

핵융합로 블랑켓 부품제작 및 접합기술

정 용 환 · 한국원자력연구소 침입노심재로개발팀, 책임연구원
홍 병 곤 · 한국원자력연구소 핵융합연구팀, 책임연구원

_e-mail : yhjjeong@kaeri.re.kr

_e-mail : bghong@kaeri.re.kr

이 글에서는 미래 전력 에너지원 개발을 위하여 연구개발이 본격화되고 있는 핵융합로의 개요 및 핵융합로의 핵심부품인 블랑켓의 기능 및 구조와 제작기술에 대하여 소개하고자 한다.

핵융합로 기술 개발 개요

핵융합로는 가벼운 원자핵 사이에 일어나는 핵융합 반응에서 발생하는 에너지를 이용하는 원자로이다. 가능한 핵융합 반응 중에서는 중수소와 삼중수소의 반응에 의하여 에너지를 생산하는 핵융합반응이 사용되는 원자들이 비교적 풍부하게 존재하고 방출되는 에너지도 크기 때문에 가장 주목 받고 있다. 또한 핵융합 반응 후 생성되는 부산물은 방사능을 띄지 않는 헬륨만 생성되기 때문에 기존의 핵분열을 이용하는 원자로와 비교하여 고준위 방사성폐기물을 발생시키지 않는다.

핵융합 반응이 일어나기 위해서는 연료의 농도가 임계값을 초과하여야 하며, 원자핵 사이 발생하는 척력을 극복하여 핵력에 의해 핵융합 반응이 가능하도록 1억°C 이상의 플라즈마 상태를 유지해야 한다. 플라즈마를 가열하는 기술은 플라즈마 입자와 공명을 발생시키는 고주파를 이용하는 방법과 중성입자 빔을 이용하는 방법이 이용되고 있으며 최근에는 중간(muon)을 촉매로 이용하여 플라즈마를 가열하는 연구가 수행되고 있다. 한편, 플라즈마를 밀폐하는 방법은 자기장을 이용하는 방법과 관성력을 이용하는 방법이 개발되고 있다.

핵융합로는 핵융합 반응이 일어나고 핵융합을 제어하는 핵융합 계통, 핵융합 반응에서 발생한 중성자의 운동에너지를 열에너지로 변환하고 변환된 열을 수송하는 계통, 핵융합에 사용될 삼중수소를 분리/정제하고 중수소를 분리하여 혼합하여 플라즈마 노심으로 공급하는 연료순환 계통 및 계측제어나 격납용기 및 폐기물 처리와 같은 기타 계통으로 구분할 수 있다. 핵융합로를 구성하는 여러 가지 부품 중 블랑켓은 핵융합 반응에서 발생된 중성자의 운동에너지를 열에너지로 변환하면서 중성자를 차폐하는 기능을 하며, 냉각수에 리튬을 포함하여

