

월성 원자력발전소 칼란드리아 전면부 점검을 위한 열영상 관측시스템(KAERI Thermo Inspector) 설계/제작

조재완, 김승호, 박동선*

한국 원자력 연구소 원자력 내방사선 로봇 기술개발 과제

email : jwcho@nanum.kaeri.re.kr

* 전북대학교 정보통신공학과 정보통신연구소

Design and Fabrication of KAERI Thermo Inspector for Inspection of Calandria Front Area in Wolsong Nuclear Power Plant

Jai Wan Cho, Seung Ho Kim, and Dong-Sun Park *

Advanced Robotics Team, Korea Atomic Energy Research Institute

E-mail : jwcho@nanum.kaeri.re.kr

* Dept. of Information and Communication Engineering, Chonbuk National University

요약

중수로(CANDU)형 월성 원자력발전소의 칼란드리아 압력관 전면부를 감시점검하기 위한 열영상 관측시스템을 설계/제작하였다. 중수로는 가동중에 핵연료를 교체한다. 칼란드리아 전면부에는 380개의 압력관 채널이 위치하고 있다. 핵연료를 교체할 시에 핵연료 교체장비가 칼란드리아 압력관 채널의 ENDCAP을 열고 핵연료를 장전하는 과정에서 발생할 지도 모르는 중수누출, 핵연료교체장비의 이상상태를 점검하는데 목적이 있다. 열영상카메라는 상용 CCD 카메라에 비해 영상의 해상도가 떨어진다. CCD 카메라는 수증기 누출과 같은 육안검사에 활용하고, 열영상카메라는 압력관 채널의 온도변화 등을 점검하기 위해 CCD/열영상카메라의 융합구조로 설계/제작하였다.

I. 서론

원자력발전소의 안전성을 확보하기 위해서는 원자력 주요설비의 사고를 미연에 방지하는 점검행위가 더욱 정밀해질 필요가 있다. 수년에 걸쳐 몇번씩 발전소의 주요설비를 정지시키고 수행하는 overhaul 정기점검보다는 설비를 가동하고 있는 상태에서 하는 가동중 순회 점검이 아주 중요하다. 이러한 가동중 검사에는

적외선 열영상카메라가 유용하게 이용된다. 절대온도 0 °K 이상의 모든 물체는 그 표면에서 자신이 갖고 있는 온도에 해당하는 열적외선을 방사한다. 방사량은 물체의 온도와 상관관계를 갖고 있다. 물체의 온도가 상승하면 물체에서 방사되는 열적외선 방사량은 온도의 4승에 비례하여 증가한다. 이와 같이 물체에서 방사되는 적외선을 영상화한 적외선 열영상카메라를 이용하여 주요설비를 비접촉 진단하는 사례가 증가하고 있다[1-3]. 일본의 히다찌 제작소에서는 ITV 카메라와 적외선영상장치를 융합한 이동식 소형감시장치를 제작하여, 사람이 들어갈 수 없는 BWR 원자로 격납용기내의 각종기기의 상태, 즉, 수증기 누출, 주요 기기의 이상가열 등을 감시하고 있다. [4] 본 논문에서는 중수로(CANDU)형 월성 원자력발전소의 칼란드리아 압력관 전면부를 감시점검하기 위한 열영상 관측시스템을 설계/제작하였다. 중수로는 가동중에 핵연료를 교체한다. 칼란드리아 전면부에는 380개의 압력관 채널이 위치하고 있다. 핵연료를 교체할 시에 핵연료 교체장비가 칼란드리아 압력관 채널의 ENDCAP을 열고 핵연료를 장전하는 과정에서 발생할 지도 모르는 중수누출, 핵연료교체장비의 이상상태를 점검하는데 목적이 있다. 열영상카메라는 상용 CCD 카메라에 비해 영상의 해상도가 떨어진다. CCD 카메라는 수증기 누출과 같은 육안검사에 활용하고, 열영상카메라는 압력관 채널의 온도변화 등을 점검하기 위해 CCD/열영상카메라의 융합구조로 설계/제작하였다. 열영상카메라

는 FLIR(AGEMA) 의 THP510을 사용하였다. 조이스틱 조작에 의한 관측포인트의 조정, 외부 BATTERY 전원에 의한 독립적인 점검 기능, 적외선 LED를 이용한 무선제어 기능을 갖추도록 하였다. CCD/열영상 카메라의 FOV를 매핑한 결과 CCD 카메라의 FOV 기준으로 400X400[Pixels X Lines] 의 유효 관측 FOV를 달성하였다.

