

마이크로 열교환기

이 규 정

고려대학교 기계공학과(kjlee@korea.ac.kr)

서론

최근 고유가시대가 도래함에 따라 에너지와 관련된 제반 문제가 전 세계적으로 매우 중요한 화두가 되었고, 특히 에너지 자원이 없는 우리나라에서는 대체에너지 및 재생에너지 개발, 청정에너지 사용 및 에너지 절약 방안이 무엇보다 중요한 이슈로 떠올랐다.

온도가 다른 두 유체 사이의 열교환 시 사용되는 열교환기는 에너지 개발 및 사용에 있어 중요한 핵심 부품이며, 효율 개선을 통한 활용이 우선시 된다. 사용 목적, 방법에 따라 다양한 종류의 열교환기로 구분되나, 그 중 마이크로 열교환기(micro heat exchanger) 개발 필요성이 점점 확대되고 있는 추세이다.

반도체를 이용한 전자칩 발명은 전자, 통신, 항공 우주, 화학, 생체공학, 에너지 분야에서 활용되는 전자시스템의 대개혁을 가져왔으며, 최근 들어 식각기술과 레이저 기술 등의 초정밀 가공 기술의 발달로 인하여 초소형 모터, 펌프, 센서, 밸브, 터빈, 열교환기, 반응기 등의 생산이 가능하게 되었고, 이를 통한 초정밀 제어가 전자기기의 초소형화 및 고집적화를 가속화시켰다. 그러나, 초소형화 및 집적화로 인해 야기되는 발열을 제거하기 위한 방안은 쉽지 않고, 최근 가공영역을 나노의 영역까지 확대하고 있어 열적 문제는 더욱 심각해지리라 생각된다.

본론

현 시점에서 마이크로 열교환기란 열교환기의 자체 크기 보다는 두 유체의 열전달 특성을 좌우하는 크기, 즉 마이크로채널, 다공성 채널 등의 마이크로 크기 영역에서 열전달을 하는 모든 열교환 시스템을 포괄적으로 포함하고 있다. 적정량의 열교환이 이루어져야 하기 때문에 크기의 한계를 가지고 있으나, 필요에 따라 MEMS(Micro Electro-Mechanical System) 기술을 이용한 마이크로 크기의 마이크로 열교환기도 제작 가능하다.

상용 열교환기에 비해 마이크로 열교환기의 장점은 무엇보다 제품의 소형 및 경량화를 이룰 수 있다는 데 있다. 소형 및 경량화는 발열 또는 냉각부위에 직접 접촉으로 열 교환을 수행할 수 있어 사용 장소의 다양화를 추구할 수 있으며, 초소형 펌프, 밸브, 센서 등과 함께 사용되어 빠른 응답에 따른 정밀제어도 가능하게 한다. 채널 크기가 작아질수록 높은 대류열전달계수를 나타내고 단위체적당 큰 전열면적(large surface to volume ratio)을 가지므로(약 $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 이상) 마이크로 열교환기는 우수한 열성능을 보인다. 열교환하는 두 유체 사이의 거리가 작아 상용 크기의 열교환기에 비해 보다 큰 온도구배를 가지기 때문에 열교환기를 지나는 두 작동 유체 사이의 온도차가 상대적으로 작아도 열전달이 잘되어 온도 근접성도 좋다. 또한, 마이크로채널을 이용

한 열교환기는 반도체 제조공정과 거의 동일한 과정을 거쳐 생산할 수 있기 때문에 대량생산이 가능하고 대당 제작 시간도 줄일 수 있으므로 기존 열교환기에 비해 제작비용을 크게 줄일 수 있다. 그러나 열전달 향상과 함께 압력강하가 증가하여 유체 순환을 위한 구동력이 커지는 단점이 있어, 이에 대한 대처 방안과 낮은 압력강하를 위한 기술 연구가 필요하며 열전달 향상과 압력강하를 함께 고려한 성능비로써 마이크로 열교환기의 성능을 평가가 하는 것이 바람직하다.

