

CCD와 적외선 열영상의 다중영상을 이용한 월성원자력발전소의 칼란드리아 전면부 점검

조재완, 최영수, 김창희, 서용칠, 김승호
한국 원자력 연구소 원자력 내방사선 로봇개발 과제

Inspection of Calandria Reactor Area of Wolsung NPP using Thermal Infrared and CCD Images

JaiWan Cho, YoungSoo Choi, ChangHoi Kim, YongChil Seo, SeungHo Kim
Advanced Robotics Team, Korea Atomic Energy Research Institute

ABSTRACT

Thermal infrared camera have poor image qualities compared to commercial CCD cameras, as in contrast, brightness, and resolution. To compensate the poor image quality problems associated with the thermal infrared camera, the technique of superimposing thermal infrared image into real ccd image is proposed. The mobile robot KAEROT/m2, loaded with sensor head system at the mast, is entered to monitor leakage of heavy water and thermal abnormality of the calandria reactor area in overhaul period. The sensor head system is composed of thermal infrared camera and ccd camera in parallel. When thermal abnormality on observation points and areas of calandria reactor area is occurred, unusual hot image taken from thermal infrared camera is superimposed on real CCD image. In this inspection experiment, more accurate positions of thermal abnormalities on calandria reactor area can be estimated by using technique of mapping thermal infrared image into CCD image, which include characters arranged in MPOQ order.

1. 서 론

중수로형 원자력발전소의 칼란드리아 전면부에 위치한 380개의 압력관채널은 정상가동시 입/출구 채널온도가 310°C/266°C분포를 보인다. 압력관채널에 이상이 있으면 고온고압의 수증기가 누출될 가능성이 있다. 이러한 고온고압의 수증기누출 및 380개 압력관채널의 급격한 온도변화 등을 점검하기 위한 목적으로 한국원자력연구소에서는 이동로봇 KAEROT/m2 를 개발하고 있다.^[1] 적외선열영

상과 CCD 카메라의 융합구조를 채택한 관측모듈이 KAEROT/m2의 마스트헤드에 탑재된다. 적외선 열영상 카메라는 압력관채널의 급격한 온도변화를 모니터링하고 CCD 카메라는 수증기누출현상 등의 일반적인 육안검사를 수행한다. KAEROT/m2가 칼란드리아전면부 주위를 순회하면서 마스트에 탑재된 센싱모듈을 통해 압력관채널 및 핵연료 교체장비의 이상상태를 실영상과 열영상으로 동시에 관측한다.

정기적으로 실시되는 월성 원자력발전소 2호기의 오버홀 점검기간에 KAEROT/m2를 투입하였다. 월성 원자력발전소 2호기의 오버홀 점검기간에 수행한 칼란드리아 전면부의 관측결과 열영상 단독으로는 이상부위를 나타내는 지점의 정확한 위치 파악이 어려웠으나 칼란드리아 압력관 배열위치를 표시하는 문자정보가 포함된 CCD 관측영상과 매핑, 중첩 디스플레이함으로써 열적 이상상태를 보이는 지점의 위치를 정확하게 추정할 수 있었다. 상이한 2 영상의 중첩을 위해서는 2 카메라시스템의 기하학적 공간위치를 찾아내기 위한 캘리브레이션 과정이 필요하다. 이러한 카메라 캘리브레이션을 위해 별도의 교정판을 사용하지 않고 칼란드리아 전면부에 위치한 원형패턴의 380개 압력관 배열좌표를 이용하였다. 본 연구에서 적외선 열영상카메라는 AGEMA의 THV510을 사용하고 육안관측의 유연성을 증대시키기 위해 11.5~69mm/F1.4 의 6배 줌기능을 갖는 전동 줌렌즈를 장착한 PulNIX의 TM-7CN CCD 카메라를 사용하였다.

