

박 찬 우 전북대학교 기계설계공학부 교수

| e-mail : cw-park@bnu.ac.kr

송 찬 호 한국기계연구원 열공정극한기술연구실 책임연구원

| e-mail : sch@kimm.re.kr

윤 석 호 한국기계연구원 열공정극한기술연구실 책임연구원

| e-mail : shyoon@kimm.re.kr

이 글에서는 플랜트공정에서 사용되는 산업용 열교환 분야에 대한 최근 기술 동향에 대해 소개하고자 한다.

발전 플랜트의 효율을 높이기 위해서 고온부와 저온부에서의 발생하는 열교환 과정이 매우 중요하다. 이와 같이 열원과 작동 유체 사이의 열에너지를 전달하는 열교환기는 플랜트 공정효율에 큰 영향을 미치는 핵심기자재이다. 플랜트 시장의 확대에 따라 플랜트용 열교환기의 수요도 증가하고 있는데 해외 플랜트 발주는 연평균 7% 대의 지속적인 성장이 예상되고 있다. 그림 1에 나타난 산업연구원 자료에 따르면 플랜트 중 기자재 비중과 기자재 수요가 동반하여 증가하고 있으며 2015년까지 플랜트 기자재의 총 수요는 17%까지 성장으로 파악되고 있다. 열교환기 시장 규모만으로 한정하여 살펴보면 과거 약 9년 동안 4배 이상 확대될 정도로 그 규모가 매우 빠르게 성장하고 있음을 살펴 볼 수 있다(그림 2). 열교환기는 대표적

인 수출형 플랜트 기자재이며 대표적인 수출국은 일본, 중국 등이고, 수입국은 EU 등이다.

플랜트용 열교환기는 주로 Shell & Tube type이 많이 사용되고 있고, 국내 업체들의 주요 수출 품목 역시 Shell & Tube type 열교환기이다. 그러나 비교적 제작이 용이한 Shell & Tube type 열교환기는 중국 및 인도 업체가 급속히 추격하고 있어 가격 경쟁력이 떨어지고 있다. 글로벌 경제위기를 기점으로 국내 열교환기 수출이 급격히 하락한 가운데 열교환기의 형태도 다변화되어 가고 있다. 초고효율 가스액화 플랜트, 연료전지 발전 플랜트 등의 신기술 에너지 플랜트의 확대로 초고온/고압 환경에 사용되는 열교환기, 초고효율 콤팩트 열교환기 등 고부가가치 열교환기에 대한 니즈가 증가하고 있는 상황이다. 또한 부식에

강하면서도 열전도율을 향상시킨 폴리머 열교환기 등의 적용이 부각되고 있다. 따라서 고부가가치 열교환기 원천기술 개발에 의한 국내업체들의 경쟁력 향상이 시급한 상황이다.

