

	초전도 자석 계통 설계 및 운영 설비 구축	개정번호: 0
	기술 시방서 (Technical Specification)	발행일자: '23. 2.

제 목 : 초전도 도체 시험설비용 권선장비 및 진공 열처리장비 개념설계

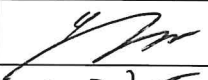


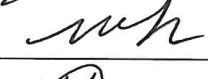

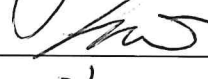
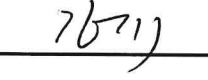
개정 이력

개정번호	개정일자	개 정 사 유
0	2023. 2. 10	최초발행

관련부서 검토

소속/직책	성 명	서 명	일 자

작성, 검토 및 승인

구 분	소속/직책	성 명	서 명	일 자
작 성	KSTAR운전팀/담당	우 인 식		2023. 2. 16
작 성	KSTAR운전팀/담당	김 무 용		2023. 2. 16
작 성	진공극저온연구팀/담당	장 용 복		2023. 2. 16
작 성	KSTAR운전팀/담당	박 현 기		2023. 2. 16
검 토	KSTAR운전팀/담당	이 현 정		2023. 2. 22
검 토	KSTAR운전연구팀/팀장	김 광 표		2023. 2. 16
승 인	토카막장치기술부/부장	박 갑 래		2023. 2. 22

목 차

1. 목적	3
2. 용어의 정의	3
3. 업무 범위	4
3.1 업무내용	4
3.2 장비별 업무내용	5
3.3 SUCCEX 자석	6
4. 기술사양	8
4.1 권선장비	8
4.1.1 권선장비 사양	8
4.1.2 권선공정	13
4.1.3 권선장비 설계시 고려사항	18
4.2 진공 열처리장비	18
4.2.1 열처리장비 사양	18
4.2.2 열처리 공정	22
4.2.3 진공 열처리장비 설계시 고려사항	26
5. 요구사항	26
5.1 설계시 요구사항	26
5.2 각종보고	26
6. 결과물	27
6.1 보고서 작성	27
6.2 제출물	27
7. 특허권 및 소유권	27
8. 기타	27

1. 목적

본 기술시방서는 한국핵융합에너지연구원(이하 KFE)에서 시행 중인 초전도 도체 시험 설비 구축 과제 수행을 위한 초전도 코일 권선장비 및 진공 열처리장비 개념설계의 기술 용역을 수행함에 있어서 필요한 전반적인 기술 사양과 제반 조건을 규정한다.

2. 용어의 정의

- (1) 발주자/구매자: 한국핵융합에너지연구원(KFE) 또는 그의 위임자를 의미하며, 기술용역 계약의 경우 발주자로도 정의한다.
- (2) 계약자/용역수행자: 구매자에게 계약에 의거 기자재 및 용역을 공급하는 자로서 이 시방서에서는 공급자, 판매자 및 하도급계약자 등을 포함한다.
- (3) 권선장비: 관내연선도체 (CICC, Cable in Conductor Conduit)의 권선장비는 스펴에 감겨진 관내연선도체를 직선 변형한 후 원하는 형상으로 성형하고 성형된 관내연선도체를 일정하게 권취 고정함으로써, 관내연선도체가 전체적으로 균일한 형상의 초전도 자석 코일을 성형하는 장비이다. 관내연선도체의 권선장비는 스펴로 부터 관내연선도체를 인출하여 공급하는 공급롤러부, 관내연선도체를 직선형으로 변형하는 직선변형 롤러부, 관내연선도체를 이송시키면서 일정한 형상으로 벤딩하는 벤딩롤러부, 관내연선도체를 권취하여 고정하는 권취부등으로 구성되어 있다.
- (4) 진공 열처리장비: 초전도자석이 극저온에서 초전도 성질을 가지기 위하여 저온 초전도선재의 초전도체 조성을 위한 열처리 장비로 고진공 환경을 조성하고 약 660℃로 온도균일도는 공간적으로 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$, 시간적으로는 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 이내로 240시간을 가열하여 초전도체 조성을 하는 장비이다. 진공 열처리장비는 진공 Chamber, 진공 시스템, Heater, 온도 제어 시스템, 가스 Purge 시스템, 운전 제어 및 모니터링 시스템등으로 구성되어 있다.

3. 업무 범위

계약자는 본 기술용역 시방서에서 언급하고 요구하는 조건 및 기준을 만족하여야 하며, 다음의 업무를 수행하여야 한다. 계약자는 아래에서 언급한 모든 업무를 계약 후 9개월 이내에 완료해야 한다.

3.1 업무내용

1) 장비 개념설계

구매자가 요구하는 사양의 초전도 자석을 제작하기 위한 권선장비 및 진공 열처리장비에 대한 기술사양을 결정하고 개념설계를 수행한다. 계약자는 초전도 자석에 대한 제원을 파악하여 장비에 요구되는 기술사양을 결정하고 이를 만족하도록 권선장비 및 진공 열처리장비 장비의 개념설계를 수행해야 한다. 또한 용역수행 중 변경되는 초전도 자석에 대한 제원을 반영한 장비의 개념설계도 본 용역에 포함된다.

개념설계시 고려해야 할 사항은 다음과 같다.

- 대상물의 구조적, 열적, 전기적 안정성을 만족하는 장비 설계
- 대상물의 허용 공차를 만족하고 대상물과의 간섭을 회피하는 장비 설계
- 경제성, 자석 제작 일정, 작업성을 고려한 장비 설계
- 장비 자체의 용이한 조립 및 설치를 고려한 장비 설계
- 권선 중 inter coil 제작을 고려한 장비 설계

2) 장비 공학계산/해석 수행

권선장비 및 진공 열처리장비 장비의 구조적 및 열적, 전기적 기술사양을 검증하기 위한 공학 계산 혹은 해석을 수행한다.

3) 장비 개념설계 도면 작성

권선장비 및 진공 열처리장비에 대하여 공학 설계 및 제작 비용 산정이 가능한 수준으로 개념 설계도를 작성한다. 개념 설계도는 조립도를 기본으로 하나 필요시 주요 부품도 까지 작성한다. 개념설계도는 2차원 도면/3차원 모델로 작성한다.

4) 설계타당성 검토를 위한 기술문서 작성

설계타당성 검토를 위한 각종 기술문서를 구매자가 요구하는 일정에 맞추어서 작성한다. 설계타당성 검토를 위해 필요한 장비 심의 관련 주요 기술문서는 다음과 같다.

(2023년 5월중 작성 완료예정)

- 사전기획보고서
- 연구장비예산심의위원회 본심의 신청서
- 장비심의위원회 안전상정 신청서

5) 주요 자재 및 부품 사양 분석

계약자는 개념설계 진행 내용을 반영하여 권선장비 및 진공 열처리장비에 대해 주요 자재 및 부품 사양의 작성 및 비용 분석을 수행한다.

3.2 장비별 업무내용

1) 권선장비 상세 업무

용역내용	용역세부내용		
(1) 장비사양/ 개념설계	1) 스폴로 부터 관내 연선도체를 인출하여 공급하는 공급롤러부 설계 2) 관내연선도체를 직선형으로 변형하는 직선변형 롤러부 설계 3) 관내연선도체의 오염물질을 제거하는 Grit 블라스터 설계 4) 관내연선도체를 일정한 형상으로 벤딩하는 벤딩 롤러부 설계 5) 관내연선도체를 권취하여 고정하는 권취부 설계 6) 각종 롤러부를 정밀 이송제어하는 CNC System 설계 7) inter coil joint 제작을 고려한 stacking 설계 8) 권선 중 각종 코일의 지그 설계 9) 권선 치수 검증에 용이한 설계		
(2) 공학계산/해석	- 상용 코드를 이용한 성형 계산/해석		
(3) 개념설계 도면 작성	- 구조 개념설계 도면 작성 (3D CAD Model, 2D 조립도면, 필요시 주요 부품도)		
(4) 설계 타당성 문서 작성	I 단계 (내부 심의 문서)	~ 2023. 5	- 사전기획보고서 - 연구장비예산심의위원회 본심의 신청서 - 장비심의위원회 안전상정 신청서 - 2D 조립 및 주요 부품 도면
	II 단계 (NFEC 심의/ 설계타당성 검토)	~ 2023. 9	- 작성 문서 양식 연구원 제공 - 2D 조립 및 주요 부품 도면
(5) 주요 자재 및 부품 사양 분석	- 주요 자재 및 부품에 대한 사양 작성 - 주요 자재 및 부품에 대한 비용 내역서 작성		

2) 진공 열처리장비 상세 업무

용역내용	용역세부내용		
(1) 장비사양/ 개념설계	1) Chamber 구조설계 (구조해석) 2) Heater 설계 (열해석) 3) 온도제어부 설계 (PID & SCR Power Control) 4) 냉각부 설계 5) 진공시스템 설계 6) Ar Gas Purging 시스템 설계 7) Monitoring 시스템 설계 8) 권선 후 이동 방법 설계		
(2) 공학계산/해석	- 상용 코드를 이용한 구조 및 열 계산/해석		
(3) 개념설계 도면 작성	- 구조 개념설계 도면 작성 (3D CAD Model, 2D 조립도면, 필요시 주요 부품도)		
(4) 설계 타당성 문서 작성	I 단계 (내부 심의 문서)	~ 2023. 5	- 사전기획보고서 - 연구장비예산심의위원회 본심의 신청서 - 장비심의위원회 안전상정 신청서 - 2D 조립 및 주요 부품 도면
	II 단계 (NFEC 심의/ 설계타당성 검토)	~ 2023. 9	- 작성 문서 양식 연구원 제공 - 2D 조립 및 주요 부품 도면
(5) 주요 자재 및 부품 사양 분석	- 주요 자재 및 부품에 대한 사양 작성 - 주요 자재 및 부품에 대한 비용 내역서 작성		

3.3 SUCCEX 자석

그림 1과 같이 위 아래 대칭으로 Inner Coil 2개, Outer Coil 2개로 구성되어 있으며, 총 중량은 약 20 tone 이며, current lead 부분의 설계는 미완성으로 향후 current lead 설계에 따라 권선기 및 열처리로 설계에 반영되어야 한다.

