

원자력발전소 가압기 점검보수 로봇의 최적화 설계

Optimal Design of Robot for Inspection and Maintenance of Pressurizer in the Nuclear Power Plant.

°엄재섭*, 정승호**, 류봉조***, 김승호**

*대전산업대학교 기계설계공학과 대학원(Tel:+82-42-630-0352; Fax:+82-42-630-0351)

**한국원자력연구소 로봇개발실(Tel:+82-42-868-8837; Fax:+82-42-868-8833; E-mail:shjung2@nanum.kaeri.re.kr)

***대전산업대학교 기계설계공학과(Tel:+82-42-630-0359; Fax:+82-42-630-0351; E-mail:BJRyu701@hyunam.tnut.ac.kr)

Abstracts The robot manipulator for inspection of pressurizer in the nuclear power plant has been developed, which consists of four parts : 2 arms, movable gripper, base frame, control console. To extract the damaged electric heating rod inside pressurizer, the gripper has been developed using wire rope and self-locking mechanism. For the examination of the structural stability of the robot manipulator, stress analysis is performed by using the ANSYS Code.

Keywords ANSYS Code, Pressurizer, Self-Locking Mechanism, Robot Manipulator

1. 서 론

원자력발전소의 1차계통은 원자로, 증기발생기, 원자로냉각재 펌프 및 가압기로 이루어져 터빈에 고온고압의 증기를 공급해 준다. 이중 가압기는 1차계통의 압력을 전열관와 분무노즐을 이용하여 2,235psig로 일정하게 유지해주는 안전성과 관련된 중요한 기기로써 정기적으로 이상 유무를 검사하여야 한다.

본 연구에서는 가압기의 점검 보수시 작업자의 방사능 피폭량을 감소시키기 위해 가압기 내부의 이상상태를 조기에 점검하고, 보수할 수 있는 로봇 시스템 개발하였다. 로봇 작업은 가압기내에서 수행되어야 하므로 여러 가지 제한조건을 고려하여 설계되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서 개발된 로봇시스템은 2자유도를 갖는 팔부, 강선을 이용한 이동가능한 파지부, 기본 프레임 및 제어부로 구성되었다. 또한, 가압기 내부의 손상된 전열관 인출시 큰 하중이 요구되므로 ANSYS Code를 이용하여 로봇의 구조적 안정성을 평가하였다.^[1] 로봇 구성요소의 매개변수를 결정하고, 매개변수값을 만족시키도록 로봇팔의 요소를 설계 및 제작하였으며,^{[2][4]} 로봇팔의 성능을 실험적으로 측정하고, 수치해석과 실험을 통해 결과를 비교 검토하였다.

2. 점검 및 보수 로봇의 설계조건 및 시스템

2.1 로봇 설계조건

개발된 로봇이 고방사선의 제한 작업공간내에서 주어진 작업을 수행할 수 있도록 하기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

- 가압기의 내부는 지름이 2.8m, 길이 13m의 원통구조이며, 상부통에는 분무 노즐이 설치되어있다. 따라서 협소한 구역에서 충돌이 일어나지 않도록 설계되어야 한다.
- 가압기 내부는 고방사선에 의한 오염이 심각하므로 내방사선을 고려하여야 하며, 사용후 세정이 가능하도록하여야 한다.
- 가압기 맨홀의 직경이 40cm로서 로봇이 장착과 삽입이 가능

하도록 로봇의 장착부와 몸체의 크기가 결정되어야 한다.

- 가압기 맨홀로부터 9 m 아래에 위치한 전열관을 파지할 수 있어야 한다.
- 작업 현상이 협소하므로 로봇의 장/탈착 및 작업의 용이성을 위해 로봇의 경량화가 이루어져야 하며, 작동이 단순해야 한다.

이상의 설계조건을 만족하도록 로봇은 2자유도를 갖는 팔부, 강선을 이용한 이동 가능한 파지부, 제어부 네부분으로 설계되었다. 그림 1은 가압기내에 부착된 로봇을 3차원 그래픽을 이용하여 보여 주고 있으며, 그림 2는 로봇의 구성도이다.

