

# 플레이트 열교환기에 관한 연구



**이성진**

(KIMM 열유체시스템연구부)

- '88. 2 경북대학교 기계공학과(학사)
- '91. 2 경북대학교 기계공학과(석사)
- '91-현재 한국기계연구원 연구원



**고득용**

(KIMM 열유체시스템연구부)

- '78-'82 한양대학교 기계공학과(학사)
- '82-'85 한양대학교 기계공학과(석사)
- '91-현재 한국기계연구원 선임연구원



**염한길**

(KIMM 열유체시스템연구부)

- '86-'90 인하대학교 항공공학과(학사)
- '90-'92 인하대학교 항공공학과(석사)
- '92-현재 한국기계연구원 연구원



**홍용주**

(KIMM 열유체시스템연구부)

- '86-'90 고려대학교 기계공학과(학사)
- '90-'92 고려대학교 기계공학과(석사)
- '92-현재 한국기계연구원 연구원

## 1. 서론

에너지 이용을 극대화 하기 위하여 고효율의 에너지 변환 기기의 설계 기술을 개발하는 것은 아주 중요하며 이와 관련된 연구의 필요성은 우선 세계적으로 제한된 에너지 자원에서 출발된다. 에너지 변환 기기의 일례로는 폐열을 이용하는 재생기, 열회수, 열관리 및 냉각, 열적 처리를 요하는 프로세스 등 산업체 전반에 광범위하게 존재한다.

많은 산업적 용도를 갖는 에너지 변환 장치로서의 열교환기는 현재까지 성능 개선을 위한 지속적인 연구와 개발을 통하여 발전하여 왔으나 아직도 그 성능과 효율 개선의 여지가 많으며, 실질적으로 많은 문제를 가지고 있다. 세계적으로도 고성능의 열교환기 개발을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 국내에서도 이에 대한 연구가 매우 절실하게 요구되고 있어 산업체, 대학, 연구소등에서 많은 연구를 수행하고 있다.

또한 전세계적으로 사회 경제 규모가 대형화함에 따라 소비재의 생산이 대폭 증가하고 있으며, 쾌적한 환경에 대한 요구에 부응하기 위해 과도한 에너지를 소비함에 따라 환경 파괴는 증가하고 있으며, 오존층 파괴, 지구의 온난화, 산성비, 사막화 등 지구 환경 문제는 날로 심각해지고 있다. 그 중에서도 지구 온난화 문제는 국제적인 환경 규제에 대비한 이산화탄소의 배출 저감을 위한 기술 개발을 요구하고 있으며, 이를 위한 한 방법으로 고효율 열 이용 시스템이나, 심야의 잉여 전력 이용 등 에너지를 적절히 활용하여 에너지 절대 소비량을 줄여 이러한 문제에 대한 근본

적 해결이 어느 정도까지는 가능할 것으로 전망된다. 따라서 심야 잉여 전력을 이용하여, 에너지를 고효율, 고밀도로 저장시켜, 주간의 에너지 필요시에 온열 또는 냉열을 이용할 수 있으며 대형 빌딩 공조, 대규모 지역 냉난방, 각종 산업 프로세서 가열 등의 대규모 열원으로 이용하여 전력의 부하 평준화를 달성할 수 있는 시스템의 개발이 요구된다. 여기에서는 고효율 에너지 변환 축적 시스템인 수퍼 히트 펌프에 적용되는 플레이트 열교환기(Plate Heat Exchanger)에 대하여 알아보고자 한다.

## 2. 기술 현황

국내에서 설계, 생산되고 있는 열교환기의 종류는 그 응용 분야 만큼이나 다양하며, 생산업체도 중, 소, 대기업을 망라하고 있다. 본 절에서는 셸-튜브 열교환기, 핀-튜브 열교환기, 플레이트 열교환기, 플레이트 핀형 열교환기에 대해 알아보고, 융접형 플레이트 열교환기의 제작에 필요한 제조 설비인 진공 용착로(vacuum brazing furnace)의 현황에 관해서 기술하기로 한다.

### 2.1 셸-튜브 열교환기

셸-튜브 열교환기는 U자형으로 구부러진 다수의 튜브가 원통형 셸의 내부에 들어 있고, 튜브의 끝은 관판에 고정되어 있어 튜브속을 흐르는 유체는 헤더(header)에서 분배되도록 되어 있다. 셸 내부를 흐르는 유체는 가능한한 튜브와 직교하면서 흐르도록 배플판을 넘나 들면서 흐르게 되어 있다. 셸-튜브 열교환기는 액체와 액체의 열교환에 사용되는 경우가 많고 석유 정제 플랜트, 화학 플랜트, 발전소 등에 없어서는 안될 열교환기이다. 국내에서 셸-튜브 열교환기는 많은 제작사에서 독자적으로 설계하여 제작하고 있으며 이에 대한 기술 수준도 상당히 높다.

### 2.2 핀-튜브 열교환기

핀-튜브 열교환기는 얇은 박막의 핀과 원형 혹은 타원형 튜브로 구성되어 있다. 일상 생활에서 가장 눈에 잘 띄는 열교환기의 하나로 사무실의 공조용 팬코일, 가정용의 에어컨 등에서도 이와 같은 열교환기를 쉽게 볼 수 있다. 핀-튜브 열교환기는 기체와 액체, 기체와 상변화하는 유체사이의 열교환에 주로 사용하고 있다. 기체의 열전달이 작기 때문에 기체측 열전달면에는 핀을 붙여서 기체가 흐르는 쪽의 전열 면적을 크게 하고 있다. 이 열교환기도 국내에서 많이 생산되는 열교환기로 설계, 제작 수준도 높다.

