

# LNG플랜트 열교환기의 기본설계기술

- 정 모 / 영남대학교 공과대학 기계공학부, mchung@yu.ac.kr
- 김 창 수 / (주)동화엔텍, kcs@dh.co.kr
- 박 승 하 / (주)동화엔텍, shpark@dh.co.kr

**LNG플랜트용 열교환기를 설계하는데 필요한 극저온 열전달의 기본 이론과 열교환기의 기본 설계 기술에 대하여 소개하고자 한다.**

LNG플랜트용 열교환기는 작동 온도가 극저온 영역에 속하므로 일반 열교환기 설계와 달리 특별히 고려해 주어야 할 사항들이 있다. 극저온 영역에서 일어나는 현상들을 이해하기 위해서는 우선 극저온이 무엇인지 정의할 필요가 있으며 그렇게 정의된 극저온 영역에서는 물질들이 어떤 특성을 지니게 되는지 설명할 필요가 있다. 이러한 특성에 대한 이해를 바탕으로 열전달 이론을 적용하면 일반적인 상황에서는 볼 수 없는 독특한 열전달 현상도 설명될 수 있다.

실무적으로 열교환기를 설계할 때 극저온 영역에서 일어나는 열전달의 특수성 이외에도 몇 가지 추가적으로 고려해 주어야 할 사항들이 있다. 본 집중기획 편에서는 위에서 극저온 영역에서 일어나는 열전달의 일반적 특수성을 알아보고 두 가지 정도 흥미로운 현상을 소개하여 한다. 이어서 극저온 열교환기를 설계하는 실무적 절차를 소개하여 독자들이 LNG플랜트용 열교환기 또는 일반적인 극저온 열교환기를 설계하는 절차를 이해하는 데 도움을 주고자 한다.

## 극저온의 정의 열전달 특성

LNG액화 공정은 극저온에서 일어나는 것이 특징이다. 일반적으로 극저온이라 함은  $-150^{\circ}\text{C}$  이하의 온도를 일컫는다. 이렇게 극저온을 구분하는 것은 극저온 산업에서 중요한 매체들인 헬륨, 수소, 질소, 산소 등의 상압 조건에서 비등 온도가  $-150^{\circ}\text{C}$  이하인 반면 일반적인 냉동 사이클에서의 온도는

모두 이보다 높기 때문에 일리가 있는 기준이다. 극저온 온도 범위에는 상온의 주변 환경과의 온도차가 대단히 크기 때문에 늘 열전달이 문제가 된다. 일반적인 물리 법칙 관점에서 볼 때 극저온에서 일어나는 열전달이라고 해서 근본적으로 다른 점은 없지만 물질의 성질 변화와 관련하여 다음과 같은 특징을 지닌다.

첫째, 일반적으로 볼 때 유체의 전달현상 관련 물성치들은 극저온 온도 범위에서 변화 폭이 매우 크다. 대부분 물질의 비열은 상온 범위에서 통상  $60^{\circ}\text{C}$  정도 온도 변화에 대하여 5% 미만 변화지만 극저온 영역에서는 대략 절대온도의 3승에 비례하여 급격히 변하는 것으로 알려져 있다. 따라서 물성을 상수로 보고 해석하면 상당한 오차를 초래할 가능성이 농후하다.

둘째는, 상압에서 극저온 범위에서 증발하는 물질의 증발열이 매우 작아서 단열이 대단히 중요한 문제로 떠오르게 된다. 예를 들어 1기압에서 질소의 증발열은  $199.3\text{ kJ/kg}$ 인데 반해 물은 무려  $2257\text{ kJ/kg}$ 에 이른다. 게다가 응축에 따르는 비용도 많이 들게 되므로 증발을 방지하는 단열 대책이 극저온 영역에서 중요한 경우가 많다. 물론 극저온 영역이라 할지라도 열교환기에서와 같이 열전달을 촉진시켜야 하는 경우도 있다. 극저온 영역에 사용되는 단열재의 열전도도는 일반 주택용으로 쓰이는 저가 단열재에 비해 약 1/1000 정도 수준에 이르는 고급 재료를 쓴다.

