

'99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

CCTV 카메라의 내방사선 특성개선 연구

Study on the Improvement of Radiation Characteristics for CCTV Cameras

최 영 수, 이 용 범
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

변 의 교, 유 승 욱
삼창기업 부설연구소
경기도 안양시 동안구 관양동 889-3

요 약

고방사선 환경에 사용될 내방사선 CCTV 카메라 시스템을 개발하기 위해 먼저 카메라 부품 및 상용 CCTV 카메라에 대한 방사선 특성평가를 수행하였다. 방사선 조사실험을 통해 CCTV 카메라에 대한 방사선 열화의 주요 원인을 분석하고 내방사화 방법들을 제시하였다. 그리고, 내방사선 특성평가를 토대로 CCTV 카메라의 전자부품은 방사선 강건소자로 대체하고 전자회로를 원격 화합으로써 $10^6 \sim 10^8$ rad 의 방사선 누적선량에 견딜수 있는 내방사선 카메라를 설계하였다.

ABSTRACT

To develop radiation tolerant CCTV cameras, radiation tests on commercial CCTV cameras and camera components have been carried out. The cause of radiation damage for CCTV camera was analyzed and a method was proposed to improve radiation hardness of

CCTV cameras. The method of improving radiation hardness is as follows : general camera components are replaced by radiation hardened components and almost of camera electronics are placed remote site where is radiation safe. By using this method, we design a radiation tolerant camera that has a tolerance of $10^6 \sim 10^8$ rad total dose..

1. 서 론

원자력발전소, RI 시설, 사용후 핵연료 처리시설, 의료용 방사선 취급시설 등 방사선 관련 작업은 사람의 접근이 제한되는 구역으로 이들 시설에서의 각종 작업은 작업자의 방사선 피폭을 고려하여 원격관측 및 원격작업의 형태로 이루어진다. 원격관측 및 원격작업은 주로 시각정보에 의존하게 되며 시각정보원으로는 일반적으로 카메라와 모니터로 구성되는 CCTV 시스템이 이용되고 있다[1]. 그러나 일반 산업용 CCTV 카메라는 방사선에 취약하여 특정 방사선량 이상의 방사선이 조사될 경우 열화되어 영상관측이 불가능하게 된다. 따라서 고방사선 환경의 원격관측 및 감시를 위해서는 방사선에 열화되지 않고 깨끗한 영상을 관측할 수 있는 내방사선 카메라의 사용이 필수적이다. 그러나 전용 내방사선 카메라는 고가이기 때문에 활용에 제한을 받고 있다.

본 논문에서는 고방사선 구역의 시설 및 작업을 원격으로 모니터링하여 안전성 및 신뢰성을 확보하기 위한 상용 CCTV 카메라의 방사선 특성을 개선한 저가의 내방사선 카메라 개발에 대하여 기술하였다. 먼저, 일반적으로 많이 사용되는 CCTV 카메라와 카메라 전자부품의 방사선 특성을 살펴보고 방사선에 의한 열화 원인을 분석하였다. 그리고 $10^6 \sim 10^8$ rad 정도의 누적선량에 견딜수 있는 내방사선 카메라의 요건 및 설계기술을 제시하였다. 상용 CCTV 카메라의 내방사화에는 카메라 및 전자부품의 방사선 조사실험에서 얻은 결과를 토대로 강건소자의 사용과 전자회로의 원격화를 바탕으로 하고 있으며, 현재 $10^5 \sim 10^6$ rad급 내방사선 카메라가 설계완료 되었다. 방사선 조사실험을 통해, 상용 CCTV로 사용되는 CCD센서 카메라는 10^4 rad 정도의 방사선 누적선량 한계치를 가짐을 확인하였다[2][3].

본 논문에서 개발중인 저가의 내방사선 CCTV 카메라 시스템은 원자력 산업분야, 의료분야, 우주항공 분야 등 인간의 접근이 어려운 고방사선 구역의 감시 및 관측을 위해 유용하게 사용되어질 것이다. 특히, 원자력 산업 분야에서는 원자로 육안검사, 핵연료 ID 검사, 사용후 핵연료 검사 등 적용분야가 많아 본 연구의 활용이 기대된다.