### 2.3 플레이트 열교환기

플레이트 열교환기는 공조용 및 산업 프로세서용으로 대단히 각광받고 있는 조립식 및 용접식 열교환기로서 그 용도는 매우 다양하다. 국내에서는 많은 기업이 외국과 기술 제휴, 합작 혹은 외국 기업의 지사 형태로 플레이트 열교환기를 공급하고 있다. 플레이트 열교환기는 프레스로 성형된 전열판들 사이에 유체가 흐른다. 전열판은 작동 유체의 누설을 막고 유로를 형성하기 위한 씰(seal)을 부착한 상태에서 여러 장 겹쳐 조립함으로써 하나의 열교환기를 구성하도록 되어 있다. 전열판의 갯수를 조정함으로써 열교환기의 용량을 변경할 수 있으며 전열판의 갯수에 의해 전열량이 결정된다. 최근에는 산업 전반에 걸쳐 가스켓형 플레이트 열교환기 대신에 용접된 플레이트 열교환기를 많이 사용하며 또한 내식성, 기밀성이 요구되는 경우에는 거의 대부분 전열판 사이의 씰대신 서로 접촉된 두 전열판 사이를 용접하여 사용한다. 국내에서 공급되고 있는 용접형 플레이트 열교환기(brazed plate heat exchanger)의 전열면은 주로 스테인레스 스틸 316종으로 되어 있으며, 필러 메탈(filler metal)은 99% 순동이나 니켈을 사용한 경우가 대부분이다. 현재까지 국내에서

구할 수 있는 최대 크기의 열교환기(전열판 기준)는 775×310mm정도 이다.

차량용 플레이트 오일 쿨러의 경우 그 크기가 극히 소형이기는 하나 순동을 필러 메탈로 사용하여 가스 분위기로에서 일부 제작되고 있으나, 산업용에 사용되는 용접된 플레이트 열교환기는 전량 수입하여 국내에 공급되고 있다. 그러나 셀을 사용한 가스켓형 플레이트 열교환기는 외국과의 기술 제휴등으로 국내에서 설계, 제작하여 대량 생산되고 있다. 따라서 국내에서 산업용에 필요한 용접형 플레이트 열교환기를 직접 설계, 제작하는 회사는 없고 현재 이 열교환기에 대한 수요가 증가하기 때문에 국내에서도 플레이트 열교환기에 대한 설계, 제작을 위한 연구가 절실히 요구되고 있다.

## 2.4 플레이트 핀 열교환기

현재 국내에서 생산되고 있는 밀집형 열교환기(compact heat exchanger)로서 대량 생산이 이루어지고 있는 열교환기는 자동차 공조용 열교환기가 그 주류를 이루고 있다. 자동차용 열교환기의 경우, 증발기 및 응축기의 경우는 대부분 알루미늄으로 제작되고 있으며, 히터 코어 및 방열기의 경우는 알루미늄과 구리가 많이 사용되고 있다. 제작 방법상에 있어서는 전면 면적은 넓으나 두께가 약 20~60 mm 정도가 대부분인 응축기나 방열기의 경우는 진공 용착로(vacuum brazing furnace)와 Nocolok 공법이 보편적으로 많이 사용되고 있다. 그러나 열교환기 전면 면적은 작으나 두께가 약 70~120mm 정도로 두꺼운 증발기의 경우는 Nocolok공법의 적용이 곤란하기 때문에 대부분 진공 용착법으로 생산되고 있다.

## 2.5 진공 용착로

### 2.5.1 알루미늄 진공 용착로

용접형 플레이트 열교환기의 제작을 위해서는

진공 용착로가 필수적이며, 국내에서 차량용 열교환기를 생산하고 있는 기업(대우기전(주), 두원공조(주), 삼성라디에터(주), 스리스타(주), 한라공조(주) 등)들은 양산용 대형 진공 용착로를 보유하고 있다. 또한 이들이 보유하고 있는 진공 용착로는 모두 알루미늄 열교환기 전용이며 스테인레스 스틸 열교환기를 생산하기에는 부적합하다고 판단된다.

### 2.5.2 스테인레스 스틸 진공 용착로

본 연구가 목표로 하고 있는 슈퍼 히트 펌프용 열교환기를 스테인레스 스틸로 제작할 경우는 필러 메탈로서 아몰퍼스 니켈합금(Cr : 18.0 ~ 19.5%, B : 1.0~1.5%, S : 7.0~8.0%, C : 0.08% 이하, N : balance)이 적합한 것으로 문헌상 조사되었다. 이 경우 필러 메탈의 고상선 온도는 1065℃가 적합할 것으로 판단된다.

현재 국내에서는 스테인레스 스틸 소재에 구리를 필러 메탈로 사용한 차량용 판형 오일 쿨러를 삼성라디에터(주)가 생산하고 있고, 동화정기(주), 한국알파라벨(주)등은 기술제휴선으로부터 용접된 스테인레스 스틸 열교환기를 공급받아 국내 수요를 충족시키고 있는 실정이다. 현재까지의 조사 결과로는 항공기용 특수 금속 부품의 고온 진공 용착을 위하여 삼성항공(주)의 경우 고온 진공 용착로를 보유한 것으로 파악되고 있다.

## 3. 플레이트 열교환기

장치산업에서 적절하고 효율적인 열교환기의 선정은 생산성 높은 운전과 경제성 그리고 공장의 합리화에 지대한 영향을 주게 된다. 적절한 열교환기를 선정하기 위해서는 운전 조건(압력과 온도등)뿐만 아니라 투자비, 운전비, 보수 및 유지비, 그리고 중량과 크기 등이 복합적으로 고려되어야 할 조건들이다.

