

핵융합로 블랑켓 재료개발 및 활용기술

윤 합 기 · 동의대학교 기계공학과, 교수
이 상 필 · 동의대학교 기계공학과, 조교수

_e-mail : hkyoon@deu.ac.kr
_e-mail : spltee78@deu.ac.kr

이 글에서는 차세대 핵융합로 블랑켓의 구조재료로 사용하기 위한 고온강도, 연성, 열변형, 저방사화, 중성자 조사성의 특성 등의 요구조건을 만족하는 재료개발 현황과 활용기술을 소개하고자 한다.

과연 꿈의 에너지시대는 올 것인가? 즉, 차세대 핵융합에너지 시대는 올 것인가 하는 의문은 누구나 한 번쯤 가져본다.

핵융합 발전은 원료로 사용되는 삼중수소는 물 속에 존재하고 있는 중수소나 삼중수소를 이용하므로 지구상에 존재하는 물의 양을 감안한다면 거의 무한정으로 사용할 수 있는 에너지원이다. 예를 들어 1g의 중수소와 삼중수소를 융합하여 얻은 열량이 10,000리터의 증유를 태운 것과 같은 엄청난 효율을 가지고 있는 발전 시스템이다. 이러한 핵융합로의 실용화를 위한 연구는 실험실 연구 차원을 벗어나 핵융합

기술의 최종 실험장치인 국제핵융합 기구(ITER)를 건설하기 위해서 현재 7개국이 참여하고 있다. 여기에는 많은 복합적인 기술이 필요하겠지만, 특히 핵융합로의 블랑켓 구조의 설계기술과 재료 개발은 매우 중요한 기술로 생각된다. 이들 재료의 개발과 실용화를 하기 위한 연구가 현재 진행 중에 있으며, 그 후보재료로는 1) Fe-Cr-W계 철강재료(저방사화페라이트강), 2) 산화물 분산 강화페라이트강(ODS강), 3) V-Cr-Ti계합금(바나듐합금), 4) SiC계 세라믹스 복합재료(SiC_f/SiC복합재료) 등이 있다. 고효율 에너지의 생산과 변환시

스템에 필요한 핵융합로의 첨단 블랑켓을 구성하는 냉각채널, 다이버터(divertor) 및 제1벽에 적용할 첨단 고성능재료의 개발을 위하여 상기 재료들이 거론되고 있다.

특히 세라믹스 중에서도 탄화규소(SiC) 재료는 우수한 고온강도, 치수안정성 및 중성자 조사에 대한 낮은 유도 방사능을 가지고 있기 때문에 헬륨을 냉각매체로 이용하는 핵융합로의 구조용 재료로서 기대되고 있다. 탄화규소는 우수한 특성 때문에 크게 주목받게 되었으나 세라믹스 특유의 낮은 인성으로 인해 초고온 구조재료로서의 사용에 제약을 받고 있다.

