

## 수중 밀링 가공을 위한 주축 및 방수장치의 개발

이동규\*(한국원자력연구소), 이기용(한국원자력연구소), 이용범(한국기계연구원),  
이근우(한국원자력연구소), 박진호(한국원자력연구소)

### Development of Main Spindle and Waterproof System for Underwater Milling Operation

D. G. Lee(KAERI), K. Y. Lee(KAERI), Y. B. Lee(KIMM), K. W. Lee(KAERI), J. H. Park(KAERI)

#### ABSTRACT

For underwater milling of parts of nuclear reactor, a waterproof main spindle system was developed, which used a servo moter. Particularly, a waterproof system is available to cope with emergencies such as an electricity failure so that it prevents hazards from cutting radioactive materials. A developed spindle was designed to be capable of horizontal and vertical cutting and structural analysis was conducted with a FEM tool(Design Space) when the forces were loaded in each axis-direction.

**Key Words** : Underwater milling(수중 밀링 가공), Waterproof system(방수장치), Main spindle(주축), Structural analysis(구조해석)

#### 1. 서론

최근 수명이 다한 원자로 해체 기술에 관한 관심이 높아짐에 따라 방사화 부분과 비방사화 부분의 절삭 분리 작업에 필요한 특정 가공기의 개발이 요구되어 지고 있다. 작업자의 방사능 피폭을 최소화하기 위해 수중에서 절삭을 수행하는 방안이 강구되고 있는데 이를 위해 특정 가공기는 수중에서 원활한 구동이 가능해야 할 것이다.<sup>(1,2)</sup>

가공기를 완성하기 위해서는 수많은 요소기술이 필요하지만 수중에서 주축과 같은 구동장치가 원활히 작동하기 위해서는 적절한 방수장치를 개발하는 것이 핵심이라 할 수 있겠다. 일반적으로 방수기술은 동적 방수 기술과 정적 방수 기술로 분류되는데 정적 방수 기술은 국내외적으로 일반화 되어 있어 큰 문제가 되지 않지만 동적 방수 기술은 현재 적용 사례가 미비하고 특히 절삭을 위해 비교적 고속으로 회전하는 주축의 방수 기술에 대해서는 연구된 바가 없는 실정이다.<sup>(3)</sup>

본 연구에서는 원자로 부품의 수중 밀링가공을 위해 주축의 방수장치를 개발하고 이를 적용하여 서보 모터를 사용하는 주축을 개발하였다. 방사능 오염물질의 절삭시 우려되는 위험을 고려하여 본 방수 장

치는 정전 등과 같은 비상시에 특히 유용하게 적용될 수 있도록 설계·제작하였다. 개발된 주축은 수직·수평 절삭이 가능하고 공구의 교환이 용이하도록 설계·제작하였다.

#### 2. 주축 설계 및 구조해석

##### 2.1 주축의 설계

개발된 주축은 최고 회전수 8,000rpm으로 수평 및 수직 절삭이 가능하도록 설계하였다. Fig. 1에 주축의 도면과 사진을 나타내었다. 주축은 LM Guide에 의해 상하이동이 가능하며 지지프레임이 외팔보 모양으로 이동장치에 부착되어 있다. 지지프레임의 선단에는 주축 모터를 둘러싸고 있는 커버가 힌지축에 의해 피벗 회전 가능하게 설계하였다. 주축의 커버와 각 부품들은 수중에서 녹이 발생하지 않도록 SUS316 이상의 내부식성 및 강성 소재를 사용하였다. 주축은 편에 의해 이동장치에 고정되어 있는데 이를 제거하여 주축 부분만을 분리하는 것이 가능하므로 수중에서 작업시 공구 교체 등을 편리하게 할 수 있다. 공구의 장착은 공구 삽입부에 설치되어 있는 복수의 가압 실린더가 삽입된 공구를 압박하여 고정할 수 있도록 설계하였다.

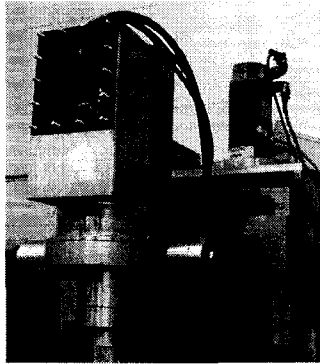
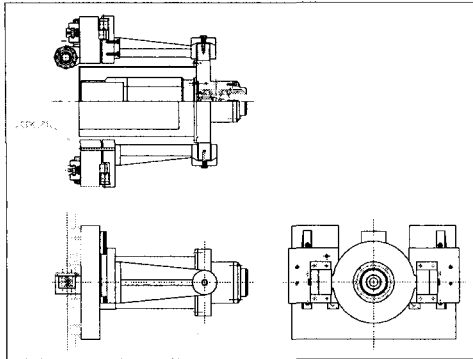


Fig. 1 Drawings and photo of the manufactured main spindle

## 2.2 주축의 구조해석

주축이 힌지축에 의해 회전하여 수평 및 수직 절삭을 수행하므로 안정된 절삭을 위해 절삭시 발생하는 절삭력에 의한 지지프레임 및 힌지부의 변형량 및 등가응력을 해석하고 주축이 적절히 설계되었는지 검토할 필요가 있다.

