

증기발생기 노즐댐작업용 로봇 입/퇴실장치 기구학 해석

이재경, 김승호, 황석용, 김창희, 김민석

한국원자력연구소

요 약

증기발생기 노즐댐작업은 고방사선 구역에서의 극한작업으로서 로봇이 이 작업을 성공적으로 수행하기 위해서는 로봇을 증기발생기 수실 내부로 자동으로 입실시켜 노즐댐 장/탈착 작업시 로봇의 플랫폼을 역할을 담당함과 동시에 작업 완료후 로봇을 수실 외부로 회수하는 장치인 로봇 입/퇴실장치의 개발이 필수적이다. 본 연구에서는 증기발생기 노즐댐작업용 로봇시스템 개발을 위하여 로봇 입/퇴실장치의 최적설계를 위한 기구학 해석을 수행하였다.

1. 서 론

최근 정밀기계 및 제어기술의 혁신적인 발전에 힘입어 원자력발전소의 안전성을 높이고 작업종사자의 방사선피폭을 저감하기 위한 노력의 일환으로 고방사선 환경 하에서 인간을 대신하여 극한작업을 수행할 수 있는 로봇시스템의 개발이 활발히 추진되고 있다 [1-3]. 원자력발전소는 핵연료의 재장전을 위하여 일정기간동안 가동이 정지되는데, 이 기간동안 각종 검사 및 보수작업이 이루어진다. 이때 핵연료 재장전과 증기발생기 내부의 전열관 관련 작업을 동시에 수행하기 위하여 증기발생기 노즐링에 노즐댐을 장착, 불팅하여 원자로 수조의 물이 증기발생기로 유입되는 것을 차단하는 노즐댐작업이 수행된다. 현재 증기발생기 노즐댐작업은 전적으로 작업자에 의존하고 있으나, 수실 내부가 방사능으로 오염되어 있을 뿐아니라 매우 협소하기 때문에 작업에 큰 어려움이 따르고 있는 실정으로 무인자동화가 절실히 요구되고 있다. 그림 1 은 증기발생기 노즐댐작업의 무인화를 위한 로봇 시스템 구성도이다.

증기발생기 노즐댐작업을 무인화하기 위해서는 로봇을 증기발생기 수실 내부로 자동으로 입실시켜 노즐댐 장/탈착 작업중 로봇의 플랫폼을 역할을 담당함과 동시에 작업 완

료후 로봇을 수실 외부로 회수하는 기능을 가진 로봇 입/퇴실장치의 개발이 필수적이다. 그러나 로봇 입/퇴실장치의 설계를 위해서는 설치시 작업자의 방사선 피폭선량을 최소화 하며, 설치후 노즐덤과 작업공구의 운반에 지장이 없어야 하며, 긴급 상황 발생시 작업자가 맨웨이를 통하여 출입할 수 있는 공간을 확보할 수 있어야 하며, 작업자가 무리없이 운반, 설치할 수 있도록 경량화 되어야하는 등의 많은 제약조건이 따르게 된다. 따라서 본 연구에서는 로봇 입/퇴실장치의 최적설계를 위한 기구학 해석을 수행하였다.

2. 로봇 입/퇴실장치의 구조

로봇 입/퇴실장치는 발전소 내부의 증기발생기까지 쉽게 운반/설치될 수 있어야 하기 때문에 경량 제작되어야 함이 필수적이다. 그러므로 본 연구에서는 비교적 가벼우면서도 충분한 강성을 가진 재질인 CFRP를 로봇 입/퇴실장치의 재질로 선정하였으며, 선형가이드부와 회전가이드부로 분리 제작하여 체결장치를 이용하여 체결되도록 하였다. 회전링크와 고정링크로 구성된 회전가이드부는 증기발생기 맨웨이 후랜지에 부착되어 선형가이드부와 매니퓰레이터의 하중을 견디며 입실이 완료된 후 회전가이드부의 회전링크를 고정하기 위하여 Cam Locking 장치가 부착되어 있다.