2. 카메라의 방사선 영향

CCTV 카메라는 인간의 시각을 대신하여 원거리의 관찰, 인체의 접근이 불가능한 환경하의 관찰 및 다수인에 의한 동시관찰을 수행할 수 있게 해준다. CCTV 시스템은 공업용, 교육용, 의료용, 가정용 등에 감시 및 관측용으로 광범위하게 사용되고 있으며, 특히 원전과 같은 방사선 작업환경은 사람의 접근이 제한되는 구역으로 CCTV 시스템에 의한 원격관측 및 원격작업이 필수적이다. 일반 산업용 CCTV 카메라는 관측 대상의 영상을 획득하기 위한 영상센서로 CCD를 사용하고 실리콘 계통의 반도체 IC로 회로를 구성하고 있다. CCD 카메라는 소형, 경량, 저소비전력의 장점을 가지지만 방사선에 취약한 특성을 가지고 있어 방사선환경에서는 열화에 의해 관측대상의 영상을 선명하게 관측할 수 없게 된다. 본 논문에서는 일반 산업용으로 많이 사용되는 CCTV 카메라의 부품 구성 및 방사선에 의한 영향을 분석하고 문제점 및 개선책을 제시하였다.

2.1 카메라 부품의 방사선 영향

물질이나 전자부품에 입사한 방사선은 그 종류나 에너지 범위 등에 따라 여러 형태의 상호작용을 일으키게 되고 하전입자나 고속중성자에 의한 displacement effect와 광자나 저에너지 전자선에 의한 이온화효과에 의한 방사선 피폭의 영향이 나타나게 된다. 본 연구에서는 원자로 주위에서 작동하는 카메라 구성 전자부품의 내방사선을 평가하고자 하므로 원자로의 핵분열물질로부터 많이 발생하는 감마선에 대한 특성을 조사하였다. 감마선은 전자기파의 일종으로서 광전효과, 콤프턴산란, 쌍생성에 의하여 물질과 상호작용을 일으키게 되고 낮은 에너지의 감마선은 주로 광전효과, 높은 에너지 영역의 감마선은 쌍생성에 의한 영향이 주 기전이 된다. 방사선에 의한 이온화 효과는 주로 입사한 방사선에 의하여 생성되는 전자와 정공 쌍들에 의하여 전자부품이나 시스템의 전기적 요소들의 값을 변화하므로써 생성된다. 주된 변화로는 charge carrier의 증가로 인한 전기전도도의 증가, 절연체내의 포획된 전자의 생성으로 인한 전기장의 형성 및 화학적인 변화 등이 있다[4][5].

카메라의 구성은 크게 렌즈, 영상센서, 카메라 구동회로로 되어있는데 렌즈는 영상센서의 표면에 빛을 모아주고 영상센서는 빛을 전기적인 신호로 바꾸어준다. 그리고 카메라 구동회로는 영

상센서에서 나오는 미약한 전기 신호를 증폭하고 일정한 형태의 신호로 변환한다. 카메라를 구성하고 있는 부품중 방사선에 취약한 것은 주로 전자부품들이며 방사선의 영향에 의해 카메라의 동작이 불가능한 경우도 발생한다. 표 1은 카메라를 구성하는 전자부품의 방사선에 의한 영향을 나타내고 있다. 저항이나 커패시터등의 수동소자는 10^8 rad 이상의 방사선량까지 기능을 상실하지 않고 동작한다. 반면 CCD의 경우 $10^4 \sim 10^5$ rad의 방사선이 누적될 경우 동작이 불가능하고 CMOS의 경우 10^4 rad 이상의 방사선이 누적될 경우 부품의 손상에 의해 기능을 상실하게 된다.

표 1 카메라부품의 방사선 영향

부품 종류	방사선 허용선량	특성 파라미터	비고
저항	10^8 rad 이상	저항	
커패시터	10^{10} rad (세라믹) 10^9 rad (마이카) $10^7 \sim 10^8$ rad(폴리에스터)	정전용량, 항복전압, 유전체 손실, 누설전류	
인덕터	$10^4 \sim 10^{10}$ rad	인덕턴스	former 와 enamel 물질에 따라 방사선 허용선량이 달라짐
다이오우드	10^8 rad 이상	항복전압, 누설전류, 순방향 전압 강하	
쌍극성 트랜지스터	$10^4 \sim 10^9$ rad 이상	이득, 누설전류, 항복전압, 포화전압	중성자가 감마선보다 100 ~ 1000배 더 손상을 가함 pnp가 npn 보다 방사선에 강건
MOSFET	$10^4 \sim 10^6$ rad	문턱전압, 항복전압, 이득, 누설전류	
CCD	$10^4 \sim 10^5$ rad	전하 전송 효율, 암전류, 플랫밴드 전압	
OP AMP	$10^5 \sim 10^8$ rad	개방 루프 이득, 입력 오프셋전압, 입력전류, 전원전류	
Voltage regulator	$10^5 \sim 10^8$ rad	출력전압, 전류용량 정적전류	
CMOS	$10^4 \sim 10^4$ rad	문턱전압, 모든 동작 파라 미터	10^7 rad (내방사선 부품)
커넥터	10^5 rad 이상	접촉저항, 터미널간 절연	
Transformer	10^8 rad 이상	변압비, 절연	

