

연구로 1,2 호기 회전시료조사대(Rotary Specimen Rack) 해체작업
공정 분석 및 수중분해장비 개발

Analysis of Dismantling Working Process and Development of the
Underwater Disassembling Equipment for Rotary Specimen
Rack(RSR) of KRR-1&2

정운수, 김성균, 정기정
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

연구로 1,2 호기의 기기중 가장 방사화 정도가 높은 회전시료조사대(Rotary Specimen Rack, RSR)의 제거작업절차가 수립되고 회전시료조사대 내부의 스테인레스 부품을 수거하기 위해 수중분해장비개발을 모색하였다. 이에 앞서 회전시료조사대 분해작업을 각 단계에 따라 3차원 시뮬레이션을 통해 작업공정분석을 수행하였으며, 세부단계에 대한 작업순서를 연구하여 작업공정 상에서 발생할 수 있는 문제점을 파악하였다. 그리고 이러한 작업공정분석을 바탕으로 회전시료조사대의 분해작업을 수행하기 위한 수중절단장비를 설계하였다.

Abstract

According to setting up working procedure of Rotary Specimen Rack(RSR) to the KRR-1&2, We have tried to develop equipments for decommissioning of RSR. First of all, analysis of working process for the RSR decommissioning work is performed by 3D simulation as to each step and detail working procedures are studied. Then we detected problems which happen to work process. On the basis of work process analysis, underwater cutting equipments are designed for decommissioning RSR.

1. 서론

국내 최초의 연구용 원자로 1,2 호기(KRR-1,2)는 각각 1962년과 1972년에 가동을 시작하여 국내 원자력 기술 자립에 많은 도움을 주었다. 그러나 하나로에 정상 가동으로 효율 가치를 상실하고 시설의 노후화로 1995년 두기 모두 가동을 중지하고 1996년 폐로하기로 결정하였다. 이후 해체설계와 방사능 분석 등을 수행하여 해체계획서[1]를 작성하였으며, 정부로부터 재입 해체 계획에 대한 인허가를 1999년 11월 받게되었다[2]

연구로를 해체할 경우 많은 양의 방사성고체폐기물들이 발생하게 되는데 대부분이 저준위 방사성고체폐기물로 평가되었다[3]. 한편, 연구로 1,2호기에 있는 3개의 회전시료조사대(Rotary Specimen Rack)는 내부의 스테인레스스틸 부품 등이 중성자 조사에 의해 가장 높게 방사화 되었을 것으로 평가되었으며, 대표적 핵종인 Co-60에 대한 예측평가를 한 결과, 폐기물 분류기준(IAEA Safty Series ST-1)[4]에 의거 중저준위인 것으로 나타났다. 그러나 실제 측정을 통해 얻어지는 방사화 결과 등을 고려하여 회전시료조사대 내부의 스테인레스스틸 부품을 중준위 고체폐기물로 분류하여 회전시료조사대 분해작업요건과 절차를 수립하였다.

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. 연구로 2호기 회전시료조사대는 수중에서 노심으로부터 원격으로 분리한 후 차폐용기에 담아 연구로 1호기 실험수조로 이송하고 여기서 수중분해장비를 이용하여 수중에서 분해, 절단작업을 하게된다. 이때 알루미늄 용기 내에 포함되어있는 스테인레스스틸 부품을 분리, 수거하여 중준위폐기물로 처리하고 나머지 알루미늄부품은 저준위폐기물로 처리하게 된다. 분리된 스테인레스스틸 부품은 연구로 운영시 사용하였던 사용 후 핵연료 이송용기(TIF Cask)에 담아 저장 관리하게 된다.

본 연구를 통해 회전시료조사대 해체작업을 각 단계에 따라 3차원 시뮬레이션을 통해 공정분석을 수행하였으며 세부단계에 대한 작업순서를 연구하였다. 그리고 작업 공정에서 발생 할 수 있는 문제점을 파악하였고 이러한 공정분석을 바탕으로 회전시료조사대를 수중에서 분해하기 위한 수중절단장비를 설계하였다.

2. 본론

2.1 회전시료조사대 개요

연구로 2호기에는 재료시편을 조사시키기 위한 41개의 알루미늄 랙(직경 3.2cm, 깊이 27.4cm)을 내장한 링 모양의 이중용기가 노심 구조물(Shroud)의 바깥쪽에 설치되어 있다. 회전시료조사대의 상부에는 부력탱크(Flotation Tank)가 설치되어 공기의 부력작용으로 회전시료조사대를 상하로 움직일 수 있게 되어 있다.(그림. 1)

회전시료조사대에는 조사시편의 장전과 인출통로로 내부직경이 3.4cm인 튜브가 설치되어있으며, 각 41개소의 조사공 위치를 내정하기 위한 드라이버-인디케이터 집합체와, 회전시료조사대 내 조사공에 시료를 장전 및 인출하기 위한 Reel형식의 Specimen-Lifting

집합체가 원자로 수조 상부의 브릿지와 연결되어 있다. 회전시료조사대 용기의 내부에는 스테인레스스틸로 제작된 스프로킷, 체인 등이 설치되어 있어 조사공의 회전운동을 전달한다.