표 1은 일반적으로 열교환기를 선정하는 기준으로서 유체의 점도, 오염도, 성질, 그리고 프로세스 성격에 따라 선정하는 방법을 나타낸 것이다.

표 1. 열교환기의 선정 기준

적 용	특 징
1) 저점도 유체 (10 Cp 이하)	- 고온, 고압, 비부식성 유체에 대하여는 튜브 열교환기를 선정하고 탄성중합체 가스켓이 적합하지 않으면 압축된 ABS 화이버 가스켓을 가진 플레이트 열교환기, 스파이럴 혹은 라멜라 열교환기를 선정한다.
2) 저점도 액체와 증기	- 부식성이 없는 유체는 튜브, 부식성이 있고 증기 압력이 중간정도는 플레이트를, 대용량의 증기에 대하여는 스파이럴이나 라멜라 열교환기를 사용한다.
3) 중간 점도 유체	- 양측이 동등한 유체의 경우 플레이트를 사용한다. 만약 가스켓이나 용고가 문제가 된다면 스파이럴형 열교환기를 사용
4) 고점도 유체	- 플레이트의 난류 유동 때문에 플레이트가 유리하다. 약 50,000Cp까지 사용. 스파이럴은 극단적으로 500,000Cp 까지 가능
5) 오염도가 큰 유체	- 스파이럴과 플레이트 열교환기 사용 가능. 섬유질이 있는 경우는 스파이럴이 더 좋다.
6) 슬러리, 부유물과 펄프	- 스파이럴이 최적, 어떤 경우는 플레이트 열교환기를 사용할 수도 있다.
7) 열에 민감한 액체	- 플레이트 열교환기가 최적이다. 그러나 유체가 고점도이며 열에 민감한 경우는 스파이럴 열교환기의 선정이 유리하다.
8) 공기의 냉각	- 핀 튜브 열교환기를 선정
9) 진공하의 공기 또는 가스	- 제한 범위안에서는 플레이트 열교환기를 사용할 수도 있으나 튜브, 라멜라, 스파이럴 열교환기가 더 좋다.
10) 응축	- 부식성이 없으면 C.S의 튜브로 선정하고 부식성이 있으면 스파이럴 또는 라멜라 열교환기를 선정
11) 고압( 35 atm) 고온( 500 ℃)	- 튜브 열교환기
12) 부식성 유체	- 그래파이트 열교환기

고온, 고압 등 거의 모든 조건에서도 사용할 수 있는 셀-튜브형 열교환기보다 전열 효율이 우수하고, 경량이며 가격이 싼 새로운 열교환기들이 계속해서 개발되고 있다. 이 새로운 열교환기 중의 하나로써 고밀도 열교환기인 플레이트, 플레이트 핀, 스파이럴 열교환기를 들 수 있으며, 본 고에서는 가스켓형 플레이트 열교환기와 용접형 플레이트 열교환기에 대해 알아 보고자 한다.

플레이트 열교환기는 약 100년의 역사를 가지고 있다. 최초의 플레이트 열교환기는 마치 필터 프레스와 비슷한 사각의 청동판과 구리판으로 구성되어 있었다. 그 후 1930년대 들어서 실용화가 되었으며 오늘날과 비슷한 모양의 정밀한 플레이트가 제작되어 유럽의 식품 공업에 기여하게 되었다. 1960년대에 이르러 효율적인 플레이트 모양과 조립 방법 및 가스켓의 재료 개발에 힘입어

매우 광범위하게 사용되었고 통상적으로 튜브 영역이라고 하는 곳까지도 침투하기 시작하였다. 이 플레이트 열교환기는 그림 1과 같이 2개의 사각 헤드 플레이트 중 하나는 고정되고 다른 하나는 이동이 가능하도록 되어 있으며 중간에는 얇고 주름진 여러 장의 플레이트가 겹쳐 있으며 플레이트와 플레이트 사이에는 가열 유체와 수열 유체가 교대로 흐르도록 되어 있고 이 유체의 누설을 방지하기 위하여 플레이트 주변으로 가스켓을 넣은 다음 클램프로 밀착시킨 것으로 두 유체가 이 플레이트를 통하여 열을 전달하는 장치이다. 각각의 플레이트는 4구석에 입출구 포트가 있으며 가열 유체와 수열 유체에 대하여 대각선 또는 일직선상으로 한쌍의 포트를 가지며, 그 포트는 엔드 플레이트에 연결된다. 열전달의 효과를 높일 수 있도록 유체의 유동 방향을 수열 유체는 상향

