

판형 열교환기

류 해 성

Plate Heat Exchanger

Hae-Seong Ryu



- 류해성 [장한기술산업(주)]
- 1954년생
- 기계공학을 전공하였으며, 열유체 및 냉동공조 관련기기의 개발과 자동제어에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

판형 열교환기 (plate heat exchanger, 이하 'PHE'라 한다)는 1930년대에 최초로 제작되어 실용화되기 시작했다. 초창기의 PHE는 식품산업에서 열처리, 즉 우유의 저온살균 등과 같은 용도로 사용되었는데, 온도와 압력의 사용한계는 70℃/2bar 정도로 아주 낮았다. 열전달 효율도 매우 낮고 plate(熱板)의 두께도 상당히 두꺼웠다.

오늘날과 같은 형태의 열판 모양을 갖추게 된 것은 1950년대 후반 Herringbone Pattern 개념이 도입되면서부터였다. Herringbone 무늬의 방향을 위 아래로 엇갈리게 교대로 배치함으로써 열판 전체 면적에 걸쳐 metal-to-metal contact가 이루어지도록 하여, plate pack(熱板組立體)의 강도(強度)를 대폭 향상시키고 비교적 얇은 두께(0.5mm~0.9mm)의 열판으로 사용압력의 한계를 16bar 정도까지 증가시킬 수 있었다.

아울러 합성고무 제조기술의 발달에 따라 개스킷의 품질이 향상되면서 사용온도조건도

170℃ 이상으로 확대되었다.

열판의 Herringbone Pattern은 PHE의 사용압력을 증가시켰을 뿐 아니라 열전달도 크게 향상시켰다. 따라서 PHE가 종래의 셸-튜브(shell & tube) 열교환기보다 훨씬 높은 열전달효율을 달성하게 된 것이다.

또한 설계기술이 더욱 발전되면서 Herringbone의 각도를 최적상태로 변화시킴으로써 주어진 허용압력손실에 대해 열교환기의 열전달계수를 최대로 할 수 있게 되었으며, 이러한 발전에 힘입어 PHE는 식품산업뿐만 아니라 화학공업, 발전설비, 일반공업 등 거의 모든 산업분야에 걸쳐 다양하고 광범위하게 응용되고 있으며, 열교환기의 대표적인 형식으로 자연스럽게 자리잡게 된 것이다.

2. PHE의 구조

2.1 개요

PHE의 구조는 비교적 단순한데 plate pack을 프레임(frame)에 고정력 조임볼트로 고정하면 된다. plate pack이란 특정 설계조건에 맞는 여러 종류의 plate들을 순서대로

배열하여 적층한 것(熱板組立體)을 말하는데 각각의 plate와 plate 사이에는 유로(流路, channel)가 형성되고, 이 유로를 통하여 가열유체와 피가열 유체가 서로 교대로 흐르게 된다. (그림 1)

Plate pack은 ①고정된 프레임판(frame plate)과 ②이동가능한 압축판(pressure plate) 사이에 넣고 ⑦조임볼트(tightening bolts)에 의해 미리 정해진 치수로 압축시켜 조립한다.

⑥ 열판(plate)은 ④하부안내봉(bottom carrying bar)에 의해 지지되고 ③상부안내봉(top carrying bar)에 의해 정확한 위치를 유지하도록 되어 있다. 또 상·하부의 안내봉은 프레임의 뒤끝에 있는 ⑤지지대(supporting volumn)에 의해 지지되며 정확한 간격을 유지하게 된다. (그림 2)

2.2 배관 연결구

PHE는 유지와 점검시 배관을 해체하지 않고 분해조립이 용이하도록 설계되어 있다.

유체는 프레임에 있는 연결배관을 통하여 출입하는데, PHE는 다음과 같이 세 종류의 연결배관 형식이 있다. (그림 3, 4)

- 나사 이음식(threaded pipe type) :
Stainless steel, Titanium, PVC
- 플랜지이음식(straight flange type) :

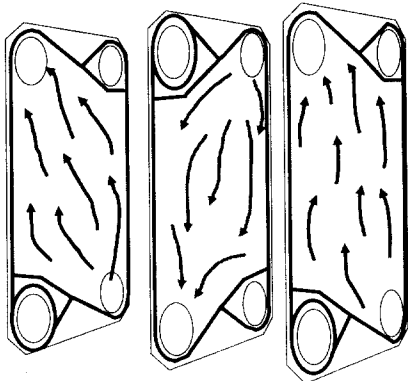


그림 1 유로의 구성

stainless steel 또는 carbon steel제의 pipe 및 flange

- 스티드볼트식(studded port type) :
Stainless steel, titanium 또는 고무 등의 liner를 필요에 따라 설치한다.

