

연구로 1, 2 호기 회전시료조사대 수중분해장비
클램프 설계를 위한 응력 해석

Analysis of Stress to Design Clamping Device of the Underwater
Cutting Equipment for Rotary Specimen Rack(RSR) of KRR-1&2

이동규, 김성균, 이근우, 박진호
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

연구로 1, 2 호기의 기기중 가장 방사능 준위가 높은 회전시료조사대(Rotary Specimen Rack, RSR)의 스테인레스 스틸 부분을 분리하기 위하여 수중분해장비를 개발하고 있다. 그 중에서 회전시료조사대를 고정하는 유압클램프는 수중절삭작업을 수행하는데 있어서 회전시료조사대를 변형시키지 않으면서 확실한 지지력을 제공해야 한다. 따라서 유압 클램프에 의해 가할 수 있는 최대 지지력이 어느 정도 인지 확인할 필요가 있다. 본 연구에서는 ANSYS 코드를 이용하여 클램프가 가하는 지지력에 대해서 회전시료조사대에 분포되는 응력과 지지력에 따른 변형을 해석하였다.

Abstract

The underwater cutting equipment are developing to disassemble stainless steel parts in Rotary Specimen Rack (RSR). The stainless steel parts are the most highly activated parts among the equipments in KRR-1&2. The clamping device should fix RSR without any deformation during underwater cutting. It is important to analysis maximum pressure fixing RSR by clamping device. In this study, the stress distribution and the deformation for clamping force using ANSYS code.

1. 서 론

국내 최초의 연구용 원자로 1, 2 호기(KRR-1&2)는 각각 1962년과 1972년에 가동을

시작하여 국내 원자력 발전에 많은 기여를 하였다. 그러나 하나로의 정상가동으로 효율가치를 상실하고, 시설의 노후화로 인해 1995년 두기 모두 가동을 중지하였다. 1997년에 연구로 1, 2호기 해체사업을 착수하여 현재 원자로 2호기의 주변시설에 대한 해체작업이 진행되고 있다.

연구로를 해체할 경우 많은 양의 방사성고체폐기물들이 발생하게 되는데 그 중에서 연구로 1, 2호기에 있는 3개의 회전시료조사대(Rotary Specimen Rack)는 내부의 스테인레스 스틸 부품 등이 중성자 조사에 의한 방사화로 방사능 준위가 상대적으로 높은 것으로 평가되어, 연구로 해체폐기물 분류기준에 의거 중·저준위인 것으로 나타났다[1,2]. 그러나 방사능 평가 오차 및 보수성 등을 고려하여 회전시료조사대 내부의 스테인레스 스틸 부품은 중준위 고체폐기물로 분류하게 되었다. Fig. 1은 회전시료조사대의 모습을 보여주고 있다[3].

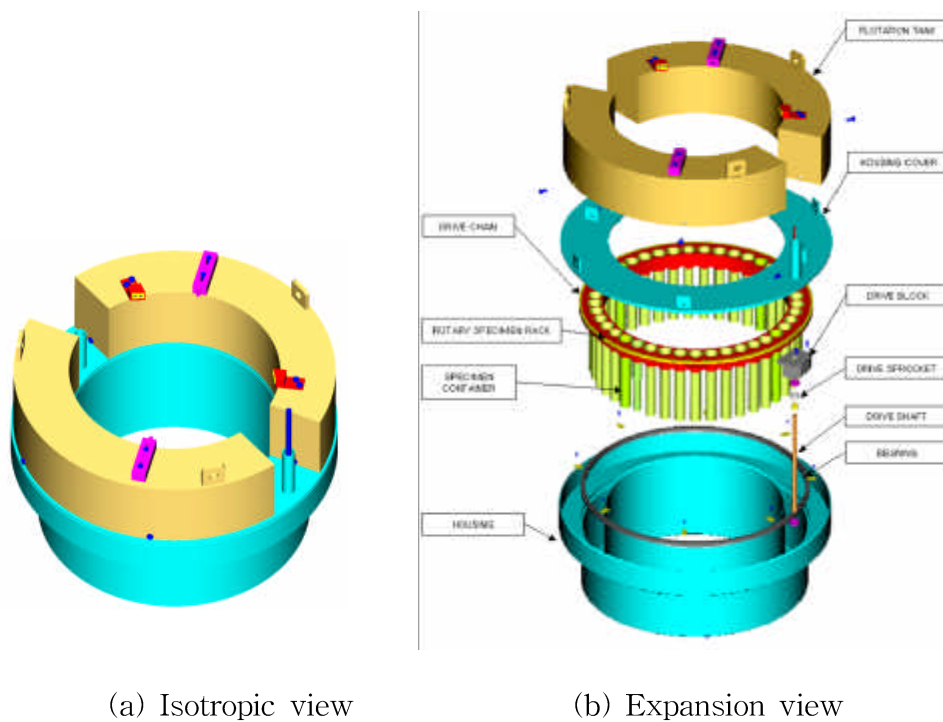


Fig. 1 Full 3D modeling of Rotary Specimen Rack

현재 회전시료조사대는 총 3개가 있으며, 이중 2개는 연구로 1호기에서 사용된 것으로서 원자로 수조로부터 제거되어 실험수조 내에 보관되어 있고, 연구로 2호기의 회전시