○ SUCCEX 자석 설계 파라미터

Split pair solenoid : bore radius 510 mm, axial gap 140 mm

Winding pack geometry (excluding ground wrapping)

IC : ID 510 mm, OD 800 mm, height 646mm, 10 turnsx 12 layers

OC : ID 810 mm, OD 1193.5 mm, height 886mm, 13 turnsx 24 layers

Peak Field : IC 16.401 T, OC 11.44 T@ Iop=34.8 kA

Field at center : 15.166 T

IC CICC : (4SC+0Cu)x5x6x6 [720SC strand], VF = 29.64%

OC CICC : $(2SC+2Cu) \times 4 \times 5 \times 6$ [240SC strand], VF = 30.81%

CICC total length per coil : IC ~ 510 m, OC ~ 2,000 m

Total CICC length : ~ 5,000 m

Helium channel length : IC ~79/158? m, OC ~159 m

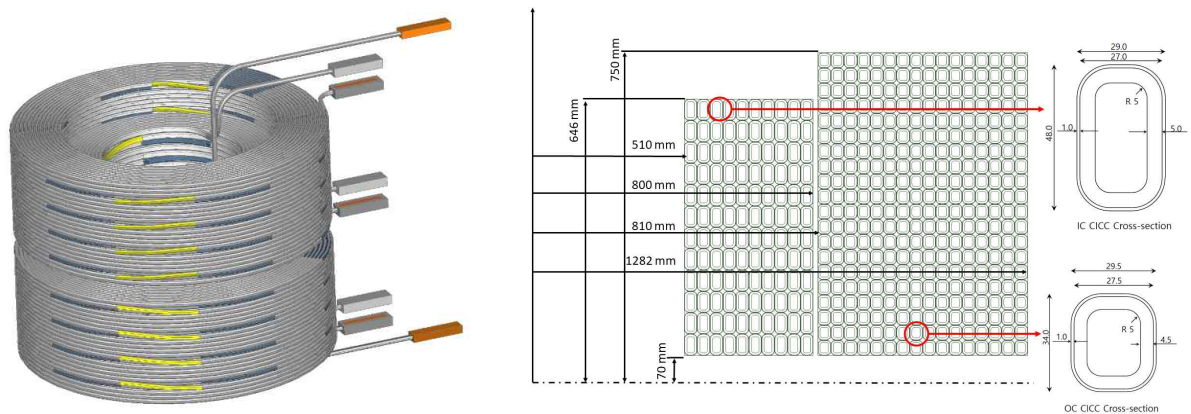
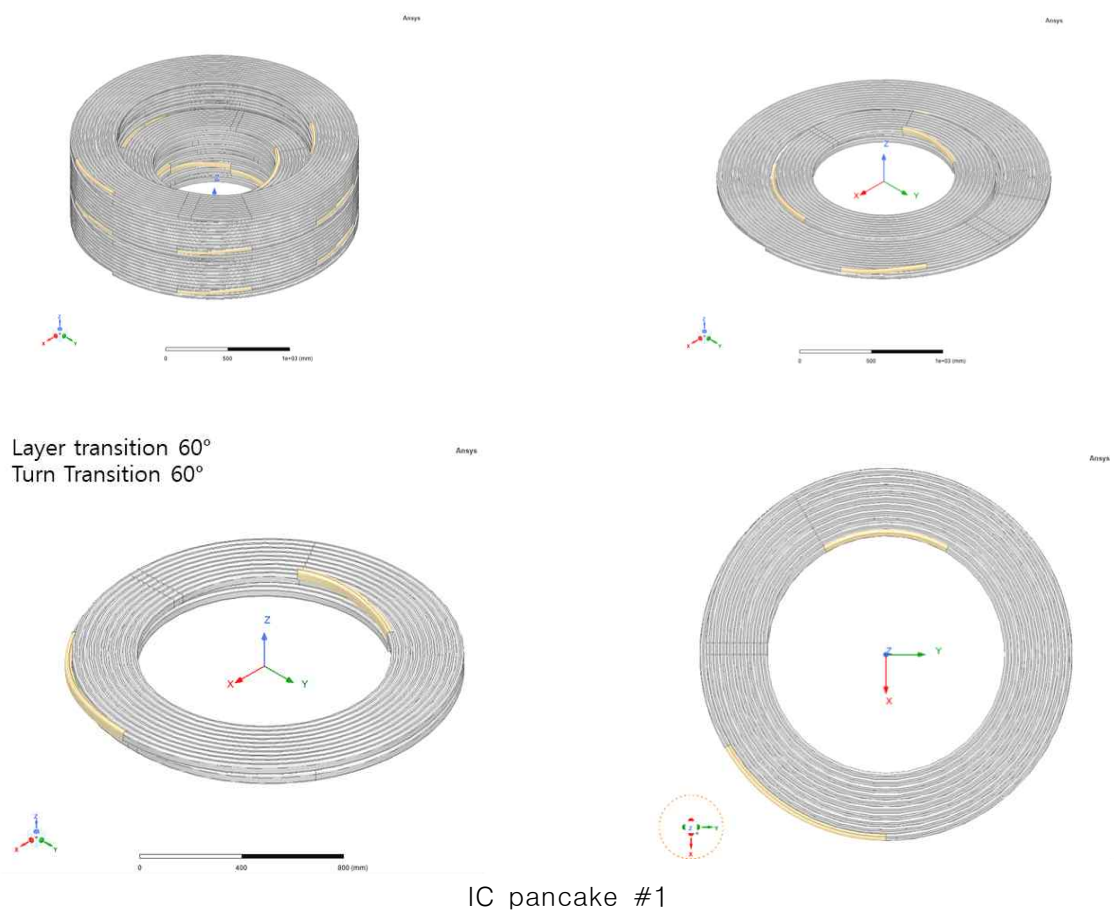


그림 1. SUCCEX 초전도 자석

○ SUCCEX 자석 3-D winding Pack 설계



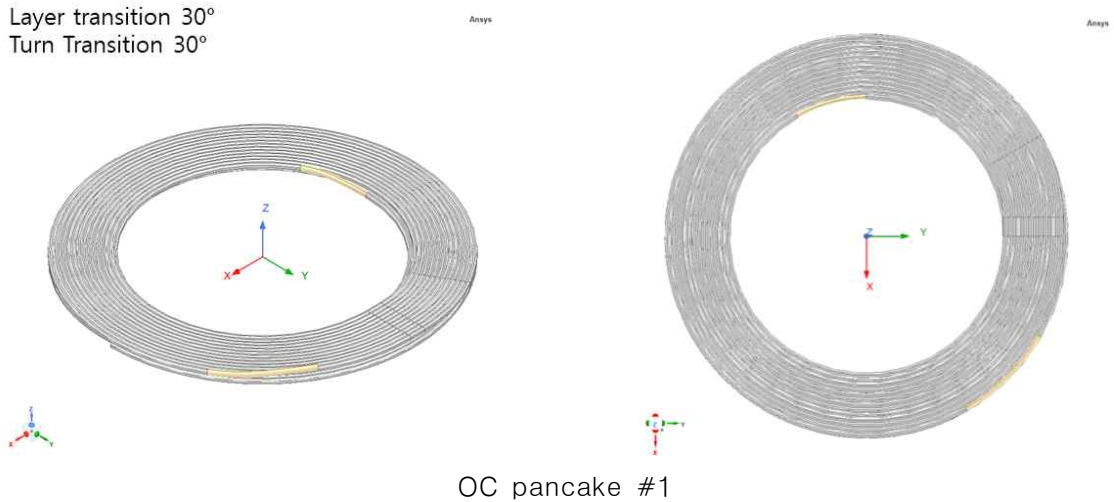


그림 2. SUCCEX 초전도 권선 설계

4. 기술사양

4.1 권선장비

4.1.1 권선장비 사양

권선장비는 스펴에 감겨진 관내연선도체를 직선 변형한 후 원하는 형상으로 성형하고 성형된 관내연선도체를 일정하게 권취 고정함으로써, 관내연선도체가 전체적으로 균일한 형상의 초전도 자석코일을 성형하는 장비이다. 관내연선도체의 권선장비는 스펴로 부터 관내연선도체를 인출하여 공급하는 공급롤러부, 관내연선도체를 직선형으로 변형하는 직선변형 롤러부, 관내연선도체를 이송시키면서 일정한 형상으로 벤딩하는 벤딩롤러부, 관내연선도체를 권취하여 고정하는 권취부로 구성되어 있다.

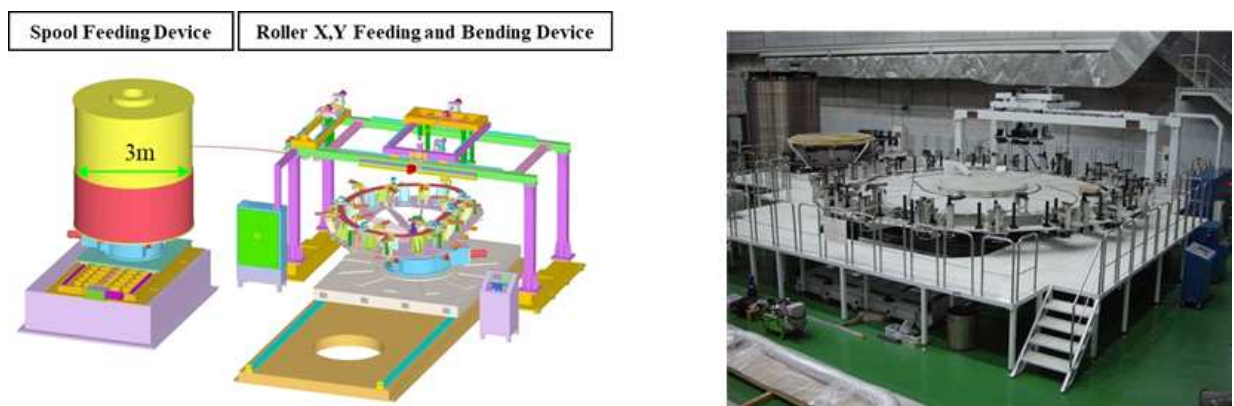


그림 3. KSTAR Magnet winding machine using 3-roll bending process

스풀에 감긴 관내연선도체가 공급되면서 연속적으로 벤딩 및 권취하여 일정 형상의 초전도 자석코일을 제작하는 권선장비의 구성은 다음과 같다.