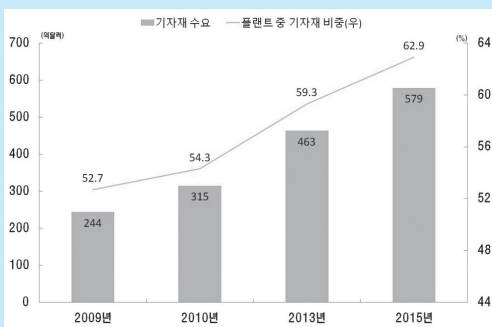


그림 1 해외 플랜트 수주 전망에 따른 기자재수요

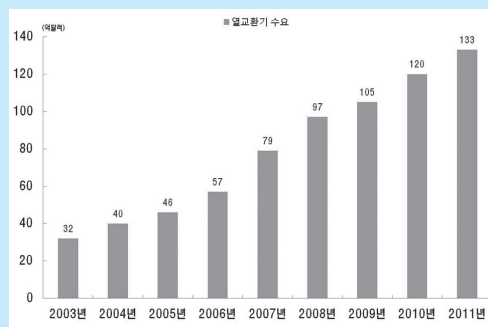


그림 2 글로벌 열교환기 전망에 따른 수요

표 1 셀앤티브 대 판형 열교환기 비교

| 종류 | 셀앤티브 | 판형 열교환기 | | |
|--------|-------|---------|------|-------|
| | | 가스켓 | 브레이징 | 완전용접식 |
| 제조방식 | 튜브 | 판형 | | |
| 용량 | 소형~대형 | 소형~대형 | 소형 | 소형~대형 |
| 사용온도 | 광범위 | 제한적 | 제한적 | 광범위 |
| 고압 내구성 | 높음 | 낮음 | 낮음 | 높음 |
| 경제성 | 낮음 | 높음 | | |

플랜트용 열교환기 기술

본 장에서는 일반적으로 플랜트에서 사용되고 있는 열교환기로 Shell & Tube type 열교환기, Plate type 열교환기, Plate-fin type 열교환기, PCHE(인쇄기판형 열교환기)를 소개하고자 한다.

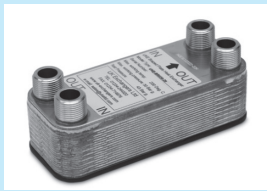
■ Shell & Tube type heat exchanger 와 Plate type heat exchanger

Shell & Tube type은 원통다관식 열교환기로 불리며, 동체 내부에 다수의 전열관을 배치하고 전열관벽을 통해 동체측 유체와 관내 유체 간에 열전달이 이루어지는 형태이다. 제작이 용이하고 가격이 저렴하나 밀집도가 낮아 부피가 크고 부가가치가 낮은 단점이 있다.

판형열교환기(Plate type heat exchanger)는 요철형으로 프레스 성형된 전열관을 포개어 교대로 유체가 흐르게 하는 구조를 가지고 있다. 개스킷형은 전열관을 분해하여 완전한 청소가 가능하므로 스케일에 의한 성능감소를 방지할 수 있으며, 전열관 매수의 가감이 용이하여 용량 조절이 가능하다. 브레이징 형(용접형)은 내부 청소나 용량 조절이 어려우나 개스킷형에 비해 보다 높은 내압성을 지니는 특징이 있다. 판형열교환기 주요 업체로는 Alfa Laval(Sweden), GEA(Germany), Hisaka(Japan), APV(U.K), SWEP(US) 등이 있으며, 이중 스웨덴의 Alfa Laval사가 세계 판형열교환기 시장의 60% 이상을 점유하고 있다. 각 제작 회사마다 개스킷의 구조, 전열관의 형상

등에 대해 차별화된 기술과 적용 분야를 가지고 있다. 판형열교환기 최근 기술 개발 동향으로는 전열관 면적이 4.0m²에 이르는 초대형화 제품 개발, 미세 박판을 이용한 초고효율 판형열교환기 개발, 고압/고온에 적용 가능한 판형열교환기 개발 등이 있다. 대용량 고집적형 판형열교환기는 체적효율이 설비비에 큰 영향을 미치는 해양모듈에 특히 중요하며, 고압/고온에 적용 가능한 판형열교환기는 해양온도차발전, 폐열회수발전 등에 적용될 수 있다. 초고효율 판형열교환기는 선박용, 발전 시스템 등에서 기존의 shell & tube type을 대체하여 시스템의 소형화에 기여할 수 있다. 국내 판형열교환기 기술은 중소기업 중심으로 개발되고 있으며, 건물 냉난방용 개스킷형 판형열교환기와 소형의 용접식 판형열교환기가 주 생산품이다. 전열관 설계기술은 선진국 수준에 가까우나, 전열관의 대면적화와 고온/고압 환경에 적용 가능한 제품 개발이 과제로 남아있다. 현재 시중에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 브레이징 타입 판형 열교환기는 Sus 전열관을 동 브레이징한 판형열교환기를 사용되고 있다. 그러나 이들 열교환기의 가장 큰 문제점인 고온 고압의 사용 환경 조건 대한 문제점과 제작방법의 한계 및 가격변동에 따른 소비자 부담 등의 현실적으로 많은 제한을 받는다. 즉, 기존에 사용되는 동 브레이징 열교환기는 컴팩트하고 효율적이며 제작이 상대적으로 간단하지만, 전열관 소재보다 용융점이 상대적으로 낮은 접합모재(동판)를 사용하여 전열관에 접합시켜 제작이 되고 있기 때문에 고온/고압 환경에서 열변형 및 모재의 크랙 등이 발생되어 내·외부 기밀이 파괴되어 제품의 안정성과 신뢰성에 가장 취약한 문제점이 있을 수 있다.