2.3 개스킷

개스킷(gaskets)은 이음매 없이 일체형(one piece)으로 제작되며 열판의 가장자리 부분과 port hole 주위에 있는 홈에 접착제(glue)를 사용하여 부착하거나 끼워넣기 방식(clip-on type)으로 고정한다. 개스킷은 유로(流路)가 교대로 형성되게 설치하고 열판의 metal-to-metal contact에 의해 간격을 유지한다. (그림 5)

프레임판(frame plate)과 열판 사이에 유체가 흐르는 것을 차단하기 위해 맨처음 설

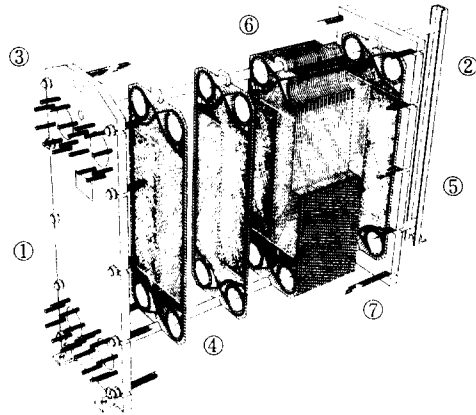


그림 2 PHE의 구조

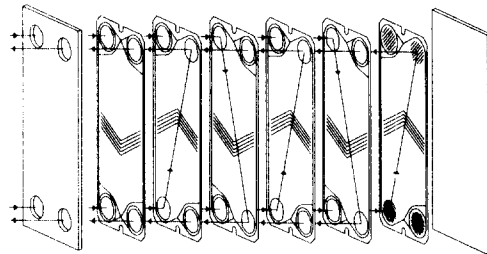


그림 3 PHE 내부의 유체 흐름

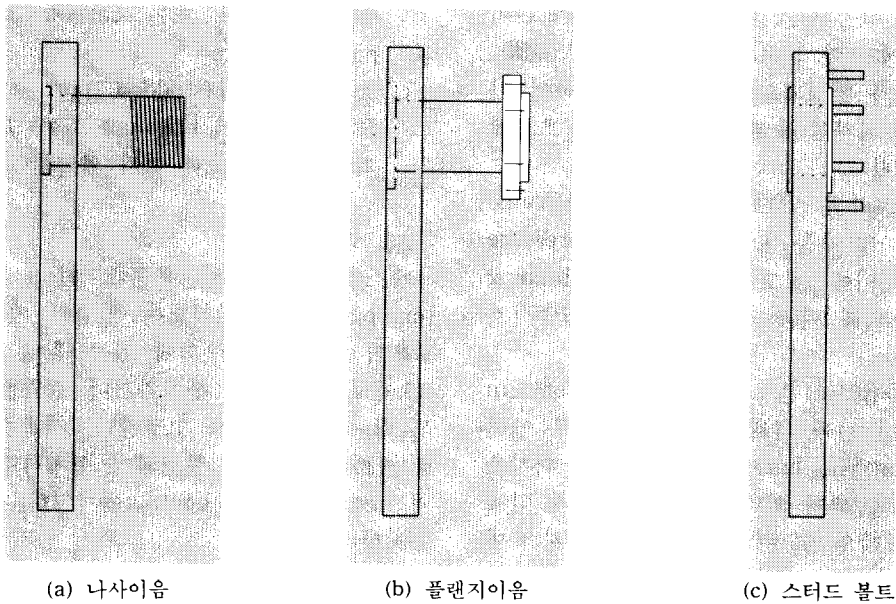


그림 4 PHE 배관 연결 형식

치되는 열판(start plate)은 O-ring으로 이루어진 개스킷으로 밀봉되어 있다. 맨끝에 있는 blank pate(end plate)는 압축 판(pressure plate)이 유체와 접촉하지 않도록 port hole이 막혀 있다. 열교환기 내부의 유체가 서로 섞이지 않도록 하기 위해서 port hole 주위에는 2중 개스킷(double gasketing)으로 되어 있는데 이 사이의 공간은 만약 누설이 생길 경우 유체를 외부로 안전하게 방출시키도록 weep hole을 설치 한다. (그림 6)

개스킷의 기능은 열판을 지지하는 것이 아니라 열판 안쪽의 유체를 밀봉시키기 위한 것이다. 개스킷의 재질은 최고온도 최고압력 하에서 사용할 수 있는 한계가 정해져 있다. 합성고무로된 개스킷의 실용적인 최고사용 한계는 170 °C / 21 bar 정도이다.

설치와 유지관리를 적절히 하면 개스킷으로 인한 누설은 생기지 않는다. 그러나 누출 사고시 치명적인 독성이 있거나 인화성이 높은 유체 등의 경우에는 안전상의 문제 때문에 판형열교환기를 사용하지 않는 편이 바람

