

원자로 수중 탐상 로봇의 역기구학 및 제어에 관한 연구 Inverse Kinematics and Control of the Reactor Inspection Robot

*#이재철¹

*#J. C. Lee (jcleee2@kaer.re.kr)¹

¹ 한국원자력연구원 원자력융합기술개발부

Key words : Reactor, Inspection, Underwater, Robot, Kinematics, Control

1. 서론

원자력발전소의 중심에는 원자로라는 원통형의 용기가 있다. 이 원자로 안에 핵물질로 만든 핵연료를 넣고 핵반응을 일으켜 열을 내고 물을 끓이는데, 이 물이나 증기로 터빈을 돌려 전기를 생산한다. 원자로 압력 용기는 일반적으로 환형 구조물과 노즐 파이프들을 서로 용접하여 만든다. 그런데 이 용접 부위는 상대적으로 취약하기 때문에 용기의 건전성을 보증하기 위해서는 이 용접 부위에 대하여 결함이 생성되었는지를 주기적으로 엄밀하게 검사해야 한다.

현재까지 가장 보편적인 방법은 원자로 용기에 물을 채운 상태에서 초음파 탐촉자로 용접 부위를 스캐닝하면서 반향된 신호를 판독하여 결함의 유무를 판정하는 것이다. 그런데 작업자가 이 용기 안으로 잠수하여 수중 작업을 수행할 수가 없으므로 초음파 탐촉자를 장착한 수중 탐상 로봇을 진입시켜 검사를 자동적으로 수행한다.

본 연구팀에서는 그간의 원자로 검사 경험과 로봇 분야의 최신 기술을 기반으로 레이저 유도 방식의 자석바퀴식 소형 로봇 검사 장비를 개발하였다. 이 검사 장비는 소형 경량의 수중이동로봇 방식으로 운반 설치 및 해체가 간편하며 검사 시간을 줄일 수 있다. 본 논문에서는 이 새로 개발된 소형 수중 이동로봇을 기반으로 하는 원자로 자동 탐상 로봇의 기구학적 해석 및 이를 기반으로 한 레이저 유도제어에 관하여 서술하였다.

2. 시스템 구조

본 원자로 자동 탐상 시스템 (RISYS: Reactor Inspection System)는 원자로 탐상로봇 (RIROB: Reactor Inspection Robot), 레이저 위치 지시기 (LAPOS: Laser Pointer), 주제어컴퓨터 (MCS: Main Control Station) 그리고 초음파신호처리기 (SODAS) 등으로 구성되어 있다.

원자로 탐상 로봇 (RIROB): 원자로 탐상 로봇은 수중형 이동 로봇인데 공기 중에서 무게가 약 60 Kg 정도이고 수중에서는 float을 장착하여 자신의 무게가 소멸되도록 개발되었다. 원자로의 내부 벽을 수직으로 운동하기 위해 검사 로봇은 4개의 자석 바퀴를 가지고 있다. 원자로 탐상 로봇의 매니플레이터는 5개의 자유도를 가지는데, Arm Slide, Arm Twist, Arm Rotation, Arm Stretch, Probe Rotation.이다.

레이저 위치 지시기 (LAPOS): 로봇은 레이저 위치 지시기에 의해 유도되는데 이 지시기는 원자로 상단 플랜지를 가로지르는 I 형 프레임 중앙에 장착되어 있다. 이 레이저 위치 지시기는 diode laser가 부착된 팬틸트(pan-tilt) 형태의 장치로서 0.02 deg/step 이하의 해상도로 정밀하게 제어된다.

3. 역기구학

좌표계 설정 : 본 연구에서의 이동 로봇 방식의 기구학적 계산은 매우 복잡하다. 본 절에서는 본 검사자동화 시스템의 모든 절차와 운동 및 제어를 위한 일관된 좌표계를 정의하여 기구의 설계, 운동학적 계산 등에 있어서 그 기준으로 삼고자 한다. 즉 원자로좌표계,

로봇좌표계, 레이저 위치 지시기 좌표계 및 부수적인 여러 좌표계를 정의한다.