부력탱크는 2개의 알루미늄 탱크로 구성되어 있는데 바닥면은 개방되어 있으며 탱크당 4개씩 총 8개의 스테인레스스틸 볼트로 본체의 상부에 고정되어 있다. 각각의 부력탱크의 상부는 서로 대칭을 유지하고, 상하 운동시 회전을 방지하기 위해 하나의 스테인레스스틸 안내핀(Guide Pin)이 설치되어 있다. 공기공급튜브를 통해 압축공기가 공급되면 부력탱크 내의 물을 밀어내고 반대로 압축공기를 배출시키면 물로 채워진다. 이 작용으로 회전시료조사대가 상하운동을 하게 된다.

2.2 회전시료대의 방사선학적 평가

연구로 해체에 있어서 가장 먼저 고려하여야 할 사항은 원자로 가동 중 중성자에 의해 방사화된 기기의 방사선학적 평가이다. 그러므로 원자로가 설치된 원자로 수조내부의 중요 기기들 중에서 핵연료에 가장 근접한 곳, 즉 중성자속이 가장 높은 곳에 위치하고 있는 원자로 구조물이 방사화 정도가 가장 높을 것으로 예상되나, TRIGA형 원자로는 원자로 구조물이 알루미늄으로 제작되어 있어 원자로 운전정지 후 수년이 지난 후에는 충분히 감쇠 되었다고 판단 할 수 있다. 그 다음으로 핵연료에 가장 근접한 기기로는 원자로 주위를 감싸고 있는 반지 모양의 회전시료조사대가 위치하고 있는데 그 내부에는 스테인레스 재질로 제작된 구동장치가 있다. 이 스테인레스 부품이 방사화되어 작업자로 하여금 피폭을 가장 많이 일으키게 하는 Co-60 핵종이 생성하게 된다. 회전시료조사대 내부의 스테인레스로 제작된 부품만을 별도로 수거 할 경우에는 소량의 고방사성 폐기물만을 처리하게 되므로 최종 처분할 때까지의 관리비이나, 최종처분 비용을 상당히 줄일 수가 있다. 그래서 연구로 2호기에 사용하였던 회전시료조사대의 방사선학적 특성을 분석한 결과, 회전시료조사대 전체의 총 방사능은 $1.28 \times 10^{12} \text{Bq}$ 으로 평가되었고 이중 Co-60 핵종은 $6.75 \times 10^{11} \text{Bq}$ 로 평가되었으며, 내부 스테인레스 부품만의 총 방사능은 $1.23 \times 10^{12} \text{Bq}$, Co-60 핵종 $6.7 \times 10^{11} \text{Bq}$ 로서 대부분을 차지하고 있는 것으로 분석되었다. 회전시료조사대 전체의 무게는 115 kg이고, 이중 내부의 스테인레스 부품이 3.4 kg 임으로 스테인레스 부품만을 별도로 수거하면 소형의 차폐용기에도 저장할 수가 있다.

2.3 회전시료조사대 해체 공정 분석

Step 1: Flotation Tank부 해체

그림 2는 Flotation Tank부의 해체과정을 보여주고 있다. No. 1 그림은 부력탱크와 회전시료대의 몸체와 결합되어 있는 모습을 나타내고 있으며 No. 2는 부력탱크 위에 고정되어 있는 블록과 볼트를 보여주고 있다. 회전시료조사대 No. 3과 같이 블록 위의 볼트 머리부분을 절단하고 볼트 나사부분을 파내어 스테인레스스틸 부품인 볼트, 너트, 블록을

빼낸다. 또한 No. 4와 No. 5에서 상부블록을 고정하고 있는 볼트의 머리부분을 절단하고 나사부를 파낸다. 마지막으로 No. 6~No. 8은 부력탱크와 회전시료대 몸체를 결합하고 있는 8개의 볼트를 제거하는 과정을 나타내고 있다. 8개의 볼트가 제거되면 No. 10과 같이 부력탱크와 하우징이 분리된다.

