

연구로 1, 2호기 회전시료조사대 수중해체장비 설계 및 성능시험

The Design and Test of Underwater Cutting Equipment for the Disassembling of Rotary Specimen Rack in KRR-1&2

이동규, 이기용, 백삼태, 정경환, 이근우
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

연구로 1, 2호기에서 사용되었던 회전시료조사대는 스테인레스 스틸 부품들의 고방사화로 인해 해체폐기물 분류기준에 의하면 중준위급 방사성폐기물로 평가되었으나, 이 부품들을 분리할 경우 회전시료조사대는 저준위방사성폐기물로 처리될 수 있다. 본 연구에서는 회전시료조사대의 스테인레스 스틸 부품 분리를 위해 수중에서 절삭 작업이 가능한 해체장비를 설계, 제작한 후 장비의 성능시험을 수행하였다. 해체장비의 메인 프레임과 힌지축에 의해 회전하는 주축에 대해 해체시 안정성과 정밀도를 평가하기 위해 구조해석을 수행하였다. 해석 결과 개발된 해체장비는 회전시료조사대를 가공하기에 충분한 안정성과 정밀도를 가짐을 확인하였다. 수중에서 가공을 수행하므로 해체장비의 방수를 위해 방수장치를 개발하였으며, 해체장비의 수중원격제어 방법을 제시하였다. 해체장비의 방수 및 절삭 성능시험 결과 회전시료조사대를 수중에서 안전하게 해체할 수 있는 충분한 성능이 입증되었다.

Summary

The Rotary Specimen Racks (RSRs) were highly activated and then classified intermediate level radioactive waste for the decommissioning of KRR-1&2. The RSR can be treated as low level radioactive waste after removing stainless steel parts. In this study, the underwater cutting equipment, which is enable to cut RSR in water, was developed and test was carried out. The stress and displacement of main frame and spindle were simulated by using a structural analysis tool and from the results it was concluded that the equipment have enough stability and accuracy to cut RSR. A waterproof system was developed to cope with emergencies such as an electricity failure and the remote controlling method was suggested. The waterproof and cutting test were conducted and then it was resulted that the equipment can be safely disassemble stainless steel parts of RSR under water.

1. 서론

연구로 해체 과정에서 가장 신중하게 취급되어질 해체 대상장치 중의 하나가 원자로 노심에 설치된 회전시료조사대(Rotary Specimen Rack)의 해체이다. 회전시료조사대는 스테인레스강으로 만들어진 부품들이 내장되어 있는데, 잔류방사능이 중준위급 이상으로 평가되었다. 따라서 회전시료조사대 자체를 그대로 처리할 경우 중준위급의 방사성폐기물이 다량 발생함으로써 이의 관리를 위한 차폐용기개발, 제작비용 및 처분비용 등이 매우 높을 수 밖에 없다. 그러므로 회전시료조사대로부터 스테인레스강 부품만을 분리·제거하여 중준위급 방사성폐기물의 양을 최소화할 필요가 있다. 현재 회전시료조사대는 총 3개가 있으며, 이중 2개는 연구로 1호기에서 사용된 것으로서 원자로 수조로부터 제거되어 실험수조 내에 보관되어 있고, 연구로 2호기의 회전시료조사대 1개는 2호기 원자로 수조 내에 있다.[1]

이에 따라, 회전시료조사대의 고방사화 부품을 분리하기 위한 분해·절단 기술이 요구되며, 회전시료조사대의 방사능이 높아 작업자의 피폭위험성이 매우 크기 때문에 방사능 차폐가 가능한 수중이나 적절한 차폐체가 설치된 곳에서 원격으로 해체를 하여야 한다. 회전시료조사대의 크기가 커서 연구로 현장에 있는 차폐시설인 콘크리트 핫셀의 문을 통과할 수 없어서 부득이 수중에서 해체작업을 수행하는 방안이 고려되었다. 회전시료조사대의 경우 알루미늄 본체와 스테인리스 스틸 부품을 분해하기 위해서는 절단 및 절삭 작업이 필요하며 이와 같은 작업이 수중에서 수행되기 위해서는 기존의 해체장비와는 달리 수중에서 원활한 절단 작업이 가능한 새로운 개념의 해체장비의 개발이 요구된다.[2]

일반적으로 방수기술은 정적 방수 기술과 동적 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.[3]