II. 열영상카메라의 구조

본 열영상관측시스템에 사용한 열영상카메라는 AGEMA THP 510 모델이다. 그림 1에 THP510 열상 카메라의 기본구조를 나타내었다. THV 510 열영상

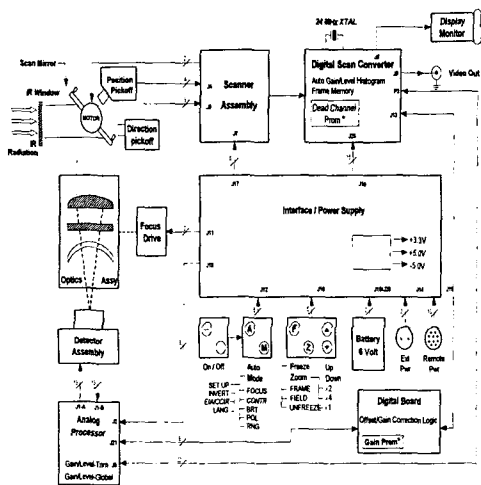


그림 1 THV510 구조
Fig. 1 Architecture of Thermo Vision 510

카메라는 column 방향으로 160 개의 검출소자를 array 형태로 되어 있다. 물체의 2차원 전영역에 대한 열영상을 얻기 위해서는 광학미러를 사용하여 스캔한다. 한번의 스캔으로 2차원 열영상을 생성할 수 있다. 이를 그림 2에 나타내었다.

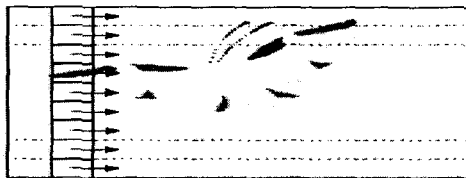


그림 2 열상카메라의 스캔방식
Fig. 2 Scan Method of Thermal Camera

THV510 의 FOV는 수평,수직으로 18.3° X 9° 이며, 분해능은 0.2°C 이다. Frame Rate 는 15Frames/sec 이며, 유효 영상의 크기는 512X320[PixelsXLines] 이다. 표 1에 THV510 의 주요 제원을 나타내었다[5].

표 1. THV510 의 주요 제원

Parameter	Specifications
Field Of View[HXV]	18° X 9°
Spectrum Range	3~5 μm
Detector Type	160 Elements Focal Plane Array
IFOV[HXV]	1.0 X 1.3mrad
IR Field rate	15Hz
Temperatutre Range	RANGEI : 0~40°C RANGEII : 0~80°C RANGEIII: 0~120°C
Focal Length	0.7m ~ ∞
Detector Cooling	ThermoElectric (Peltier Effect)
Thermal Sensitivity	0.1°C @ 30°C
Thermal Image [HXV]	512 X 320 [HXV]

III. 열영상 관측시스템 설계/제작

열영상카메라는 상용 CCD 카메라에 비해 영상의 해상도가 떨어진다. 수증기 누출과 같은 정황은 상용 CCD 카메라로 육안감시를 하고, 수증기 누출 영역의 온도변화는 열영상카메라로 감시를 하는 개념을 도입하였다. 이는 열상카메라중 비교적 저가에 속하는 THV510 단독으로는 원자력 주요시설의 관측지점을 설정하기가 매우 어렵다. 왜냐하면 THV510 의 영상의 Contrast 가 매우 낮기 때문이다. 그러므로 점검이 필요한 주요지점을 상용 CCD 카메라로 보면서 설정하는 것으로 하였다. 본 논문에서는 상용 CCD 카메라로 PuLNIX 사의 TM-7CN B/W CCD 카메라를 사용하였다. TM-7CN CCD 카메라는 1/2" 크기의 CCD 소자를 갖고 있으며, Interline 방식의 비교적 저렴한 범용 CCD 카메라이다. CCD 카메라 관측영역과 THV510 열영상카메라의 관측영역을 공유하기 위해서는 센서의 FOV를 맞출 필요가 있다. 열상카메라의 FOV에 가장 근접한 FOV를 갖는 렌즈로 25MM/F#1.8 C-MOUNT 렌즈를 사용하였다. 25M/M 렌즈의 경우 1/2" CCD에 대해 수평X수직 방향으로 각각 14.59° X 10.97° 의 FOV를 갖는다[6]. 표 2에 25M/M 렌즈의 주요특성을

나타내었다.