Step 2: 회전시료조사대 상부판 절단

회전시료조사대 상부판을 제거하기 위해 몸체 외부벽과 내부벽에 수증분해장비의 절삭기를 이용하여 회전시료조사대를 회전시켜서 원주방향으로 절단한다. 그림 3의 No. 2는 회전시료조사대 상부판이 절단된 모습을 나타내고 있다. 그 다음 회전시료조사관을 회전시키는 장치인 구동블록을 분해한다. No. 4와 같이 구동샤프트와 회전시료대 몸체와 연결되어 있는 부분을 절단한다. No. 5는 회전시료조사관을 제외한 모든 부품이 제거된 모습을 보여주고 있다.

Step 3: 구동체인 해체와 Strip 제거

그림 4는 회전시료조사관에 연결되어 있는 구동체인을 제거하는 과정이다. 먼저 No. 2와 No. 3과 같이 회전시료조사관과 체인을 연결하고 있는 볼트의 머리를 제거한다. 총 19개의 볼트를 제거하면 No. 5와 같이 회전시료조사관과 체인이 분리된다. 그 다음 회전시료대 몸체와 베어링을 고정시키고 있는 Strip을 제거한다. No. 7과 같이 Strip을 고정하고 있는 볼트의 머리를 제거하여 Strip을 분리한다.

Step 4 회전시료조사관 분리

그림 5는 회전시료조사관과 몸체를 분리하는 과정을 나타내고 있다. No. 1에서 몸체의 내부를 원주방향에 따라 커터를 이용하여 절단한다. No. 2는 몸체 내부가 절단된 모습을 보여주고 있다. 몸체에서 회전시료조사관을 분리시킨다. 회전시료조사관과 체인 분리시 볼트 머리만 제거하고 남은 볼트 나사부와 너트 19개를 제거한다. No. 6은 회전시료조사관에서 스테인레스스틸 부품을 모두 분리한 모습을 나타내고 있다.

Step 5 베어링 분리 및 나사부 절단

그림 6은 회전시료조사대 본체에 남아있는 잔여물(볼트 나사부와 베어링)을 제거하는 과정을 나타내고 있다. 먼저 No. 2와 같이 몸체와 베어링을 분리시킨다. 그리고 No. 3과 같이 몸체에 붙어 있는 머리가 절단된 볼트를 나사부 주위를 절단하여 분리한다. No. 4는 볼트의 나사부가 절단된 모습을 나타내고 있으며 No. 5는 상부 하우징에서 모든 스테인레스스틸 부품이 제거된 모습을 나타내고 있다.

Step 6: 바닥 블록 및 Side Bracket 절단

그림 7은 몸체 하부에 부착되어 있는 하부블록을 제거하는 과정을 나타내고 있다. 하부

블록을 고정하고 있는 볼트의 머리를 제거한다. 그 다음 No. 3과 같이 하우징에서 하부 블록을 분리한다. 몸체에는 아직 볼트의 나사부가 남아 있으므로 나사부 주위를 절단하여 분리시킨다. No. 5는 나사부가 분리된 모습을 보여주고 있다. 그리고 몸체 안쪽 하단부에 Side Bracket이 볼트로 고정되어 있다. 이를 제거하기 위해 Side Bracket을 No. 7과 같이 몸체와 닿는 주변을 절단하여 분리시킨다.

2.4 회전시료조사대 수중분해장비 설계

위에서 언급한 해체공정을 수행하기 위해서는 회전시료조사대를 수중에서 절단, 분해할 수 있는 장비를 개발해야 한다. 해체장비는 기본적으로 수평, 수직, 및 원주 방향으로 절단이 가능해야하며 수조 속에서 작업을 수행해야 하므로 구동모터의 방수 및 부식방지는 필수적이다. 분해장비의 기본사양은 다음과 같다.

1. 크기 : 장비의 전체 크기는 2,094mm × 2,205mm × 3,098mm이다.
2. 구동모터 : 구동모터는 크게 절삭용 모터와 이송용 모터로 나누어지며 각각의 사양은 표 1과 같다.
3. 작업 Table 및 Cutting Ass'y 이송거리는 좌우 이송거리는 900 mm, 전후이송거리는 640 mm, 상하이송거리 1400 mm 이며 회전 테이블은 360°회전이 가능하도록 한다.
4. 해체장비 전체중량은 약 1800 kg 이다.
5. 작업Table의 최저 이송속도는 좌우이송은 30 mm/min, 전후이송은 30 mm/min, 상하이송은 60 mm/min로 설정하였다.
6. 직선운동 및 회전시스템에 사용될 이송장치로 다음과 같은 부품을 선정하였다.
 - 1) 좌우이송장치
 - a. Linear Motion Guide : HR 2042T (THK, 미국)
 - b. Ball Screw : BNT 2806B (THK, 미국)
 - 2) 전후이송장치
 - a. Linear Motion Guide : HSR 20HTA (THK, 미국)
 - b. Ball Screw : BNT 2806B (THK, 미국)
 - 3) 상하이송장치
 - a. Linear Motion Guide : HSR 35HTA (THK, 미국)
 - b. Ball Screw : BNT 4512B (THK, 미국)
 - 4) 회전장치
웜과 웜기어 사용

이상과 같은 기본재원을 이용하여 최종 설계된 회전시료조사대 수중해체장비는 그림 8.과 같다.