셋째는, 열전달이 일어나는 상태가 임계점 부근인 경우가 자주 발생한다는 점이다. 물질은 임계점 부근에서 상태량이 급격히 변할뿐더러 변화의 방향을 바꾸는 경우도 많아서 임계점이 포함된 대류 열전달은 독특한 거동을 수반하는 경우가 많다.



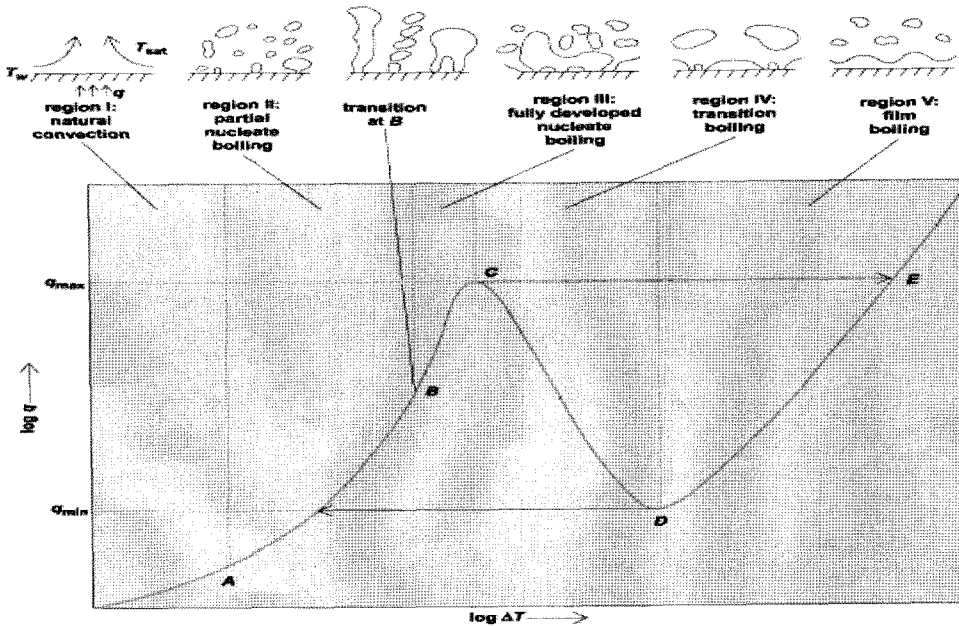
넷째는, 복사열전달이 일어날 때 온도가 낮아지면서 플랭크 법칙에 의해 가장 강한 강도를 갖는 파장이 길어지게 된 결과 재료의 복사 성질이 상온 때에 비해 현저하게 달라진다는 점이다. 예를 들어 상온에서는 피크 파장이 0.01 mm 정도 되지만 1 K에서는 2.9 mm나 되어 웬만한 단열재 두께와 맞먹는다. 같은 재료라 하더라도 복사 물성치가 대폭 달라지게 될 것은 명백하다.

다섯째, 열교환기 설계에 있어 찬 유체와 더운 유체 사이의 온도 차를 대변하는 온도 접근(temperature approach) 가 불과 수 K정도 밖에 안 되는 경우가 많아서 고성능이 되도록 세심하게 설계하여야 한다는 점이다. 보통의 가스터빈 열교환기나 공기 조화기 등에서는 온도접근이 상당한 커서 상대적으로 여유로운 설계가 가능한 경우가 많다. 극저온 열전달과 관련된 흥미로운 현상을 두 가지만 소개하기로 한다.