본 연구에서는 수중에서 회전시료조사대를 절단하기 위해 4축으로 구동되는 수중 해체장비를 개발하였다. 회전시료조사대의 물리적·방사선학적 특성을 분석하여 이를 기초로 해체장비를 설계하였다. 개발된 수중해체장비는 X, Y, Z방향의 3축과 Z방향 회전축이 더해져 4축 구동이 가능하므로 고방사화 되어 방사능 준위가 높은 스테인리스재의 분리 절단이 원활하게 수행될 수 있다. 절단 작업이 수중에서 수행되므로 수중해체장비에 사용되는 서보모터를 보호하기 위해 방수장치를 개발하였다. 방사화 물질의 절단시 우려되는 위험을 고려하여 개발된 방수장치는 정전 등과 같은 비상시에도 방수기능을 유지할 수 있도록 설계, 제작하였다. 구조해석을 통해 절단시 발생하는 수중해체장비의 안정성과 정밀도를 확인하였고, 회전시료조사대 고정 장치를 설계하기 위해 고정 장치가 가하는 압력에 대한 회전시료조사대의 등가응력 및 변형량을 평가하였다. 해체장비의 방수 및 절삭성능을 확인하기 위해 압력저하실험과 절삭시험을 수행하였고 해체장비의 수중원격 제어를 위한 방법을 제시하였다.

2. 회전시료조사대 특성 분석

회전시료조사대는 시편을 고정시키기 위한 41개의 알루미늄랙(직경 3.2cm, 길이 27.4cm)으로 구성된 환형으로서 노심 Shroud의 바깥쪽에 설치되어 있다. 회전시료조사대의 상부에는 부력탱크가 설치되어 공기의 부력작용으로 회전시료조사대를 상하로 움직일 수 있게 되어 있다. 회전시료조사대에는 조사시편의 장전과 인출통로로 내부직경이 3.4cm인 튜브가 설치되어있는데, 각 41개소의 회전시료조사대내의 조사공 위치를 지정하기 위한 Drive-and-Indicator 집합체와, 조사캡슐은 회전시료조사대내 조사공에 장전 및 인출을 하기 위한 Reel형식의 Specimen-Lifting 집합체가 이동가능 브릿지에 설치되어 있다. 회전시료조사대 용기의 내부 둘레에는 스테인레스 스틸 스프로킷 및 체인이 설치되어 있어 회전운동을 전달한다. 부력탱크는 2개의 알루미늄 탱크로 구성되어 있는데 바닥면은 개방되어 있으며 탱크당 4개씩 총 8개의 스테인레스 스틸 볼트로 본체의 상부에 고정되어 있다. 각각의 부력탱크의 상부에는 서로 대칭을 유지하고, 상하운동시 회전을 방지하기 위해 하나의 스테인레스 스틸 안내핀(Guide Pin)이 설치되어 있다. 공기공급튜브를 통해 압축공기가 공급되면 부력탱크내의 물을 밀어내고 반대로 압축공기를 배기시키면 물로 채워진다. 이 작용에 의해 회전시료조사대가 상하운동을 하게 된다.[4]

회전시료조사대의 수중 해체장비를 설계하기 위해 회전시료조사대의 물리적·방사선학적 특성을 분석하였고, 분석 결과를 토대로 해체장비를 설계하였다.

2.1 물리적 특성

회전시료조사대는 전체적으로 직경 86cm, 높이 55cm, 총무게 118kg으로 알루미늄과 스테인리스 스틸로 구성되어 있다. 대부분 알루미늄으로 이루어져 있으며 일부 부품인 볼트, 너트, 체인 등은 스테인리스 부품이고 스테인리스 부품의 무게는 약 3.4kg이다. 회전시료조사대는 Fig. 1과 같이 부력탱크, 조사관, 체인, 드라이브 샤프트, 하우징 등으로 구성되어 있다.

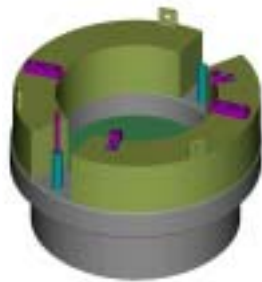


Fig. 1 회전시료조사대의 구성

2.2 방사선학적 특성

연구로 2호기 가동정지 후 현재까지 회전시료조사대의 방사능을 평가하였으며 평가를 위한 기본 입력자료는 다음과 같이 산출하였다. 첫째, 연구로 2호기는 23년간 운전하여 총 출력이 68,740MWh이며, 2MW로 운전될 때 노심에서의 최대중성자속은 $7.0 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2\text{sec}$ 이다. 둘째, 최대중성자속이 Central Thimble에 위치한다고 가정하여

산출된 최대중성자속과 회전시료조사대의 중성자속의 비율 0.3036을 이용하여 회전시료 조사대에서의 평균 중성자속을 계산하였다. 회전시료조사대에서의 평균 중성자속을 이용하여, ORIGEN 2.1 코드로 스테인리스 스틸 및 알루미늄의 핵종별 비방사능을 계산한 결과와 재질별 비방사능을 이용하여 산출된 회전시료조사대의 총방사능은 Table 1과 같다.

