

# 플랜트에서의 열교환기 기술현황 및 폴리머 열교환기 응용

Plant Technology



**송찬호**

sch@kimm.re.kr

서울대학교 기계공학과 공학박사  
한국기계연구원, 책임연구원



**윤석호**

shyoon@kimm.re.kr

서울대학교 기계공학과 공학박사  
한국기계연구원, 책임연구원



**오동욱**

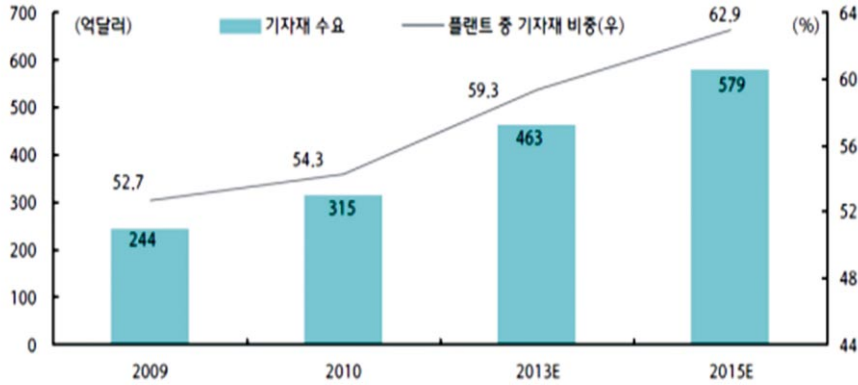
dwoh@Chosun.ac.kr

서울대학교 기계공학과 공학박사  
조선대학교, 조교수

## 1. 서언

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 증 기자재 비중과 기자재 수요가 동반하여 증가하고 있으며 2015년까지 플랜트 기자재의 총 수요는 17%까지 성장할 것으로 예상되고 있다.

열교환기 시장규모만으로 한정하여 살펴보면 과거 약 9년 동안 4배 이상 확대될 정도로 그 규모가 매우 빠르게 성장하고 있음을 살펴 볼 수 있다(그림 2). 열교환기는 대표적인 수출형 플랜트 기자재이며 대표적인 수출국은 일본, 중국 등이고, 수입국은 EU 등이다.



자료 : 산업연구원

[그림 1] 해외 수주에 따른 향후 플랜트 기자재 수요 전망

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 확대에 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 국내 업체들의 경쟁력 향상이 시급한 상황이다.

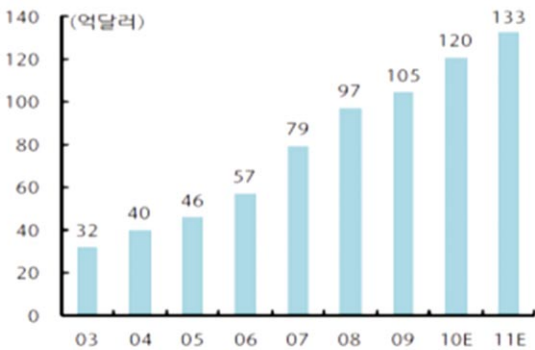
환기 등 고부가가치 열교환기에 대한 니즈가 증가하고 있는 상황이다. 또한 부식에 강하면서도 열전도율을 향상시킨 폴리머 열교환기 등의 적용이 부각되고 있다. 따라서 고부가가치 열교환기 원천기술 개발에 의한 국내 업체들의 경쟁력 향상이 시급한 상황이다.

## 2. 플랜트용 열교환기 기술

본장에서는 일반적으로 플랜트에서 사용되고 있는 열교환기로 Shell & Tube type 열교환기, Plate type 열교환기, Plate-fin type 열교환기, PCHE(인쇄기판형 열교환기)를 소개하고자 한다. 특히 PCHE는 최근에 초고온에 따른 재질의 변화로 SUS 재질 외에 인코넬 소재를 이용하여 열교환기를 개발하였다.

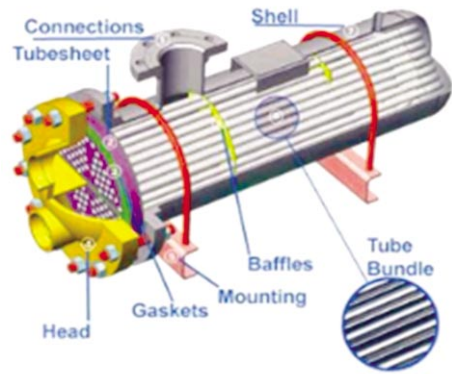
### 2.1 Shell & Tube type heat exchanger

Shell & Tube type은 원통다관식 열교환기로 불리며, 그림 3에 나타난 바와 같이 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.