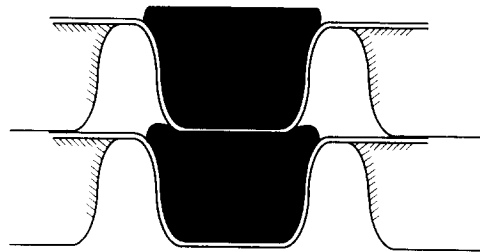


그림 5 개스킷의 형상

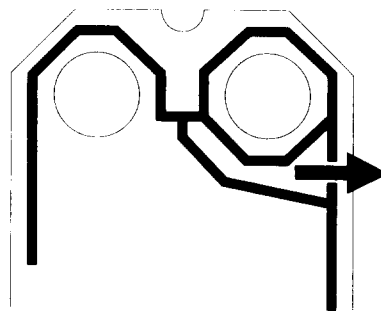
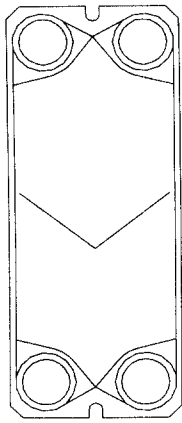


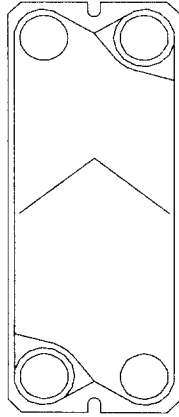
그림 6 공기 누출 구멍

직하다.

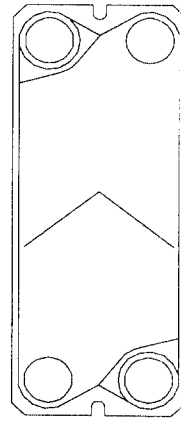
열교환기의 밀봉정도는 plate pack과 합성



(a) S-Plate, E-Plate



(b) L-Plate



(c) R-Plate

그림 7 Plate의 형상

고무로 된 개스킷을 얼마나 세게 조여 주느냐에 달려 있으며 개스킷의 탄성도와도 관계가 있는데 이 탄성도는 사용경과 기간에 따라 조금씩 열화(劣化)한다.

개스킷(gaskets)의 표준 재질은 다음과 같다.

- Nitrile(NBR)
- EPDM
- Viton G

2.4 열판(plate)

열판에는 상부와 하부에 유체가 다른 유로로 이동할 수 있도록 port hole이 있고 이곳으로부터 유체가 열판 위를 대각선방향으로 균등하게 분배되도록 유량분배기(flow directors)가 설치되어 있다. 열판은 대개 세 가지 종류가 있는데 S-Plate/E-plate, L-plate, R-plate이며 그 모양은 그림 7과 같다.

2.4.1 S-plate/E-plate

○ S-plate는 4개의 port hole을 가지고 있으며, 각 port hole은 O-ring의 개스킷으로 밀봉되어 있어서 유체는 전열판으로 흐르지 못하고 port hole만을 통과하도록 되어 있다. frame plate와 개스킷이 접촉하도록 설

치한다.

○ E-plate는 더 이상 유체의 흐름이 진행되지 않고 압축판과 유체가 접촉하지 못하도록 4개의 port hole이 모두 막혀있다. S-plate는 plate pack의 맨 처음에, E-plate는 맨 나중에 위치하고 있다. 이 판은 실제로 어떠한 유로도 형성하지 않는다.

2.4.2 L-plate

○ L-plate는 channel plate이며 유체가 좌상단에 있는 port hole을 통과하여 전열판 표면의 유로를 따라 우하단을 향하여 대각선으로 통과한다.

2.4.3 R-plate

○ R-plate는 channel plate이며 유체가 우상단에 있는 port hole을 통과하여 전열판 표면의 유로를 따라 좌하단을 향하여 대각선으로 통과한다.

3. PHE의 전열설계(傳熱設計)

3.1 열전달 조건

열교환기의 성능은 θ 값(열전달 단위수 또는 열전달길이, NTU or thermal length)의

로 표현될 수 있다. 이 Θ 값은 열교환되는 두 유체간의 일정한 온도차에 대해 각 유체의 온도를 변화시키는 열교환기의 능력으로 정의될 수 있다. 여기서 온도차란 대수평균 온도차(LMTD)를 말한다.

열교환에 관한 수식은 다음과 같다.

$$Q = m \times Cp \times \delta t \quad (1)$$

$$\text{또는 } Q = k \times A \times LMTD \quad (2)$$

위 두 식에 의해서 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$m \times Cp \times \delta t = k \times A \times LMTD \quad (3)$$

여기서, Q 는 열교환 용량, m 는 질량유량, k 는 총괄열전달계수, δt 는 유체의 온도상승이나 감소, $LMTD$ 는 대수평균온도차, Cp 는 비열, A 는 전열면적을 나타낸다.

위의 식은 다음과 같이 무차원수인 Θ 값으로 표현할 수 있다.

$$\Theta = \frac{\delta t}{LMTD} = \frac{k \times A}{m \times Cp} \quad (4)$$

위의 식에서 Θ 는 열전달 단위수(NTU) 또는 열전달 길이(thermal length)라 한다.

만약 열교환기가 정확하게 설계된다면 이론적으로는 $(k \cdot A)/(m \cdot Cp)$ 로 정의되는 열교환능력을 나타내는 Θ 값이, $\delta t/LMTD$ 로 정의되는 열교환용량에 필요한 값과 정확하게 일치될 수 있을 것이다. 그러나 일반적으로는 이렇게 정확히 열전달길이를 맞추는 것은 거의 불가능하기 때문에 대부분의 경우 어느 정도의 Oversurfacing을 허용하게 된다.