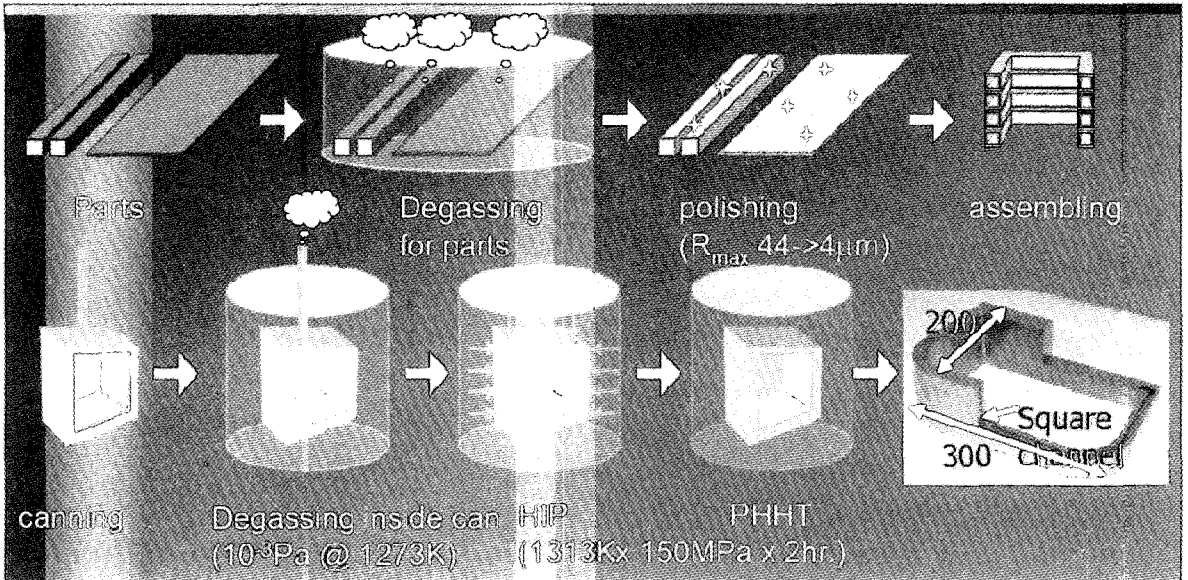


그림 1 HIP 접합을 이용한 불량켓 부품 제조 공정

핵융합로의 불량켓은 플라즈마와 인접하는 부품으로서 높은 중성자속 및 열속 환경에서도 우수한 성능을 유지해야 한다.

삼중수소를 생산하는 기능도 함께 한다.

현재 핵융합 기술개발은 공장 설비 규모의 핵융합 출력이 가능한 토카막형 시험설비인 ITER를 설계하고 건설하는 단계까지 진행되고 있다. 따라서, ITER 설계와 건설에 있어서 불량켓의 제작 기술 확립이 필요하고, 그 기술확립이 이루어지기 위해서는 2015년부터 가동에 들어갈 ITER에 증식불량켓(breeder blanket)을 삽입하여 핵융합 환경하에서의 에너지변환 및 열 생성과 회수, 삼중수소의 생산과 회수기능, 방사선차폐기능 등 여러가지 성능

을 실증하고, 그 건전성 및 안전성을 입증하는 것이 반드시 필요하게 된다. 이를 위해 ITER 개발에 참여하는 유럽연합(EU), 일본, 미국, 중국, 러시아 및 한국 등에서는 ITER Test Blanket Module(TEM) Program을 제안하여 각국 고유의 TEM 설계 및 제작에 많은 연구를 수행하고 있다.

핵융합로 불량켓 재료

핵융합로의 불량켓은 플라즈마와 인접하는 부품으로서 높은 중성자속 및 열속 환경에서도 우수

한 성능을 유지해야 한다. 이러한 요구조건을 만족시키는 구조재료로서 저방사화 페라이트/마르텐사이트강(RAFM강), 바나듐 합금(V alloys) 및 SiC/SiC복합재들이 제안되고 있다.

RAFM강은 핵융합로 불량켓의 후보 재료 중 현실적으로 가장 적용 가능성이 높은 재료로서 현재 ITER에서 시험될 TBM의 구조재료로도 제안되고 있다. RAFM강은 과도한 조사조건에서도 치수안정성이 우수하고 향후 큰 설비투자 없이 양산할 수 있다는 장점을 가지고 있다. RAFM강은 비용, 이용성 및 사용경험 관점에서 스테인리스강의 장점을 공유하고 있으며, 표면 열용량, 중성자 조사특성 측면에서는 스테인리스강보다 매우 우수하고, 기존의 핵분열발전 분야의 경험과 기술을

이용할 수 있는 장점이 있다.

이러한 RAFM steel은 주요 냉각재 및 브리딩(breeding) 재료와의 양립성도 우수하며, 스웰링 및 헬륨취화에도 민감하지 않은 특성을 가지고 있다. 대표적 RAFM강인 F82H는 일본의 JAEA와 NKK corporation에서 공동으로 개발되었으며 이 합금에 대한 다양한 연구들이 진행되었다. 이후 일본의 대학들을 중심으로 개발된 JLF와 EU에서 개발된 Eurofer도 공동시험 조성으로 선정되어 다양한 연구가 수행되고 있다. 한편, RAFM강의 적용 온도를 높이기 위하여 산화물분산강화방법을 응용하는 연구들이 활발히 진행되고 있다. 특히 산화물 입자의 크기를 나노크기로 줄일 경우 가동온도를 크게 증가시킬 수 있다.