반도체 부품은 온도, 전압, 전자기파 등의 외부요인에 의해 동작에 영향을 받기 쉬운 특성을 가지고 있으며, 특히 방사선에 의해 심각한 손상을 입게 된다. CMOS형의 IC는 방사선에 가장 쉽

계 영향을 받는 부품중 하나로 구조적인 특성상 방사선에 의한 이온화로 전하의 흐름이 변화하여 동작점이 바뀔으로서 본래의 기능을 상실하게 된다. 트랜지스터는 부품의 종류에 따라 $10^4 \sim 10^9$ rad 의 방사선량에 의해 영향을 받게 된다. 그리고 영상센서의 경우에는 표 2와 같은 방사선 영향이 나타난다. CCD는 $10^4 \sim 3 \times 10^4$ rad 정도의 방사선이 누적되면 기능을 상실하게 되고 튜브방식의 영상센서는 2×10^8 rad 정도의 방사선 누적에 의해 기능을 상실하게 된다. CCD는 MOS형의 집적회로이고 MOSFET와 거의 같은 방사선 허용정도를 가지는데 방사선에 의해 잡음 레벨이 증가하고 전하 전송효율이 떨어짐으로써 어느정도 이상의 방사선이 조사되면 성능은 급속히 떨어지게 된다. 튜브방식의 영상센서는 CCD 영상소자에 비해 방사선에 강인한 특성을 지니므로 고방사선 환경의 원격관측 및 감시를 위해서는 튜브방식의 카메라를 사용하는 것이 효과적이다.

표 2 영상소자의 방사선 영향

Effect	SOLID STATE DEVICE			TUBE		
	CPD	MOS	CCD	VIDICON	NEWVICON	CHALNICON
Exposure Rate Effects						
(1) Out of order	1.9×10^4 R/hr	1.5×10^4 R/hr	10-1000 R/hr	3×10^5 R/hr	1×10^5 R/hr	1×10^5 R/hr
(2) Phenomenon	breakdown	whitening	snow noise			
(3) Breakdown	1.9×10^4 R/hr	1.6×10^4 R/hr	3.4×10^4 R/hr	3×10^5 R/hr	1×10^5 R/hr	1×10^5 R/hr
Exposure Effect						
(1) Out of order	4.5×10^5 R	6.0×10^5 R	6.0×10^5 R	2×10^8 R	2×10^8 R	2×10^8 R
(2) Breakdown	1.1×10^4 R	1.5×10^4 R	2.3×10^4 R	2×10^8 R	2×10^8 R	2×10^8 R

2.2 CCD의 방사선 조사실험

고방사선환경 원격관측 및 감시를 위한 시스템으로 일반 산업용 CCTV 카메라의 사용 가능성을 알아보기 위해 방사선 조사실험을 수행하였다. 실험에 이용된 방사선원은 40,000Ci의 Co-60 감마선원이며, 실험구성은 그림 1과 같이 방사선원에서 128cm 떨어진 거리에 카메라를 위치시키고 원격지에 모니터를 설치하여 카메라의 영상신호를 볼 수 있게 하였다. 카메라에 조사된 선량율은 2×10^4 rad/hr로 하였으며 카메라 신호 출력이 전혀 나오지 않을 때까지 방사선을 조사시켰다.