최근 국내 판형 열교환기 업체인 삼일 산업에서는 완전 용접 제조방식 판형 열교환기를 개발하여 기존 동브레이징 판형 열교환기의 문제점을 해결하고 있다. 기존의 동과 같은 용접모재가 필요 없는 Sus 전열관을 직접 붙인 제살용접 방식의 자동용접 방식 제조



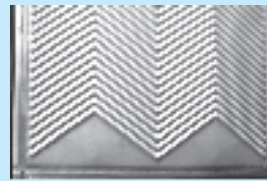
동브레이징판형열교환기

고온 및 고압에 의한 크랙
열응력 및 진동에 취약
대용량 제작 불가



셸앤튜브열교환기

효용도 낮음
부품의 크기가 큼
제작단가가 고가
적정용량 선정이 불리함



완전 용접식 판형 열교환기

- 크랙/열변형 제거
- 초대형 생산 제조기술 확보
- 고효율 성능 확보
- 광범위한 사용환경
- 가격 경쟁력 제고

사에 의해 독점 생산되는 spiral wound type heat exchanger에 비해 생산 가능한 회사가 많고 액화 천연가스 생산량 증설 시 병렬로 열교환기를 추가하여 상대적으로 용이하게 용량을 늘릴 수 있는 장점이 있다. 또한 액화공정의 예냉(precooling) 영역에서는 spiral wound

그림 3 완전 용접식 판형열교환기(삼일산업)

기술을 확보하여 고온/고압 환경에서 고온의 열과 고압에 의한 크랙 및 열변형이 완벽히 제거되도록 구조적인 설계를 제품을 개발하였다.

완전용접식 판형열교환기는 전열판을 적층을 하는 방식으로 제조하기 때문에 용량 제한이 없고, 자동용접 제조방식을 적용하여 용접시간 단축에 따른 생산성 향상, 불량률을 최소화하였다. 특히, 고온 고압에 우수성을 지니고 있기 때문에 향후 플랜트 산업에 사용되는 셸앤튜브 방식 열교환기의 대체품으로 적합할 것으로 예상된다.

■ Plate-fin type heat exchanger

플레이트 핀 열교환기(Plate-fin type heat exchanger)는 콤팩트 열교환기로 분류되며 고효율/고집적 형태로 소형경량화가 가능하고 극저온/항공분야에 많이 사용된다. 플레이트 핀 열교환기는 플레이트와 핀으로 이루어진 열교환기이다. 극저온 분야로는 고효율 열교환기가 필요한 천연가스 액화 플랜트의 주냉각 액화용 열교환기로 사용된다. 아직까지는 LNG 플랜트 시장을 절대적으로 지배하고 있는 APCI사의 spiral wound type heat exchanger가 극저온 가스액화용 열교환기의 대부분을 차지하고 있지만, 플레이트 핀 열교환기는 APCI 프로세스 다음의 점유율을 가지고 있는 cascade 프로세스의 주냉각 열교환기로 사용되며 APCI

heat exchanger보다 우수한 열전달 특성을 가지고 있으므로 주 액화 열교환기로 spiral wound type을 사용하는 공정에서도 precooling용으로는 플레이트 핀 열교환기를 사용하는 경우가 있다. 그림 4에 LNG 플랜트에 사용되는 플레이트 핀 열교환기의 외형을 나타내었다.

