

핵융합로용 SiC/SiC복합재료의 접합기술

박 준 수 · 교토대학 에너지이공학연구소, 연구원

_e-mail : jspark@iae.kyoto-u.ac.jp

히노키 타수야 · 교토대학 에너지이공학연구소, 조교수

_e-mail : hinoki@iae.kyoto-u.ac.jp

코야마 아키라 · 교토대학 에너지이공학연구소, 교수

_e-mail : kohyama@iae.kyoto-u.ac.jp

이 글에서는 핵융합로 블랭킷용 구조재료 중에서 가장 고온특성이 뛰어난 SiC/SiC복합재료를 이용한 구조물 제작에 필수 기술이라고 할 수 있는 접합기술에 대해 소개하고자 한다.

원자로, 핵융합로 등과 같이 많은 연구자들이 대량의 에너지를 안전하게, 깨끗하게, 적은 경비로 만들어 낼 수 있을 것인가에 대해서 많은 연구가 진행되고 있다. 핵융합로의 개념 자체가 원자로에 비하여 위험한 사고가 일어날 여지가 없으며, 연료수급 문제, 방사성 폐기물 문제, 핵확산억지 등에 있어서 많은 잇점을 가지고 있다. 더군다나 남아도는 핵융합로의 열을 이용하여 수소를 만들어내는 연구도 이루어지고 있어서, 석유에 의존하고 있는 교통수단의 대체연료로 수소를 이용할 경우, 대기오염의 걱정 없

이 꿈과 같은 쾌적한 생활을 할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

위와 같은 꿈과 같은 이야기를 현실화하기 위해서는 풀어야 할 기술적 과제들이 있다. 먼저 비용 면에서 살펴보면, 핵융합로의 건설에 많은 경비가 소요되므로, 현재 많이 보급되어 있는 경수로형 원자로에 비하여 핵융합로의 발전단가는 비싼 편이다. 발전단가를 낮추려면 핵융합로의 소형화를 통해서 건설경비를 줄이고, 로의 운전온도는 높여서 열효율을 올려야 한다. 운전온도를 올릴 수 있다면 덩으로 높은 핵융합로의 열을 이용하여 수소에너지를 경제적으로 만들어 낼 수도 있다.

핵융합로의 개념 자체가 저준위의 방사성폐기물의 양이 적고, 방사화되더라도 짧은 시간 내(수십~수백년)에 자연상태로 돌아가도록 고안되어져 있기는 하지만, 방사성폐기물 자체가 아주 없는 것이 아니다. 그러나 로가 작아지면 작아질수록 방사성폐기물도 줄일 수 있다. 그러한 작으면서도 열효율이 높은 핵융합로를 만들려면, 지극히 높은 온도(수천만°C~수억°C)의 내부 플라즈마와 로의 내벽간의 거리를 가깝게 설계해야 가능하지만, 문제는 가까워질수록 로 내벽이 버텨야 하는 온도 또한 높아져야 한다는 것이다. 현재, ITER는 최초 설계안에 비

하여 컴팩트해졌지만, 여전히 보수적인 설계를 따르고 있다. 내벽의 구조재료로서는 스테인리스 스틸(SS 316L(N))이 사용될 예정이다. 금속 자체가 인류가 많이 다루어본 재료로서, 기존의 원자로에서의 실적도 충분히 가지고 있다. 즉, 낮은 가격, 취급의 용이성, 경험축적에 따른 신뢰성을 얻을 수 있으나, 철강재료인 만큼 획기적으로 높은 성능을 달성하기는 어렵다.

따라서, ITER 이후에 계획되고 있는 DEMO로, 실용로의 내벽재료로서 연구되고 있는 재료들은, 저방사화 철강재료, 바나든탍금, 탄화규소섬유 강화 탄화규소 매트릭스(SiC/SiC)복합재료가 있으며, 이중에서도 가장 저방사화 특성이 뛰어나며, 고온에서의 높은 안정성과 강도, 적당한 열특성을 보여주는 SiC/SiC복합재료는 핵융합로용 구조재료로서 매우 매력적인 재료이다.