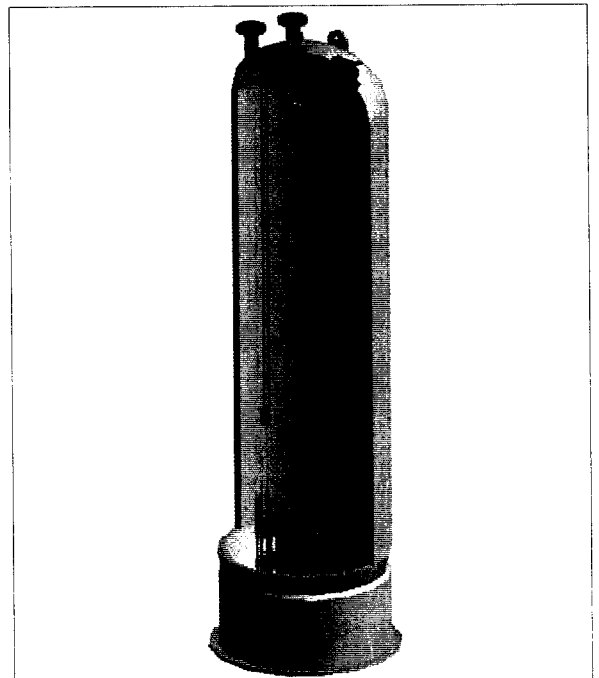


그림 1 가압기 및 로봇 시스템.

Fig. 1 The pressurizer and the robot system.

3. 로봇 요소 설계

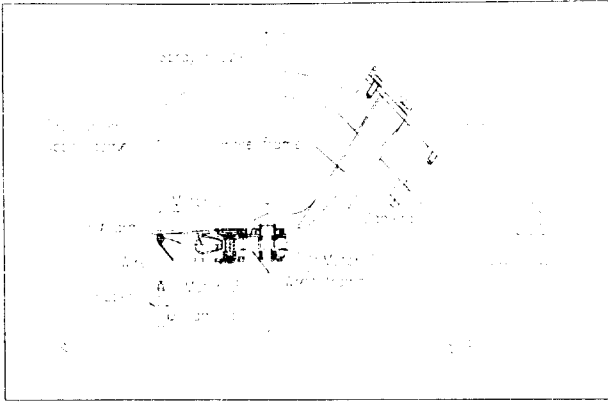


그림 2 로봇의 구성도.

Fig. 2 The schematic diagram of the robot system.

2.2 권선부 및 첫 번째 팔(Drum / First Arm)

권선부 부분은 가압기내에 있는 전열관을 제거 및 점검할 수 있는 파지부 및 기타 점검장비를 상·하로 움직이게 한다. 그림 2에서와 같이 첫 번째 팔은 강선을 감아올릴 수 있는 드럼과 드럼을 구동시키는 모터, 드럼과 모터를 고정하는 구조물 세부분으로 나눌 수 있다. 모터를 구동하면, 모터와 연결된 하모닉 드라이브 기어(Harmonic Drive Gear)에서 1/120으로 감속되어 드럼의 토오르크를 증대시키고, 드럼이 구동하면서 드럼 위에 강선을 감아 올리게 되어 있다.

2.3 중간 팔 (Middle Arm)

가압기 내부의 전열관은 등 간격의 원주 방향으로 두 열로 배치되어 있기 때문에 이 위치에 접근하기 위하여 로봇의 중간 팔은 첫 번째 팔을 회전시키는 기능은 한다. 구성은 그림 2에서 보는 바와같이 모터 부분과 구조물 부분으로 된다.

2.4 기본프레임(Base Frame)

기본프레임은 첫 번째 팔, 중간 팔을 고정시키는 부분이다. 기본프레임은 가압기내부에 들어갈 수 있는 맨홀 입구에 설치하므로 전열관 제거 작업공간과 첫 번째 팔, 중간 팔을 지탱해야 한다. 따라서 로봇의 첫 번째 팔, 중간 팔 보다 많은 힘을 받는 부분이다. 그러므로 안전성이 요구되어 ANSYS Code를 이용하여 구조해석함으로써 안전성을 평가하였다.