고온용 플레이트 핀 열교환기는 주로 고온부 열원으로부터 열을 회수하여 저온부의 열원에 공급하는 재생 사이클 열교환기(recuperator)로 사용되며 복합 화력 발전 및 항공기, 선박용 가스터빈에 적용된다. 주로 GE, Rolls-Royce 등의 업체가 가스터빈 시장을 주도하고 있으며 Sumitomo, Serck Como, HS Marston 등이 고온용 플레이트 핀 열교환기를 공급하고 있다. 항공용 가스터빈 엔진에서는 공냉식 오일 쿨러(air-cooled oil cooler) 또는 공냉식 IDG 오일 쿨러(air cooled integrated drive generator oil cooler) 등에 플레이트 핀 열교환기가 사용되고 있으며, 선박용 엔진에서는 인터쿨러 및 재열기에 플레이트 핀 열교환기가 사용되고 있다.

■ PCHE(Printed Circuit Heat Exchanger)

현재 활발히 플랜트에 사용되고 있는 유형은 아니지만 비교적 최근에 개발되고 있는 열교환기로 인쇄회로판 열교환기(printed circuit heat exchanger, PCHE)가 있다. PCHE는 전자회로에 회로를 인쇄하는 방식과 유

사하게 열교환 유로를 금속 박판에 화학적 에칭(chemical etching)으로 마이크로 채널 형태를 식각하기 때문에 붙여진 이름이다. 이러한 방식으로 열교환 유로를 금속박판에 식각하면 레이저 등 기계적 가공을 이용한 정밀가공 기술로 마이크로 채널을 제작하는 것보다 제조비용이 적게 들고 대량 생산이 용이한 장점이 있다. 그림 5에 마이크로 채널을 식각한 SUS 박판과 각 가공방법에 의한 채널 형상 단면을 나타내었다. 이렇게 만들어진 박판을 적층하고 접합을 하여 열교환 코어(core)를 만드는 데 브레이징(brazing) 방식 또는 확산접합(diffusion bonding) 방식을 사용한다. 극저온/초고온 또는 고압 환경 등의 극한환경에서 사용되는 열교환기를 만들기 위해서는 주로 확산접합 방식을 주로 사용한다. 확산접합이란 금속판재를 적층한 후 용융시키지 않은 상태에서 이중 금속을 투입하지 않고 원자 간의 금속 결합을 이용하여 접합시키는 방식이다. 확산접합 방식은 모재와 접합부가 거의 동일한 조직과 성질을 가지게 되므로 극저온 또는 초고온 환경에 강하고 기존 브레이징 관형열교환기에 비해 내압성이 월등히 우수하고, 온도차에 의한 열충격이 강해 허용 온도범위가 넓다.

또한, PCHE는 유로 가공이 용이하기 때문에 주로 고집적 형태로 만들 수 있는 마이크로 채널 구조로 유로를 제작하게 된다. 마이크로 채널 구조는 단위 체적당 전열면적이 크기 때문에 소형화가 가능하다는 것이 가장 큰 장점이다. 대용량의 열교환기가 필요한 플랜트 일수록 소형화로 인한 플랜트 건설 및 유지보수 등의 비용 절감 효과가 크게 나타난다. LNG-FPSO에 사용되는 액화 플랜트처럼 공간의 제약이 큰 플랜트 환경에서도 열교환기의 소형화는 필수적이다. 현재 영국의 Heatric사의 PCHE가 상업적으로는 가장 앞서있다. 주로 고온/고압 환경에서 작동해야 하는 가스 및 오일 플랜트, 발전 플랜트, 화학반응기, 심해저 플랜트 등 다양한 용도로 PCHE를 제조하여 공급하고 있으며 최고 내압성능은 600bar, 최고온도조건은 900℃까지의 제품을 개발하였다. 초고온 환경에서는 인코넬과