3. 결론

연구로 1,2호기에서 가장 방사화가 높은 것으로 평가되고 가장 취급이 어려운 회전시료 조사대(RSR)를 3차원 시뮬레이션을 통해 작업공정분석을 수행하였다. 특히, 고방사성 물질로 취급할 수밖에 없는 스테인레스스틸 부품인 볼트, 너트, 체인 등과 같은 부품을 별도로 수거하기 위한 작업을 세부단계 별로 검토하였다.

고방사성 물질을 취급하기 위해서는 원격으로 차폐가 된 밀폐된 방이나 수중에서 작업할 수밖에 없으므로 연구로 1호기 수조 옆에 부착된 실험수조가 적절하여 회전시료조사대(RSR)를 수중에서 해체하기 위한 장비를 개발하게 되었다. 이 장비는 수중에서 직선절단 및 원주방향 회전절단 등이 이루어진다는 점에서 특수성을 갖는다. 이와 같이 수중에서 절삭이 가능한 장비는 현재 국내외에 알려진 바가 없어 향후 수중에서 절단작업을 수행하는 최초의 장비가 될 수 있을 뿐만 아니라 향후 수중 금속가공 장비의 개발에 유용한 기술들을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 다음 기회에는 설계된 도면에 따라 제작된 장비의 성능 시험평가 결과를 발표할 기회가 있기를 기대한다.

4. 참고문헌

- [1] 정기정 외, 연구로 1호기 및 2호기 폐로사업 해체계획서, KAERI/TR 1654/2000, 한국원자력 연구소, 2000
- [2] 정기정 외, 연구용 원자로 폐로사업, KAERI/RR-2099/2000, 한국원자력연구소, 2000
- [3] 정기정 외, 연구용 원자로 폐로사업, KAERI/RR-1993/99, 한국원자력연구소, 1999
- [4] "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", Safety Standard Series ST-1, IAEA, 1996
- [5] 박승국 외, 연구로 1,2호기(TRIGA Mark-II&III)의 해체 방사성 고체폐기물 처리방안, KAERI/TR-1341/99, 한국원자력연구소, 1999
- [6] 박승국 외, TRIGA 연구로 폐로를 위한 시설현황 및 방사선/능 조사보고서, KAERI/TR-1153/98, 한국원자력연구소, 1998
- [7] 이봉재 외, "TRIGA Mark-II,III 연구로시설의 폐로를 위한 시설내 잔류 방사선/능 평가", 제 24권 제2호, 대한방사선학회지, 1999
- [8] 연구로 1,2호기 폐로를 위한 방사선관리지침, 한국원자력연구소, 2000
- [9] 박승국 외, 연구로 2호기(TRIGA Mark-III) 해체계획, KAERI/TR-1331/99, 한국원자력연구소, 1999
- [10] 박승국 외, "연구로 1호기(TRIGA Mark-II) 현황 및 해체방법, 제8권 제3호, 한국에너지공학회, 1999
- [11] K. J. Jung, "Radioactive waste management plan during the TRIGA Mark-II and Mark-III decommissioning", International Symposium on Technologies for the Management of Radioactive Waste from Nuclear Power Plants and Back End Nuclear Fuel Cycle Activities, Taejon, 1999

표 1 이송 및 절삭 모터 재원

	Cutting Motor	Feed Motor
Company	VOAC	렉스로스-세기
Model	F11-10	MCR05, 380
Volume	9.84 cm^3	380 cm^3
Torque	7.8 Nm ($\Delta P=100bar$)	604 Nm ($\Delta P=100bar$)
Speed	Min: 200 rpm Max: 10000 rpm	Min: 5 rpm Max: 220 rpm
Weight	5 kgf	39 kgf