- 스풀로부터 관내연선도체를 인출하여 공급하는 공급롤러부
- 관내연선도체를 직선형으로 변형하는 직선변형롤러부
- 관내연선도체를 이송시키면서 일정한 형상으로 벤딩하는 벤딩롤러부
- 관내연선도체를 권취하여 고정하는 권취부

스풀과 공급롤러부(30) 사이 및 직선변형롤러부와 벤딩롤러부 사이에는 제1, 2가이드롤러부가 설치되어 관내 연선도체가 용이하게 이송하는 역할을 한다. 벤딩롤러부는 관내연선도체의 폭방향 양측을 지지하는 지지롤러와 일방향으로 이동하여 관내연선도체를 벤딩하는 벤딩롤러로 이루어진다. 직선변형롤러부와 벤딩롤러부에는 관내연선도체의 폭방향 양측을 지지하면서 이송력을 제공하는 제 1,2 이송롤러가 설치된다.

벤딩롤러부의 지지롤러와 벤딩롤 및 제1,2 이송롤러는 스틸강을 침탄 열처리하여 표면경도가 HRC 60-62인 재질로 이루어져 관내연선도체와의 지속적인 마찰에 의한 마모를 최소화 한다.

직선변형롤러부의 다음 공정에는 Grit 블라스터가 설치되어 관내연선도체의 오염물질을 제거하고 관내연선도체 표면의 잔류응력을 해소한다.

스풀에 감긴 관내연선도체가 공급되면서 연속적으로 벤딩 및 권취되어 일정한 형상의 초전도 자석코일을 제작하는 권선공정은 다음과 같다.

- 스풀로부터 관내연선도체를 인출하여 공급하는 공급단계
- 관내연선도체를 직선형으로 변형하는 직선변형단계
- Grit 블라스팅을 하여 관내연선도체의 오염물질을 제거하고, 관내연선도체 표면의 잔류응력을 해소하는 단계
- 관내연선도체를 이송시키면서 일정한 형상으로 벤딩하는 벤딩단계
- 관내연선도체를 권취하여 고정하는 권취단계

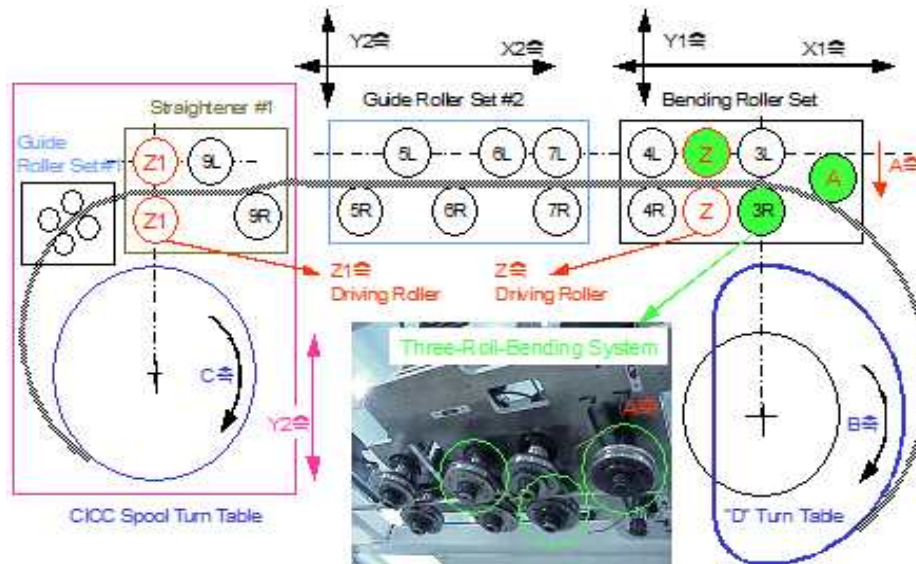


그림 4. Winding system for producing superconductive magnet

벤딩롤러단계 전에 벤딩 후의 스프링백 데이터를 미리 분석하는 권선해석 방법은 관내연선도체를 3차원의 유한요소 셀로 모델링하는 가상 생산단계, 벤딩 전의 잔류응력이 최종 변형에 미치는 영향을 알아보기 위해 코일 속에 있는 잔류응력을 측정하는 잔류응력측정 단계, 계산의 정확도를 검토하기 위하여 초전도체를 넣지 않은 Prototype 코일을 제작하는 Prototype 코일 제작 단계 및 Prototype 코일과 관내연선도체의 데이터 비교단계로 이루어진다.

현재까지 개발된 초전도자석은 지구자장의 약 26만배에 달하는 13테슬라의 자장을 얻을 수 있으며, 이러한 자장은 핵융합 반응에서 요구되는 플라즈마를 만들고 가두기 위해 필요한 것이다. 따라서 초전도자석의 핵심 기술은 “관내연선도체 (CICC:Cable-in Conduit-Conductor)”라고 알려진 각각의 전선을 감아 코일을 형성하여 초전도자석을 제작함에 있다. 관내연선도체(CICC)는 35kA급의 대전류 운전을 위해서 360 또는 486가닥의 선재를 사각형의 금속관으로 둘러싸인 방식의 도체를 사용하여 자석을 제작하는 것으로, 초전도자석의 운전시 발생하는 열을 4.5K로 냉각하기 위해 약 5기압의 초임계헬륨을 관내연선도체로 강제 순환시킨다.

CICC의 자케팅(Jacketing) 재료는 Stainless Steel 316 LN으로, Stainless Steel 316 LN Tube를 Butt Orbital GTAW(GAS Tungsten Inert Gas Arc Welding)법으로 용접하여 400m 길이로 만든 다음, 144 가닥의 초전도 선재를 풀링(Pulling) 방식으로 삽입하고, 사각단면형태로 롤링(Rolling)하여 만든 것이다.

관내연선도체는 스펴에 감긴 상태로 보관 및 운반되었다가 사용시 스펴에서 관내연선도체를 인출하여 일정한 형상의 초전도 자석코일로 성형하는 데, 관내연선도체가 스펴의 단면형상으로 보관되어 스펴의 단면형상을 유지하려는 잔류응력이 발생하여 다른 형상으로 성형하려면 보관상태의 잔류응력에 따른 성형 후의 스프링백 때문에 원하는 형상으로

성형하기에 어려운 문제점이 있었다. 또한 원하는 형상으로 성형한다고 하더라도 그 형상이 불규칙적이고 각 층의 형상과 전체의 형상이 일체로 정확하게 성형하기 어려운 문제점이 있었다. 따라서 스펴의 단면형상으로 고정된 관내연선도체를 직선변형한 후 원하는 형상으로 성형하고 성형된 관내연선도체를 일정하게 권취 고정함으로써, 관내연선도체가 전체적으로 균일한 형상으로 성형되도록 하는 관내연선도체의 권선장비를 설계한다.

관내연선도체의 권선장비는, 스펴에 감긴 관내연선도체가 공급되면서 연속적으로 벤딩 및 권취되어 일정한 형상의 초전도 자석코일을 제작하는 권선장비에 있어서, 스펴로부터 관내연선도체를 인출하여 공급하는 공급롤러부(30)와 관내연선도체를 직선형으로 변형하는 직선변형롤러부와 관내연선도체를 이송시키면서 일정한 형상으로 벤딩하는 벤딩롤러부와 관내연선도체를 권취하여 고정하는 권취부를 포함한다.

그림 5는 관내연선도체의 권선장비의 개략적인 구성도이다. 관내연선도체의 권선장비는 스펴에 감긴 관내연선도체가 공급되면서 연속적으로 벤딩 및 권취되어 일정한 형상의 초전도 자석코일을 제작하는 권선장비이다. 관내연선도체의 권선장비는 TF, PF 코일 등 KSTAR 초전도 자석코일을 성형하기 위해서 3-롤 벤딩에 의한 연속 권선방식을 채택하고, 10개의 servo-motor 시스템으로 동작되는 각 축(A축, B축, C축, Y3축, Y2축, X2축, Y1축, X1축, Z1축 그리고 Z2축)으로 구성되고 각 축은 절대값으로 좌표 0.005mm 혹은 각도 0.005도 까지 위치제어가 가능하며, 5축까지 프로그래밍에 의한 동시 제어운전이 가능하다. SUCCEX 자석은 KSTAR CS 자석과 동일한 solenoid 자석으로 축 수를 최적화할 수 있도록 설계 함을 원칙으로 한다.

10개의 축은 그림 5와 같이 2차원 평면상으로 움직이는 축이다. A축, B축, C축, Z1축 및 Z2축은 평면상 회전방향을 나타내고, X1축과 X2축은 좌우방향을 나타내며, Y1축, Y2축 및 Y3축은 상하방향을 나타낸다.

스플로부터 관내연선도체(90)를 인출하여 공급하는 공급롤러부(30)가 설치되고, 공급롤러부(30) 다음에는 직선변형롤러부(40)가 설치되어 공급된 관내연선도체(90)를 직선형으로 변형한다.

또한 직선변형롤러부(40) 다음에는 벤딩롤러부(70)가 설치되어 직선형으로 변형된 관내연선도체(90)를 이송시키면서 일정한 형상으로 벤딩하며, 벤딩롤러부(70) 다음에는 권취부(80)가 설치되어 성형된 관내연선도체(90)를 권취하여 고정한다.