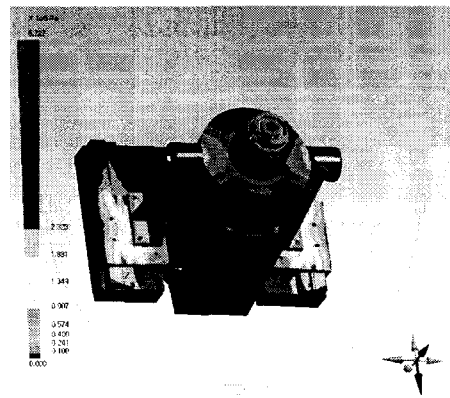
3차원 유한요소해석 프로그램(Design Space)을 이용하여 구조해석을 수행하였으며 수평 절삭시 주축 모델에 사용된 총 노드 수는 183,391개, 총 엘리먼트 수는 106,149개이며 수직 절삭시 총 노드 수는 179,944개, 총 엘리먼트 수는 104,710개 이다. 500N의 하중이 각 3축 방향으로 공구부에 작용하는 경우에 대하여 구조해석을 하였다. 구조해석을 위한 입력 자료는 Table 1과 같다.

수평 절삭의 경우 Z방향으로 500N의 하중을 공구 삽입 부분에 가했을 경우 구조해석한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 이 때 최대 등가응력은 5.73MPa로서 하중이 가해지는 공구 삽입 부분, 힌지축 부분, 주축 모터를 지지하는 프레임의 연결부분에서 발생하였다. 개발된 주축은 힌지축에 의해 회전하므로 절삭시 하중이 가해질 경우 힌지축 부분의 변형이나 파손이 우려되는데 구조해석 결과 항복 강도인 207MPa보다 훨씬 작은 응력을 받으므로 안정적인 절삭이 수행될 수

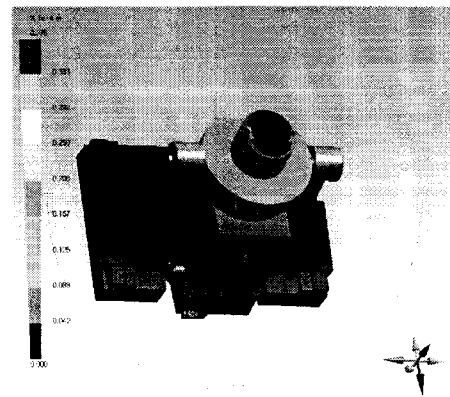
있을 것으로 사료된다. 최대 변형량은 0.038mm로 공구 삽입 부분과 모터 커버의 끝단 부분에서 발생하였으며 원자로 부품의 절삭시 만족할만한 정밀도를 가짐을 확인하였다. X방향과 Y방향으로 500N의 하중을 가했을 경우의 구조해석 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Material properties of main spindle

Modulus of Elasticity	$1.93 \times 10^{11}$ Pa
Poisson's Ratio	0.31
Tensile Yield Strength	207MPa
Tensile Ultimate Strength	586MPa



(a) Equivalent stress



(b) Displacement

Fig. 2 Results of structural analysis for main spindle in horizontal cutting state (loading direction : Z)

최대 등가응력은 7.12MPa로서 Y방향으로 하중이 가해지는 경우 힌지축 부분에서 발생하였으며, 최대 변형량은 0.038mm로서 Z방향으로 하중이 가해지는 경우 발생하였다. 실제 절삭 정밀도에 영향을 미치는 공구 삽입 부분의 최대 변형량도 0.038mm로서 Z방향으로 하중이 가해지는 경우 발생하였다. Y방향으로 하중이 가해지는 경우 최대 변형량은 공구 삽입 부분이 아닌 모터 커버의 끝단에서 발생하였다.

Table 2 Results of structural analysis for main spindle in horizontal cutting state

Loading Direction (500N)	Maximum Equivalent Stress (MPa)	Maximum Displacement (mm)	Displacement of Tool Insert Part (mm)
X	4.98	0.002	0.002
Y	7.12	0.02	0.012
Z	5.73	0.038	0.038

수직 절삭의 경우 Y방향으로 500N의 하중을 공구 삽입 부분에 가했을 경우 구조해석한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 이 때 최대 등가응력은 7.14MPa로서 하중이 가해지는 공구 삽입 부분, 힌지축 부분, 지지프레임의 하단부분에서 발생하였다. 이 값 역시항복 강도인 207MPa보다 훨씬 작은 응력이므로 안정적인 절삭이 수행될 수 있을 것으로 사료된다. 최대 변형량은 0.015mm로 공구 삽입 부분에서 발생하였으며 충분한 정밀도를 가짐을 확인하였다. X방향과 Y방향으로 500N의 하중을 가했을 경우의 구조해석 결과를 Table 3에 나타내었다.