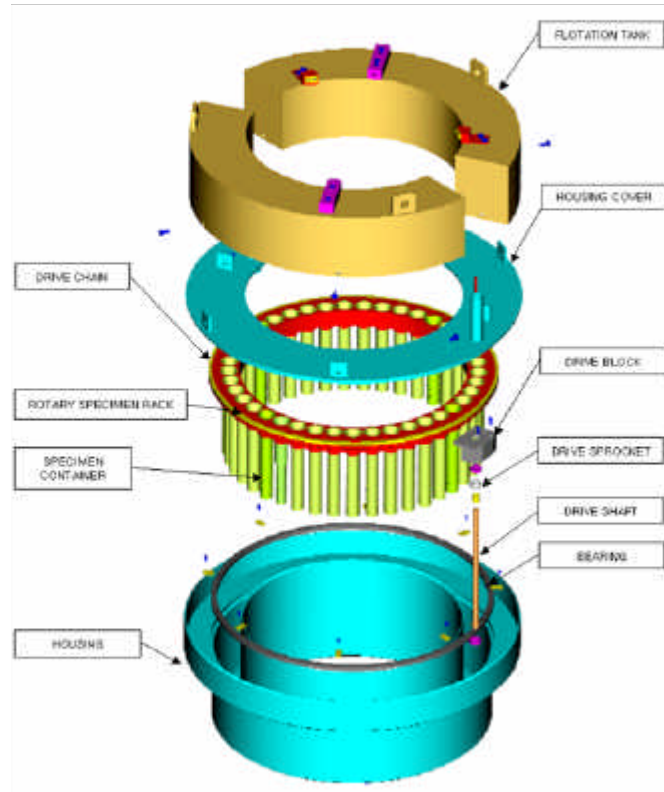
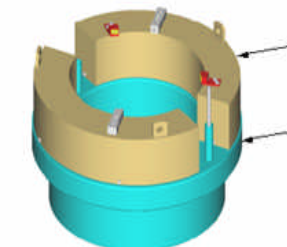
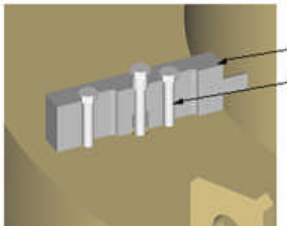
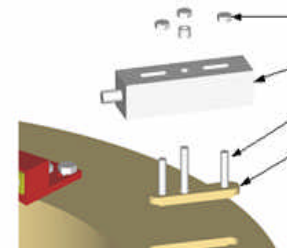
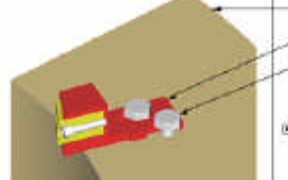
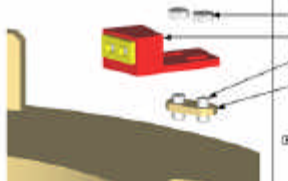
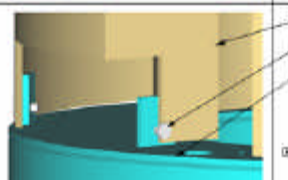

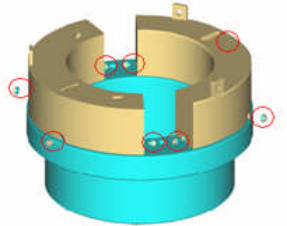
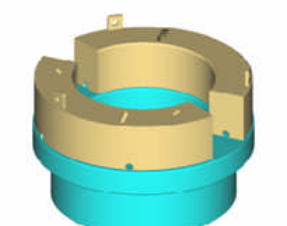


그림 1. 회전시료조사대 분해도

NO	약 단	설 명
1		<p>FLOTATION TANK</p> <p>HOUSING</p> <p>1. ROTARY SPECIMEN RACK 완성태</p>
2		<p>BLOCK "A"</p> <p>BOLT</p> <p>1. BLOCK "A" SECTION도</p>
3		<p>BOLT HEAD부</p> <p>BLOCK "A"</p> <p>BOLT 나사부</p> <p>FLOTATION TANK 절단</p> <p>1. BOLT HEAD부 절단 2. BLOCK "A"를 분리시킴 3. FLOTATION TANK상단에 BOLT가 취부되어있는 부위를 절단</p>

NO	약 단	설 명
4		<p>FLOTATION TANK</p> <p>BLOCK "B"</p> <p>BOLT</p> <p>1. BLOCK "B" SECTIONS</p>
5		<p>BOLT HEAD부</p> <p>BLOCK "B"</p> <p>BOLT 나사부</p> <p>FLOTATION TANK 절단부</p> <p>1. BOLT HEAD부 절단 2. BLOCK "B"를 분리시킴 3. FLOTATION TANK상단에 BOLT가 취부되어 있는 부위를 절단</p>
6		<p>FLOTATION TANK</p> <p>BOLT</p> <p>HOUSING COVER</p> <p>1. FLOTATION TANK의 HOUSING COVER를 결합하고 있는 BOLT가 내부 모습</p>
7		<p>1. FLOTATION TANK의 HOUSING COVER를 결합하고 있는 BOLT 를 인그림과 같이 절단</p>