관내연선도체가 감긴 스펴은 스펴턴테이블(11) 상의 중심에 설치되어 관내연선도체가 인출됨에 따라 관내연선도체의 인출방향(C축)으로 회전한다. C축은 Y3축 이동부(234) 위에 설치되어 벤딩롤러부(70)가 Y1축 방향으로 주행할 때 스펴도 함께 Y1축 방향으로 주행한다. 스펴턴테이블(11)는 서보모터(표시 생략)로 회전 구동된다.

스폴 턴테이블(11)의 다음에는 제1 가이드롤러부(20)가 설치되어 스펴에서 풀려나온 관내연선도체가 용이하게 안내하면서 공급롤러부(30)로 이송된다. 제1 가이드롤러부(20)는 한 쌍 이상의 가이드롤러(24)로 구성되어 관내연선도체의 폭방향 양측을 지지 안내한다.

제1 가이드롤러부(20)의 다음에 설치되는 공급롤러부(30)는 한 쌍 이상의 공급롤러(31)로 구성되고, 공급롤러(31)는 구동모터에 연결되어 강제로 관내연선도체를 공급한다.

공급롤러부(30) 다음에 설치되는 직선변형 롤러부(40)는 스펴에서 공급롤러부(30)에 의해 풀려나온 관내연선도체를 직선화한다.

직선변형 롤러부(40)에는 공급된 관내연선도체의 폭방향 양측을 지지하면서 이송력을 제공하는 제1 이송롤러(43)가 설치된다. 제1 이송롤러(43)는 구동모터에 연결되어 강제로 관내연선도체를 이송한다. 여기서는 한 쌍의 제1 이송롤러(43)가 설치되지만 그 수에는 제한이 없으며, 직선변형 롤러부(40)에는 이송롤러(43) 외에도 가이드롤러(44)가 관내연선도체의 폭방향 양측을 지지하면서 관내연선도체의 이동경로를 안내한다.

Z1축은 제1 이송롤러(43)의 회전방향을 표시하며 관내연선도체를 진행시키는 방향을 나타내고, Y3축은 Y3축 이동부(234)의 이동방향을 나타낸다. Y3축 이동부에는 스펴, 제1 가이드롤러부(20), 공급롤러부(30) 그리고 직선 변형롤러부(40)가 함께 설치된다. 이때 제1 이송롤러(43)와 Y3축 이동부(234)에 서보모터가 각각 연결된다.

직선 변형롤러부(40) 다음에는 블라스터(51)가 설치되어 관내연선도체 외측에 잔류하는 오염물질을 제거하고, 관내연선도체 표면의 잔류응력을 해소한다.

직선 변형롤러부(40) 다음에는 제2 가이드롤러부(60)가 설치되어 블라스터(51)를 통과한 관내연선도체의 진직도를 유지하면서 관내연선도체가 용이하게 벤딩롤러부(70)까지 이송한다. 제2 가이드롤러부(60)는 한 쌍 이상의 가이드롤러(64)로 구성되어 관내연선도체의 폭방향 양측을 지지 안내한다.

Y2축과 X2축은 제2 가이드롤러부(60)의 이동방향을 나타낸다. 이때 제2 가이드롤러부(60)에 서보모터 2개가 층을 달리하여 각각 연결되어 상하 좌우방향으로 이동된다.

제2 가이드롤러부(60) 다음에 설치되는 벤딩롤러부(70)는 직선형으로 변형된 관내연선도체의 폭방향 양측을 지지하는 한쌍의 지지롤러(71)와, 일방향으로 이동하여 상기 관내연선도체를 벤딩하는 벤딩롤러(72)를 포함하여 구성된다.

또한 벤딩롤러부(70)에는 관내연선도체의 폭방향 양측을 지지하면서 이송력을 제공하는 제2이송롤러(73)가 설치된다. 제2 이송롤러(73)는 구동모터에 연결되어 강제로 관내연선도체를 이송한다. 벤딩롤러부(70)는 관내연선도체를 성형하는 롤러부로, 자석의 곡률변화에

따라서 CNC제어로 이동이 가능하다. 여기서는 한 쌍의 제2 이송롤러(73)가 설치되지만 그 수에는 제한이 없으며, 벤딩롤러부(70)에는 이송롤러(73) 외에도 가이드롤러(74)가 관내연선도체의 폭방향 양측을 지지하면서 관내연선도체의 이동경로를 안내한다.

Z2축은 제2 이송롤러(73)의 회전방향으로 관내연선도체의 진행방향을 나타내고, Y1축과 X1축은 벤딩롤러부(70)의 이동방향을 나타내며, A축은 벤딩롤러(72)의 이동방향을 나타낸다. 이때 제2 이송롤러(73)와 벤딩롤러(72)에 서보모터(도시생략)가 각각 연결된다. 벤딩롤러부(70)에 서보모터(도시 생략) 2개가 층을 달리하여 각각 연결되어 상하좌우방향으로 이동된다. Y3축, Y2축 및 Y1축은 도 2상 상하방향으로 동시 이동된다.

벤딩롤러부(70)의 다음에 설치되는 권취부(80)는 벤딩롤러부(70)에 의해 성형된 관내연선도체를 감으면서 형상이 유지되도록 고정하는 권취턴테이블(81)을 구성한다. 권취턴테이블(81)은 TF, PF 등 자석코일의 종류에 따라서 다르게 형성되는데, 그림1에서는 D형 TF 코일을 나타내었다. B축은 권취턴테이블(81)의 권취를 위한 회전방향을 나타낸다. 이때 권취턴테이블(81)에 서보모터가 연결된다.

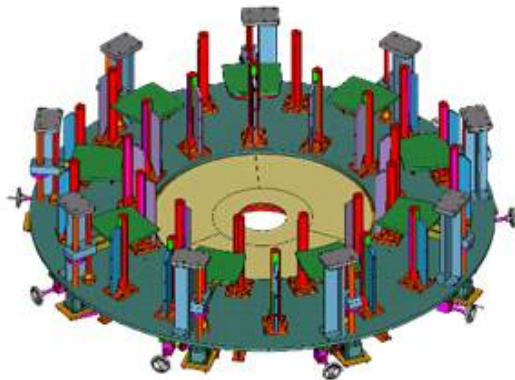


그림 5. KSTAR PF 권취턴테이블(Turntable) 형상

권선장비의 롤러들은 초전도 관내연선도체(CICC)의 자케팅 재질인 SUS304, SUS316L, 그리고 Incoloy908 재질과의 계속적인 마찰에도 그 표면마모가 최소화 되도록 기본적으로 스틸강을 고주파 열처리하여 표면경도(HRC) 45 이상의 재질로 이루어지며, 특히 제1,2 이송롤러 및 벤딩롤러부(70)의 지지롤러(71)와 벤딩롤러(72)는 SCM415강을 침탄 열처리하여 표면경도(HRC)가 60~62의 재질로 이루어진다.

4.1.2 권선 공정

관내연선도체의 권선방법은 스펴에 감긴 관내연선도체가 공급되면서 연속적으로 벤딩 및 권취되어 일정한 형상의 초전도자석코일을 제작하는 방법이다. 관내연선도체의 권선방법은, 우선 처음단계는 관내연선도체의 공급단계로, 스펴로부터 관내연선도체를 인출하여 공급하는 단계이다. 스펴을 받치고 있는 스펴턴테이블(11)이 C축으로 회전하면서 스펴에 감

긴 관내연선도체가 풀린다. 풀리는 관내연선도체는 제1 가이드롤러부(20)의 안내를 받으면서 공급롤러부(30)의 공급롤러(31)에 의해 강제로 인출되어 다음 단계로 공급된다.

다음 단계는 관내연선도체의 직선변형단계로, 공급된 관내연선도체를 직선형으로 변형하는 단계이다. 공급롤러부(30)에 의해 공급된 관내연선도체는 직선변형롤러부(40)의 제1이송롤러(43)에 의해 강제 이송되면서 가이드롤러에 의해 직선형으로 변형되고, 직선변형롤러부(40)는 직선형으로 변형하기 위해 CNC제어를 통해 Y2축으로 이동한다. 제1 이송롤러(43)는 Z1축으로 회전하여 관내연선도체를 강제 이송한다. 이때 관내연선도체는 (-)직선화, 초전도자석 권선곡률의 반대방향의 곡률을 갖도록 직선화 공정이 이루어진다. 권선장비의 3-롤 벤딩시스템인 벤딩롤러부(70)는 항상 (+)방향으로만 곡률형성이 가능하도록 설계되어 있기 때문이다. 벤딩을 진행하기 전 최종 진직도를 0.5mm/m정도 까지 맞춘다.

직선변형단계의 다음에 관내연선도체가 블라스터(51)를 통과하게 함으로써 블라스팅을 하여 관내연선도체의 오염물질을 제거하고, 관내연선도체 표면에 다량의 모래 등을 통한 미세한 압입작용을 통해서 관내연선도체의 조관시 발생하는 잔류응력을 완화시키며, 관내연선도체 표면에 밀착되게 절연 테이핑 및 그라운드 랩핑을 실시하는 데 도움을 준다.

블라스팅을 한 관내연선도체는 제2 가이드롤러부(60)의 가이드롤러에 의해 안내되어 벤딩롤러부(70)로 이송된다. 이때 제2 가이드롤러부(60)는 직선상태를 유지하면서 안내되도록 CNC제어에 의해 X2축과 Y2축으로 이동된다. 다음 단계는 관내연선도체의 벤딩단계로, 제2 가이드롤러부(60)에 의해 안내된 관내연선도체를 이송시키면서 일정한 형상으로 벤딩하는 단계이다. 벤딩롤러부(70)에 공급되는 관내연선도체는 가이드롤러로 공급되어 안내된 다음 제2 이송롤러(73)에 의해 Z2축으로 강제이송된다. 이송된 관내연선도체는 한 쌍의 지지롤러(71)에 의해 지지되면서 벤딩롤러(72)에 의해 일정한 형상(그림4의 경우 D형 TF코일)으로 벤딩된다. 이때 벤딩롤러(72)는 A축으로 이동되면서 관내연선도체를 벤딩하며, 벤딩롤러부(70)는 벤딩롤러(72)와 함께 관내연선도체가 일정한 형상으로 벤딩되도록 Y1축과 X1축으로 이동된다. 여기서 벤딩롤러부(70)가 Y1축 방향으로 주행할 때 스펴도 Y3축에 따라 Y1축 방향으로 주행한다.