료조사대 1개는 2호기 원자로 수조 내에 있다. 연구로 2호기 회전시료조사대는 수중에서 노심으로부터 원격으로 분리한 후 차폐용기에 담아 연구로 1호기 실험수조로 이송하고 여기서 Fig. 2와 같은 수중분해장비를 설계하여 수중에서 분해, 절단작업을 하게된다. 이때 회전시료조사대의 알루미늄 탱크 등에 포함되어있는 스테인레스 스틸 부품을 분리, 수거하여 중준위폐기물로 처리하고, 나머지 알루미늄 부품은 저준위폐기물로 처리할 계획이다. 분리된 스테인레스 스틸 부품은 연구로 운영시 사용하였던 사용 후 핵연료 이송용기 (TIF Cask)에 담아 저장 관리하게 된다[4].

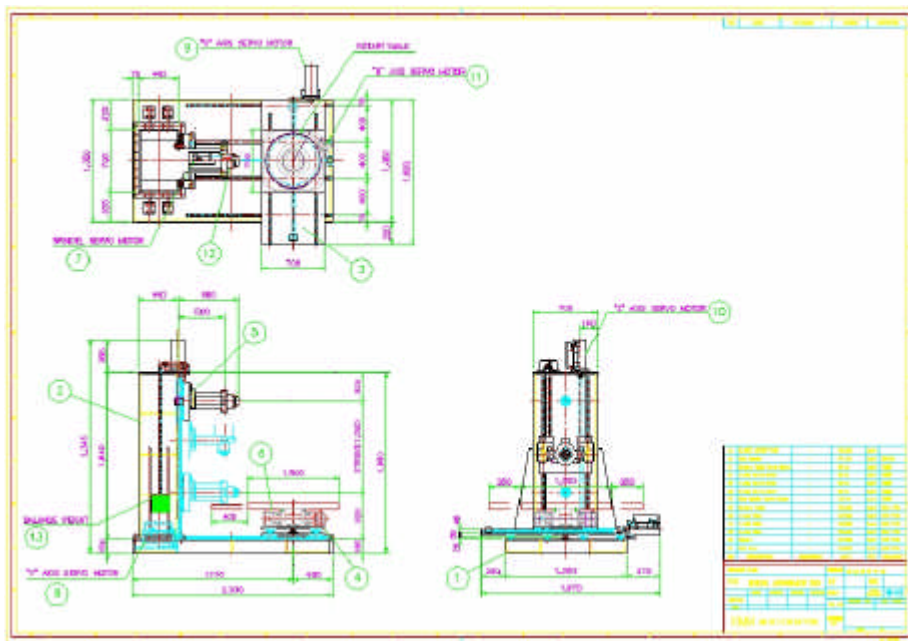


Fig. 2 A Design Drawing of Underwater Cutting Equipment

수중분해장비의 여러 부품 설계중 회전시료조사대를 고정하기 위한 유압 클램프는 수중절삭 작업을 수행하는데 있어서 회전시료조사대의 확실한 지지력을 제공해야 한다. 그러나 너무 무리한 힘을 가하여 회전시료조사대가 부서지거나 파손되어 고방사성 부위가 떨어져 나가면 2차 오염으로 인하여 심각한 문제가 야기 될 수 있다. 또한 고방사성 부분에 대한 정밀절삭이 요하는 부분에서는 유압 클램프의 압력에 의한 변형이 작아야만 정밀절삭작업을 수행 할 수 있다. 따라서 유압 클램프에 의해 가할 수 있는 최대 지지력이 어느 정도 인지 확인할 필요가 있다. 유압클램프의 적정 지지력을 구하기 위하여 다음과 같은 조건을 주어 지지력을 계산하였다. 유압 클램프가 가하는 힘에 대한 지지부의 최대 등가응력(Von-Mises Stress)값이 지지부의 재질인 알루미늄의 최대탄성영역을 벗어 나지 않아야 하며, 탄성영역 내에서 가해질 수 있는 최대의 힘을 회전시료조사대를 고정

하기 위한 지지력으로 설정하였다.

