이 방사선에 상당히 강인함을 알 수 있다[5]. 포텐쇼미터의 성능을 나타내는 인자 중 하나는 독립선형성(independent linearity)이다. 이를 구하기 위해서는 우선 샘플데이터로부터 선형최소자승법에 의해 제곱오차합(SSE)을 최소화하는 방향으로 선형적합곡선(linear fitting curve)을 구하고, 이 선형적합곡선으로부터 샘플데이터와의 편차를 구해 그 중 최대편차를 기준으로 폴스케일출력 대비 백분율로 표시한 것이다 (Fig. 6).

포텐쇼미터의 특성을 평가하기 위해 건전한 엔코더와 조사대상 포텐쇼미터를 연결한 후 엔코더의 디지털 출력신호와 포텐쇼미터의 출력신호를 비교하기 위한 테스트 베드를 Fig. 7과 같이 제작하였다. 사용방법은 다음과 같다. 포텐쇼미터를 테스트베드에 고정하고 커플링으로 엔코더와 연결한다. 방사

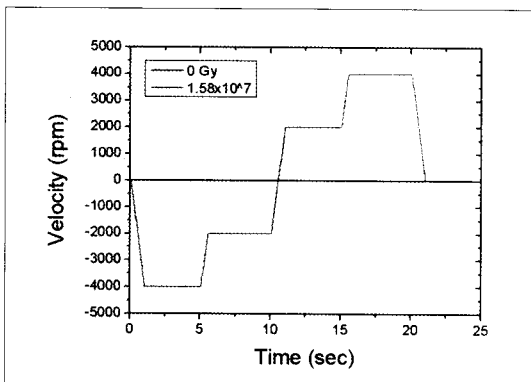


Fig. 4. The AC servo motor's response to a trapezoidal velocity input

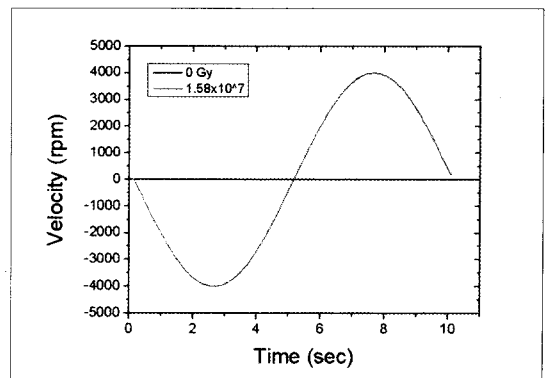


Fig. 5. The AC servo motor's response to a sinusoidal velocity input

선영향평가 프로그램을 실행시키고, 회전손잡이를 천천히 1 회전시키면 1 회전 동안의 포텐쇼미터와 엔코더 신호데이터를 수집, 저장하고, 그래프로 그려 선형성을 평가하게 된다. 오른쪽 하단에 두 커넥터는 각각 포텐쇼미터와 엔코더출력 신호가 나가는 연결 부위이다. 이 때 비교신호로 사용한 회전 엔코더의 사양은 아래와 같다.