이러한 단점을 해결하기 위해

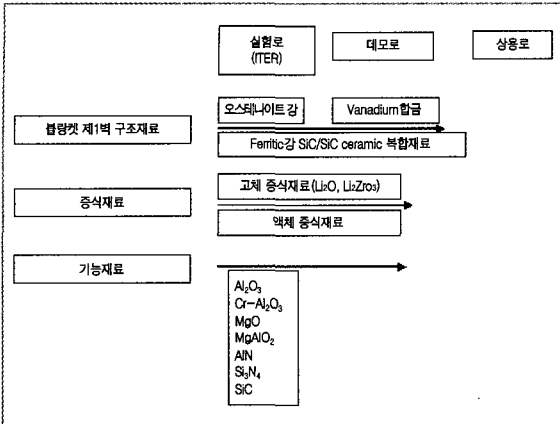


그림 1 로의 개발단계와 후보 및 기대되는 재료

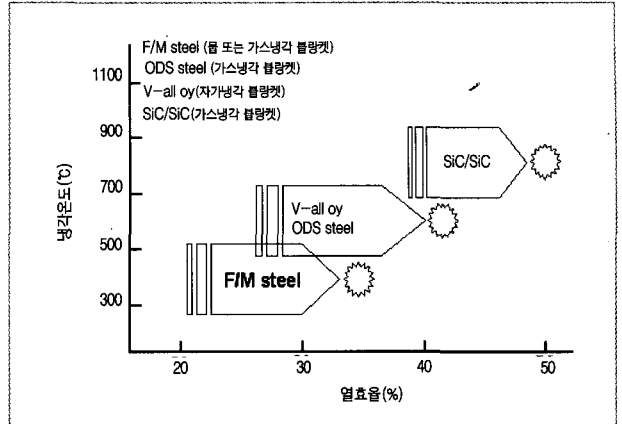


그림 2 핵융합로의 재료개발 목표

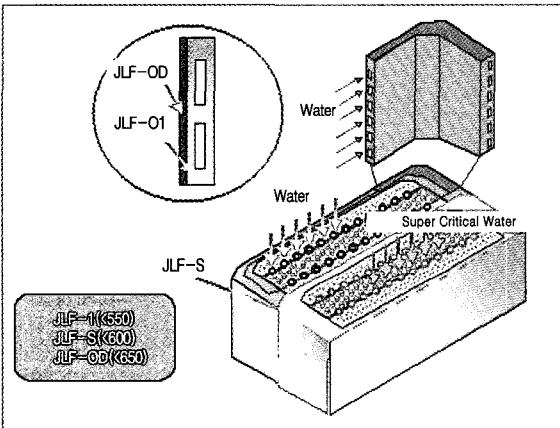


그림 3 저방사화 철강재료를 이용한 블랑켓

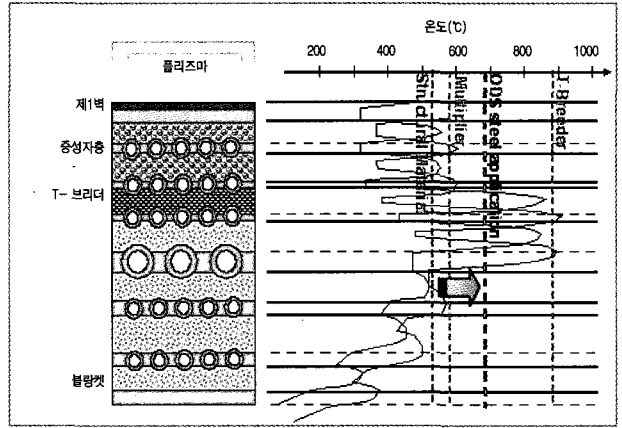


그림 4 사용온도와 블랑켓 구조의 관계

SiC섬유를 이용한 섬유강화 SiC 기지(SiC_f/SiC) 복합재료의 개발에 주력하고 있다. SiC_f/SiC 복합재료의 개발 분야는 SiC섬유의 개발 분야와 SiC기지재를 형성하는 프로세스 분야로 크게 구분되어 진행되고 있다.

이러한 핵융합로 블랑켓과 제1벽(first-wall)의 구조용 재료로 추천되고 있는 재료의 종류를 그림 1에 표시하였으며, 각 사용온도와 효율적 측면에서 재료의 성

능은 그림 2에 나타내었다.

블랑켓구조용 재료의 활용 분야

그림 3은 저방사화 페라이트강이 사용할 수 있는 블랑켓 구조의 사용 예이다. 그림에서 알 수 있듯이 수 냉각부의 요소 재료로 Fe-Cr-W계의 저방사화 페라이트강(JLF, F82H 시리즈) 등이 대상으로 연구되고 있다. 이들 소

재는 Cr-Mo내열강을 기본으로 핵융합로 구조용 수냉각 제1벽에 사용하기 위하여 기계적 성질 및 저방사화 등을 고려하여 합금설계된 재료이다. 그림 4는 이들 소재의 사용온도와 블랑켓 구조의 관계를 나타낸 그림이다. 그림에서 보면 사용온도에 따라 개발해야 할 재료의 종류가 다를 수 있다. 특히 산화물 분산강화 페라이트강(ODS)은 600℃ 이상에서 사용하기 위해서 개발되고 있다. 한 예로, EUROFER