SiC/SiC복합재료를 이용한 대형/복잡형상의 실용부품을 제조하기 위해서는 여러 가지 과제들이 존재한다. SiC/SiC복합재료의 강화재(reinforcement)와 기지재(matrix)는 기본적으로 경도가 매우 높고 잘 변형되지 않는 세라믹이기 때문에, 금속에 비하여 가공성이 떨어져 처음부터 복잡한 형상의 제품을 만들어 내는 것은 용이한 일이 아니다. 따라서, 세라믹을 이용하여 제품을 설계할 경우, 설계자는 가능한 단순

한 형상의 세라믹 부품의 조합으로 제품을 만들어 낼 수 있도록 설계하여야 하며, 세라믹 소재의 생산자에게는 처음부터 원하는 형상에 가능한 가깝게 만들어, 최소한의 가공만으로 완성품을 만들어 내는 제조기술(near net shaping)이 요구된다.

그 다음으로 단순한 형상의 부품을 화학적, 물리적 방법으로 접합하여 복잡한 형상으로 만들어 내는 방법이 필요하다. 접합은 제품설계의 자유도를 높여주며, 현장에서의 조립, 유지보수 측면에서도 매우 중요한 기술이다.

접합기술

기존의 세라믹의 접합방법으로는 어떠한 것들이 있을까? 교과서식으로 분류해보면 (1) 접착제에 의한 접착, (2) 메탈라이징,

(3) 고상액상접착, (4) 고상가압접착, (5) 용접접착, (6) 용융접합, (7) 기계적 접합 등이 있다. 그러나 실제 SiC/SiC복합재료의 접합에는 앞에서 열거한 한 가지 이상의 접합원리가 동시에 작용하는 경우가 많다.

일단, 단순히 무엇인가를 붙인다고 하면 접착제를 이용한 접착을 생각해볼 수 있다. 유기접착제에는 많은 종류가 있고, 내열성 및 고강도를 기대하기는 힘들지만, 적절히 선택할 경우, 간단한 조작으로 상온사용의 세라믹기공소자, 다공체 등에 활용될 수 있다. 내고온성이 필요할 경우는 무기접착제가 개발되어 1,300°C 이상의 고온에서도 사용할 수 있는 접착제들이 시판되고 있다. 이러한 내열성 무기접착제들은 쓰기가 매우 간편하다는 장점을 가지지만, 보통 Al₂O₃, SiO₂ 등의

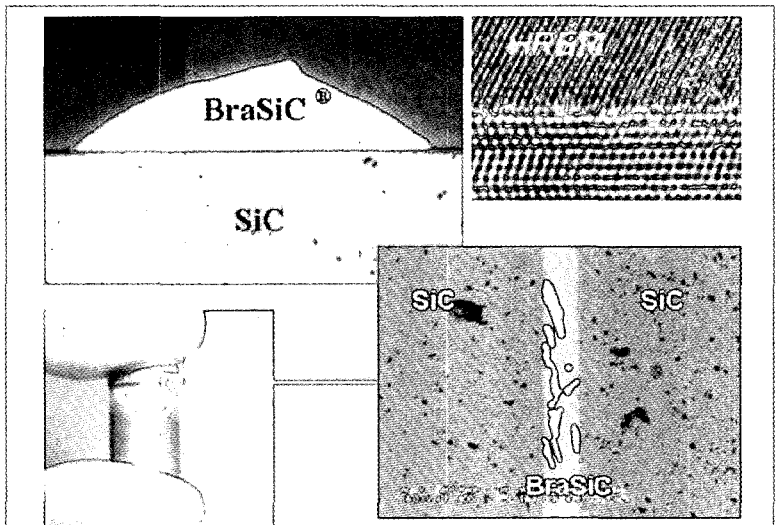


그림 1 브레이징 접합법인 BraSiC®에 의하여 접합된 SiC

산화물을 주원료로 사용하기 때문에, 고온안정성, 열팽창률의 차이, SiC와의 공존성(compatibility)에서 문제가 발생할 수 있으며, 접합부의 강도를 기대하기도 힘들다. 따라서, 이러한 무기접착제를 이용할 경우, 사용 목적에 적합한지에 관한 세심한 검토가 필요할 것이다.