극저온 냉각과 관련된 열전달 문제 중 늘 부딪히는 난제 중 하나는 상온 상태에서 주변과 열평형을 이루고 있던 시스템을 어떻게 작동 저온까지 효과적으로 끌어 내릴 것인가? 하는 것이다. 배관용 파

이프라던지, 밸브 등 구성 요소들을 신속하게 작동 온도까지 냉각시켜야 한다. 이 문제는 마치 고온의 금속 덩어리를 찬 물에 넣을 급속 냉각시킬 때 어떻게 비등 열전달을 효과적으로 통제할 것인가 하는 문제와 현상적으로 동일하다. 그림 1의 Boiling Curve에서 보면 온도가 유체 온도보다 일정한 값 이상으로 높으면(D점 보다 오른쪽) 막비등이(film boiling)이 일어나면서 열전달량이 peak치(C점) 보다 현저하게 떨어지게 되어 벽면이 냉각되는데 많은 시간이 필요하게 된다. 연구 결과에 따르면 냉각하고자 하는 표면에 얇은 coating 처리하면 벽면과 유체 사이의 온도차를 많이 줄일 수 있어 벽면에서 막비등 대신 핵비등이 발생하도록 할 수 있는 것으로 알려져 있다. 이렇게 되면 열전달량이 많이 증가하므로 냉각시키는 시간도 그만큼 절약 되게 된다.

극저온서 발생하는 재미있는 현상 중 다른 하나는 1941년 발견된 이른바 Kapiza Conductance라는 현상이다. 이 현상은 고체 벽면과 유체가 만나는 경계면에서 생기는데 일반적인 열전달 문제에서 대류열전달이 일어날 때 고체-액체 경계면에서



[그림 1] Boiling Curve

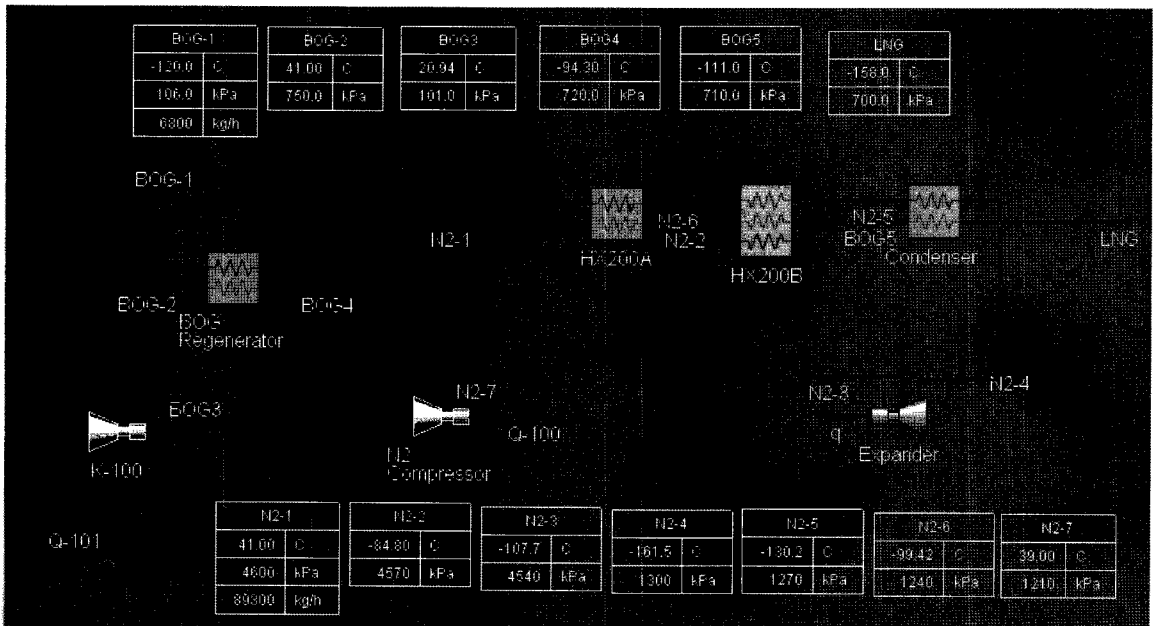
양측의 온도가 같다고 가정하는 것에 대한 예외라고 볼 수 있다. 실험 결과에 따르면 경계면에서 마치 고체 면 사이의 접촉저항처럼 경계면을 통하여 상당한 온도의 jump가 생기는 것으로 관측되었다. 반면 유체부분에서는 오히려 열경계층이 없어져 온도 구배가 크게 변하지 않는 것으로 알려졌다. 이 현상은 통상의 열전달 이론으로는 설명이 불가능하기 때문에 별도의 모델을 도입하여 해석하는 경우가 많다. 이러한 현상과는 별도로 극저온 대류 열전달에서 특별히 주의할 점을 한 가지 더 든다면 임계점 부근에서 대류 열전달이 일어날 경우도 특별한 주의를 요한다. 이 부근에서는 비열, 점도, 열전도 등이 급격하게 변하므로 열전달 현상도 많이 왜곡되기 때문이다.