2. 적외선 열영상카메라와 CCD카메라의 캘리브레이션

칼란드리아점검 이동로봇 KAEROT/m2의 마스트에 탑재될 센서시스템 헤드부는 적외선 열영상카메라와 CCD 카메라의 융합구조이다. 그림 1 에 KAEROT/m2 마스트에 탑재될 관측용 센서시스템 헤드의 정면구성도를 나타내고 있다. 열영상카메

라와 CCD 카메라를 수평으로 배치하였다. 적외선 열영상카메라는 AGEMA의 THV510을 사용하였으며, 이의 관측 FOV는 수평 X 수직방향으로 18.3° X 9.15° 이다. CCD 카메라는 범용의 1/2" 셀크기의 PulNIX의 TM-7CN 모델을 사용하였으며 육안 관측의 유연성을 증대시키기 위해 11.5~69mm/F1.4의 6배 줌기능을 갖는 전동 줌렌즈를 장착하였다. THV510의 IR렌즈직경이 70mm 이므로, CCD 카메라렌즈의 수평중심축을 THV510의 70mm 직경의 중앙에 정렬하였다. 따라서, 그림 1에 나타내고 있는 것처럼 수평, 수직축으로 153, 20mm의 오프셋이 각각 존재한다. 표 1에 센서헤드부의 주요제원을 나타내고 있다.^[2]

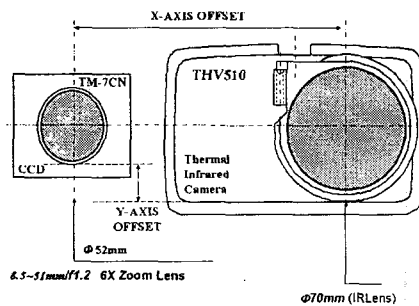


그림 1. 관측모듈 구성도
Fig 1. Configuration of Sensor Head

표 1. 센서헤드부의 주요 제원
Table1. Specifications of Sensor Head

Parameter	Specifications	
	THV510	TM-7CN
FOV [HXV]	18.3 X 9.15°	7.2~41.2°
Spectrum Range	3~5 μm	0.4~0.7 μm
Detector	160Elements InSb FPA	1/2" IT CCD 6.45 X 4.84mm
InfraredFOV	1.0X1.3 mrad	-
Field rate	15Hz	60Hz
Focal Length	0.7m ~ ∞	11.5~69mm
Effective Cell	-	0.84 X 0.98μm
Sensitivity	0.1°C@ 30°C	-
Image Size	512 X 320	768 X 494

물체가 내뿜는 복사열을 1차원 어레이센서에 맺히게 하는 적외선 광학계를 수평방향으로 512회 미세 이동시켜 수평방향 영상신호를 얻고, 수직방향으로 1회 미세이동시켜 인터레이스 스캔방식의 NTSC 형태의 적외선 영상신호를 얻고 있다. 표 1의 TM-7CN CCD 카메라의 특성자료와 비교하여 1차원 어레이 형태의 InSb FPA 소자에 대한 셀의 정확한 크기 등의 제원을 알 수 없으므로 THV510 열영상카메라를 캘리브레이션 하기위해 Tsai 등이

제안한 카메라 캘리브레이션 기법을 사용할 수 없다^{[3][4]}. 또한, THV510 열영상카메라와 TM-7CN CCD카메라 줌렌즈의 관측FOV 특성이 상이하므로 이를 하나의 FOV 기준으로 교정해줄 필요가 있다. 그림 2에 THV510 열영상카메라와 TM-7CN CCD 카메라의 FOV 관계를 나타내었다.

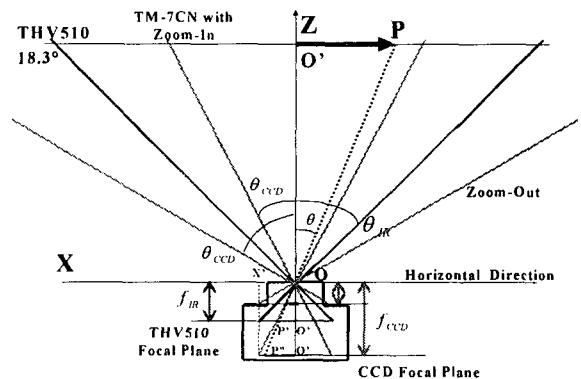


그림 2. THV510과 TM-7CN의 FOV특성
Fig. 2. FOV Relations of THV510 and TM-7CN

그림 2에서 THV510 열영상카메라는 TM-7CN CCD 카메라렌즈 f_{CCD} 의 줌인/아웃에 따라 초점거리가 가변적인 광각 또는 협각의 렌즈 f_{IR} 로 유추할 수 있다. 이는 THV510의 열영상이 CCD 영상에 f_{CCD} / f_{IR} 비율로 확대 또는 축소되어 맺힘을 의미한다. THV510의 임의의 상 $O'P'$ 는 줌인 상태의 TM-7CN CCD에 다음과 같은 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$O'P' = f_{IR} \cdot \tan \theta \quad (1)$$