세라믹전구체(ceramic precursor)를 접합제로 이용한 접합 또한 연구되고 있다. Donato 등(1997)은 SiOC 유리질을 이용하여 α -SiC과 화학증기침투법(CVI: Chemical Vapour Infiltration)으로 제조된 SiC/SiC복합재료들을 접합하였다. 그러나 세라믹전구체가 세라믹으로 바뀌면서 생기는 체적수축과 균열로 인하여 강도는 낮은 편이다. Si, Ti, Zr, Al 등의 순수한 금속 또는 합금을 이용한 브레이징도 SiC의 접합법으로 이용될 수 있다. 프랑스의 CEA Grenoble에서는 Cu-Si합금을 이용한 브레이징 접합법인 BraSiC[®]을 개발하였다.⁽²⁾ 이 방법은 1,300°C~1,400°C에서 실시되며, 상온에서의 강도는 200MPa 이상으로 보고되고 있다.

미국 NASA의 M. Singh 등은 SiC판 사이에 반응결합(reaction-bonding)으로 만들어진 SiC를 끼워 넣고 1,425°C에서 15분간 가열하여 용융된 금속실리콘을 반응시켜 접합시키는 ARCJoinT⁽³⁾라는 기술을 개발하

였다. 이 방법은 가압할 필요 없이 가열만으로 접합이 가능하고, 금속실리콘이 접합부에 존재하므로, 흔히 접합부에서 발생할 수 있는 열전도도의 저하와 같은 문제가 없으리라고 기대된다. 하지만, 미세조직에 여분의 금속실리콘이 남아 있다는 것은, 이 금속실리콘이 녹는 온도인 1,425°C 전후로 접합부의 특성에 변화가 올수 있다는 것을 의미한다. 또한, 금속실리콘 자체는 고속중성자조사환경에서 핵변환이라는 현상을 통하여 반감기가 매우 긴 물질로 바뀔 가능성이 있으므로, 항공우주 분야가 아닌 원자력에너지시스템에 사용하기 위해서는 주의가 필요할 것으로 생각된다.

금속화된 표면을 다른 금속과 기계적으로 접합시키는 방법도 있다. 몰리브덴(Mo), 텅스텐(W) 등의 고용점 금속분말을 포함하

는 페이스트를 분포시켜 소성하는 방법으로 비교적 오래전부터 사용되고 있다. 특히, W는 이온 및 중성자입자 등의 조사에 의해 고체표면의 원자가 방출되어 손모되는 것(sputtering)을 막고, 핵융합로 내벽의 기밀성을 높이기 위한 피복재료로서 주목을 받고 있다. W는 용점이 극히 높고(3,387°C), 열팽창률이 SiC와 비슷하여 열응력의 영향을 덜 받는다는 장점이 있다. 미국 오크리지 국립연구소(ORNL)에서는 W분말을 SiC 표면에 뿌린 뒤 적외선가열을 이용하여 대량의 에너지를 단시간에 공급하여, W피복층을 만드는 방법을 개발하였다.⁽⁴⁾

일본 교토대학 에너지이공학연구소 코야마 연구실의 연구팀은 SiC세라믹 표면에 W분말을 올려 SiC/SiC복합재료의 제조와 동시에 제조 후에 W분말을 소결하

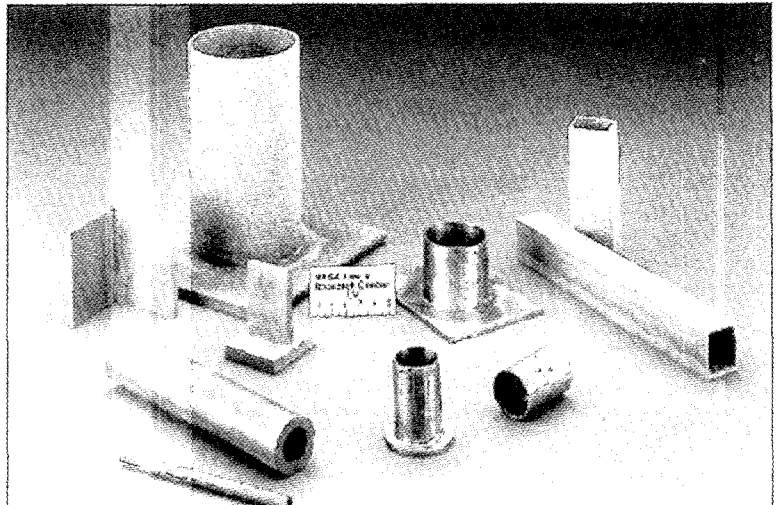


그림 2 ARCJoinT법으로 접합된 다양한 소재들(<http://www.grc.nasa.gov/WWW/RT1999/5000/5130singh.html>)