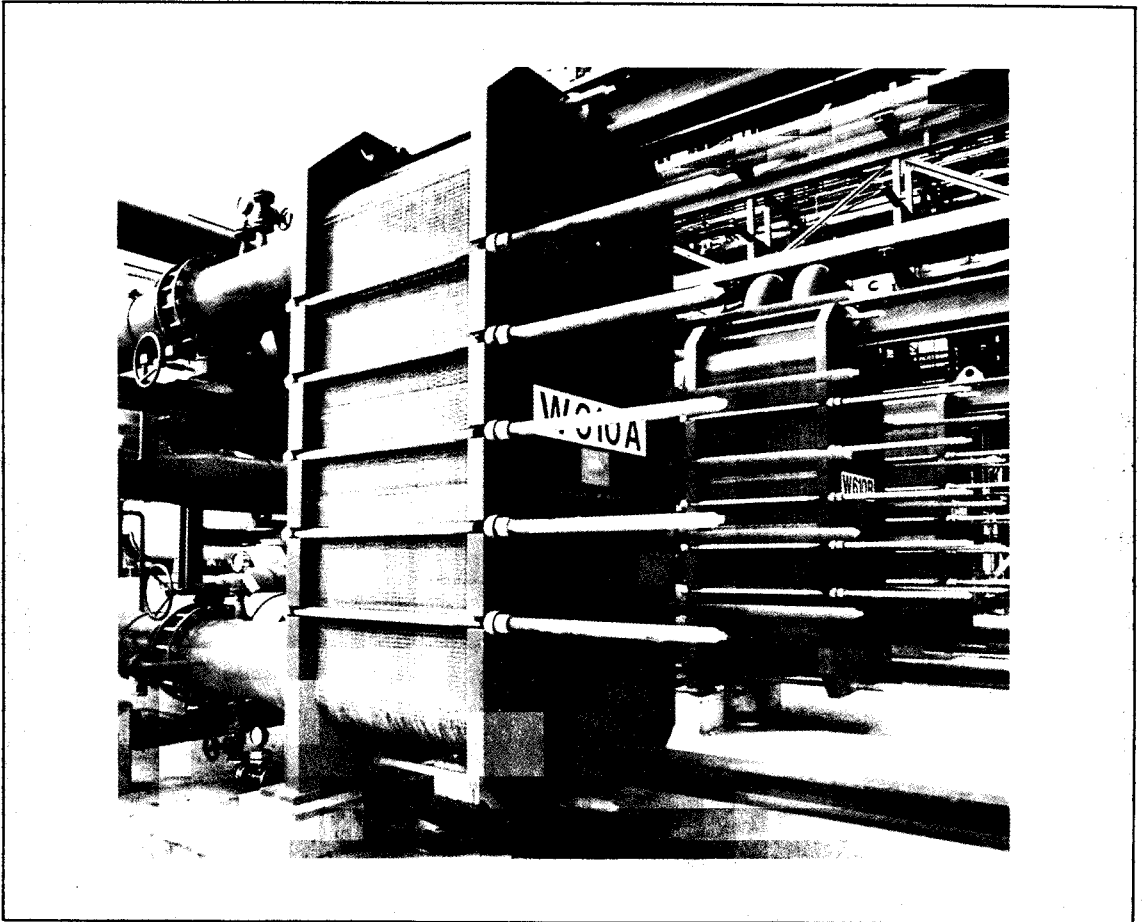


그림 1. 플레이트 열교환기

으로 하고 가열 유체는 하향으로 유동할 수 있도록 배열한다.

### 3.1 특징

플레이트의 주름은 아주 작은 레이놀드수에서도 난류를 유발하기 때문에 두 유체간의 열전달 계수는 튜브 열교환기의 2 ~ 4배 정도로 크고, 구조상 by-pass와 누수가 없으며 항상 대향류로 하기 때문에 열효율이 높은 것이 최대의 장점이다. 오염 계수는 유체의 짧은 체류 시간과 높은 난류 효과, 그리고 국부적으로 유속이 낮은 지역이 없기 때문에 튜브 열교환기보다 1/5 정도의 값을 적용한다. 설계시에는 플레이트의 크기, 쉘브

론 각(chevron angle), 다양한 패스 배열 등으로 탄력적인 설계가 가능하고 구조적인 측면에서도 열충격이 있어도 진동, 열팽창 등의 문제가 발생하지 않으며, 가스켓형 플레이트 열교환기는 제작이 완료된 후라도 플레이트 수의 증감이 가능하여 다양한 열부하에 적용할 수 있는 독특한 능력을 가지고 있다.

융접형 플레이트 열교환기는 가스켓이 필요없기 때문에 가스켓형 플레이트 열교환기의 사용이 제한되는 영역까지 광범위하게 사용된다. 일반적으로 가스켓형과 융접형 플레이트 열교환기를 비교해 보면 같은 용량에서 크기가 융접형 플레이트 열교환기가 훨씬 작다. 그러나 융접형 플레이트 열교환기는 융접된 후 열용량을 변경하고자

할 때에는 플레이트를 추가하는 것은 불가능하며 정비시 해체하여 작업할 수 없는 단점이 있다.

### 3.2 사용 범위

이 열교환기의 사용 범위는 전열판과 가스켓의 제한 조건에서 찾을 수 있다. 즉, 가스켓의 재질로는 천연 혹은 합성 고무가 널리 사용되고 있으나 이러한 재질들은 제한된 온도와 압력, 특히 솔벤트와 같은 유기물에 의한 화학적 침투성 때문에 제한을 받는다. 일반적인 사용 범위는 온도 0 ~ 120℃, 압력 1 ~ 10 기압 정도이나 압축 아스베스토 가스켓을 사용하는 경우는 약 250℃ 까지 사용 가능하며 탄성 중합체나 아스베스토 가스켓은 25 기압까지 사용할 수 있다고 한다. 이 때 사용되는 모든 가스켓은 주기적으로 갈아 주어야 하며 그 주기는 사용하는 곳에 따라 다르다. 그러나 가스켓이 없는 용접형 플레이트 열교환기는 가스켓형보다 다소 높은 압력과 온도에 사용할 수 있다.

압력 손실은 복잡한 유로 구조로 인하여 플레이트내에 높은 전단 특성이 유발되기 때문에 완전 난류의 경우 마찰 계수는 크지만 유로가 짧고 유속이 낮기 때문에 튜브 열교환기와 거의 같은 압력 손실이 발생한다. 또 높은 전단특성 때문에 증기의 분율이 크고 사용 압력이 낮은 2성분 사용에는 적합하지는 않으나 상압에서 증기를 응축한다든지 다른 특정한 다상 영역에서 적절하게 사용할 수도 있다. 가스켓형 플레이트 열교환기의 경우 플레이트 둘레의 긴 가스켓 때문에 진공 상태에서의 작업은 근본적으로 부적합하고 유로 간격이 좁기 때문에 부유 고체 입자들의 크기가 제한되어야 하고 프레임 비용이 높기 때문에 플레이트수가 10개 이하인 경우는 비경제적이다.

