

방사선 환경에 강인한 CMOS카메라에 관한 연구

백동현*, 김배훈**

A Study on the CMOS Camera robust to radiation environments

Dong-Hyun Baek*, Bae-Hoon Kim**

요약 방사선원을 이용하는 곳에는 사람의 접근이 제한되나 관측장비는 노출됨으로 방사선에 강하여야 한다. 이에따라 카메라차폐 구조설계에 필요한 물질로 비중과 용융점이 가장 높은 텅스텐과 가장 낮은 납을 선정하여 코발트 60 방사선 소스에 대한 선량을 1/8까지 감소시킬 경우 Tu는 체적 432.6cm³, 두께 2.4cm이었고, Pb는 체적 961cm³, 두께 3.6cm이었다. 이를 적용하여 CMOS Image센서를 적용한 카메라모듈 및 내방사선 차폐구조의 하우징과 방사선에 강한 CMOS카메라를 제작하였다. 최적화된 차폐두께의 선정을 위한 실험에서 생존한 헤드분리형2M AHD형 카메라(①번)를 적용한 결과 카메라 및 아답터등 연관설비에 대한 차폐가 이루어지면 1.88×106rad 이상의 선량에서도 잘 동작함을 확인하였다. 따라서 고방사선에 적용할 수 있는 카메라 기술력확보와 사업성을 기대할 수 있다.

Abstract Human access is restricted to environment where radiation sources are used, however observation equipment should be radiation-resistant as it is exposed. Therefore, if tungsten with the highest specific gravity and melting point and the lowest lead were selected to reduce the dose to the Cobalt 60 radiation source to 1/8, Tu had a volume of 432.6cm³, a thickness of 2.4cm, and Pb had a volume of 961cm³, a thickness of 3.6cm. By applying this method, produced a radiation resistant CMOS camera with a camera module using a CMOS Image sensor and a radiation shielding structured housing. As a result of applying the head detachable 2M AHD camera (No. ①) that survived the experiment to select the optimal shielding thickness, when shielding the associated equipment such as cameras, adapters, etc. is achieved, it was confirmed that the design of the structure is appropriate by operating well at doses higher than 1.88×106rad. Therefore, it is expected to secure the camera technology and business feasibility that can be applied to high radiation environments

Key Words : Material specific, Camera head, CMOS camera, Radiation-Proof Video Camera,

1. 서론

방사선은 조사선량에 따라 적색골수손상에서부터 중추계 신경손상으로 진전됨은 말할 것도 없이 특정조직이나 기관이 일정 잠복기를 거쳐 영구불임이나 방사선 폐렴사까지 일으킨다고 한다.¹⁾ 따라서 국제방사선위원회(ICRP)는 음식물, 화장품, 장식품등에 방사성물질을 첨가하지 않도록 권

고하고 있으며 유럽연합(EU)은 금지하고 있다. 그러므로 방사선을 관리하는 사람들이나 이를 사용할 수 밖에 없는 기구들에 대해서는 방사선 피폭을 최소화할 수 있어야 한다. 이에 CCD카메라는 원자력발전소, 해체로봇, 방사능 폐기물장등에서의 원전 감시점검용 이동로봇, 증기발생기 유지보수 로봇, 핵연료 교체장비등 각종 원격조작 및 작

* Department of Fire&Disaster Protection Engineering, Gachon University.

** President, Youngkook Electronics Co.,LTD

Received December 16, 2019

Revised February 01, 2020

Accepted February 02, 2020

업시스템의 시각 장치로 활용되고 있으며 의료용 방사선시설인 X선 촬영시설, 감마치료시설 등의 학문분야에서는 그 용도가 매우 크다. 특히 원자로 내부와 같이 사람의 접근이 제한되는 고방사선 구역에서의 원격 관측 및 작업은 주로 시각정보에 의존하게 되는데 이 때 부피가 작고 사용하기 편리한 CCD카메라가 주로 이용되고 있다. 그러나 방사선에 쉽게 열화되어 고방사선 환경에서의 감시와 관측 기능을 수행하기에 부적합하다.