최대 등가응력은 7.14MPa로서 Y방향으로 하중이 가해지는 경우 힌지축 부분에서 발생하였으며, 최대변형량은 0.034mm로서 X방향으로 하중이 가해지는 경우 모터 커버의 끝단에서 발생하였다. 공구 삽입 부분의 최대 변형량은 0.015mm로서 Y방향으로 하중이 가해지는 경우 발생하였다. Z방향으로 하중이 가해지는 경우 최대 변형량은 X방향으로 하중이 가해지는 경우처럼 모터 커버의 끝단에서 발생하였다.

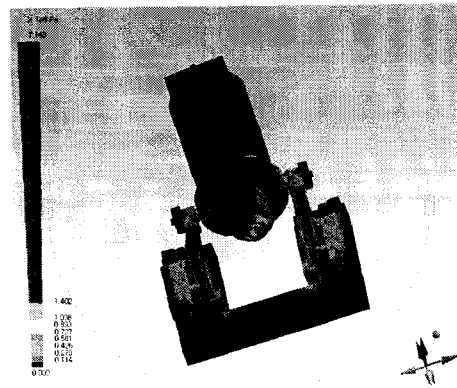
### 3. 주축의 방수장치 개발

개발된 주축에는 서보 모터를 구동 장치로 사용하기 때문에 수중에서 작업할 때 방수(Sealing) 기술이 매우 중요하다. 서보 모터에 조금이라도 물이 침투될 경우 모터는 구동이 정지되고 사용이 불가하므로 작업의 안전 측면과 수리비 등의 경비 측면에서도 방수 장치는 제일 우선적으로 고려되어야 할 것이다. 일반적으로 실링은 동적 실링(Dynamic Sealing)과 정적 실링(Static Sealing)으로 분류되는데, 모터 등의 구동 장치에는 동적 실링을 적용해야 한다. 동적 실링 기술에도 여러 가지 종류가 있지만 주축이 고속 회전 시 안정적으로 실링이 가능하도록 기계적 실링(Mechanical Sealing) 기술을 사용하였다.

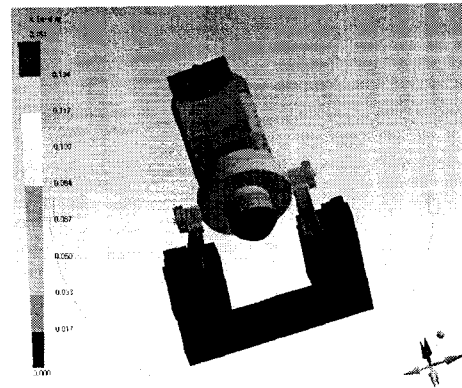
기계적 실링은 회전축에 직접 실링 면의 접촉이 없어 축의 마모가 발생하지 않고 발열이 없으며, 수명 또한 다른 회전형 실링 장치 중에 가장 긴 특징을 가지고 있다. Fig. 4에 주축에 기계적 실링을 한 상태의 도면을 나타내었다.

Table 3 Results of structural analysis for main spindle in vertical cutting state

Loading Direction (500N)	Maximum Equivalent Stress (MPa)	Maximum Displacement (mm)	Displacement of Tool Insert Part (mm)
X	6.43	0.034	0.013
Y	7.14	0.015	0.015
Z	5.54	0.02	0.011



(a) Equivalent stress



(b) Displacement

Fig. 3 Results of structural analysis for main spindle in vertical cutting state (loading direction : Y)

