

마이크로 채널 기반의 극저온용 열교환기 개발

- 윤 석 호 / 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부, shyoon@kimm.re.kr
- 최 준 석 / 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부, jschoi@kimm.re.kr
- 박 상 진 / 한국기계연구원 정책연구실, giant@kimm.re.kr

열교환 효율이 높고 소형화에 유리하여 차세대 열교환기 기술로 떠오르고 있는 마이크로 채널 기반의 열교환기를 극저온 LNG 플랜트에 적용하기 위한 연구에 대하여 소개하고자 한다.

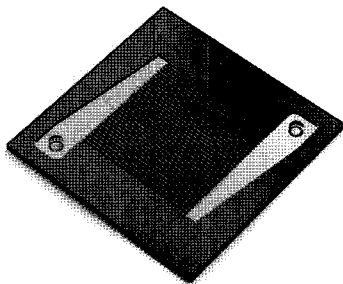
마이크로 채널 열교환기

마이크로 채널이란 특성길이가 1 μm 에서 1 mm 사이의 채널을 말한다. 1981년 Tuckerman 등에 의해 마이크로 채널 열교환 구조의 개념이 최초로 제시되었고, 이후 마이크로 채널 내에 유체를 흘려 발생 열의 효과적 분산이 가능함을 실험으로 입증한 바 있다. 최근 들어 IT, NT 기술발전으로 인한 전자부품의 소형화 추세에 따라 초소형 냉각구조의 필요성이 증대되었고, 이에 따라 마이크로 채널 기반의 열교환 구조에 대한 연구가 주목받고 있다.

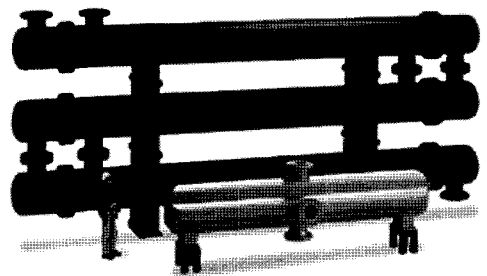
마이크로 채널 열교환 구조는 단위 체적당 전열면적이 크므로 우수한 열전달 성능을 가지며 이에 따라 소형 경량화가 가능하다는 것이 가장 큰 장점이다. 따라서 소용량의 전자냉각 분야 뿐만 아니라 마이크로 채널 구조를 가지면서 용량은 플랜트에 적용할 수 있도록 대형화하여 사용하려는 시도가

이루어지고 있다. 대용량의 열교환기가 필요한 플랜트 일수록 그림 2와 같이 소형화의 장점이 두드러지며 플랜트 기자재의 소형 경량화는 플랜트 건설 및 유지보수 등의 비용 절감에도 큰 영향을 미칠 수 있다.

마이크로 구조의 열교환기는 그 형태와 유동특성에 따라 마이크로 채널 열교환기(micro channel heat exchanger), 마이크로 관형 열교환기(micro tube heat exchanger) 및 마이크로 히트파이프 열교환기(micro heat pipe heat exchanger) 등으로 구분할 수 있다. 이 중 마이크로 채널 열교환기가 마이크로 구조의 우수한 열적성능을 가지면서 플랜트에 적용 가능한 용량으로 대형화하기에 적합한 구조로 평가받고 있다. 마이크로 채널 열교환기 중에 금속 박판에 반도체 제조 공정과 유사한 리소그래피 공정(lithography process)을 통해 화학적 에칭(chemical etching)으로 마이크로 채널을 제작하는 방식의 열교환기를 특별히 인쇄기판형 열교환기(printed circuit heat exchanger)라고 부른다. 인쇄기판형 열교환기는 레이저 등을 이용한 정밀가공 기술로 마이크로 채널을 제작하는 것보다 제조비용이 적게 들고 대량 생산이 용이한 장점이 있다. 이