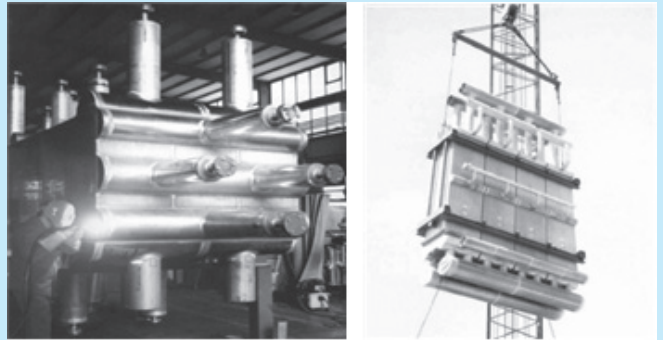


그림 4 극저온용 플레이트 핀 열교환기 외형(좌), 콜드박스에 장착되고 있는 모습(우)

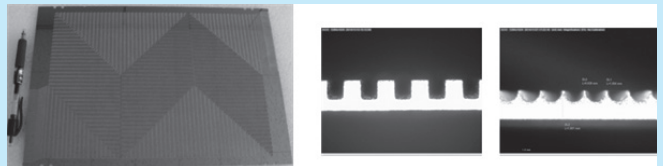


그림 5 마이크로 채널을 식각한 SUS 박판, 기계적 가공(좌)과 화학적 가공(우)에 의한 채널

같은 특수한 재질로 열교환기가 제작되어야 하는데 최근에 한국기계연구원에서는 인코넬 617을 이용한 확산접합기술을 개발하여 PCHE를 개발한 바가 있다.

■ 열전도성 폴리머 열교환기

플랜트용 열교환기로서 해수 등의 부식에 노출되는 열교환기는 티타늄과 같은 고가의 재질에 의존하게 된다. 이러한 부식에 강한 소재로서 플라스틱 소재를 이용하여 열교환기를 만들려고 하는 시도가 이루어지고 있다. 단순한 플라스틱 소재는 열전도도가 매우 취약하므로 그 특성을 비약적으로 발전시킨 열전도성 폴리머 복합소재가 주목 받고 있는데 열전도성 폴리머 복합소재는 폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS) 등의 기존 플라스틱 소재에 전기/열전도 특성이 뛰어난 탄소계열의 입자 혹은 섬유를 첨가제로 추가해서 제조된다. 근래 나노기술의 발달로 카본블랙(Carbon black), 탄소나노튜브(CNT), 그래핀(Graphene) 등 높은 전기/열 전도율을 가지는 나노입자의 대량생산이 가능해졌으며 생산단가도 비약적으로 감소하고 있으므로 폴리머 복합소재의 생산단

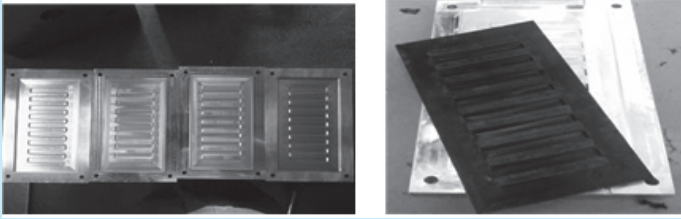


그림 6 열전도성 폴리머 재질 요철형 판형열교환기 금형 몰드 및 제작품 (전북대학교)

가도 획기적으로 감소시킬 수 있게 되었다.