자료 : UN DATA, 토러스투자증권

[그림 2] 글로벌 열교환기 시장 규모



[그림 3] Shell & Tube type heat exchanger

## 2.2 Plate type heat exchanger

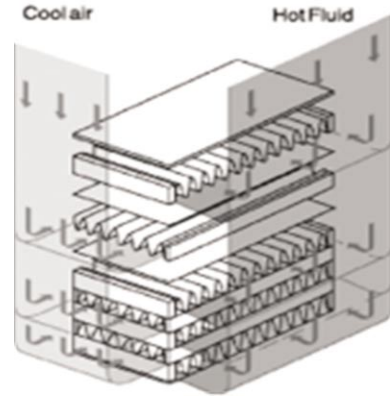
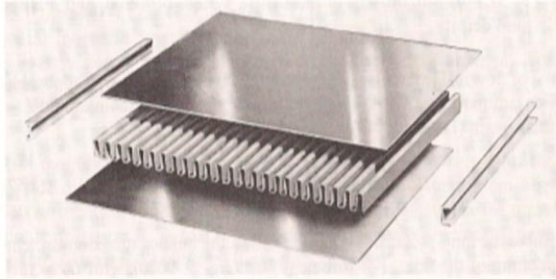
판형열교환기(Plate type heat exchanger)는 그림 4와 같이 요철형으로 프레스 성형된 전열판을 포개어 교대로 유체가 흐르게 하는 구조를 가지고 있다. 개스킷형은 전열판을 분해하여 완전한 청소가 가능하므로 스케일에 의한 성능감소를 방지할 수 있으며, 전열판 매수의 가감이 용이하여 용량 조절이 가능하다. 용접형은 내부 청소나 용량 조절이 어려우나 개스킷형에 비해 보다 높은 내압성을 지니는 특징이 있다.

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, 전열판의 형상 등에 대해 차별화된 기술과 적용 분야를 가지고 있다. 판형열교환기 최근 기술 개발 동향으로는 전열판 면적이 4.0 m<sup>2</sup>에 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 시



[그림 4] 플랜트용 판형열교환기



[그림 5] Plate fin heat exchanger 개념도



[그림 6] Spiral wound type heat exchanger

스탬 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. 전열판 설계 기술은 선진국 수준에 가까우나, 전열판의 대면적화와 고온/고압 환경에 적용 가능한 제품 개발이 과제로 남아 있다.

### 2.3 Plate-fin type heat exchanger

플레이트 핀 열교환기(Plate-fin type heat exchan-



[그림 7] 극저온용 플레이트 핀 열교환기 외형(좌), 콜드박스에 장착되고 있는 모습(우)



[그림 8] 고온용 플레이트 핀 열교환기 (출처: 스미토모 사 홈페이지)

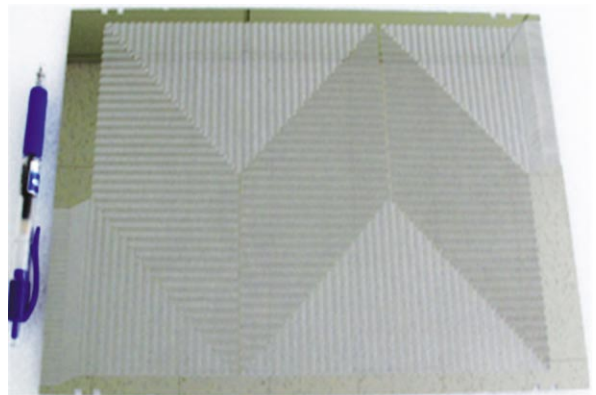
ger)는 콤팩트 열교환기로 분류되며 고효율/고집적 형태로 소형경량화가 가능하고 극저온/항공분야에 많이 사용된다. 플레이트 핀 열교환기는 그림 5에 나타낸 바와 같이 플레이트와 핀으로 이루어진 열교환기이다. 극저온 분야로는 고효율 열교환기가 필요한 천연가스 액화 플랜트의 주냉각 액화용 열교환기로 사용된다. 아직까지는 LNG 플랜트 시장을 절대적으로 지배하고 있는 APCI사의 spiral wound type heat exchanger(그림 6)가 극저온 가스액화용 열교환기의 대부분을 차지하고 있지만, 플레이트 핀 열교환기는 APCI 프로세스 다음의 점유율을 가지고 있는 cascade 프로세스의 주냉각 열교환기로 사용되며 APCI사에 의해 독점 생산되는 spiral wound type heat exchanger에 비해 생산 가능한 회사가 많고 액화천연가스 생산량 증설시 병렬로 열교환기를 추가하여 상대적으로 용이하게 용량을 늘일 수 있는 장점이 있다. 또한 액화공정의 예냉(precooling) 영역에서는 spiral wound heat exchanger보다 우수한 열전달 특성을 가지고 있으므로 주 액화 열교환기로 spiral wound type을 사용하는 공정에서도 precooling용으로는 플레이트 핀 열교환기를 사용하는 경우가 있다. 그림 7에 LNG 플랜트에 사용되는 플레이트 핀 열교환기의 외형을 나타내었다.