표 2. 25M/M C-MOUNT 렌즈의 주요 특성

Parameter	Specifications
초점거리	25M/M
최대구경비(F#)	1:1.8
FOV[HXV]	1" CCD: 28.71° X 21.73° 2/3" CCD: 19.96° X 15.04° 1/2" CCD: 14.59° X 10.97°
최근점 촬영범위[HXV]	1" CCD: 271 X 203 [mm] 2/3" CCD: 186 X 140 [mm] 1/2" CCD: 135 X 102 [mm]
최소 초점거리	0.5m

CCD 와 THV510 사이의 간격이 좁으면 줌을수록 공유하는 유효 FOV가 증가한다. 본 논문에서는 THV 510의 물리적인 Dimension 때문에 CCD와 THV510 사이의 수평 간격을 113mm 로 설정하였다. THV510의 수직 FOV 에 대한 정확한 data를 얻을수 없어서, CCD 렌즈의 중심을 THV510 렌즈직경 70mm 중심에 맞추었다. 따라서, CCD 카메라는 두 센서의 Baseline 으로부터 25mm 높게 위치하게 되었다. 그림 3(a),(b)에 열영상관측시스템의 전면/후면부 구성도를 나타내었다.

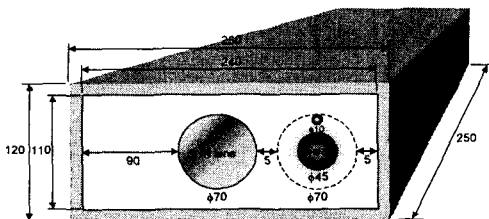
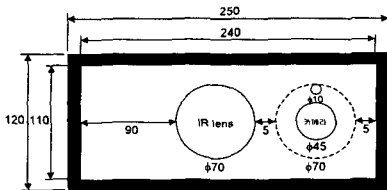


그림 3(a) 열영상관측시스템의 전면부
Fig. 3(a) Front of KAERI Thermo Inspector

후면에 3" LCD 모니터를 장착한 것은 Stand-Alone 타입으로 관측을 할 때, 조작자가 CCD 관측영상을 보면서 관측지점을 설정하고, 또한 THV510 열영상카메

라의 관측지점의 초점을 제어하기 위한 것이다.

또한, THV510 열영상 카메라는 Ni-Cd Battery로 동작되고 있다. Battery를 사용할 경우 30분 정도의 관측시간밖에 허용되지 않기 때문에 원자력발전소의 가동중 상시검사에는 부적합하다. 이를 보완하기 위해서 CCD 카메라의 구동전원인 DC 12V 전원을 단일 전원으로 하여 THV510용 전원모듈을 설계/제작하여 연속적인 관측이 이루어질수 있도록 하였다.

그리고, THV510 열영상카메라는 Range 범위에 따라 온도측정범위가 다르다, 관측지점의 온도범위가 설정된 Range를 초과할 경우에는 Range를 변경시킬 필요가 있으며, 이를 위해 THV 510 의 제반 parameter 를 원격제어할 필요가 있다. 유/무선 2가지 경우의 제어시스템을 구축하였다. 월성 4호기의 경우, 실측 결과 제어실에서 칼란드리아 압력관까지의 거리가 30m 정도 되었다. 따라서, THV510 카메라의 주요제어 파라미터로 전원 ON/OFF, 모드제어, 모드의 세부사항제어에 필요한 7라인과 CCD/THV510 의 비디오통신전송을 위한 2심선의 동축케이블을 고려하여 13심선의 Belden 케이블을 선정하였다. 무선의 경우는 Battery 로 제어할 경우를 대비하여 적외선 LED를 이용한 광변조에 의한 카메라 모드제어를 하도록 하였다. 그림 4 에 제작된 열영상관측시스템의 전면부,후면부를 나타내었다

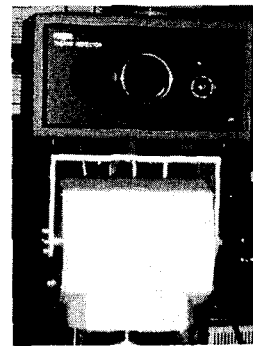


그림 4(a). 열영상관측 시스템 전면부

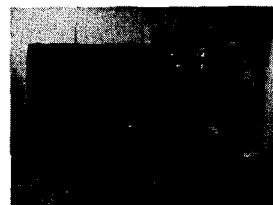


그림 4(b). 뒷면 모습

IV. 실험 및 결과

열영상관측시스템의 성능평가를 위해서 그림5와 같은 테스트패턴을 제작하였다. 그림 6, 7은 열영상관측시스템의 관측영상을 나타내고 있다. 매핑기법을 이용하여 융합된 2센서의 유효 FOV를 계산하였다[7]. 그 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림에서 사각형으로