위 식을 다르게 표현하면 아래와 같다.

$$A = \frac{m \times Cp \times \Theta}{k} \quad (5)$$

여기서, m 이 증가된다면 전열면적 즉 plate 면적이 더 크게 요구된다는 것을 알 수 있고 Θ 값이 크면 열전달면적도 크게 된다는 것을 알 수 있다. 다음에 두 가지의 경우에 관해서 예를 들어 설명해 보기로 한다.

예제 1)

42,000 kg/h 80→60 °C water

42,000 kg/h 20→40 °C water

$$\Theta = \frac{\delta t}{LMTD}$$

여기서,

$$\delta t = 20 \text{ } ^\circ\text{C}, LMTD = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Rightarrow NTU = 0.5$$

전열면적

$$A = \frac{42,000 \times 4.2 \times 0.5}{k} = \frac{88,200}{k}$$

예제 2)

10,500 kg/h 80→40 °C water

10,500 kg/h 20→60 °C water

앞식에서

$$\delta t = 40 \text{ } ^\circ\text{C}, LMTD = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Rightarrow NTU = 2$$

전열면적

$$A = \frac{10,500 \times 4.2 \times 2}{k} = \frac{88,200}{k}$$

위의 두 가지 경우는 전열면적이 똑같이 계산되어 나오나 열교환기는 다르게 선정된다.

예제 1)은 짧고 넓은 열교환기가 요구되지만 예제 2)는 길고 좁은 열교환기가 요구된다. 즉 예제 1)은 4배의 많은 열판이 필요하나 1/4의 전열길이가 되어야 한다는 것이다. 실제로는 높은 Θ 값이 요구되는 경우에 열판과 열판 사이의 간격을 좁게 하여 주어진 압력손실을 만족시키도록 유로당 유량을 작게 하면 설계조건을 맞출 수 있다. 즉 유로당 유량을 일반적인 경우의 1/4로 하면 주어진 온수와 냉수측의 온도차 조건하에서도 1차측과 2차측의 각 유체온도차를 4~5배 크게 할 수 있는 것이다.

PHE는 plate 크기별로 일반적으로 두 가지 형식의 pattern을 사용하고 있는데 하나는 high theta type이고 또 다른 하나는 low

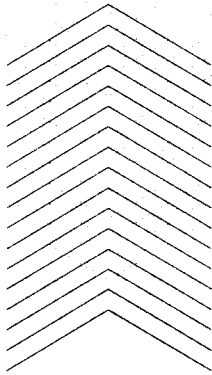


그림 8 Plate의 형상

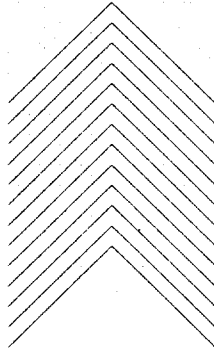


그림 9 Plate의 형상

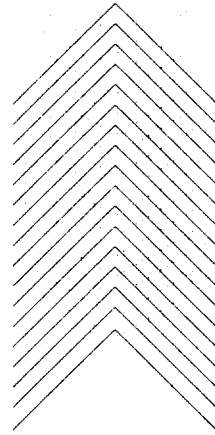


그림 10 Plate의 형상

theta type이다. 이 두 형식을 혼합사용하여 중간정도의 특성을 얻을 수 있다.

3.2 High theta와 Low theta plate

어떤 주어진 설계조건에 정확히 맞는 전열 길이를 얻도록 설계한다는 것은 거의 불가능하다. 그러므로 열교환기의 선정에 있어서는 어느 정도의 oversurfacing이 필요하게 된다. 이러한 문제를 최소화하기 위해서 high theta와 low theta 두 종류의 전열특성을 가진 plate를 개발하였으며, 두 종류의 판을 하나의 열교환기내에서 조합하여 사용할 수 있다. 이 다른 두 종류의 판은 세 종류의 유로를 형성시킬 수 있는데 high theta channel, low theta channel 및 mixed theta channel 등이 있다.

이렇게 함으로써 여러가지 다른 유로들을 혼합하여 최적의 전열특성 즉, high theta channel만으로 된 가장 높은 값과 low theta channel만으로 된 가장 낮은 값 사이의 어떤 값이라도 선택할 수 있도록 설계하는 것이다.