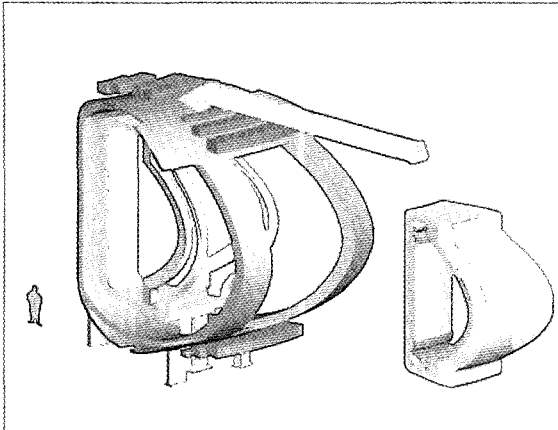


그림 5 불량켓 구조

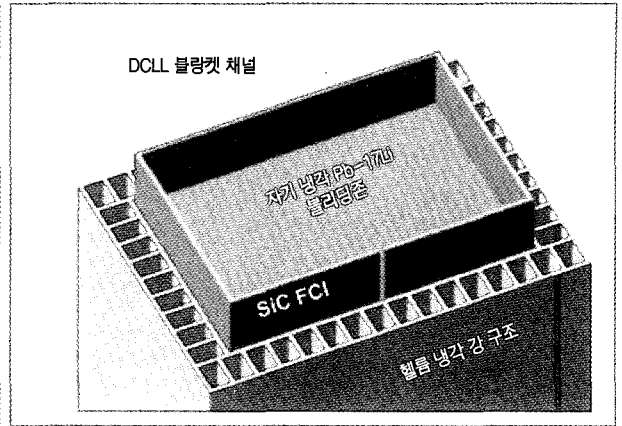


그림 6 DCLL 불량켓 채널

표 1 대표적인 SiC섬유의 특성

	Nicalon™			Tyranno™				Sylamic™
	NL-201	HI-NL	Type-S	TE	ZE	SA	SA-B	-
C/Si	1.34	1.39	1.05	1.37	1.48	1.08	1.08	1.0
불순물 (mass %)	10.1% O	0.5% O	0.2% O	10.2% O 2%	1.7% O 1% Zr	<0.3% O <2% Al	<0.3% O <2% Al	-
인장강도 (Gpa)	2.9	2.8	2.6	3.3	3.5	2.8	2.8	3.2
탄성계수 (Gpa)	205	270	420	190	230	420	280+	380
연신율 (%)	1.4	1.0	0.6	1.8	1.5	0.7	1.0+	-
밀도 (mg/m³)	2.55	2.74	3.10	2.48	2.55	3.02	3.02	3.0-3.1
결정크기 (nm)	<2	2-10	50	2	2	>200	50-200	-
열전도율 (W/m-K)	1.45	7.9	18.4	1.35	3.78	65	50+	40-46

97이라 불리는 9%CrWTa 기초로 한 것과 Y₂O₃을 소량 함유한 것 등이 개발되고 있으며, 최근 일본에서는 Al과 Cr 양을 조절한 ODS강들이 개발되고 있다. 그러나 아직 국내에서는 이러한 재료들의 합금 설계한 재료들이 개발되지 않고 있는 실정이다.

그림 5와 6은 SiC_f/SiC복합재료를 사용하기 위한 불량켓 제1벽과 헬륨 냉각용 고온증식의

이중냉각 리튬(DCLL) 불량켓 채널의 구성 예를 나타낸 것이다. 이 경우 SiC_f/SiC복합재료의 활용 범위가 많을 것으로 기대된다.

SiC_f/SiC복합재료의 개발 동향

먼저 SiC섬유의 개발 분야를 살펴보면 고온강도와 결정성을

개선하기 위해 많은 노력을 기울이고 있으며 SiC_f/SiC복합재료의 개발에는 크게 세 가지의 종류로 구별되고 있다. Nicalon 계열의 SiC섬유들은 일본의 니혼카본 회사를 중심으로 많은 상품이 나와 있으며 기계적 특성들도 점차적으로 개선되고 있으나 1,000°C 이상의 온도에서 강도 저하 현상이 급격히 나타나고 있다. Tyranno계열의 SiC섬유는

