

소듐냉각고속로(원형로) 주요기기 제작 특성

최한광[†]·이중곤^{*}·전일정^{*}·김세훈^{*}·이정규^{*}·김용수^{*}·김철^{*}·안동현^{*}

Manufacturing characteristic of major components for prototype SFR

Han Kwang Choi[†], Jung Gon Lee^{*}, Il Jung Jun^{*}, Jeong Kyu Lee^{*}, Yong Su Kim^{*}, Chul Kim^{*},
and Dong Hyun Ahn^{*}

(Received 31 May 2016, Revised 19 June 2016, Accepted 21 June 2016)

ABSTRACT

The prototype SFR has currently been under design by KAERI. The size of its major components is much larger than that of APR1400 and high temperature materials are applied for it. The increased size of components and those specific materials effect on material procurement, manufacturing process and fabrication facilities. The manufacturing methods are studied for Reactor Vessel/Guard Vessel, Control Rod Drive Mechanism, Heat Exchanger, Primary Pump, Reactor Vessel Internals, Steam Generator and In-Vessel Transfer Machine. The proper manufacturing methods are suggested for each component including side forging technology for ultra large forgings of Reactor Vessel to minimize the weld seams on which In-service Inspection should be conducted.

Key Words : Sodium-cooled Fast Reactor (소듐냉각고속로), Manufacturing Assessment(제작성 평가), Ultra large forging(초대형단조품), In-service Inspection (가동중검사), CGID(일반규격품목품질검증)

1. 서 론

소듐냉각고속로(원형로)는 높은 기화온도를 가지는 소듐을 냉각재로 사용하여 설계온도 545°C에서도 액체상태를 유지하며 운전되는 고온원자로이다. 따라서 소재 또한 고온에서 건전성이 확인된 소재가 적용된다. 설계 형상 측면에서 소듐냉각고속로(원형로)의 원자로 외경 직경은 8.75m이며 상용원전(APR1400) 원자로 외경 대비 1.5배 정도이다. 또한 증기발생기 전열관 튜브의 길이는 직관 26.3m로서 튜브 전문 업체가 생산 경험이 없는 크기를 가지고 있다. 이러한 고온 소재 적용과 제품 크기의 증가는 주단 소재를 포함하여 소재의 수급성과 제작 공정에

많은 영향을 미친다.

본 연구에서는 특정설계 단계에 있는 소듐냉각고속로(원형로)의 주요기기인 원자로/격납용기, 제어봉구동장치, 열교환기, 냉각재펌프, 원자로내부구조물, 증기발생기 및 핵연료 취급장치의 고온용 소재의 수급성 측면과 고온로 기술요건에 부합하는 제작성을 검토하였다. 이를 통하여 제작 및 가동중 검사 부위를 최소화하는 설계안과 건설 단계를 대비하여 개발이 필요한 제작 기술 분야를 제안 하였다.

2. 원자로 및 격납용기

2.1 소재 특성 및 수급성

원자로용기는 하부헤드(Bottom Head)의 노심지지 플랜지(Core Support Flange)로 노심 및 내부구조물을 지지하는 한편, 1차 계통의 압력경계를 유지하는 기능을 수행한다. 격납용기와 원자로용기 사이의

[†] 회원, (주)두산중공업
hankwang.choi@doosan.com
TEL : (055)278-5732 FAX : (055)278-8497
^{*} (주)두산중공업

200mm 간격을 갖는 공간은 질소(N₂)가스로 채워져 원자로에서 1차 계통 누설 사고 발생 시 방사능 물질을 차단하며, 누설된 1차 계통 냉각재(Sodium)를 수용한다. 원자로용기 주요 소재의 사양 및 수급성은 다음과 같다.

2.1.1 원자로헤드

원자로 헤드는 두께 300mm, 외경 9454mm이며, 상단에 Pump를 설치하기 위한 내경 1700mm의 2개 홀, IHX를 설치하기 위한 내경 1490mm의 4개 홀, DHX를 설치하기 위한 내경 755mm의 4개 홀, 내경 254mm의 1개 홀, 내경 80mm의 2개 홀, 내경 30mm의 1개 홀, 그리고 45개의 원자로헤드 볼트 홀이 필요하다. 모든 홀은 원자로 헤드를 관통하고 있고, 최종 제작 후 원자로헤드의 중량은 Table 1과 같이 112 ton이며, 형상은 Fig. 1과 같다.

Table 1. Materials for Reactor Vessel Closure Head

품명	재질	중량 (ton)
Flat Head	SA-965 Grade F316H	112
Rotating Plug Rim	SA-965 Grade F316H	

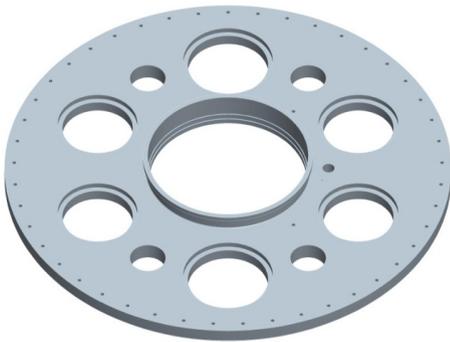


Fig. 1 Reactor Vessel Closure Head

원자로헤드는 평평한 상판과 회전 플러그로 구분된다. 상판의 경우 300mm로 매우 두꺼워 플레이트보다는 4개의 단조품을 구매하여 용접으로 연결하여 제작된다. 단품 용접 후 가공될 각종 홀들은 용접부를 피해야 한다.

2.1.2 회전플러그

회전 플러그는 최대 두께 300mm, 전체 높이 830mm, 외경 3405mm이며, 상단에 IVTM을 설치하

기 위한 내경 704mm의 1개 홀, CRDM을 설치하기 위한 내경 140mm의 9개 홀이 필요하다. 모든 홀은 회전 플러그를 관통하며, 최종 제작 후 회전 플러그의 중량은 Table 2와 같이 29 ton이다. 회전 플러그의 형상은 Fig. 2와 같다.

