

원자로 부품의 수중 밀링 가공을 위한 4축 밀링 머신의 설계

이동규*(한국원자력연구소), 이기용(한국원자력연구소), 김성균(한국원자력연구소),
이근우(한국원자력연구소), 박진호(한국원자력연구소)

Design of 4-axes Milling Machine for Underwater Milling of Nuclear Reactor Parts

D. G. Lee(KAERI), K. Y. Lee(KAERI), S. K. KIM(KAERI), K. W. Lee(KAERI), J. H. Park(KAERI)

ABSTRACT

A new milling machine was designed and manufactured for underwater cutting of rotary specimen racks(RSR) used in the Korea Research Reactor. To cut out intermediate level radioactive stainless steel parts from RSR effectively and safely, the machine was designed to be operated in four directions of X, Y, Z axes and a rotation upon Z axis. The stress and displacement of main frame were simulated by using a structural analysis tool(Design Space) and the pressure of clamping device was evaluated.

Key Words : Research Reactor(연구로), Rotary Specimen Rack(RSR : 회전시료조사대), Underwater Cutting(수중절삭), Structural Analysis(구조해석), Design(설계)

1. 서론

원자력 산업 전반에 걸쳐 최근 가장 활발히 진행되고 있는 분야는 원자력 시설의 해체 기술이다. 원자력 시설 중 연구로 1, 2호기에서 사용된 회전시료조사대(RSR : Rotary Specimen Rack)와 같이 방사화된 부품은 그대로 방사성 폐기물 저장용기에 방사능 노출이 방지된 밀봉 상태로 지정된 장소에 반영구적으로 저장, 관리하도록 되어 있다. 그러나 회전시료조사대의 경우 주 구성재질인 알루미늄은 중성자에 의해 방사화가 거의 되지 않는 반면, 스테인리스 스틸 부분은 방사화가 많이 되어 방사능 준위가 높게 된다. 이렇게 비방사화 부분과 방사화 부분을 함께 폐기시킬 경우 불필요하게 방사성 폐기물의 발생량이 증대되고 방사성 폐기물 저장용기가 커지게 되는 문제점이 발생하며, 이는 자원의 낭비와 저장시설의 확충에 의한 소요 경비 증대를 야기시킨다.⁽¹⁾

이에 따라, 각종 원자로의 사용부품을 방사화 부분과 비방사화 부분으로 분해하는 기술이 요구되는 바이며 안전하고 주위 환경에 영향을 미치지 않도록 해체 작업을 수중에서 수행하는 방안이 고려된다. 회전시료조사대의 경우 알루미늄 본체와 스테인리스 스틸 부품을 분해하기 위해서는 절단 및 절삭 작업이

필요하며 이와 같은 작업이 수중에서 수행되기 위해서는 기존의 가공기와는 달리 수중에서 원활한 절삭 가공이 가능한 새로운 개념의 가공기의 개발이 요구된다.⁽²⁾

본 연구에서는 수중에서 회전시료조사대를 가공하기 위해 4축 밀링 머신을 개발하였다. 개발된 밀링 머신은 X, Y, Z방향의 3축과 Z방향 회전축이 더해져 4축 구동이 가능하므로 고방사화 되어 방사능 준위가 높은 스테인리스재의 분리 가공이 원활하게 수행될 수 있으며 main frame과 clamping device의 구조해석 및 지지력 평가를 수행하여⁽³⁾ 회전시료조사대를 안정적으로 가공할 수 있도록 하였다.

2. 구조설계 및 기계요소

수중 밀링 가공을 실현하기 위해서는 우선적으로 수중에서 녹이 발생되지 않는 재료를 사용하여 밀링 머신을 제작하여야 하며, RSR의 크기 및 형상을 고려하여 고정장치 및 테이블의 설계와 주축 및 이송축의 구동범위를 설정하여야 한다.

Fig. 1에 설계된 밀링 머신의 조립도와 사진을 나타내었다.

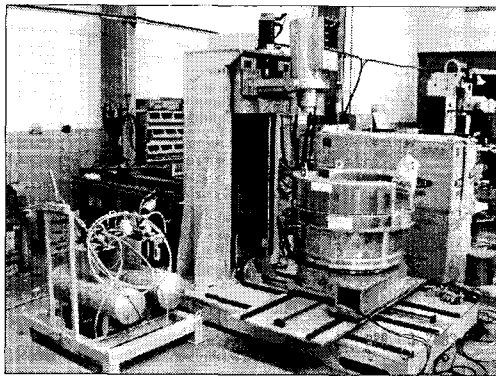
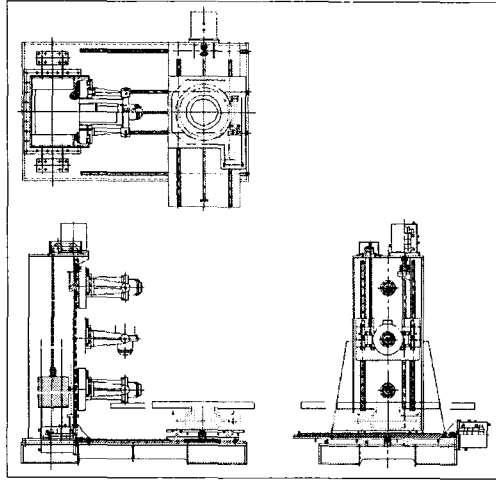