### 극저온 열교환기 설계

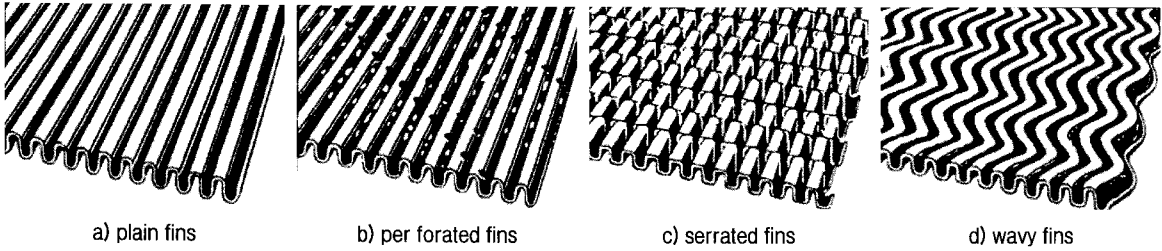
LNG 플랜트에서 관심이 되는 열교환기는 천연가스 액화공정인 그림 2와 같은 초저온 냉각 사이클에 사용되며 Cold Box라 불리는 열교환기의 집합체를 중점 대상으로 하고 있다.

이러한 Cold Box용 열교환기는 미국 및 유럽 선진국에서는 설계 기술을 가지고 있으나 국내에서는 아직까지 소형 열교환기를 제외하고 대부분의 경우 일본, 미국, 프랑스, 독일 등지에서 수입하고 있는 상황으로 열교환기 중에서도 설계 및 제작이 매우 어려운 분야 중에 하나이다.

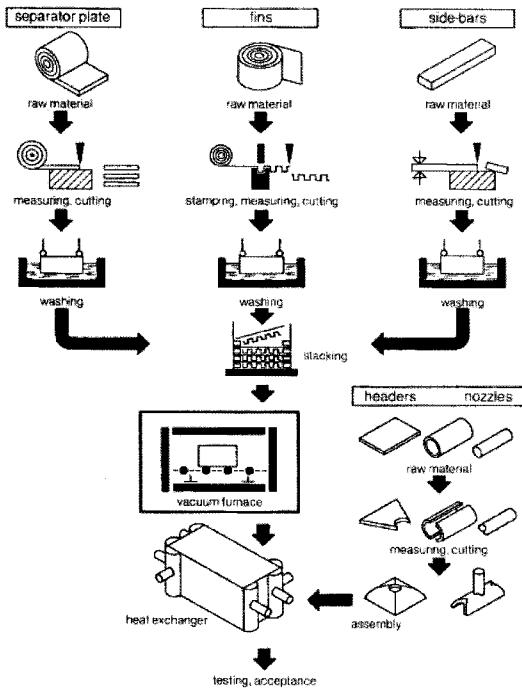
Cold Box용 열교환기는 가장 광범위하게 사용되는 Shell & Tube형 열교환기나 Plate & Gasket형 열교환기 등과는 달리 저온 열손실을 최소화하면서 효율적인 열교환이 일어날 수 있는 열교환기를 선정하여야 하는데 기존의 Shell & Tube형이나 Plate & Gasket형 열교환기보다 단위 부피 당 열전달면적을 극대화시킨 작고 효율적인 열교환기를 조밀 열교환기(compact heat exchanger)가 많이 쓰인다. 통상적으로 열교환기의 열전달 면적과 부피의 비인 면적밀도(area density)가  $700\text{m}^2/\text{m}^3$ 보다 큰 경우에 조밀 열교환기라 할 수 있다. 이러한 조밀 열교환기는 공기와 같은 기체를 가열, 냉각시키기 위해서 주로 사용되어 지는데 그 예로는 자동차의 라디에이터나 가스터빈용 열교환기 등을 들 수 있다.