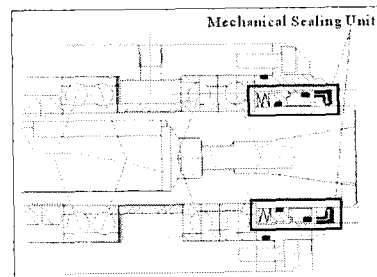


Fig. 4 Mechanical sealing of main spindle

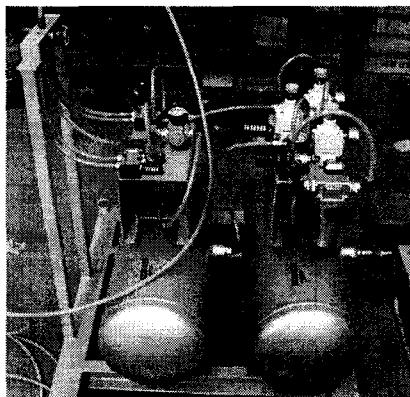
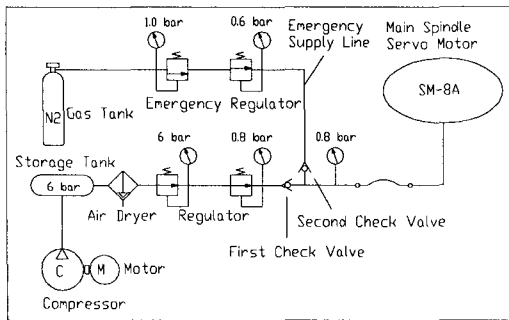


Fig. 5 Design and photo of Waterproofing System

수중에서 작동되는 주축의 실링을 위해 기계적 실링 장치를 사용하였고 수압보다 높은 압력의 공기를 공급함으로써 원천적으로 물이 침투되는 것을 방지하도록 설계하였다. 특히 정전이나 공기를 공급하는 압축기의 고장 등으로 압력이 저하되는 것에 대비하여 압축 질소(N<sub>2</sub>) 가스를 공급하는 방수장치를 개발하였다. Fig. 5에 방수장치의 구성도와 사진을 나타내었다.

방수 장치는 압축기에서 생산되는 압축공기(6bar)가 압축공기저장탱크에 일시적으로 저장된 후 에어 드라이어에서 수분이나 이물질이 제거된다. 레귤레이터에서 감압된 공기는 제1체크밸브를 통해 주축에 공급되어 방수하도록 구성되어 있다. 또한 정전과 같은 비상시에는 가스용기의 압축가스가 제1, 2 레귤레이터에서 감압된 후, 제2체크밸브를 통해 공급되도록 구성하되, 제1체크밸브를 통해 압축공기가 공급되는 공급유로의 압력이 설정압(0.8bar) 이하로 저하되면 제2체크밸브가 개방되면서 가스용기의 압축가스가 공급되도록 구성하였다. 가스용기에는 질소 등과 같이 압축성이 우수한 가스를 고압으로 압축한 상태로 연결하고, 제1레귤레이터에서는 가스용기로부터 공급되는 압축가스의 압력을 1차적으로 1.0bar까지 낮추게 된다. 그리고, 제2레귤레이터에서는 제1레귤레이터에서 감압된 압축가스의 압력을 다시 0.6bar까지

낮추어 공급하게 된다.

본 방수장치는 정전 등과 같은 비상시 압축기로부터 압축공기가 공급되지 않아도 제2체크밸브가 압력 차에 의해 자동 개방되면서 가스용기의 압축가스를 제1,2레귤레이터에서 0.6bar로 감압한 상태로 공급하게 되고, 이에 따라 공급유로를 통해 계속적으로 압축가스의 공급이 가능토록 함으로써 수중기기의 방수상태를 그대로 유지할 수 있으므로 방수중단에 의한 주축 서보 모터의 고장 등을 예방하게 되는 효과를 제공한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 원자로 부품의 수중 밀링가공을 위해 방수장치를 개발하고 이를 적용하여 주축의 수직, 수평 절삭이 가능한 주축을 개발하였다. 개발된 주축의 구조해석 결과 수평 절삭시 최대 등가응력은 7.12MPa로서 Y방향으로 하중이 가해지는 경우 힌지축 부분에서 발생하였으며, 최대변형량과 공구 삽입 부분의 최대 변형량은 0.038mm로서 Z방향으로 하중이 가해지는 경우 발생하였다. 수직 절삭시 최대 등가응력은 7.14MPa로서 Y방향으로 하중이 가해지는 경우 힌지축 부분에서 발생하였으며, 최대변형량은 0.034mm로서 X방향으로 하중이 가해지는 경우 모터커버의 끝단에서 발생하였다. 공구 삽입 부분의 최대 변형량은 0.015mm로서 Y방향으로 하중이 가해지는 경우 발생하였다. 구조해석 결과 안정적인 절삭이 가능하며 충분한 정밀도를 가짐을 확인하였다. 개발된 방수장치는 비상시에 압축 질소 가스를 공급하도록 설계, 제작하여 주축 서보 모터의 고장 등을 예방하게 되는 효과를 제공한다.

#### 후기

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

#### 참고문헌

1. Jung, K. J. et al., "Decommissioning Plan for KRR-1&2," KAERI/TR-1654/2000, 2000
2. Lee, D. G. et al., "Study on the Management of Radioactive Solid Wastes for the KRR-1&II Dismantling Activities," Proceedings of the KNS Spring Meeting, Kori, Korea, 2000
3. "Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment," Naval Surface Warfare Center, 1998