- 제조사: Autonics
- 모델명: E40-H10-2000-6-L-5
- 작동전압: 5 VDC  $\pm$ 5%

위 엔코더는 1 회전당 2000 펄스를 발생시키므

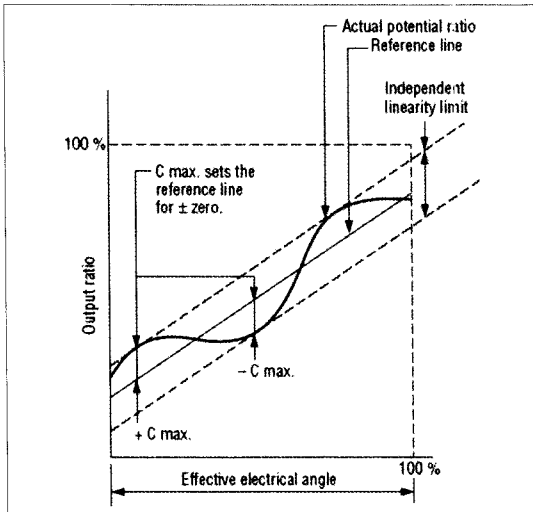


Fig. 6. A definition of an independent linearity

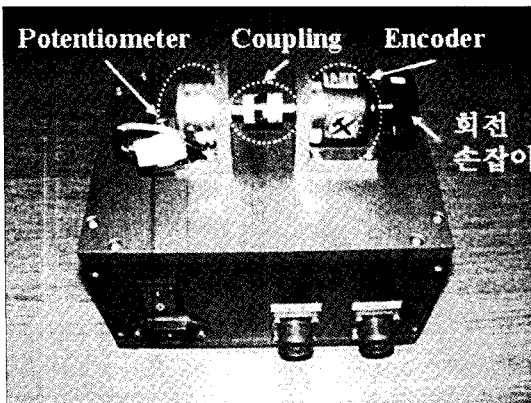


Fig. 7. A testbed for an off-line evaluation of a potentiometer

로 실험의 목적인 포텐쇼미터의 기준 신호로 사용하기에는 부족함이 없다. 포텐쇼미터와 엔코더의 출력신호를 수집하기 위한 DAQ 보드로는 NI 사의 범용 DAQ 보드인 PXI-6221와 SCC-68 터미널블록을 사용하였다. 포텐쇼미터와 엔코더의 작동전압은 5 VDC로 DAQ 보드의 전압출력 기능을 이용하여 연결하였다. 방사선영향평가 프로그램은 NI LabVIEW 8.0을 사용하여 구현하였다. 포텐쇼미터 방사선영향평가 프로그램은 테스트베드의 회전손잡이를 1 회전시켰을 때 포텐쇼미터와 엔코더(기준 신호)의 출력신호를 저장하는 기능과 그래프에 비교하여 뿌려주는 기능이 있다. 내부적으로는 1 회전시 포텐쇼미터의 초기 수집전압을 0 V로부터 시작하도록 정렬하는 기능과, 엔코더의 수집신호를 기준으로 전 수집데이터와 일정 각도 이상의 회전이 발생하게 되면 데이터를 수집하도록 하는 기능을 추가하여 수동으로 회전하여도 문제가 없도록 하였다. Fig. 8에 포텐쇼미터 방사선영향평가 프로그램의 프론트패널 화면을 나타내었다.

왼쪽상단은 실험에 사용한 엔코더의 기본하드웨어 정보를 설정하는 컨트롤이고 왼쪽하단은 회전손잡이를 돌릴 때 수집되는 포텐쇼미터와 엔코더의 신호를 실시간으로 디스플레이해주는 인디케이터들이다. 오른쪽에 그래프가 세 개가 있는데, 맨 위 쪽이 엔코더, 중간이 포텐쇼미터, 마지막이 엔코더

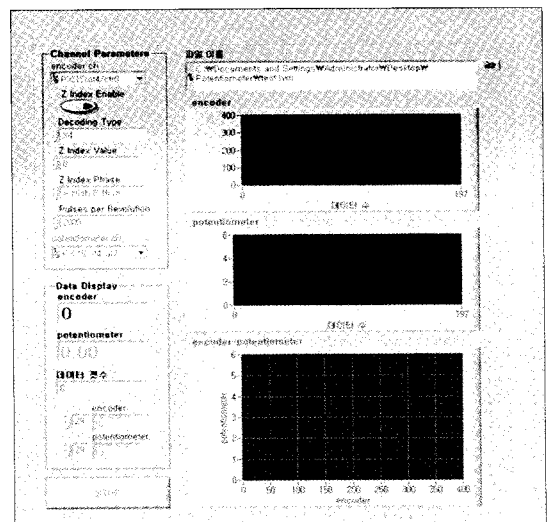


Fig. 8. A user interface for the potentiometer test program

대 포텐쇼미터의 그래프를 그리도록 되어있다. 맨 아래쪽 그래프를 보면 포텐쇼미터가 기준신호인 엔코더와 비교해서 얼마나 선형성이 훼손 되었는지를 평가할 수 있다.

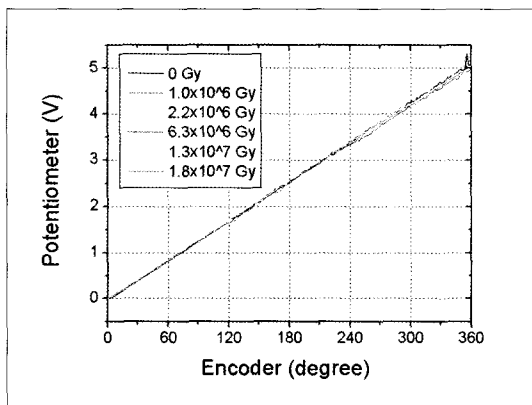
포텐쇼미터의 누적방사선조사선량에 따른 그래프를 Fig. 9에 나타내었다. 포텐쇼미터의 사양을 보면 350° 이내에서 유효한 값을 출력하므로 350°~360° 사이의 값은 무시하여야 한다. Fig. 9의 그래프로 보아  $1.8 \times 10^7$  Gy의 누적조사 선량까지 크게 선형성을 벗어나지 않는다. 이를 좀 더 정량적으로 분석하기 위해 누적선량에 따른 독립선형성을 Table 2와 같이 구하였다. 독립선형성의 값을 구할 때 350°~360° 사이의 수집데이터는 제거하여 계산결과와 신뢰성을 높였다. 독립선형성의 값이 작을수록 최소자승법으로 구한 직선과 실제 측정데이터 간의 편차가 적다는 것을 의미하며, 이는 간단히 말해 선형성이 좋다는 것을 의미한다. Table 2에 의하면 누적조사선량이 커질수록 독립선형성의 값이 증가하는 경향을 보이지만, 이 정도 범위( $\Delta$  0.36%) 내에서 일반화를 하기는 힘들다.