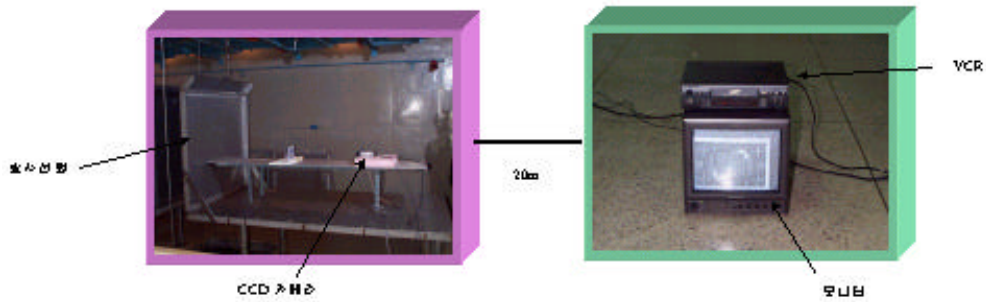
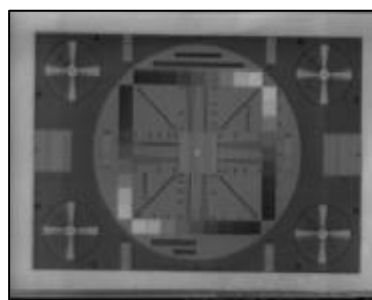


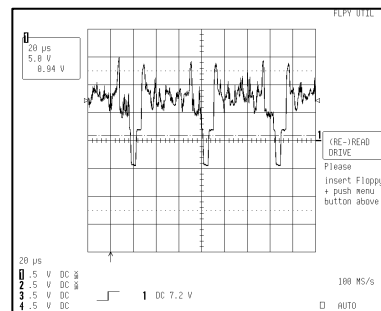
그림 1 방사선조사 실험 장면

방사선을 조사시키지 않았을 때의 카메라 출력 영상 및 신호는 그림 2와 같이 선명한 영상을 관측할 수 있었다. 방사선을 조사시킨 직후 그림 3과 같이 화면 전체에 걸쳐 흰 반점의 잡음이 나타나는 것을 발견하였다. 방사선량이 허용한계보다 높아 CCD가 손상을 입어 영상에 손실이 생겼다. 방사선량이 누적됨에 따라 화면전체에 흰 반점의 수가 많아지고 영상은 더욱 관측하기 힘든 상태로 되었다. 방사선량이 3×10^4 rad 가 되었을 때 그림 4와 같이 화면은 관측이 불가능할 정도가 되었고 잠시후 영상은 완전히 사라져 화면 전체가 검게 되었다.

CCD의 경우 10^3 rad/hr 이상의 방사선량으로 조사될 경우 방사선에 의한 snow 노이즈가 발생되고 $3 \sim 5 \times 10^4$ rad의 방사선이 누적되면 기능을 완전히 상실하게 된다. 그리고 카메라 구동 전자부품중 IC 부품이 손상을 입어 카메라 작동이 불가능하게 되었다.



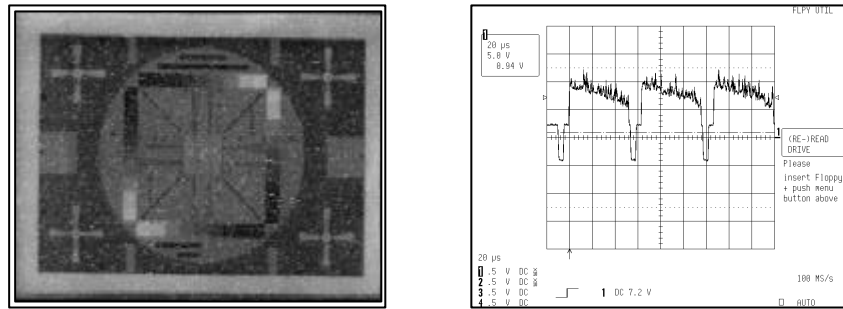
(a)



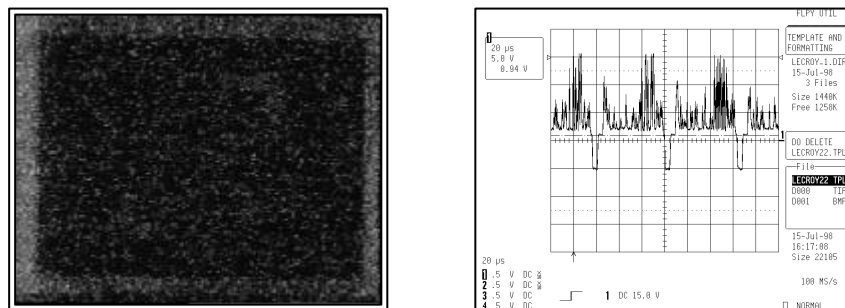
(b)