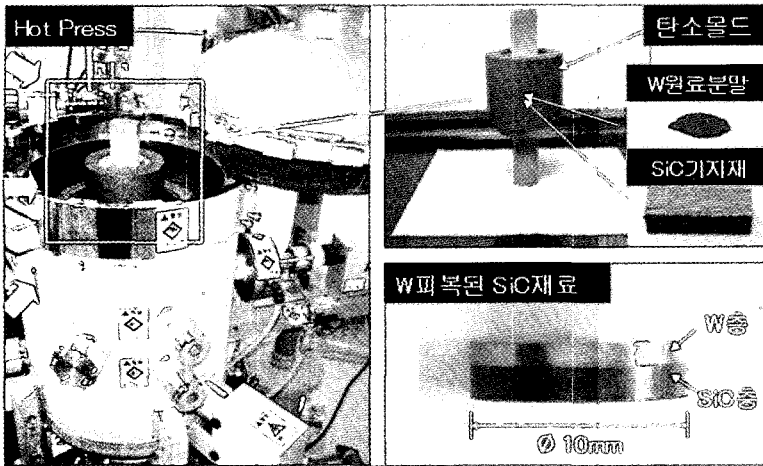


그림 3 핫프레스를 이용한 W피복

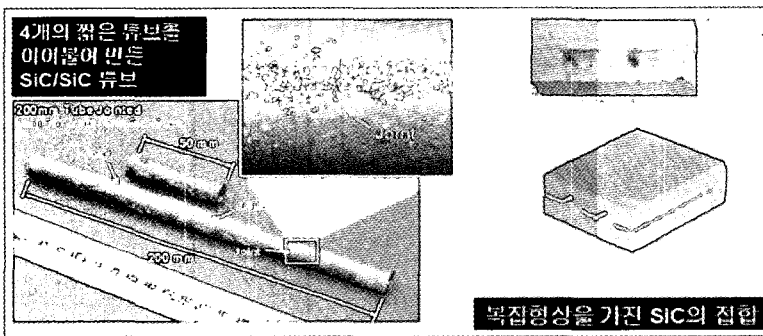


그림 4 짧은 튜브를 이어 붙여 만들어진 200mm 길이의 튜브와 내부에 홈을 가지는 SiC세라믹

여 피복층을 만드는 방법을 연구하고 있다⁵⁾(그림 3). 이러한 방법들은 W의 피복법인 동시에 접합법으로도 이용될 수 있다.

기존의 SiC/SiC복합재료의 접합에 있어서 가장 큰 문제점은 어떻게 하면 접합온도를 낮출 수 있을까? 라는 점이었다. 초기단계에 개발되었던 SiC섬유는 섬유층의 산소농도가 높았던 관계로 고온에서 스스로 열분해되어 버리는 문제가 있었다. 따라서 산소가 많이 포함된 SiC섬유를 강화

재료 이용한 SiC/SiC복합재료는 어떠한 수를 쓰더라도, 섬유가 분해되어 버리는 온도 이하에서 접합이 이루어져야만 했었다.

최근의 고결정성, 고순도, 화학양론적 SiC섬유(Hi-Nicalon™ Type-S, Tyranno™-SA)의 경우 매우 뛰어난 내열성을 보여주고 있다. 따라서, SiC세라믹 제조에는 많이 사용되어 왔으나 제조온도가 지나치게 높았던 핫프레스법을 사용한 SiC/SiC복합재료의 제조가 가능하게 되었다.

Kohyama 등은 Tyranno™-SA 섬유와 나노사이즈의 극초미립의 SiC분말, 소량의 산화물계 첨가제를 넣고 핫프레스를 사용하여 고성능의 SiC/SiC복합재료(NITE-SiC/SiC)를 개발하는데 성공하였다. 또한, SiC/SiC복합재료의 제조방법을 응용한 SiC/SiC복합재료의 접합도 연구되고 있다. 그림 4는 핫프레스를 이용하여 접합된 50mm 길이의 짧은 SiC튜브 4개를 이어 붙여 200mm 길이의 SiC/SiC 튜브와 내부에 홈을 갖는 비교적 복잡한 형상의 SiC의 실물사진이다. 소개된 접합법 중에서는 가장 높은 온도(1,600°C 이상)와 압력을 요구하므로, 까다로운 접합법이라 할 수 있지만, 모재와 거의 동일한 미세조직을 갖는 접합층으로 인하여 기존의 접합강도평가법으로는 측정이 곤란할 정도의 매우 높은 강도를 보인다. 모재와 동일 성분과 조직을 가지므로 불순물의 영향, 모재와의 열팽창률의 차이 등이 없다는 것도 장점이다. 하지만, 역시 접합온도가 고온이며, 가압이 필요하다는 것이 문제점이며, 이러한 문제점들을 해결하기 위한 연구들이 진행 중이다.