Table 1. 핵종별 비방사능 및 회전시료조사대의 총방사능

핵종	비방사능		RSR의 총방사능
	스테인레스 스틸 (Bq/g)	알루미늄 (Bq/g)	
Mn-54	2.69E+ 05	7.43E+ 02	1.00E+ 09
Fe-55	6.58E+ 07	1.80E+ 05	2.44E+ 11
Co-60	1.37E+ 08	6.68E+ 05	4.66E+ 11
Ni-59	1.41E+ 05	-	4.79E+ 08
Ni-63	1.79E+ 07	2.00E+ 03	6.13E+ 10
Nb-94	7.21E+ 04	-	2.45E+ 08
TOTAL	2.21E+ 08	8.51E+ 05	7.73E+ 11

회전시료조사대의 총 방사능은 $7.73 \times 10^{11} \text{Bq}$ 이며, 이중 Co-60의 방사능은 $4.66 \times 10^{11} \text{Bq}$ 이므로, Co-60이 함유된 스테인레스 부품만 분리하면 방사능 준위가 매우 낮은 저준위폐기물로 분류가 가능하다. 차폐되지 않은 회전시료조사대의 방사선량은 1m 떨어진 지점에서 248.2mSv/hr로 예상된다.

3. 수중 해체장비 설계 및 검증

3.1 해체장비의 설계 요건

수중에서의 절단방법(Platom사의 OmniCut 방법, Roper Resources사의 Deepwork Underwater Cutoff Saw 방법, Trentec사의 Wire-Sawing 방법)을 비교 분석하여 설계요건을 만족시킬 수 있는 방법으로 서보 모터를 사용한 전동식 절삭 방안을 선정하였다. 수중에서 발생하는 부가질량(added mass)과 항력(drag force) 그리고 부력(buoyant force) 등을 고려하여 동특성을 제어하는 기술로서, 수중 및 공기중에서 직선운동을 할 경우 작용하는 관성항, 속도항, 중력항 등을 이론적으로 평가한 결과 수중작업 매니플레이터에서는 부가질량의 영향이 크고, 부력의 영향으로 중력항이 크게 감소하며, 속도항에 비해 무시할 수 없는 크기의 항력을 받게 되어 매니플레이터 시스템을 제어하기 위한 방식으로 분할제어방법을 선정하였다.

회전시료조사대의 물리적/방사화 특성, 선정된 수중 요소기술, 분해 환경 등을 중

합적으로 고려하여 다음과 같은 분해장비의 설계요건을 도출하였다. 첫째, 원격 장치에 대한 내수성 부여가 필요하다. 둘째, 가공공구 및 가공품 회전에 대한 물의 저항을 최소화 하여야 한다. 셋째, 구동 장치는 정밀 조정에 유리한 전동식 서보 모터를 사용한다. 넷째, 가공 대상은 회전시료조사대의 주요 재질인 알루미늄이다. 이와 같은 설계 요건들을 만족하도록 해체장비를 설계하였다.

3.2 해체장비의 설계 특성

수중 절단을 실현하기 위해 수중에서 녹이 발생되지 않는 재료를 사용하여 수중 해체장비를 제작하였고, 회전시료조사대의 크기 및 형상을 고려하여 고정 장치 및 테이블의 설계와 주축 및 이송축의 구동범위를 설정하였다 Fig. 2에 설계된 수중해체장비의 조립도와 사진을 나타내었다.

개발된 수중해체장비는 X, Y, Z의 3축 동시제어가 가능하며 작업 테이블이 Z축에 대해 회전하며 주축이 회전하여 수평 · 수직 절삭이 가능하다. X, Y, Z축의 행정거리는 각각 900mm, 640mm, 1400mm이고, 테이블이 Z축에 대해 360°회전이 가능하다. 수중해체장비의 각 축과 회전 시스템의 소재를 내부식성 및 강성을 고려하여 SUS316L을 사용하였고, 실링된 스핀들과 테이블의 이송을 위한 직선운동 안내기구(linear motion guide) 및 볼스쿠류(ball screw), 주축의 회전과 위치제어용 서보모터(servo motor), CNC 컨트롤러로 구성하였다. 또한 주축의 원활한 상하 구동을 위해 주축의 중량과 일치하는 평형추(balance weight)를 제작하여 주축과 연결하였고 베드는 수중에서 중량 감소로 인한 진동 발생을 방지하기 위해 충분한 중량을 가지도록 설계하였다.

주축은 최고 회전수 8,000rpm으로 수평 및 수직 절삭이 가능하도록 설계하였다. 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 내부식성 및 강성을 고려하여 SUS316L을 사용하였다. 주축은 핀에 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.

이송을 위한 직선운동을 위해 양단에 LM guide 2축을 설치하고 그 중간에 볼스쿠류를 설치한 후 끝단에 모터를 연결하여 모터의 회전운동을 직선운동으로 변환하였다. 작업 테이블의 회전을 위해 작업 테이블 하단부에 Warm Wheel을 설치하고 그 아래 테이블에 Warm 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.