그림 2 방사선 조사전의 화면 및 출력파형

(a) 화면 (b) 출력파형



(a) (b)
 그림 3 방사선 조사직후의 화면 및 출력파형
 (a) 화면 (b) 출력파형



(a) (b)
 그림 4 3×10^4 rad 방사선조사후 화면 및 출력파형
 (a) 화면 (b) 출력파형

3 카메라의 방사선 내구성 개선

일반 산업용으로 주로 사용되는 CCD 카메라는 소형, 경량, 저소비전력, 그리고 고신뢰성의 장점을 지니고 있지만 방사선에 아주 취약한 특성을 나타내므로 고방사선 환경의 감시, 관측용 카메라로서는 부적합하다. CCD의 경우 10^3 rad/hr 이상의 선량을에서 snow 현상이 나타나고 $10^4 \sim 10^5$ rad 의 방사선 조사에 의해 카메라의 기능을 완전히 상실하게 된다. 반면 튜브방식의 영상센서는 크기 및 무게 등이 CCD에 비해 크지만 2×10^8 rad의 방사선량까지 사용 가능하여 방사선에 대한 내구성이 우수하여 고방사선환경의 감시, 관측용 카메라의 영상센서로 적합하다[6].

본 논문에서는 고방사선 환경의 원격 관측 및 감시를 위해 방사선에 대한 내구성이 우수한 튜브방식의 영상센서를 이용하여 카메라 시스템을 구성하였다. 그리고 튜브 방식의 카메라를 방사선에 조사시켜 성능을 평가하고 개선책을 제시하였다.

3.1 방사선 강건소자 사용

비디콘, 뉴비콘 등의 튜브방식 영상센서는 CCD에 비해 방사선 내구성이 우수한 영상센서로 2×10^8 rad의 방사선 허용선량을 지닌다. 튜브방식 카메라 시스템의 구성은 그림 5와 같이 영상획득부, 영상증폭부, 동기신호발생부, 편향회로부, 전원부로 되어 있다. 카메라를 구동시키기 위한 회로는 전자부품들로 구성되어 있으며 부품의 특성에 따라 방사선에 의한 영향도 크게 달라진다. 이들 부품중 저항, 커패시터 등의 수동소자는 방사선에 강한 특성을 가지고 있으며 TR, IC등의 능동소자는 방사선에 약한 특성을 가진다. 특히 MOS형 IC는 방사선에 매우 취약한 특성을 지니므로 이러한 부품들은 다른 부품으로 대체하거나 회로변경을 통해 방사선 내구성을 개선하여야 한다. 본 논문에서는 비디콘 튜브를 영상센서로 사용하여 고방사선 환경을 원격관측할 수 있는 카메라 시스템을 구성하고 방사선 영향평가를 수행하여 보다 고준위의 방사선 환경에서 사용할 수 있는 시스템 개발에 관한 연구를 수행하였다.