### 3.3 구조

플레이트 열교환기는 지지대와 플레이트 팩으로 크게 분류할 수 있으며 지지대란 플레이트 팩

과 지지부로서 조임 볼트를 이용하여 가운데 플레이트를 두고 두 개의 헤드 플레이트를 적당히 결합한다. 그림 2는 일반적인 플레이트 열교환기의 구조를 나타낸다

플레이트와 이동할 수 있는 헤드 플레이트는 상부의 캐리어 바와 하부의 가이드 바에 의해 지지되며 전열 플레이트 여러 장을 캐리어 바와 가이드 바에 매달고 플레이트와 플레이트 사이에 가스켓을 넣은 다음, 조임 볼트로 헤드 플레이트를 소정의 치수까지 조여서 사용한다. 캐리어 바와 가이드 바는 고정 헤드에 볼트로 고정된다. 수열측 유체와 가열측 유체는 프레임 플레이트에 설치된 4 개의 포트로 출입하게 된다.

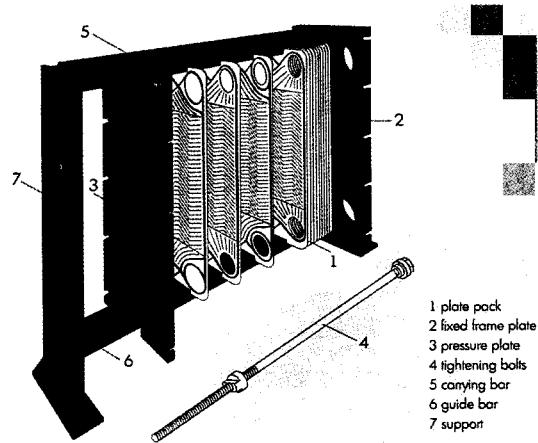


그림 2. 플레이트 열교환기의 구조

플레이트 팩은 튜브에서의 튜브 번들에 해당하는 것으로 가장 중요한 구성 요소는 플레이트인데, 플레이트는 주름 잡힌 형태가 플레이트 열교환기의 효율과 직결되기 때문에 주름의 형태, 깊이, 홈의 모양, 웨브론 각 등은 대부분 특허권이 있다. 그리고 플레이트 본체와 포트 사이는 유체의 유동 분포를 균등하게 설계하는 것이 매우 중요하다. 즉, 유체 유동을 플레이트 전체에 고르게 분배하는 분배 지역을 잘못 설계하면 플레이트의 열교환 성능에 상당한 영향을 미친다.

현재 대부분의 플레이트 열교환기는 기계적 강도가 높은 웨브론 형태가 사용되고 있지만 일부

상업용 플레이트는 돌기상 플레이트, 네스팅 혹은 빨래판이라 불리는 주름 형태도 사용하고 있다. 이러한 주름 형태들은 쉘브론 플레이트와 차이가 크기 때문에 일반적인 보정은 불가능하다. 그렇지만 이러한 플레이트들이 열전달면에서 열등하지도 않기 때문에 계속해서 사용되고 있다. 한쌍의 접합된 플레이트는 튜브 열교환기에서 튜브와 유사한 유동 유로가 형성되며, 플레이트 사이가 좁기 때문에 높은 열전달 효과를 가지게 된다. 셀-튜브 열교환기와 비교할 때, 실제적인 튜브 열교환기에서는 불가능한 작은 직경의 튜브를 사용하는 것과 같고 주름은 난류를 촉진시키는 효과가 있는 스파이럴 튜브를 사용하는 것과 유사하다.

기본적으로 플레이트는 사각 형태이며 작동 유체는 길이 방향으로 유동하며 돌기상 플레이트, 파형 플레이트, 쉘브론 플레이트가 있으며, 플레이트 중앙부의 돌기는 다음과 같은 중요한 역할을 한다. 즉 유체의 유동에 소용돌이 효과를 일으켜 난류화를 촉진시키므로 큰 열전달 계수를 얻을 수 있게 하고, 전열면적을 증가시킨다. 그리고 플레이트의 강도를 증가시키고 압력차가 있을 때 플레이트의 간격을 규정 치수로 유지하는 역할을 한다. 전열판의 크기는 제작사에 따라 다르며 주로 소형(1 매당 전열면적 0.1 ~ 0.15 m<sup>2</sup>), 중형(0.25 ~ 0.33 m<sup>2</sup>), 대형(0.5 m<sup>2</sup>)으로 분류된다.

### 3.4 플레이트의 종류

#### 3.4.1 돌기상 플레이트

그림 3과 같이 플레이트 표면에 구상 돌기와 평두 돌기를 합성하고 있다. 이 플레이트의 구상 돌기는 유체를 와류하게 하는 작용을 하며, 평두 돌기는 열교환을 하는 양유체에 압력차가 있을 때 인접 플레이트의 구상 돌기와 접촉하여 압력차를 지지하게 되어 있다.

