

증기발생기 세관의 중심좌표추출에 대한 연구

조재완, 김창희, 서용철, 최영수, 김승호
한국 원자력 연구소 내방사선 로봇개발 과제
전화 : 042-868-8828 / 핸드폰 : 016-226-8645

Study on Extraction of the Center Point of Steam Generator Tubes

Jai Wan Cho, Chang Hoi Kim, Yong Chil Seo, Young Soo Choi, Seung Ho Kim
Advanced Robotics, Korea Atomic Energy Research Institute
E-mail : jwcho@nanum.kaeri.re.kr

Abstract

This paper describes extraction procedure for the center coordinates of steam generator tubes of Youngkwang NPP #6, which are arrayed in triangular patterns. Steam generator tube images taken with wide field-of-view lens and low-light lamp mounted on a ccd camera tend to have low contrast, because steam generator is sealed and poorly illuminated. The extraction procedures consists of two steps. The first step is to process the region with superior contrast in entire image of steam generator tubes and to extract the center points. Using the extracted coordinates in the first step and the geometrical array characteristics of tubes lined up in regular triangle forms, the central points of the rest region with low contrast are estimated. The straight lines from center point of a tube to neighbour points in horizontal and 60, 120°degree directions are derived. The intersections of straight line in horizontal direction and slant line in regular triangle direction are selected as the center coordinates of steam generator tubes. The Chi-square interpolation method is used to determine the line's coefficients in horizontal and regular triangle direction.

I. 서론

국내에 가동중인 원자로는 가압형 경수로, 증수로의 두종류이지만 증기발생기 모델은 경수로의 경우에는 웨스팅하우스사의 F, 프라마톰의 51B, 한국표준형이 있으며, 증수로의 경우에는 AECL의 CANDU 6형으로 다양한 모델분포를 이루고 있다. 증기발생기의 모델에 따라 작게는 3,300 여개에서 많게는 8,200 여개의 전열관 세관이 분포되어 있으며, 전열관 세관의 직경도 CANDU형이 0.625"이고, 프라마톰 51B형이 0.875"로 모델에 따라 다양하다. 한국표준형 증기발생기 세관직경은 0.75"(19.05mm)이다. 증기발생기 세관배열의 목적은 동일한 면적에 보다 많은 세관들을 설치하여 열교환 효율을 높이는 데 있다. 따라서, 증기발생기 세관의 건전성을 평가하기 위해 매년 실시되는 정기검사(overhaul) 기간중에 세관의 결함 및 이물질존재여부를 검사하도록 의무화 되어 있다. 증기발생기 지역은 사람의 접근이 허용되지 않는 고방사선 구역이므로 로봇을 이용하여 세관의 건전성을 평가하기 위해 와전류탐상검사를 실시하고 있다. 원자력연구소에서는 증기발생기 세관의 유지보수를 위한 로봇 매니플레이터를 개발하고 있다.

본 논문에서는 증기발생기 세관영상에서 배열된 세관들의 중심좌표추출에 대해 기술한다. 증기발생기 영역은 협소하고 밀폐된 구역이고 로봇 매니플레이터 베이스를 장착하는 맨웨이에 CCD 카메라와 조명장치를 이용하여 전열관 영상을 얻기 때문에 S/N 특성이 양호한 전열관 영상을 얻기가 어렵다. 본 논문에서는 증기발생기 세관의 전체 영상중에서 상대적으로 S/N 특성이 우수한 일부영역을 처리하여 세관의 중심점을 추출한다. 일부 영역에서 추출된 세관의 중심좌

표들과 증기발생기 세관의 기하학적 공간배열의 규칙성을 이용하여 S/N 특성이 열악한 나머지 세관의 중심좌표들을 추출하였다. 본 연구에 사용한 영광 원자력발전소 6호기의 증기발생기 세관은 정삼각형 구조로 배열되어 있다. S/N 특성이 양호한 세관들의 중심좌표를 추출한다. 추출된 하나의 세관중심으로부터 이웃하는 세관들에 대해 수평방향(0°, 180°)과 정삼각형 방향(60°, 120°)으로 직선을 도출하였다. 도출된 수평방향과 정삼각형 방향의 선분이 교차하는점들을 S/N 특성이 나쁜 나머지 영역의 세관들의 중심점으로 취하였다. 수평방향 및 정삼각형 방향에 대한 직선은 Chi-Square 알고리즘을 이용하여 구하였다. 또한 증기발생기 세관배열이 규칙성을 갖고 있기 때문에 캘리브레이션 플레이트로 활용될 수 있다. 본 논문에서 추출한 전열관 세관들의 중심좌표들을 이용하여 Tsai가 제안한 카메라 캘리브레이션기법을 적용하여 로봇 매니플레이터 베이스의 기하학적 공간좌표 및 방향을 추출하였다.