Fig. 1 Drawings and photo of the manufactured milling machine for underwater cutting

본 밀링 머신은 X, Y, Z의 3축 동시제어가 가능하며 작업 테이블이 Z축에 대해 회전하며 주축이 회전하여 수평·수직 절삭이 가능하도록 설계하였다. X, Y, Z축의 행정거리는 각각 900mm, 640mm, 1400mm이고, 테이블이 Z축에 대해 360°회전이 가능하다. 본 밀링 머신은 각 축과 회전 시스템의 소재를 내부식성 및 강성을 고려하여 SUS316L을 사용하였고, 실링된 스피들과 테이블의 이송을 위한 직선운동 안내기구(linear motion guide) 및 볼스크류(ball screw), 주축의 회전과 위치제어용 서보모터(servo motor), CNC 콘트롤러로 구성하였다. 베드는 수중에서 중량 감소로 인한 진동 발생을 방지하기 위해 충분한 중량을 가지도록 설계하였다.

2.1 주축 및 직선운동 안내기구

주축은 서보모터를 사용하여 5000rpm까지 구동이 가능하고 수직 및 수평에서 작동이 가능하도록 설계

하였으며, 서보모터의 Mounting Flange에 주축의 Bearing Housing을 설계하여 간단한 구조로 설계하였다. 또한 주축의 원활한 상하 구동을 위해 주축의 중량과 일치하는 평형추(balance weight)를 제작하여 주축과 연결하였고, 주축 유니트의 공구교체와 위치변경을 용이하게 할 수 있는 빠른 교체 시스템을 설계하여 적용하였다.

이송을 위한 직선운동을 위해 양단에 LM guide 2축을 설치하고 그 중간에 볼스크류를 설치한 후 끝단에 모터를 연결하여 모터의 회전운동을 직선운동으로 변환하였다. 작업 테이블의 회전을 위해 작업 테이블 하단부에 worm wheel을 설치하고 그 아래 테이블에 worm gear를 설치한 다음 끝단부에 모터를 연결하여 작업 테이블이 360°회전 가능하도록 설계하였다.

사용된 LM Guide는 수중에서의 원활한 구동을 위해 스테인리스 스틸에 레이던트 코팅 처리된 제품을 사용하였고, 테이블 회전 장치는 백래쉬(backlash)를 적게 하기 위해 대형(600mm) 원기어식 회전 테이블을 사용하였다.

2.2 Clamping Device

회전시료조사대를 작업테이블에 고정하기 위한 clamping device는 수중에서 작동되는 특성을 고려하여 공기압으로 작동하도록 설계하였으며, Fig. 2와 같이 4개의 actuator를 90°간격으로 크로스로 설치하여 RSR의 홀 안쪽에서 바깥쪽으로 팽창시켜 고정하는 방법으로 설계하였다.

clamping device actuator rod의 끝단에는 큰 단면적을 가진 원형 jaw를 부착하여 actuator의 작동되는 힘이 RSR의 내면 원통에 가해지도록 하였으며, 절삭력에 의해 RSR의 지지부가 변형되어 clamping force가 약해지는 것을 방지하기 위해 원형 guide plate를 설치하였다. clamping device의 base는 작업 테이블 크기와 일치시킴으로서 간단한 구조와 지지가 용이하게 설계하였다.

3. 밀링머신의 구조해석 및 평가

3.1 Main Frame의 구조해석

밀링 머신의 main frame은 베드 끝단에 주축의 상하 이송이 가능하도록 컬럼을 설치한 구조로 정밀 절삭을 실현하기 위해서는 main frame이 충분한 강성을 유지하여야 하므로 설계의 검증은 위해 구조해석을 수행하였다.

3차원 유한요소해석 프로그램(Design Space)을 이용하여 구조해석을 수행하였으며 main frame 모델에 사용된 총 노드 수는 284,243개, 총 엘리먼트 수는 154,516개이며 500N의 하중이 컬럼에 작용하는 경우

에 대하여 구조해석을 하였다. 구조해석을 위한 입력 자료는 Table 1과 같다.