NO	약 단	설 명
8		<p>1. BOLT부위 모두 절단(8EA)</p>
9		<p>1. BOLT부위 모두 절단 제거된 모습</p>

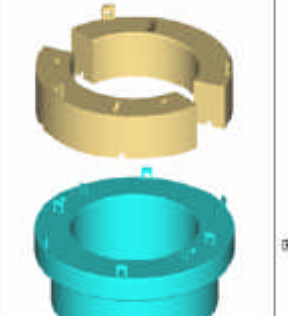
10		<p>1. FLOTATION TANK의 HOUSING이 분리된 모습</p>
----	--------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------

그림 2. Flotation tank부 해체 단계

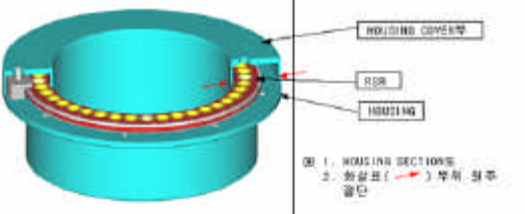



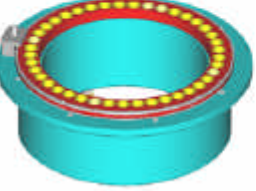

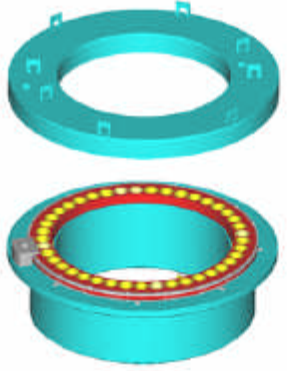

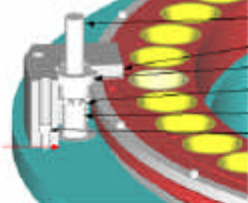



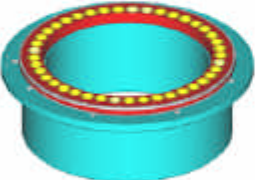

NO	학 도	설명	NO	학 도	설명
1		<p>  1. HOUSING SECTION  2. 롤러부 (→) 부위 절단  절단 </p>	2		<p>  1. HOUSING COVER 제거될 모습 </p>
2		<p>  1. HOUSING COVER 절단된 모습 </p>	4		<p>  1. DRIVE BLOCK의 SECTION  2. 롤러부 (→) 부위 CUTTING (2회)  3. 상기 기계부품 모두 분리됨 </p>
			3		<p>  1. DRIVE BLOCK이 분리될 모습 </p>