High theta plate는 chevron(V자형의 패턴모양)이 넓은 각도($110^\circ \sim 130^\circ$)를 가지고 있으며 큰 난류를 형성하여 상대적으로 열전

달계수가 크고 압력손실도 비교적 높은편이다. (그림 8)

Low theta plate는 chevron(V자형의 패턴모양)이 좁은 각도($50^\circ \sim 70^\circ$)를 가지고 있으며 난류형성효과가 약하고 상대적으로 열전달계수가 작으며 압력손실도 작다. (그림 9)

High theta, Low theta 두 가지의 plate를 혼합하여 V자형의 각도를 평균화하면 전열 특성(전달계수와 압력손실)이 중간값으로 된다. (그림 10)

위의 세 가지 종류의 유로를 모두 함께 사용하는 것은 실용적으로는 별로 장점이 없으며 어떤 원하는 전열길이를 얻기 위해서 두 가지 종류의 유로를 혼합하여(H+M) 또는(M+L)을 사용할 수 있다.

4. PHE의 선정

어떤 특정한 사용 조건에 맞는 가장 좋은 열교환기를 선정하기 위해서는 아래에 열거한 여러가지 사항들을 고려하여야 한다. 선정시 가장 우선적으로 고려해야 할 중요한 사항으로서는 유체의 온도와 압력의 한계, 유지관리성과 열교환용량의 추후확장 가능성, 경제성의 비교 등이 있다.

열교환기의 선정시 고려해야 할 여러가지 항목은 다음과 같다.

- 재질
- 유량, 온도조건, 허용압력손실의 한계와 같은 설계조건
- 압력과 온도의 사용한계
- 사용 유체의 오염 상태의 고려
- 유지 관리
- 추후 열교환기 용량증설 필요성

4.1 부식

열판의 두께는 0.6 mm~0.9 mm 정도로 다른 열교환기의 전열면과 비교하여 아주 얇으므로 부식 여유 두께를 고려한다는 것은 어려우며 일반적으로 부식정도는 연간 최대 0.05 mm 정도밖에 허용되지 않는다.

판형열교환기에서는 셀-튜브 열교환기와는 달리 열판의 재질을 한층 고급화하여 내식성을 높여야 할 필요가 있다. 그러나 PHE는 값비싼 고급 재질의 금속을 사용함에도 불구하고 얇은 두께의 전열판으로도 충분히 기계적 강도가 높고 열전달계수가 높기

때문에 재료의 소요량을 대폭 절감하여 전체적인 가격으로는 오히려 값이 싸다.

4.2 Plate의 재질

PHE의 재질은 프레스가공이 가능한 것으로 부식에 잘 견딜 수 있어야 하며, 가장 일반적인 재질은 표 1과 같다.

4.2.1 스테인리스강

1) 304

가장 저렴한 오스테나이트(austenitic) 계열의 스테인리스강. 일반적인 유기물이나 무기물에 의한 부식에 견디지만, 황산이나 염산에는 내식성이 약하다. 냉수측에 염소성분이 존재할 때는 금속조직의 특정성분이 공격을 받아 pitting(孔蝕)이나 간극부식이 생기기 쉽다.

2) 316

여러가지 광범위한 환경조건에서 사용할 수 있으며, 낮은 농도(10~15%)의 황산에서도 사용할 수 있다. 2.5% 정도의 몰리브덴을 함유하고 있으므로 염소성분에 의한 부식

표 1 PHE의 일반적인 재질

합 금	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe	Ti	Pd	Co	Others
스테인리스									
304	18	10			Bal.				
316	18	10	2.5		Bal.				
254SLX	20	25	4.5	2	Bal.				
254SMO	20	18	6	0.82	Bal.				
니켈합금									
Hast. B-2	<1	Bal.	28		2			2.5	
Hast. C-276	15.5	Bal.	16		5	3.5		2.5	
기타									
Titanium						>99			
Ti-Palladium						>99	0.15		

(단위 : %, Bal. : 나머지 함량)

에 대해서도 상당한 저항력이 있다.

3) AVESTA-254SLX

이 금속은 황산용액에서도 사용할 수 있고 특히 염소와 플루오르 이온이 섞여 있는 인산용액 등에도 사용할 수 있다. 니켈 25%를 함유하고 있으므로 흔히 316 Stainless Steel 에서 발생하기 쉬운 응력 부식작용으로 인한 crack 등을 거의 완벽하게 방지할 수 있다.

4) AVESTA-254SMO

몰리브덴을 316보다 많이 함유하고 있으므로 염소성분에 의한 pitting(孔蝕)이나 틈새 부식에 대한 저항력이 아주 좋다. 염수나 미네랄산을 사용하는 설비에서는 없어서는 안 될 중요한 재료이다.

4.2.2 니켈합금

1) HASTELLOY B-2

이 금속은 염산이나 고농도의 황산에 효과적인 내식성을 발휘하는 값비싼 니켈을 사용한 합금이다. 그러나 산화하기 쉬운 환경이나 철분과 구리가 이온의 상태로 유체속에 포함되어 있을 때는 저항력이 크게 떨어지는 단점이 있다. 만약 산(酸)이 공기와 혼합되면 급격한 반응이 생겨 이 금속은 부식에 저항하는 효과가 상당히 떨어지게 된다.