$$O'P'' = f_{CCD} \cdot \tan \theta \quad (2)$$

$$f_{IR} \cdot \tan \theta_{IR} = f_{CCD} \cdot \tan \theta_{CCD} \quad (3)$$

$$O'P' = O'P'' \cdot \frac{\tan \theta_{CCD}}{\tan \theta_{IR}} \quad (4)$$

여기서, $\theta_{CCD}, \theta_{IR}$ 은 TM-7CN CCD와 THV510 열영상 카메라의 수평방향 FOV 이다. THV 510 카메라의 상이 CCD 카메라의 상으로 매핑되면서 실제 상보다 f_{CCD} / f_{IR} 비의 크기로 맺히게 된다. 따라서 TM-7CN CCD 카메라 줌렌즈의 초점거리 f_{CCD} 를 알면 THV510 적외선 열영상 카메라의 초점거리 f_{IR} 를 CCD 소자의 크기로 추정할 수 있다. f_{CCD} 를 구하기 위해서 카메라 캘리브레이션 기법을 사용한다. 본 논문에서는 칼란드리아 전면부에 위치하고 있는 380개 압력관 원형패턴을 캘리브레이션 플레이트로 활용하였다. 그림 3에 칼란드리아 전면부의 모습을 나타내었다. 그림

3에 나타낸 것처럼 칼란드리아 전면부의 압력관 채널은 11.25"(285.75mm) 간격의 정방형 형태로 배열되어 있음을 알 수 있다. 적절한 영상전처리 기법을 이용하여 압력관 원형패턴의 중심좌표를 추출하고, 압력관 원형패턴의 실제 공간상의 좌표를 대입하여 식 5를 풀면 이동로봇 마스트에 탑재된 CCD 카메라의 초점거리 f_{CCD} 를 계산할 수 있다.

$$X_c = RX_w + T \quad (5)$$

여기서 X_c 는 world 좌표계 X_w (칼란드리아 전면부에 위치한 압력관의 3차원 실공간상에서의 배열 좌표)가 2-D 인 CCD 소자면에 맺히는 좌표이다. R, T 는 마스트에 탑재된 센서헤드시스템의 회전(rotation), 병진(translation)을 나타낸다. 이동로봇의 마스트헤드에 탑재된 CCD 카메라로 획득한 25~30 개 정도의 압력관 원형패턴영상의 중심좌표를 추출하여 X_c 로 사용하였다.

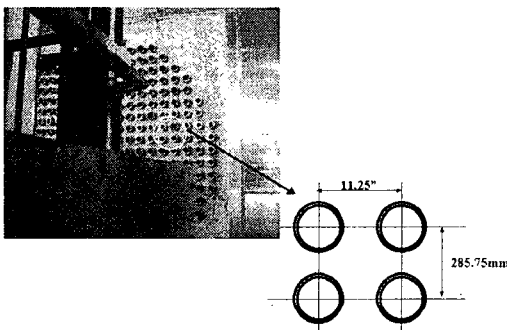


그림 3. 칼란드리아 압력관 전면부
Fig. 3. Front View of Calandria Reactor Area

3. 실험 및 결과

그림 4(a)는 월성 원자력발전소의 칼란드리아 전면부 점검용 이동로봇의 모습을 나타내고 있으며 4(b)는 이동로봇의 제어기를 나타낸다.