Table 2 Materials for Rotating Plug

품명	재질	중량 (ton)
Rotating Plug	SA-965 Grade F316H	29



Fig. 2 Rotating Plug

회전 플러그는 Fig. 2에서 보이는 형상과 같이 일체형 단조품으로 제작 가능하다. 회전 플러그의 상단 가장자리 림과, IVTM 및 CRDM 설치용 홀 가공에는 장기간이 소요될 것으로 판단된다.

2.1.3 원자로 용기

원자로 용기는 두께 150mm의 상단부 플랜지, 두께 50mm의 셸, 두께 50mm의 하단부 점지구형, 그리고 두께 421.9mm의 하단부 플랜지로 구성되어 있으며, 상단부 플랜지에는 내경 60mm의 스테르드홀 45개 가공이 필요하다. 원자로 용기의 최종 제작 후 중량은 Table 3과 같이 203 ton이며, 형상은 Fig. 3과 같다.

Table 3. Materials for Reactor Vessel

품명	재질	중량 (ton)
Top Flange	SA-240 Type 316	203
Shell	SA-240 Type 316	
Torispherical Bottom Head	SA-240 Type 316	
Core Support Flange	SA-965 Grade F316H	

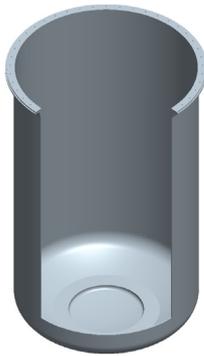


Fig. 3 Reactor Vessel

원자로 용기의 셸의 경우 외경에 비해 상대적으로 두께가 얇은 50mm 이므로 내면 및 외면 가공이 어려울 것으로 예상되어, 최대 사이즈의 플레이트를 구매하여 벤딩 후 용접으로 마무리 한다. 원자로 용기의 셸은 4등분하여 플레이트로 제작하고, 각 셸은 약 6.8 m 길이의 네 개의 플레이트를 벤딩하여 용접 이음하여 셸을 제작한다. 그러나 가동중검사의 대상이 되는 셸의 길이방향 용접심(Longitudinal Seam)을 최소화하기 위해서는 Outside pressing forging 방법이 개발되어야 한다. 현재 해외 Outside pressing forging 전문 단조 업체의 경우에도 설비 한계로 인하여 원자로 용기의 셸 크기를 일체형으로 제작할 수 없다.

2.2 제작 특성

2.2.1 오스테나이트 스테인리스강 용접 후 고용화 열처리

오스테나이트 스테인리스강은 내부식성을 향상시키기 위해 사용되나, 용접부 인근의 열영향부(Heat Affected Zone)는 크롬탄화물 석출로 인해 부식에 취약해진다. 그러나 용접부가 열처리를 통해 1000~1150℃의 온도에 도달하면, 용접금속 내 입계에 형성된 크롬 탄화물이 주변 조직으로 용해되며, 이로 인해 내부식성이 향상되고 연성 및 인성이 향상되는 한편, 용접으로 인해 생성된 용접부의 잔류응력이 해소된다. 냉각 시에는 용접부가 예민화 온도구간(500~800℃)에 노출되지 않도록 가능한 한 신속하게 냉각되어야 한다. 고용화 열처리에 대한 열처리 권고사항은 다음과 같다.

- 온도: 1900°F ~ 2000°F
- 시간: 두께 1/8인치 이하의 제품에는 10분, 두께 1/8인치 이상일 경우 1/8인치 당 8분 (최대 4시간

을 넘지 않는 범위에서)

오스테나이트 스테인리스강의 경우 코드에서는 열처리를 요구하지 않으나, 두께가 두꺼운 원자로헤드 또는 벤딩 후 용접되는 접시구형 헤드의 용접 잔류응력 해소를 위해 고용화 열처리를 수행할 수 있을 것으로 보인다.

2.2.2 치수안정화를 위한 열처리

용접은 높은 열을 발생시키고, 급속도로 냉각/응고되어 잔류응력을 유발하는 한편, 결정립 크기를 조대화 하고 용접부 및 인근 모재의 연성 및 부식저항성을 약화시킨다. 이러한 이유로, ASME 코드에서는 요구하지 않지만, 피크 잔류응력을 감소시키고 용접부의 치수를 안정시키기 위해 열처리가 수행될 수 있다.

그러나 원자로용기 및 격납용기 용접 후에는 그 크기 때문에 열처리로 이용이 어렵다. 따라서 Upper Vessel Assembly와 Lower Vessel Assembly의 Girth Seam 용접 후에는 Soak Band와 Heated Band 영역을 고려한 국부열처리가 수행되어야 한다.

ASME Code Sec. VIII(Rules for Construction of Pressure Vessels) UW-40(a)은, Table UCS-56의 용접 후 Soak Temperature를 만족하기 위해 가열되어야 하는 Soak Band를 규정하고 있다. UW-40(a)에 따르면 Soak Band는 용접부와 용접부 인근의 열영향부(Heat Affected Zone)를 포함해야 하며, 용접개선면 끝단에서 2인치(50.8mm) 또는 셸 두께 중 작은 값만큼의 범위를 포함해야 된다고 정의되어 있다.

SFR 원형로의 경우 원자로용기의 두께는 50mm, 격납용기의 두께는 25mm이므로, 이는 모두 2인치(50.8mm)보다 작다. 따라서 원자로용기 및 격납용기의 Soak Band는 용접개선면이 시작되는 부분에서 셸 두께(원자로용기 50mm, 격납용기 25mm)만큼 떨어진 지점까지를 포함해야 한다.

Heated Band는 유연한 세라믹 패드로 감싸져 가열되는 부위를 의미한다. 주변의 가열되지 않은 셸 부위로 전도(Conduction)되거나 주변제품으로 복사 또는 대류를 통해 빠져나가는 열손실을 보상하기 위해 Heated Band는 기본적으로 Soak Band 영역 이상이어야 한다. WRC (Welding Research Council) Bulletin 452, "Recommended Practices for Local Heating of Welds in Pressure Vessels"는 Soak Band 너머로 확장되어야 할 Heated Band의 길이(HB extension)를 다음

과 같이 권고하고 있다.

$$HB \text{ extension} = 2 \times \text{SQRT}(R \times t) \quad (1)$$

Where,

R = internal radius, t = wall thickness

이에 따라 각 용기의 Heated Band Extension은 다음과 같이 확정될 수 있다.