따라서 방사선구역을 감시하기 위한 필수요소인 카메라는 방사선에 강한 성질을 가진 부품들로 설계 제작함은 물론 카메라센서로 촬상관의 CCD카메라, Tube카메라가 아닌 고체촬상 소자를 사용하여 $10^4 \sim 10^5 \text{rad}$ 이상의 방사선이 누적되어도 동작할 수 있는 내구성이 강한 부품들을 이용하여야 한다. 따라서 영상 습득부분인 카메라 본체의 영상센서에는 방사선에 가장 강한 CMOS를 사용하고 여기에서 획득한 신호증폭을 위한 초단 증폭기 등에는 내구성이 강한 소량의 소자들만으로 회로를 구성하여 수리 및 유지보수가 쉬운²⁾ 방사선환경에 강한 CMOS카메라에 대하여 논하고자 한다.

2. 화각 설계

그림 1은 피사체의 크기, 카메라와 피사체간의 거리설계에 필요한 화각(Field of view)으로 렌즈의 두께에 따라 식 (1)과 같이 한다. 이 때 θ 는 화각이며 B는 CMOS크기이고 f 는 주파수이다.

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{B_{max}}{2f} \right) \quad (1)$$

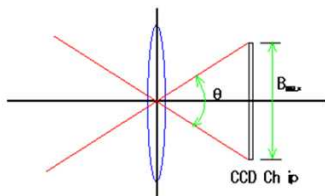


그림 1. 화각
Fig. 1. Field of view

3. 차폐 구조물 설계

차폐 구조물은 재질에 따라 그 특성이 다르므로 최적의 재질을 선정하기 위하여 2회의 실험을 통해 얻은 값으로 방사선에 대한 차폐 두께를 계산한 다음 카메라 하우징을 제작하였다.

3.1 재질별 비중

물질이나 전자부품에 입사한 방사선은 그 종류나 에너지 범위 등에 따라 여러 형태의 상호작용을 일으키며 광자나 저에너지 전자선에 의한 이온화효과에 따라 방사선 피폭의 영향이 나타나게 된다.

방사선에 의한 이온화효과는 주로 입사한 방사선에 의하여 생성되는 것으로 이온화식 화재연기 감지기의 적용과 같다.

그러나 방사선이 강하면 전자와 정공 쌍들에 의하여 전기 전도도의 증가, 절연체내의 전기장 또는 화학적변화로 전자 부품이나 시스템의 전기적 요소들에 대한 값을 변화시킨다. 표 1은 재질별 비중과 용융점이다.

표 1. 재질별 비중과 용융점

Table 1. Material specific gravity and melting temperature

Element name	specific gravity	melting point
Al	2.70	659
Cd	6.65	321
Au	19.32	1,063
Ag	10.49	962
Cr	7.19	1,800
Sn	7.30	232
W	19.30	3,500
Ta	16.60	2,850
Fe	7.87	1,530
Cu	8.96	1,083
Pb	11.36	327
Ni	8.90	1,452
Pt	21.45	1,750
Mg	1.74	649
Mn	7.43	1,260
Zn	7.13	419
Brassboard	8.73	910
Brasspole	8.50	880
St304	7.90	1,400
St316	7.95	1,400
Bronze	9.00	970

3.2 차폐두께 계산

방사선차폐를 위해서 CMOS렌즈를 감싸는 재료는 납, 텅스텐을 사용한 원기둥모양으로 하여 식(2)에 따라 두께를 계산한다.

$$S=2\pi \times r(r+h)$$

$$V=\pi \times r^2 \times h \quad (2)$$

r : 반지름 h: 길이
S: 면적 V: 체적

3.2.1 텅스텐 사용 시

- 체적 : $9.8 \times 3.14 \times (7.8/2)^2 - 5 \times 3.14 \times (3/2)^2 = 468.04 - 35.325 = 432.7 \text{cm}^3$
- 무게 : $432.7 \times 19.3 \text{g} = 8.3514 \text{kg}$
- $\therefore t(W)=\ln 2/u=0.693147/0.9592=0.722631 \rightarrow 0.8 \text{cm}$ (반가층)

u : 선형흡수계수 0.9592

반가층은 코발트 60의 방사선 소스에 대하여 선량 1/2 감소시킬 때 0.8cm이고 1/4 감소시킬 때 1.6cm이나 1/8까지 감소시킬 수 있는 2.4cm를 적용한다.