D형의 TF 코일과 같은 일정한 형상의 자석코일 권선시에는 벤딩롤러부(70)가 자석코일 형상의 궤적을 따라서 움직이면서 동시에 곡률을 형성해야 한다. 이를 위하여 권선장비는 벤딩롤러부(70)가 X축, Y축의 방향으로 프로그램 주행이 가능하도록 설계되어 있어 어떠한 모양의 자석권선도 가능하다.

다음 단계는 관내연선도체의 권취단계로, 벤딩된 관내연선도체를 일정한 형상으로 권취하여 고정하는 단계이다. 이때 권취턴테이블(81)은 CNC제어에 의해 B축으로 회전되면서 관내연선도체를 권취한다.

3-Roll 벤딩롤러(한 쌍의 지지롤러(71)와 벤딩롤러)에 의해 정확한 치수의 일정한 형상으

로 자석코일을 제작(벤딩)하려면, 성형시 관내연선도체의 벤딩 후 스프링백 크기를 정확하게 예측하고 곡률변화에 따라서 이를 연속적으로 보정하면서 성형을 해야 한다. 따라서 권선을 하기 전에 스프링백을 고려하여 벤딩롤러(72)의 이송량과 곡률과의 관계에 대한 데이터를 획득할 필요가 있으며, 여기서는 해석에 의한 방법을 기술한다.

벤딩롤러단계 전에 벤딩 후의 스프링백 데이터를 미리 분석하는 권선해석방법은, 가상생산단계, 잔류응력 측정단계, 프로토타입의 코일제작단계 및 프로토타입의 코일과 스프링백의 데이터 비교단계로 이루어진다.

관내연선도체에서 정확한 치수의 형상을 얻기 위해서는 시행착오적 방법이 불가피하다. 이러한 어려움을 극복하기 위하여 가상생산(virtual manufacturing)기법을 활용하였다. 가상생산단계는 컴퓨터를 활용하여 최종 제품의 응력해석이나 변형도 해석뿐만 아니라, 제작공정 자체를 시뮬레이션 하는 방법을 일컫는다. 통상의 가상생산은 비선형 유한요소 해석을 활용하여 제작성, 최종 제품의 형상, 잔류응력, 및 제품수명을 고려한 최적화를 수행할 수 있다. 상용 비선형 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 활용하여 관내연선도체의 3-롤 벤딩공정을 시뮬레이션 함으로써 관내연선도체를 최소한의 노력으로 정확히 제작하기 위한 데이터를 얻기 위한 방법은 다음과 같다. 우선, 성형 후 스프링 백이 일어난 후의 코일 반경을 벤딩롤러의 함수로 표시함으로써 실제 생산시 성형 제어에 필요한 데이터를 얻고자 하였으며, 추가적으로, 첫 번째 회전(turn)과 곡률이 가장 큰 경우에 있어서 관내연선도체의 단면적 변화를 조사함으로써 초전도체 다발(strand)이 충분한 공간을 확보할 수 있는지도 알아보았다. 만일 단면적이 너무 감소하면 초전도체 다발이 관내연선도체 내에서 성형 도중에 손상을 입을 가능성이 높다. 설계 사양에는 단면적의 감소가 1.5% 이내를 유지하도록 규정되어있다.

관내연선도체에서 SAGBO(Stress Accelerated Grain Boundary Oxidation)가 발생할지의 여부를 알기 위해서 코일에 분포된 von Mises 응력을 관측하였다. SAGBO는 작동 온도가 50C~800C일 때, 인장응력이 200 MPa를 초과할 때, 그리고 산소압력이 10⁻⁵ torr (at 1 atm, 0.14 ppm)이 넘을 때 등, 이 세가지 조건이 동시에 만족될 때 발생한다.

가장 작은 곡률반경을 갖는 CS코일을 모델링하였다. 그림 5는 3-롤 벤딩공정의 개요를 나타낸다. 구동 롤러가 관내연선도체를 밀면 성형 방향으로 관내연선도체 소재가 진행된다. 벤딩롤러(72)를 이용하여 관내연선도체가 일정한 곡률반경을 가지도록 성형한다. 토카막 장비에는 곡률반경이 431mm인 CS 코일로부터 3,850mm인 PF 코일까지 다양한 크기의 코일이 장착된다. 벤딩롤러(72)의 하향이동거리 대 스프링백 이후의 관내연선도체의 최종반경을 관측하였다. 성형 후 관내연선도체의 반경을 벤딩 롤 이동거리의 함수로 표시하였다.

가상생산을 수행하기 위한 엔진으로써 상용 비선형 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS, Compaq-Digital workstation 433AU 그리고 SGI Origin 2000을 사용하였다. 계산시간을

줄이기 위하여 코일의 길이 방향으로 1/2만 모델링하였다. 셸(Shell) 요소를 사용하여 벤딩에 의한 전단변형율을 포함할 수 있게 했다. 따라서 S4R요소로 관내연선도체를 3차원적으로 모델링하였다. 3차원 모델링된 형상을 그림 5에 나타내었다. 코일 벽의 두께 방향으로 5개의 적분점을 할당하였다. 롤러들은 RIGID SURFACE 옵션을 이용하여 강체 표면으로 정의하였다. 마찰은 오직 관내연선도체와 구동롤러 사이에만 존재하는 것으로 가정하였다. 스프링 백 후에 관내연선도체의 세 지점에서 응력을 관측하였다. 여기서 관측된 수치들은 2차원 CAD프로그램인 Intelli-CAD에 입력하여 가상생산된 관내연선도체의 반경을 자동적으로 계산하고 이를 벤딩 롤러 대 관내연선도체 반경의 관계로 맞추었다. 최소반경을 갖는 관내연선도체의 스프링 백 후 단면과 잔류응력도 조사하였다. 계산에는 Incoloy 908과 SUS 304의 두 가지 재료가 사용되었다. 이들의 기계적 성질을 표 1에 나타내었다.

표 1. SUS 304(measured)과 Incoloy 908의 기계적 성질

Symbol	SUS 304	Incoloy 908
Elastic Modulus	195 GPa	180 GPa
Poissons Ratio	0.3	0.3
Yield Stress	321 MPa	848 MPa
Effective Stress-Strain	$\sigma=1525.5(0.03978+\epsilon^p)^{0.483}$	$\sigma=1848.3(0.00334+\epsilon^p)^{0.137}$

다음 단계는 잔류응력측정단계로 벤딩 전의 잔류응력이 최종 변형거동에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 코일 속에 있는 잔류응력을 측정하는 단계이다. 초전도체 다발을 자케팅하는 과정과 성형(벤딩) 전 운반된 코일을 직선변형하는 과정에서 발생하는 잔류응력이 최종 변형거동에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 코일 속에 있는 잔류응력을 측정하였다. 코일에 내재된 잔류응력을 측정하기 위하여 응력완화를 이용한 구멍뚫기(hole-drilling) 스트레인 게이지 방법을 사용하였다. 사용된 스트레인 게이지 사양은 Tokyo Kenkyujo FRS-3-11이었다. 초전도체 다발이 없는 빈 관내연선도체를 적당한 크기로 잘랐다. 이 때 가장자리와 끝단 효과를 최소화하기 위하여 구멍으로부터 양단의 각각 길이가 구멍직경의 10배 이상이어야 함을 고려하였다. 스트레인 게이지는 심(seam) 용접된 부분과 그 반대편 그리고 양쪽 벽 부분의 네 지점에 부착하였다.

다음 단계는 프로토타입의 코일제작단계로, 성형 후의 코일 반경의 계산결과와 비교하여 계산의 정확도를 검토하기 위하여 초전도체를 넣지 않은 프로토타입 코일을 제작하는 단계이다. 계산의 정확도를 검토하며 본격적인 생산에 필요한 데이터를 얻기 위하여 프로토타입 CS 코일을 제작하였다. 이를 위하여 CNC제어가 가능한 3롤-벤딩롤러부(70)를 사용하였다. 초전도체 다발을 넣지 않은 스테인리스강 관내연선도체를 소재로 사용하였다. 특수하게 설계된 장비를 이용하여 성형 후 반경을 측정하였다.

다음 단계는 프로토타입의 코일과 관내연선도체의 데이터 비교단계로, 프로토타입으로 제작된 코일과 관내연선도체의 스프링백 데이터를 비교하여 결론을 내리는 단계이다.

관내연선도체의 권선장비 및 그 권선방법은 스폴의 단면형상으로 고정된 관내연선도체를

인출하여 직선변형한 후 사용자가 원하는 형상으로 성형하고 성형된 관내연선도체를 일정하게 권취 고정함으로써, 관내연선도체가 전체적으로 균일한 형상으로 성형되도록 할 수 있다. 또한 관내연선도체를 벤딩하기 전에 벤딩 전의 잔류응력을 미리 해석함으로써, 관내연선도체를 벤딩한 후에 발생하는 스프링백을 고려하여 스프링백 데이터를 벤딩 중에 반영하여 최종적인 초전도 자석코일을 설계 사양대로 보다 정확히 제작할 수 있다.

