

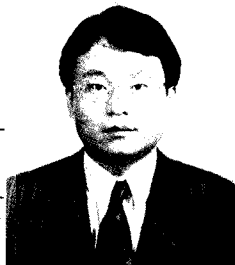
경사기능재료의 해외 연구 동향



김 해 두

(KIMM 재료기술연구부)

- '72-'79 연세대학교 요업공학과(학사)
- '79-'80 영국 Sheffield대학 요업공학과(석사)
- '81-'83 연세대학교 대학원(박사과정 이수)
- '83-'87 독일 Aachen 공대 요업공학과(박사)
- '84-'86 독일 Aachen 공대 요업공학과 연구조교
- '86-'88 독일 Aachen 공대 요업공학과 연구원
- '88-현재 한국기계연구원 책임연구원



이 병택

(KIMM 재료기술연구부)

- '82-'86 충남대학교 재료공학과(학사)
- '86-'88 충남대학교 금속공학과(석사)
- '89-'93 일본 동북대학 재료공학과(박사)
- '87-'89 산업과학기술연구소(연구원)
- '93-'95 일본 동북대학 금속재료연구소(문부교관)
- '95-현재 한국기계연구원 선임연구원

1. 서 론

사무라이 칼은 일본의 정신과 혼이 용용되어 있는 가장 일본적인 것이라고 알려져있다. 사무라이 칼은 탄소양이 각각 다른 steel layer를 여러겹 쌓고 단조 공정을 통해 제조되어 왔으며, 이 사무라이칼은 대표적인 FGM의 하나일 것이다. 또한 이종 재료(예 : 금속-세라믹 복합체)에 있어서 가장 큰 문제점은 소결공정을 통해 발생하는 열응력 및 실제 사용시 발생할 수 있는 열응력을 어떻게 극복하느냐 하는 점이다.

일본 항공 우주 연구소에서 차세대 항공기에 필요한 초내열 재료를 개발코자 하였을때 경사기능재료 개념이 대두되었다. 1985년에 3mmφ의 시험편을 제조하여 기초연구를 수행한후 1987년부터 경사기능재료 연구가 일본정부의 지원으로 시작되었다(FGM Part I). 경사기능재료에 대한 개념이 알려지자 전세계적으로 연구가 확산되었으며, 1989년 독일 항공우주연구소의 Prof. Bunk 초청에 의해 일·독 Joint Seminar가 독일에서 개최되었으며 1990년에 일본 Sendai에서 제1회 국제 FGM 심포지움이 열리게 되었다. 제1회 심포지움은 전세계적으로 400여명이 참가해 대단한 관심을 보였으며, FGM 연구가 국제적으로 중요한 연구분야임을 증명하였다.

일본의 FGM 연구(Part I)는 5년간 계속되어 1991년말에 끝났으며 많은 연구결과를 생산하였다. Part I의 중요 핵심은 급격한 온도 차이에 견디는 FGM 재료를 개발하는 것이었으며, 금속과 세라믹의 조성을 조정하여 양쪽의 장점을 극대화하는 방향으로 연구가 진행되었다. 고온 부위는 세라믹이 견디고 기계적 특성을 금속이 보완하는 경

사적 구조를 갖게 디자인 되었으나, 실제 응용 측면에서는 제한적이었다.

동일한 개념을 열적인 측면 뿐만아니라 전기적, 광학적, 화학적 등 광범위하게 사용하고자 1992년 조사 사업을 한후 1993년 부터 FGM 연구 Part II를 시작하였다. FGM Part II는 "Development of Energy Conversion Materials through Formation of Gradient Structures"라는 제목이며, Part I 이 구조 재료측면이 강조된 반면 Part II는 기능측면이 강조되어 Part II가 종료될 경우 광범위한 응용이 기대되고 있다.

1992년에 2차 FGM 심포지움이 미국 San Francisco에서 개최되었으며 일본, 독일, 미국의 FGM 연구 협조체계가 구축되었다. 1994년에 Swiss Lausanne에서 3차 FGM 심포지움이 개최되었으며, 구조 뿐만아니라 기능분야에 대한 응용연구도 발표되기 시작하였다.

1994년에는 미국에서 미국내 FGM 연구발표회가 MIT와 ORNL 주관으로 MIT에서 개최되었으며, 현재 각종 국제 학술대회에 FGM Session이 별도로 설정되어 있는 정도로 고유한 연구분야로 자리 잡고 있다.

본 조사 연구 사업에서는 FGM 연구가 세계적으로 진행이 되고 있으나 국내에서는 체계적으로 이루어지지 않고 있는바 세계각국의 연구동향 및 현재까지의 연구결과를 조사 분석함으로써 향후 응용 가능성이 높은 FGM 연구의 국내 시작에 기여하고자 한다.