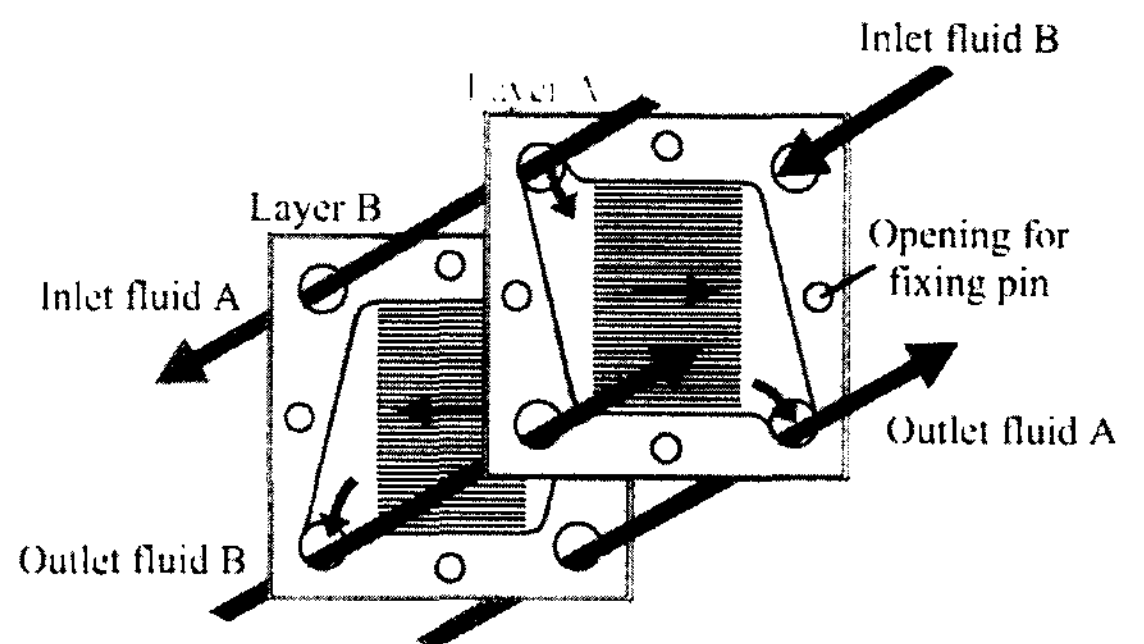
마이크로 열교환기는 유동의 형태 및 모양에 따라 다양하게 명명되고 있으며 아직 명확한 구분은 이루어져 있지 않다. 그러나, 기본 열전달 메커니즘, 구동 메커니즘(모세력, 중력, 펌프), 제작 기법에 따라 마이크로채널 열교환기(micro-channel HE), 마이크로관형 열교환기(micro-tube HE), 마이크로 히트파이프(micro heat pipe), 인쇄회로형 열교환기(printed circuit HE), 모세구동 루우프형 마이크로 열교환기(capillary-pumped-loop micro HE), 열사이폰 열교환기(thermosyphon HE) 등으로 불리어지고 있다. 이들은 주로 마이크로채널, 홈(groove)과 다공성 워(wick), 또는 미세관을 구성하고 있으며 마이크로 스케일에서의 열전달 특성이 마이크로 열교환기의 성능을 좌우한다. 지금까지의 활용분야로는 주로 컴퓨터 전자칩 냉각에 초점이 맞추어져 있으나, 연료전지, 발전 및 폐열회수 시스템, 생체화학 시스템, 의료기기, 레이저, LCD, LED 및 태양전지 냉각, 냉동 및 에어컨의 증발기 응축기 대응 분야에도 활용의 예를 추구하고 있으며, 창의적 사고가 많이 요구되는 분야이다.