고온용 플레이트 핀 열교환기는 주로 고온부 열원으로 부터 열을 회수하여 저온부의 열원에 공급하는 재생 사이클 열교환기(recuperator)로 사용되며 복합화력 발전 및 항공기, 선박용 가스터빈에 적용된다. 주로 GE,

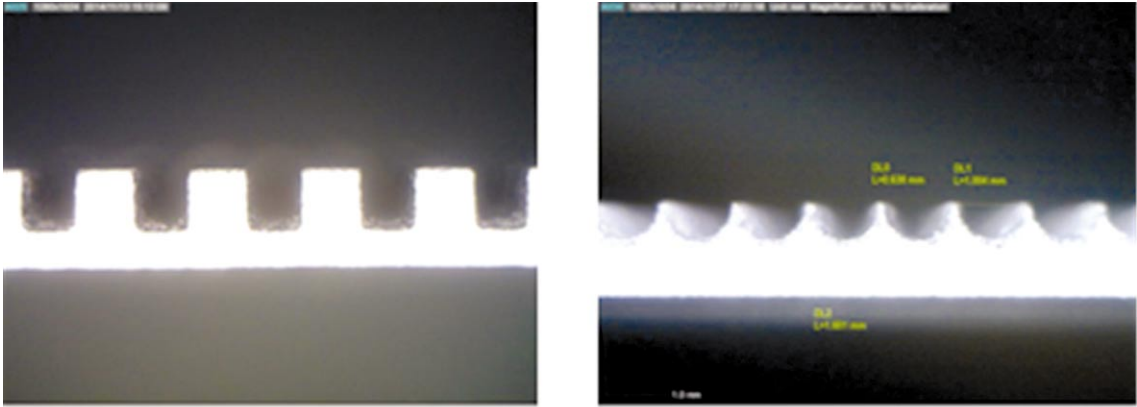
Rolls-Royce 등의 업체가 가스터빈 시장을 주도하고 있으며 Sumitomo, Serck Como, HS Marston 등이 고온용 플레이트 핀 열교환기를 공급하고 있다. 항공용 가스터빈 엔진에서는 공냉식 오일 쿨러(air-cooled oil cooler) 또는 공냉식 IDG 오일쿨러 (air cooled integrated drive generator oil cooler)등에 플레이트 핀 열교환기가 사용되고 있으며, 선박용 엔진에서는 인터쿨러 및 재열기에 플레이트 핀 열교환기가 사용되고 있다.