회전시료조사대를 작업테이블에 고정하기 위한 클램핑 장치는 수중에서 작동되는 특성을 고려하여 공기압으로 작동하도록 설계하였으며, Fig. 3과 같이 4개의 Actuator를 90°간격으로 크로스로 설치하여 회전시료조사대의 홀 안쪽에서 바깥쪽으로 팽창시켜 고정하는 방법으로 설계하였다. 클램핑 장치에서 Actuator Rod의 끝단에는 큰 단면적을 가진 원형 Jaw를 부착하여 Actuator의 작동되는 힘이 회전시료조사대의 내면 원통에 가해

지도록 하였으며, 절삭력에 의해 회전시료조사대의 지지부가 변형되어 Clamping Force가 약해지는 것을 방지하기 위해 원형 Guide Plate를 설치하였다. 클램핑 장치의 베이스는 작업 테이블 크기와 일치시킴으로서 간단한 구조와 지지가 용이하게 설계하였다.

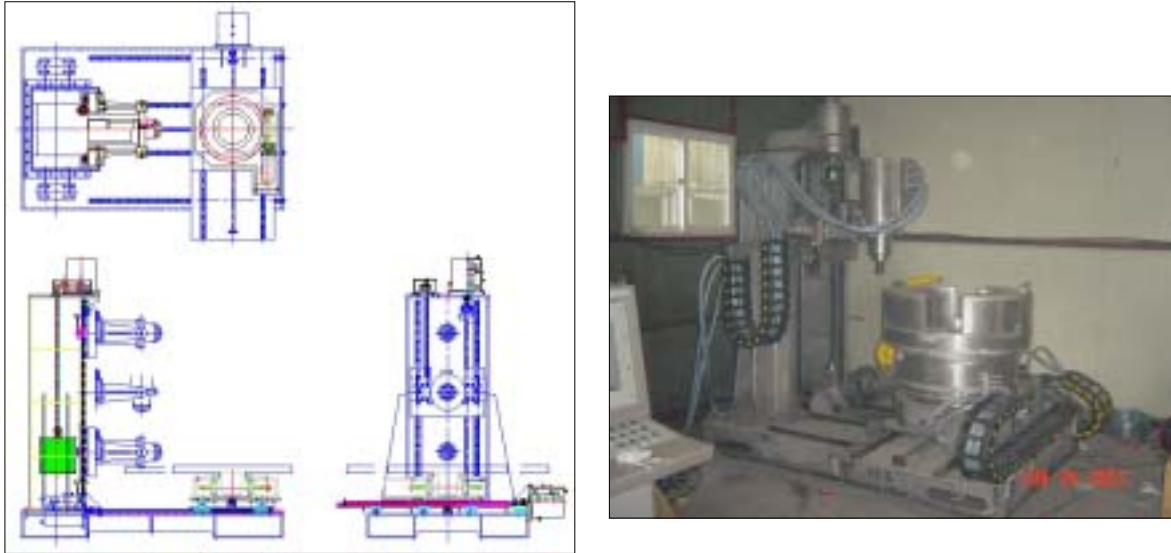


Fig. 2 수중해체장비의 설계도와 사진

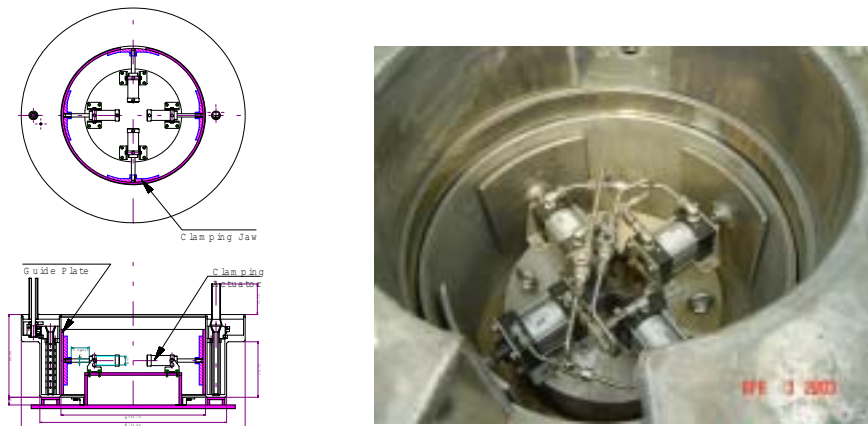


Fig. 3 회전시료조사대의 클램핑 장치

개발된 주축과 이송기구에는 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 회전시 안정적으로 실링이 가능하도록 기계적 실링(Mechanical Sealing) 기술을 사용하였다.[5]

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. 수중에서 작동되는 서보 모터의 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(N2) 가스를 공급하는 방수장치를 개발하였다. Fig. 4에 방수장치의 구성도와 사진을 나타내었다.

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 및 이송기구 서보 모터의 고장 등을 예방하게 되는 효과를 제공한다.