마이크로채널 열교환기는 유체가 마이크로채널을 통과하며 열교환하는 형태이며, 마이크로관형 열교환기는 기존의 관형열교환기의 축소판으로 미세관을 이용하여 열교환한다. 마이크로 히트파이프는 삼각 또는 사각구조를 갖는 히트파이프 형태로 기존의 워구조 대신 결정체 성장 등을 통한 미세구조를 만들어 모세관력을 유도한다. 인쇄회로형 열교환기는 화학 에칭과 확산접합 기법을 이용하여 금속박판을 적층한 후 마이크로채널 형태로 열교환한다. 모세구동 루우프형 마이크로 열교환기는 모세관력을 이용하여 펌프의 구동 없이 히트파이프와 다르게 증기와

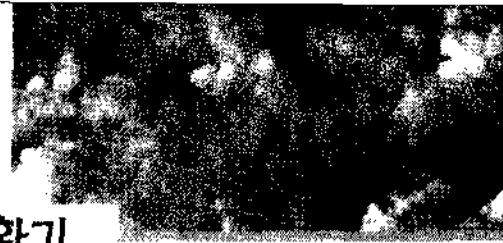
액체를 한 방향으로 순환시켜 열성능을 좋게 한 것이며, 열사이폰 열교환기는 모세관력 대신 중력장에서 액체가 기체보다 무거운 성질을 이용하여 자연순환하는 열교환기이다.

현재 많이 연구되고 있는 마이크로 열교환기는 그림 1에 나타난 것과 같이 관형열교환기의 구조와 같은 구조, 즉 마이크로채널을 가진 미세구조판(micro structured plate)을 수~수십장 적층하고 두 개의 유체가 번갈아 대향류 또는 직교류로 흐르면서 열교환하는 형태를 갖는다. 마이크로 열교환기의 재질, 작동유체, 작동영역에 따라 다양한 형태의 마이크로채널을 제작할 수 있고, 복잡한 금형 공정을 거치지 않아 초기 개발 비용을 줄일 수 있는 장점이 있어 활용도가 높으나 정밀가공/제작 기술, 열성능 해석 기술, 온도, 압력 유동 측정 및 제어 기술 등에 대한 연구는 매우 미미하며 초보단계이다. 여기서는 마이크로채널을 이용한 마이크로 열교환기 관련 내용을 보다 자세히 다루고자 한다(그림 2).

마이크로채널이란 특성길이가 1 mm보다 작고 1 m보다 큰 채널을 말한다. 마이크로채널을 이용한 열전달의 개념은 1981년 Tuckerman과 Pease에 의하여 처음으로 제안되었는데, 이들은 정상상태의 관내 유동에서 관내 열전달 계수가 관경에 반비례한다는 것에 착안하여 마이크로채널을 만들고 그 채널 속으로 유체를 흘려 냉각하는 방식을 구현하였다. 이 마이크로채널을 이용한 냉각 실험을 통하여 790 W/cm² 이라는 높은 냉각 성능을 구현하였으며 이는 그 당시 알려진 어떤 방식보다 큰 냉각능력을 나타낸 것이었다. 이후 많은 연구자들이 마이크로채널을



[그림 1] 대향류 마이크로 열교환기의 유동 및 적층 구조 (출처: 참고문헌2)



이용한 열전달에 큰 관심을 갖게 되었으며 마이크로 채널 적용 마이크로 열교환기에 많은 연구를 할애하고 있다. 최근에는 연료전지 시스템의 반응기, 냉각기, 개질기 등에 마이크로채널의 영역을 확대하고 있다.