#### 3.4.2 파형 플레이트

이 플레이트는 그림 4의 모양으로 유체의 유동 방향은 길이 방향이 된다. 여기서 삼각의 주름은

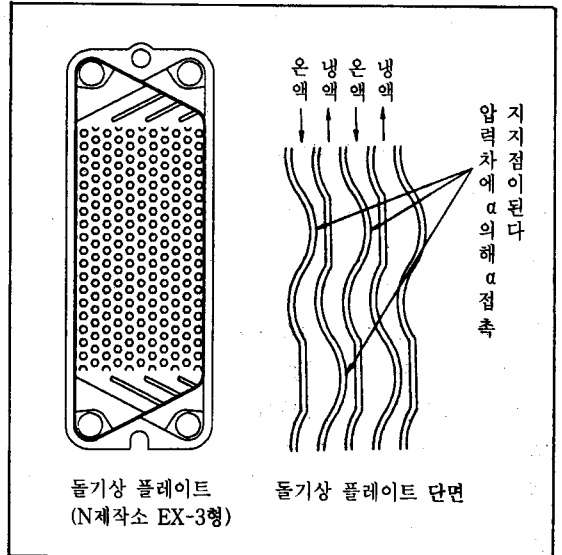


그림 3. 돌기상 플레이트

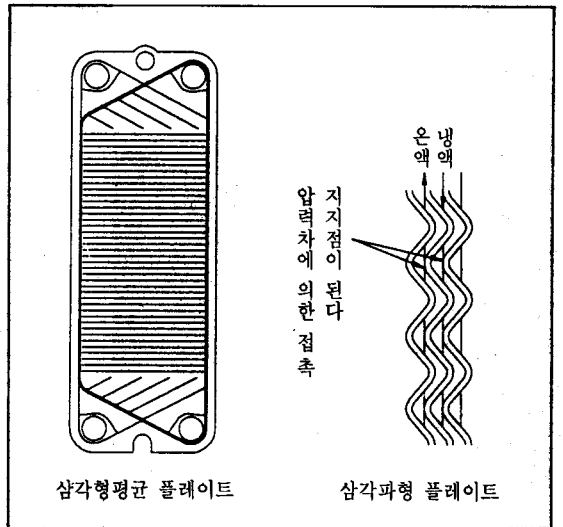


그림 4. 파형 플레이트

인접 플레이트와 동일하여 밀착시 하나의 유로가 형성되는데 주름이 없는 부분은 인접 플레이트와 접촉하기 때문에 플레이트 팩을 역학적으로 견고하게 해주며 두 유체 간 차압으로 발생하는 변형도 방지해 준다. 또 삼각 주름은 플레이트의 간격을 조절하는데 일반적으로 3.8 ~ 6.4mm의 간격을 사용하며 열적 성능, 압력 손실, 전열 특성에 큰 영향을 주고, 특히 열부하는 광범위하게 허용

되지만 다른 형태에 비해 열전달 계수와 압력 손실이 다소 낮은 편이다. 파형 플레이트 열교환기는 주로 낙농 공업과 음료 공업에 사용되고 있다.

### 3.4.3 웨브론 플레이트

화학 공업에서 설계되는 주름 플레이트 형태로 얇은 주름이 플레이트의 가로측 방향으로 경사나 있고 인접 플레이트도 이 각도에 맞추어 주름이 있어 그림 5와 같이 덧붙이게 된다. 이 구조는 인접 플레이트와 접합시켰을 때 정점과 정점이 접촉되기 때문에 얇은 플레이트라도 심한 변형이 없으며 유체가 유동할 수 있는 공간이 있기 때문에 차압이 커도 문제가 없다. 플레이트 주름은 웨브론 각이라 부르는 경사 각도( $65^\circ \sim 25^\circ$ )를 가지고 있으며 이 각도는 전열 특성과 압력 손실에 큰 영향을 준다. 작은 웨브론 각을 가지는 플

레이트는 상대적으로 높은 열전달과 높은 압력 손실을 발생하며 이를 하드 플레이트라 부르고, 큰 웨브론 각을 가지는 플레이트는 반대로 낮은 열전달과 작은 압력 손실을 발생하며 이를 소프트 플레이트라 한다. 최적의 설계 목적상 열전달 계수와 압력 손실을 중간으로 하기 위하여 소프트 플레이트와 하드 플레이트를 같이 사용할 수도 있다. 일반적으로 웨브론 플레이트는 파형 플레이트보다는 더 큰 열전달 계수와 압력 손실이 있다.

## 4. 플레이트 열교환기 설계

튜브 열교환기 설계시에는 설계 데이터와 방법을 쉽게 이용할 수 있는 반면 플레이트 열교환기 설계시 이용할 수 있는 정보는 거의 없는 실정이다. 일부 제작사에서는 자신들만의 독특한 설계 방법을 가지고 있으며 그 회사 나름대로 계산하여 설계 과정을 개발해 왔다. 플레이트 열교환기에 대한 열전달과 압력 손실과의 관계식을 개발하기 위한 노력이 계속되어 왔으나 대부분의 관계식은 일반적으로 이용될 수 있을 정도로 높은 신뢰도를 주지 못한다.

### 4.1 LMTD와 $\epsilon$ -NTU 방법

LMTD 방법은 입출구 온도가 모두 알려진 경우에 가장 적절한 방법으로 주로 셸-튜브 열교환기 설계에 적용되고 있고,  $\epsilon$ -NTU 방법은 각 유체의 유량과 비열 그리고 총괄 열전달 계수 등은 알 수 있으나 출구의 온도를 모르는 경우, 그리고 전열 면적의 변화가 총괄 열전달 계수에 변화를 아주 작게 미치는 밀집형 열교환기에 적절한 방법이다. 또한 열교환기 설계시에는 입출구의 온도, 유량 등이 주어질 때 칫수와 전열 면적을 결정하는 설계 방법(Design case)과 전열 면적, 총괄 열전달 계수, 입출구 온도 등이 주어질 때 성능 평가 방법(Rating case)이 있다.