2.5 파지부/ 점검 장비 (Gripper/ Inspection tools)

파지부는 가압기내에 있는 전열관을 제거하는데 사용된다. 모터를 이용한 능동 강세 파지 방법은 인출중에 능동소자의 고장이 발생하면 작업자가 가압기 내부로 들어가 수리하기 때문에 이를 방지하기 위해서는 자율파지 장치가 필요하다. 본 연구에서는 전열관 각각의 지름이 동일하다는 점에 착안하여, 보울을 이용한 자율 파지 방법을 고안하였다. 고안된 파지장치는 볼과 스프링으로만 구성되므로 구조가 매우 간단하고, 동력 사용이 불필요하므로 고장 발생률이 매우 적다. 또한, 파지부에 무선 카메라를 설치하여 가압기 내부의 이상유무를 육안으로 점검할 수 있도록 하였다.

2.6 제어부

로봇팔의 제어는 원격시스템으로 제어방식은 개루프방식을 이용하였다. 카메라로 위치를 파악후, 제어장치의 스위치를 조절하여, 로봇팔을 필요한 위치에 이동시킨다.

3.1 로봇 팔의 길이 결정

가압기 내부공간과 전열관 위치를 고려하여 로봇 팔의 길이와 작업공간을 다음과 같이 결정한다. 그림 3은 로봇 팔의 길이와 작업공간을 보여주며, 로봇 팔의 길이를 결정하기 위해 다음과 같은 식을 얻는다.

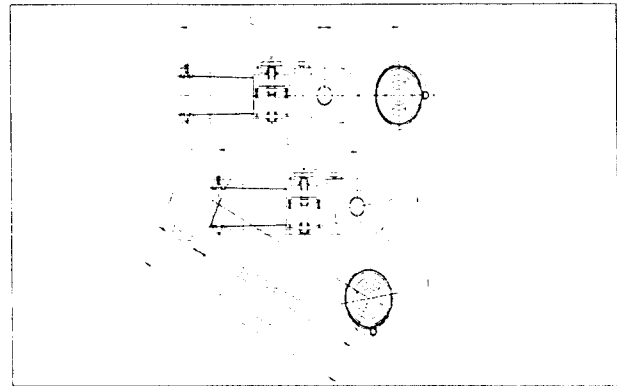


그림 3 로봇의 팔의 개략도.

Fig. 3 The schematic drawing of the robot arms.

$$d = b + c \quad (1)$$

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \alpha \quad (2)$$

$$\alpha \geq 90^\circ \quad (3)$$

위 식을 만족하는 로봇 팔의 길이를 결정한다. 식(1),(2),(3)에서 α 는 가압기 중심선에서 안쪽 전열관까지의 거리 559mm, d 는 가압기 중심선에서 바깥쪽 전열관까지의 거리 710mm, b 는 로봇 첫 번째 팔의 길이이고, c 는 로봇 중간 팔의 길이이다.

우선, $\alpha = 90^\circ$ 일 때 c 를 구하면, 식(1), (2)로부터, $c = 181.17\text{mm}$, 528.83mm 를 구할 수 있다. 식(3)을 만족하는 $\alpha > 90^\circ$ 을 얻기 위해, $c = 255\text{mm}$ 로 가정하며, 식(1)에 의해 $b = 455\text{mm}$ 가 되고, 식(2)에 의해 $\alpha = 100^\circ$ 가 된다. 로봇 팔 길이 $c = 255\text{mm}$, $b = 455\text{mm}$ 는 식(1), (2), (3)을 만족함으로써 로봇 팔 길이로 결정한다. 표 1에서는 상세 설계된 로봇팔의 각각에 대한 크기와 무게에 대하여 나타나 있다.

표 1 로봇의 기계적 세원.

TABLE 1 The mechanical specification of the robot.