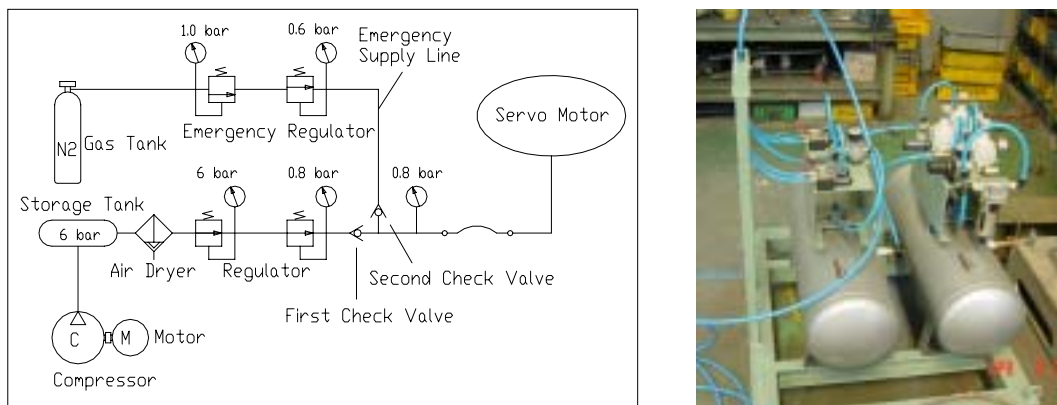


Fig. 4 방수장치의 설계도면과 사진

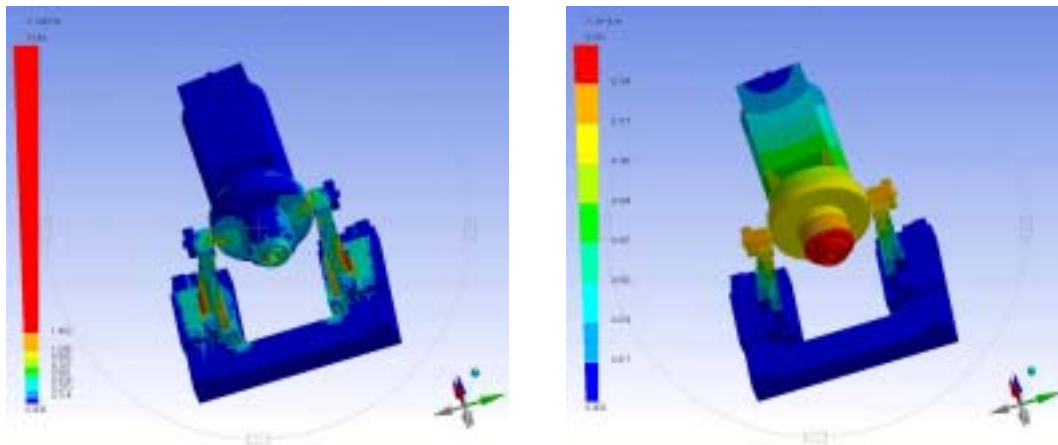
3.3 해체장비의 구조 해석

해체장비의 안정성과 정밀도를 평가하고 검증하기 위해 구조해석을 수행하였다. 밀링 머신의 메인 프레임은 베드 끝단에 주축의 상하 이송이 가능하도록 컬럼을 설치한 구조로 정밀 절삭을 실현하기 위해서는 메인 프레임이 충분한 강성을 유지하여야 하므로 메인 프레임에 대한 구조해석을 수행하였다. 또한 주축이 힌지축에 의해 회전하여 수평 및 수직 절삭을 수행하므로 안정된 절삭을 위해 절삭시 발생하는 절삭력에 의한 지지프레임과 힌지부의 변형량 및 등가응력을 해석하고 주축이 적절히 설계되었는지 검토할 필요가 있다. 끝으로 절삭 작업시 회전시료조사대를 고정하기 위한 공기압 클램프의 압력은 변형이나 파손없이 회전시료조사대를 확실하게 고정할 수 있는 적정 지지력을 갖도록 설계되어야 하므로 회전시료조사대에 관한 구조 해석을 수행하였다. 3차원 유한요소해석 프로그램(Design Space)을 이용하여 500N의 하중이 작용하는 경우에 대하여 구조해석을 하였다[6].

메인 프레임의 경우, 최대 등가응력은 2.24MPa로 베드의 지지되는 부분에서 나

타났으며 컬럼과 베드의 연결부분에서는 약 0.3MPa의 증가응력을 보였다. 이는 항복강도에 훨씬 못 미치는 응력 값으로 프레임이 충분한 강성을 유지할 수 있는 구조로 설계되었음을 확인하였다. 최대 변형량은 프레임의 맨 윗부분에서 0.02mm로 나타났으며 회전시료조사대의 절삭 작업을 수행하기에는 충분한 정밀도를 가짐을 확인하였다.