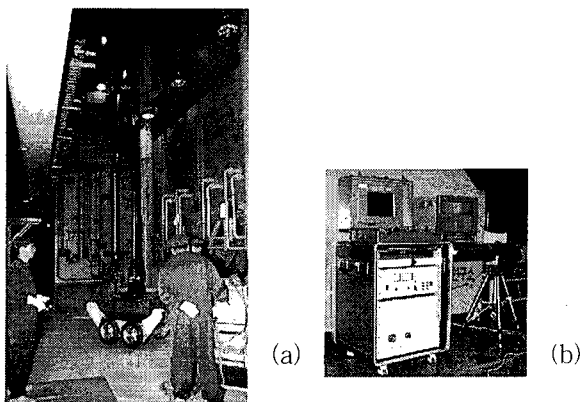


그림 4. 이동로봇KAEROT/m2와 제어기.
Fig. 4. Kaerot/m2 mobile robot system and controller

그림 4(b)의 제어기로부터 이동로봇까지는 30m 길이의 케이블로 연결되어 있다. 이동로봇과 마스트헤드사이에는 10m 길이의 케이블이 연결되어 있다. 이동로봇과 마스트헤드사이의 연결케이블에는 열영상카메라와 CCD 카메라의 영상을 전송하는 동축케이블 2심과, 마스트헤드의 조향, THV510 열영상카메라의 파라미터, CCD 카메라의 전동 줌, 초점 등을 제어하기 위한 제어선로 4심, 전원공급라인 2심 등의 다중 복합구조의 케이블이다. THV510 열영상카메라의 파라미터에는 적외선 광학계의 초점제어, 관측 온도범위 설정, 열영상의 밝기, 콘트라스트, 모드제어 등이 포함된다. 마스트 헤드에서 촬영된 칼란드리아 전면부의 관측 2영상이 이동로봇을 거쳐 제어기로 동축케이블을 통해 전송된다. 제어기에서는 관측 2영상을 VTR에 저장, 백업을 한후 산업용 PC에 내장된 Matrox Meteor II Frame/Grabber를 통해 디지털화하여 영상처리 및 매핑을 수행하게 된다. Matrox Meteor II Frame/Grabber는 4개 채널의 영상신호를 캡취할 수 있다. 본 논문에서는 2개 채널을 이용하여 CCD 관측영상과 적외선 관측영상을 순차적으로 획득하였다. 그림 5에 이동로봇 마스트헤드의 CCD 카메라시스템으로 촬영한 380개 압력관중의 일부영상을 나타내고 있다.

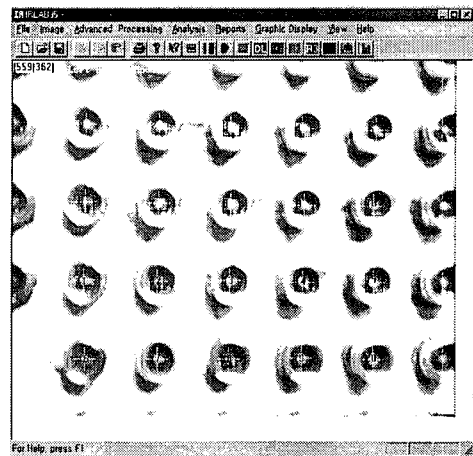


그림 5. 칼란드리아 전면부의 압력관 채널
Fig. 5. Pressure Tube Image of Calandria Reactor Area

월성 원자력발전소 칼란드리아 전면부의 주변 조명이 너무 밝았고, 빛을 반사하는 흰색의 보온재로 덮여있는 까닭으로 CCD 카메라 시스템의 Auto-IRIS 기능이 제대로 작동되지않아서 S/N 비가 좋은 관측영상을 획득하지 못하였다. 콘트라스트가 뛰어난 영상을 얻기 위해서는 IRIS를 수동제어할 수 있는 3자유도(줌, 초점, 조리개)를 갖는 전동렌즈의 장착이 필요하다고 생각된다. 그림 5의 관측영상에서 상대적으로 S/N 비 특성이 좋은 압력관 부분의 closure plug 영역만을 설정하여 2진화 처리 후 무게중심을 구하여 X_c 를 추출하였다. 식(5)를 풀어