2) HASTELLOY C-276

값비싼 니켈합금으로 실제로 낮은 pH상태에서 염소이온에 의한 강한 부식을 방지할 수 있고, 황산농도가 높은 곳에서도 사용할 수 있으며 상당히 진한 농도의 염산에서도 사용할 수 있다. 실제로 이금속은 인산용액이나 온도가 높고 농도가 짙은 황산용액에 사용해도 좋은 결과를 얻고 있다.

4.2.3 그밖의 금속

1) Titanium

이 금속은 염소 이온을 가진 용액에서 매우 탁월한 내식성을 가지고 있으며 실제로 120°C의 바닷물이라든가 염화칼슘과 같은 염화물 용액이나 농도 70%까지의 질산용액

에도 저항하는 능력이 아주 우수하다. 그러나 황산에 저항하는 능력은 316과 유사하다. 염산용액에도 좋은 결과를 나타내고 있으며 특히 철분이나 구리의 산화이온을 가지고 있는 경우에도 상당한 저항력을 보이고 있다.

2) Titaninum-Palladium

티타늄에 0.15%의 palladium을 첨가하여 부식에 저항하는 능력을 개선하였고, 특히 미네랄산(황산/염산)에 저항하는 능력이 뛰어나다.

4.3 개스킷 재질

개스킷은 두 가지 유체 사이에 혼합이 생기는 것과 누설을 방지하는 역할을 하고 있다.

만약 하나의 개스킷에서 누설이 생기면 유체가 열교환기 밖으로 새어나오게 되며 누설 되더라도 두 유체간의 혼합이 발생하는 경우는 없다. PHE에서는 NBR, EPDM, Viton G와 같은 탄성을 가진 개스킷을 사용하며, 최고 사용온도는 대략 다음과 같다.

- NBR : 110°C
- EPDM : 150°C
- Viton G : 170°C

4.4 유량

PHE에서 허용될 수 있는 최대유량은 주어진 압력손실의 한계를 초과하지 않는 범위에서 유로를 통하여 흐를 수 있는 유량의 총합계로 결정된다. 대부분의 물/물 또는 점도가 낮은 유체의 경우 연결배관구에서의 압력손실이나 속도가 주된 제약 요인으로 작용한다.

4.5 압력손실

압력손실은 열교환기 설계에 있어서 중요한 설계인자이다. 동력비의 절감이나 설비의 사용여건에 따라 시스템을 효율적으로 사용할 수 있도록 하기 위해서 PHE에서 허용할 압력손실은 어떤 제한을 두어야 한다. 열판

에서의 압력손실은 주로 port hole부분과 유로에서 이루어진다. Multi-pass(多回路式)일 경우에는 압력손실이 급격히 증가하게 되므로 열교환기 효율을 고려하되 가능한한 pass를 줄이는 것이 바람직하다. 전열판에서의 압력손실은 유로에서 plate표면과 유체의 마찰에 의해 발생되며, 이는 유로에서의 속도가 증가할수록 더욱 크게 된다. 압력손실의 크기는 유로당 유량의 제곱에 비례하는 것이 일반적이다.

유로에서의 압력손실은 실제로 열전달을 일으키는 필요불가결의 요소이다. 따라서 연결배관이나 열판의 port에서는 압력손실을 최소로 유지하는 것이 바람직하며 이러한 손실은 대개 전체 압력 손실의 30%를 넘지 않도록 하는 것이 좋다.

4.6 압력과 온도의 사용조건 한계

PHE는 얇은 판으로 구성되어 있기 때문에 가공단면의 변화라든가 진동이나 피로현상 및 열에 의한 변형을 허용하기는 어렵다. 그러므로 열판에 가해지는 압력과 온도의 사용한계를 제한하여야 한다. PHE에서는 판의 pattern을 서로 엇갈리게 하여 이웃하는 두 판을 겹치게 함으로써 여러 곳에 수많은 접촉점을 확보하게 되고 그로 인해서 열교환기의 기계적 강도를 크게 증가시킬 수 있는 것이다.

최대압력과 최대온도의 제한은 개스킷 재질에 의해서도 결정된다.

이러한 사용 조건의 한계를 극복하기 위해 최근에 개발된 제품으로 용접식 판형열교환기(CBE)가 있다. 이것은 기존의 판형열교환기 형태에 기초를 두고 있으나, 열교환기의 모든 이음부위를銅합금으로 Brazing 용접함으로써 개스킷을 전혀 사용하고 있지 않다. Brazing은 유로 사이의 밀봉이 아주 확실하며, 열판관경 주위나 각 pattern의 교차점에도 용접이 이루어지기 때문에 기계적 강도 또한 우수하다.

최대 사용압력은 30 bar 정도이고 일반적인 최고 사용온도는 185℃이다. 그러나 특별한 경우에는 그 이상의 조건에서도 사용할 수 있다.

4.7 오염에 대한 고려

오염은 모든 열교환기에서 공통된 문제인데, 열전달 표면에 열전도율이 낮은 물질(스케일)이 부착되는 것을 말한다. 이렇게 되면 열전달을 방해하는 전도층이 하나 더 생기기 때문에 열전달효율이 낮아지게 된다. 또한 유로가 좁아지면서 압력손실도 더욱 크게 된다.