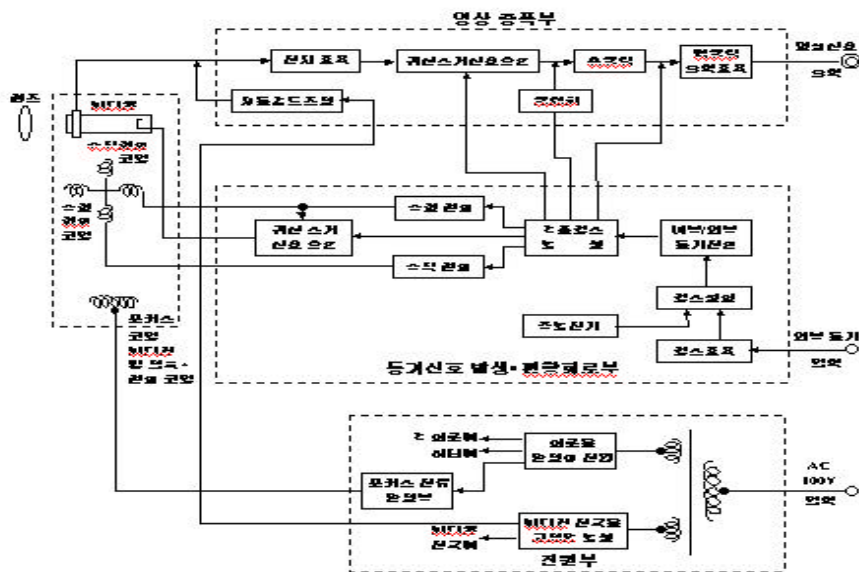


그림 5 튜브방식의 카메라 회로 구성도

그림 6은 비디콘 영상센서를 이용한 카메라 시스템의 방사선 조사실험 장면을 보여주고 있다. 실험에 이용된 방사선원은 40,000Ci의 Co-60 감마선원이며 카메라 영상센서 및 구동회로를 방사선에 조사시키면서 원격으로 관측할 수 있도록 하였다. 카메라에 조사된 선량은 2×10^4 rad/hr로 하였으며 카메라 영상이 전혀 나오지 않을때까지 방사선을 조사시켰다.

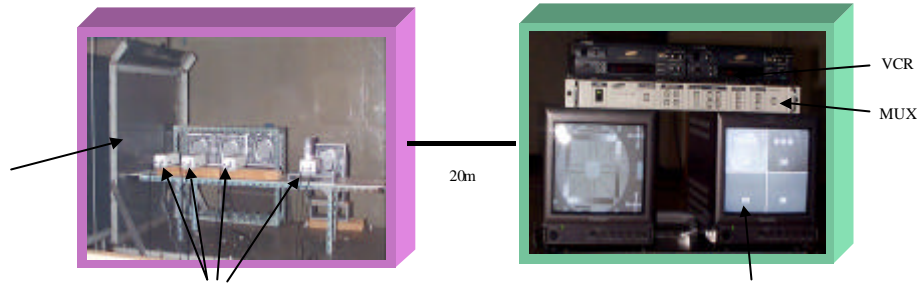
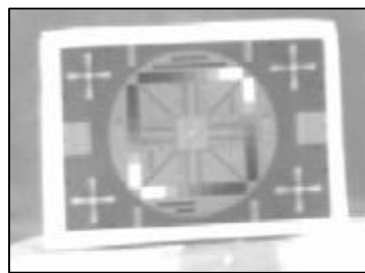
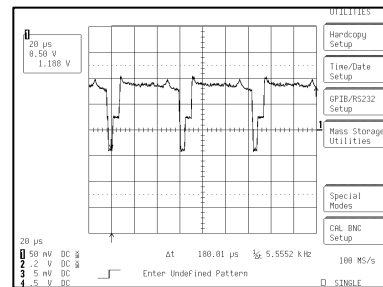


그림 6 방사선 조사실험 장면

그림 7은 방사선 조사전의 카메라 영상 및 출력파형이고 그림 8은 방사선 조사직후의 카메라 영상 및 출력파형이다. CCD 카메라와는 달리 선량율에 의한 snow 노이즈가 발생하지 않았고 선명한 영상을 관측할 수 있었다. 그림 9는 10^5 rad 의 방사선이 조사된 후의 영상 및 출력파형으로 화면의 전체적인 밝기가 어두워졌으나 비교적 선명한 영상을 관측할 수 있었다. 방사선의 조사가 계속 진행되자 갑자기 영상이 떨리면서 화면이 전혀 나오지 않게 되었다.



(a)



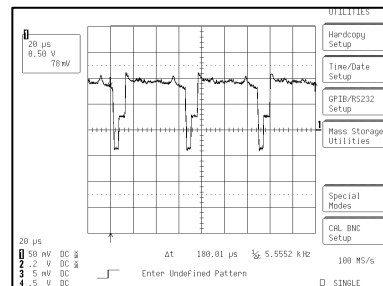
(b)

그림 7 방사선 조사전의 화면 및 출력파형

(a) 영상 (b) 출력파형



(a)



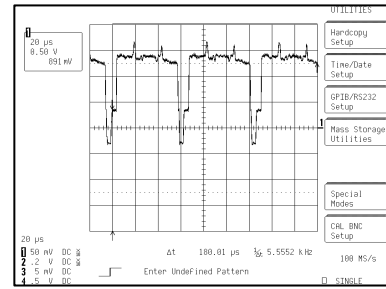
(b)

그림 8 방사선 조사직후의 화면 및 출력파형

(a) 영상 (b) 출력파형



(a)



(b)