**다. 열전대**

열전대의 경우 ACP 핫셀에서 금속전환장치의

**Table 2. Independent linearity change vs the total dose of a potentiometer**

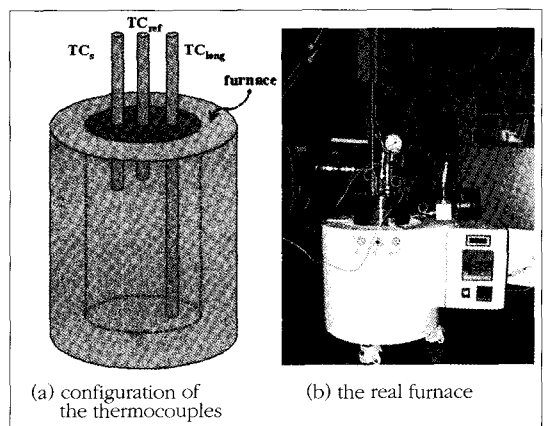
누적조사선량 ( $\times 10^6$ Gy)	0	1.0	2.2	6.3	13	18
독립선형성(%)	0.77	0.92	0.69	1.00	1.19	1.13



**Fig. 9. Potentiometer output vs the encoder signal at different total doses**

내부반응용기의 온도 측정 및 염이송관 온도 측정 시 사용된다. 두 열전대 모두 K-type 열전대이며, ACP 적용을 위해 주문 제작한 것이다. K-type 열전대의 경우 보통 0~1260 °C 범위 내에서 온도를 측정할 수 있다. K-type 열전대는 Chromel(+)과 Alumel(-)의 두 금속을 연결하여 놓은 것이며, 실험에 사용된 열전대는 이 두 금속이 금속보호관 안에 쌓여있는 형태이다.

열전대의 경우 오프라인으로 방사선영향평가를 한다. 열전대의 방사선영향평가 실험을 위해 기준 온도 제공을 할 수 있는 로(furnace)를 이용하였다. Fig. 10에 로의 구조와 영향평가실험 사진을 나타내었다. TC<sub>long</sub>으로 표시한 열전대는 금속전환장치 내부반응용기의 온도측정에 사용된 열전대이고, TC<sub>s</sub>로 표시한 열전대는 염이송관의 온도측정에 사용된 열전대이다. TC<sub>ref</sub>는 조사되지 않은 상용 K-type 열전대로 로 내부용기의 온도변화 감지를 위해 사용하였다. 실제 로의 온도제어는 Fig. 10에 표시하지 않은 다른 열전대(바닥쪽에 가깝게 설치되어 있음)의 되먹임 신호를 이용하여 수행하였다. 총 3개의 열전대의 신호를 수집하기 위한 데이터 측정/수집 장비로는 포텐쇼미터에 사용된 범용 DAQ보드인 PXI-6221과 SCC-68 터미널블록, 온도신호앰프인 SCC-TC02 모듈을 사용하였다. 열전대의 신호선은 SCC-TC02 모듈에 직접 연결되며, SCC-TC02 모듈은 SCC-68 터미널블록에 삽입하여 사용하도록 되어있다. 실험에 사용한 로는 원래 다른 용도로 사



**Fig. 10. A testbed for an off-line evaluation of thermocouples**



용되던 것인데, 뚜껑부분을 재가공하여 열전대 3개를 장착할 수 있도록 개조하였다.

로 온도 실험 시 온도프로그램은 승온(325°C, 20 min) → 유지(325°C, 30 min) → 승온(650°C, 30 min) → 유지(650°C, 6 hrs) → 냉각의 순서로 입력하였고, 뚜껑에 삽입된 세 열전대의 온도를 로 내부 온도가 다 식을 때까지 측정하였다. 로 내부 주위에는 히터가 설치되어 있어 로 내부의 온도를 올리게 되는데, 그 특성을 살펴보면 바닥온도가 가장 높고 뚜껑에 가까운 쪽의 온도가 가장 낮다. TC<sub>long</sub> 열전대의 경우 길이가 상당히 길어 로 바닥에 닿도록 설치되어 있다. Fig. 11에 시간변화에 따른 열전대의 온도변화 특성 결과를 나타내었다. 프로그램 온도로 로의 내부 온도가 따라가지 못하는 것은 로의 열용량이 크고, 뚜껑이 금속재질로 되어있어 외부로 열손실이 많기 때문이다. TC<sub>long</sub> 열전대의 경우

바닥에 닿아 있어 히터의 온도에 가장 민감하게 영향을 받아 요동치고 있음을 알 수 있다. 비교적 뚜껑 쪽에 가깝게 설치된 TC<sub>s</sub>와 TC<sub>ref</sub>의 온도는 바닥 온도에 비해 두 배정도 낮다는 것을 알 수 있다. Fig. 11(a),(b)의 TC<sub>ref</sub>를 비교하면 약간의 차이가 있음을 알 수 있는데, 이는 실험 당시 로 주위의 조건이 약간씩 다르기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 Fig. 11로 보아서는 외부 영향을 배제한 방사선의 영향만이 열전대에 미치는 특성을 알아보기 힘들기 때문에 Fig. 12와 같이 다른 방법으로 결과 그래프를 그려보았다.