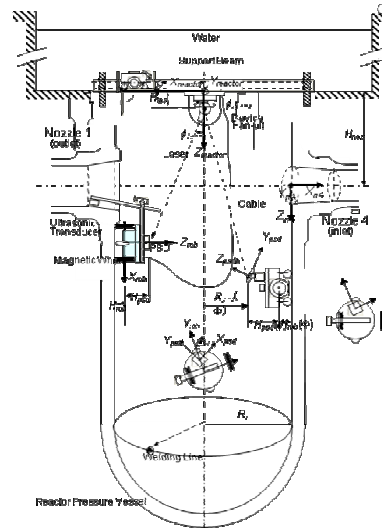


Fig.1 Coordinate system of the reactor (side view)

1) 원자로좌표계 (Reactor Coordinate): 원자로의 기하학적 위치에 고정된 좌표계로서 모든 위치 및 경로 계산에 기준이 되는 좌표계이다. 원자로 플랜지 면과 원자로 원통의 수직 중심선이 만나는 위치에 좌표계의 원점을 주며, 수직 하향으로 Z 축을 설정하고 좌측 방향으로 X 축, 지면속을 향하는 쪽으로 Y 축을 둔다. X 축부터 시계방향으로 회전한 각을 극 좌표계로 정의한다. 노즐의 번호는 앞의 X 축에서 가장 가까운 쪽을 노즐 1 번, 그 이후는 시계 방향으로 노즐의 번호를 부여한다.

2) 노즐부 좌표계 (Nozzle Coordinate): 각각의 노즐은 원통형 타이트와 원뿔형 타이트가 접합된 형태로 되어 있는데 노즐부 좌표계는 원뿔의 꼭지점에 노즐좌표계의 원점을 두고 노즐이 축선방향에 X 축을 둔다

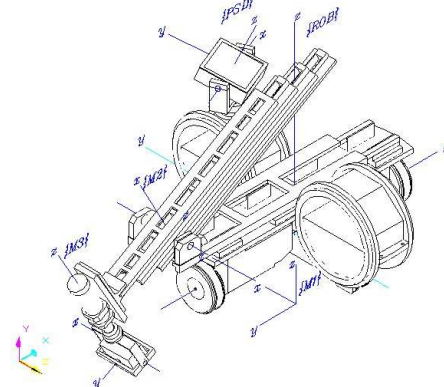


Fig. 2. Coordinate system of the reactor inspection mobile robot with 5 link manipulator

3) 로봇 좌표계 (Robot Coordinate): 수중 탐상 로봇에는 위치 감지 센서(DSD)가 탑재되어있는데, 로봇 좌표계는 원형 로봇의 중심축이 두 구동 바퀴의 축을

연결한 선과 교차하는 점에 좌표계의 원점을 둔다. 로봇의 수직 방향으로 Z_r 축을 정의하고 로봇의 전면방향으로 Y_r 축을 두며 로봇의 우측 바퀴 쪽으로 X_r 축을 둔다.

4) 매니플레이터 좌표계 (Manipulator Coordinate): 수중 탐상 로봇에는 초음파 탐촉자를 이동시킬 3 자유도의 다단식 매니플레이터가 장착되어 있는데, 이 매니플레이터 손 끝에 초음파 탐촉자가 달려 있고 여기에 Gripper 좌표계를 둔다.

5) 레이저 위치지시기 좌표계 (LAPOS Coordinate): 위치지시기의 회전 중심에 레이저위치지시기 좌표계의 원점을 둔다. 이 레이저 위치지시기는 2 자유도로서 각각의 링크에 고유한 좌표계는 일반적인 로봇 좌표계 정의 방식에 따른다. 이 밖에 여러가지 좌표계산을 위한 부좌표계들은 필요에 따라 정의하여 사용한다.

원자로의 반경, 노즐의 반경과 위치, 로봇의 사양에 관한 치수 등 많은 양의 변수를 정의하고 약어를 명명하여 사용한다. 원자로 탐상 로봇 몸체와 로봇에 장착된 매니플레이터 각 링크간의 기구학을 해석하여 정리하면 다음과 같다.