원자로용기의 Heated Band Extension: 150mm

격납용기의 Heated Band Extension: 76.2mm

원자로용기의 Soak Band 및 Heated Band는 다음과 같다.

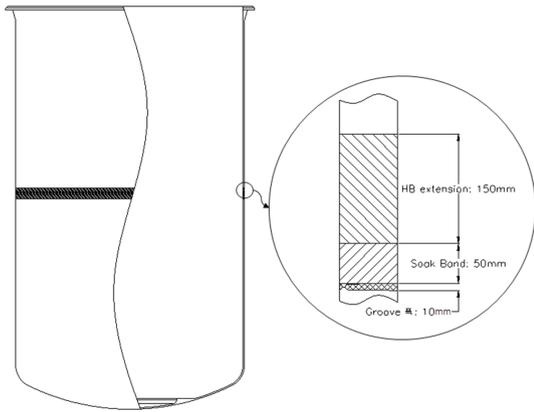


Fig. 4 Soak & Heat Band for Reactor Vessel Girth Seam

2.2.3 용접성

Type 316 오스테나이트 스테인리스강 용접성은 우수하며, Type 316H의 용접성은 Type 316과 동일하다. (Type 316H 강은 Type 316 강과 P-No.가 같기 때문에 Type 316용 WPS/PQ 사용)

Vessel Longitudinal Seam 및 Girth Seam 용접 시 용착효율이 높은 SAW Wire 용접을 적용할 수 있으며, 접시구형 헤드의 Longitudinal Seam 용접부에는 GTAW 자동용접이 적용 가능하다.

3. 제어봉구동장치

3.1 소재 특성 및 수급성

SFR 원형로 제어봉 구동장치의 압력경계기기의 재료는 주로 316H 계열의 오스테나이트 스테인리스

강으로 고온 물성이 일반 316 계열 오스테나이트 스테인리스 강보다 우수한 재료가 사용될 예정이다. 316 계열의 스테인리스 강은 몰리브덴(Mo)의 첨가로 304SS 계열보다 내식성 및 내공식성이 높은 것으로 알려져 있다. 또한 압력경계부 기기의 경우, 경수로 원전에서 사용되는 봉산수 대신 액체 소듐이 사용되므로 오스테나이트 스테인리스 강의 예민화 및 그에 따른 응력부식균열(Stress Corrosion Cracking)의 발생위험도가 상대적으로 매우 낮아 탄소함량은 별도로 규제되지 않으나 국내 건설원전 인허가 요건과 동일 수준으로 관리될 것이다. 전자석 집합체에는 자성체 재료인 410 계열의 스테인리스 강이 사용되며, 내마모 특성이 요구되는 부품에 대해서는 인코넬 625 또는 인칼로이 925 재료의 사용을 고려하고 있다.

Spring, Ball nut & Lead Screw, Ball bearing, Gear 등 구동부품은 고유의 운전특성 및 설계수명을 고려한 특수소재 부품이 사용될 것이다.

Table 4. Raw material specification of CRDM

Product Form	Material
Forging	ASME SA-182, F316H
Plate	ASME SA-240, 316H
Bar	ASME SA-479, Type 316H ASME SA-479, Type 410
Tube	ASME SA-213, TP316H
Pipe	ASME SA-312, TP316H
Bolt/Nut	Type 300 Series SS
Guide	Inconel 625 or Incoloy 925
Stopper/Coupler	Inconel 625 or Incoloy 925

Table 5. Part specification of CRDM

Product Form	Material
Spring	Inconel X-750
Ball Nut	Housing : Incoloy 925 Ball : Type 440C SS
Lead Screw	Incoloy 925
Ball Bearing	Casing : Type 316 SS Ball : Type 440C SS
Gear	Incoloy 925
Gear Wheel	Incoloy 925
Magnet Coil	Wire : Cu Insulation : Poly Imide
Bushing	Inconel 718

원소재에 대해 소재 수급성에는 문제가 없으며, 부품 소재의 경우, 적합한 성능을 가진 일반규격품 선정 및 이에 따른 일반규격품 품질검증이 중요하다.

3.2 제작 특성

3.2.1 ASME Code NB-4000 제작

CRDM 원소재는 Forging, Bar, Tube/Pipe, Plate 형태의 원소재료로부터 절단, 기계가공, 연마, 표면처리하여 제작된 후 용접 또는 체결체에 의해 제작된다. 별도 성형이나 용접후열처리(Post Weld Heat Treatment, PWHT) 제작공정은 요구되지 않는다. 부품 용접 시 용접사 인정은 ASME Code Section III, Sub-section NB, Sub-article NB-4320에 따라 수행된다. 용접절차서 인정 또한 Sub-article NB-4320에 따른다. 또한, 캐노피형 용접부(Canopy seal weld)와 같이 특수 설계한 용접 밀봉부에 대해서는 ASME Code NB-4360에 따라 용접인정이 이루어진다.

압력경계기기의 재료에 대해서 기계가공 후 가공 표면에 대해 표면검사가 요구된다. 완전용입용접 개선부를 포함하여 모든 가공면에 대해서는 표면결함 검출을 위해 자분 탐상 검사(Magnetic Particle Examination, MT) 또는 액체 탐상 검사(Liquid Penetrant Examination, PT) 등의 표면검사 형태의 비파괴검사(Non-destructive Examination, NDE)가 요구된다.

또한, 용접부에 대해서는 용접 전 용접검증이 요구되며, 표면검사에 추가하여 내부 결함 검출을 위해 RT(Radiographic Examination) 또는 UT(Ultrasonic Examination) 등의 체적검사 형태의 NDE가 요구된다. 비파괴검사원 인정은 ASME Code NB-5520에 따르면, 비파괴검사 절차서 인정은 NB-5112에 따라 수행된다.