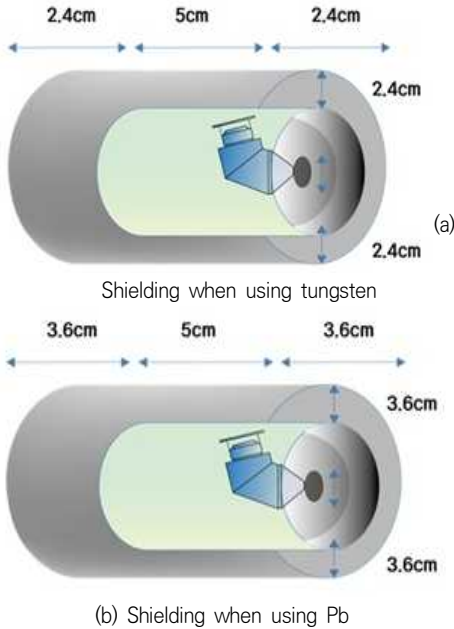


그림 2. 텅스텐과 납 사용시 차폐
Fig. 2. Shielding when using tungsten and lead

3.2.2 납 사용 시

- 체적: $12.2 \times 3.14 \times (10.2/2)^2 - 5 \times 3.14 \times (3/2)^2$

$$= 996 - 35 = 961 \text{cm}^3$$

- 무게 : $961 \times 11.36 \text{g} = 10.917 \text{kg}$

$\therefore t(\text{Pb})=\ln 2/u=0.693147/0.5894=1.176022 \rightarrow 1.2 \text{cm}$ (반가층)

u : 선형흡수계수 0.5894

반가층은 코발트 60의 방사선 소스에 대하여 선량 1/2 감소시킬 때 1.2cm이고 1/4 감소시킬 때 2.4cm이나 1/8까지 감소시킬 수 있는 3.6cm를 적용한다. 그림 2는 텅스텐과 납 사용시 차폐 두께이다.

4. 카메라모듈 설계

카메라모듈 설계시에는 모듈의 사양과 성능을 고려하여야 한다. 표 2는 카메라모듈 사양으로 다음의 성능을 갖도록 하여야 한다.

4.1 카메라모듈 사양

- (1) 최고 1080P 60fps의 Full HD 지원으로 우수한 비디오 성능이 제공되도록 하며 저조도 성능이 우수하여야 한다.
- (2) 외부 기계식 셔터를 지원하고 정확한 프레임 속도 제어가 가능하여야 한다.
- (3) 위치 기반의 색상 및 렌즈 음영 보정이 되어야 하며 스테레오/3D 카메라 기능을 지원할 수 있어야 한다.
- (4) 데이터 인터페이스는 4 라인 직렬 HiSPi (High-Speed Pixel Interface)이어야 하고 자동 블랙 레벨 교정이 이루어져야 하며 차동 신호(SLVS 및 HiVCM)를 병렬 전송할 수 있어야 한다.
- (5) 통계 엔진과 온도 센서를 내장하여야 하고 HDR(High dynamic range)을 지원할 수 있어야 한다.

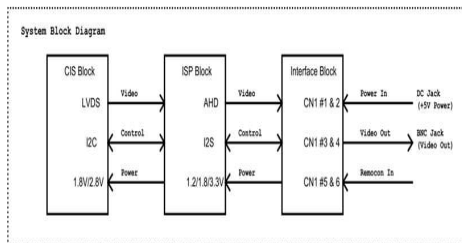
표 2는 카메라모듈 사양이다.