[그림 2] hysys를 활용한 초저온 냉각 사이클의 예

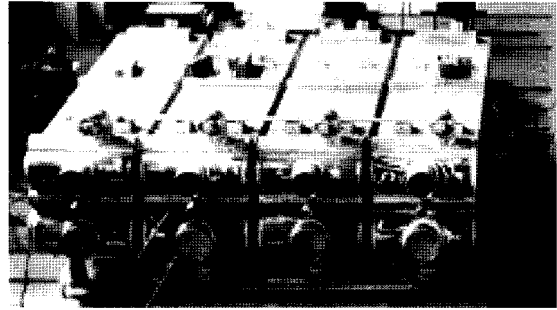


[그림 3] plate fin의 종류



[그림 4] 진공 브레이징 알루미늄 PFHE 제작과정

우선 plate fin type 열교환기는 그림 3과 같은 다양한 plate fin으로 이루어지는데 Plate Fin의 형상에 따라 다양한 특징을 가진다. 일반적으로 plain fin은 응축이 일어나는 영역에서 사용되며 다른 fin에 비해서 낮은 열전달값과 압력강하를 보이지만 지속적인 응축수 배출이 용이한 구조이다. perforated fin은 주로 증발이 이어지는 영역에서 사용되며 유동이 균일하게 안정적으로 분포될 수 있게 해준다. Perforated fin은 plain fin에 다수의 구멍을 뚫어놓은 형태인데 이 구멍의 수에 따라서 열전달과 압력



[그림 5] plate fin type 열교환기 assembly 사진

강하의 특성이 바뀌게 된다. Serrated fin은 주로 낮은 압력 영역에 위치하는 가스 유동에 대해서 높은 열전달 값을 가진다고 알려져 있다. 열효율은 좋지만 형상의 복잡함에서 오는 압력강하와 제작 비용 상승을 잘 고려해서 설계가 수행되어야 할 것이다. Wavy fin의 경우 plain fin과 serrated fin의 중간정도의 열성능 및 압력강하 값을 가지며 주로 단상에서 적용되어진다.

그림 4는 이러한 plate fin의 제작과 plate fin을 적용하여 열교환기를 제작하는 과정을 나타내고 있다.

그림 5는 이러한 plate fin을 사용하여 실제 LNG 플랜트 액화공정에 사용되는 'K'사의 aluminum brazing plate fin type의 완성된 모습을 나타내고 있다. 참고적으로 저온용 열교환기에는 저온에 강한 stainless steel이나 aluminum 재질이 주로 사용되는데 일반적으로 plate fin의 경우 가볍고 극저온인 -268℃까지도 적용이 가능한 aluminum이 사용되어진다.