* 그림4, 5 설명 *

11 : 스푼턴테이블

20 : 제1가이드롤러부 24 : 가이드롤러

30 : 공급롤러부 31 : 공급롤러

40 : 직선변형롤러부 43 : 제1이송롤러 44 : 가이드롤러

51 : 블라스터

60 : 제2가이드롤러부 64 : 가이드롤러

70 : 벤딩롤러부 71 : 지지롤러 72 : 벤딩롤러 73 : 제2이송롤러 74 : 가이드롤러

80 : 권취부 81 : 권취턴테이블

90 : 관내연선도체

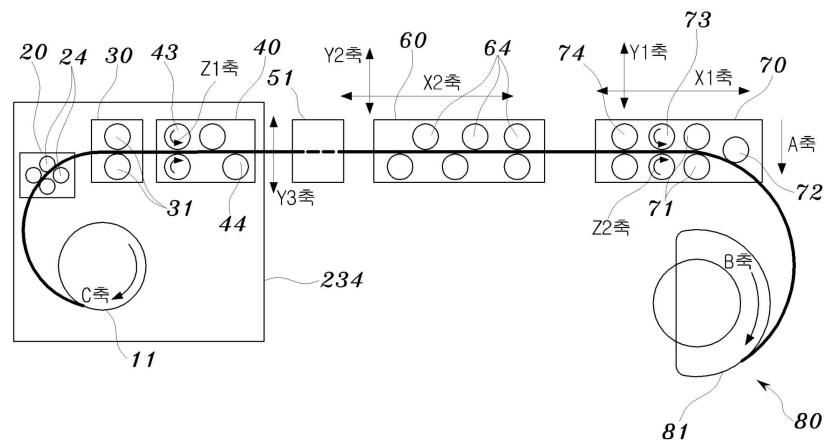


그림 6. 관내연선도체의 권선장비 구성도

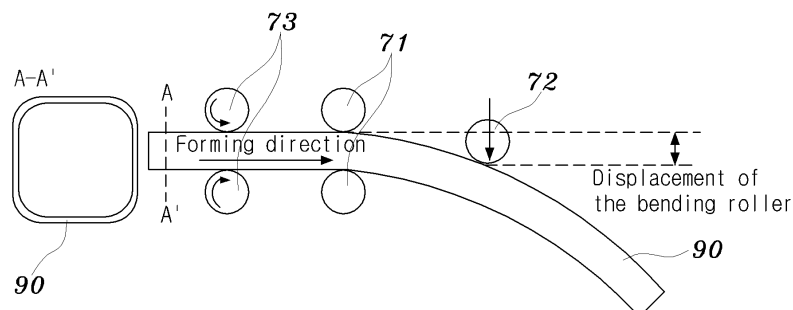


그림 7. 3-Roll 벤딩 개요도



그림 8. KSTAR 권선장비

4.1.3 권선장비 설계시 고려사항

본 용역에서는 KSTAR 권선장비 구조에 대한 개선 사항으로, 아래와 같은 기술적 사항을 반영하여 설계를 수행한다.

- 용역 기간 내에 확정될 자석 및 Lead 형상을 고려한 권선장비 설계
- 스푼 회전이송과 관내 연선도체를 인출하여 공급하는 공급롤러부 회전 이송 동기화
- 권선시 관내연선도체의 정밀한 길이방향 이송량 측정 장치 설계
- 관내연선도체를 직선형으로 변형하는 직선변형 롤러부 필요성 검토
- 관내연선도체의 오염물질 제거와 잔류응력을 해소하는 Grit 블라스터 필요성 검토
- 권선완료 후 자석 Lifting을 위한 권취부 이송 메카니즘 필요성 검토

4.2 진공 열처리장비

초전도 코일의 제작에는 극저온에서 초전도성질을 가지기 위해 660℃의 온도로 30일간 진공 열처리장비에서 반응이 요구되는 Nb3Sn 초전도선재를 STS 재질의 Jacket으로 구성된 CICC(Cable in Conductor Conduit)초전도 도체를 사용한다. 연속 권선기를 이용하여 CICC를 Coil 형태로 권선하여 열처리 Jig에 Clamping 한후에 진공 열처리장비 내부에 설치하고 660℃의 온도로 30일간의 반응처리가 요구된다. 이때 요구되는 온도균일도는 공간적으로 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 이내이며, 시간적으로는 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 이내이며, CICC내부의 불순물을 제거하기 위해 Ar gas Purge를 진행한다.

4.2.1 열처리장비 사양

다음은 KSTAR 초전도자석의 진공열처리를 수행하기 위한 진공 열처리장비의 기본사양이다.

- (1) 규모: 최대 외경 5.9 미터(플랜지 외경), 높이 약 4.5 미터(중간원통부분 높이 최소 1.5 미터), 내부 등온통 내경 4.7 미터 이상

- (2) 냉각용 이중벽 구조(진공용기 외부벽온도 40 °C 이하유지), vacuum feed-thru(전기, 온도센서, 가스배관, 기타)들 설치하는 ports, flanges, 그리고 blank flange들을 포함한다.
- (3) 진공도
- 5×10^{-6} Torr(기본): 대기압에서 24시간 이내 달
 - 5×10^{-5} Torr(heater 가동시): heater 가동후 1시간 이내달성, 4×10^{-5} torr 이하 (산소 분압기준)
- (4) Heater: 직경 약 5.3 미터, 높이 약 1.5 미터, 진공용 열선사용(몰리브데늄)
- (5) 진공용기 내부온도
- 최고 900 °C, PID 온도제어,
 - 온도제어속도 0.5 °C/min (100 °C - 900 °C 주어진 setting온도에서)
 - 공간 온도분포 균일도: ± 1.0 °C(100 °C - 900 °C 주어진 setting온도에서)
 - 시간 온도변화 안정도: 45일간 연속 ± 3 °C(100 °C ~ 900 °C 주어진 setting온도에서)
- (6) 냉각수 압력 및 온도: 최대 15기압(정상 7기압), 30 °C 입구온도, 출구온도 최대 50 °C, All SUS304 혹은 SUS316배관으로 구성
- (7) Purge gas 공급배관: 2×10^{-9} SCCS helium leak rate 이하, SUS316 EP tube 배관, 최대 100 기압하에서 작동

나. 장비구조

진공 열처리장비는 크게 다음의 4가지의 역할을 담당하는 하부시스템(진공 시스템, 온도 제어 시스템, 가스 Purge 시스템, 운전 제어 및 모니터링 시스템)으로 구성이 되어 있다. 그림 9는 각각 열처리로의 정면모습과 내부의 모습을 보여주고 있다.

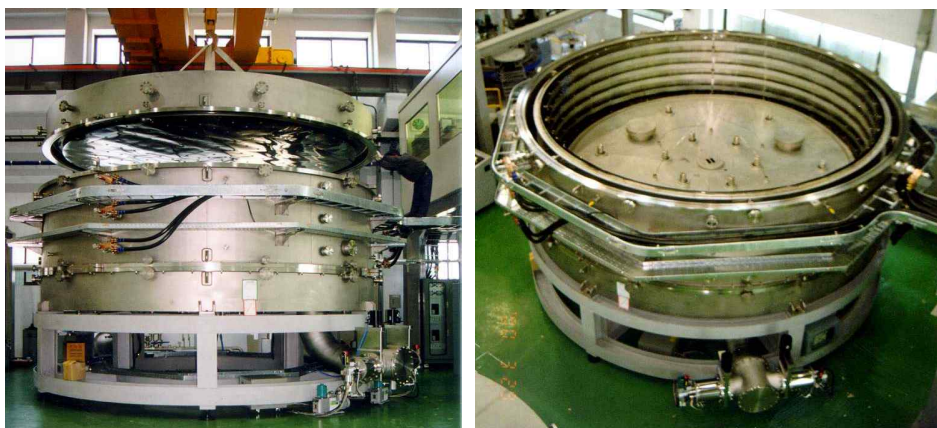


그림 9. KSTAR 진공열처리 장비

(1) 진공 시스템

진공 시스템은 대기압에서 1×10^{-3} torr까지는 피스톤 펌프 2대와 루트 펌프 1대로 구성된

Roughing 펌프시스템이 담당하고 1×10^{-3} torr 이하는 4대의 Cryopump로 구성된 Cryopump 시스템이 담당하도록 구성이 되어있다. 그림 10은 열처리로의 진공챔버와 진공 펌프 시스템을 보여주고 있다.

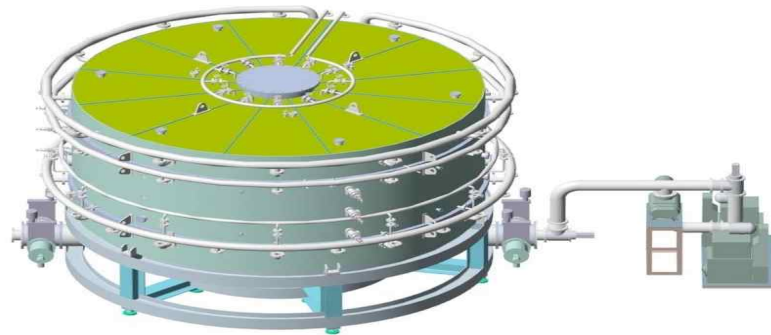


그림 10. KSTAR 진공챔버 및 진공펌프 시스템

(2) 온도제어 시스템

온도제어 시스템은 챔버 내부에 설치되어 있는 3세트의 열선의 온도를 각각 독립적으로 제어 할 수 있도록 구성이 되어 있다. 열선에 공급되는 전원은 먼저 3상 380볼트의 전원이 PID 온도 조절기에 의해서 제어되는 SCR에서 조절된 후 변압기를 거쳐 열선에 적합한 전압으로 변환된 후 열선에 공급되어 충분한 열량을 낼 수 있도록 구성이 되어 있다. PID 온도 조절기는 각각 3 세트의 열선을 제어하고 있으며, 열전대를 통해서 열선의 온도를 입력받아서 PID 제어를 통해서 출력을 SCR로 출력하고 있다. 그림 11은 열선에 공급되는 전원의 계통도를 나타내고 있으며, 그림 12는 실제의 열선의 모습을 보여주고 있다. 열선 및 챔버내에 설치된 자석의 온도를 측정하기 위해서 열전대를 사용하고 있으며, 열처리장비의 가동온도 범위에서 가장 우수한 특성을 나타내는 K-type의 열전대를 사용하고 있다. 열선의 온도 측정 및 온도제어를 위해서 총 18개의 열전대가 사용중이며, 내부에 설치되는 자석의 온도측정을 위해선 총 12개의 열전대를 사용하고 있다.