Table 2. Camera module specification

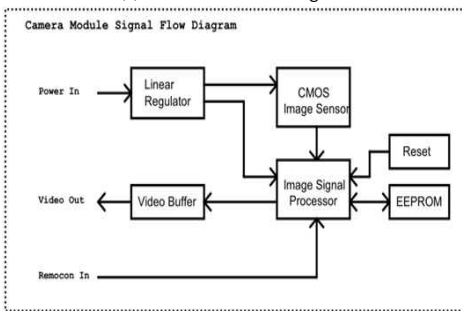
Classification	Specification
Optical type	1/2.7 inch
effective pixel	1928(H)x1088(V) :16:9 Screen
Shutter type	Electronic push shutter
Sensitivity	4.0V/lx/second
S/N ratio	40dB
Dynamic range	Max96dB
Power	300mW less than
operating temperature	-30°C to +85°C
Sensor Size	10x10 mm 80 pin

4.2 카메라 Block Diagram과 Camera Module Signal Flow Diagram

그림 3은 Camera Block Diagram과 카메라 모듈 Signal Flow Diagram이다. (a)는 카메라 Block Diagram으로 CIS Block, ISP Block, Interface Block으로 구성된다.



(a) Camera Block Diagram



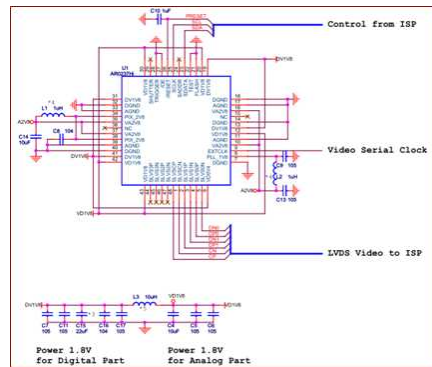
(b) Camera Module Signal Flow Diagram

그림 3. 카메라 블록도와 카메라모듈 신호흐름도
Fig. 3. Camera Block Diagram and Module Signal Flow chart

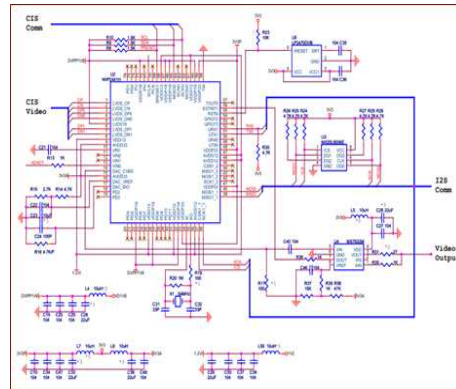
(b)는 카메라모듈 Signal Flow Diagram으로 전원이 Linear Regulator에 인가되면 이 전원은 CMOS 영상센서와 영상신호프로세서에 인가된다. 그러면 영상신호 프로세서와 EEPROM의 상호작용으로 Video 버퍼를 통해 신호가 출력되며 원격으로도 제어가능하다.

4.3 Circuit Diagram

그림 4의 (a)는 영상을 처리하기 위한 CMOS Image Sensor 회로도이다.



(a) CMOS Image Sensor circuit



(b) Signal Processing circuit

그림 4. CMOS Image Sensor 회로도 and 신호처리 회로도
Fig. 4. CMOS Image Sensor circuit and Signal Processing circuit

그림 4의 (a)는 CMOS Image Sensor 회로도이며 (b)는 신호전달을 위한 Signal Processing 회로도이다.

4.4 Power & Interface circuit

그림 5는 전원공급과 인터페이스를 위한 회로도이다.