실험은 총 2 회가 실시되었는데, 1 회 때는 조사되지 않은 건전한 TC<sub>long</sub>와 TC<sub>s</sub> 열전대를 평가한 것으로 'unirradiated'로 표시가 되었고, 2 회 때는  $9.5 \times 10^6$  Gy의 누적선량을 받은 TC<sub>long</sub>와 TC<sub>s</sub> 열전대를 평가한 것으로 'irradiated'로 표시하였다. 각

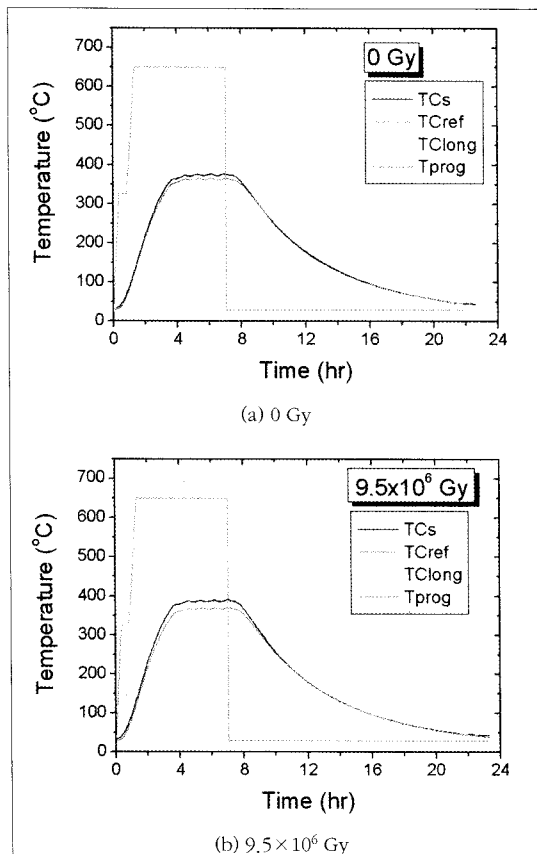


Fig. 11. Responses of a couple of thermocouples to a programmed temperature in a furnace

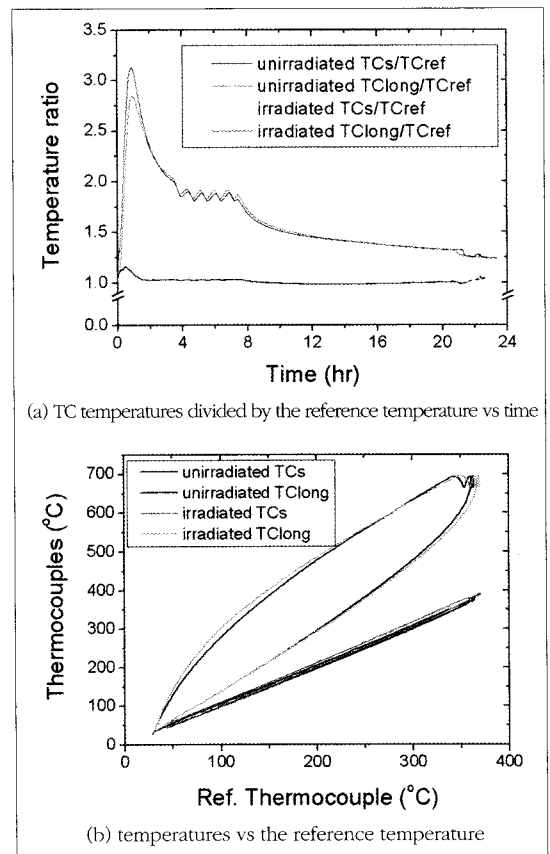


Fig. 12. Another expression of Fig. 11 based on the normalized temperature

실험의 프로그램 온도는 똑같지만 실제 실험 당시 외부환경의 영향으로  $TC_{ref}$ 의 온도가 약간 차이가 남을 알 수 있다. 따라서 이러한 영향을 배제시키고 방사선의 영향만을 보기 위하여  $TC_{ref}$  열전대의 온도로  $TC_{long}$ 와  $TC_s$  열전대의 온도를 평균화 시켜보았다(Fig. 12(a)).  $TC_{long}$ 와  $TC_s$  열전대 모두 방사선 조사된 것과 안 된 것이 약간의 차이를 보이고 있다. 온도상승구간인 천이상태에서는 약 10% 차이가 발생하였고, 최고온도인 정상상태에서는 약 1.6%의 차이가 발생하였다. 좀 더 다른 방법으로 방사선의 영향을 보기 위해 각 실험의  $TC_{ref}$  열전대의 온도를 x축으로 잡고,  $TC_{long}$ 와  $TC_s$  열전대의 온도를 y축에 그려보았다(Fig. 12(b)) 더 확연하게 온도차이가 있음을 알 수 있었다. 누적선량에 대한 방사선의 영향을 살펴보기 위해서는 향후  $9.5 \times 10^6$  Gy 누적선량 이상으로 조사된 열전대에 대한 추가 실험이 필요한 것으로 사료된다.