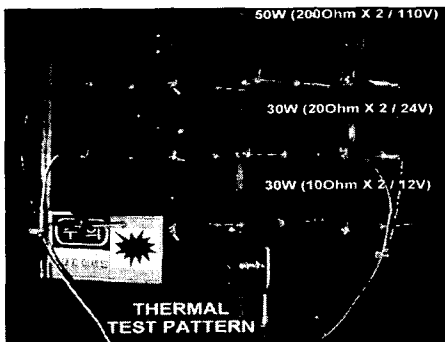


그림 5. Test Pattern

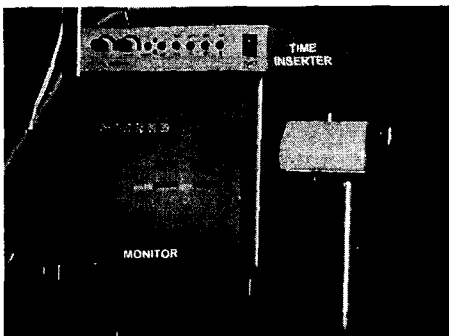


그림 6. CCD(TM7CN B/W) 관측영상

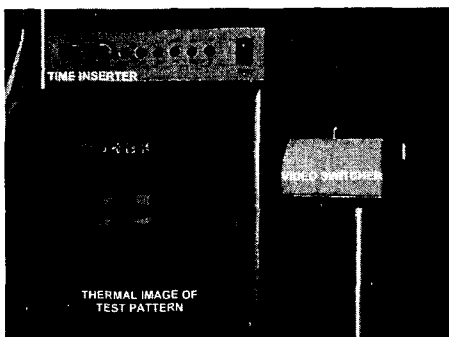
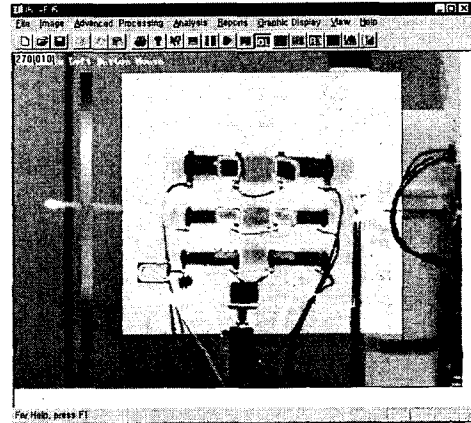


그림 7. THV510 관측영상

태두리친 영역이 CCD/THV510 카메라의 FOV 가 공유하는 것을 나타내고 있다. 유효 FOV 영역이 CCD 이미지 Frame 의 오른쪽 끝까지 공유를 하지만, 관측의 편의성을 위해서 폭을 400X400 으로 설정하였다.



V. 결론 및 추후 연구

원자력발전소 주요시설의 감시점검을 위한 열영상관측시스템을 설계/제작하였다. 앞으로 보완해야 될 사항으로는 관측지점의 정확한 열적 이상상태를 판정하기 위해서는 THV510 카메라의 Focusing이 자동으로 제어되어야 하며, 조이스틱을 통한 수동제어방식이 영상 처리에 의한 자동제어/추적기능이 겸비되도록 하여야 할 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] 濫井一光, “赤外線/可視カメラによる自動監視システム”, アロマティックス, Vol.44, No9,10 pp269-272, 1992
- [2] 木村幸則, “赤外線映像装置による電力設備診断”, 電氣現場技術 9월호, pp83-86, 1991
- [3] 赤外線高度利用技術調査委員會, “赤外線應用の高度化”,
- [4] 北見互雄, “高まる原子力用ロボットの使命”, 原子力eye, Vol.44. No.7, pp32-33, Jul, 1998
- [5] THV-510 ThermoVision Maintenance Manual
- [6] 東芝外觀圖, <http://www.technoland.co.jp/>
- [7] 전자공학회, 하계학술대회 논문집, 1999년 6월