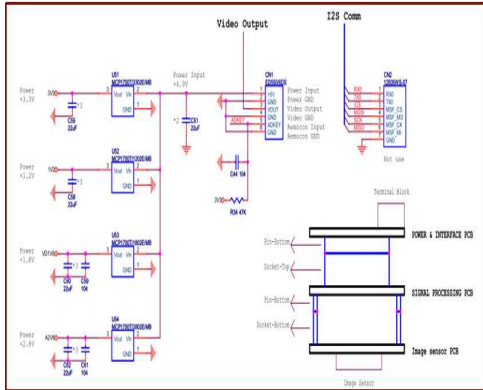


그림 5. 전원과 인터페이스 회로도
Figure 5. Power & Interface circuit

4.5 비디오신호출력

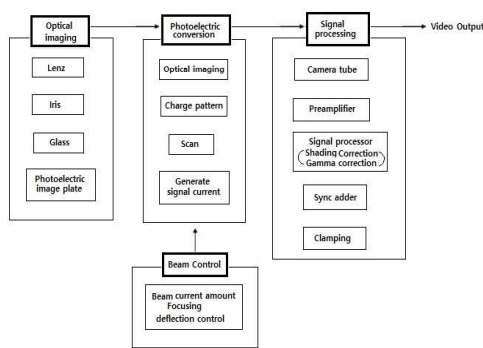


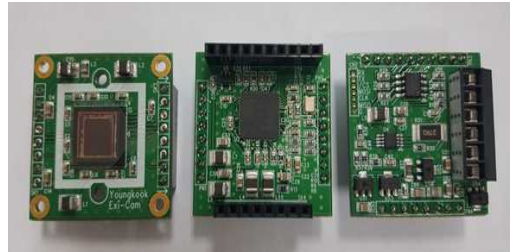
그림 6. 비디오 신호출력 블럭도
Fig. 6. Video Signal output block

비디오신호는 그림 6과 같이 광영상부분의 렌즈, Iris, Glass, Photoelectric Image plate, 광전변환부분의 광영상, 전하패턴, 스캔, 신호전류생성부분과 이에 빔전류량, 포커싱, 편향제어등의 빔제어 신호를 보내는 부분, 카메라튜브, 예비증폭기, 신호처리기, 동기부, Clamping등으로 조합된 신호처리부등으로 구성된다.

5. 실험 및 고찰

그림 7의 (a)는 Image sensor와 Signal process

ing이며 (b)는 Power & Interface 실제이다.



(a) Image sensor and Signal processing



(b) Power & Interface PCBs

그림 7. 이미지센서 신호처리부와 전원부 PCBs
Fig. 7. Image sensor, Signal processing and Power & Interface PCBs



(a) Prototype

(b) experimental appearance

그림 8. 시제품과 실험모습
Fig. 8. Starting item & experimental appearance

그림 8의 (a)는 CMOS카메라 시제품이며 (b)는 실험 모습이다. 방사선에 강인한 CMOS카메라의 화질을 평가하기 위해 카메라 형태, 화소수, 모듈 형태별 6개모델을 선정하여 각 센서의 종류 및 구성에 대한 방사선 조사실험을 실시한 후 조사량을 확인하고 카메라의 이상유무를 확인하였다.

그림 9는 조사선량을 확인하기 위해 시약을 부착한 상자이다. 총 조사선량은 각 카메라에 선량 측정용 시약을 부착한 다음 방사선 조사후 전체 시간동안 시약에 누적된 선량이며 선량율은 방사

선 조사선량을 시간당량으로 계산한 것이다.



그림 9. 방사선 검사 시약
Fig. 9. Reagents for checking irradiation

전체 24시간 방사선 조사 중 52분동안 시험이 중단되었으나 시험 시작시간 26일 16시54분~종료시간 27일 17시46분으로 전체 시험시간 중 카메라 신호가 종료된 시점의 시간을 신호종료시간으로 하였다.

생존시간은 전체 24시간 중 카메라별 생존한 시간을 말하며 허용누적선량은 선량을(Gy/h)과 생존시간의 곱이다.

1번 카메라(헤드분리형 2M AHD)는 2시간 조사 후에도 생존하였으며 저준위실험에서 24시간 조사한 선량과 고준위 실험에서 1시간 조사한 선량이 동일하여, 1차 실험때와 다른 2배의 방사선을 조사한 효과가 나타났다.

표 3에서 1번의 헤드분리형 2M AHD 카메라와 6번 카메라(41만 화소CVBS)가 24시간 방사선을 조사한 후에도 생존하였으나 1번 카메라는 가장 많은 1,552Gy의 방사선량을 조사 한 후에도 생존하였다.

그림 10의 (a)는 방사선 조사전 카메라 영상으로 모두 정상동작하고 있다. 그러나 카메라에 방사선이 조사되기 시작한 후 1번과 6번 카메라는 24시간 후에도 생존하였다.