### 라. 가속도계

가속도계의 경우 탈피복장치의 블레이드 모듈에 부착되어 로드컷 기임 사전징후 판별에 사용되며, 탈피복장치 운전 중에는 상당한 선량율을 받게된다. 25 cm 로드컷 160 개를 포함하는 로드컷 컨테이너의 표면에서 최대 선량율은 4 Gy/h이고, 탈피복장

치의 운전시간이 90 시간인 점을 고려하면 1 배치 당 최대 360 Gy의 누적 선량으로 피폭 받을 수 있을 것으로 예측된다[6]. 따라서 방사선 영향평가 시 이러한 점을 고려하여 센서신호의 건전성 여부를 확인 하면 최소 몇 배치 동안 신뢰성 있는 측정데이터를 줄 것인가에 대한 답을 얻을 수 있다. 가속도계는 고준위감마조사시설에서 실시간으로 데이터를 측정하였다. 이를 위해서는 센서를 포함한 가진기(exciter)만을 시설 안에 넣어놓고 나머지 앰프와 계측장비 등은 피폭되지 않도록 시설밖에 놓아서 측정 신뢰도를 확보해야 한다. 가진기를 구동하기 위해서는 파워앰프가 필요하며, 이는 피폭되지 않도록 시설 밖에 설치하였다. 또한 가진기의 구동파형을 결정하기 위해서 함수발생기를 이용하여 파워앰프의 입력으로 넣어주어야 한다. 가속도계의 신호는 데이터 수집 및 분석 하드웨어로 입력되며, 본 실험에서는 NI사의 PXI 시스템(PXI-8196 및 PXI-4462)을 이용하였다(Fig. 13). 가속도계의 방사선 영향평가를 사용된 시스템의 상세사양은 아래와 같다.

- 가속도계: B&K 8324
- 주파수범위: ~ 9 kHz
- 공진주파수: 30 kHz
- 최대충격:  $\pm 2000$  g peak

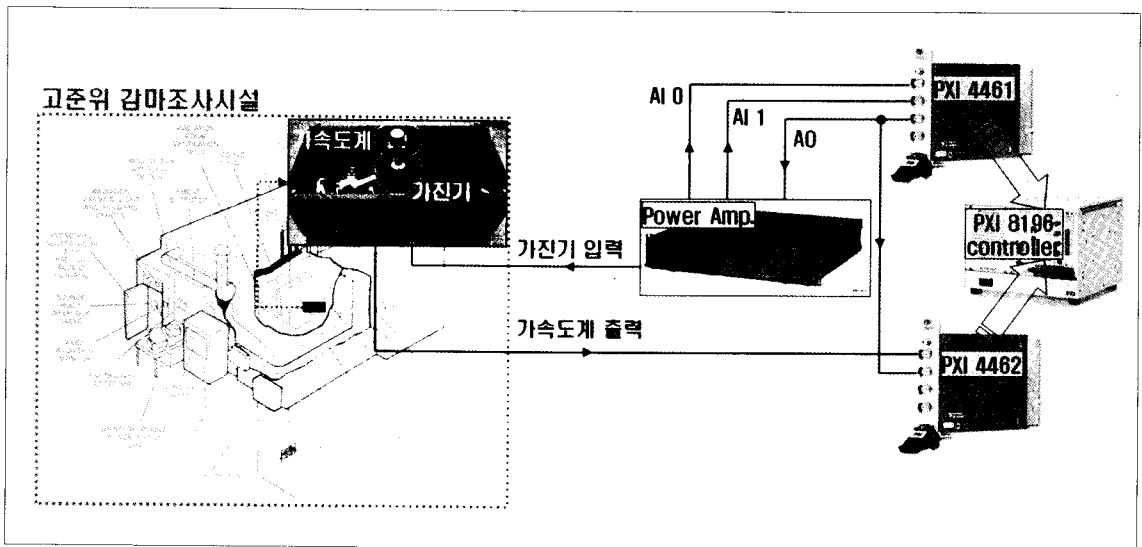


Fig. 13. Schematic diagram of the gamma irradiation test system for an accelerometer