2. 현 황

2.1 일본 FGM 연구

2.1.1 일본 1단계 국책 FGM 연구(1987-1991)

일본내에서 FGM 연구의 시작은 1980년대 초반 일본항공우주연구소 Dr. Niino, 동북대 Prof. Watanabe, Prof. Hirai, 동북 공업기술원 Dr. Ikeuchi 등에 의해 구성된 연구 team에 의해 처음으로 제안되었다. 재료의 응용시 고온특성과 파괴인성은 어느

단일 재료로는 만족되지 않는다는데 착안하여 고온특성이 우수한 세라믹과 파괴인성이 우수한 금속을 혼합하여야 하며, 이때에 제조시 혹은 사용시 발생 가능한 열적 응력을 보상 혹은 완화하기 위해 조성과 구조를 경사지게 조작할 것이 제안되었다. 이 연구 team은 그동안 조사되었던 것들을 종합하여 일본과기청에 연구비를 신청하여 1986년부터 연구를 시작하게 되었다.

연구의 최종목표는 2000K에서 건디며 1000K의 온도 구배를 견딜수 있는 고온재료 개발이었다. 초기에는 17개 연구 team이 시작하였으며 3년 후에는 30개 연구팀이 참여하였다. Prof. Koizumi가 steering committee 위원장을 맡았으며 재료 design, 제조, 평가 그룹간의 원활한 의사 교환이 될수 있도록 구성되어졌다(그림 2-1). Design 그룹에서는 thermo-mechanical 이론, 열응력의 modelling, computer design system 개발 등을 주로 수행하였으며, 제조 그룹에서는 CVD, PVD, PM, Plasma spray, SHS 등의 방법을 이용하여 경사기능재료 제조에 역점을 두었다. 평가 team에서는 이 재료의 thermo-mechanical 특성을 평가하기 위해 독창적인 방법등을 고안하였다(표 2-1).

과기청 연구비는 5년간 12.15억 \yen 이었다(표 2-2).

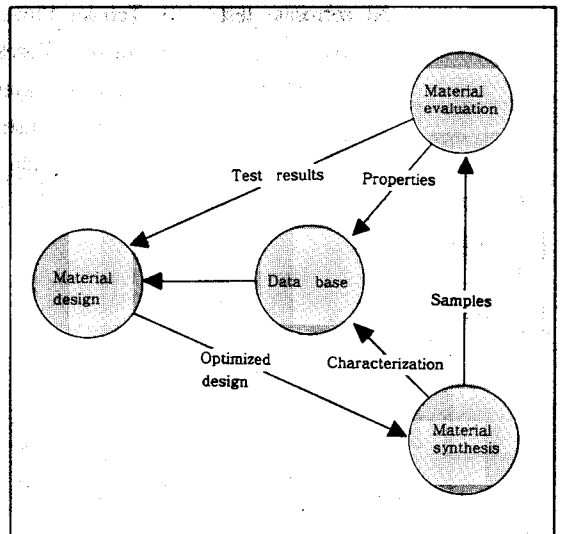


그림 2-1 Information flow of the research project

표 2.1 Research topics and institutions in the project

Research topic	Institution
DESIGN and MODELING 1) Theoretical analysis of mechanical and thermal properties 2) Modeling of thermal stress and relaxation 3) Structure and system design	Tokyo Institute of Technology Shizuoka University National Mechanical Engineering Laboratory National Aerospace Laboratory Power Reactor and Nuclear Fuel Dev. Corp. Daikin Industries, Ltd. Nissan Motor Ltd.
PROCESSING 1) CVD, PVD 2) Powder metallurgy 3) Plasma spray 4) SHS	Tohoku University Sumitomo Electric Industries, Ltd. Nippon Oil Company, Ltd. National Research Institute for Metals Tohoku University NKK Ltd. Ishikawajima-Harima Heavy Industries Ltd. National Research Institute for Metals Nippon Steel Corp. Government Industrial Research Inst., Sendai Osaka University Kawasaki Heavy Industries, Ltd.
EVALUATION 1) Erosion and corrosion test 2) Thermal stability 3) Non-destructive evaluation 4) Thermal shock and fatigue test 5) Simulation test under actual conditions	Tohoku University National Research Institute for Metals Tohoku University Hitachi Construction Machinery Ltd. National Ship Research Institute. National Aerospace Laboratory Mitsubishi Heavy Industries Ltd. National Aerospace Laboratory

표 2.2 Project budget

Fiscal year	1987	1988	1989	1990	1991	Total
Budget(Million yen)	257	308	199	270	181	1,215

Design 그룹에서는 경사구조에 대한 micro thermo-mechanics 분야를 확립하였고 Expert system과 FEM 등이 경사기능재료를 design하기 위해

사용되었다.

CVD법과 가압소결법을 이용하여 30cm 크기로 된 정사각형 형태의 SiC/TiC/SiC FR-C system이 제조되었으며 SiC/C를 coating한 50cm diameter conical 모양의 C/C 복합재료가 CVD와 CVI 법을 겸용하여 제조되었으며 이 복합재료는 2000K에서 뜨거운 gas가 마하 3의 속도로 흐르는 분위기에

서도 견딜수 있었다.

10cm 크기의 사각 ZrO₂/SUS 304 판넬이 plasma spraying 법으로 제조되었으며, 비슷한 크기의 ZrO₂/Ni 판넬이나 10cmφ의 ZrO₂/SUS 실린더가 hot press나 HIP 방법으로 제조되었다. TiB₂/Cu, TiC/Ni, MoSi₂/SiC/TiAl 등의 디스크 등은 SHS 방법으로 제조되었다.