주축의 구조해석은 수평 절삭과 수직 절삭으로 나누어 수행하였다. 수평 절삭의 경우 최대 증가응력은 7.12MPa로서 Y방향으로 하중이 가해지는 경우 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 회전시료조사대의 절삭시 만족할만한 정밀도를 가짐을 확인하였다. 수직 절삭의 경우 최대 증가응력은 7.14MPa로서 Y방향으로 하중이 가해지는 경우 하중이 가해지는 공구 삽입 부분, 힌지축 부분, 지지프레임의 하단부분에서 발생하였다. 이 값 역시 항복 강도인 207MPa보다 훨씬 작은 응력이므로 안정적인 절삭이 수행될 수 있을 것으로 사료된다. 최대 변형량은 0.034mm로서 X방향으로 하중이 가해지는 경우 모터 커버의 끝단에서 발생하였으며 공구 삽입 부분의 최대 변형량은 0.015mm로서 Y방향으로 하중이 가해지는 경우 발생하였다. Fig. 5에 구조해석 결과의 한 예를 나타내었고 Table 2에 최대 증가응력과 최대 변형량을 나타내었다.



(a) 등가응력

(b) 변형량

Fig. 5 수직 절삭 상태에서 주축의 구조해석 결과(하중 방향 : Y)

회전시료조사대를 고정하기 위한 적정 지지력을 계산하기 위해 클램프가 가하는 지지력에 대해 회전시료조사대에 분포되는 증가응력과 변형량을 계산하였다. 해석 방법은 해석 프로그램을 사용하여 클램핑 장치의 Jaw가 회전시료조사대에 가하는 압력을 미소한 일정량 만큼 점차 증가시켜 가며 반복 구조해석을 수행하며 증가응력을 관찰하고 증가응력이 회전시료조사대의 항복강도인 280MPa과 같아졌을 때를 나타낸 것이다. 이때 Jaw에 의해 가해진 압력은 5.75MPa이었으며, 최대 변형량은 약 0.9mm로 나타났다. 따라서, 회전시료조사대를 테이블에 고정할 경우 클램핑 장치의 Jaw의 최대 압력을 5.75MPa로 정하고 실제 고정 압력은 이보다 낮게 가하는 것이 바람직하다.

Table 2 수평 및 수직 절삭 상태에서 주축의 구조해석 결과

Cutting State	Loading Direction (500N)	Maximum Equivalent Stress (Mpa)	Maximum Displacement (mm)	Displacement of Tool Insert Part(mm)
Horizontal Cutting State	X	4.98	0.002	0.002
	Y	7.12	0.02	0.012
	Z	5.73	0.038	0.038
Vertical Cutting State	X	6.43	0.034	0.013
	Y	7.14	0.015	0.015
	Z	5.54	0.02	0.011

3.4 해체장비의 수중 원격제어 방법

해체장비는 수중 약 4m에서 절단작업을 수행하므로 육안으로 절단과정을 관찰하기 어려우며 수동으로 운전할 경우 절삭이송 속도의 불안정적으로 인해 공구의 파손과 진동을 유발할 우려가 있고 절삭 정밀도가 저하된다. 따라서 본 해체작업을 위한 수중원격제어방법을 제시한다.

본 해체장비의 주축과 이송축의 서보모터는 컨트롤러로부터 지령제어선을 통해 조절 가능하므로 원격제어를 위해서는 작업자가 컨트롤러에 입력되는 NC(Numerical Control) 코드를 생성해 주어야 한다. NC 코드는 일종의 프로그램 언어로써 해체장비의 컨트롤러를 제어할 수 있는 기능을 가지고 있으며, 회전속도, 이송속도, 공구 경로 등의 정보를 포함하고 있다. NC 코드를 생성하는 과정은 작업자가 절단대상의 형상 정보를 측정하여 수동으로 생성하는 방법과 CAM 프로그램을 통해 자동으로 생성하는 방법이 있는데, 회전시료조사대의 경우 절단 공정이 많으므로 CAM 프로그램을 통해 자동으로 NC 코드를 생성하기로 한다. 컴퓨터를 사용하여 자동으로 NC 코드를 생성하기 위해서는 회전시료조사대의 CAM 모델이 필요하다. CAM 모델은 CAD 모델에 공구 형상, 공작물 정보 등이 포함된 것을 의미한다. 이와 같이 생성된 NC 코드는 컨트롤러로 전송되어 입력되고 실제 원격절단을 하기 전 해체장비의 이송 중 충돌을 방지하기 위해 공구 경로를 검증하는 작업을 거친다. 최종적으로 검증된 NC 코드는 해체장비에 전송되어 자동으로 절단작업을 수행하게 된다. Fig. 6에 수중원격제어를 위한 CAM 시스템을 나타내었다.