바나듐 합금은 우수한 중성자 특성, 높은 설계여유도, 우수한 가공성, 고온 및 고부하조건에서 우수한 성질, 냉각재와 양립성 등의 장점이 있다. 특히 바나듐 합금은 RAFM강에 비하여 더 높은 표면 열속 및 중성자 조사환경에 사용할 수 있을 뿐만 아니라 연성이 우수하여 기존 가공기술로 제조가 용이하고, 용접성도 우수하며 재사용의 가능성도 높아 폐기물관리 요구를 최소화할 수 있다. 바나듐 합금과 관련된 주된 관심분야는 액체금속을 냉각재로 사용할 경우 발생할 수 있는 Magneto-Hydro Dynamic (MHD) 효과를 완화하기 위하여



핵융합로의 블랑켓은 서로 다른 기능을 수행해야 하는 재료들이 접합을 통하여 최종 부품으로 제조되어야 하며 따라서 동종 또는 이종재료의 접합기술이 블랑켓 제조의 핵심기술로 고려되고 있다.

부식저항성 부도체 코팅을 개발하는 것이다. 이와 같은 코팅기술이 성공적으로 개발된다면, 바나듐 합금의 가동온도 범위는 400~700°C 정도가 될 것으로 예측되고 있다.

SiC_f/SiC복합재는 SiC fiber와 SiC matrix를 결합한 재료로서 내열성과 저방사성을 요구하는 핵융합로의 설계조건에 SiC 복합재가 부합되면서 핵융합로 블랑켓의 후보 재료로 고려되고 있는 재료이다. SiC_f/SiC복합재의 종류로는 fiber를 Dupont 사의 Nicalon series나 UBE 사의 Tyranno series를 이용하고 제조공정에 따라 그 종류가 다양하다. 재료의 개발방향은 제조 시 고온에서 취성을 야기할 수 있는 산소의 양을 줄이는 방향과 Si와 C의 구성 비율이 1:1에 가까운 화학양론성 fiber에 가깝게 제조하여 열전도도 및 고온 기계적 물성, 조사취화 저항성을 개선하는 방향으로 추진하고 있다.

SiC_f/SiC복합재와 관련한 연구 동향은 크게 fiber 및 matrix 제조 공정기술, 접합기술로 나눌 수 있으며, 이론적인 접근을 통한

해석 모델링과 실증실험 연구에 주요안점을 두고 있다. SiC_f/SiC 관련 연구는 일본에서 가장 활발한 편이며 코토대학 및 JAEA에서 fiber의 결정성을 높여 물성 개선을 유도하는 연구 및 전자빔을 이용한 접합물성 개선 연구 등이 수행되고 있다. SiC_f/SiC복합재는 뛰어난 저방사화 성질과 내열성이란 관점에서는 핵융합 재료로서 우수한 적합성을 보인다는 점과 물성연구 및 제조, 접합연구가 아직 확립되어 있지 않아 현 기술로서는 핵융합로의 구조재료로서 사용하기 어려운 단점을 동시에 지니고 있다.

핵융합로에서 플라즈마를 대면하는 제1벽 역할을 하는 아모(armor) 재료는 플라즈마와 양립성이 우수하고 침식저항성이 우수한 성질을 요구한다. ITER에서 제1벽으로 사용되는 아모 재료의 약 80%는 베릴륨(Be)이 사용되는데, 이는 베릴륨이 플라즈마 오염을 적게 시키고 방사화능 감소가 적을 뿐만 아니라 산소를 함유하는 능력이 우수하고 다른 아모재료와 비교하여 화학적 스퍼트링(chemical sputtering)이

발생하지 않기 때문이다. 베릴륨 아모 재료에 대한 평가기준은 불순물 함량, 결정립 크기, 제조방법, 열-기계적 처리방법 등이며 최종적으로 ITER 제1벽의 아모 재료는 S-65C VHP(제조사: 미국의 Brush Wellman Inc.)가 선정되었고, TBM에 사용될 아모 재료로는 Be과 W 등이 고려되고 있다.

불랑켓 제작 기술

핵융합로의 불랑켓은 서로 다른 기능을 수행해야 하는 재료들이 접합을 통하여 최종 부품으로 제조되어야 하며 따라서 동종 또는 이종재료의 접합기술이 불랑켓 제조의 핵심기술로 고려되고 있다. 이러한 총상구조물의 제조에 있어서 확산접합의 일종인 Hot Isostatic Pressing(HIP)이 운전과정에서 예상되는 고중성자 및 고응력상태에서 충분한 기계적 건전성을 실현할 수 있는 유망한 방법으로 고려되고 있다. 다른 상용 접합방법과 비교하여 HIP은 접합전후 공작물의 치수변화가 적고 복잡한 형상의 접합에 유용한 것으로 보고되고 있다.