High power Xe lamp로 장착된 고온 피로 시험기가 설치되어 30cmφ, 수 mm 두께의 시편을 표면온도 2000K, 온도차 1000K의 조건으로 시험할 수 있었으며, 대체로 경사 기능 재료가 비경사 기능 재료와 비교하여 내열특성이 우수하였다.

1차 FGM 연구 동안 60개 회사, 70여 개인 등이 consortium을 형성하였고, 매년 workshop 2회, symposium 1회 등을 행하였으며, 신속한 정보는 News Letter 발간에 의해 가능하였다. 또한 국제학술대회를 2회에 걸쳐 개최하였으며, 전체적으로 볼때 성공적으로 수행되었다고 평가되었으며, 1년간의 조사사업후 2차 FGM 연구로 연결되었다.

여러 FGM 제조 방법중에서 powder metallurgy (PM)법에 의한 FGM 제조는 조성, 미세조직, 전체 기물의 외형을 자유로이 제어하기 용이하다는 점에서 일본 동북대(Prof. Watanabe 그룹)에서 일찌기 시작하였다. PM법으로 FGM을 제조할 경우 제조시 혹은 사용시 발생할 수 있는 열응력을 극복할 수 있는 재료 선택 및 조성 profile을 우선적으로 선정하여야 하며 선정된 재료를 적층 혹은 충전한후 가압 혹은 상압 소결을 통해 제조한다. 이상과 같은 일반적 방법 이외에도 각 재료를 slurry로 제조하여 조성 profile에 맞게 혼합한 후 spray deposition하여 제조할 수도 있으며 slurry를 slip casting하는 방법으로 조성 profile에 맞게 적층하는 방법도 알려져 있다. 적층된 시편은 CIP로 치밀한 성형체를 얻은후 HIP로 가압소결하여 조직을 더욱 미세하게 제어할 수도 있다(그림 2-2).

소결온도가 다른 재료를 동시에 소결하는데 수반되는 문제점을 극복하기 위해 differential temperature sintering 방법도 제안되었다. 예로서 laser beam으로 시편을 조사하여 소결할 경우 시편내에 온도차를 부여할 수 있기 때문에 소결 온도가 다른

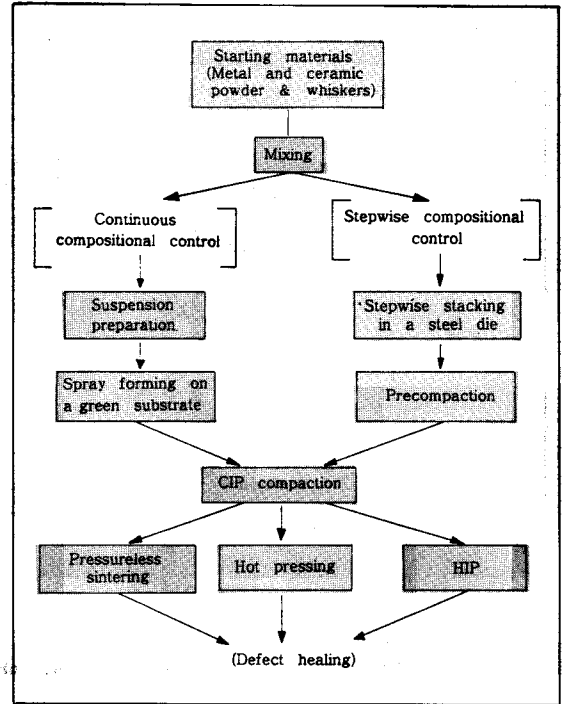


그림 2-2 Flow chart of powder metallurgical fabrication of functionally gradient materials.

이종의 복합체를 소결하는데 유리한 점이 있다. 상기와 같은 어려움을 극복하기 위해 출발분체 별로 입도를 조절하여 성형체를 제조하여 수축율이 대체적으로 일정하게 조절이 가능함을 보였다(그림 2-3). 또한 서로 다른 수축율을 보이는 이종 재료간의 FGM화는 hot press, HIP등과 같이 가압 소결을 통해 어느 정도 소결후 비틀림과 같은 문제점을 극복할 수 있다. 그러나 hot press 방법의 경우 단순 형상에만 적용이 가능하다는 단점이 있다.

성형체 제조시에 doctor blade 법으로 조성 profile에 맞게 layer를 제조후 적층할 경우 제조공정의 한계로 0.2mm 이하로 layer의 두께를 조절하기가 어려우나 Spray deposition 방법으로 적층할 경우 적층 두께를 0.1mm 이하로 조절이 가능하다.