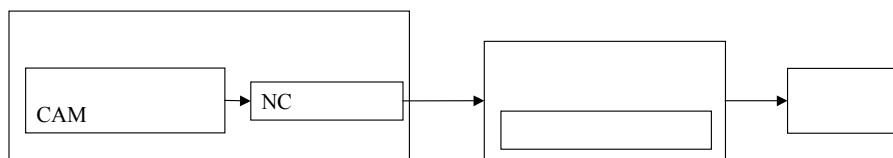


Fig. 6 수중원격제어 방법

비록 수중절단작업을 원격자동제어한다 하더라도 예측하지 못한 사고를 방지하고 절단작업과정을 실시간으로 관찰 및 감시하기 위해 수중에 카메라를 설치하였다. 카메라

는 해체장비에 2대를 설치하였으며, 각각 전후좌우 방향으로 회전이 가능하도록 제작하였다. 카메라에 연결된 모니터는 컨트롤러에 설치하여 작업자가 화면으로 감시하여 위험 상황 발생시 컨트롤러를 통해 해체장비를 바로 멈출 수 있도록 하였다.

4. 성능 시험

해체장비의 방수 성능 및 절삭성능을 평가하기 위해 방수 및 절삭시험을 수행하였다. 해체장비는 서보모터와 같은 전기 장치를 사용하므로 미량의 물이라도 침투하면 고장을 일으키게 된다. 따라서 장비를 수중에 투여하기 전에 충분한 방수 시험을 수행하여 안정성을 확보하였다. 절삭시험의 경우 모의 회전시료조사대를 절삭하여 절삭조건에 따른 진동이나 공구의 파손을 파악하고 적절한 절삭조건을 도출하였다.

4.1 방수 및 절삭시험 방법

방수시험은 각 모터케이스에 압력을 가하고 압력이 저하되는 시간을 검사하여 평가하였다. 이 시험은 실제 수중에서 절삭작업시 주변 압력은 0.4bar 정도이므로 모터케이스 내의 압력이 0.4bar 이상이 되면 물이 침투하지 못한다는 사실에 근거하였다. 보다 안정적인 방수를 위해 압력저하시험시 가해진 압력은 초기 3bar로 하고 0.4bar까지 저하되는 시간을 조사하였다. 압력이 저하되는 시간이 길어질수록 해체장비는 수중에서 좋은 방수 기능을 가진다고 할 수 있다. 본 해체장비를 위해 제작된 방수장치(Fig. 4)는 모터케이스가 0.4bar이상의 압력이 유지되도록 제어해주므로 압력저하시간이 충분히 길다면 수중에서 해체장비의 절삭작업이 원활히 이루어질 수 있을 것으로 기대한다.

해체장비는 기계적 실링장치와 압력을 유지해 주는 방수장치로 방수 기능을 갖추고 있으며, 해체장비의 조립시 발생하는 미세한 누설 부위는 에폭시로 1차 실링 후 실리콘으로 2차 실링을 하였다. 이러한 보완 부위는 컨트롤러와 해체장비를 연결하는 전력공급선과 제어지령선의 모터 연결부, 컨트롤러 연결부, 전선내피부이다. Fig. 7에 모터연결부와 전선내피부의 실링한 상태를 나타내었다.

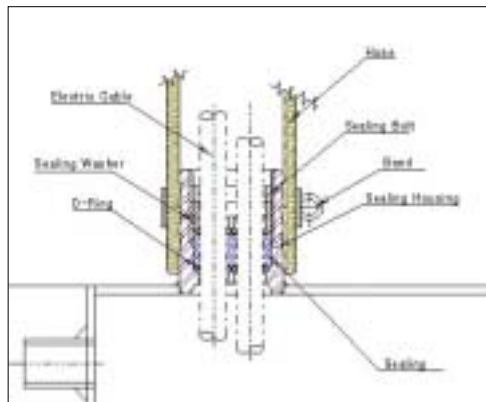


Fig. 7 모터연결부와 전선내피부의 실링

절삭시험은 Fig. 8과 같은 모의 회전시료조사대를 제작하여 이를 대상으로 수행하였다. 절삭시험은 주축 회전속도 2000, 2500, 3000rpm(revolution per minute), 이송속도 100, 125, 150mm/min의 조건에서 수행하였다. 절삭력을 측정하여 안정적인 절삭

조건을 도출하기 위해서 회전시료조사대와 같은 재질의 알루미늄에 대해 일반 머시닝 센터에서 절삭시험을 수행한 수 이를 해체장비에 적용하였다.

4.2 시험 결과

방수시험을 위한 압력저하시험 결과(X축)를 Fig. 8에 나타내었다. 시험은 실링 보완하기 전의 상태와 실링한 후의 상태에서 각각 수행하여 결과를 비교하였다. 실링 전의 경우 압력이 3bar에서 0.4bar로 저하되는데 걸리는 시간은 약 12분, 1bar에서 0.4bar로 저하되는데 걸리는 시간은 약 7분으로 매우 빠른 속도로 압력이 저하되었다. 실링 후의 경우 압력이 3bar에서 0.4bar로 저하되는데 걸리는 시간은 약 2시간 10분, 1bar에서 0.4bar로 저하되는데 걸리는 시간은 약 1시간으로 실링 전의 경우와 비교하여 약 10배 정도의 우수한 방수 성능을 보였으며 해체장비의 수중 투여시 모터의 안전성을 확인하였다. X축의 압력저하시험 결과를 기준으로 그 외 축에도 같은 실링 방법으로 보완하여 우수한 방수 성능을 확보하였다.