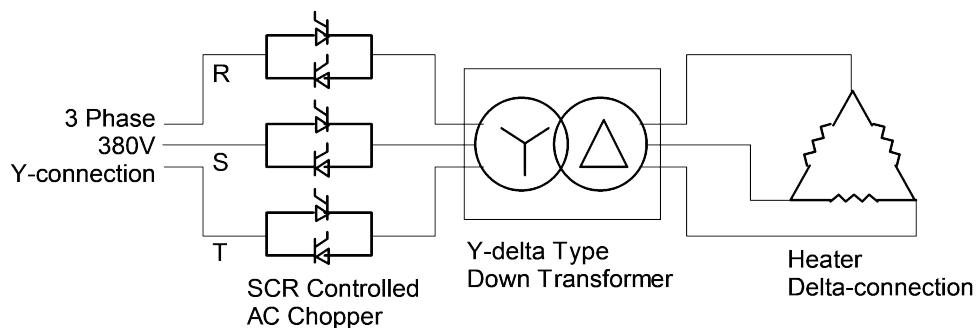


그림 11. 열선 전원 공급 시스템



그림 12. 진공열처리로 열선

(3) 가스 Purge 시스템

가스 Purge 시스템은 초순수(99.9995%) Ar gas를 연속적으로 챔버내에 설치되어 있는 초전도자석의 CICC내로 흘려주어 초전도 도체 및 CICC 제작과정 중 발생된 불순물을 제거하는 시스템이다.(아래 그림 13의 O₂ 및 H₂O Analyzer는 설치는 KFE와 협의)

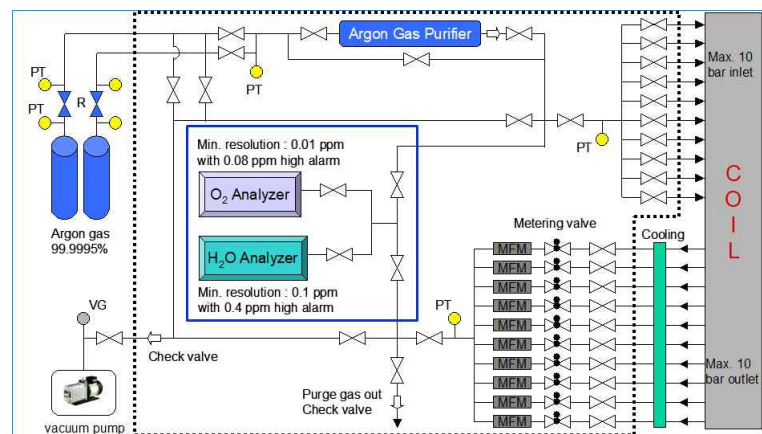


그림 13. Gas Purge 시스템

(4) 운전 제어 및 모니터링 시스템

KSTAR 진공 열처리장비 진공 시스템, 온도제어 시스템, 가스 Purge 시스템이 상호 유기적으로 연결되어 있어야만 초전도체의 열처리 반응을 완성시킬 수 있다. 이러한 조건을 충족시키기 위해서 열처리장비는 PLC(Programmable Logic Controller)를 기본 시스템으로 채용하여 제어에 활용하고 있다. 기본적으로는 사람의 판단에 우선한 제어를 가장 우선에 두었고, 실수에 의한 오조작을 방지하기 위한 Interlock을 중요한 제어사항에 대해서는 설정해 놓고 있다. 한편으로 열처리로의 운전기록과 현재 상태를 손쉽게 파악하기 위하여 GUI(graphic user interface)를 기본 바탕으로 한 그래픽 monitoring system을 가동하고 있다.

그림 14는 열처리장비의 Monitoring 시스템에 대한 계통도를 보여주고 있는데, 먼저 열

처리장비에서 수집된 각종신호는 PLC에 통합되어 운전이 되고, 이러한 운전 정보를 통신을 통하여 PC에서 수집후 인터넷으로 운전자에게 정보를 제공하는 구조를 보여주고 있다.

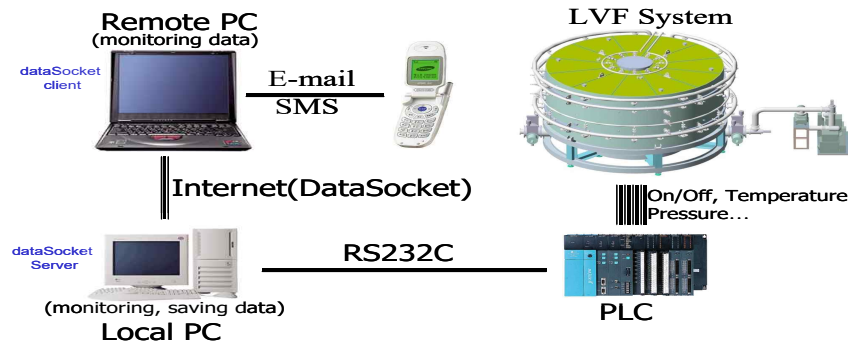


그림 14. 열처리장비 Monitoring 시스템 계통도

그림 15는 열처리장비에서 수집된 각종 정보를 컴퓨터 화면에 나타내도록 작성한 Monitoring 주화면의 모양이다. 그림에서 알수 있듯이 열처리온도, 진공도, 가스의 농도, RGA(Residual Gas Analyser), 수온 등등을 일목요연하게 보여주고 있다.

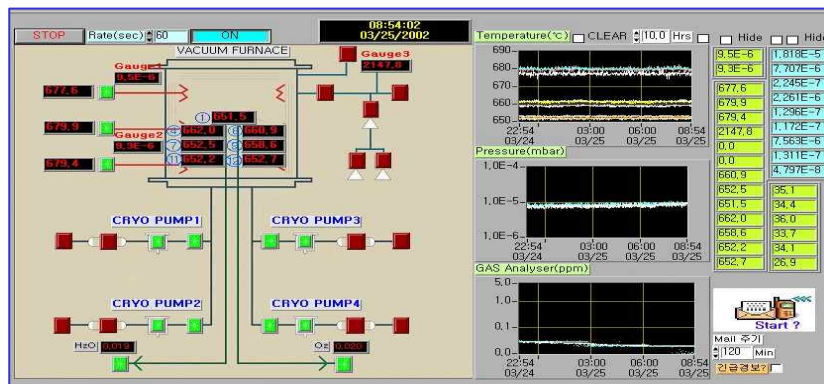


그림 15. 열처리장비 Monitoring 주화면

4.2.2 열처리 공정

열처리장비의 운전은 크게 다음의 초전도 자석 설치, 진공 배기, 열선가동, 진행상황 monitoring의 4단계에 걸쳐 작업을 수행하고 있다.

(1) 초전도 자석 설치

KSTAR 초전도 자석은 대략 2~4톤의 자석 자체의 중량과 열처리시 자석의 열변형을 최소화 하기 위한 열처리 지그의 중량 1~2톤을 합한 총 3~6톤의 중량을 갖게 되므로 열처리로 내부에 설치시 상당한 주의가 요망된다. 일단 열처리장비 내에 초전도자석이 놓여지게 되면, 온도 monitoring을 위한 12개의 열전대를 자석의 주위에 설치하는 작업과 SAGBO의 방지를 위한 가스 Purge를 위하여 가스 Purge 시스템의 배관과 자석의 Helium feedthrough와 연결하는 작업을 수행하게 된다. Helium feedthrough와 가스

Purge 시스템과의 배관연결은 swagelock으로서 간단히 연결하며, 수차례의 시험을 통해서 660℃ 에서도 가스의 유출이 없음이 확인 하였다. 그림 16은 열처리로에 설치된 TF 초전도자석의 모습을 보여주고 있다. 열처리로의 뚜껑을 닫기 전의 상태로 가스 배관과 열전대가 설치되어 있는 것을 확인 할 수 있다.

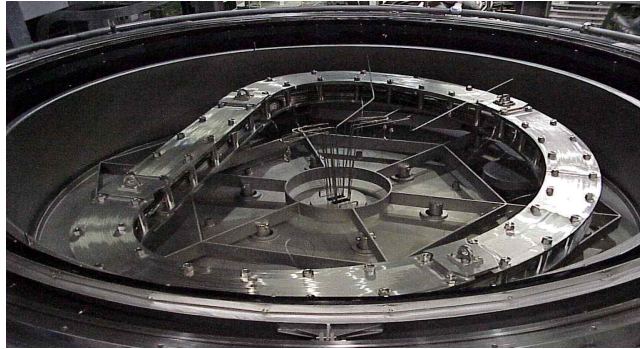


그림 16. TF 초전도자석

(2) 진공 배기

열처리장비의 진공배기는 먼저 2대의 Piston pump를 가동하여 수 torr 까지 배기한 후 root pump를 가동하여 1×10^{-2} torr 까지 배기 한다. 4대의 Cryopump는 가동전에 항상 full regeneration과정을 거쳐 가동준비 상태가 되며, 챔버내 진공이 1×10^{-2} torr에 도달하게 되면 메인 밸브를 열어서 진공배기 하도록 구성되어 있다.

(3) 열선가동

열처리장비 내의 진공도가 5×10^{-5} torr 이하로 유지되면, 비로소 열처리를 시작할 수 있게 된다. 열선의 온도를 제어하기 위한 PID 온도 조절기에는 아래의 그림에서 보여지는 시나리오를 입력하여 운전하게 되는데, 전체적으로 온도 상승속도는 6 °C/hr이며, 460 °C에서 100 시간, 570 °C에서 200 시간, 660 °C에서 240 시간을 유지하게 된다. 그림 17은 KSTAR 초전도자석의 열처리 시나리오를 보여주고 있다.