PHE에서는 유체가 균일하게 분배되고, 난류가 크게 형성되며, 표면이 매끄럽기 때문에 오염계수가 낮다. 또한 부식에 잘 견디는 고급재질로 만들어졌기 때문에 오염도는 더욱 낮아지게 된다.

오염에 의해 성능이 저하된 열교환기는 전 열면을 청소하여 스케일을 제거함으로써 성능을 회복할 수 있다.

열교환기의 청소는 기계적인 방법과 화학적처리 두 가지 방법이 있다.

기계적인 방법으로 열교환기를 효과적으로 청소하기 위해서는 쉽게 분해조립이 가능해야 하는데 이것이 바로 PHE의 가장 우수한 장점중 하나이다. 화학적 처리에 의한 청소 작업을 할 때는 산성, 염기성, 또는 세척제 등의 적절한 용액을 사용하면 된다. 세척은 세척액이 잘 분배되고 난류가 크게 일어나야 가장 효과적으로 처리된다.

일반적으로 열교환기의 성능저하 즉 온도 조건이 맞지 않는다거나 압력손실이 크게 되거나 하기 전까지는 청소를 하지 않는 것이 원칙이다.

4.8 유지관리 및 용량증설

PHE는 유지관리를 잘하면 최상의 조건으로 사용할 수 있다. PHE는 오염이나 부식 상태를 쉽게 판별할 수 있으며, 화학적 또는

기계적 세척이나 수리를 하기에 매우 편리하다.

PHE는 필요한 경우 plate만 추가시키면 손쉽게 용량을 증가시킬 수 있다. 또한 열판과 개스킷이 적합하기만 하다면 얼마든지 다른 목적의 새로운 시스템에도 사용할 수 있다.

5. PHE의 특성과 장점

5.1 소형, 경량의 고효율 열교환

PHE는 오늘날 시판되는 열교환기 중 구조가 가장 간단하고 소형 경량인데, 그 이유는 다음과 같다.

- (1) PHE는 일반적으로 셀-튜브형식에 비해서 물과 물에서의 열전달계수가 3배 이상 높다.
- (2) 셀-튜브형식에 비해서 열전달면적이 1/3에서 1/5 정도면 충분하다.
- (3) PHE의 열판은 파형(波形)으로 가공되어 강도가 높은 구조로 되어 있으므로 셀-튜브형식보다 사용되는 재료의 양이 아주 적다.
- (4) 부식에 잘 견디는 재질을 사용하므로 부식에 의한 열판 두께의 여유를 감안하지 않아도 된다.
- (5) 셀-튜브형식의 경우 유지관리를 위해 튜브를 꺼낼 수 있는 여분의 서비스 공간이 필요하지만 PHE는 처음 설치된 공간내에서 충분히 정비를 할 수 있다.

5.2 간편한 유지관리

PHE는 열판을 청소하거나 개스킷과 열판이 손상을 입어서 교환할 경우에도 장비의 분해 및 조립이 용이하다. 배관을 전혀 건드리지 않고 장비의 분해·조립이 가능하고 용량 증가로 인한 열판의 추가도 용이하다. 이러한 것도 셀-튜브 형식에서는 거의 불가능하다.

5.3 온도 근접성이 우수

예를 들면 셀-튜브 형식의 경우 물/물 열교환기에 있어서 적절한 압력손실범위 이내

에서는 최대 θ 의 값이 pass당 0.5 정도이지만 PHE의 경우에는 θ 의 pass당 4 정도로 크다. 이것은 PHE가 매우 근접한 온도조건에서도 충분한 열교환능력을 발휘할 수 있는 것을 의미하며 같은 열교환기 용량일 경우 유량을 매우 낮게 설계할 수 있으므로 펌프의 운전비용을 대폭 절감할 수 있다. PHE에서는 유체를 저온측 입구온도의 1°C 이내로 내릴 수 있으며 반대로 고온측 출구 온도의 1°C 이내로 유체를 가열할 수도 있다. 그러므로 열회수(heat recovery) 효율을 85~90% 정도는 쉽게 얻을 수 있으므로 열회수 응용부분에서는 가장 효율적인 열교환기라 할 수 있다.

5.4 낮은 오염도

PHE에서는 난류가 크고, 유량분배가 일정하므로 유로 내부의 유동이 빠르고 열판의 표면이 매끄럽기 때문에 오염(fouling)이 매우 낮다. 전열면의 표면에 부착된 스케일에 의해 열전달을 방해하게 되는 정도를 오염계수(fouling factor)라고 하며 물/물 열교환기에서는 대략 0.0001에서 0.0003을 설계상 고려하게 된다. 일반적으로 셀-튜브 열교환기의 오염계수에 비해서 PHE는 1/7에서 1/10 정도이다. 그러나 PHE의 경우는 오염 계수 대신에 여유율(oversurfacing·오염에 의한 영향을 고려해서 열교환면적을 증가시키는 비율)을 흔히 사용하는데 일반적으로 여유율은 10% 정도면 충분하다.