- 최대연속정현파: 2000 g peak
- 결재질: Inconel 600
- 센싱 Element: Piezoelectric Type BT
- 중량: 91 grams
- 가속도계 전하앰프: B&K 2647
  - Gain: 1 and 10 mV/pC
  - 최저한계주파수: 0.17 Hz
  - 최고한계주파수: 50 kHz
- 가진기: B&K 4810
  - 주파수범위: DC to 18 kHz
  - 공진주파수: 18 kHz 이상
  - 정격힘(peak): 10 Newton (65 Hz to 4 kHz)
  - 최대 가속도(peak):  $550 \text{ ms}^{-2}$  (65 Hz to 4 kHz)
  - 최대 변위(peak-to-peak): 6 mm
  - 중량: 1.1 kg
- 파워앰프: B&K 2718
  - 출력과워: 75 VA into 3  $\Omega$  exciter
  - 입력 impedance: 15 k $\Omega$
  - 출력 impedance: (0.04  $\Omega$  (10 Hz to 5 kHz), (0.08  $\Omega$  (5 kHz to 20 kHz))
- 함수발생기: PXI-4461
  - 입력채널: 2 ea
  - 샘플링율: 204.8 kS/s
  - 최대신호대역폭: 92 kHz
  - 입력분해능: 24 bits
  - 입력범위:  $\pm 316 \text{ mV to } 42.4 \text{ V}$
  - 출력채널: 2 ea
  - 출력분해능 24 bits
  - 출력 Update rate: 204.8 kS/s
- 데이터수집하드웨어: DSA PXI-4462
  - 입력채널: 4 ea
  - 샘플링율: 204.8 kS/s
  - 최대신호대역폭: 92 kHz
  - 입력분해능: 24 bits

- 입력범위:  $\pm 316 \text{ mV to } 42.4 \text{ V}$

- PC기반계측시스템: 컨트롤러 PXI-8196
  - CPU: 2.0 GHz P M760
  - RAM: 1 GB
  - Windows OS: XP

실제로 고준위 셀에서 온라인 방사선조사시험 시 가진기가 피폭되어 가속도 신호에 영향을 줄 가능성이 있으므로 가진기의 피폭량을 최소화하기 위한 방안이 필요했다. 이를 위해 납벽돌로 구조물을 쌓아 가진기를 최대한 차폐시키면서 가속도계만 피폭되도록 하였다.

가속도계의 온라인 데이터 취득 소프트웨어는 LabVIEW 8.0 및 Sound and Vibration Toolkit 3.1을 이용하여 자체 프로그래밍 하였다. Fig. 14에 가속도계의 온라인 데이터 취득 및 신호처리 프로그램의 유저인터페이스 화면을 보여주고 있다. 좌측 상단은 입,출력 채널을 설정하는 control이다. 출력 채널은 함수파형을 발생할 수 있는 채널을 의미하며 PXI-4461 Dynamic Signal Analyzer 의 경우 입력 2 채널, 출력 2 채널을 갖고 있다. 본 실험에서는 함수발생기를 따로 사용하지 않았고, PXI-4461의 출력 채널을 함수발생기 대신 사용하였다. 입력은 가속도계의 입력과 출력채널을 다시 입력으로 받고 있다. 고속으로 데이터를 저장하므로 scan rate와 FIFO에서 가져올 샘플 개수를 조정할 수 있도록 하

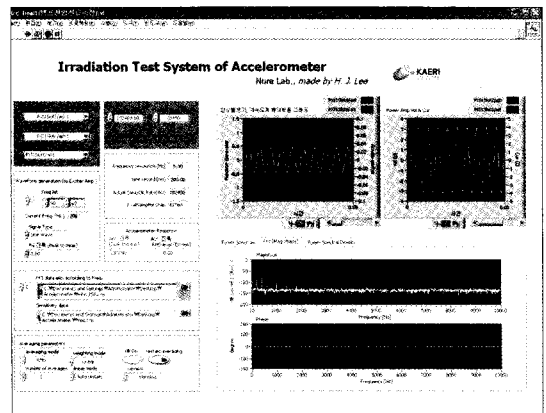
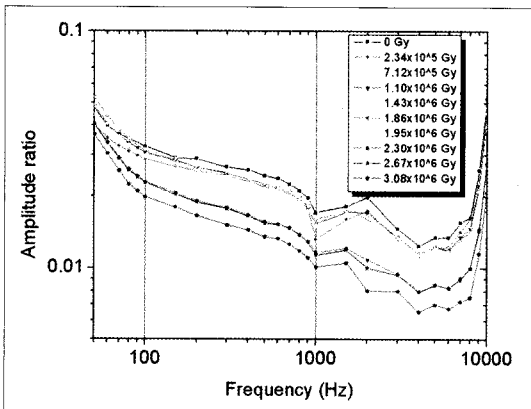