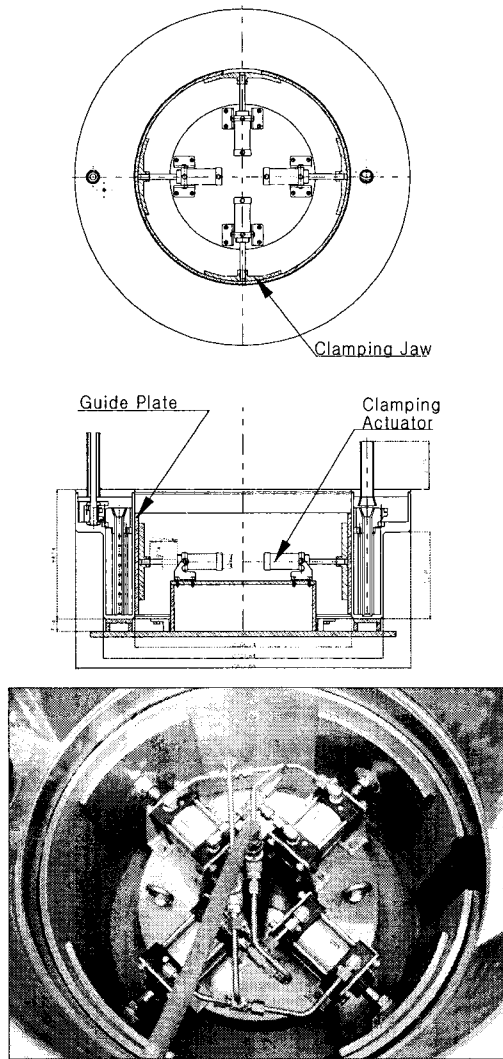


Fig. 2 Clamping device of RSR

Table 1 Material properties of main frame

Size	2200×1350×2040 mm
Modulus of Elasticity	1.93×10^{11} Pa
Poisson's Ratio	0.31
Tensile Yield Strength	207MPa
Tensile Ultimate Strength	586MPa

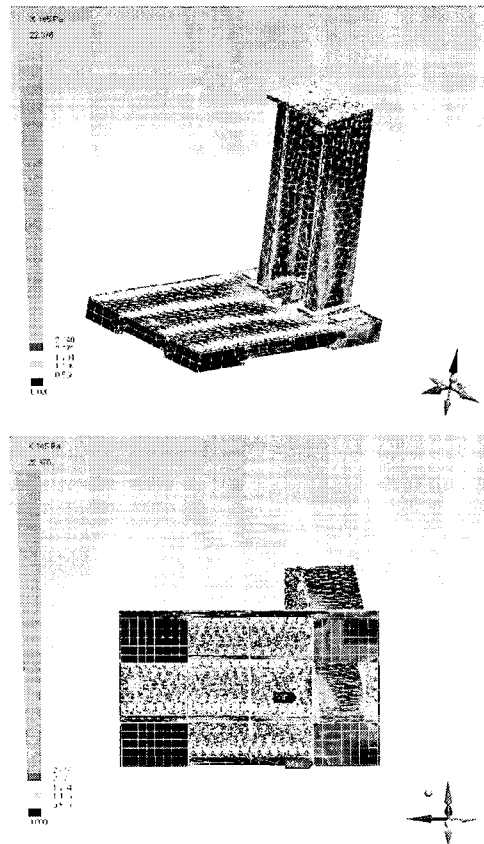
Fig. 3에 구조해석을 수행한 결과인 등가응력과 변형량을 나타내었다. 최대 등가응력은 2.24MPa로 베드의 지지되는 부분에서 나타났으며 킬럼과 베드의 연결부분에서는 약 0.3MPa의 등가응력을 보였다. 이는 항복강도에 훨씬 못미치는 응력값으로 프레임이

충분한 강성을 유지할 수 있는 구조로 설계되었음을 확인하였다. 최대 변형량은 프레임의 맨 윗부분에서 0.02mm로 나타났으며 RSR의 절삭 작업을 수행하기에는 충분한 정밀도를 가짐을 확인하였다.

3.2 Clamping Device의 지지력 평가

절삭 작업시 RSR을 고정하기 위한 공기압 클램프의 압력은 변형이나 파손없이 RSR을 확실하게 고정할 수 있는 적정 지지력을 갖도록 설계되어야 한다. 부리한 힘을 가하여 RSR이 파손되어 고방사능 부위가 떨어져 나가면 심각한 문제가 야기될 수 있으며, 고방사능 부분에 대한 정밀한 절삭이 요하는 부분에는 공기압 클램프의 압력에 의한 변형이 작아야만 정밀 절삭을 수행할 수 있다.