현재 쉽게 제작 구현이 가능하고 가벼우며 상온에서 스테인리스강에 버금가는 열전도율($\sim 15\text{W/mK}$)을 가지는 상용화된 폴리머 복합소재를 구할 수 있으며 제조사 측에서는 전자장비 방열판, 히트파이프, 열교환기 등 다양한 제품에 적용할 수 있다고 선전하고 있다(Coolpolymers사의 E시리즈, LG화학의 LUCON 제품군 등). 과거의 폴리머열교환기와 관련된 연구는 주로 해수 혹은 화학약품 처리 등 부식성 액체 취급용에 국한하여 수행이 되었다. 낮은 열전달 성능에도 불구하고 내부식성이 뛰어난 폴리머 소재로 고가의 티타늄 합금을 대체하기 위한 연구가 수행되었다. 특히 George Fischer®, Fluorotherm®, Ametek® 등의 회사에서 화학약품 제조, 처리 공정 중에 사용되는 다양한 폴리머열교환기를 제작 판매하고 있으며, 주로 내부식성이 높은 PVDF, PTFE, PP 등의 재료로 Immersion Type, Shell-tube Type 등의 다양한 용량의 산업용 열교환기를 양산하고 있다. 공조용 냉난방 시스템에 적용되는 폴리머열교환기는 유럽 등지에서 활발하게 연구된 바 있으며, 특히 스웨덴의 AB Segerfrojld® 사는 두께 2.8mm의 PP 박막 간의 접합 및 용접으로 조립된 Plate-fin 형태의 MonoBlock 제품군을 생산하고 있다. 위와 같은 사례들은 열전도성 폴리머 복합소재가 아니라 열교환기 재질을 단순히 폴리머로 대체하는 수준이다.

열전도성 폴리머 복합소재를 사용하여 제작된 열교환기의 상업화는 아직까지는 알려진 바가 없으나, 최근 연안발전소 냉각용 해수 열교환기를 기존 티타

늄 혹은 알루미늄 합금에서 고전도성 폴리머 물질로 대체 시 열교환 시스템의 제작단가 및 운전 비용을 비교 분석한 결과가 발표된 바 있다(미국 Maryland 대학). 또한 이를 lab-scale 수준에서 직접 구현하여 성능평가를 수행하였으며, 폴리머 열교환기의 적용 분야가 연안발전소 냉각시스템 뿐만 아닌 OTEC(Ocean Thermal Energy Conversion) 등 해양플랜트의 기자재로 다양하게 활용할 수 있다고 주장한 바 있다.

국내에서는 전북대학교 및 한국기계연구원에서는 판형열교환기 형태의 폴리머 복합소재 열교환 구조를 개발하는 연구를 수행하고 있다. 기존 스테인리스강 판형열교환기와 비교하여 동등한 수준의 열전달 성능을 가지는 폴리머 복합소재의 개발, 고집적 유로형상 설계 기술 및 대면적 열교환기 단위 박판 제조 기술에 관한 기초 연구를 수행하였고 플랜트 배가스 열교환기 등의 상용화에 적용성 연구를 진행 중이다. 그림 6은 표면 요철이 있는 열전도성 폴리머(HDPE) 재질 판형 열교환기 전열판을 제작하기 위해서 금형틀과 전열판 제작품을 나타낸다.

플랜트에 사용되고 있는 열교환기는 플랜트의 성장과 더불어 그 수요가 매우 증가하고 있다. 또한 플랜트가 점차 고도화 되어가고 있고 이에 따라 작동환경이 초고온, 내부식성 등 극한 조건에 대응하도록 요구되어 가고 있다. 극한환경 조건에 적합한 재질, 설계, 공정의 개발은 열교환기의 부가가치를 높일 수 있으므로 지속적인 연구가 필요하겠다. 초고온고압 환경에 적합한 PCHE와 같은 열교환기는 향후 플랜트의 핵심기기로 더욱 주목해야 할 것으로 예상된다. 또한 폴리머열교환기는 전 세계 열교환기 시장의 약 1/4에 해당되는 저온/저압 환경에서 작동하는 열교환기에 적용할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 특히 나노기술의 발전과 기능성 폴리머 소재 개발에 따라 기존 금속을 대체하는 수준이 아니라, 열교환기의 설계 패러다임을 바꾸는 방향으로 발전될 가능성이 매우 높을 것으로 판단된다.