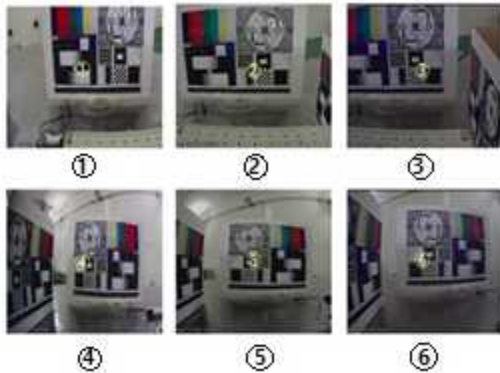
표 3. 카메라 실험데이터
Table 3. Experiment Data by Camera

No.	Camera	Total irradiation dose	Dose rate (Gy/h)	Signal end time	Survival time	Permit cumulative dose (Gy)	Survival
1	Head sep type 2M AHD	1552.3	64.6791	27day 17:46	24	>1552	O
2	1.3M AHD	1047.1	43.6291	27day 07:40	14.7	643	×
3	410 Thou pixel CVBS	747.3	31.1375	27day 14:44	(11.5)21	(358) 653	×
4	2M AHD	1482.3	61.7625	26day 21:30 (screen blank)	4.5	284	×
5	1.3M AHD	1023	42.625	27day 04:27	11.5	492	×
6	41Thou pixel CVBS	705	29.375	27day 17:46	24	>705	O

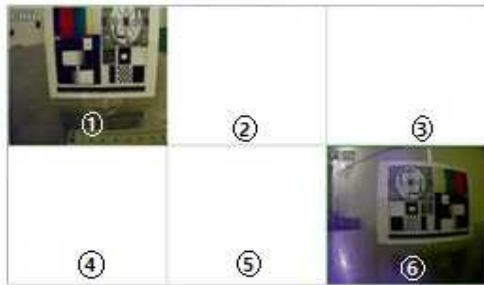
그러나 2번 카메라는 14.7시간, 3번 카메라는 21시간, 4번 카메라는 4.5시간, 5번 카메라는 11.5시간 후에는 영상이 나타나지 않았다.

방사선 2차 실험은 1차 실험에서 생존한 1번 카메라(헤드분리형 2M AHD)에 대해 선량을 2배 증가시켜(1차 선량:1,552Gy) 카메라의 생존 여부를 확인하고, 카메라의 누적된 선량을 통해 카메라 차폐 두께를 계산하고자 한 것이다. 헤드분리형 2M AHD에 하우징을 장착한 카메라에 총 조사선량 2,900Gy를 2시간동안 조사하여 생존하였다.

3차 실험은 2차 실험을 통해서 얻은 결과로 구조물 차폐 두께를 계산하여 카메라 하우징을 제작한 다음에 카메라를 장착한 후 연구 목표값인 1×10^6 rad이상의 방사선을 조사하여 카메라의 생존여부를 확인하였다.



(a) Screen before irradiation



(b) Screen after irradiation

그림 10. 방사선조사 전과 후의 카메라영상
Fig. 10. Screen before, after irradiation.

1번 카메라는 10시간 방사선을 조사 후에 영상이 OFF되는 현상이 발생하였다. 확인한 결과 아답터에 대한 차폐를 하지 않아 발생한 것으로 아답터 교체 후 정상 작동됨을 확인하였다.

그림 11은 실험을 위해 설치된 모습과 방사선 조사전후의 영상이다.

4차 실험에 해당하는 것으로 3차 실험 시 고장의 원인이 된 1번 카메라 아답터를 차폐하여 고준위 실험실에서 $1 \times 10^6 \text{rad}$ 이상인 방사선을 조사한 후에도 카메라는 생존하였고 19시간 조사 후에도 정상동작함을 확인하였다. 이를 기반으로 카메라의 차폐와 헤드를 분리하여 적용시 $1.88 \times 10^6 \text{rad}$ 의 방사선 조사량에도 카메라가 정상적으로 동작하고 있음을 확인하였다.

그림 11의 (a)는 개발한 CMOS카메라를 장착한 하우징을 설치한 때 실험모습이며 (b)는 방사선원을 조사하기전의 영상이다. (c)는 방사선원을

19시간동안 $1.88 \times 10^6 \text{rad}$ 선량으로 조사한 후의 영상으로 계속 나타나고 있어 카메라가 생존하고 있음을 알 수 있다.