ITER 제1벽의 제조를 위한 접합방법들에 대한 연구들이 진행되어 왔으나, 아직까지 최적의 접합조건은 더 연구개발이 필요한 실정이다. 제1벽의 아모 재료로 이용되는 베릴륨은 열저거층으로 사용되는 구리(Cu)합금에 잘 접합되어야 하기 때문에 구리합금

과 접합성이 가장 중요한 문제이다. 접합에 있어서 가장 큰 문제점은 베릴륨이 대부분의 다른 합금과 적당한 온도나 고온에서 반응한다는 것이다. 이와 같은 문제를 해결하고 베릴륨/구리 접합부의 우수한 특성을 제공하기 위하여 다양한 방법들이 연구되고 있으며 베릴륨과 금속간 화합물을 형성하지 않는 원소 또는 합금(Al, Ge, Si, AlSi, or AlBeMet)을 베릴륨과 구리 합금 사이에 중간층으로 채우는 방법이 가장 유망한 방법으로 평가되고 있다. 이 경우는 접합온도가 전반적으로 채워지는 재료들의 용융점과 같거나 낮아야 한다. 금속간 화합물의 형성보다 낮은 친화력을 갖는 방어재료의 확산을 이용하며 다양한 형태의 중간층(Ti, Cr, Ti/Ni, Al/Ni, Ti/Cu, Al/Ti/Cu, Cr/Cu)이 연구되어 왔다.

TBM의 경우도 기본적인 디자인들은 거의 선정이 끝난 상태이고, 현재는 그 유효성 및 제조기술에 중점을 두고 연구가 진행 중이다. TBM은 크게 일차벽, 냉각/보강판, 증식장치, 외벽, 후벽 등으로 구성 되고, 이들 부품의 일부는 삽입되어 있는 냉각채널에 의해서 냉각된다. 이 냉각시스템은 복잡한 조직과 작은 채널치수 때문에 제조의 어려움을 겪고 있고, 이 부품들을 일체형의 TBM으로 제조하기 위한 접합기술이 필요하다. 이 때문에 많은 연구자들이 적절하고 유효한 공

정을 선정하기 위해 여러 가지 제조공정의 연구를 진행하고 있다. 이와 같이 복잡한 구조를 가지고 있는 TBM을 성공적으로 제조하기 위한 접합방법으로는 확산접합법이 가장 유망한 것으로 제안되었고, 그 중에서도 HIP 방법이 가장 기대되는 접합법 중의 하나로 주목되었다. 이 방법은 용접 대상의 표면에 작용하는 압력 분배를 일정하게 할 수 있고, 비교적 넓은 면적의 접합과 복잡한 형상을 하고 있는 복수의 부재를 한번에 접합할 수 있는 특징이 있다.

현재 TBM 연구를 수행하고 있는 각국에서는 접합부의 우수한 기계적 특성을 얻기 위한 적절한 HIP 접합기술(표면처리, 압력, 온도, 유지시간, getter material 등)과 HIP 처리후 열처리공정 등 최적화된 접합조건을 도출하기 위한 연구가 진행 중에 있다.

TBM 제작에 있어서 양호한 상태의 접합을 위해서 고려해야 할 몇 가지 중요한 점이 있다. 첫 번째는 재료의 표면처리이다. 모재의 과도한 입자성장이 없이는 완전한 결합이 어렵고, 표면 불순물이 결정입계의 이동을 방해하기 때문에 접합하고자 하는 재료의 표면처리가 아주 중요하게 된다. 그리고 Si, Al, Ca를 포함하는 산화물의 제어도 또한 중요하다. 예를 들어, 모재에 함유되어 있는 탄화물 입자의 경우 균열의 시작점으로 작용하여 균열의 발생을 용이하게 하므로 재료의 기계적 특성