6. PHE의 응용

1) 낮은 점도의 액체(예를 들어 물대물)의 열교환일 경우

낮은 점도의 액체란 점도가 10 cP 이하의 것을 말한다. 대부분의 경우에 다른 형식의 열교환기보다 전열면적이 작게 요구되기 때문에 매우 경제적이다. 단 PHE의 온도와 압력의 한계를 초과하는 용도에는 곤란하다. 열교환되는 유체가 액체 대 액체이고 탄소강

(carbon steel)보다는 316 스테인리스강(stainless steel)이나 타이타늄(titanium)같은 재질을 사용하여야 할 경우에는 PHE를 선택하면 더욱 경제성이 높아진다.

2) 중간 점도의 액체의 경우

중간점도의 액체란 점도가 10~100 cP의 범위에 있는 것을 말한다. 이런 점도범위에서는 PHE의 열판이 파형(corrugated)으로 가공되어 있기 때문에 낮은 Reynolds수에서도 난류가 일어난다. 그래서 이와 같은 용도에서는 탄소강 재질의 셸-튜브열교환기와 비교하더라도 고급재질을 사용하는 PHE가 경제성이 우수하게 된다.

3) 높은 점도의 액체의 경우

높은 점도의 액체란 점도가 100 cP를 넘는 것을 말한다. 이 점도에서는 어느 열교환기에서든 유체는 층류 유동을 한다. 높은 점도의 유체에서 가장 중요한 것은 유량 분배를 정확하게 해주는 것인데, 만일 유량분배가 제대로 되지 않을 경우 높은 점도의 유체가 정체하는 구역이 생겨서 더 큰 문제가 발생하기도 한다. PHE는 이러한 문제를 해결시켜주고 점도가 75,000 cP가 넘는 유체에도 사용할 수 있다. 열교환기의 양측에 모두 높은 점도의 유체를 사용할 경우 PHE를 사용하면 유량분배가 좋고 양측의 유체가 동일한 유동특성으로 흐르기 때문에 다른 형식의 열교환기를 사용하는 것보다 열전달 성능이 훨씬 우수하다.

4) 낮은 점도의 액체와 증기 사용의 경우

만약 재질을 탄소강으로 할 경우에는 셸-튜브의 열교환기를 사용하는 것이 가장 경제적이다. 그러나 고급재질을 사용할 필요가 있거나 정기적인 세척이 필요한 경우라면 PHE를 사용하는 것이 오히려 낫다. 또 설치장소의 제한이 있거나 나중에 열교환기 용량의 증감이 필요한 경우에는 PHE를 사용하는 것이 좋다.

5) Process 유체의 예열과 냉각

석유정제공정(distillation process)의 경우

process 유체의 입구온도는 가능하면 boiling(증발)온도에 가깝게 유지하고 이를 예열하기 위해 정제탑의 하부출구에서의 유체와 열교환시키는 것이 가장 경제적인 방법으로 알려져 있다. 이와 같이 낮은 점도의 두 유체를 서로 열교환시켜 폐열을 회수할 경우 그 회수율이 높게 요구될수록 PHE를 사용하는 것이 효과적이다.

6) 열회수

열회수(heat recovery)율이 커야 할 경우 PHE를 사용하면 기술적으로 또한 경제적으로 우수한 성과를 얻을 수 있다. 그 이유는 PHE는 높은 열전달계수와 온도근접효과를 얻을 수 있기 때문이다. 실제로 PHE에서 양측의 온도차이는 1~4℃ 정도로 셸-튜브 열교환기의 4~6℃와 비교하여 매우 낮다. 그러므로 process의 특성상 가열이나 냉각을 동시에 요구할 경우 이중 이득을 얻을 수 있다. 가열에 필요한 비용뿐 아니라 냉각수나 냉동기의 전력도 절감된다.

7) 냉각수의 순환계통

흔히 냉각수를 자연수(호수, 강, 바다 등)로부터 직접 취수하거나 냉각탑을 이용하는 경우 값비싼 process용 열교환기나 생산설비에서 부식이나 오염이 문제될 때가 많다. 따라서 깨끗한 냉각수가 순환될 수 있도록 별도의 중간 냉각수계통을 설치하는 것이 좋은데, 이 중간냉각수 계통에 사용되는 열교환기는 값비싼 공정용 열교환기나 고가생산설비 대신 오염이나 부식을 감당하게 된다. 대량의 자연수를 사용할 경우 PHE는 기술적으로 또 경제적으로 가장 우수한 선택이 될 수 있다. 만약 냉각수에 염소성분이 없다면 열판은 스테인리스강을 사용한다. 그러나 만약 물에 염분이나 염소이온이 존재하면 열판은 티타늄으로 한다. 셸-튜브 열교환기로 하고 copper-nickel 합금튜브를 사용할 경우 초기 투자비는 다소 절감되지만 부식문제에 의한 비용까지 감안한다면 PHE를 사용하는 것이 더욱 경제적이다. 