Fig. 14. A user interface for the accelerometer test program

였다. 함수형태, 진폭, 주파수 리스트를 결정할 수 있도록 하였다. 프로그램은 각 주파수별로 웨이브폼을 각 파일에 저장하게 된다. 또한 모든 주파수 리스트에 대해 입력진폭(함수진폭) 대 출력진폭(가속도계진폭)을 한 파일에 기록하도록 되어있다. 실시간으로 신호처리를 하여 주파수 영역에서 FFT, 파워스펙트럼, 파워스펙트럼밀도를 그래프를 통해 볼 수 있도록 하였고, 시간 영역에서 웨이브폼을 그래프를 통해 볼 수 있도록 하였다. 가진기에는 항상 정현파 형태의 파형이 입력되도록 프로그래밍 되어 있고, 가속도계의 출력범위를 고려하여 50 Hz에서 10 kHz 사이에서 주파수를 변화시켜가며 데이터를 취득하도록 하였다. 가속도계로부터 수집한 정현파의 진폭을 함수발생기의 진폭 레벨로 나누어 평균화시켜 주파수변화에 따른 진폭변화를 살펴보았다. Fig. 15에 주파수 변화에 따른 진폭신호의 크기를 나타내었다. 실험결과에 의하면 누적선량 대비 변화폭이 큰  $2.0 \times 10^6$  Gy 정도가 손상분기점이라고 할 수 있다. 따라서 이 범위 이내에서는 방사선이 가속도계에 미치는 영향이 상대적으로 적다.

**마. CCD 카메라**

CCD 카메라의 경우 방사선에 매우 취약하므로 저준위감마조사시설을 이용하여 100 Gy/hr의 일정한 선량으로 조사시켜가면서 중간 중간 데이터를 오프라인으로 취득하는 방식으로 방사선영향평가를 수행하였다. CCD 카메라를 평가하기 위해서



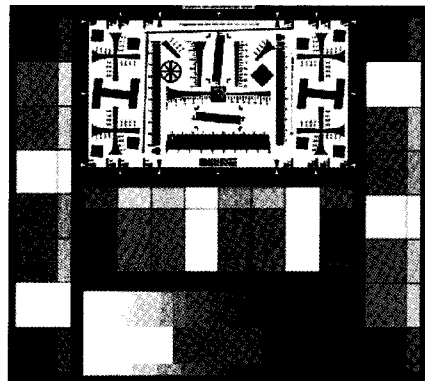
**Fig. 15. Vibration amplitude vs the frequency of the accelerometer at different total doses**

Fig. 16(a)과 같은 테스트베드를 제작하였다. 이는 항상 일정한 빛의 양(색온도 일정)을 받는 평가판 (Fig. 16(b))을 CCD 카메라로 촬영하는 방식을 취할 수 있도록 하는 장치이다. CCD 카메라로 평가판 촬영시 위 덮개가 있어 외부조명의 영향을 받지 않도록 하였다. CCD 카메라 영상 데이터 수집을 위해서 사용한 하드웨어 및 소프트웨어 사양은 아래와 같다.

- 영상보드: PXI-1411
- 용도: Color and Monochrome
- 입력 채널: 1 ea
- 공간분해능: 640×480 NTSC, 768×576 PAL
- Pixel Depth: 8 bit
- 표준입력: NTSC, PAL, S-Video, RS-170, CCIR



(a) the testbed



(b) the color and resolution chart

**Fig. 16. A testbed for an off-line evaluation of the CCD camera**

- 메모리: 16 MB
- Programmable functions: Partial image acquisition, gain, reference, offset, HSL conversion
- 데이터수집하드웨어: PXI-8196
- 소프트웨어: NI-Max

CCD 카메라의 경우 알려진 바에 의하면 손상분기점이 100 Gy 정도이다. 실험결과 Fig. 17에 의하면 100 Gy보다는 좀 더 높은 손상분기점을 보여주고 있다. 평가판이 불룩하게 보이는 것은 소형 CCD 렌즈와 피사체의 거리가 짧을 경우 광각제열의 렌즈특성 때문이다. 조사량에 따라 촬영된 평가판을 보면 183 Gy까지는 아무런 영향도 받지 않다가 233 Gy에서 모든 촬상소자가 파손되었음을 알 수 있다. 좀 더 정량적인 방법으로 방사선 영향평가를

를 하기 위해 조사량에 따른 광도(luminosity)결과를 Fig. 18와 같이 살펴보았다. 0 Gy부터 손상되기 전까지 광도 히스토그램이 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 이와 같은 방식으로 RGB 값의 변화도 살펴봐왔으나 파손직전까지 히스토그램의 큰 변화가 없음을 알 수 있었다. ACPF 내에서 In-situ 영상 이상감시용으로 사용할 카메라의 손상분기점은 다른 센서류에 비해 매우 낮은 값이다. 결국 CCD 카메라의 주기적인 교체가 필요하지만, CCD 카메라의 가격이 비교적 저렴하므로 주기적 교체는 타당성이 있는 유지보수 방안이라고 할 수 있다.