그림 9 10^5 rad 방사선 조사후의 화면 및 출력파형
(a) 영상 (b) 출력파형

방사선에 조사된 카메라를 분석해 본 결과 비디콘은 방사선에 의해 손상을 입지 않았고 카메라를 구동하는 전자부품의 손상에 의해 카메라가 동작하지 않은 것으로 밝혀졌다. 카메라를 구동하는 전자부품중 가장 먼저 손상을 입은 것은 수평/수직 동기 발생을 위한 IC 이고 이 부품의 손상으로 인해 카메라 동작 자체가 불가능하게 되었다. 그리고 카메라 구동회로를 구성하는 다른 IC들도 방사선에 비교적 약한 특성을 나타내었고 $2 \times 10^5 \sim 10^6$ rad의 방사선 누적에 의해 정상적인 기능을 상실하게 되었다. 본 실험을 통해 활상관 방식의 카메라가 CCD 카메라에 비해 방사선에 강한 특성을 가짐을 알 수 있었고, 카메라 구동회로의 구성부품인 CMOS 타입의 IC가 방사선에 취약함을 알 수 있었다. 따라서 고방사선 환경의 원격관측 및 감시를 위한 카메라 시스템은 활상관을 영상센서로 사용하고, 카메라 구동회로 부품중 방사선에 약한 IC는 방사선에 강한 부품으로 회로를 재구성하여 방사선 내구성을 높이도록 하였다.

3.2 원격화에 의한 방사선 내구성 개선

방사선에 강한 부품인 튜브방식의 영상센서를 이용하여 카메라를 구성할 때 방사선에 의해 문제가 되는 부분은 카메라 구동 회로를 구성하는 반도체 부품들이다. 카메라를 구성하는 부품중 하나라도 이상이 생기면 전체적인 성능에 영향을 미치므로 IC와 같이 방사선에 약한 부품들은 내방사선 부품을 사용하거나 방사선의 영향이 없는 곳에 위치시켜야 한다. 그러나 내방사선 전자부품은 가격이 비싸고 제한된 부품만 상용화되어 사용에 제약이 따른다. 본 논문에서는 일반 전자부품을 사용하여 방사선 내구성을 개선시키기 위한 방법으로 전자회로의 원격화 방안을 제시하였다. 원격화에 의한 방사선 내구성 개선 방안은 영상획득에 필수적인 부품들만 카메라 헤드에 장착시키고 그외의 부품들은 방사선의 영향이 미치지 않는 원격지에 배치하여 방사선에 대한 내구

성을 개선하는 것이다. 그림 10은 카메라의 방사선 특성을 개선하기 위한 전자회로의 원격화 개념도이다. 영상획득에 필요한 렌즈 및 영상센서, 그리고 전치증폭기는 카메라 헤드에 장착시키고 영상증폭부, 동기발생부, 고압발생부는 방사선의 영향이 없는 원격제어부에 위치시킨다. 카메라 헤드에 장착된 부품은 방사선의 영향을 고려하여 설계하고 원격제어부는 일반 부품을 사용함으로써 비용의 절약 및 내방사화가 용이하다. 그림 11은 원격관측을 위한 내방사선 카메라 시스템의 구성도를 나타내고 있다. 관측대상의 조명 및 관측방향을 원격지에서 제어할 수 있도록 조명, 팬/틸트를 이용한 시스템을 구성하고 카메라에서 획득된 영상을 모니터로 관측할 수 있도록 하였다.