3.2.2 용접재료

용접자재와 관련하여 SFR 원형로 CRDM 제작하는 용접자재의 재료 요건은 오스테나이트 스테인리스 강의 용접 시 미세균열(Micro-fissuring) 발생을 방지하기 SFR 원형로 제어봉 구동장치의 압력경계기 역시 델타페라이트에 대한 규제지침서 1.31의 권고사항을 만족하여야 한다. 델타페라이트 함유량은 오스테나이트 스테인리스강의 용접재질A-No. 8 (ASME Code Section IX의 표 QW-442)에 대하여 적

용되어야 하며 설계온도가 425 °C 이하인 경우, 최소 수용 델타페라이트 함유량은 5FN 이다. 반면 노심에 근접하는 기기에 대해서는 설계온도가 425 °C 를 초과할 경우 3FN ~ 10FN 범위 이내로 제한된다.

3.2.3 일반규격품 품질검증

안전등급 기기의 제작에 있어 일반규격품 품질검증(CGI Dedication) 적용 시 원자력 품질시스템을 보유한 업체에서 품질검증을 실시하여야 하나 국내 소규모 전문 제작업체의 경우 Q등급자재로의 일반규격품 품질검증에 적합한 품질시스템을 갖추지 못한 경우가 많으며 안전등급 기기의 자재구매, 제작, 시험 및 검사 등 전반적인 제작업무 수행이 어려운 경우가 많다. 이 경우, 원자력 품질시스템을 갖춘 공인 시험기관이나 Q등급 제조업체를 통해 일반규격품 품질검증을 수행하여야 한다.

일반규격품 품질검증의 일반적인 수락(Acceptance) 절차는 아래 Fig. 5와 같다. 수락방법은 1은 시험, 수락방법 2는 제작중 입회, 수락방법 3은 품질보증 시스템의 점검, 수락방법 4는 유사 품목의 납품 실적을 검토하는 것이다. 일반적으로 수락방법 1을 필수로 하여 나머지 3가지 중 한가지를 선택하여 품질검증이 수행된다.

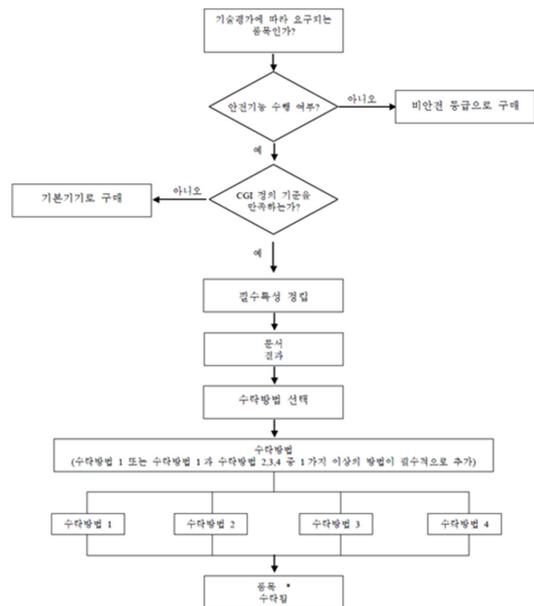


Fig. 5 Typical acceptance procedure for Commercial Grade Item(CGI) dedication

4. 중간열교환기 (IHx)

4.1 소재 특성 및 수급성

SFR 원형로 중간열교환기의 주요 재질은 고온에 강한 성질을 가진 9Cr-1Mo-1V 화학조성의 고온용 Low Alloy 크롬 몰리브덴으로 구성되어 있다. 해외 SFR의 중간열교환기의 경우 Stainless Steel 316을 사용하는 경우도 있으므로 튜브 확관 방법이나 용접부의 건전성 및 후열처리 등의 제작성 확인을 위한 Mock up 시험의 검토도 요구된다.



Fig. 6 Intermediate Heat Exchanger

4.1.1 중간열교환기 (IHx) 소재 특성

중간열교환기에 사용하는 재질은 ASME Code Section III Division 5 NH(High Temperature Reactors)의 Mandatory Appendix Table I-14.1(a)에 규정되고 있으며, Product Form에 따른 재질은 아래 Table 6과 같다.

Table 6. Material selection per product form

Spec. No.	Material	Product Form	Remark
SA-182	SA182-F91	Forging	
SA-213	SA213-T91	Seamless Tube	
SA-335	SA335 -P91	Seamless Pipe	
SA-387	SA387-91	Plate	

4.1.2 용접소재 특성

아래 AWS Class에 해당하는 용접소재는 9Cr-1Mo-1V 합금용 용접재료로 Cr 함량이 높아 용접부의 고온에서 높은 내Creep성을 가지고 있다.

Table 7. Permissible Weld Materials in Table NH-I-14.1(b)

Spec. No.	Class	Remark
SFA-5.5	E90XX-B9	
SFA-5.23	EB9	
SFA-5.28	ER90S-B9	

4.1.3 소재 수급성

9Cr-1Mo-1V(Table 4.1.1(a))소재는 산업용보일러 등의 분야에서 널리 사용되는 자재로 소량 구매의 경우를 제외한다면 수급에는 특별한 어려움이 없다. 다만 원자력등급용 자재 적용에 따른 소재 공급사 자격은 프로젝트 수행시 Vendor Sourcing이나 Quality Survey를 통하여 해결해야 하는 사항이다.

4.2 제작 특성

SFR 중간열교환기는 상/하부 동체와 튜브시트, 노즐 및 플랜지등으로 구성된 주단품과 튜브 지지대와 확관으로 고정되는 직관형튜브 등으로 구성되어 있으며 소듐 물반응을 고려한 이중배관 동체, 튜브 지지대 align 및 wedge를 이용한 고정 및 설치, 재질 특성을 고려한 튜브 확관 및 9Cr-1Mo-1V 재료의 용접성등의 제작특성의 검토가 요구된다.