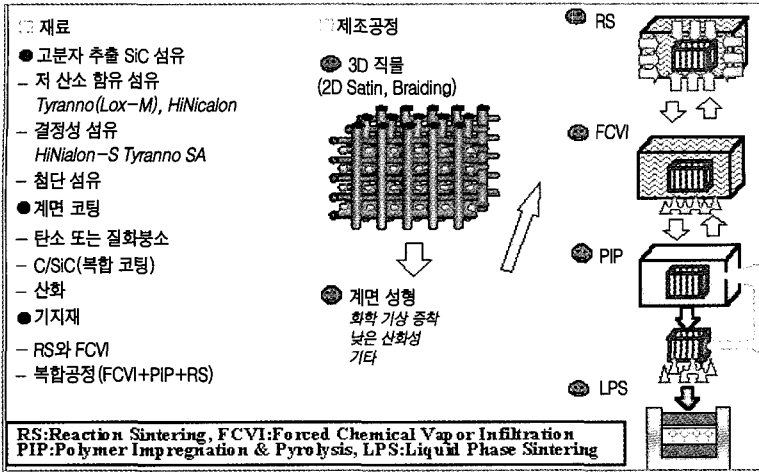


그림 7 SiCf/SiC복합재료의 제조방법

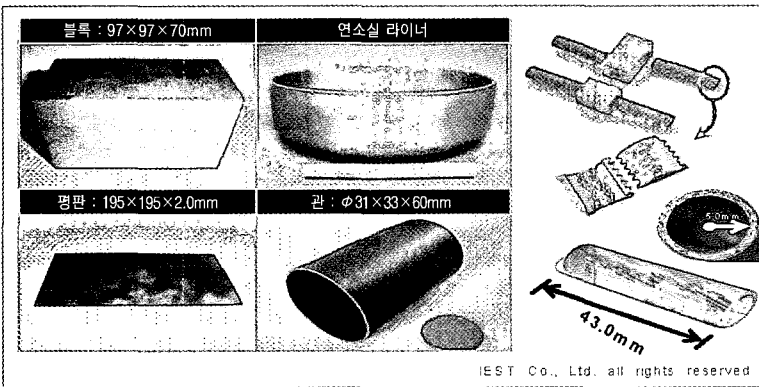


그림 8 SiCf/SiC복합재료의 부품 사례

일본의 우베산업에서 주로 제조되고 있으며 최근에는 산소의 함량이 적고 화학적으로 SiC에 가깝게 만들어진 Tyranno SA SiC섬유를 출시하여 Hi-Nicalon SiC섬유를 대체할 수 있는 다용도 첨단 섬유로 기대되고 있다. 특히, Tyranno SA SiC섬유는 1,800℃의 온도에서도 상온강도를 보유함으로써 SiCf/SiC복합재료의 개발을 가

속화할 것으로 생각된다. Sylramic SiC섬유는 미국의 다우코닝(Dow-corning)사에서 개발되어 공급되고 있으며 제조공정은 Tyranno SA SiC섬유의 성형법과 유사하지만 Si의 함유량이 높은 비결정성 SiC로서 Tyranno SA와 Hi-Nicalon type S SiC섬유에 비해 결정성이 다소 떨어지는 것으로 알려지고 있다. 이와 같이 대표적인 섬유의 특성은 표 1과 같다.

SiCf/SiC복합재료의 제조 방법

결정성 SiC섬유의 고온 안정성이 고성능화됨에 따라 SiCf/SiC복합재료의 성형 프로세스도 다양화되고 있으며, 비교적 낮은 온도에서 수행되는 전통적인 화학기상 침투법(chemical vapor infiltration) 혹은 폴리머함침소성법(Polymer impregnation and pyrolysis)과 반응소결을 이용한 용융함침법(melt infiltration)과 액상소결법(Liquid phase sintering) 등이 있다. 비교적 낮은 온도에서 수행되는 전통적인 화학기상 침투법(chemical vapor infiltration) 혹은 폴리머함침소성법(polymer impregnation and pyrolysis)에서 반응소결을 이용한 용융 함침법(melt infiltration)과 액상 소결법(liquid phase sintering)으로 전환되고 있다. SiCf/SiC복합재료에 관한 연구는 대학 및 연구소의 연구실 수준의 기초 연구 결과를 취합하고 있을 뿐만 아니라 대형 프로젝트를 고성능 강화 섬유 개발, SiC기지재의 제조 및 특성 제어, 섬유-기지재 계면의 제어, 강화 섬유의 배향 및 배열의 고도화 등을 수행하여 제조 프로세스 개발, 기계적 및 물리적 특성을 중심으로 진행되고 있다. 또한 미시구조 해석, 중성자 조사효과 및 환경 인자의 영향 등을 조사하는