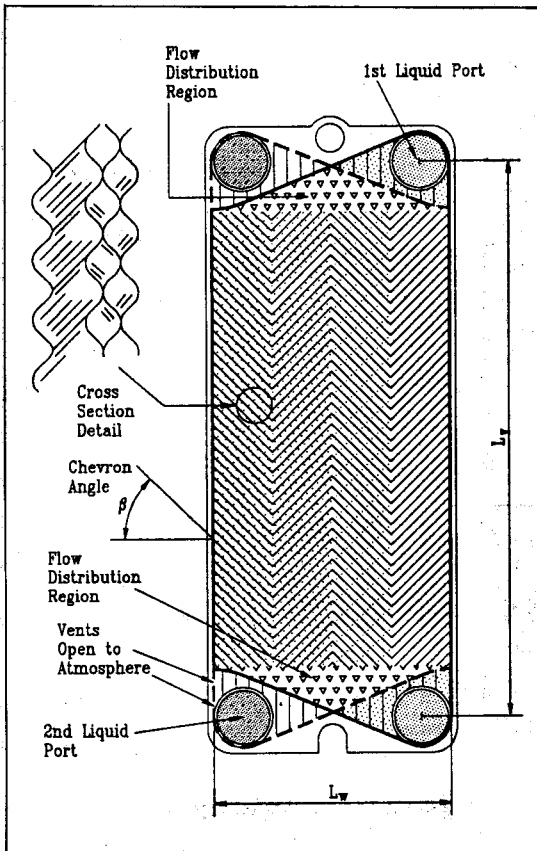


그림 5. 웨브론 플레이트



표 2. 설계 방법에 있어  $\epsilon$ -NTU와 LMTD의 비교

$\epsilon$ -NTU 법	LMTD 법
1) 주어진 입출구 온도를 가지고 온도 효율( $\epsilon$ )을 계산한다. 2) 양 유체의 용량률(R)을 계산한다. 3) $\epsilon$ 과 R을 알고 그 값을 이용하여 열이동 단위수(NTU)를 계산한다. 4) 전열 면적을 계산한다. $A = NTU \times C_{min} / U$	1) 주어진 입출구 온도를 가지고 P와 R를 계산한다. 2) 대수 평균 온도차 보정 계수(F)를 계산한다. 3) 총괄 열전달 계수(U)를 계산한다. 4) 전열 면적을 계산한다. $A = Q / (U \times LMTD \times F)$

표 3. 성능 평가 방법에 있어  $\epsilon$ -NTU와 LMTD의 비교

$\epsilon$ -NTU 법	LMTD 법
1) 주어진 입출구 온도를 가지고 열이동 단위수(NTU)와 용량률 계산한다. 2) 열이동 단위수와 용량률로 온도 효율( $\epsilon$ )을 계산한다. 3) 주어진 전열 면적, 총괄 열전달, 계수를 이용하여 온도차를 구하고 출구 온도를 계산한다.	1) 용량률을 계산한다. 2) 출구 온도를 가정하여 P를 결정 하거나 P를 가정하고 출구 온도를 계산한다. 3) 온도차 보정 계수(F)를 정한다. 4) 열부하(Q)를 계산한다. 5) 계산된 Q값으로 출구 온도를 계산하여 가정한 값과 비교한다. 6) 가정한 값과 일치될 때까지 반복 한다.

상기의 두 과정에서 어느 방법을 사용하더라도 결과는 같다. 그러나 성능을 평가할 때는 LMTD 방법을 사용하면 시행 착오법을 사용하여야 되기 때문에 반복 계산의 번거로움이 있다.  $\epsilon$ -NTU법에 나오는 무차원수  $\epsilon$ , NTU, R은 LMTD법에서 나오는 무차원수 P, R, F보다 열역학적 의미를 명확하게 나타내는 변수이다. 실제적인 문제에서 투자비를 최적화하려면 전열 면적의 증가에 따라서 열교환기의 성능이 얼마나 증가하는가를 알아야 한다.  $\epsilon$ -NTU법으로는 용량비에서 NTU의 증가에 따른  $\epsilon$ 의 증가 성향에서 쉽게 알 수가 있다.

#### 4.2 플레이트와 셸-튜브 열교환기의 비교

플레이트 열교환기와 셸-튜브 열교환기를 비교함에 있어 플레이트 열교환기의 선택과 연관된 중요한 고려 사항은 운전비, 유지, 무게, 공간 제한, 사용 온도, 온도 접근, 압력 레벨로 요약할 수 있다. 작동 유체가 액체/액체인 경우에 셸-튜브

보다 플레이트 열교환기에서 더 높은 총괄 열전달 계수를 얻는다. 튜브는 강도 측면에서 볼 때 가장 최적의 형상이지만 유량 면적과 연관해서 가장 작은 열전달 면적을 가지므로 열전달면으로 볼 때는 최악의 형상이다. 압력 손실은 같은 평균 속도와 유동 길이에서 튜브보다 100배 정도 크지만 이 압력 손실은 열전달 목적을 위해서는 최적의 요소이다. 플레이트의 유로는 NTU당 상당 압력 손실의 튜브보다 더 큰 열전달 계수를 준다. 대개 플레이트 유로에서 평균 유속은 0.3~0.8 m/sec이며 튜브의 일반적인 속도의 반정도이다.