본 연구에서는 회전시료조사대를 고정하기 위한 유압 클램프의 지지력을 ANSYS 코드를 이용하여 계산하였다.

2. 본론

2.1 응력해석에 대한 이론적 배경

회전시료조사대를 고정하기 위한 지지압력을 계산하기 앞서 등가응력에 대한 이론적인 식을 살펴보면 다음과 같다.

본 해석은 탄성영역 내에서 수행하고 전단은 무시하는 것을 가정하였다. 이에 대한 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\{\sigma\} = [D](\{\epsilon\} - \{\epsilon^{th}\}) \quad (1)$$

$$\{\epsilon\} = [B]\{u\} \quad (2)$$

여기서 $[D]$ 는 강성행렬을 나타내고 $[B]$ 는 본 연구에서는 온도에 대한 영향을 무시하기 때문에 $\{\epsilon^{th}\}$ 항은 0이 된다. 따라서

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (3)$$

이 된다.

주 변형률 $[\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3]$ 는 3차 방정식에 의한 변형률 구성요소로부터 계산된다.

$$\begin{vmatrix} \epsilon_x - \epsilon & \frac{1}{2} \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \frac{1}{2} \epsilon_{xy} & \epsilon_y - \epsilon & \frac{1}{2} \epsilon_{yz} \\ \frac{1}{2} \epsilon_{xz} & \frac{1}{2} \epsilon_{yz} & \epsilon_z - \epsilon \end{vmatrix} = 0 \quad (4)$$

Von-Mises 또는 등가(equivalent) 변형률 ϵ_e 는 다음과 같이 계산된다.

$$\epsilon_e = \left(\frac{1}{2} \left[(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2 \right] \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

주 응력 ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)은 3차 방정식에 의한 응력 구성요소들로부터 계산될 수 있다.

$$\begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma & \frac{1}{2} \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \frac{1}{2} \sigma_{xy} & \sigma_y - \sigma & \frac{1}{2} \sigma_{yz} \\ \frac{1}{2} \sigma_{xz} & \frac{1}{2} \sigma_{yz} & \sigma_z - \sigma \end{vmatrix} = 0 \quad (6)$$

Von-Mises 또는 등가(equivalent) 응력 σ_e 는 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma_e = \left(\frac{1}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right] \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

2.2 ANSYS를 이용한 등가응력 계산

회전시료조사대를 고정하기 위한 적정 지지력을 계산하기 위하여 본 논문에서는 ANSYS를 사용하여 클램프가 가하는 지지력에 대해서 회전시료조사대에 분포되는 등가 응력을 계산하였다. Fig. 3은 회전시료조사대를 고정하기 위한 클램프의 설계도면을 보여 주고 있다. 회전시료조사대를 고정하기 위하여 4개의 유압 실린더를 90도 간격으로 배치 하였으며, 실린더형 클램프가 회전시료조사대의 홀 안쪽에서 바깥쪽으로 팽창시켜 고정하게 된다.

Fig. 4은 클램프의 적정 지지력을 구하기 위한 응력해석 절차를 나타내고 있다. 먼저 해석에 필요한 초기 데이터를 입력하고 ANSYS를 이용하여 Von-Mises Stress를 구한다. 여기서 최대 Von-Mises Stress가 재료의 항복강도와 크거나 같으면 해석을 종료하고 그렇지 않으면 유압에 의해 가해지는 압력을 증가시켜 해석을 다시 수행한다[5].

위와 같은 해석 절차를 이용하여 알루미늄의 항복강도인 280 MPa과 최대 Von-Mises Stress와 같아질 때 조가 가할 수 있는 최대압력은 1,086,000 Pa로 계산되었다. Fig. 5는 항복강도인 280 MPa에 도달하였을 때의 응력분포를 나타내고 있으며, 그림은 상하 좌우 대칭이므로 1/4만 해석을 수행하였다.

Fig. 6은 최대항복강도인 280 MPa로 가해질 때 최대 변위량을 나타내고 있으며 최대

변위량은 약 6 mm 정도로 계산되었다.

해석 결과를 종합해 보면 최대항복강도인 280 MPa에 도달하기까지 가할 수 있는 최대 압력은 1,086,000 Pa이고 이때의 최대변위량은 6 mm로 비교적 변위량이 작은 것을 알 수 있다. 따라서 유압 클램프 설계시 유압 클램프가 가할 수 있는 최대 압력을 약 1,000,000 Pa로 정하는 것이 변위가 크게 일어나지 않으면서 회전시료조사대를 가장 견고히 고정할 수 있는 최대 압력임을 알 수 있다.