입/퇴실장치가 입실을 완료한 후 로봇이 작업을 수행할 경우 선형가이드부는 큰 모멘트 하중을 받게된다. 따라서 두 개의 레일과 볼스크류를 사용하여 로봇이 선형운동을 원활하게 할 수 있도록 하였으며 입실완료시 선형가이드부를 증기발생기 바닥에서 지지할 수 있는 다리를 부착하여 작업시 휨이 최소화 되도록 하였다. 그리고 입/퇴실시 간섭을 줄이기 위하여 구동부를 다리 내부에 내장했으며 전선의 처리를 위하여 선형가이드부 내부에 파이프를 삽입하였다. 또한 선형가이드부 상부에 부착된 레일, 예압 등급이 높은 블록 및 스크류와 근접센서들을 오물의 침투, 외부공기와의 접촉에 의한 산화 및 제염시 고압수로부터 보호하기 위하여 자바라를 설치하였다. 그림 2 는 제작된 로봇 입/퇴실장치이다.

3. 기구학 해석

로봇 입/퇴실장치를 그림 3과 같이 모델링하여 기구학 해석을 수행하였다. 그림에서 링크 HBC 는 고정링크이고 링크 ADEF 는 회전링크이다. 회전링크는 스크류 BC 의 길이 변화에 따라 A 점을 기준으로 회전한다. l_1 과 l_2 는 각각 링크 AB 와 AC 의 길이를

나타내며 x 는 링크 BC의 길이를 나타낸다. x 는 가변으로서 입/퇴실장치 시스템의 입력이 된다. θ 는 링크 AB 와 링크 AC가 이루는 각도로서 입실각을 나타내며, 입/퇴실장치 시스템의 출력이 된다. x 는 구동모터를 구동시켜 워엄기어를 통하여 스크류를 회전시킴으로서 변화시킨다. 스크류의 길이가 최대가 될 때 입/퇴실장치는 입실이 완료되며, 입실 완료 시에는 입/퇴실장치의 다리 (Leg) 부분이 증기발생기 수실 내부 바닥에 닿게된다. 입/퇴실장치는 입실시와 퇴실시 기구학적으로 동일하므로 본 연구에서는 로봇을 장착한 후 입실이 완료될 때까지의 경우에 대하여 기구학 해석을 수행한다. 퇴실시 로봇이 완전히 빠져서 작업자가 장/탈착 작업을 원활하게 수행할 수 있기 위해서는 70° 정도의 회전링크 회전이 필요하므로 고정링크의 굽힘 각을 ϕ 라하면 $\theta_{\max} = \phi$, $\theta_{\min} = \phi - 70^\circ$ 가 된다.

그림 3 에서 $x^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos(\theta)$ 의 관계가 있으므로 정기구학 (Forward Kinematics) 은 다음과 같이 주어진다.

$$x = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos(\theta)} \quad (1)$$

식(1)로부터 역기구학 (Inverse Kinematics) 을 구하면 다음과 같다.

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - x^2}{2l_1l_2} \right) \quad (2)$$

입실 초기의 스크류의 길이를 x_{\min} 이라하고 입실이 완료되었을 때의 스크류의 길이를 x_{\max} 라하면 스크류의 행정은 $l_{stroke} = x_{\max} - x_{\min}$ 이 된다. 그런데, 실제로 스크류를 설계하기 위해서는 필요한 행정에 부가적으로 너트의 길이 등이 포함될 수 있도록 여유 길이가 더 필요하다.

스크류에 가해지는 축력은 입실 각도에 따라 비선형적으로 변화하게 되나 본 연구에서는 선형적으로 변화한다고 가정하였다. 입실 초기 시에 가해지는 하중 모멘트는 $M_i = 12,686 \text{ Kg}_f\text{-cm}$ 이고 입실 완료시의 하중 모멘트는 $M_f = 6,750 \text{ Kg}_f\text{-cm}$ 이므로 입실 각에 따른 하중 모멘트는 다음과 같이 주어진다.

$$M_L = -84.8 \theta + 12,686 \text{ Kg}_f\text{-cm} \quad (3)$$

여기서 θ 는 입실 각으로서 단위는 도이다.