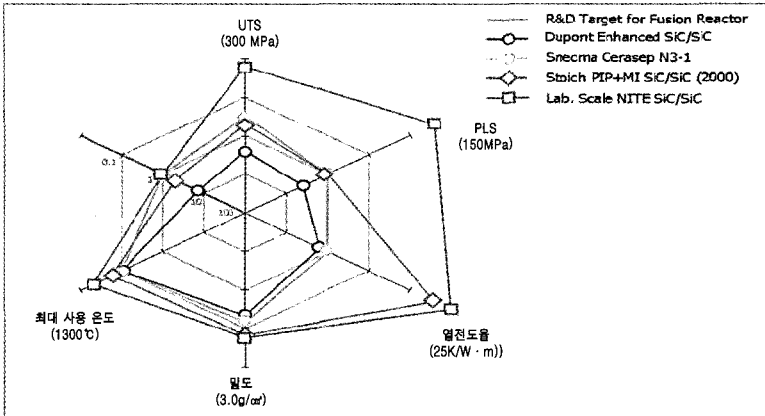


그림 9 개발 현황과 활용 방안

평가 분야, 접합기술과 성형기술 등을 개발하면서 최종적으로는 핵융합로의 핵심부품으로 실용화하는 분야로 구분되어 연구되고 있다. 국내에서는 SiCf/SiC복합재료에 대한 연구가 본 연구실을 비롯하여 다소 진행되고 있지만 아직 제조 프로세스의 확립이 불충분하여 본격적인 실용화를 검토하기에는 미성숙한 단계에 있는 것으로 생각된다. 국외에서는 SiC섬유의 개발이 활발히 진행되고 있는 일본에서 SiCf/SiC복합재료의 개발에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있는 실정이다. CVI 법은 현재 미국의 ORNL과 일본의 NRIM가 선두 주자로서 약 ϕ 100mm 정도의 소형 구조물을 제조할 수 있는 기술을 갖추고 있으나, PIP 공법과 함께 재료의 성형과정에서 나타나는 낮은 밀도가 실용화를 크게 제한

하고 있다. 반응 소결법은 CVI법 및 PIP법에 비해 비용이 저렴하고 밀도, 열전달률 및 정밀 정형 가공의 측면에서 보다 전망 있는 제조법으로 고려되지만 미세조직에 존재하는 잔류실리콘의 억제 및 SiC섬유의 보호방법이 중요한 과제로 대두되고 있다. 이에 반하여, 액상 소결법은 기지재 영역에 높은 밀도와 우수한 결정성의 확보에 유리하며 성형온도가 고상 소결에 비해 낮다는 장점을 보유하고 있지만 액상소결과정에서 사용되는 첨가물의 함량 및 종류에 크게 영향을 받는다.

SiCf/SiC복합재료의 부품개발 사례

최근에는 일본의 에네텍(IEST Co. Ltd)에서 나노 사이즈의

SiC 분말을 이용한 액상소결법을 활용하여 튜브나 판재 형태의 SiCf/SiC복합재료 부품을 개발하는 것으로 알려지고 있다. SiCf/SiC복합재료에 대한 연구를 체계적으로 진행하기 위해서는 기계 및 재료 분야의 역할이 강조되며 첨단 에너지산업 및 우주항공산업에 대한 기반기술 및 국제 경쟁력을 구축할 수 있을 것으로 생각된다.

맺음말

이 글에서 소개한 소재들은 ITER를 중심으로 한 소재개발 현황과 구조재료로 활용하기 위한 기술을 중심으로 소개하였다. 결론적으로 F/M강과 V합금, SiCf/SiC복합재료의 개발현황과 활용 방안 등을 요약하면 그림 9와 같다. 여기서 이들 분야의 연구 진행 사항을 살펴보면 각 소재들의 특성과 고온물성 및 경제성 등을 예측할 수 있다. 그러나 아직 국내에서는 이러한 연구들이 산학연의 연계프로그램으로 구축되어 있지 않은 실정으므로 차세대 핵융합로의 건설을 위해서 이러한 재료개발과 활용기술에 독자들의 많은 관심을 기대한다. 서두에 전제한 꿈의 에너지시대 즉 차세대 핵융합에너지시대를 기대하면서 이 글을 맺는다.