이와 같이 적층된 성형체는 소결한 후 냉각시 조성 profile에 의한 열응력 때문에 균열이 발생할 수 있다. 따라서 이와 같은 열응력을 최소화하기

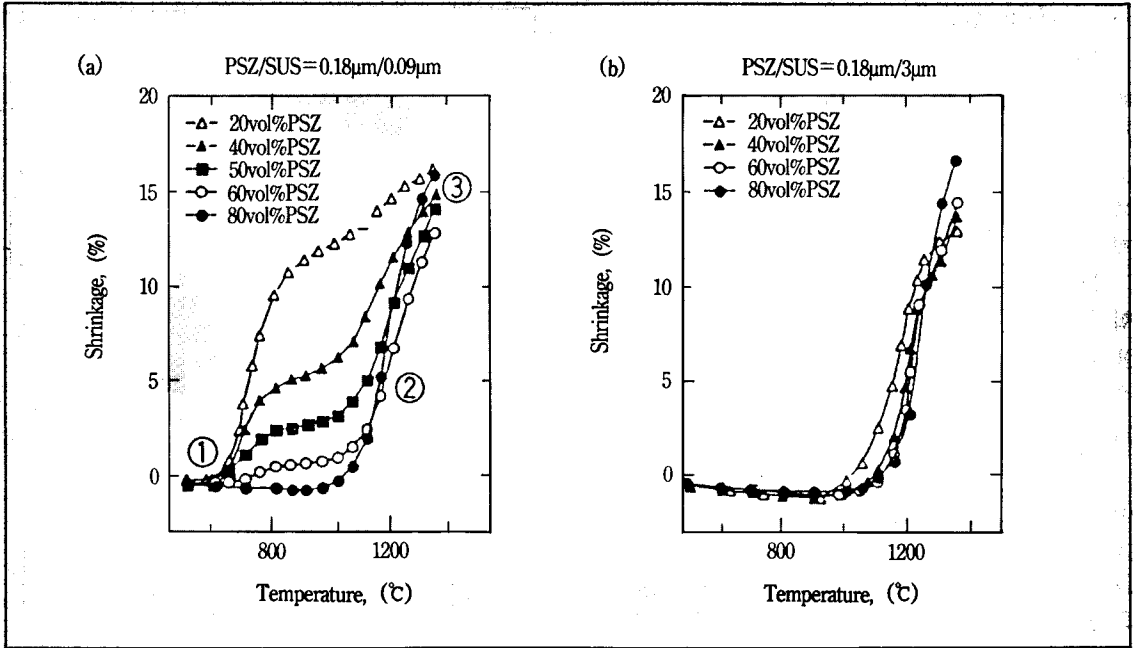


그림 2-3 Adjustment of sintering shrinkage by controlling powder particle size.
Material combination: stainless steel of 304 type and partially stabilized zirconia.

위해 유한 요소 해석법(FEM)으로 최적 조성 profile을 계산할 필요가 있다(그림 2-4). FEM 계산시에는 조성별 열팽창계수, 열전도도, 탄성율, 소성율, poison비 등이 필요하며, 잔류응력의 조합층 별 물성 계수 의존성이 계산되어야 한다. 따라서 최소 응력을 가질수 있게 각 층별 조성이 결정되어야 한다. 원판형의 경우 계산에 의하면 axial stress 보다는 radial과 circumferential stress가 큰 것으로 나타나므로 시편 표면의 radial crack 형성에 주의하여야 한다. 두꺼운 시편의 경우 axial stress가 주요하므로 측면의 crack에 주의하여야 한다.

FGM 내의 조직이 아주 미세할 경우 탄성계수나 열팽창계수는 rule of mixture 법에서 직선상으로 변하며, 열전도도나 파괴인성은 계면층에서 전이 현상을 나타낸다. 이러한 전이는 계면층에서의 미세구조의 변화와 관련되어질 수 있다.

FGM의 평가 방법중 최근 Burner Heating Test (BHT) 방법이 일본 동북대학교 Watanabe 교수 team에서 개발되었다. 종래 방법으로는 대형 장

비가 소요되는 반면 이 방법의 경우 장치가 간편하고 가격이 상대적으로 저렴하며(1,000만 ¥ 정도), 손쉽게 이용이 가능하다. BHT법은 FGM의 ceramic side를 수소, 산소 혼합 gas에 의해 버너로 가열하며 금속 side는 냉각수에 의해 냉각함으로써

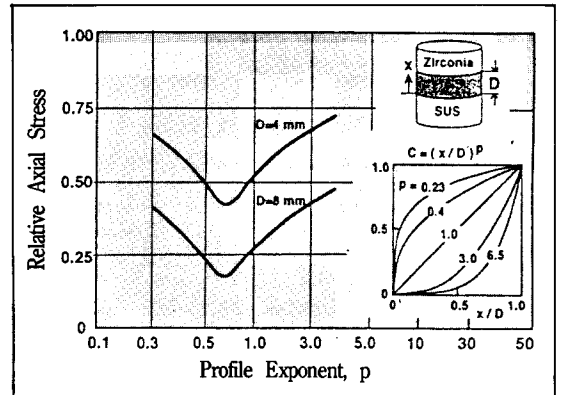


그림 2-4 Effect of composition profile of graded layers on relative maximum axial stress. The axial stress is normalized with respect to that of direct bonding.