Plate fin type 열교환기의 경우 일반적인 용접기

슬과는 다르게 제작을 위해 브레이징(brazing)이라는 접합 기술이 사용되어 진다. 브레이징이란 금속재료나 비금속재료의 접합방법의 하나로써 450℃ 이상 모재의 용융점 이하의 온도에서 접합부를 가열하여 모재는 녹이지 않고 용가재만 녹여 모재를 접합하는 기술로서 접합하고자 하는 두 모재 사이에 젖음현상(wetting)과 모세관 현상(capillary Phenomenon)등을 이용하여 침투, 확산시켜 접합하는 기술을 말한다.

그림 6은 브레이징의 간단한 process를 나타내고 있는데 plate fin type 열교환기에서 브레이징 기술은 plate fin 형상에 의한 열전달 효과와 압력강하 현상의 적절한 조절과 함께 신뢰성과 성능 확보를 위한 핵심 기술이라고 할 수 있을 것이다.

Plate fin type 열교환기에서 두 유체가 보통 직각 방향으로 흐를 경우에는 교차흐름 열교환기(cross flow heat exchanger)라고도 하며 비 혼합식(unmixed flow)과 혼합식(mixed flow)으로 세분될 수 있다.

비 혼합식에서는 핀 사이를 한 유체가 흐르면서 서로 섞이지 않지만 혼합식에서는 유체가 횡적으로 자유롭게 섞일 수 있다.

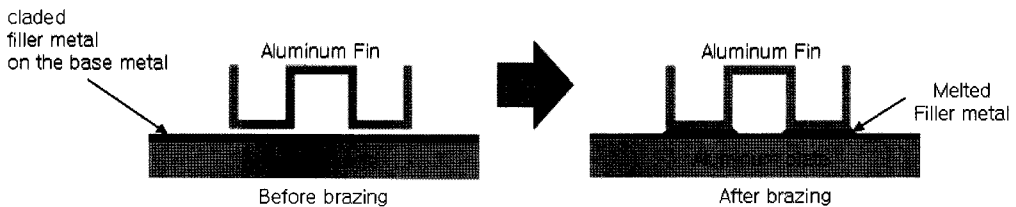
그림 7은 'L'사의 spiral wound type 열교환기를 나타낸 것이고 그림 8은 Cold box에 적용한 모습이다.

열교환기의 기본설계 방법에는 크게 ε-NTU 방법과 LMTD 방법이 있다.

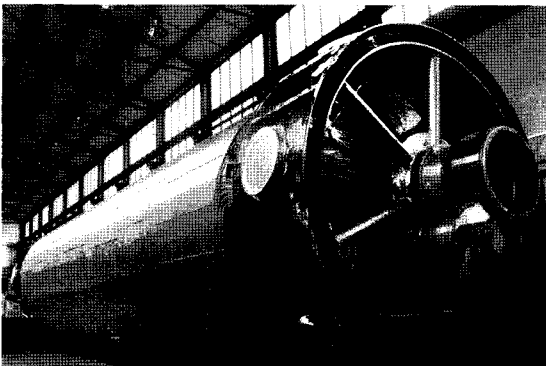
LMTD 방법은 주어진 주어진 입출구 온도를 가지고 대수평균온도차를 구하고 적절한 보정계수를 사용하여 열교환기를 설계하는 방법으로 식 (1)과 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$LMTD = \frac{(T_H - T_C)_{out} - (T_H - T_C)_{in}}{\ln\left(\frac{(T_H - T_C)_{out}}{(T_H - T_C)_{in}}\right)} \quad (1)$$

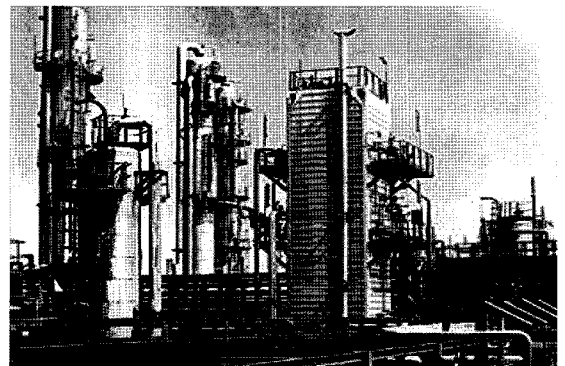
열교환기의 필요 전열면적은 다음의 수식에서 구해질 수 있다.