이 하중모멘트에 의해 스크류에 가해지는 축력은 다음과 같이 계산된다.

그림 3 에서 $l_2^2 = l_1^2 + x^2 - 2l_1l_2 \cos \alpha$ 이므로

$$\cos \alpha = \frac{l_1^2 + x^2 - l_2^2}{2l_1x} \quad (4)$$

가 된다.

팔 길이는 $l = l_1 \sin \alpha$ 이므로 스크류에 가해지는 축력은 다음과 같이 계산된다.

$$F_{screw} = \frac{M_L}{l} \quad (5)$$

4. 시뮬레이션

로봇 입/퇴실장치의 최적설계를 위하여 주요 설계변수에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 민감도해석을 하였다. 그림 4 는 주요 설계변수인 링크길이 l_1, l_2 , 고정링크 굽힘 각도 ϕ 의 변화에 대한 스크류의 여유길이의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 링크 길이 l_1 이 증가할수록 스크류의 여유길이는 감소하며 링크길이 l_2 는 증가할수록 스크류의 여유길이는 증가함을 알 수 있다. 고정링크 굽힘 각도 ϕ 가 140° 보다 작을 경우에는 스크류의 여유길이는 거의 일정하나 이보다 커지면 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그림 5 는 링크길이 l_1, l_2 , 고정링크 굽힘각도 ϕ 의 변화에 대한 스크류 축력의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 링크 길이 l_1 이 증가할수록 스크류 축력은 감소하며 링크길이 l_2 는 증가할수록 스크류 축력은 증가함을 알 수 있다. 그리고 고정링크 굽힘 각도 ϕ 가 140° 보다 작을 경우에는 스크류의 여유길이는 급격히 감소하나 이보다 커지면 거의 일정함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 로봇 입/퇴실장치의 최적설계를 위한 기구학 해석을 수행하였다. 로봇 입/퇴실장치의 기구학 모델을 구하여 주요 설계변수인 링크 길이 l_1, l_2 와 고정링크 굽힘

각도 ϕ 가 스크류의 여유길이와 스크류 축력에 미치는 영향을 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 민감도 분석을 수행하여 종합적으로 평가하였다.

참고 문헌

1. J.R.White, Evaluation of Robotic Inspection Systems at Nuclear Power Plant, NUREG/CR-3717, 1984.
2. F.M.Smith, D.K.Backman and S.C.Jacobsen, "Telerobotic Manipulator for Hazardous Environments," *Journal of Robotic Systems*, pp.251-260, 1992.
3. J.Lochard, "Cost Effectiveness of Robotics and Remote Tooling for Occupational Risk Reduction at Nuclear Facilities," IAEA-CN-49/44.

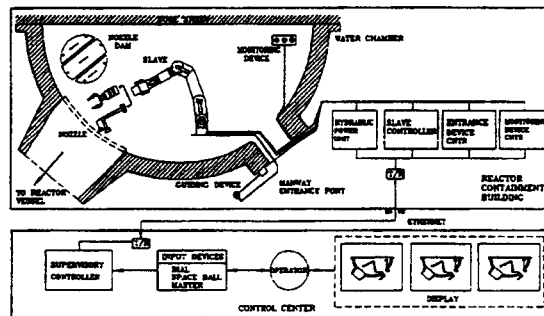


그림 1. 노즐담 장/탈착 작업 시스템 구성도.

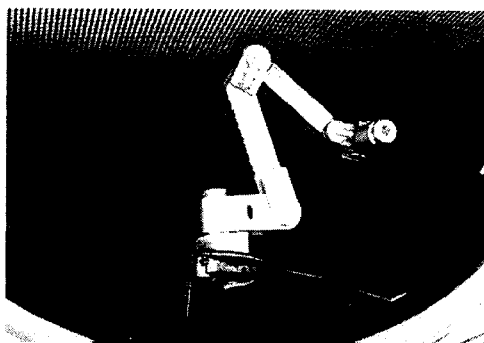


그림 2. 로봇 입/퇴실장치.