II. 증기발생기 전열관 탐상 로봇

가압 경수로형 원자력발전소에서 증기발생기는 전열관 세관내부를 흐르는 1차 냉각수와 그 외부를 지나 2차 냉각수에 의하여 열교환을 한다. 1차 냉각수는 290~330℃의 온도분포를 보인다. 2차 냉각수는 급수노즐을 통하여 들어와서 증기발생기 튜브시트(tube sheet) 상부까지 내려와 전열관 세관의부와 접촉하면서 상승하여 열교환에 따른 증기가 생성된다. 방사선에 오염된 1차냉각수와 증기를 발생시키는 2차냉각수는 전열관 세관을 경계로 하여 격리되어 있다. 따라서 전열관 세관의 균열이나 파손에 의해 1차 냉각수와 2차 냉각수가 섞이게 되면 방사성 오염물질이 외부로 누출될 수 있는 위험이 뒤따른다. 그러므로 증기발생기 세관의 건전성을 확보하는 일이 무엇보다 시급하다. 이를 위해 매년 정기검사때마다 증기발생기 전열관의 건전성을 점검하고 있다. 증기발생기 전열관 세관의 건전성을 확보하기 위해 ECT, UT 검사등을 수행한다. ECT 탐촉자를 전열관 세관 내부에 밀어넣어서 세관 내부의 크랙, dent 등의 크기, 위치 등의 제원을 측정하고 결함정도에 따라 전열관 세관을 관막음(plugging) 또는 보수(sleeving)를 한다. 증기발생기 전열관 세관의 점검, 유지보수 등의 모든 작업을 로봇을 통해 수행한다. 이는 증기발생기 수실내부가 고방사선으로 오염되어 있고, 협소하고, 작업자에 대한 방사선 피폭위험 등 작업환경이 매우 열악하기 때문이다. 원자력연구소의 로봇개발팀에서는 증기발생기 전

열관 세관의 유지보수를 위한 로봇 매니플레이터를 개발하고 있다. [1] 그림 1에 로봇매니플레이터를 이용한 전열관 세관 유지보수의 개념도와 목업에서의 설치장면을 보이고 있다. 로봇 매니플레이터에 장착된 ECT Probe가 3/4" 직경의 전열관 세관내부의 중심에 정확하게 위치하기 위해서는 로봇 매니플레이터의 Arm Pivot Assembly와 전열관 튜브시트가 수평을 유지하는 것이 중요하다. 국내에 가동중인 원자로의 증기발생기 모델에 따른 전열관 세관의 배열 및 제원을 표 1에 나타내고 있다. [2]

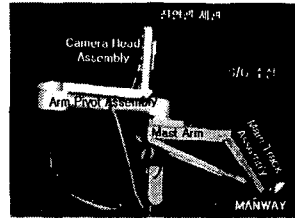
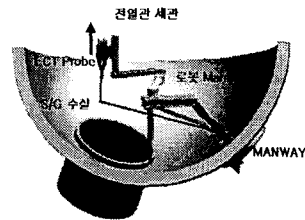


그림 1. 증기발생기 전열관 유지보수 로봇

표 5. 증기발생기 전열관 세관의 사양

원자력 발전소	고리 1호	고리 2,3,4 영광 1,2	울진 1,2	영광 3,4,5,6 울진 3,4	월성 1,2,3,4
S/G Type	W/H Delta60	W/H Model F	프라마톰 Model 51B	한국형 System 80	CANDU 6
Tube Number	4934	5626	3330	8214	3530
Tubing Pattern	삼각형	Square	Square	삼각형	삼각형
Tube Pitch	1.10"	0.98"	1.28"	1.00"	0.95"
Tube Dia.	0.75"	0.688"	0.875"	0.75"	0.625"

표 1에서 알 수 있듯이 전열관 세관의 패턴은 삼각형 구조와 정방형구조로 나누어 진다. 그림 2에 본 연구에서 사용한 한국형 경수로 타입인 영광 6호기의 증기발생기 전열관 세관의 배열형태를 나타내었다.