(a) Experimental appearance



(b) Camera Image before Experimental



(c) Camera Image after Experimental

그림 11. 실험 모습과 방사선 조사전과 후의 영상
Fig. 11. Experimental appearance and Screen before, after irradiation.

6. 결론

방사선원을 이용하는 곳에는 사람의 접근이 제한되나 관측장비는 노출됨으로 방사선에 강하여야 한다. 따라서 기존의 카메라보다 방사선원에 강한 CMOS카메라를 제작하여 실제 적용하고자 한 것으로 그 결과는 다음과 같다.

1. 카메라 차폐구조설계에 필요한 재질은 비중과

- 용융점이 가장 높은 텅스텐과 비중은 상위그룹이나 용융점이 낮은 납을 선정하였는바 코발트 60 방사선 소스에 대한 선량 1/8까지 감소시킬 경우 텅스텐은 체적 432.7cm³, 두께 2.4cm이었고, 납은 체적 961cm³, 두께는 3.6cm로 하면 되었다.
2. 최적화된 차폐구조물 두께의 선정을 위해 방사선을 24시간 조사하였을 때 헤드분리형2M AHD 형식(①번)과 41만 화소 CVBS형식의(②번) 카메라가 생존하였다. 그러나 ①번 카메라는 방사선량을 ②번 카메라보다 2.2배 많은 1,552Gy를 조사한 후에도 생존하였다.
 3. 헤드분리형인 ①번 카메라에 개발한 CMOS Image센서 및 이중반사형 구조인 방사선 차폐구조의 하우징에 장착하여 실험한 결과 카메라 및 아답터등 연관설비에 대한 차폐가 이루어지면 1.88×10⁶rad 이상의 선량에서도 카메라가 잘 동작함을 확인하였다.

본 연구는 센서헤드와 C.C.U분리의 장거리 전송 기술, 광학기술, 차폐기술, 전자기술등 하드웨어 기술력을 확보하였다. 그러므로 다양한 내방사선 카메라 제품 LINE-UP 증대, 낮은 선량(1kGy=10⁵ rad)급 제품군과 특수목적 또는 사용 용도에 따라 높은 선량(10⁷~10⁸rad)인 제품군등 다양화를 추진한다면 사업성도 높게 될 것이며 카메라 유지관리 비용의 절감도 기대된다.

REFERENCES

- [1] D. H. Baek, "The Study on the Radiation-Proof Video Camera system Remote Module of the Tube type", JKIIECT 18-12, Vol.11 No.6. pp. 93~99, 2018.
- [2] D. H. Baek, "Ararm & Security", pp. 143~178, Dongil Ltd, Korea. 2017.
- [3] Richard Sharp, "Radiation Effects on Electrical and Electronic Equipment", bnes, 1994.

- [4] T. Jyunichiro. "Radioactivity & Radiation", Ohmsha, Ltd, Japanese. 2011.
- [5] S. K. Song, C. H. Han, O. D. Gwen, G. S. Lee, E. S. Kim, S. C. Bae, J. R. CH. "Remote Module System Design for Performance Improvement of Radiation-Proof Video Camera", Kyungbook Univ. 1999.

저자약력

백 동 현 (Dong-Hyun Baek)

[정회원]



전
 •국토교통부 중앙건설심의위원
 •전국대학소방학과 교수협의회 회장
 •롯데월드몰타워 자문위원
 •한국화재소방학회 회장
 현
 •인천국제공항공사 자문위원
 •한국법안전포럼 상임대표
 •가천대학교 설비소방공학과 교수

〈관심분야〉 • 영상화재감지 및 무선감지
 • 경보 및 시큐어리티
 • 화재신호처리

김 배 훈 (Bae-Hoon Kim)



전
 •한국발명진흥협회 감사
 •대우프런티어밸리 운영위원회회장
 •2014년 신기술 실용화 촉진대회. 대통령 표창
 현
 •동백테크노밸리기업협의회 회장
 •한국신제품인증협회 회장
 •(주)영국전자 대표이사

〈관심분야〉 • 특수 영상기기 및 무선감지
 • CCTV 및 시큐어리티
 • 영상신호처리