RSR을 고정하기 위한 적정 지지력을 계산하기 위해 유한요소해석 프로그램(Design Space)을 사용하여 클램프가 가하는 지지력에 대해 RSR에 분포되는 등가응력과 변형량을 계산하였다. 이 때 사용된 총 노드 수는 115,420개, 총 엘리먼트 수는 57,282개이다. 구조해석을 위한 입력 자료는 Table 2와 같다.



(a) Equivalent stress

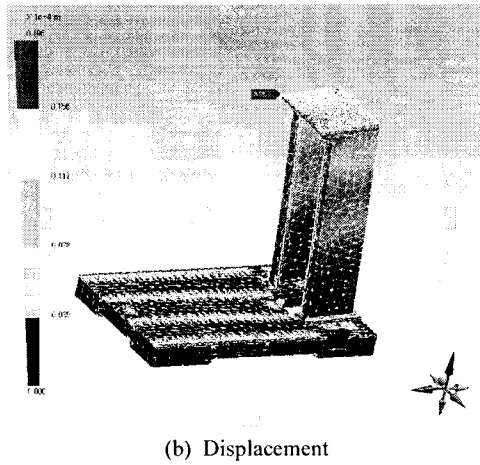


Fig. 3 Results of structural analysis for main frame

Table 2 Material properties of RSR

Modulus of Elasticity	$7.1 \times 10^{10} \text{Pa}$
Poisson's Ratio	0.33
Tensile Yield Strength	280MPa

해석 결과 등가응력과 변형량은 Fig. 4와 같이 나타났다. 본 해석 결과는 해석 프로그램을 사용하여 clamping device의 jaw가 RSR에 가하는 압력을 미소한 일정량 만큼 점차 증가시켜 가며 반복 구조해석을 수행하며 등가응력을 관찰하고 등가응력이 RSR의 항복강도인 280MPa과 같아졌을 때를 나타낸 것이다. 이 때 jaw에 의해 가해진 압력은 5.75MPa이었으며, 최대 변형량은 약 0.9mm로 나타났다. 따라서, RSR을 테이블에 고정할 경우 clamping device의 jaw의 최대 압력을 5.75MPa로 정하고 실제 고정 압력은 이보다 낮게 가하는 것이 바람직하다.



(a) Equivalent stress

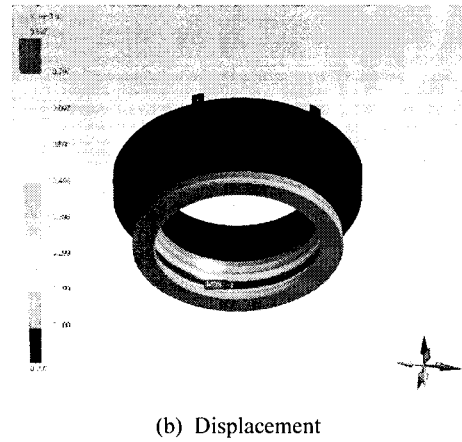


Fig. 4 Results of structural analysis for RSR

4. 결론

본 연구에서는 회전시료조사대의 수중 밀링 가공을 위해 4축 밀링 머신을 개발하였다. 수중에서의 원활한 구동을 위해 각 축과 회전시스템의 소재를 내부식성 및 강성을 고려하여 SUS316L을 사용하였고 LM Guide는 스테인리스 스틸에 레이던트 코팅 처리하여 사용하였다. RSR의 안정적 셋팅을 위해 전용 clamping device를 고안하였다. main frame의 구조해석 결과 최대 등가응력은 2.24MPa, 최대변형량은 0.02mm로서 RSR의 절삭 작업을 수행하기에 충분한 정밀도를 가짐을 확인하였다. clamping device의 지지력을 결정하기 위해 jaw에 의한 RSR의 한계 압력을 구조해석을 통해 계산하였으며, jaw의 압력은 5.75MPa를 넘지 않아야 한다.

후기

이 연구는 과학기술부 원자력 연구개발 중·장기 계획사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. "Regulation for the safe transport of radioactive material," Safety Standard Series ST-1, IAEA, 1996
2. Kim, H. R. and et al., "The Planning for the 3D Dynamic View of the KRR-1&2 Dismantling Process." The Proceedings of the 2nd Korea-China Joint Workshop on Nuclear Waste Management, pp. 129-135, 2001
3. 김성균, 이동규 외, "정지 유체 내에 있는 회전시료조사대의 진동해석 및 지지부의 응력해석," 에너지 공학회지, Vol. 12, No. 1, pp. 23-28, 2003