기계적 접합

마지막으로 비영구적인 결합방법으로서 기계적 접합방법을 살펴보고자 한다. 기계적 접합은 금

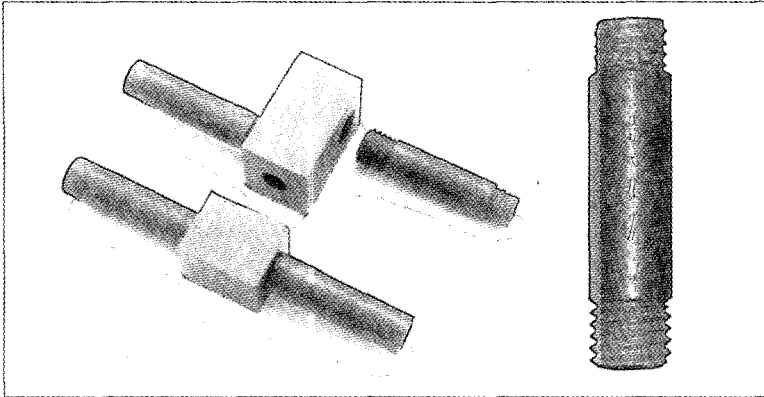


그림 5 나사산이 가공된 NITE-SiC/SiC튜브와 이를 이용한 기계적 결합의 예

속재료일 경우, 매우 간단한 접합 방법이지만, 세라믹의 경우에는 그렇지 못하다. 왜냐하면 세라믹 자체가 처음부터 원하는 형상으로 만들어 내기가 힘들고, 가공하기도 어려우므로 금속처럼 복잡한 형상으로 만들어 끼워 넣는 방식, 구멍을 뚫어 리벳 또는 나사로 체결하는 방식을 채용하기 힘들다. 또한 가능하다 하더라도 복잡형상부, 기계가공부에서의 응력집중에 의하여 세라믹의 강도가 매우 저하할 가능성이 있다. 다행히도 본문에서 이야기 하고 있는 세라믹복합재료의 경우는 세라믹에 비해 인성이 높아서, 내재된 결합 또는 가공에 의한 강도 저하가 세라믹에 비하여 덜한 편이다.

탄소 또는 C/C복합재료의 경우, 고온 산화분위기에서의 사용이 불가하며, C/C복합재료 자체의 경도, 탄성계수, 강도는 SiC/SiC복합재료에 비하여 낮고, 내마모성도 낮아 수명이 짧은 편으로, 진공 또는 불활성가스를

사용하는 고온로에서 발열체의 고정과 같은 하중이 과도하게 작용하지 않는 곳에 제한적으로 사용되고 있다. 일찍이 항공기용 고온가스터빈에 질화규소, CMC, 세라믹내화물을 이용하고자 하는 많은 시도가 있었다. 탄소섬유강화/탄소매트릭스(C/C)복합재료, 또는 C/C복합재료에 용융실리콘(Si)을 반응시켜 만든 C/C-SiC 나사를 이용한 기계적 체결과 동시에 결합부의 틈새에는 무기접착제를 채워 넣는 방법이 미국에서 개발된 바 있다. SiC/SiC복합재료 그 자체는 매우 높은 강도와, 경도로 인하여 가공이 까다로운 편이지만, 나사산을 기계적으로 가공할 수도 있으며, 이 방법으로 그림 5와 같이 SiC/SiC복합재료로 만들어진 튜브와 블록을 체결할 수도 있다.

이 이외에도 금속간의 용접과 마찬가지로 레이저, 전자빔 등을 이용하여 접합부를 용융시키고, 얻어진 용융물로 접합부를 채워

서 접착시키는 방법도 있다. 최근의 대출력 레이저에 의한 가공법의 발달로 세라믹의 용접에서도 주목받기 시작하였다. 그러나 용접시의 열충격, 잔류응력의 제거, 또는 용접부 결정립의 조대화, 기포에 대한 대책이 필요할 것으로 생각된다.