4.2.1 상단 이중 배관 제작성

중간열교환기는 Thermal Shield Cylinder와 IHx Cylinder로 구성된 압력경계부의 내부에 별도의 Inner Pipe를 사용하는 것으로 설계되어 있으며 seamless pipe인 Inner Pipe의 설치에는 특별한 문제는 없으나 Expansion Bellows와 연결 방법 등은 Bellow의 사양 확정 후 확인이 필요하다.

4.2.2 튜브 지지대 설치 검토

Lower Tube sheet Hole을 중심으로 TSP(Tube Support Plate) hole 을 align후 wedge를 두드리며 맞춘 후 wedge 주변을 용접하며 동일한 방법으로 5개의 TSP를 순차적으로 설치한다.

4.2.3 튜브 확관 검토

SA213-T91 소재는 Ferritic Stainless steel로서 항복강도(min 60 ksi)가 높고 연신율(min 20%)이 낮은 강종이다. 소재 특성으로 인해 확관에 필요한 압력은 높고, 연신이 작게 되므로 확관 시 균열 발생 가능성이 높다. 특히, 튜브시트 홀 내경을 엄격하게 관리하지

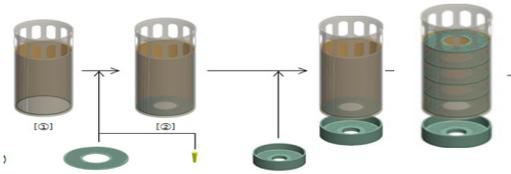


Fig. 7. Tube Support Plate Assembly

않아 공차가 클 경우 Flaring이 많이 되어 튜브 균열 발생 가능하므로 자재 구매 시 튜브 치수관리 및 튜브시트 홀 치수 관리도 필요함. 수압 확관 또는 롤확관 등의 확관 방법의 적용은 가능하나 Mock-up을 통해 확관 조건 선정 및 확관 부위 품질 평가 수행이 요구된다.

4.2.4 용접성

예열온도(중간온도), 후열온도 및 PWHT온도는 P-No.3 에서 적용하는 온도보다 약 50~100℃ 높아 작업성이 열악하며(PWHT 유지온도는 750℃ 정도로 열처리 가능함), 예열온도가 유지된 상태에서 후열 및 PWHT를 수행해야 하기 때문에 고온에서 제품 취급 이 요구됨에 취급상 어려움이 많을 것으로 예상된다. 또한 높은 Cr 함량과 V와 같은 합금원소가 포함되어 있어 PWHT후 재열균열(Reheat cracking)에 민감하며 Cr함량이 높은 용접재료를 사용하기 때문에 용접시 용접봉 운용의 어려움이 있다.

5. 냉각재펌프

5.1 소재 특성 및 수급성

SFR원형로 냉각재펌프의 설계, 제작 및 검사는 ASME Code, Section III Division V Subsection HB에 따라 수행된다. 냉각재펌프의 설계온도는 545℃ (1013°F)로서 Subpart A의 저온 요건을 적용할 수 없으며Subpart B의 요건이 적용된다. Division 1, NB 3000의 요건에 준해서 Section II, Part D, 부록 2A, 2B 및 4에 의해 포함되는 온도범위 내에서 기기, 부품 또는 부속물을 설계 및 Material을 선정할 수 있다.

Shaft, Impeller를 포함한 비압력부는 ASME Code, Section III Division V Subsection HB를 적용 받지 않으나, 재료는 Section II, Part D, 부록 2A, 2B 및 4에 의해 포함되는 온도범위 내에서 기기, 부품 또는 부속물을 설계 및 Material을 선정할 수 있다.

재질 선정은 해당 펌프의 구동조건, 부식 환경 등을

고려하여 Stainless Steel Type 316H를 사용하며, 부품별 특성에 따라 Product Form을 결정하여야 한다.

5.2 제작 특성

5.2.1 냉각재펌프

냉각재펌프는 Shaft와 일부 품목을 제외하고는 제관 용접으로 제작된다. 특히 SFR 냉각재펌프의 Shaft는 전동기에서 발생한 회전력을 전달하는 부품으로 적정한 강도가 요구되며, 상/하부는 중실축, 중간부는 중공축을 별도 제작하여 조립되는 구조로 되어 있다.

5.2.2 냉각재펌프 회전축

중공축은 Round bar소재로 내/외부를 가공하거나, 인발(Drawing)로 제작하는 2가지 방식으로 제작이 가능하다. 가공에 의한 제작 방식은 Shaft의 형상 및 형상공차와 같은 설계 요건에 따라 제작할 수 있는 범위가 제한적이다. Deep Hole을 통한 내경 가공은 외경의 10배 정도까지 가공이 가능하므로 현재 중간부의 중공축은 외경 630mm, 길이 6400mm(추정)이므로 Deep Hole가공이 가능하다. 인발로 제작 가능한 중공축은 외경60mm이므로, 인발로 Shaft제작은 불가능할 것으로 검토되었다.



Fig. 8 Shaft of Primary Pump

각 단품(상/중/하부) 치수에는 용접수축율을 사전에 검토하여야 용접 후 전체 Shaft의 길이를 만족할 수 있으며, 각 단품(상/중/하부)들의 직경치수 및 형상공차(원통도 등)는 단품 상태에서 최대한 정밀하게 제작이 되어야 한다.

Shaft는 Bearing 및 Mechanical Seal과 정밀치수로 조립되고, Shaft의 진동과 밀접한 연관 Run-out 및 직진도 등을 고려하여 반드시 단품간 용접 후 추가 가공이 요구된다.

6. 원자로내부구조물

6.1 소재 특성 및 수급성

SFR 원형로 원자로내부구조물 및 상부안내구조물의 재질은 고온 재질에 견딜 수 있는 TYPE 316 스테인리스 강으로 구성한다. 소재 부분은 설계요건을 고려한 구성 소재와 용접 소재 두 가지로 분류한다. 소재 수급성은 제품 형상 및 크기를 반영한 Product Form 기준으로 검토하였다.