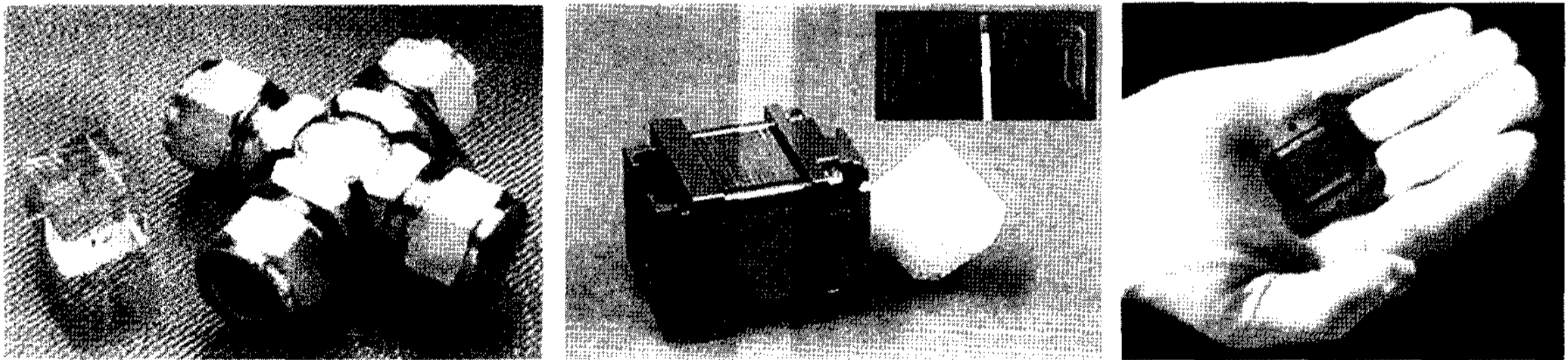
마이크로채널은 일반적으로 스테인리스스틸 박판에 MEMS기술 중 하나인 리소그래피 공정(lithography process)과 화학 에칭(chemical etching) 기법으로 제작되나, 정밀 기계 가공 및 레이저 기술을 이용하여 가공하기도 한다.

기존 관형 열교환기에서는 적층판 간의 기밀을 위한 접합으로 가스켓을 주로 사용하였으나, 최근들어 고압과 고온에서도 기밀을 유지할 수 있는 브레이징(brazing), 확산접합(diffusion bonding) 및 레이저용접(laser welding) 기법이 사용된다. 이들 기술은 마이크로 열교환기의 접합기술로 영역을 확대하고 있으며, 특히 열변형 및 접합 불량을 최소화하는 것이 제조공정 핵심 기술 중 하나이다.