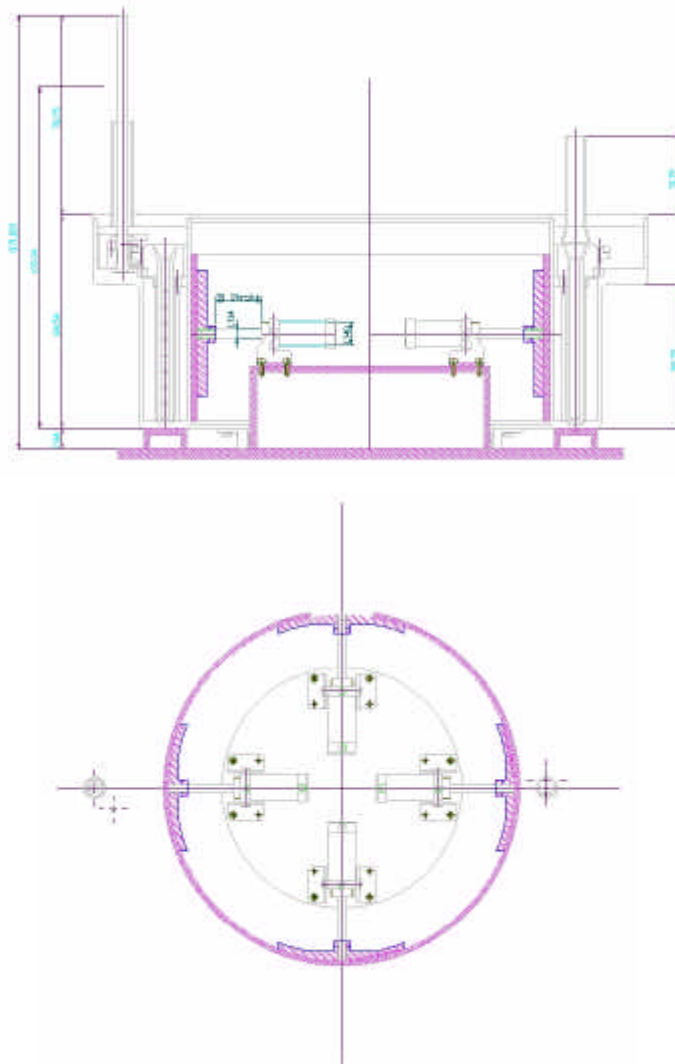


Fig. 3 Hydraulic Clamp to Fix RSR

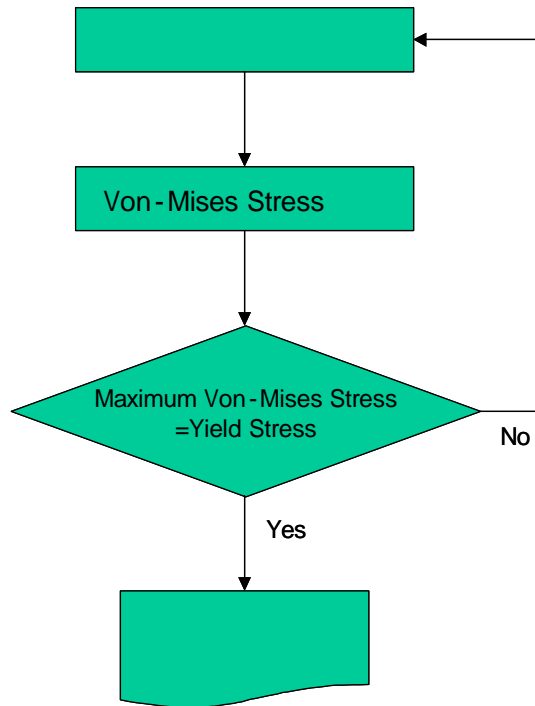


Fig. 4 Procedure of Stress Analysis

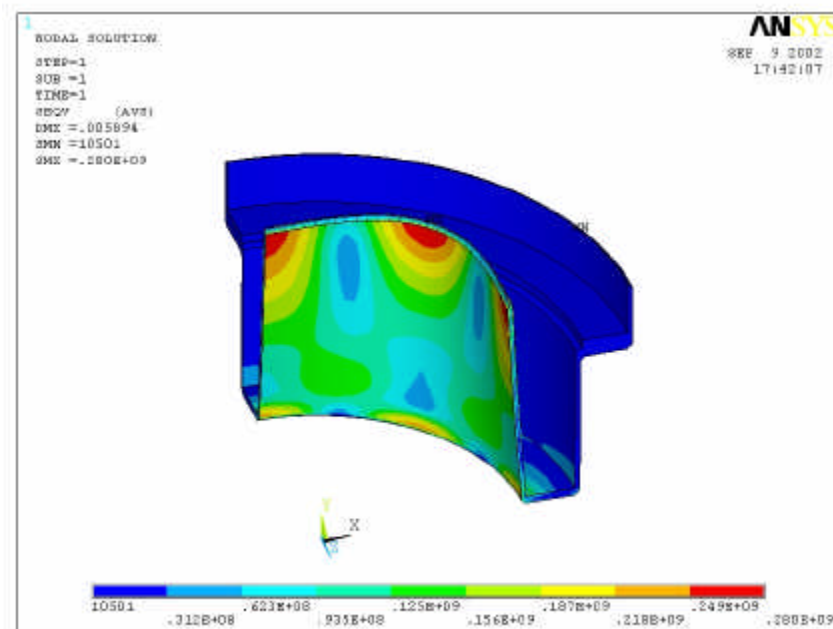


Fig. 5 Maximum Von-Mises Distribution of RSR

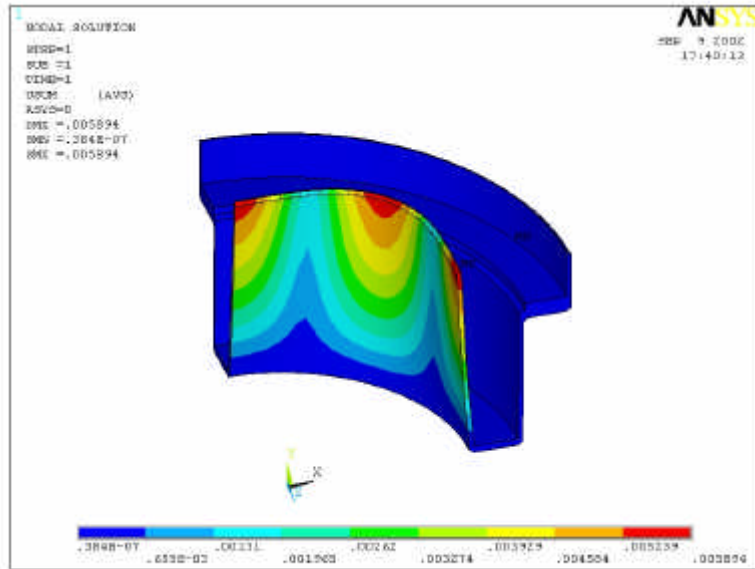


Fig. 6 Maximum Displacement of RSR with respect to Yield Stress

3. 결론

연구로 1, 2호기에서 가장 방사화가 높은 것으로 평가되고 가장 취급이 어려운 회전시료조사대(RSR)를 해체하기 위한 수중분해장비에서 RSR를 고정할 수 있는 유압 클램프 설계시 RSR의 최대 변위량을 최소화하면서 지지압력을 최대화 할 수 있는 압력을 계산하였다.

ANSYS 코드를 이용하여 응력을 해석한 결과 RSR의 알루미늄 부품에 대한 최대항복강도인 280 MPa에 도달하기까지 가할 수 있는 최대 압력은 1,086,000 Pa이고, 이때의 최대변위량은 6 mm로 비교적 변위량이 작은 것으로 평가되었다. 따라서 유압 클램프 설계시 유압 클램프가 가할 수 있는 최대 압력을 약 1,000,000 Pa로 정하는 것이 변위가 크게 일어나지 않으면서 회전시료조사대를 가장 견고히 고정할 수 있는 최대 압력이다.

본 연구의 결과를 바탕으로 현재 연구로 1, 2호기 회전시료조사대 수중분해장비를 설계하고 있으며, 설계 완료후 시작품을 제작하여 검증실험을 할 예정으로 있다.

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중·장기 계획사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 정기정 외, 연구로 1호기 및 2호기 폐로사업 해체계획서, KAERI/TR 1654/2000, 한국 원자력 연구소, 2000
- [2] “Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material”, Safety Standard Series ST-1, IAEA, 1996
- [3] 정운수 외, 연구로 1, 2호기 회전시료조사대 해체작업 공정분석 및 수중분해장비 개발, 한국원자력학회 2002 춘계학술발표회, 2002
- [4] 이동규 외, 연구로 1, 2호기 해체에 따른 방사성고체 폐기물 관리방안 연구, 한국원자력학회 2000 춘계학술발표회, 2000
- [5] ANSYS Engineering Analysis System User's Manual for Revision Swanson Analysis System, Inc., 1992