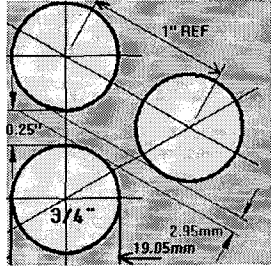


그림 2. 영광 6호기 증기발생기 전열관의 배열

증기발생기 전열관 세관의 유지보수를 위한 로봇 매니플레이터를 설치할 때 Main Arm Track에 카메라를 설치하여 로봇 매니플레이터 설치과정을 점검한다. 설치가 끝난후에는 카메라헤드 어셈블리에 CCD 카메라를 장착하여 ECT Probe 가 전열관 세관의 중심에 위치하고 있는지를 항상 감시한다. Main Arm Track에 설치된 카메라로부터 획득한 전열관 세관의 영상을 이용하여 중심점을 추출하고, 그림 2에 나타낸 바와 같이 세관배열의 규칙성을 카메라 캘리브레이션 플레이트로 활용을 하면 전열관 세관에 대한 Main Arm Track에 장착된 CCD 카메라의 특성 파라미터 및 기하학적 공간좌표를 추출할 수 있다. 이를 구하기 위해서 카메라 캘리브레이션 기법을 사용한다. 일반적으로 격자무늬가 규칙적으로 배열된 캘리브레이션 플레이트를 사용하여 카메라 캘리브레이션을 수행 한다. 사람의 접근이 제한되는 증기발생기 수실내부와 같은 고방사선 지역에서는 캘리브레이션 플레이트를 사용할 수 없다. 본 논문에서는 별도의 플레이트를 사용하지 않고 증기발생기에 위치하고 있는 8000여개의 증기발생기 세관 원형패턴을 캘리브레이션 플레이트로 활용하였다. 적절한 영상전처리 기법을 이용하여 세관 원형패턴의 중심좌표를 추출하고, 증기발생기 세관 원형패턴의 실제 공간상의 좌표를 대입하여 식 1을 풀면 Main Arm Track에 장착된 CCD 카메라의 특성 파라미터 및 기하학적 공간좌표를 계산할 수 있다. [3] 식 1에서 3차원 공간상의 좌표가 2차원 CCD에 투영된 X_c 를 오차없이 정확하게 추출하는 것이 필요하다.

$$X_c = RX_w + T \quad (1)$$

여기서 X_c 는 world 좌표계 X_w (증기발생기에 위치한 세관의 3차원 실공간상에서의 배열 좌표) 가 2-D인 CCD 소자면에 맺히는 좌표이다. R, T 는 Main Arm Track에 탑재된 CCD 카메라의 회전(rotation), 병진(translation)을 나타내며 식 (2), (3)에 나타내었다.

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} r_1 &= \cos \psi \cos \theta \\ r_2 &= \sin \psi \cos \theta \\ r_3 &= -\sin \theta \\ r_4 &= -\sin \psi \cos \theta + \cos \psi \sin \theta \cos \phi \\ r_5 &= \cos \psi \cos \phi + \sin \psi \sin \theta \sin \phi \\ r_6 &= \cos \theta \sin \phi \\ r_7 &= \sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi \\ r_8 &= -\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi \\ r_9 &= \cos \theta \cos \phi \end{aligned} \quad (3)$$

III. 실험 및 결과

그림 3은 건설중에 있는 영광 6호기의 증기발생기의 전열관을 Sony 디지털 캠코더DCR-PC5로 찍은 영상이다. DCR-PC5는 1/4" CCD 센서에 10X 줌렌즈를 장착한 카메라이다. 증기발생기 수실내부가 밀폐되어 있고 외부 조명이 없는 관계로 캠코더에 부착된 조명장치를 이용하여 촬영을 하였지만 전 영상역역에 대해 균일한 S/N 특성을 갖는 영상을 얻지 못하였다. 향후 현장적용시에 S/N특성이 균일한 관측영상을 얻기 위해서는 조명에 대한 기법도 심도 있게 연구되어야 한다. 그림 3의 영상에서 상대적으로 전열관 세관의 원형패턴이 선명하게 표시되는 영역을 중심으로 영상처리를 수행하였다. 영상의 profile, projection, histogram 분석을 통해 배경과 원형패턴을 분리시키기 위한 최적의 threshold를 결정하고 2진화처리를 수행하였다. 배경과 분리된 세관의 원형패턴 영상을 라벨링 처리하고 각각의 라벨에 대해 size filter를 적용하여 에지부근과 S/N 특성이 나쁜 영역의 전열관 세관영상을 제거하였다. S/N 특성이 좋은 영역의 각각의 라벨 영상에 대해 무게중심을 구하여 전열관 중심점으로 취하였다. 추출된 하나의 세관중심으로부터 이웃하는 세관들에 대해 수평방향($0^\circ, 180^\circ$)과 정삼각형 방향($60^\circ, 120^\circ$)으로 직선을 도출하였다. 도출된 수평방향과 정삼각형 방향의 선분이 교차하는점들을 S/N 특성이 나쁜

나머지 영역의 세관들의 중심점으로 취하였다. 수평 방향 및 정삼각형 방향에 대한 직선은 Chi-Square 알고리즘을 이용하여 구하였다. [6] 이를 그림 4에 나타내었다.