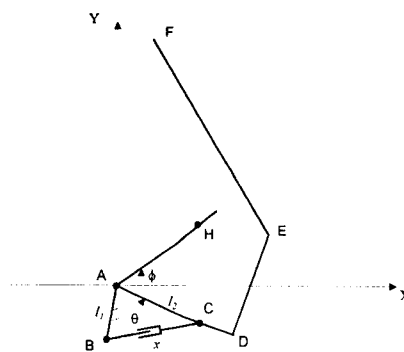
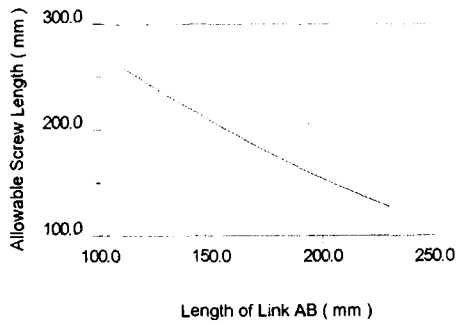
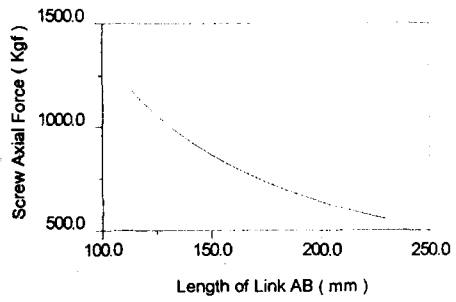


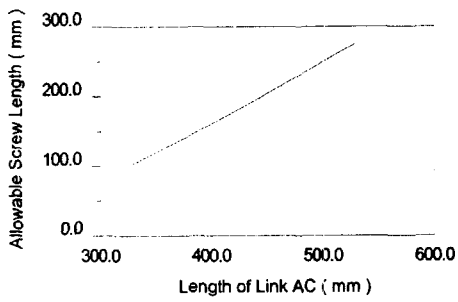
그림 3. 로봇 입/퇴실장치의 기구학 모델.



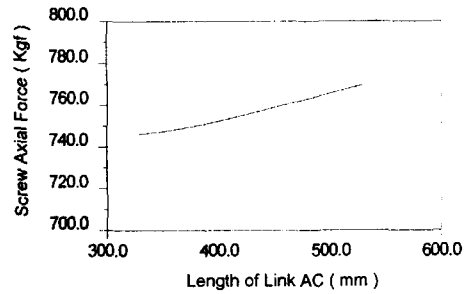
(a) 링크길이 l_1



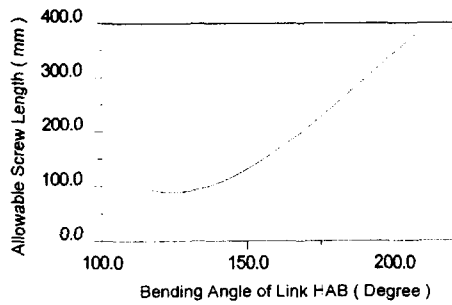
(a) 링크길이 l_1



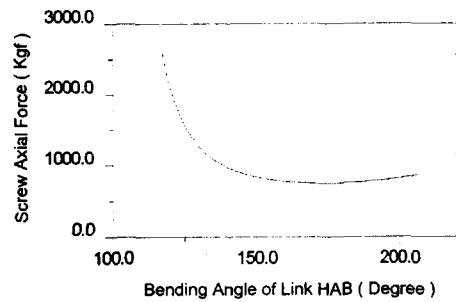
(b) 링크길이 l_2



(b) 링크길이 l_2



(c) 고정링크 굽힘 각도 ϕ



(c) 고정링크 굽힘 각도 ϕ

그림 4. 주요 설계변수의 변화에 대한 스크류 여유길이의 변화.

그림 5. 주요 설계변수의 변화에 대한 스크류 축력의 변화.