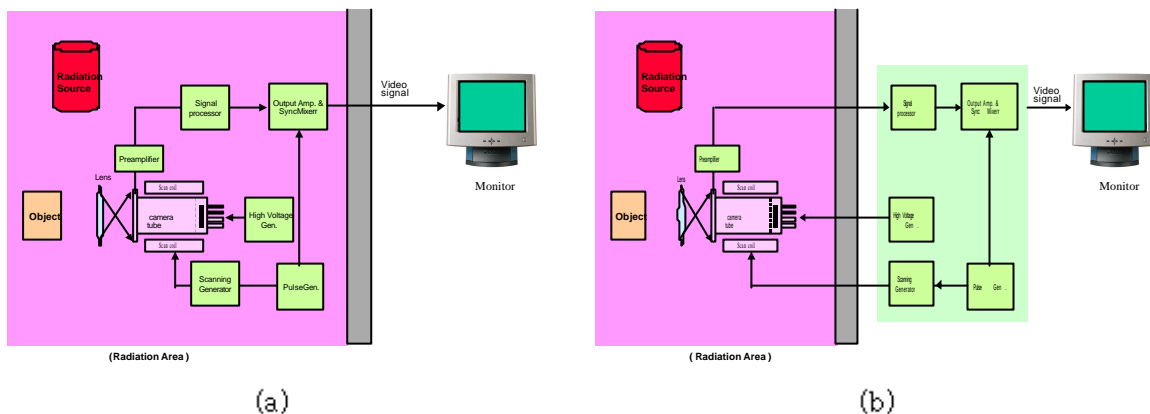


그림 10 일반 CCTV 카메라 및 구동회로 원격화 제안방법
 (a) 일반 CCTV 카메라 (b) 카메라 구동회로의 원격화 제안방법

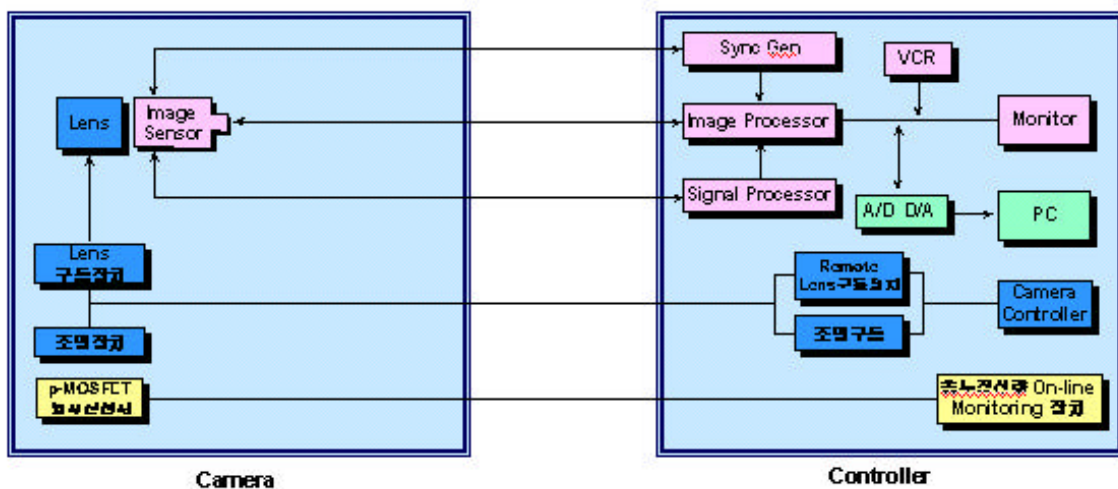


그림 11 내방사선카메라 시스템 구성도

4. 결 론

고방사선 환경은 사람의 접근이 제한되는 구역으로 카메라에 의한 원격관측 및 원격작업이 필수적이다. 일반적인 CCTV 카메라는 방사선에 취약하여 고방사선 환경의 감시 및 관측에는 사용이 어려우며 현재 시판되는 전용 내방사선 카메라는 고가이다. 따라서, 본 논문에서는 상용 CCTV 카메라의 방사선 특성평가와 내방사화 연구를 토대로 저가의 내방사선 카메라를 개발하기 위한 연구를 수행하였다. 상용 CCTV 카메라의 내방사화는 방사선 조사실험에서 얻어진 방사선 강건소자의 사용과 전자회로의 원격화를 통해 구현하였다. 본 논문에서 제시한 내방사화에 의해 누적선량 $10^5 \sim 10^6$ rad에서 양호한 화질을 얻을 수 있는 내방사선 카메라를 설계하였다. 상용 CCTV 카메라로 사용되는 CCD센서 카메라는 10^4 rad 정도 까지의 방사선 누적선량에서 사용 가능하다. 향후에는 $10^6 \sim 10^8$ rad 급 내방사선 카메라를 개발할 예정이다.

본 논문에서 제안한 고방사선 환경 원격관측용 카메라는 원자로의 육안검사, 사용후 핵연료 검사장치등 다양한 적용분야를 가지고 있어 앞으로의 활용에 많이 기여할 것이다.

참고문헌

1. 원송희 편저, "CCTV 시스템 설계의 기법," 도서출판 세화, 1996
2. 김영해 편저, "센서인터페이싱," 기전연구소, 1987
3. D.F.Barbe, "Charge-Coupled Devices," Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1980
4. Richard Sharp, "Radiation Effects on Electrical and Electronic Equipment," bnes, 1994
5. Henning Lind Olesen, "Radiation Effects on Electronic System," Plenum press, 1966
6. Bernard Grob, " Basic Television and Video Systems," McGraw-Hill Book Company, 1975