항 목	첫번째팔	중간팔	기본프레임	파지부
무게(kg)	10	15	20	6
길이×폭×높이(cm)	40×16×17	43×18×17	100×60×80	φ10×13

3.2 로봇팔의 모터 선정

로봇팔의 운동방정식을 유도하는 방법은 크게 Newton Euler 방법과 Lagrangian 방법으로 나누어 진다. 본 연구에서는 Newton Euler 운동방정식을 이용하여, 토오르크와 동력을 구하였다.^[1] 표 2에는 계산된 각 관절의 토오르크와 동력이 나와있다.

표 2 각 관절 및 드럼의 필요 토오르크와 동력

TABLE 2 Required torque and power of the joints and drum.

항 목	관절 1	관절 2	드럼
토오르크(kg·m)	24	13	15
동력(W)	25	22	128
구동속도(m/min)	0.82	0.51	3.1

모터의 선정은 표2를 참조로 선정였으며, 관절 1은 360°, 관절 2는 180° 회전한다. 회전시 모터의 속도가 빠르게 되면 로봇 팔이 부딪히거나, 위치제어에 어려움을 주게되므로, 모터 1과 모터 2의 감속비는 592 : 1로 하였다. 표 3은 각 관절에 사용한 모터 및 드럼 구동용 모터의 제원을 나타낸다.

표 3 모터의 제원.

TABLE 3 The motor specification.

항 목	모터 1	모터 2	모터 3
종 류	직류모터	직류모터	직류모터
볼트(V)	24	24	32
정격소비동력(W)	15	9	100
회전속도(RPM)	4,800	5,900	3,000
전류(A)	0.09	0.055	4.5
감속기	592:1	592:1	1 : 1
토크 (kgf·m)	Stall	1,174	552
	Friction	378	204
		1,840	325

3.3 하모닉 드라이브 기어(Harmonic Drive Gear) 선정

로봇을 이용하여 전열관을 제거할 때, 드럼의 구동에 의해 전열관을 제거하게 된다. 이때 드럼속에서 모터와 드럼을 연결해주며, 전열관을 들어올릴 힘을 전달해주는 부분이 하모닉 드라이브 기어이다. 하모닉 드라이브 기어 선정은 표2와 같이 드럼에 작용하는 토크가 15kgm이고, 표4의 하모닉 드라이브 기어의 허용 모멘트가 16kgm인 CSF-25형 하모닉 드라이브 기어를 선정하였다.

표 4 하모닉 드라이브 기어 제원.

TABLE 4 The harmonic drive specification.

형 번	기본정격하중(kg)		허용모우멘트 (kg·m)
	동정격하중	정정격하중	
CSF-25	980	1,540	16

3.4 보울을 이용한 파지부 설계

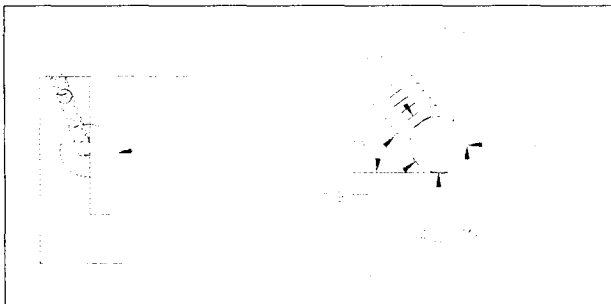


그림 4 로봇 파지부의 구성.

Fig. 4 The schematic diagram of the robot girpper.

파지부의 전열관을 들어 올릴 경우, 파지부에 작용하는 힘들을 그림 4에 나타내었다. 여기서 μP 가 파지부와 파지하고자하는 물체사이의 파지력이 된다. 그림에서 작용하는 힘들의 관계를 힘의 평형방정식에 의해 계산하면,

$$P = \frac{k\delta(\mu \sin \alpha - \cos \alpha + 1)}{(\mu + 1) \{ (\mu + 1)(\sin \alpha + 1) + (\mu - 1)\cos \alpha \}} \quad (4)$$

이 된다. 여기서 $k\delta$ 는 스프링 작용력, R_A 는 수직면과의 반력, R_B 는 경사면과의 반력, P 는 파지물체와의 반력, W 는 파지물체의 무게, μ 는 마찰계수이다. 파지부에는 3개의 보울을 이용하였으므로,

$$3\mu P \geq W \quad (5)$$

이다. 식(5)의 관계가 성립하면, 파지부는 물체를 파지할 수 있다.