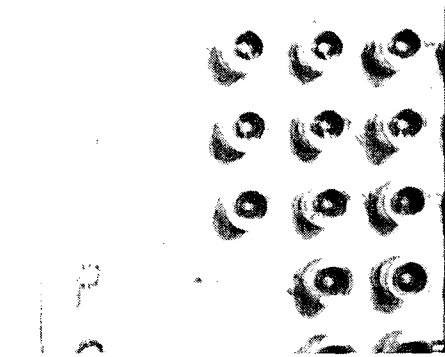


그림 6(a). 압력관 채널의 CCD 관측영상
Fig. 6(a). CCD Image of Pressure Tubes

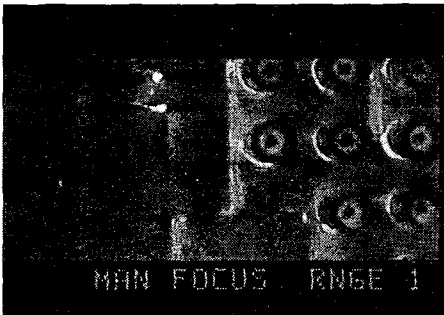


그림 6(b). 압력관 채널의 적외선 열영상 Fig. 6(b). Thermal Infrared Image of Pressure Tubes

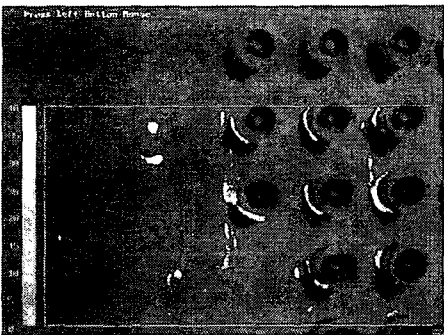


그림 6(c) CCD 와 열영상의 중첩영상
Fig. 6(c). Superimposition image of CCD and Thermal Images

카메라 캘리브레이션 파라미터를 구한결과 CCD 카메라 ZOOM 렌즈의 f_{CCD} 는 9.46mm였으며 칼란드리아 전면부로부터 이동로봇의 관측거리는 2,592.46mm 였다. 그림 6(a)영상은 TM-7CN CCD 카메라의 칼란드리아 전면부 관측영상이며 그림 6(b)는 CCD 카메라보다 수평방향으로 153mm 거리의 offset 위치에서 획득한 칼란드리아 전면부 관측영상이다. 그림 6(b)의 열영상에서 흰색으로 밝게 보이는 부분이 상대적으로 온도가 높은 영역이다. 검

은 색의 원형이 칼란드리아 압력관 원형패턴을 나타내고 있으며 검은색 원형 테두리 중앙에 있는 검은색 영역이 closure plug을 나타낸다. 칼란드리아 압력관 관측 열영상을 2진화 처리하여 온도가 높은 영역을 추출한다. 그림 6(b)의 관측영상에서 온도가 높은 열영상을 TM-7CN CCD 카메라 줌렌즈 좌표계로 변환하여 CCD 관측 영상에 매핑한 것을 그림 6(c)에 나타내었다. 그림 6(b)의 열영상을 독립적으로 관측하였을 경우 보온재 틈새를 통해 열이 누설된다는 것을 알 수는 있으나 정확한 위치를 파악하기는 쉽지 않다. 그림 6(c)의 열영상과 CCD 영상의 매핑영상에서는 M 행의 압력관 채널위치에서 열적인 이상상태가 있음을 쉽게 알 수 있다. 이는 육안관측영상인 CCD영상으로부터 압력관 채널의 배열위치를 마킹한 행방향의 M,O,P,Q 와 같은 문자정보를 인식할 수 있기 때문이다. 열영상카메라와 CCD 카메라가 갖고 있는 고유의 장점을 매핑함으로써 칼란드리아 전면부에 열적 이상상태가 나타나는 위치를 보다 정확하게 추정할 수 있다.

4. 결론 및 추후 연구

본 논문에서는 적외선 열영상과 CCD영상으로 구성되는 2 개의 상이한 영상 정보를 이용하여 월성원자력 발전소 2호기의 칼란드리아 전면부를 관측하였다. 월성원자력발전소 2호기의 오버홀 점검기간에 칼란드리아 점검 이동로봇 KAEROT/m2를 투입하였다. KAEROT/m2 마스트에 탑재된 센서헤드부는 적외선 열영상카메라와 CCD 카메라의 융합구조로 구성되어 있다. 적외선 열영상카메라는 칼란드리아 전면부 압력관 채널의 온도변화 등을 점검하고 CCD 카메라는 수증기 누출과 같은 육안 관측을 한다. 2 개의 상이한 영상 정보인 적외선열영상과 CCD 영상을 매핑하여 분해능이 우수한 CCD 관측 영상에 열적 이상상태를 보이는 지점의 관측 열영상을 중첩 디스플레이 해줌으로써 칼란드리아 전면부의 이상 부위를 정확하고 효율적으로 점검할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 김승호, 원전용 로봇시스템개발, (한국 원자력연구소, 대전, 1995)
- [2] Hughes Aircraft, THV-510 Maintenance Manual
- [3] Roger Y. Tasi, "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses", IEEE J. Robotics and Automation, Vol. RA-3, No.4, August, 1987
- [4] D. Zhang, Y. Nomura, S. Fujii, "A Simple and Accurate Camera Calibration Method", SPIE Vol.1822, 139-148, 1992