그림 3. Housing Cover 절단

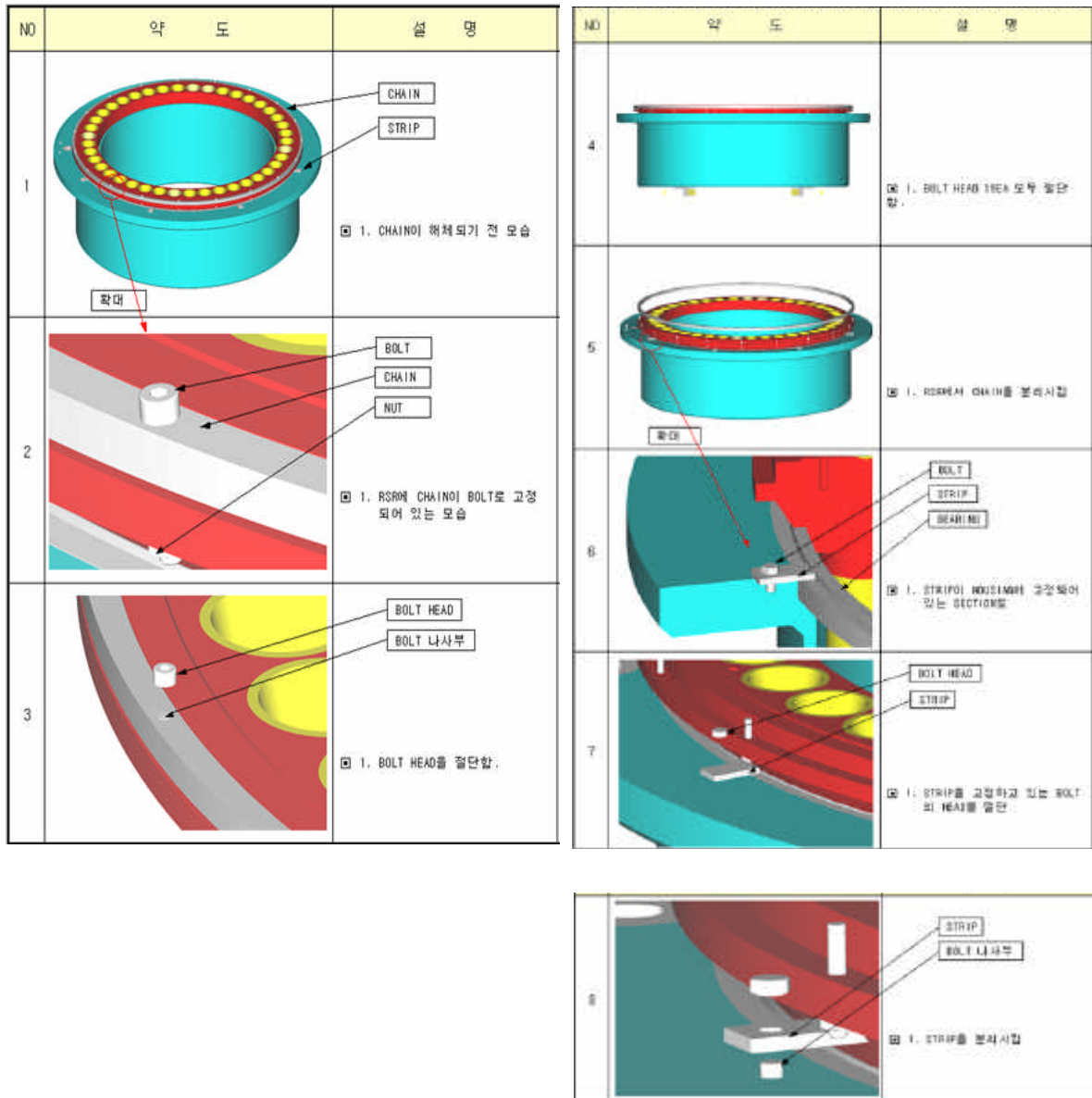


그림 4. 구동체인 해체와 Strip 제거

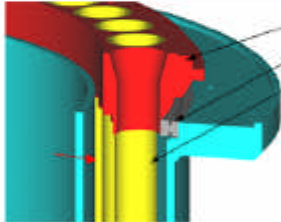
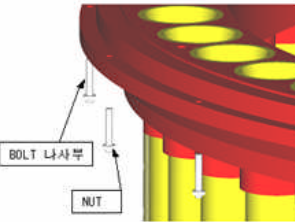
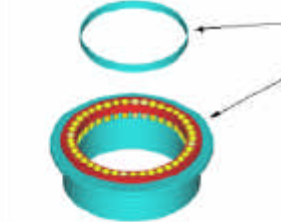
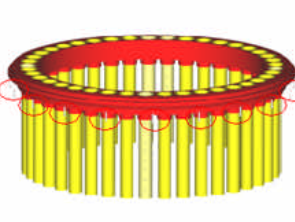
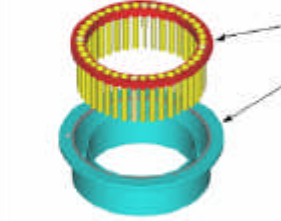
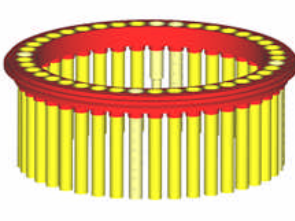
NO	작업	설명	NO	약도	설명
1		<p>RSR이 베어링과 컨테이너 사이에 위치하고 있습니다. 화살표(→) 방향으로 내경을 CUTTING합니다.</p>	4		<p>RSR에서 CHAIN분리시 BOLT HEAD만 제거하고 남은 BOLT 나사부분과 NUT를 제거함</p>
2		<p>HOLDING 분해해서 CUTTING 링 내경을 분리시킴</p>	5		<p>BOLT의 나사부분 19개 모두 제거함 (○)</p>
3		<p>HOLDING 분해해서 RSR을 분리시킴</p>	6		<p>RSR에서 스테인레스부품들이 모두 분리된 모습</p>

그림 5. 회전시료조사관 분리

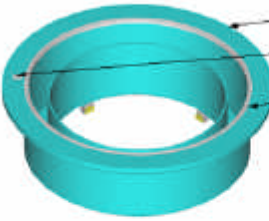
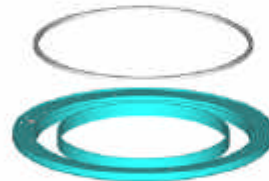
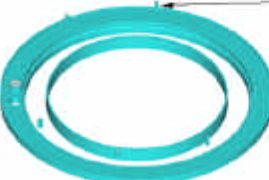