6.1.1 소재 특성

HGB-2121 항에서는 원자로내부구조물 및 상부안내구조물 고온부 재질에 허용하는 재질을 ASME Code Section III Division 5 NH Mandatory Appendix Table I-14.1(a), Table HGB-II-2121-3에 규정하고 있으며, 규정된 재질에 대한 Product Form별로 제안되는 재질은 Table 8과 같다.

Table 8 Material selection per product form

Spec. No.	Material	Product Form	Remark
SA-182	SA182 F316H	Forging	Below 10,000 lbs
SA-213	SA213 TP316H	Seamless Tube	
SA-240	SA240 TYPE 316H	Plate	
SA-479	SA479 TYPE 316H	Bar	
SA-965	SA965 F316H	Forging	Over 10,000 lbs

6.1.2 용접자재 특성

용접자재와 관련하여 상용로의 경우 델타페라이트 함량이 8FN~15FN으로 규제되고 있으나, HGB-2433.2 항에서는 설계온도 800°F(425°C) 이상인 경우 용접자재 델타페라이트 함량을 3FN ~ 10FN 범위로 제한하고 있다. 규제지침서 1.31의 권고사항에서는 800°F(425°C) 이하인 경우 용접자재 델타페라이트 함량을 최소 5FN으로 제한하고 있다. 800°F(425°C) 이상의 설계온도에 대하여 델타페라이트의 요구치가 낮아졌으나, 용접봉 제작성 및 작업성에는 영향이 없다.

6.1.3 소재 수급성

Table 8과 같은 재질 기준에서는 수급성이 원활하나 제품 제작 형상 및 크기를 고려한 Product Form 기준은 제약이 따른다. SFR 원형로 원자로내부구조물 및 상부안내구조물 소재 구매 시 설계 요건을 고려

한 단조품 구매는 가능하다. 하지만 구매 경쟁력이 낮고 제작 시 단조중량 및 회수를 증가로 인한 손실이 크다. 설계 및 제작 요건을 모두 고려할 경우, 판재 및 부분별 단조품 소재가 선정되어야 하고 이 경우 소재 수급성에 제약사항은 없다.

6.2 제작 특성

SFR원형로 원자로내부구조물은 설계 특성 상 압력유지품목이 아니므로 상용로 대비 두께가 얇고 부피가 큰 구조적 특성을 가진다. 얇은 두께를 가진 제품의 변형 관리는 설계 요건을 맞추기 위한 주요 성공 변수로 작용한다. 또한 구조물 핸들링 및 운송 시 치수 뒤틀림을 방지하기 위한 추가적인 고정구조물 설치가 필요하다.

6.2.1 단품 제작 특성

IVS Shroud나 Core Shroud는 부분별 판재 및 단조품 소재 제작 시 내부 및 외부에 지지할 구조물이 없고 얇은 두께로 인해 치수 관리가 상당히 어렵다. 내경 및 외경은 최소 $\pm 6.35\text{mm}$ 의 공차로 관리되어야 한다.

Core Restraint는 Core Restraint Ring과의 조립성을 반영하여 4개의 단품으로 제작된다. 단순 가공으로 제작되므로 제작적인 문제는 예상되지 않는다.

Core Support Structure는 크게 Upper Grid Plate와 Inlet Plenum으로 나누어 제작이 가능하다. 설계 특성을 고려하여 단조품으로 제작하여야 한다. Hole이 많아 가공으로 인한 열변형이 예상되므로, 벨런싱 가공으로 변형 관리가 필요하다. Nozzle부분은 배관과 연결되므로 ASME B16.25 “Buttwelding Ends”에서 제시하는 용접 개선면 끝단부 개선형상을 설계요건에 반영하여야 한다.

Redan Structure는 부피가 가장 큰 구조물이며, Bending 작업을 위해 최소 16 개의 판재로 제작되어야 한다. 30mm의 두께에 Seam 용접 작업이 많아 치수변형이 크므로, 반경 공차는 최대 25.4mm 이내로 관리되어야 한다. 용접 후 변형이나 핸들링 및 운송을 고려한다면 최소 내측에 고정 가능한 구조물이 6 개 이상이 필요하다.

6.2.2 조립 시 제작 특성

조립 시 Core Shroud나 Upper Grid Plate는 한쪽으

로 접근이 불가능한 경우가 발생한다. 용접 개선부 형상은 한쪽 용접을 위한 Bevel 혹은 J-groove 형상을 가질 수 있도록 하며, HGB-3352 “허용용접이음 및 설계계수”에 따라 품질계수 및 피로계수가 고려되어 설계 요건에 반영되어야 한다.

Upper Grid Plate와 Inlet Plenum의 조립 시 용접으로 인해 Upper Grid Plate의 외곽 Hole 변형이 예상되며, 용접 후 내측 접근 불가로 Balancing 용접이 불가하여 치수불일치가 우려된다. Hole 간 정렬요건은 정밀수준의 공차요건이 필요하고 불일치를 최소화하기 위해 Upper Grid Plate의 최외각 Hole은 Girth Seam 용접 후 가공되어야 한다.

7. 증기발생기

7.1 소재 특성 및 수급성

상용로의 경우 증기발생기의 압력 경계부 주 재질은 SA-508 Grade3 Class 1, 전열관 재질은 SB-163 Alloy 690이나 SFR원형로 증기발생기의 재질은 9Cr-1Mo-V다. SFR 증기발생기에 허용되는 재질은 ASME Code Section III Division 1 NH Mandatory Appendix Table I-14.0에 규정하고 있다. Table I-14.0에 규정된 재질 중 상용로에 적용된 Material Specification을 고려하여 적용 가능한 재질은 Table 9와 같다.