마지막으로 핵융합로 환경에서 SiC/SiC복합재료의 접합부에 요구되는 조건을 정리하여 보면, 1,000°C 이상의 고온에서 안정하며, 화학적으로 공존성을 가져야 하며, 중성자조사에 대하여 저방사화 물질일 것, 경우에 따라서 하중을 버틸 수 있어야 하며, 기밀성을 가질 것 등을 들 수 있다. 또한 현장에서의 유지보수성도 함께 고려되어야 할 것이다.

ITER의 테스트블랭킷모듈(TBM : Test Blanket Module,) 과 ITER 이후의 DEMO로, 실용핵융합로의 블랭킷모듈을 제작하기 위하여 다양한 재질과 형태의 구조재료, 냉각제, 증식제(breeder), 증배제(multiplier)를 조합한 설계안들이 나와 있다. SiC/SiC복합재료는 타 재료에 비하여 매우 뛰어난 특성을 자랑하지만, 아직은 높은 비용과 타재료에 비하여 사용실적/경험적 측면에서 떨어지는 편이다. 기술적 기반이 받쳐주지 않는 한, 단일 재료만으로 핵융합로용 블랭킷을 제작한다는 것은 비용면으로나 안전성 측면으로나 높은 위험을 감수하여야 한다. 앞에서도 구구

절절히 이야기 하여 왔듯이, 성능 면으로는 SiC/SiC복합재료가 타 재료를 압도하지만, SiC/SiC복합재료만을 사용한 블랑켓의 제작은 아직은 어려울 것으로 판단된다. 요구되는 성능, 각 후보재료의 특성, 제조성, 비용을 동시에 고려한 합리적인 설계가 필요하며, 이종재료간의 접합을 위한 연구개발 또한 뒤따라야 할 것으로 보인다.

참고문헌

(1) A. Donato, P. Colombo, M.O. Abdirashid, in' P. Fenici, A.J. Frias Rebelo (Eds.), *Proceedings of the 1st IEA International Workshop on SiC/SiC Ceramic Composites for Fusion Structural Applications*, EUR 1375 EN, 1997, p. 107.
 (2) A. Gasse, F. Saint Antonin, G. Coing Boyat,

"Specific non reactive BraSiC alloys for SiC/SiC joining", Report CEA-Grenoble, DEM n.DR 25/97 December 1997.
 (3) M. Singh, J.D. Kiser and S.C. Farmer, "Joining of SiC-based ceramics by reaction forming approach," *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 1997, 18(3), 161.
 (4) T. Hinoki, L.L. Snead and C.A. Blue, "Development of Refractory Armored Silicon Carbide by Infrared Transient Liquid Phase Processing," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 347, issues 3, (2005), 207-216.
 (5) S.J. Son, K.H. Park, Y. Katoh and A. Kohyama, "Interfacial Reactions and Mechanical Properties of W-SiC in-situ

Joints for Plasma Facing Components," *Journal of Nuclear materials*, Vol. 329-333, Part 2, (2004) 1549-1552.
 (6) Y. Katoh, S.M. Dong, A. Kohyama, "Thermo-Mechanical Properties and Microstructure of Silicon Carbide Composites fabricated by Nano-Infiltrated Transient Eutectoid Process," *Fusion Engineering and Design*, Vol. 61-62, (2002) 723-731.
 (7) J.K. Lee, Y. Katoh and A. Kohyama, "SiC and Si3N4 Ceramic Joining by the Transient Eutectic Phase Process," *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, Vol 24, Issue 4, (2003), 325-330.

기계용어해설

온도의존성(Temperature Dependence)

액체의 열전도율이 온도의 변화에 따라 증가, 일정 또는 감소하는 특성으로 이 성질을 이용하면 상온에서 한 온도에서의 측정기기 교정뿐만 아니라 넓은 온도범위에 대한 엄밀한 교정을 수행할 수 있다.

충전층(Packed Beds)

충전층은 내부에 입자들이 무작위로 메워져 있는 튜브나 파이프이다. 충전층은 보통 화학 반응기에 사용되어 이 상(Two Phase) 간의 접촉 면적을 늘린다. 또한 열을 저장하는 데도 사용된다.

화학적 세척(Chemical Washing)

오염물을 물의 분사로 제거하는 기계적인 세척이 아니라 세제와의 반응으로만 제거하는 세척