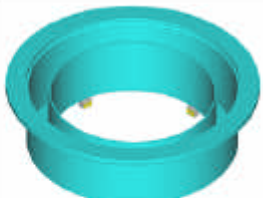
NO	작 도	설명
1		<p>HOUSING 스테인레스부품 간여물 (BOLT 나사부 & Bearing) BEARING</p> <p>※ 1. HOUSING 분해 모습</p>
2		<p>※ 1. BEARING을 HOUSING에서 분리 시킴</p>
3		<p>BOLT 나사부</p> <p>※ 1. HOUSING에 외부에서 HEAD만 절단된 BOLT의 나사부유물을 CUTTING머시 분리함</p>
NO	작 도	설명
4		<p>※ 1. 분리된 BOLT나사부 모습</p>
5		<p>※ 1. 상부의 스테인레스부품들이 모두 제거된 HOUSING 모습</p>

그림 6. Bearing 분리 및 나사부 절단

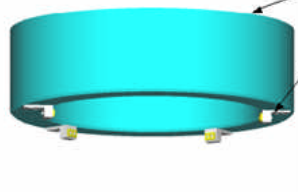





NO	약	명		
1		<p>HOUSING 바닥BLOCK</p> <p>1. HOUSING의 하부쪽 모습 2. 바닥BLOCK은 BOLT로 고정되어 있음</p>		<p>BOLT 나사부</p> <p>1. HOUSING에서 바닥BLOCK을 분리하고 날 모습</p>
2		<p>BOLT HEAD</p> <p>1. 바닥BLOCK을 고정하고 있는 BOLT의 HEAD를 절단함</p>		<p>1. HOUSING에서 BOLT의 나사부 주위를 CUTTING에 분리시킴 모습</p>
3		<p>BOLT 나사부</p> <p>1. HOUSING에서 바닥BLOCK을 분리시킴 2. BOLT의 나사부는 HOUSING에 남아있음</p>		<p>SIDE BRKT</p> <p>1. HOUSING과 바닥BLOCK의 사이에서 BOLT를 고정시켜 있음</p>
				<p>1. SIDE BRKT를 영구철과 같이 HOUSING과 같은 부위 주변을 CUTTING에서 분리시킴</p>

그림 7. 바닥 Block 및 Side Bracket 절단

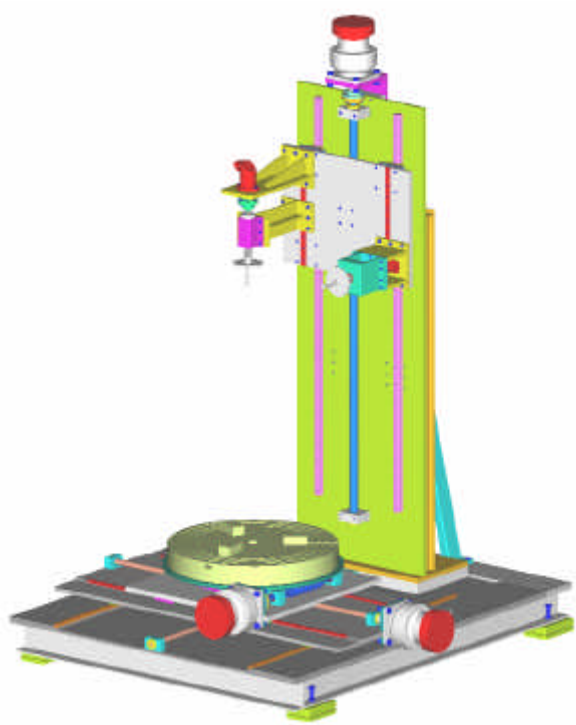
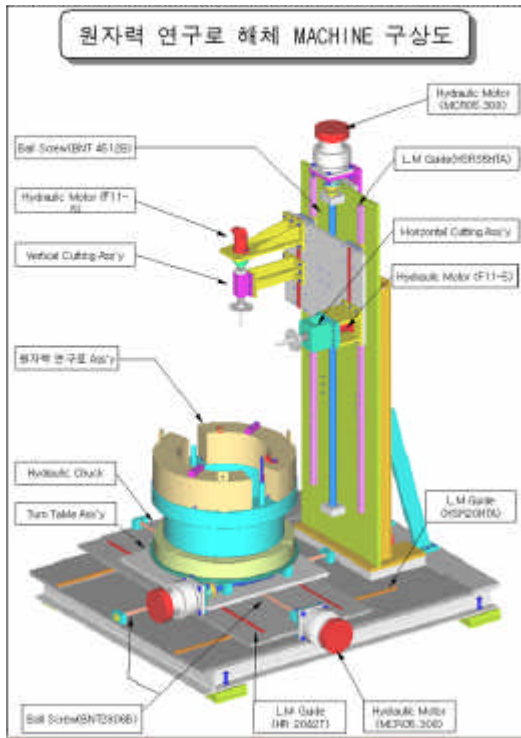


그림 8. 회전시료조사대 해체장비 구상도