$${}^{ROB}_{M1}T = Trans(-k_1\theta_1, 0, H_1) ROT(y, -90^\circ) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -k_1\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & H_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{M1}_{M2}T = Trans(0, 0, D_2) ROT(z, k_2\theta_2) = \begin{bmatrix} \cos k_2\theta_2 & -\sin k_2\theta_2 & 0 & 0 \\ \sin k_2\theta_2 & \cos k_2\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & D_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{M2}_{M3}T = Trans(H_3, 0, 0) ROT(x, 90^\circ) ROT(z, k_3\theta_3) = \begin{bmatrix} \cos k_3\theta_3 & -\sin k_3\theta_3 & 0 & H_3 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin k_3\theta_3 & \cos k_3\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{M3}_{M4}T = Trans(0, D_4 + k_4\theta_4, 0) ROT(x, -90^\circ) ROT(z, 90^\circ) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & D_4 + k_4\theta_4 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{M4}_{M5}T = Trans(0, -h_{5press}, D_5) ROT(x, -90^\circ) ROT(z, -90^\circ) ROT(z, k_5\theta_5) = \begin{bmatrix} \sin k_5\theta_5 & \cos k_5\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -h_{5press} \\ \cos k_5\theta_5 & -\sin k_5\theta_5 & 0 & D_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{M5}_{M6}T = Trans(0, 0, H_6) ROT(x, 90^\circ) ROT(z, k_6\theta_6) = \begin{bmatrix} \cos k_6\theta_6 & -\sin k_6\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin k_6\theta_6 & \cos k_6\theta_6 & 0 & H_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{M6}P_{contact} = \begin{bmatrix} 0 \\ H_{probe} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

4. 레이저 유도 제어

이동 로봇을 사용할 경우 로봇의 위치를 정확히 제어하여 원하는 검사 부위에 로봇의 손끝 (탐촉자)를 정확히 위치시키는 것이 것은 핵심적인 과업 중의 하나가 된다. RISYS 는 원자로 플랜지 상단에 Cross Frame 을 설치하고 그 중앙에 레이저 포인터를 장착한 상태에서 이 레이저 빔의 주사 방향을 기준으로 모든 좌표 연산이 이루어진다.

레이저 포인터로 부터 발사된 레이저 빔을 인식하는 레이저 수광 센서 (PSD)는 RIROB 의 본체에 장착되어 있다. 레이저 빔이 PSD 표면의 한 점에 입사되면 로봇은 PSD 의 중심에서부터 입사점까지의 편향(Deviation)을 계산해 낸다. 그리하여 입사한 레이저의 위치가 항상 PSD 의 중앙에 오도록 좌우 바퀴를 구동하여 로봇을 움직인다.

5. 결론

원자력발전소의 원자로압력용기의 안전성을 확인하기 위한 원자로 탐상 로봇을 개발함에 있어 로봇의 기구학적 해석, 경로 해석 및 제어는 핵심적인 연구를 필요로 한다. 본 연구에서는 고안된 탐상 로봇을 정밀하고 정확하게 움직이기 위한 일련의 해석과 알고리즘을 제안하였다. 이동 로봇의 레이저 유도에 의한 제어 방법이 개발되어 수중 실험을 수행하였으며 이 실험을 통하여 도출된 여러가지 개선점은 새로운 로봇의 설계에 반영되어 이 새로운 장비가 원자로 검사를 실제 수행하게 되면 Critical Path Process, 안전성 향상, 그리고 검사의 신뢰성 개선과 같은 많은 이점이 기대된다.

후기

본 연구는 교육과학기술부 원자력연구개발 중장기사업으로 지원되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Fallon J. B., Shooter S. B. Reiholtz S. W. and Glass S. W. "URSULA: Design of an Underwater Robot for Nuclear Reactor Vessel Inspection." Proceeding of American Society of Civil Engineers, Specialty conference on robots for challenging environments, Albuquerque, NM (1994)
2. Brockelman C. A. "Robotic Inspection System for the Lower Head of a boiling Water Reactor Pressure Vessel", *Proc. of the ANS 5th Topical Meeting on Robotics and Remote Systems*. Tennessee, vol. 1, pp 409-415 (1993)
3. Kim J. H., Lee J. C. & Eom H. S "An Underwater Mobile Robotic System for Reactor Vessel Inspection in Nuclear Power Plants." International Symposium on Robotics and Manufacturing, Montpellier, France. (1996)
4. Kim J. H. "Robot based Reactor Vessel Inspection Technology at KAERI." Proceedings of 3rd KAIF/FAF Round table Conference, Seoul, Korea . (1995)