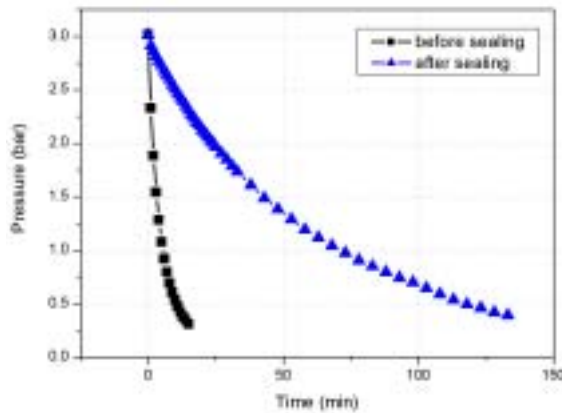


Fig. 8 압력저하시험 결과(X축)

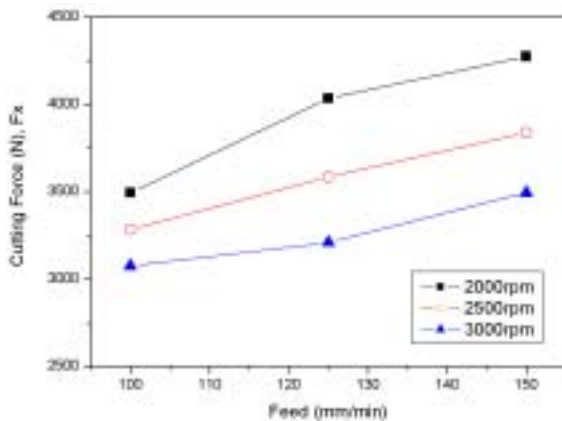


Fig. 9 절삭력 측정 결과

회전시료조사대를 절삭하기 위한 최적의 조건을 도출하기 위해 알루미늄의 절삭력 측정 결과를 Fig. 9에 나타내었다. X방향의 절삭력에 대해 비교한 결과 회전속도가 커질수록 절삭력은 낮아지며, 이송속도가 커질수록 절삭력은 커짐을 알 수 있다. 실제 절삭시 절삭력이 작을수록 절삭은 안정적으로 이루어지므로 회전시료조사대를 절삭하기 위

한 최적 절삭조건을 회전속도 3000rpm, 이송속도 100mm/min으로 결정하였다. 이와 같이 도출된 절삭조건으로 모의 회전시료조사대를 성공적으로 절삭하여 스테인리스 스틸 부품을 해체하였다.

5. 결론

회전시료조사대를 수중에서 해체하기 위한 수중 해체장비를 제작하였다. 해체장비를 설계하기 위해 회전시료조사대의 물리적·방사선학적 특성을 분석하고 분석 결과를 토대로 해체장비를 설계하였다. 해체장비의 특징은 회전시료조사대의 원활하고 정밀한 가공을 위한 4축 구동 방식, 회전시료조사대의 견고한 고정을 위한 전용 클램핑 장치 제작, 내수성을 위한 기계적 실링 및 방수장치 제작 등이다. 해체장비의 설계 후 구조해석을 수행한 결과 본 장비는 안정성과 충분한 정밀도를 가짐을 확인하였다. 수중에서 해체작업이 수행되는 특성을 고려하여 CAM 시스템을 적용한 수중 원격제어 방법을 제시하였다. 제작된 해체장비의 방수 및 절삭 성능을 평가하기 위해 압력저하실험과 절삭 실험을 수행하였고 그 결과 해체장비의 우수한 방수 성능을 확인하였으며 회전시료조사대를 안정적으로 절삭할 수 있는 최적 절삭조건을 도출하였다. 이와 같은 결과로부터 제작된 해체장비는 회전시료조사대를 수중에서 안전하게 해체할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 중·장기 계획사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) 정기정 외, “연구로 1호기 및 2호기 폐로사업 해체계획서”, KAERI/TR 1654/2000, 한국원자력연구소, 2000
- (2) 이동규 외, “연구로 1, 2호기 해체에 따른 방사성 고체폐기물 관리방안 연구”, 2000 춘계학술발표회, 한국원자력학회, 2000
- (3) "Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment", 1998, Naval Surface Warfare Center
- (4) 박승국 외, “연구로 1, 2호기 회전시료조사대 해체절차에 관한 연구”, 2001춘계학술발표회, 한국원자력학회, 2001
- (5) 이동규 외, “수중 밀링 가공을 위한 주축 및 방수장치의 개발”, 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, 2003
- (6) 이동규 외, “원자로 부품의 수중 밀링 가공을 위한 4축 밀링 머신의 설계”, 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, 2003