#### 2.4 PCHE(Printed Circuit Heat Exchanger)

현재 활발히 플랜트에 사용되고 있는 유형은 아니지만



[그림 9] 마이크로 채널을 식각한 SUS 박판



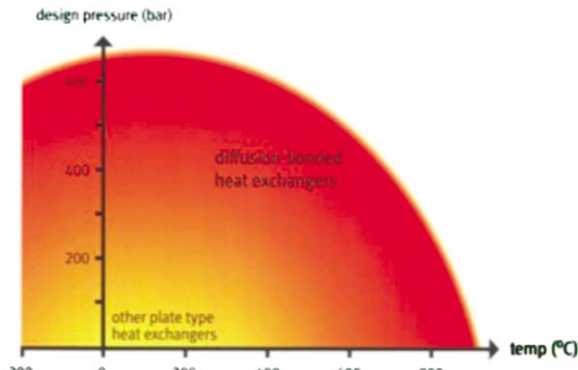
[그림 10] 기계적 가공(좌)과 화학적 가공(우)에 의한 채널 형상

비교적 최근에 개발되고 있는 열교환기로 인쇄회로판형 열교환기(printed circuit heat exchanger, PCHE)가 있다. PCHE는 전자기판에 회로를 인쇄하는 방식과 유사하게 열교환 유로를 금속 박판에 화학적 에칭(chemical etching)으로 마이크로 채널 형태를 식각하기 때문에 붙여진 이름으로 그림 9에 마이크로 채널을 식각한 SUS 박판을 나타내었다. 이러한 방식으로 열교환 유로를 금속박판에 식각하면 레이저 등 기계적 가공을 이용한 정밀가공 기술로 마이크로 채널을 제작하는 것보다 제조비용이 적게 들고 대량 생산이 용이한 장점

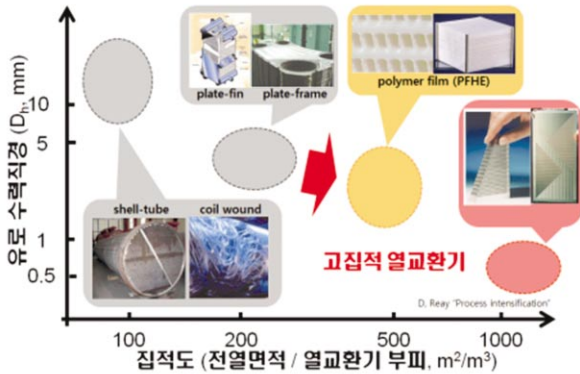
이 있다. 가공방법에 의한 채널 형상 단면을 그림 10에 나타내었다.

이렇게 만들어진 박판을 적층하고 접합을 하여 열교환 코어(core)를 만드는데 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 이종 금속을 투입하지 않고 원자 간의 금속결합을 이용하여 접합시키는 방식이다. 확산접합 방식은 모재와 접합부가 거의 동일한 조직과 성질을 가지게 되므로 극저온 또는 초고온 환경에 강하고 그림 11에 나타낸 바와 같이 기존 브레이징 판형열교환기에 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(그림 12). 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.



[그림 11] 확산접합 방식으로 제작된 열교환기의 허용 압력 및 온도범위



[그림 12] 열교환기 형태에 따른 수력직경 및 집적도



[그림 13] 확산접합 방식으로 제작된 인쇄기판형 열교환기 (한국기계연구원)



[그림 14] 영국 Heatric사에서 제작한 플랜트용 PCHE

현재 영국의 Heatric사의 PCHE가 상업적으로는 가장 앞서있다. Heatric사에서 제작한 플랜트용 대용량 PCHE를 그림 14에 나타내었다. 주로 고온/고압 환경에서 작동해야 하는 가스 및 오일 플랜트, 발전 플랜트, 화학반응기, 심해저 플랜트 등 다양한 용도로 PCHE를 제조하여 공급하고 있으며 최고 내압성능은 600 bar, 최고 온도조건은 900℃까지의 제품을 개발하였다.

초고온 환경에서는 인코벨과 같은 특수한 재질로 열교환기가 제작되어야 하는데 최근에 한국기계연구원에서는 인코벨 617을 이용한 확산접합기술을 개발하여

PCHE를 개발한 바가 있다(그림 15).

### 3. 열전도성 폴리머 열교환기

#### 3.1 폴리머 열교환기 소재

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.



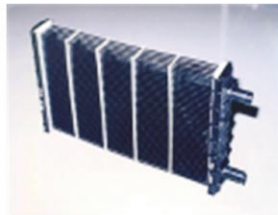
[그림 15] 확산접합설비 및 인코넬 열교환기(한국기계연구원)

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 생산단가도 획기적으로 감소시킬 수 있게 되었다. 폴리머 복합소재에서 원 폴리머 소재 대비 첨가제의 비율이 높아지면 열물성 외에 다른 기계적인 물성도 변하며 이는 제품 생산성 및 물성 측면에서 바람직하지 않