온도차이를 발생시키며 2분동안 가열한후 발생하는 온도차를 기준으로 한다. 균열발생은 acoustic emission 센서로 모니터 한다. 내열 수치는 heat flux와 열전도도의 조성 의존성을 이용하여 평가 한다. 이 시험의 경우 대개 수직 방향의 균열이 세라믹 층 내에 발생한다. 이는 가열시 세라믹층에 큰 압축응력이 걸리며 냉각시에는 tensile stress가 발생되며 이 tensile stress에 의해 ceramic층에 수직방향의 균열이 발생한다. 균열이 최초 발생하는 온도가 이 재료의 내열특성을 결정한다. 균열이 최초 발생하는 온도는 시편의 크기, 조성 profile, 가열 조건 등에 무관한 것으로 실험결과 되었으며, 이는 내열 특성이 재료 고유 특성에만

의존하는 것 때문으로 사료된다. 고온 부위에서의 압축응력과 저온 부위에서의 인장응력이 FGM에서는 가장 중요하게 고려해야할 부분으로 사료 된다.

세라믹 층에서의 수직 균열의 발생은 이 수직 균열이 금속 층에까지 전파되지 않도록 할 수 있다면 큰 문제가 없으며 혹은 열응력 완화 측면에서는 오히려 좋은점도 있다. 따라서 세라믹 층내에서 균열 전파가 방해될 수 있도록 미세구조를 조절할 필요가 있다. 특히 metallic chopped fiber의 세라믹층내 도입이 매우 유력한 방법이다.

결론적으로 FGM 개발의 flow diagram이 그림 2-5에 나타나 있다.

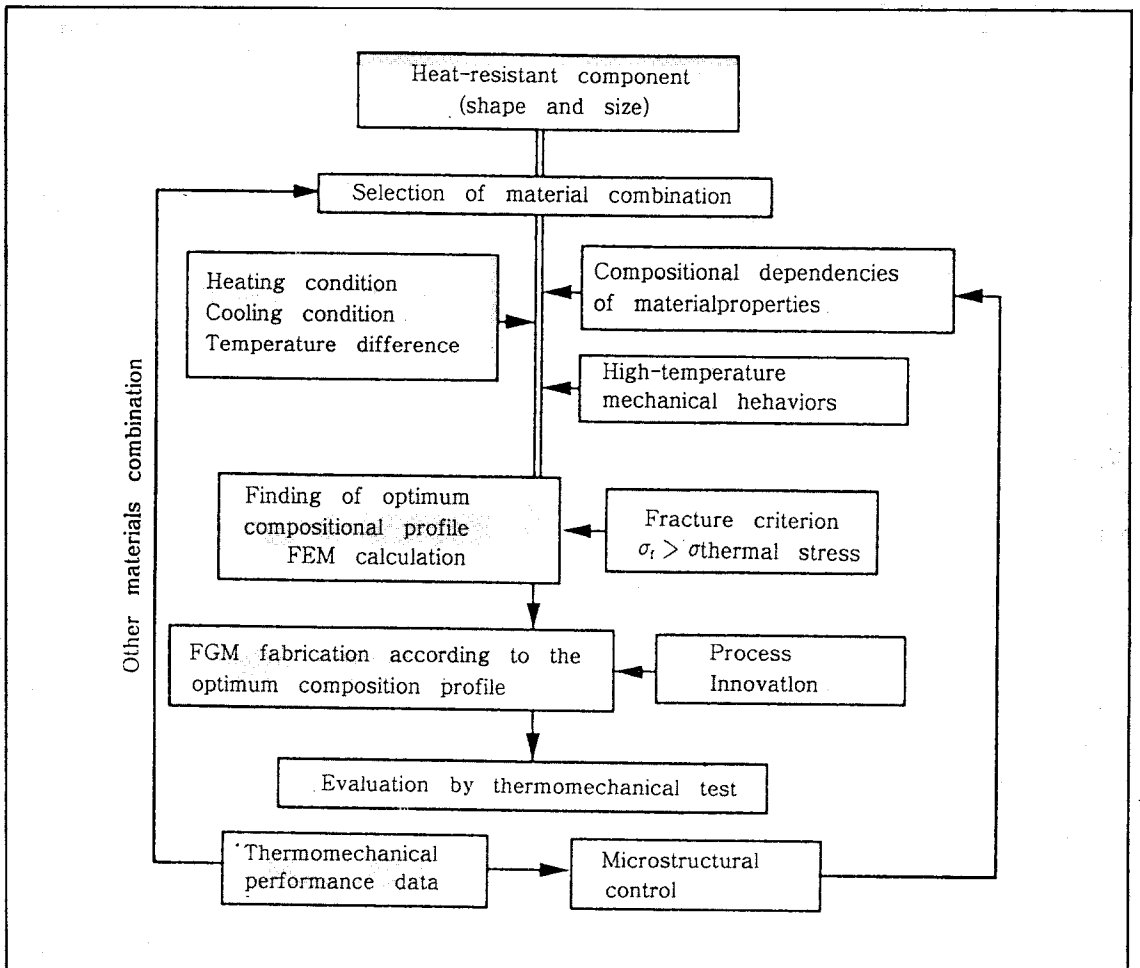


그림 2-5 Overall material development flow of P/M FGMs.