Table 9 Permissible Base Materials for Structures other than Bolting in Table NH-I-14.1(a)

Base Material	Product Form	Spec. No.	Type, Grade
9Cr-1Mo-V	Forging	SA-182	Grade F91
	Seamless Tube	SA-213	Grade T91
	Seamless Pipe	SA-335	Grade P91
	Plate	SA-387	Grade 91

7.1.1 용접자재

9Cr-1Mo-V에 해당하는 용접자재 허용 재질은 아래 Table 10과 같다. 상용로 용접 제작은 델타페라이트 함량을 8FN ~ 15FN 으로 규제하고 있으나 NH-2433.2에서는 설계온도 425°C(800°F) 이상의 경우 용접자재 델타페라이트 함량을 3FN ~ 10FN으로 규제하고 있다. 델타페라이트의 요구치가 낮아 졌으나 상용로 제작에 사용되는 용접봉 및 용접 절차에서도 델타페라이트 함량을 최소 5FN이상 관리하고

있으므로 용접 제작성에 미치는 영향은 없다.

Table 10 Permissible Weld Materials in Table NH-I-14.1(b)

Base Material	Spec. No.	Class
9Cr-1Mo-V	SFA-5.5	E90XX-B9
	SFA-5.23	EB9
	SFA-5.28	ER90S-B9
	SA-387	Grade 91

7.1.2 부위별 사용 자재

SFR 원형로 증기발생기는 직관형 전열관을 통한 One Through Type Steam Generator 의 형태를 가지고 있으며 2개의 Tubesheet(관관) 및 전열관으로 소듐과 물/증기의 경계를 형성한다. 소듐 냉각재 외부 동체(Outer Shell)을 통해 내부동체(Inner Shell) 내부로 유입하여 전열관에 접촉되며 내부동체 외부에는 전열관과 동체측 사이의 온도차에 따른 축 방향 열팽창 차이를 흡수하기 위해 Bellows가 설치된다. 9Cr-1Mo-V 에 해당하는 Round Bar 형태 및 Bellows는 Code 에서 다루고 있지 않아, 추후 논의가 필요하다.

Table 11 Material Selection per product form

Part Name	Product Form	Material	Remark
Tubesheet	Forging	SA-182 Gr.F91	
Top & Bottom Head	Forging	SA-182 Gr.F91	
Nozzles	Forging	SA-182 Gr.F91	
Support Skirt	Forging	SA-182 Gr.F91	
Outer Cylinder	Forging or Plate Forming	SA-182 Gr.F91 SA-387 Gr.91	
Inner Cylinder	Forging or Plate Forming	SA-182 Gr.F91 SA-387 Gr.91	
Sliding Base	Plate	SA-387 Gr.91	
TSP	Plate	SA-387 Gr.91	
Wedge	Plate	SA-387 Gr.91	
Frame Structure	Plate Forming	SA-387 Gr.91	
Ring Structure	Plate Forming or Plate Machining	SA-387 Gr.91	
Heat Transfer Tube	Seamless Tube	SA-213 Gr.T91	

내부 구조물 및 외부 Support 를 포함한 구성품별 재질은 ASME Code Section III Division 1 NH Mandatory Appendix Table I-14.0에 따라 결정하였다. 주단품 및 후판은 제작 및 수급이 가능하며, 전열관의 경우 One Through Type Steam Generator에 사용되는 전열관은 해상 운송이 가능하다.

7.2 제작 특성

SFR 원형로 증기발생기에 대한 예비특정 설계에 대하여 관관 제작특성을 포함하여 주요 내부 구조물 제작성을 검토하였다.

7.2.1 전열관관과 전열관 제작성

증기발생기 전열관관은 PGSFR 주기기 제작개념 및 노외 핵연료 취급절차에 따라 수압확관을 위한 관관으로 제작하는 방법과 전열관관에 Spigot 을 형성하여 전열관을 Butt Weld 하는 방법으로 적용이 가능하다.

전열관관은 확관을 통한 제작방법 또는 전열관관에 Spigot 을 형성하여 전열관과 전열관관의 Spigot 과 Butt weld 를 적용한 방법 모두 제작개념에 따른 제작방법에 차이가 있으며, 전열관과 전열관관간 제작성 검토를 위한 시제품 제작을 통한 기술개발이 필수적으로 요구된다.

7.2.2 전열관 지지대 및 내부구조물 제작성

전열관 지지대는 전열관의 외벽에 밀착되는 형태로 전열관 외부직경과 전열관 지지대간 공차설계에 따라 제작성이 결정된다. 추가적인 상세설계를 통하여 공차 설계가 이루어질 예정이다. 전열관 지지대를 포함한 전열관 뭉치는 Inner shell 에 Long Seam 을 사용하여 제작이 되어야 할 것으로 사료된다.

8. 핵연료취급장치

8.1 소재 특성 및 수급성

SFR원형로에서 핵연료취급장치는 원자로 내부에서 핵연료 교체를 담당하는 노내핵연료 취급장치(In-Vessel Transfer Machine, IVTM)와 원자로 외부에서 핵연료를 취급하는 노외핵연료 취급장치(Ex-Vessel Transfer Mach-ine, EVTM), 원자로 헤드에 설치되어 노내핵연료 취급장치를 이동시키는 회전 플러그

(Rotating Plug, RP), 연료 이송시 노내/외 밀봉을 위한 Adaptor Structure (AS), 노내 - 노외간 연료 이송을 위한 Fuel Transfer Port (FTP) 로 구성된다.

회전플러그와 노내핵연료 취급장치의 재질은 Stainless Steel, Type 316H 를 사용한다.

8.1.1 회전 플러그

회전 플러그의 구조는 Fig. 9와 같이 Canopy, 베어링, 그리고 본체로 구성되며, 본체는 다시 회전 플러그 Flange 와 5개의 세부 Parts 로 조립되어 있다. 회전 플러그 Flange 는 Dia. 3,390mm, 높이850mm의 원통형으로 Reactor Head 에 설치되며. Forging 품으로 제작 가능하다.