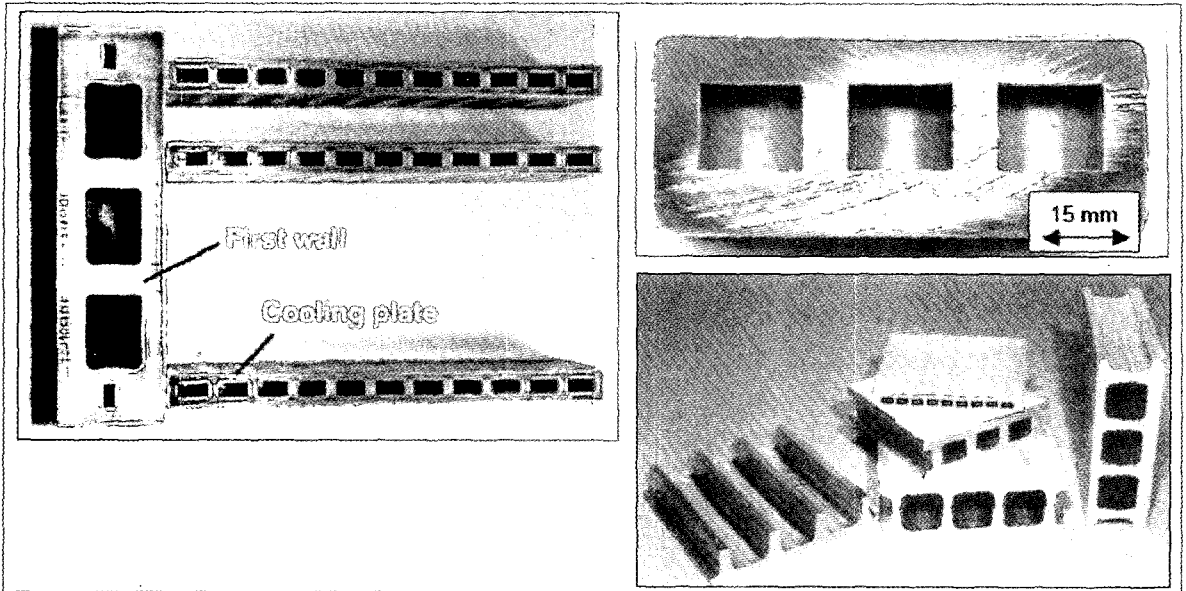


그림 2 HIP 공정에 의하여 제작된 블랑켓 부품

에 악영향을 줄 수 있기 때문이다.

TBM의 일차벽 및 구조재의 제작기술은 일반적으로 다음과 같은 7가지 공정에 의해서 이루어지고, 이 공정은 여러 가지 제조기술에 따라 조금씩 순서가 바뀌거나 변형된 공정이 첨가될 수 있다.

1. Annealing process : 구조재료의 가공성 향상과 잔류응력제거
2. Machining process : 주로 dry milling을 이용한 groove 형태의 가공 및 rib가공 등
3. Cleaning process : 고순도 용매를 이용한 표면 불순물 세척
4. HIP joining process : 적절한 온도, 압력, 시간의 조절에 의한 1단계 및 2단계

공정 등 다양한 기술 개발

5. Tempering and normalizing process : 인성 부여 및 재료의 기계적 특성을 향상
6. Bending process : U형의 일차벽 제조를 위해 냉각채널에 여러가지 보강재를 충전하여 가공
7. Welding process : 일차벽 box 안에 냉각 / 보강판을 용접(TIG 및 전자빔 용접법 사용)

핵융합로 블랑켓의 제조에 있어서 중요한 과제는 개발하고자 하는 블랑켓의 개념에 맞는 재료의 개발과 재료간의 접합기술을 이용한 일체화 제조기술의 확립을 들 수 있다. 블랑켓은 크게 구조재, 삼중수소 증식재 및 중성자

증배재, 냉각재로 구성되어 있으며, 그 각각의 특성과 블랑켓의 개념에 만족하는 여러 가지 재료의 개발과 특성연구가 활발히 진행되고 있다. 재료간 접합기술의 경우 현재 확실하게 정립된 기술이 없으며, HIP, TIG 용접, 전자빔용접, 레이저 용접 공정이 주로 사용되고 있다. 따라서 블랑켓 접합부의 조사에 따른 특성평가 및 부식평가에 따른 전반적인 평가 자료의 확보는 요구 성능을 만족하는 블랑켓의 제작에 필수적이다. 최근에는 접합에 의해 약화된 기계적 특성을 향상시키기 위해서, 접합 후 열처리 공정에 대한 연구가 진행되고 있다. 향후 현재 사용하고 있는 HIP 접합기술의 체계적인 확립 및 새로운 접합기술의 개발 또한 필요한 실정이다.