[그림 1] 마이크로 채널의 구조



[그림 2] 마이크로 채널 열교환기의 소형 경량화

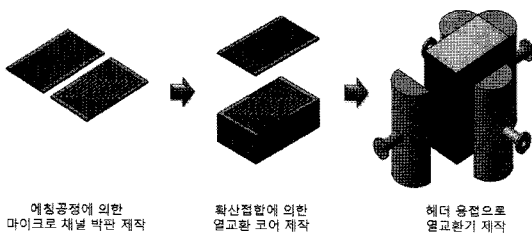


러한 방식으로 마이크로 채널이 식각된 박판을 필요한 압력과 온도에 대하여 충분한 내구성을 가지도록 적층하여 열교환기 코어(core)를 제작하는데 현재 주로 사용되는 접합 방식은 브레이징(brazing) 방식과 확산접합(diffusion bonding) 방식 두 가지가 있다. 브레이징 방식은 박판 사이에 용융접합재를 넣고 고온진공 상태에서 접합재의 용융점 이상으로 가열하면 녹은 접합재가 진공상태에서 모세관 현상에 의해 모재 사이로 기밀하게 스며들어 모재를 녹이지 않고 접합하는 기술이다. 반면 확산접합 방식은 금속판재를 적층한 후 용융시키지 않은 상태에서 이중 금속을 투입하지 않고 원자 간의 금속 결합을 이용하여 접합시키는 방식이다. 그림 4에 나타난 바와 같이 초기에는 접촉부의 물리적 변형이 일어나면서 밀착되다가 중간단계에서는 변형보다는 확산에 의해서 공극이 소실되며, 최종단계에서는 공극 내부로 확산이 일어나 잔류 공극이 소실되면서 접합이 이루어지게 된다. 확산접합 방식은 모재와 접합부가 거의 동일한 조직과 성질을 가지

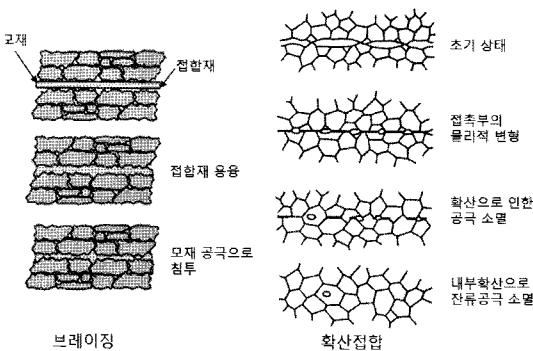
게 되므로 극저온 환경에 대한 이중 금속간의 변형을 차이로 인한 문제가 생기지 않는다는 장점이 있으나, 접합 소요시간이 길어 생산성이 떨어지는 단점이 있다. 하지만 소량 주문형으로 생산해야 하는 플랜트용 열교환기의 생산 방식으로는 적용 가능하다 할 수 있다. 위에서 언급한 특성에 따라 단위 체적당 전열면적이 넓어 열전달 성능이 우수하며, 대용량화가 가능하고, 기존 열교환기의 크기와 무게를 감소시킬 수 있으며, 극저온 조건에서의 내구성도 우수한 특성을 가지고 있으므로 가스플랜트용 열교환기의 차세대 기술로 마이크로 채널 구조를 가지고 확산접합 방식으로 제작한 인쇄기판형 열교환기가 활발히 연구되고 있다.

극저온 액화공정

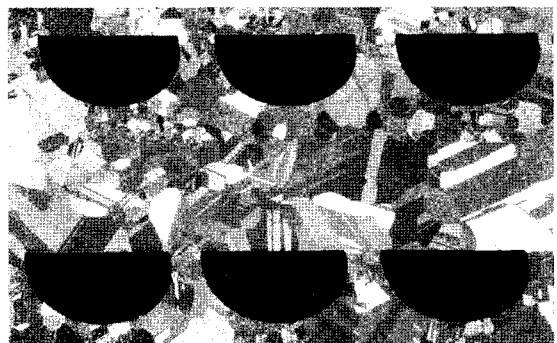
LNG(Liquefied Natural Gas)는 천연가스를 저장 및 수송을 위하여 부피를 가스 상태의 1/600로 압축하기 위해 액화한 것이다. 천연가스 수요는 지속적으로 늘고 있어 국제에너지 기구(IEA)는 2030년에 천연가스가 전세계 에너지수요의 약 28% 까지 차지할 것으로 예상하고 있다. 이에 따라 천연가스를 액화시키기 위한 LNG 플랜트의 건설 수요도 함께 증가하고 있다. 천연가스 액화공정은 LNG 플랜트 전체 설비금액의 40% 정도를 차지할 뿐만 아니라 전체 공정의 효율을 결정하는 중요한 요소이다. 특히 그 중에서도 냉각 및 액화를 위한 열교환기의 성능에 따라 전체 시스템의 효율이 정해지기 때문에 고효율 열교환기의 개발은 LNG 플랜트의 필수



[그림 3] 인쇄기판형 열교환기 제작 과정



[그림 4] 브레이징과 확산접합 방식

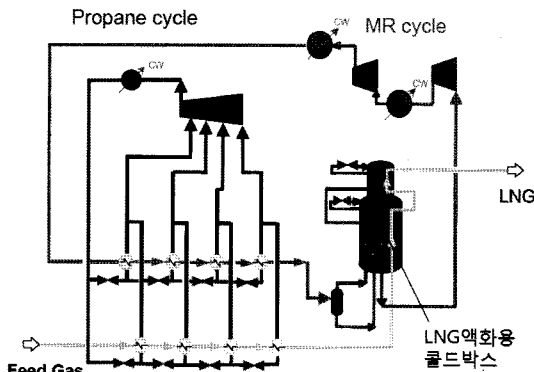


[그림 5] 확산접합 방식으로 제작된 열교환기 단면

요소가 될 수 있다.