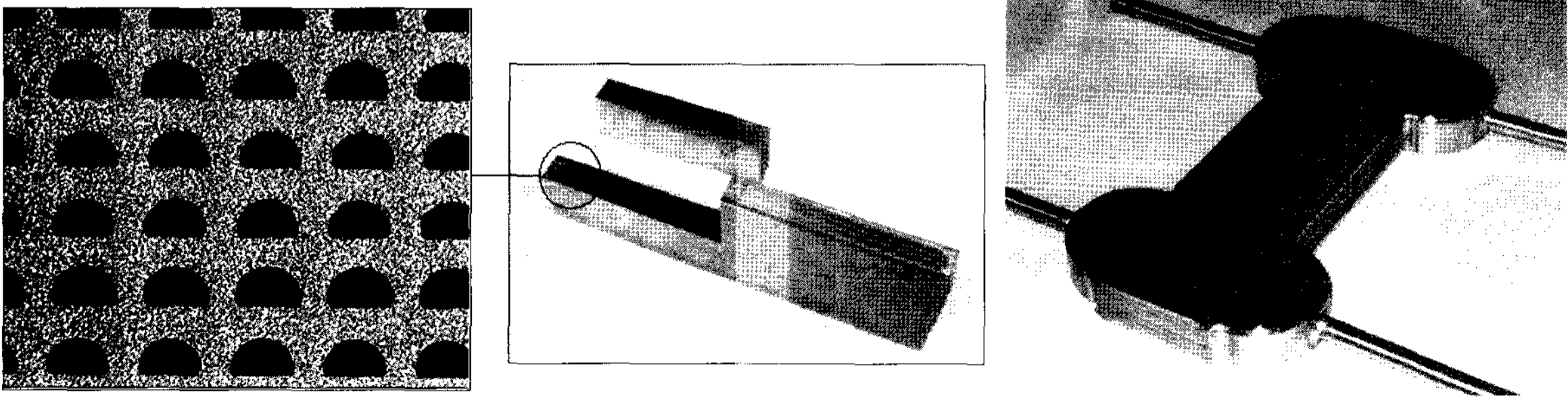
브레이징은 각 적층판 사이에 얇은 판의 용가재

(filler material)를 첨가하고 이를 고진공 고온로에 용가재 용융점 이상으로 가열한 후 냉각시켜 용융 용가재의 표면장력을 이용하여 접합하는 기술로 적층판의 재질에 따른 용가재의 선정, 채널의 막힘 현상이 없도록 적절한 용가재 양의 선정이 무엇보다 중요하며, 이에 대한 연구와 제작 시의 노하우가 요구된다.

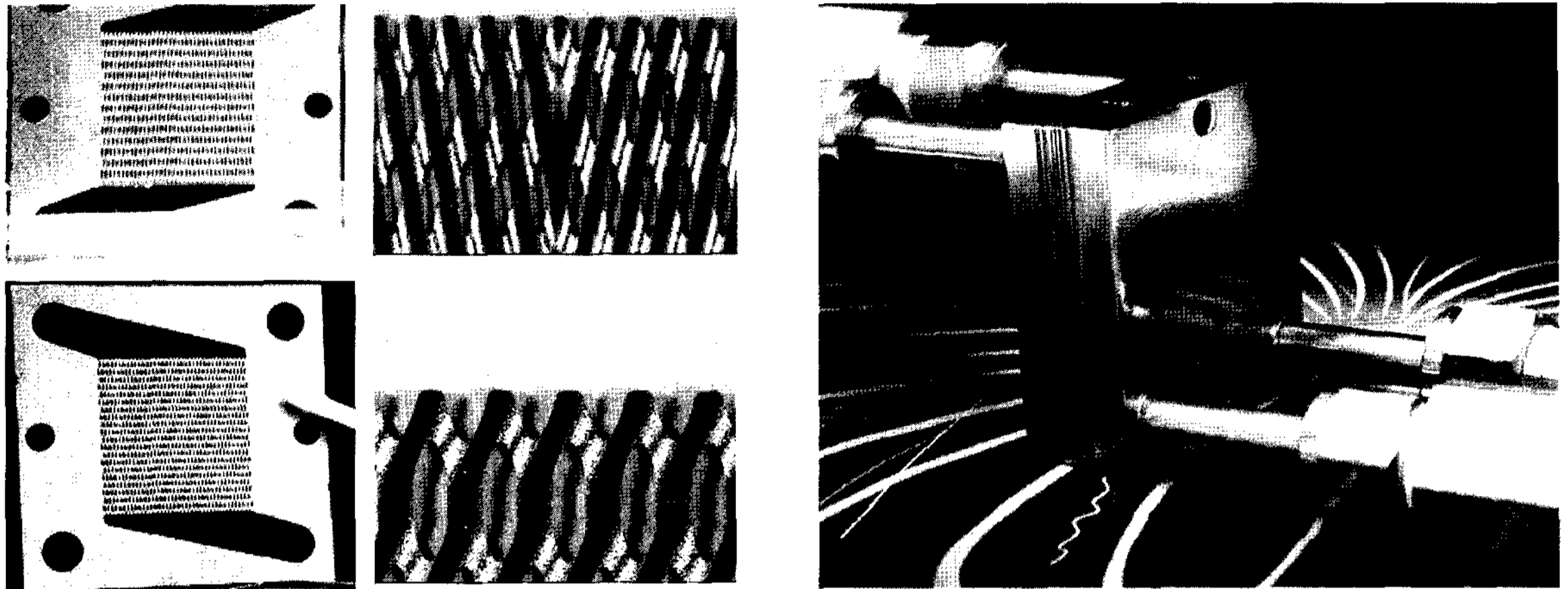
확산접합은 용가재 없이 금속판을 용융점 아래의 온도로 가열한 후 금속 표면을 압착하여 표면 간의 물질 전달에 의한 결정립 성장을 촉진시켜 결합하는 방법이다. 이 때 고온에서 금속판의 압착 시 적정량의 힘이 골고루 배분되도록 하여야 하며, 다양한 형태의 채널 제작 시 채널의 변형이 없도록 사전 연구와 제작 노하우가 필요하다. 가스켓, 용가재 및 용접 물질이 필요 없어 열교환기의 무게를 줄일 수 있고 첨부 물질에 대한 열저항과 접촉저항을 줄일 수 있어, 마이크로 열교환기에서는 더욱 유효한 기술이다. 확산접합 열교환기는 영국 Heatric사에서 처음으로 상용화하여 공급하고 있으며, 국내에서는 (주)이노