#### IV. 결론

ACPF 내에서 사용되는 부품 중 우선순위가 높은 AC 서보모터, 포텐쇼미터, 열전대, 가속도계 그리고

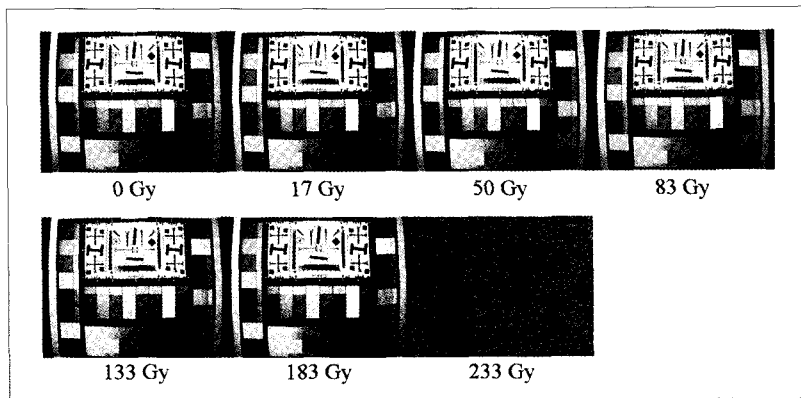


Fig. 17. A change of the color of the CCD camera at different total doses

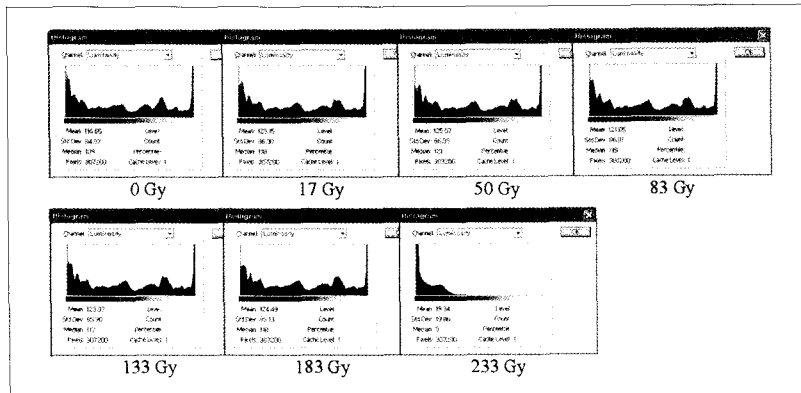


Fig. 18. A change of the luminosity of the CCD camera at different total doses

CCD 카메라에 대한 감마 방사선 영향평가를 수행하였다. AC 서보모터의 경우 누적조사선량이  $1.6 \times 10^7$  Gy 까지 아무런 특성변화가 발생하지 않았고, 포텐쇼미터의 경우  $1.8 \times 10^7$  Gy까지 거의 특성변화가 없었으며, 열전대의 경우  $9.5 \times 10^6$  Gy에서 정상상태 특성변화가 1.6% 발생하였다. 가속도계의 경우  $2.0 \times 10^6$  Gy 이상에서 특성변화가 크게 관찰되었으며, CCD 카메라의 경우 196 Gy를 기점으로 촬상소자가 완전히 파손되었다. 결과로부터 아날로그 디바이스들은 방사선의 영향에 매우 강인하다는 것을 알 수 있고, CCD 카메라와 같은 전자소자는 매우 취약하다는 것을 알 수 있다. ACPF에서 사용되는 주요 부품들의 방사선 영향평가 데이터를 구축함으로써 신뢰성을 확보하였고, 손상분기점 및 특성변화자료를 활용하여 ACP 주요부품의 정확한 유지보수 시점을 알 수 있을 뿐만 아니라 향후 스케일업(scale-up) 핫셀 구축시 부품선택의 근거 자료로 사용될 수 있을 것이다.

**후 기**

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력중장기 연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

**참고문헌**

[1] G. You, et al., "Development of hot cell facilities for demonstration of ACP," Proc. of the 4th Korea-China Joint Workshop on Nuclear Waste Management, pp. 191-204(2003).

[2] J. S. Yoon, B. S. Park and H. J. Lee, "Analysis of Remote Operation in KAERI's Advanced Spent Fuel Conditioning Process(ACP)," Transactions of the American Nuclear Society, 95, pp. 201-202(2006).

[3] L. P. Houssay, "Robotics and radiation

hardening in the nuclear industry," Master's thesis, University of Florida, (2000).

[4] K. U. Vandergriff, "Designing equipment for use in gamma environments," ONRL/TM-11175(1990).

[5] J. L. Bostock and F. R. Sias, "Radiation hardening for terrestrial robots," Topical report(1994).

[6] 송태길 외, "사용후핵연료 차세대관리공정 장치의 내방사선 요건 분석 II," KAERI/TR-2533/2003, 한국원자력연구소, 과학기술부 (2003).