4. 로봇 기본 프레임의 구조해석

로봇 시스템의 구조적 안전성을 평가하기 위해 ANSYS Code를 이용하여 기본 프레임에 대한 구조해석을 하였다. 로봇은 알루미늄 합금으로 하였고, 표 5는 로봇에 사용한 알루미늄합금에 대한 물성치이다.

표 5 알루미늄합금 물성치.

TABLE 5 The material property of aluminum alloy.

특성 재질	비중 KN/m ³	밀도 kg/m ³	탄성 계수 GPa	전단탄 성계수 GPa	프아 송비 ν	항복 응력 (σ _y) MPa	극한 응력 (σ _t) MPa
7075-T6	28	2,800	72	27	0.33	480	550

4.1 모델링

로봇 기본 프레임을 ANSYS Code로 모델링하면 그림 5와 같다. 모델링에서 사용된 ANSYS 요소종류로는 Shell 63를 사용하였다. 기본 프레임에 형성된 요소 수는 2,885요소이다.

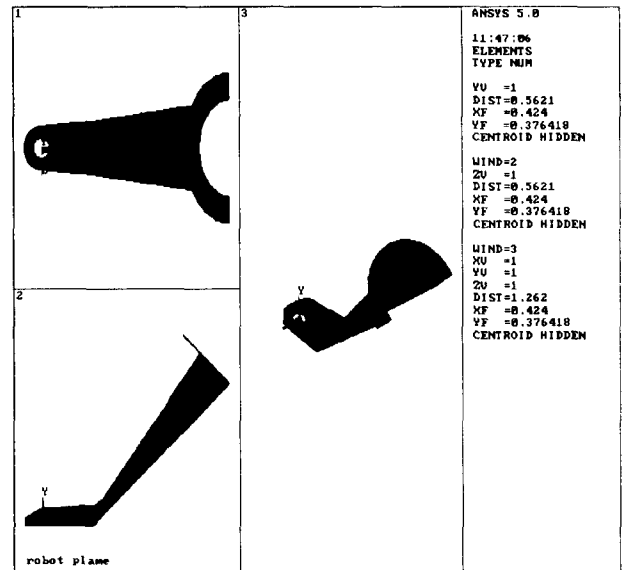


그림 5 로봇 기본 프레임의 ANSYS 모델.

Fig. 5 The ANSYS model of the robot base frame.

4.2 로봇 기본 프레임에 작용하는 힘과 경계조건

로봇의 관절 1 중심에서 첫 번째 관 끝단까지 거리는 730mm이고, 전열관을 들어올리는 힘 $P=1,200N$, 로봇의 팔자중 $W=400N$ 이다. 로봇 기본 프레임 밑면 원의 중심에서 y축 아래 방향으로 힘 F 이 작용한다. 이때,

$$F = P + W = 1,600N \quad (6)$$

이다. 밑면 원을 중심으로 x축 시계방향으로 모우멘트(M_x)가 작용한다. M_x 는

$$M_x = P \times D + W \times \frac{D}{2} = 1,022 Nm \quad (7)$$

이다. 로봇 기본 프레임의 경계조건으로 기본 프레임의 상단이 가압기 맨홀에 4개의 볼트로 고정된다.

4.3 로봇 기본 프레임 설계 분석 및 응력해석

ANSYS Code에 의해 로봇 구조해석 결과물 얻는다. 그림 6에서 로봇팔의 요소에 따른 응력 집중도(Stress Intensity Factor)를 나타내고 있다. 로봇팔의 응력집중을 그림 6에서 보면, 관절 1과 연결되어지는 부분에서 많은 응력이 발생함을 알 수 있다.