대표적인 LNG 액화공정 중의 하나인 C3/MR 공정의 개략도를 그림 6에 나타내었다. 실제 천연가스 액화가 이루어지는 핵심요소인 쿨드박스를 구성하는 열교환기 이외에도 사이클 구성과 천연가스 냉각을 위한 다수의 열교환기가 사용되고 있음을 알 수 있다. LNG는 영하 162℃ 이하에서 액체 상태가 되므로 액화공정에 사용되는 열교환기는 그 재질부터 극저온 환경에서 내구성을 가져야 하고, 또한 이러한 극한 환경에서의 유동 및 열전달 특성이 고려되어야 한다.

현재 LNG 액화플랜트에 사용되고 있는 기존의 극저온 열교환기를 살펴보면 Spiral wound type과 Aluminum brazing plate fin type이 가장 많이 사



[그림 6] LNG 액화공정 개략도(C3/MR 공정)

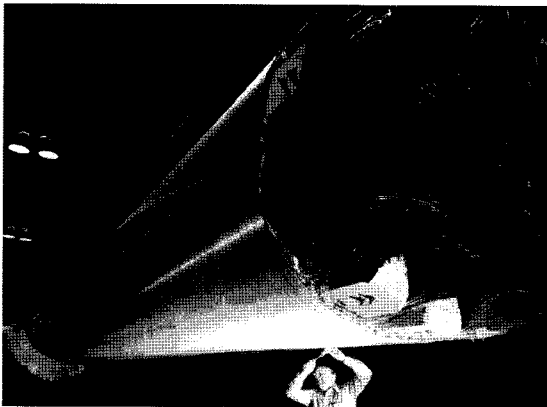
용되고 있다. Spiral wound type을 공급하는 업체는 APCI사와 Linde사가 있으며 그 상세구조는 공개되어 있지 않다. 가장 많이 사용되는 LNG 액화공정을 공급하는 APCI사의 경우 LNG 액화용 주 열교환기의 가격이 3,000만 달러(5 MPTA 액화플랜트 기준, 2005년)에 이른다.

APCI 공정 다음으로 많이 사용되고 있는 Conocophillips사의 LNG 액화공정에는 Aluminum brazing plate fin type 열교환기가 사용되고 있다. 이 방식은 LNG 생산량을 늘리고자 할 때 병렬로 증설할 수 있기 때문에 Spiral wound type에 비해 용량 증설에 유연성이 높다는 장점이 있다. 하지만 열교환 온도차 및 최고 사용가능 압력에 대해 제약이 따른다.

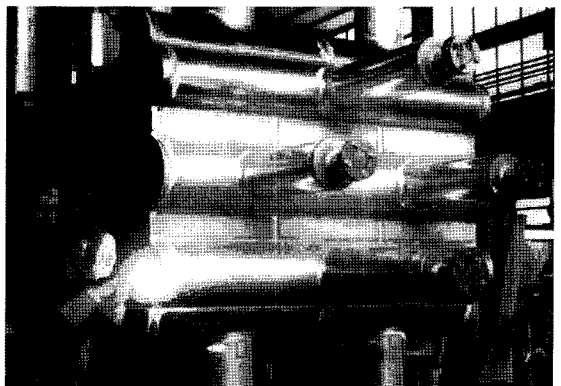
따라서, 극저온 LNG 액화공정에 확산접합을 이용한 마이크로 채널 열교환기를 적용할 수 있다면 극저온에 대한 내구성 및 고효율로 인하여 많은 장점을 가질 수 있고, 콤팩트화가 가능하여 LNG-FPSO 등의 해양플랜트에 적용하는데에도 강점을 가질 수 있다.