2.1.2 일본의 2단계 국책 FGM 연구(1993-1997)

초기의 FGM 연구는 조성과 구조를 경사지게 변화시켜 특성이 우수한 재료를 제조코자 하였으며, 특히 극고온 사용을 전제로 많은 연구가 제조시 혹은 운용시 열응력을 어떻게 극복할 것이냐에 주안점이 맞추어졌다. FGM 1단계 연구가 성공리에 종료된후 1년정도의 조사 사업중 열적 응용 뿐만아니라 전자, 화학, 광학, 핵, 생체 재료 등으로 광범위하게 응용이 가능함을 보여주었으며, 기존 재료의 특성을 향상할 뿐만아니라 새로운 재료의 창출도 가능할 것으로 기대되었다. 따라서 FGM 2단계 연구에서는 조성, 구조의 경사짐이 팽진, 열진, 핵진 등의 에너지 변환에 응용을 전제로 시작되었다. 따라서 2단계 연구제목은 “경사짐을 이용한 에너지 변환 재료 개발”로 결정되었다.

본 연구의 주안점은 태양에너지나 핵 에너지를 heat-collecting section에서 열로 변환시키며, 이 열은 1100-2000K 범위는 thermionic element를 사용하며 300-1100K 범위는 thermoelectric element를 사용하여 열 에너지를 유용한 에너지로 변환시키는 것이다. 본 연구는 1993년 부터 1997년까지 진행될 예정이며 1993년에서 1995년까지는 주변기술과 thermionic element 및 thermoelectric element를 경사가능 개념을 도입하여 효율을 극대화시키는데 주안점이 있으며, 1996년과 1997년에는 Super HYDECS(Super High-efficiency Hybrid

Direct Energy Conversion System)를 제작하는 것이다. Super HYDECS는 향후 우주 공간에서의 에너지 공급원으로 사용될 예정이며, 이는 태양 열이나 핵에너지를 공급원으로 사용할 수 있고 단위 중량당 높은 전력을 생산할 수 있기 때문이다 (그림 2-6).

그림 2-7이 이 project에서 수행해야할 에너지 변환개념을 잘 설명해 주고 있다. 향후 기술적으로 발전하여 태양에너지와 핵에너지를 광범위하게 응용할 수 있다고 가정한다면 두 에너지는 훌륭한 에너지원이 될 것이다. 핵에너지원으로는 기술개발이 용이하다는 관점에서 방사선 동위원소 열원이 선택되었다. α , β , γ 선 등과 같은 방사선은 열에너지와 구분되어 고에너지 입자들이다. 고에너지 입자들을 이용함에 있어서 연구의 초점은

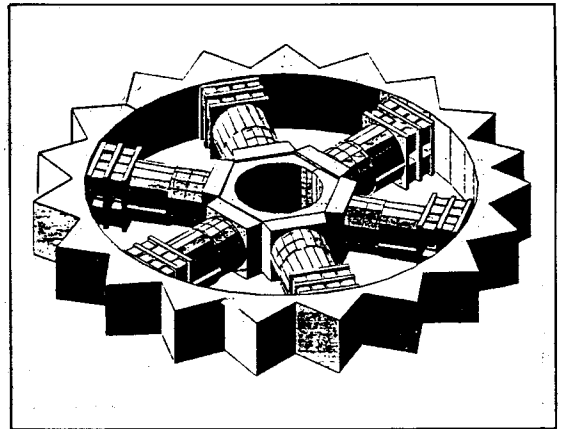


그림 2-6 Prototype model of super HYDECS.

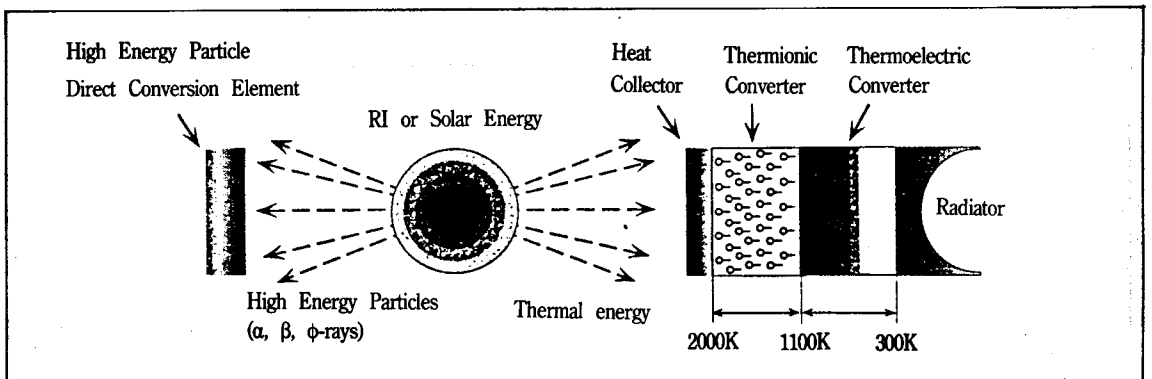


그림 2-7 Overview of energy conversion forms and conceptual model of hybrid direct energy conversion system.