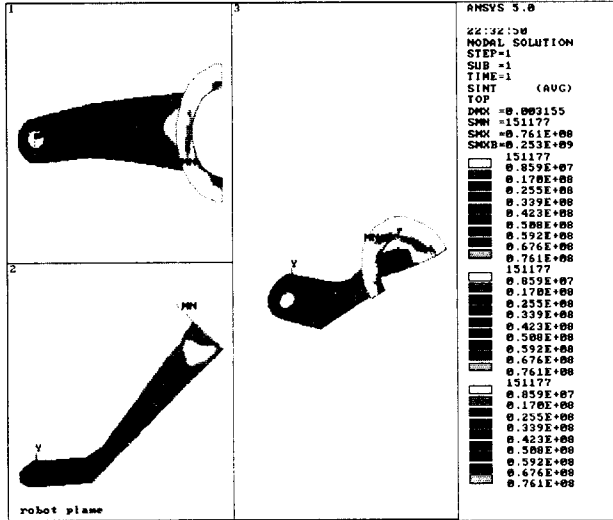


그림 6 ANSYS Code에 의한 응력집중도.

Fig. 6 The stress intensity factor calculated by the ANSYS Code.

연강 구조물의 좌굴이론에는 Tresca이론과 Von Mises이론이 있다. 연강 구조물 설계에 많이 이용되는 이론은 최대 전단응력 이론이다. 본 논문에서도 최대 전단응력 이론을 이용하여 평가하였다. 즉,

$$F_S \times \sigma_i < \sigma_3 \quad (8)$$

이 성립되어야 한다. 여기서, F_S 는 안전계수, σ_i 는 최대 응력 집중도이고, σ_3 는 재료의 항복응력이다. ANSYS Code에 의해 계산된 최대 응력집중도 σ_i 는 253MPa이고, 알루미늄합금의 항복응력 σ_3 는 480MPa이므로, 안전계수를 1.5로 했을 때, 식(9)에 의해

$$1.5 \times 253MPa < 480MPa \quad (9)$$

이 된다. 그러므로, 로봇 기본 프레임은 식(9)에 의해 로봇팔에 작용하는 하중과 모우멘트에 의해 로봇 기본 프레임이 안전함을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 원자력발전소 1차계통에 속하는 가압기내부에 있는 전열관을 제거하고, 가압기내부를 점검할 수 있는 로봇을 설계 및 제작하였다. 로봇의 설계는 각 부재의 요소설계와 전체 시스템의 응력해석을 통하여 이루어 졌다. 연구결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

1. 원자력발전소와 같은 방사능 오염지역과 사람이 작업할 수 없는 위험한 작업을 하는 로봇의 하드웨어 제작에 들어가기 전에 ANSYS Code를 이용하여 시스템의 안전성 검토와 수치해석을 수행하였다. 수행결과 로봇 기본프레임의 ANSYS Code의 최대응력치 380MPa는 알루미늄합금의 항복응력 480MPa보다 낮으므로 안전하다.

2. 사전에 컴퓨터 시뮬레이션과 수치해석을 통해, 로봇제작에 들어감으로써 시간절약과 경제성을 높였다.
3. 가압기내에 있는 전열관을 제거하기 위해서 간단하면서, 실용적인 보울을 이용한 자울파지 방법을 고안하여 제작하였다.
4. 로봇의 활용으로 위험 지역에서 일하는 작업자의 안전을 도모할 수 있다.

참고문헌

- [1] ANSYS User's Manual, Vol. I-IV, Swanson Analysis System, Int, 1992
- [2] Benjamin C.Kuo, Jacob Tal, *DC Motor and Control Systems*, SRL, Illinois, 1978
- [3] John J. Craig, *Introduction to Robotics*, Addison-Wesley, Massachusetts, 1989
- [4] Harrold A. Rothbart, *Mechanical Design Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1996
- [5] Joseph E. Shigley, Charles R. Mischke, *Standard Handbook of Mechine Design*, McGraw-Hill, New York, 1996
- [6] Arora J. S, *Introduction to Optimum Design*, MaGraw-Hill, New York, 1989
- [7] 김태룡, 박진석, 정승호, 김승호, *로봇 최적화 설계 기술개발*, 과학기술처 보고서, 1995