[그림 6] plate fin에서의 브레이징 process



[그림 7] spiral wound type 열교환기



[그림 8] Cold box 적용 예



$$A = Q/U \times LMTD \times F \quad (2)$$

여기서, Q=열량(kcal/kg)

U = 총괄열전달계수(kcal/hr · m<sup>2</sup> · °C)

A = 유효 전열면적(m<sup>2</sup>)

F = 대수평균차 보정계수

ε-NTU 방법은 열교환기의 유효도(heat exchanger effectiveness)를 이용한 설계기법으로 ε는 식 (3) 및 식 (4)와 같이 정의 될 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\text{실제로 전열된 양}}{\text{최대 가능한 열전달량}} = \frac{Q}{Q_{\max}} \quad (3)$$

실제 열교환기에서는 다음 중의 하나가 될 것이다.

$$\epsilon = \frac{C_h(T_{h,in} - T_{h,out})}{C_{\min}(T_{h,in} - T_{c,out})} \text{ or } \epsilon = \frac{C_c(T_{c,out} - T_{c,in})}{C_{\min}(T_{h,in} - T_{c,in})} \quad (4)$$

여기서 C<sub>min</sub>은 W<sub>h</sub>C<sub>p<sub>h</sub></sub>와 W<sub>c</sub>C<sub>p<sub>c</sub></sub>중 작은 값이다.

열교환기의 필요 전열면적은 다음의 수식에서 구해 질 수 있다.

$$A = NTU \times C_{\min} / U \quad (5)$$

LMTD 방법은 입,출구의 온도를 모두 알고 있을 때나 Shell & Tube 열교환기 설계에 주로 적용되고 있고 ε-NTU 방법은 각 유체의 유량과 유체의 물성치를 알고 있고 출구온도를 모르는 경우나 전열면적의 변화가 열단달 계수의 변화에 영향을 적게 미치는 조밀 열교환기 설계에 적절한 방법으로 알려져 있다.

앞서 설명했던 초저온 열교환기 type중의 하나인 plate fin type의 경우 ε-NTU 방법이 적용될 수 있고 counter flow의 경우에는 식(6)과 같이 표현될 수 있다.

$$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C_R)]}{1 - C_R \exp[-NTU(1 - C_R)]} \quad (6)$$

Parallel flow의 경우는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + C_R)]}{1 + C_R} \quad (7)$$

여기서 C<sub>R</sub> = C<sub>min</sub> / C<sub>max</sub> 를 나타낸다.

Coldbox에 사용되는 plate fin type 열교환기는 교차흐름이면서 두 유체가 혼합되지 않는 그림 9와 같은 형태를 가지고 있는 경우가 많은데 식 (8)와 같이 나타낼 수 있다.

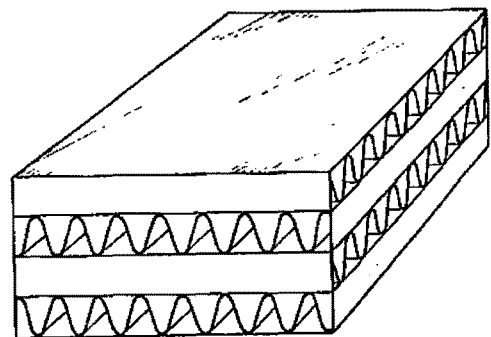
$$\epsilon = 1 - \exp\left(-\frac{NTU^{0.22}[1 - \exp(C_R NTU^{0.78})]}{C_R}\right) \quad (8)$$

실제 열교환기 설계에 있어 총괄열전달계수를 알지 못하는 경우가 많은데 오염계수를 고려하지 않았을 때 식 (9)는 일반적인 수식이다.