기관재료의 에너지 밴드내의 준위차에 구배를 두어 고에너지 입자를 어떻게 직접 전기나 레이저로 변화시킬 수 있는지를 연구하는 점이다. 이 연구결과는 넓은 파장 범위를 효과적으로 이용함으로써 β -배터리의 성능을 향상시키는데 유용하게 사용될 것이다. 열에너지를 이용함에 있어서 태양빛이나 방사선 동위원소 에너지 등이 그림 2-7의 오른쪽 부분에 나타나 있는 열수집부분에서 열로 변환된다. 이 연구의 최종목표는 super HYDECS를 개발하는 것이다.

상기 연구를 효율적으로 수행하기 위해 5개 그룹으로 구분되었다. Design 그룹의 주요 일은 미세구조 분석에 따른 전자특성을 이론적으로 평가하며, 전자적, 열적, 기계적 특성에 대한 data base를 확보하며, gradient potential theory에 의한 최적 energy band, 조성 및 carrier 분포를 평가하고 동시에 이와같은 전기적 기능과 열 응력 완화기능이 동시에 가능한가 하는 이론을 평가하는 것이다. 또한 이와같이 최적화된 조건으로 super HY-DECS를 제검토하는 일이다.

구조 제어 그룹에서는 thermoelectric과 thermionic 재료에 대한 연구개발을 수행하며 열전변환 그룹과 thermionic 변환 그룹으로 구분된다.

열전변환 연구 그룹에서는 소결법이나 PIES, CVD등과 같은 방법을 이용하여 조성과 carrier 농도가 독자적으로 구배 되어질 수 있는 기술을 개발하는 것이 중요하다. 최종 목표는 조성과 carrier간의 최적 구배 조건을 동시에 만족하여 1100 K에서 300K 온도 범위에서 16%의 최대 변환 효율은 달성하는 것이다.

Thermionic 변환 그룹의 연구 목표는 CVD, 소결법, 기타 방법을 이용하여 emitter 구조는 고 work function으로, collector 구조는 저 work function을 구현하는 것이다. 핵에너지 변환 측면에서는 α -, β -, γ -선 등과 같은 고에너지 입자들을 직접 유용하게 변환시킬 수 있는 기술개발을 추구한다.

단위 부품제조 그룹에서는 1700K와 같은 큰 온도 구배하에서 에너지 변화기능이 효율적으로 유지되는냐를 측정하는 것이 주요 임무이다. 이와같은 임무를 위해 접합 기술과 성형기술을 개발하여

기능재료와 구조재료가 공존할 수 있게 하는 것이다. 기능재료와 구조재료가 구배되어진 재료의 열적 안정화 기술도 중요한 부분이다.

평가 그룹의 중요한 관점은 이 재료의 전기적, 열적, 기계적 특성을 개별적으로 분리해서 평가할 수 있는 기술을 확립하는 것이다. 세부적으로 여러 에너지형태의 변환기능을 정량적으로 평가하고 hybrid 변환계의 특성을 평가하는 방법, 우주공간에서와 유사한 환경에서 진공 저항성과 방사 저항특성을 평가하는 방법등을 개발하는 것이다.

2단계에서의 주요 연구 참여 team은 변환 FGM 제조 부분에 동북대 Prof. Watanabe, 열전 부분에 NRIM의 Dr. Nishida, element 제조에 Osaka 대학 Prof. Miyamoto 등이 참여하며 총괄은 일본 항공 우주연구소의 Dr. Niino가 책임자로 되어있다.

2.2 유럽의 FGM 연구 동향

유럽내에서는 각 연구소별로 개별 project로 연구가 진행중이며 국가별 혹은 유럽내 대형 과제 화로는 되어 있지는 않은 상태이다.

유럽내에서는 전체적으로 FGM의 내열응용에 주로 집중되어 있다. 항공기 구조물의 경량화 및 초고온 내열재료 측면에서 열응력에 대한 기초 연구가 많이 수행되고 있다. powder metallurgy 기술을 이용하여 Mo-Si₃N₄, Mo-Al₂O₃, Nb/Nb₂Ti-Al/Ti₂Al₃Si₂ bulk FGM 제조를 연구하고 있으며, microwave 소결기술을 이용하여 FGM 제조 기술도 연구가 진행중이다. TiAl 분말내에 α 량을 변화시켜 PM방법으로 시험편을 제조한 결과 ductility와 creep 저항성을 동시에 만족한 터빈블레이드 제조가 가능함을 보였다. 상업화를 전제로 승용차의 piston head를 강화코자 세라믹내에 기공을 경사지게 분포시키고 기공내에 금속 melt를 가압하면서 주입시켜 세라믹·금속 경사기능 재료를 제조하였으나, 아직까지 실용화 되지는 않았다.

Thermal barrier coating에도 FGM 개념을 도입하여, coating층 내에 기공율의 분포를 경사지게 하여 원하는 특성을 가지면서도 코팅층내의 잔

유용력 문제를 많이 감소시킨 연구결과가 보고되었다. 핵융합 반응로에 사용코자 Mo에 B,C를 경사지게 코팅한 재료 및 graphite에 TiC를 경사지게 코팅한 재료에 대한 연구가 수행되었으며, 절삭공구에도 경사기능 개념의 도입이 연구되었다.