국내외 기술현황

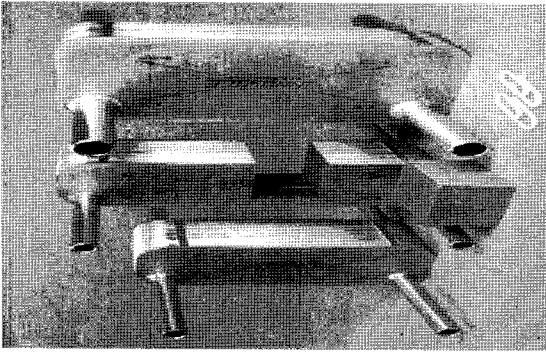
마이크로채널 열교환기의 중요한 성능 요소들은 마이크로 채널에서의 열전달 특성과 압력 강하 특성이다. 세부적으로는 채널 형상 및 유동의 형태, 다수의 미세 채널 사이의 균일한 유동 및 온도 분



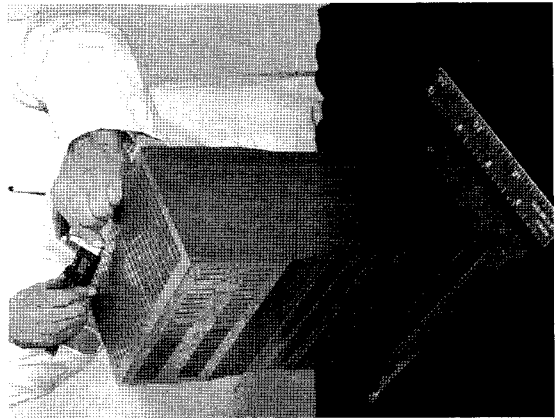
[그림 7] LNG 액화용 Spiral wound type 열교환기



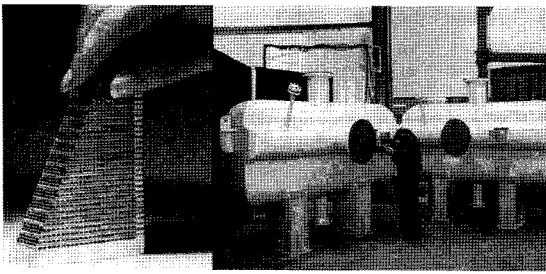
[그림 8] LNG 액화용 Aluminum brazing plate fin type 열교환기



[그림 9] 상온용 소형 마이크로 채널 열교환기



[그림 11] 미국 Velocys사의 마이크로 채널 열교환기
(출처: Velocys사 홈페이지)



[그림 10] 영국 Heatic사의 마이크로 채널 열교환기
(출처: Heatic사 홈페이지)

포에 따라 열교환기 성능이 달라지므로 이러한 요인들을 고려한 설계기술의 확립이 열교환기 개발에 필수적이다. 현재 국내 기술 수준은 상온의 소형 마이크로 채널 열교환기의 경우에 대하여 제작기술이 확보되어 있으나 플랜트에 적용할 수 있는 수준의 대용량 마이크로 채널 열교환기나 가스액화 공정 등의 극저온 환경에서 사용되는 마이크로 채널 열교환기에 대한 기술은 확보되어 있지 않다. 그림 9에 (주)이노월에서 제작한 마이크로 채널 열교환기를 나타내었다.

국제적으로는 영국의 Heatic사의 마이크로 채널 열교환기가 상업적으로 가장 앞서있다. 현재 가스 및 오일 플랜트용, 발전 플랜트용, 화학반응기 등 다양한 용도로 마이크로채널 열교환기를 제조하여 공급하고 있다. 압력은 600 bar까지 내압성능을 가지며 고온으로는 900℃까지 적용 가능한 다양한 제품을 개발하고 있다.

미국의 Velocys사는 마이크로 채널 열교환기의

적용 분야에 대해 LNG 플랜트의 액화공정용 등 다각적으로 검토하다 최근에는 청정합성연료를 제조하는 GTL(Gas-to-Liquids)나 BTL(Biomass-to-Liquids) 플랜트의 합성반응기로 이용하려는 연구에 더욱 주안점을 두고 개발하고 있다. 마이크로 채널 간의 높은 열유속으로 인하여 기존 반응기보다 단위체적당 10배 이상의 생산효율을 낼 수 있다고 주장하고 있다.

결 어

선진국 업체들의 독과점이 심해지는 플랜트 분야에 진입하여 점유율을 늘리기 위해서는 첨단 플랜트의 원천기술을 확보해야 한다. 따라서 플랜트 원천기술의 기반을 형성하는 핵심 기자재에 대한 기술을 개발해야 하며, 그 한 예로 고부가가치 LNG 플랜트 액화공정의 핵심요소인 마이크로 채널 기반의 극저온 열교환기를 들 수 있다. 고효율 열교환 구조에 대한 원천기술은 전자장치, 신재생 에너지분야 등 다양한 분야에 활용될 수 있으며 시장 파급효과가 크므로 지속적으로 연구되어야 한다.

후 기

본 연구는 국토해양부 가스플랜트사업단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다. (주)