다. 첨가제의 증가로 인하여 용융 시 점성의 증가로 인한 사출, 압출 등의 생산성이 떨어지며, 복잡한 형상의 제품을 만들기 위하여 보다 높은 사출 압력이 필요하게 된다. 또한 취성(Brittleness)의 증가로 충격강도가 낮아지게 되어 제품의 기계적인 내구성 및 신뢰성이 떨어진다. 이와 같은 물성 변화 외에 탄소나노튜브와 같은 종횡비가 극단적인 물질을 첨가제로 이용하는 경우 첨가제가 충전방향으로 정렬하기 때문에 발생하는 문제인 물성의 비등방성이 생긴다. 이러한 단점에도 불구하고 쉽게 제작 구현이 가능하고 가벼우며 상온에서 스테인리스강에 버금가는 열전도율(~15 W/mK)을 가지는 상용화된 폴리머 복합소재를 구할 수 있으며 제조사 측에서는 전자장비 방열판, 히트파이프, 열교환기 등 다양한 제품에 적용할 수 있다고 선



Fiber composite heat sink



[그림 16] 열전도성 폴리머 복합재료 적용 예





[그림 17] 대향류 열교환기의 열전달 및 열저항 구성

$$\frac{1}{U_{overall}} = \frac{t}{k_{HXwall}} + \frac{1}{h_{hot}} + \frac{1}{h_{cold}}$$

전하고 있다(Coolpolymers사의 E시리즈, LG화학의 LUCON 제품군 등).

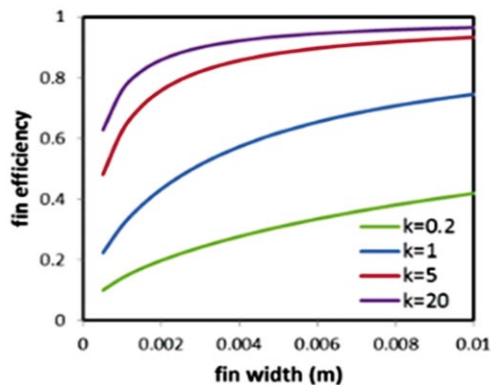
### 3.2 폴리머 열교환기 열유동 설계

앞장에서 언급한 바와 같이 폴리머 원 재료에 열전도성 첨가제의 추가는 여러 가지 문제로 첨가량이 제한을 받기 때문에 현재의 기술 수준으로는 열교환기로 제작할 수 있는 열전도성 폴리머 소재의 최대 열전도율은 약 5 W/mK 이하로 판단된다. 이는 상온에서 스테인리스강의 1/3 정도 수준이다. 기존 금속 열교환기와 비교하여 상대적으로 낮은 열전도율을 극복하고 동등하거나 향상된 열전달 성능을 내기 위해서는 폴리머열교환기 설계 시 전열면적을 높이는 고집적 유로 설계 등 기존 열교환기 설계와는 다른 접근 방식의 열유동 설계가 필요하다. 일반적으로 알루미늄과 같은 높은 열전도율을 가지는 금속으로 제작된 열교환기는 전도열전달에 의한 열저항이 대류열전달에 의한 열저항과 비교하여 무시할 수 있을 만큼의 작은 값을 가진다. 하지만 낮은 열전도율을 가지는 소재로 열교환기를 만들 경우, 대류열전달에 의한 열저항값에 따라서 열교환기 재료의 열전도율이 전체 총괄열전달에 영향을 미치거나 또는 안 미칠 수도 있다. 예를 들면 판의 두께가 0.5 mm인 단순 판형열교환기에서 '뜨거운 유체'와 '차가운 유체' 쪽의 대류열전달계수가 동일하게 100W/m<sup>2</sup>K인 경우에는 재료의 열전도율이 2 W/mK인 폴리머열교환기와 그보다 큰 열전도율을 가지는 알루미늄 열교환기간의 총괄열전달계수의 차

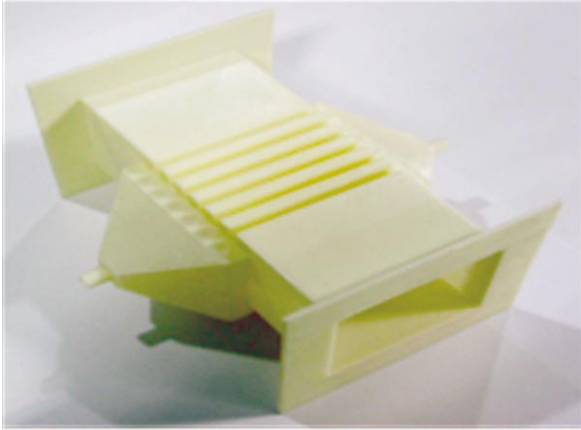
이가 1% 미만으로 계산된다.