유럽내 주요 연구 그룹으로는 독일 항공우주 연구소의 재료연구 책임자인 Dr. Kaysser 연구 그룹, 스위스 로잔대학(Swiss Federal Institute of Technology of Lausanna)의 Prof. Ilchner 그룹 등이 있다. 독일 DLR에서는 고온에서 견디는 고온 구조재료 측면에서 연구가 수행되고 있으며 swiss의 EPFL에서는 thermal barrier coating 및 금속계 FGM 연구등이 수행되고 있다. 러시아에서는 이미 우주용 thermionic 재료에 대한 연구가 진행중이며 일본의 2단계 FGM 국책연구는 기반기술이 확립 되면 러시아와의 긴밀한 협조를 예상하고 있다. 영국의 Dr. Yiasemides 등은 광산 채광에 사용되는 내마모 공구를 FGM 개념을 도입하여 특성을 향상시키는 연구를 수행하였으며 WC-Co 계의 초경재료에도 FGM 개념을 도입하여 내마모 특성을 향상시키는 연구가 수행중이다.

2.3 기타 FGM 연구

미국의 General Electric 사에서는 터빈블레이드에 4층의 조정상 구매를 갖는 thermal barrier coating을 plasma spray 코팅법에 의해 제조하여 실험하였으나 가격적인 측면에서 불합리하여 FGM 적용을 하지 못하는 상태이며, MIT에서는 ORNL과 공동으로 FGM Workshop을 개최한 적이 있다.

Reactive metal infiltration 방법에 의한 SiC/Al FGM, SiC/Cu FGM 제작이 MIT의 Prof. Chiang에 의해 수행되었고, State Univ. of N.Y. at Stony Brook의 Prof. Sampath는 FGM의 thermal spray 공정에 대한 연구를 수행 중이며, MIT의 Prof. Cima는 FGM의 3-D printing, Drexel 대학의 Prof. Koczak은 FGM의 in-situ processing, Colorado School of Mines의 Prof. Moore는 SHS에 의한 Al/SiC FGM 제조, MIT의 Prof. Jensen은 CVI 공법에 의한 FGM 제조 등을 연구하고 있다. 또한 기계공학 전공자

들의 FGM 구조의 기계적 특성 해석 측면에서 다른 나라 연구자보다 많은 미국 연구자들이 흥미를 가지고 있다.

중국에서는 우환철강대학을 중심으로 금속간 화합물계 FGM 제조에 대한 연구가 수행 중이며 할빈대학의 윤종대 교수 team에서도 FGM 연구를 수행중이다.

3. FGM의 향후 전망

많은 가능성을 갖고 있는 FGM이지만 아직 미지의 분야도 많아 해결해야 할 문제도 많다. FGM의 문제점을 나열해보면 다음과 같다.

- 재료의 자유도가 크기 때문에 최적으로 짜맞추는 것이 어렵다.
- 합성의 최적 조건을 결정하기가 어렵다.
- 서로 다른 많은 조성의 물성을 파악하여 제어할 필요가 있다.
- 종래의 가공법으로는 가공이 곤란한 것이 많다.
- 종래의 평가기술을 단순히 적용할 수 없다.
- 큰 면적의 구조물에 있어서 재료의 휨이 문제가 된다.

현재 FGM은 문제해결을 위해 복수의 재료를 FGM화 하자는 생각이 많다. 그러나 FGM을 보다 더 유용하게 응용하기 위해서는 FGM화 하는것 그 자체가 완전히 새로운 기능을 발휘할 수 있는 가능성이 고려되어야 한다.

FGM 연구는 1980년대 초 일본에서 시작하여 현재는 세계 각국에서 각국의 이익에 맞게 연구를 수행하고 있다. 일본에서는 1단계 국책연구로 차세대 항공기 구조용 재료로서 극고온 및 큰 온도구배에서 사용가능한 재료로서 개발하였으며 과제목표는 성공적으로 만족되었다.

상기 연구결과는 향후 차세대 초음속 비행기 재료로서 사용이 가능할 것으로 판단되나, 재료 자체의 경제성 측면에는 문제점이 많이 노출되어 있다. 이 개념을 실용화하기 위해 burner tip 등에 응용하여 성공적으로 실증되었으나 경제성 측면에서 매우 고가일 것으로 판단된다. 2단계 연구는 기능재료의 FGM화이나 주로 우주공간에서의 발전

등과 같이 특수한 용도로의 응용을 전제로 한다. 물론 향후에 기능재료의 특성 향상과 같이 부수적인 효과는 있을 것이다. 미국이나 유럽 등지에서는 FGM에 대해 실용적인 연구를 많이 수행하고 있으며, 기능재료 측면보다는 고온 사용가능한 계에 대한 연구 및 내마모성 향상이라는 측면에서 접근하고 있다. 러시아와 중국의 연구는 실용적인 측면과 거리가 있다고 할 것이다.

현재까지의 경향을 종합하면 특수한 용도로의 응용은 매우 매력적이나 범용의 응용으로는 실현되지 않고 있으며 이는 경제성 측면에서 불리하다는 점이 가장 큰 장애요인이다. 이 FGM 재료가 과연 실용화 될 것인가? 간단한 부품(예 : 공구재료 등)에 대한 적용 및 경제적 제조법을 고안하기전까지는 실용화가 어려울 것이다.