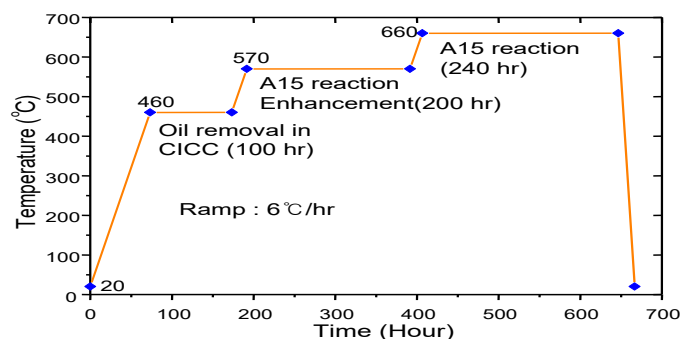


그림 17. KSTAR 초전도자석의 열처리 시나리오

(4) 진행상황 monitoring

열처리장비는 700시간에 가까운 시간동안 계속해서 운전이 되고, 또한 운전의 실패는 자석의 치명적인 결함으로 작용함으로써, 운전상황에 대한 각별한 주의가 요망된다. 쉽게 현재의 진행상황을 monitor하기 위하여 그림 17에서 보이는 것처럼, 현재의 열처리진행시점을 나타내는 열처리 진행시간 Monitoring화면을 작성하여 운영중이며, 또한 전체적인 열처리로의 운전상황을 monitor 하기위한 열처리장비 시스템 Monitoring화면도 그림 18에서 보이는 것처럼 구성하여 운영중이다.

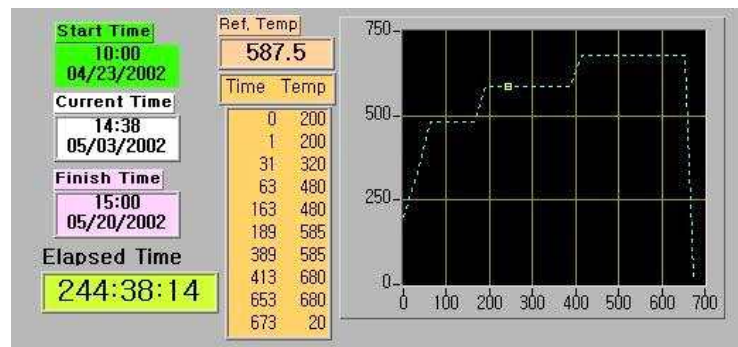


그림 18. 열처리 진행시간 Monitoring

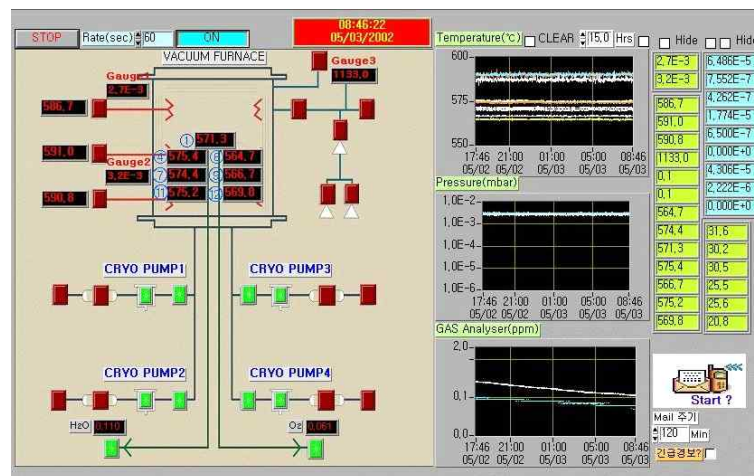


그림 19. 열처리장비 시스템 Monitoring

표 2. 진공 열처리장비 사양서(안)

No	구 분		사 양
1	설치 공간(mm)		10,000(W) X 10,000(L) X 4,000(H) -본 장치 Size :Φ4,500(Flange Out Dia) X 2,000(H)
2	장치 중량(Ton)		본체 총중량 : 60 Ton (부속장치 제외) -장치본체 : 40 Ton -Water(14) + Coil(3) + Jig(3) 중량 = 20 Ton
3	전기	Heating Power	300kVA x 3 sets= 900 kVA -AC380V,3P,60Hz,전압변동:±10%
		UPS 용량 -Cryopump Com. -Rotary Pump -단독 Cooler -PLC Control (각종 계기류)	60kVA -Input, Output : AC380V,3P,60Hz,전압변동:±5% -Back Time : 15min -AC208V,1P,60Hz,5kw x 4sets= 20 kVA -AC220,3P,60Hz,0.75kw x 4 sets = 3 kVA -AC220,3P,60Hz,충전기 용량 : 11 kVA -기타 전기용량 : 26 kVA
4	Cooling Water Supply (1)	CryoPump	-Flow rate : 16 L/min / -Pumping 수압 : 6.0 kgf/cm ² -Inlet Water Temperature : 10~40℃(사용온도:20℃) -Auto Supply Water Inlet Fitting Size : 15A -Auto Supply Water Outlet Fitting Size : 20A -사용유체 : Deionized Water / 보충수 공급(수동)
		Piston Pump Booster Pump	-Flow rate : 45 L/min / -Max Pressure : 6.0 kgf/cm ² -Inlet Water Temperature : 10~40℃(사용온도:20℃) -사용유체 : Deionized Water
5	Cooling Water Supply (2)	Water Jacket (Chamber)	-Flow rate : 1,200 L/min / -Max Pressure : 6.0kgf/cm ² -Inlet Water Temperature : 20℃~40℃ -사용유체 : Deionized Water -Inlet Water Fitting Size : 50A x 3 Line -Outlet Water Fitting Size : 80A
6	Cooling Water Supply (3)	Power Current (bus-bar)	-Flow rate : 70 L/min / -Max. Pressure : 6.0 kgf/cm ² -Inlet Water Temperature : 10~40℃(사용온도:Max.30℃) -사용유체 : Deionized Water -Inlet, Outlet Water Fitting Size : 25A
7	Dry Air Supply		-Flow rate : 960 L/min / -Max. Pressure : 5~7kgf/cm ² -Inlet Water Fitting Size : 20A
8	GN2 Supply	Cryopump Chamber진공 배기	-Max. Pressure : 2kgf/cm ² / -Flow rate : 20 L/min -Inlet GN2 Fitting Size : PT1/4

4.2.3 진공 열처리장비 설계시 고려사항

본 용역에서는 KSTAR 진공 열처리장비 구조에 대한 개선 사항으로, 아래와 같은 기술적 사항을 반영하여 설계를 수행한다.

- 용역 기간 내에 확정될 자석 및 Lead 형상을 고려한 진공 열처리장비 설계
- 고진공 시스템 기능의 필요성 검토

5. 요구사항

계약자는 아래와 같은 요구조건을 준수해야 한다.

5.1 설계시 요구사항

- (1) 모든 설계는 필요시 발주자가 전 과정을 확인할 수 있어야 한다.
- (2) 모든 설계에 필요한 정보는 계약자가 요구한 정보를 바탕으로 KFE에서 제공한다.
- (3) 계약자가 아래의 업무를 수행함에 있어 요구되는 정보를 계약자에게 제공한다.
- (4) 설계 결과는 보고서에 기록하고 raw data는 발주자가 확인 할 수 있도록 정리한다.
- (5) 설계 방법, 절차, 결과의 평가는 발주자와 협의하는 것을 원칙으로 한다.

5.2 각종보고

계약자는 계약도중 진행상황 및 결과를 표 3과 같이 보고해야 한다.

표 3. 각종보고형식 및 보고방법

보고형식	제출물	보고 날짜	보고방법
1) 월간보고	전자파일 또는 하드카피	마지막 주 목요일	전자문서 또는 구두발표
2) 중간보고	전자파일 또는 하드카피	추후 결정	전자문서 또는 구두발표
3) 최종보고	전자파일 또는 하드카피	추후 결정	구두발표

- 1) 월간보고는 계약 후 1개월 후부터 시행하며, 중간보고 및 최종보고 시 생략한다.
- 2) 보고형식은 발주자에서 지정한 형식을 따른다.
- 3) 모든 보고 일정과 형식, 방법은 발주 담당자와 협의 후 결정할 수 있다.

6. 결과물

6.1 보고서 작성

해석 보고서는 한글 또는 MS-Word format으로 작성하며, 해석에 필요한 데이터의 정보들은 상세히 언급해야한다.

6.2 제출물

용역수행으로 인한 제출물은 표 4와 같으며, 최종보고서 제출 전, 최소 1주 전에 검토용 보고서를 제출한다.

표 4 용역 보고서

결 과 물	결과물 종류	제본	제출형태	수량	비고
(1) 제본 및 전자파일	중간보고서	1	전자파일	1	
	최종보고서	2		1	

7. 특허권 및 소유권

- 1) 계약자는 본 용역의 수행과정에서 계약자가 설계 시 사용하거나 제공한 특허 또는 상품권으로 인하여 발생할 수 있는 어떠한 종류의 책임으로부터 KFE는 완전히 면책되도록 하여야 한다.
- 2) 본 계약에 의거 계약자가 공급한 기자재 (know-how 포함)가 KFE를 상대로 특허권 분쟁이 야기되었을 때, 이에 대한 모든 비용 및 손해는 계약자가 부담한다.
- 3) 계약자 (하도급자 포함)는 본 용역의 수행과정에서 반출된 도면 및 기술자료, 습득한 제반 지식을 KFE의 사전 승인 없이 국내외 타 project에 임의로 사용하거나 반출할 수 없으며, 이로 인해 야기된 제반 문제에 대해서는 계약자가 모든 책임을 진다.

8. 기타

- 1) 계약자는 KFE가 작성한 도면 및 specification에 언급된 모든 기술사항에 대하여 충분히 검토를 하여야 하며 그 검토 결과 누락된 부분, 미비한 사항, 또는 KFE에서 제시한 사항보다 우수한 (성능, 수명 등) 대안이 있을 때는 설계 방안 제출 시 계약자의 의견을 이유, 변경방법 및 내용, 장단점 등을 기술하고, 상세한 근거 자료를 첨부하여 제출한다.