[그림 2] 마이크로채널열교환기들(출처: 참고문헌3, 참고문헌4)



[그림 3] 확산접합 마이크로채널열교환기



[그림 4] 양면식각 마이크로채널 박판과 적합한 마이크로 열교환기

월이 처음으로 소량의 확산기법을 이용한 마이크로 열교환기를 연구용으로 제작하고 있으며, 극소수의 전문업체가 시장에 뛰어들고 있다. 그림 3은 확산접합 채널 단면적과 마이크로 열교환기를 보여준다.

마이크로채널에서는 층류 유동의 특성을 가지고 있으며, 화학 에칭으로 마이크로채널을 제작하는 특성 상 주로 단면 에칭 기법이 사용되고 있어 열전달 향상에 한계를 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 양면 화학 에칭 기법으로 단면 에칭에서 만들 수 없는 다양한 3차원 구조의 채널을 제작하여, 혼합에 의한 난류 및 이차류를 야기하며 열전달 향상 방안을 추구할 수 있다. 그림 4는 양면 식각 판과 이를 이용한 마이크로 열교환기를 보여준다.

결론

열교환기는 대형 플랜트에서부터 전기/전자장치, MEMS 등의 초소형 장비에 이르기 까지 열과 관련된 시스템에는 꼭 필요한 기본 부품이다. 최근 MEMS 기술을 응용한 마이크로 열교환기의 개발이 활발히 진행되고 있으며 실제 상용품들도 등장하고 있다. 그러나, 마이크로 열교환기는 아직 개발 초기 단계로 기술적/제조적 유연성을 많이 내포하고 있어, 특히 연구자의 독창성과 창의성이 요구되는 분야이다.

열교환기 재질, 채널의 형상, 접합 기술 등은 열성능 향상에 있어 중요 연구과제이며, 국가적으로도 기술적 선점을 위해 많은 연구비를 투자하여야 한다.

참고문헌

1. Tuckerman, D.B., Pease, R.F.W., "High-Performance Heat Sinking for VLSI," IEEE Electron Device Letters, Vol., EDL-2, No.5, May, 1981
2. Ehrfeld, W., Hessel, V., Lowe, H., "Microreactors: New Technology for Modern Chemistry," Wiley-VCH, Weinheim, 2000
3. Schubert, K., Beir, W., Linder, G., Seidel, D., "Profiled microdiamonds for producing microstructures," Ind. Diamond Rev., Vol., 50, No.5, 1990
4. Loft, A., Lowe, H., Hessel, V., Ehrfeld, W., "A Standardized Modular Microreactor system," in Proceedings of the 4th International Conference on Microreaction Technology, IMRET 4, pp. 441-454, March, 2000, Atlanta, USA