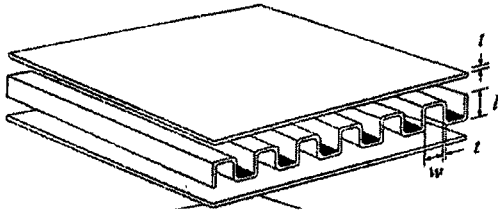
$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + R_w + \frac{1}{h_o} \quad (9)$$

여기서 h값은 h=f<sub>n</sub>(u, ρ, μ, k, Cp, etc)의 함수이고 Nu수는 Nu = hD<sub>e</sub> / k = f<sub>n</sub>(Re, Pr, μ/μ<sub>w</sub>)의 함수로 나타낼 수 있다. U값을 구하기 위한 h값은 이러한 관계를 활용하여 실험을 통해서 찾아낼 수 있다.

그림 10과 같은 치수를 가지는 plate fin type 열교환기에서 U값은 식 (10)로 나타낼 수 있고



[그림 9] 비혼합식 교차흐름 열교환기의 예



[그림 10] plate fin 열교환기의 치수 정의

$$\frac{1}{UP_e} = \frac{1}{nW} \left[ \frac{w+t}{h_i(w+\eta_i l)} + \frac{t}{k} + \frac{w+t}{h_o(w+\eta_o l)} \right] \quad (10)$$

여기서  $\eta$ 는 핀의 효율로

$$\eta = \frac{\tanh(0.5 \sqrt{\frac{2h}{kt}})}{0.5 \sqrt{\frac{2h}{kt}}}$$

와 같이 나타낼 수 있고  $k$ 는 재료의 전도도를 나타낸다.

$h$ 값은 앞서 설명한 바와 같이 실험을 통해서 구할 수 있고 또한 이러한 형태의 열교환기인 경우 공학적 가정을 거쳐 하기와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} - h &= \frac{k}{d} Nu \quad (\text{층류}) \\ - h &= 0.023 \frac{k}{d} Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad (\text{난류}) \end{aligned}$$

여기서  $d$ 는 수력직경으로  $d = 2wl / w+l$ 로 나타낼 수 있다.

이상과 같이 초저온 열교환기의 종류와 기본적인 열교환기 설계기법에 대해서 간단하게 알아보았는데 Coldbox용 열교환기의 경우 액체-액체, 액체-기체, 기체-기체, 응축 과정 등 다양한 열교환 과정을 거치므로 보다 정확한 열교환기 설계기술

정립을 위해서는 lab scale급 규모의 실험품을 제작하여 다양한 실험을 수행하는 것이 필요할 것이다. 추가적으로 초저온에서의 물질의 특성에 대한 기초연구와 열교환기의 내구성 및 신뢰도를 확보하기 위한 연구도 병행되어야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 가스플랜트사업단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

### 참고 문헌

1. Cryogenic Heat transfer, Randall F. Barron, Taylor & Francis, New York, 1999.
2. Cryogenic Systems, Randal F. Barron, Oxford university press, New york
3. 브레이징 접합개론, 유택인, 정재필, 신영식 공저, (주)기술정보
4. www.kobelco.co.jp
5. 가스플랜트사업단 분리공모과제, 국토해양부, 건설교통평가원, 2008.09
6. Compact Heat Exchangers, 3rd ed., W. M. Kays and A. L. London, Krieger Publishing Co., 1984.
7. Microscale Heat transfer Fundamentals and Applications, S. Kakac, L. L. Vasiliev, Y. Bayazitoglu, Y. Yener, Springer, 2005.
8. 열교환기 이론과 설계, 민의동, 화학공업조사회
9. Thermodynamic design of methane liquefaction system based on reversed-Brayton cycle, Ho-Myung Chang, Myung Jin Chung, Min Jee Kim, Seong Bum Park, Cryogenics, 2008