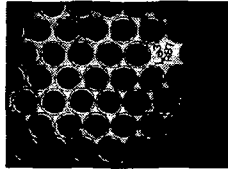
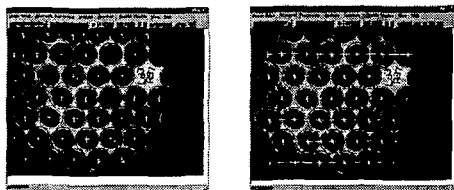
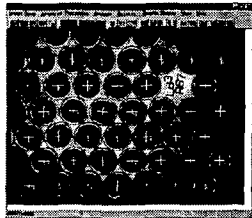


그림 3. 증기발생기 세관영상



4-(a)

4-(b)



4-(c)

그림 4. 증기발생기 세관 중심좌표 추출

그림 4(a)는 S/N특성이 좋은 영역의 전열관 세관의 중심좌표 추출영상이며, 4(b)는 이웃하는 세관들에 대해 수평/정삼각형 방향으로 직선을 도출한 영상이며 4(c)는 수평방향과 정삼각형 방향의 직선이 교차하는 점들을 전열관 세관의 중심으로 취한 영상을 나타내고 있다. 그림 4(c)의 영상이 증기발생기에 위치한 세관의 3차원 실공간상에서의 배열 좌표 X_w 가 2-D 인 CCD 소자면에 투영되어 맺히는 좌표 X_c 이다. X_w 는 알고 있으므로 추출한 X_c 를 이용하여 식(1)을 풀면 그림 1의 Main Track Assembly 베이스에 부착된 카메라의 기하학적 공간좌표 및 방향을 추출할 수 있다. Main Track Assembly에 부착된 카메라의 위치 및 방향을 이용하면 로봇매니퓰레이터 베이스의 기하학적 공간좌표 및 방향도 동시에 추정할 수 있다. 그림 5에 식(1)을 풀어서 구한 카메라 캘리브레이션 파라미터를 나타내었다.

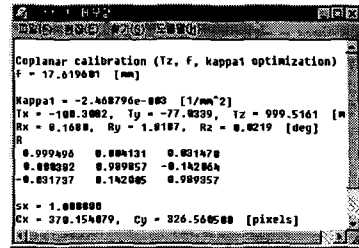


그림 5. 카메라 캘리브레이션 파라미터

IV. 결론 및 추후 연구

증기발생기 세관의 전체 영상중에서 상대적으로 S/N 특성이 우수한 일부영역을 처리하여 세관의 중심점을 추출하였다. 추출된 하나의 세관중심으로부터 이웃하는 세관들에 대해 수평방향(0, 180°)과 정삼각형 방향(60, 120°)으로 직선을 Chi-Square 알고리즘을 이용하여 도출하였다. 수평방향과 정삼각형 방향의 도출된 선분이 교차하는 점들을 세관들의 중심점으로 취하였다. 추출된 전열관 세관들의 중심좌표들과 증기발생기 세관배열의 규칙성을 캘리브레이션 플레이트로 활용하여 카메라 캘리브레이션을 수행하였으며, 이를 통해 로봇매니퓰레이터 베이스의 기하학적 공간좌표 및 방향을 추출할 수 있음을 확인하였다.

향후 ECT Probe의 위치를 감시하기 위해서 로봇매니퓰레이터의 카메라헤드 어셈블리에 장착되는 카메라의 영상정보를 이용한 캘리브레이션이 필요하며, 이를 위해서는 90mm 이하의 MOD를 갖고, 초점거리가 짧은 광각의 렌즈를 통해 획득되는 영상의 렌즈왜곡에 대한 보정연구가 선행되어야 한다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] 김승호 외, "원전용 로봇 시스템 개발", KAERI/RR-1359/93, 한국원자력연구소
- [2] 박성호 외, "증기발생기 세관 건전성 평가기술개발", KOPEC/NED/TR/2000-05, 한국전력기술주식회사, 2000. 3
- [3] Roger Y. Tsai, "A Versatile Camera Calibration Technique", IEEE J. Robotics and Automation, Vol. RA-3, No.4, August 1987.