반면 유체 측의 대류열전달계수가 2,000 W/m<sup>2</sup>K라면 폴리머열교환기는 알루미늄 열교환기와 비교하여 20% 낮은 총괄열전달계수를 가지게 된다. 즉, 열교환기의 사용환경에 따라서 요구되는 재료의 최소 열전도율이 존재하며, 일반적으로 낮은 대류열전달계수 환경에서 폴리머열교환기의 적용이 바람직하다. 이 때문에 폴리머로 제작한 열교환기의 상용화에 성공한 예는 현재까지는 주로 대류열전달 계수가 낮은 자연대류용 방열판이나 저유속 환경에서 작동되는 환기용 현열회수장치정도이다.

폴리머열교환기 설계 시 고려해야 되는 또 다른 중요한 요소는 바로 흰효율(Fin efficiency)이다. 열교환기 중에 전열면적을 넓히기 위하여 많이 사용되는 것이 흰을

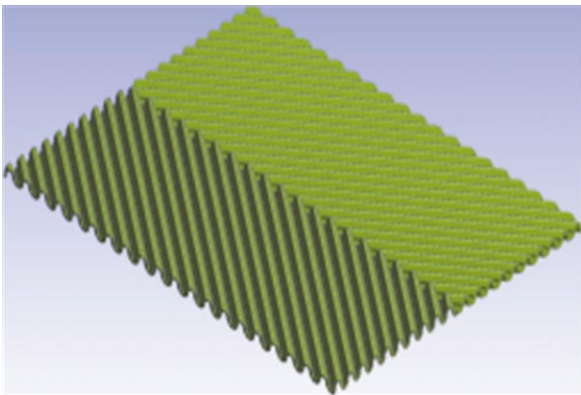


[그림 18] 소재의 열전도율과 핀 두께에 따른 핀 효율



[그림 19] 3D 프린터로 만든 주표면형 열교환기

이용한 열교환 구조이다. 판-핀(Plate-fin) 혹은 핀-튜브(Fin-tube) 열교환기 등과 같은 열교환기에 루버, 오프셋 등과 같은 다양한 형태의 핀 구조가 채용되고 있다. 핀의 성능을 정량적으로 나타내는 핀 효율은 핀의 밑바닥 온도와 핀 끝부분인 팁의 온도 차이를 무차원화한 값으로 열교환기 및 핀 설계 시 중요한 지표가 된다. 핀 효율은 핀 표면에서의 대류열전달계수, 핀 두께, 핀 길이 및 핀의 열전도율로 나타낼 수 있다. 위의 열저항 계산과 마찬가지로 대류열전달계수를  $100 \text{ W/m}^2\text{K}$ , 핀의 길이를  $10 \text{ mm}$ , 핀의 열전도율을  $2 \text{ W/mK}$ , 핀 두께를  $5 \text{ mm}$ 로 가정할 경우, 핀 효율은 60%밖에 안 된다.



[그림 20] 폴리머 복합소재 단위 열교환 박판 설계 및 시제품(한국기계연구원)

금속열교환기의 경우 핀의 두께가  $1 \text{ mm}$  미만임에도 열교환기의 핀 효율은 95% 이상으로 설계한다는 점에서 폴리머열교환기에서 핀은 전열면적 증가의 큰 역할을 못하는 것으로 계산된다. 폴리머열교환기의 경우 핀과 같은 이차적인 전열면적이 그 역할을 못하기 때문에 판형열교환기와 같은 주표면형(Primary surface type) 열교환기 방식이 적합하다고 판단된다.

### 3.3 폴리머 열교환기 적용 사례

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 Segerfrojð® 사는 두께  $2.8 \text{ mm}$ 의 PP 박막간의 접합 및 용접으로 조립된 Plate-fin 형태의 Mono



Block 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 티타늄 혹은 알루미늄 합금에서 고전도성 폴리머 물질로 대체 시 열교환 시스템의 제작단가 및 운전비용을 비교 분석한 결과가 발표한 바 있다(미국 Maryland 대학). 또한 이를 lab-scale 수준에서 직접 구현하여 성능평가를 수행하였으며, 폴리머열교환기의 적용 분야가 연안발전소 냉각시스템뿐만 아닌 OTEC(Ocean Thermal Energy Conversion) 등 해양플랜트의 기자재로 다양하게 활용할 수 있다고 주장한 바 있다.

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 배가

스 열교환기 등의 상용화에 적용할 예정이다(그림 20).

#### 4. 결 어

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 전세계 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. (KIPEC)