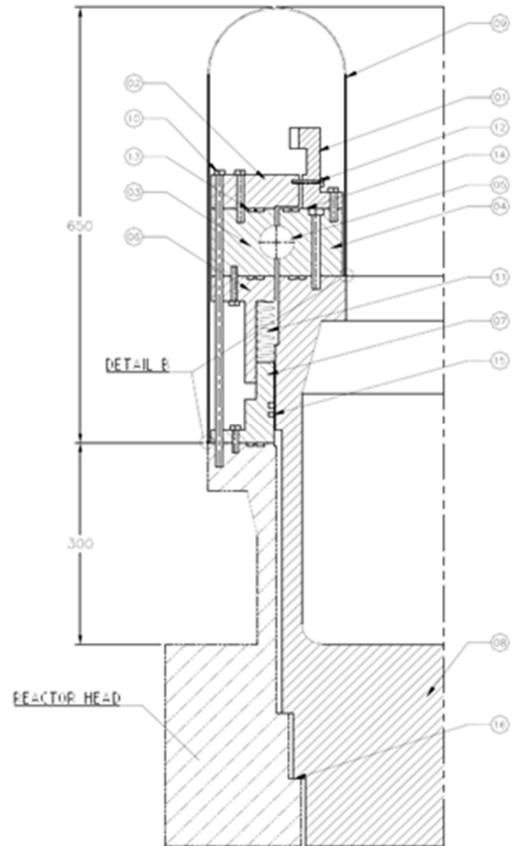


Fig. 9 Section view of rotate plug

8.1.2 노내핵연료 취급장치

Main Tube는 O.D 615mm, 두께 15mm, 길이 9,244mm 로서 Welded Pipe 로 제작 가능하며 O.D

24”[609.6mm]으로 설계 변경 시 Seamless Pipe 로 제작이 가능하다.

8.2 제작 특성

8.2.1 핵연료취급장치

구동장비 특성상 유지보수를 위해 기기의 조립 및 분해가 용이하도록 설계, 제작되어야 한다. 특히, 회전 플러그는 기밀 유지를 위한 각종 Seal, Bellows 선정 및 성능 검증이 요구된다.

8.2.2 회전 플러그

Canopy 는 Reactor Head 회전 플러그에 걸쳐 설치되며 용접으로 밀봉상태를 유지한다. Canopy 재질은 316H Plate로 두께는 2mm이다.

Canopy 는 Upper Structure, Outer Ring, Inner Ring 으로 나누어 제작하며 Upper Structure 는 단면은 반원, 전체 형상은 도넛 형태로써 일체형을 제작하기는 불가능하고 Bending 에 따른 변형이 심할 것으로 예상되므로 Fig. 10과 같이 45° 간격으로 8 parts 로 나누어 용접, 제작하도록 한다. Inner Ring 과 Outer Ring 은 Plate 자재의 길이방향 제약(최대 6,000mm)으로 인해 각각 2 parts 로 나누어 제작 가능하다.

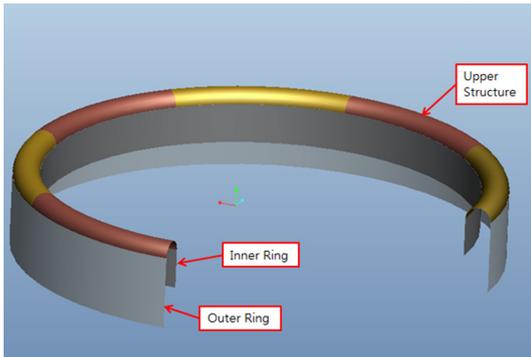


Fig. 10 Fabrication of canopy

8.2.3 노내핵연료 취급장치

Main Tube는 Fig. 11과 같이 회전 플러그에 의한 회전과 핵연료 취급에 따른 구조물 변형을 방지하기 위해 Bracket 으로 Tube 내부를 지지하게 된다. 이때, 일체형 Bracket으로 제작시 “A” 용접부위는 좁고 긴 밀폐된 공간으로 수동 및 자동용접이 불가능하므로 Plate를 3 부분으로 나누어 각 part별로 용접, 제작하도록 한다.

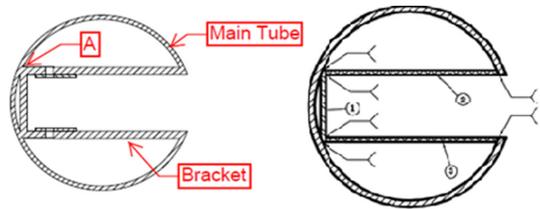


Fig. 11 Fabrication of IVTM main tube

9. 결 론

본 논문에서는 소든펜각고속로(원형로)의 주요 기기에 대하여 적합한 제작 방안을 제시하였다. 현재의 설계 형상은 고온로 기술기준을 적용하여 제작 가능한 형상을 가지고 있다. 원자로의 경우 용기의 용접심을 줄이기 위한 Outside pressing forging 기술과 증기발생기의 경우 튜브와 튜브 시트 이음 제작 방법 개발이 필요하다. 현재 소든펜각고속로(원형로)는 특정설계가 진행 중이며 설계가 진행됨에 따라 의도된 기능과 건전성을 보유하고, 발전소 현장에서 가동중 검사 및 유지 보수가 가능한 설계가 구현되도록 제작성 검토는 지속 수행되어야 하며 그 결과는 설계에 반영되어야 한다.

참고문헌

- (1) ASME, 2010, “High Temperature Reactor,” *ASME B&PV Sec. III, Div. 5*, 2010ed.
- (2) ASME, 2010, “Rules for construction of nuclear facility components,” *ASME B&PV Sec. III, Div. 1, Sub. NB, NG and NH*, 2010ed.
- (3) KAERI, 2013, SFR Design Concept Description: Chapter 4, Reactor Core, and Chapter 5, Reactor Coolant System and Connected System.
- (4) KAERI, 2015, SFR Components Design Drawings.
- (5) Tsukada, H., Suzuki, K., Saito & R. Miura, J., 1986, “Ultra-Large Size Austenitic Stainless Steel Forgings for a Fast Breeder Reactor: Development, Manufacturing and Properties Achieved.”
- (6) Bhavini, P. K., 2014, “An Overview of Welding and Fabrication Aspects during Manufacture of Nuclear Reactor Components for 500MWe Prototype Fast Breeder Reactor,” *Int. Welding Congress*.