플레이트 열교환기에서 유체 흐름을 위한 유로가 이상적인 반면 셸-튜브 열교환기에서 셸측은 열전달 측면에서는 좋지 않다. 대부분의 열교환기 용량에 있어 플레이트 열교환기에서 요구되는 패스의 수는 튜브나 셸측에서 요구하는 수 보다 많지가 않으며 이것은 열교환기의 입출구에서 비생산적인 압력 손실을 줄인다. 플레이트 열교환기의 장점은 LMTD가 튜브 열교환기 보다 더 크다는

것이며 플레이트 열교환기에 있어서 이론적인 LMTD의 95%가 이루지는 반면 나중에는 80%가 넘지 않게 효과적으로 사용한다. 플레이트 열교환기에 있어 온도 접근은 1°C까지 낮게 할 수 있는 반면 셸-튜브 열교환기에서 5°C 정도의 온도 접근은 경제적이지 못하다.

열교환기 튜브의 벽 두께는 일반적인 플레이트의 2배이며 따라서 금속 벽면 저항은 플레이트 열교환기에서 더 작으며 오염 저항도 플레이트 열교환기에서 더 작다. 열교환기 재질이 연강이고 미세한 온도 접근이 요구되지 않을 때 플레이트는 연강으로 거의 만들지 않기 때문에 셸-튜브 열교환기가 더욱 경제적이다. 열교환기 재질이 고가를 요구 할 때 플레이트 열교환기가 더욱 경제적이다. 사용할 수 있는 최대 포트 크기의 제한 때문에 가스와 증기와 같은 낮은 밀도의 많은 양을 다루기 위한 플레이트 열교환기를 위한 경제적인 설계를 하는 것은 매우 어려우며 이런 제한은 셸-튜브 열교환기에는 없다. 플레이트 열교환기의 최대 장점중의 하나는 검사, 청소, 정비를 위한 모든 부분을 분해 할 수 있다는 것이며 튜브 열교환기에 있어서 튜브와 내부를 검사하는 것은 어렵다. 똑같은 열용량이라면 플레이트 열교환기는 셸-튜브 열교환기보다 더 가볍고 설치 면적이 작아도 된다. 플레이트 열교환기는 유지 보수를

위한 추가적인 공간이 필요 없지만 셸-튜브 열교환기는 튜브 번들을 빼내기 위한 공간이 필요하게 된다.

표 2는 플레이트 열교환기와 튜브 열교환기를 비교한 자료이다.

### 5. 열교환기 성능 실험

열교환기의 열전달 용량 및 압력 손실, 온도 분포 등 열전달 특성을 파악하기 위하여 열교환기 성능 시험장치를 설계, 제작하였다. 수퍼 히트 펌프의 경우 냉매는 R-22와 R-142b 혼합 냉매를 사용하기로 되어 있으나 열교환기의 열전달 성능 시험을 위해서는 그 특성이 잘 알려져 있는 R-22를 사용하였다. 시험 장치의 열부하 및 냉각을 위해서는 순수물을 사용할 수 있으며 열교환기 성능 시험 장치의 용량은 약 35kW 이다.

융접형 플레이트 열교환기의 열전달 특성을 조사하기 위하여 사용된 열교환기는 현재 국내에서 사용되고 있는 10kW 열교환기를 증발기로 하여 실험을 하였다. 이 열교환기는 쉘브론 각이 30°로 큰 압력 강하를 가지고 높은 열전달을 갖는다. 플레이트 수는 20장으로 냉매측의 유로는 9채널 물측의 유로는 10채널을 형성한다.

표 2. 플레이트와 튜브 열교환기의 비교

수열측	방열측	
Water	Water	
590,000 kg/h	590,000 kg/h	
23°C to 36.5°C	41.5°C to 28°C	
열 회수율 : 70.5%		
NTU의 수 : 2.4		
허용 압력 손실 : 100 kPa		
열교환기 형식	플레이트	튜브
열전달 면적 (m <sup>2</sup> )	448	1218
열전달 계수 (w/m <sup>2</sup> °C)	3840	1832
유효 평균 온도 차이 (°C)	5.6	4.8
압력 강하 고온/저온 (kPa)	32 / 33	100 / 100
오염 저항 고온/저온 (m <sup>2</sup> °C/w)	0.00017 / 0.000017	0.000086 / 0.000086
패스 배열	1 / 1	튜브측에서 4개의 배열
재질	SUS	mild steel

5.1 시험 장치

본 시험 장치는 냉매로서 R-22를 사용하고 열 부하 및 냉각은 순수물을 사용하는 약 10 냉동톤 규모의 냉동기와 유사하게 설계 되어 있다. 그림 6은 본 시험장치의 개략도이다. 열교환기를 시험 하지 않을 경우는 장치를 기본적으로 구성하고 있는 증발기와 응축기, 팽창변 및 압축기로 냉매 측 폐회로가 구성되어 일반적인 냉동기와 동일하게 운전할 수 있으며 이때 증발기의 열부하로는 기름보일러를 사용하여 항상 일정 온도를 유지하는 온수조의 온수를 사용하며, 응축기의 냉각은 상온의 수도물을 사용하게 되어 있다. 이 시험 장치는 냉매의 유량을 변화 시키기 위하여 압축기의 용량을 조절할 수 있게 인버터를 이용하여 압

축기에 연결된 모터의 속도를 조절하였다.

5.2 측정

소온도차 열교환기의 열교환 성능 시험을 위하여 실제 데이터 측정시는 Data Acquisition System을 사용하였다. 압력은 그림에서 보는 바와 같이 열교환기 전후로 하여 물과 냉매의 압력을 측정하였으며 온도는 정확한 온도 변화 측정을 위하여 RTD를 사용하였으며, 측정 위치는 응축기, 증발기 전후에 있어 물과 냉매 라인에 각각 2점을 측정하였다. 또한 온수 저장 탱크의 수온을 일정하게 유지하기 위하여 온수조의 물 온도도 측정하였다. 시험용 열교환기를 통과하는 물유량 측정은 PANAMETRICS 초음파 유량계를 사용하였

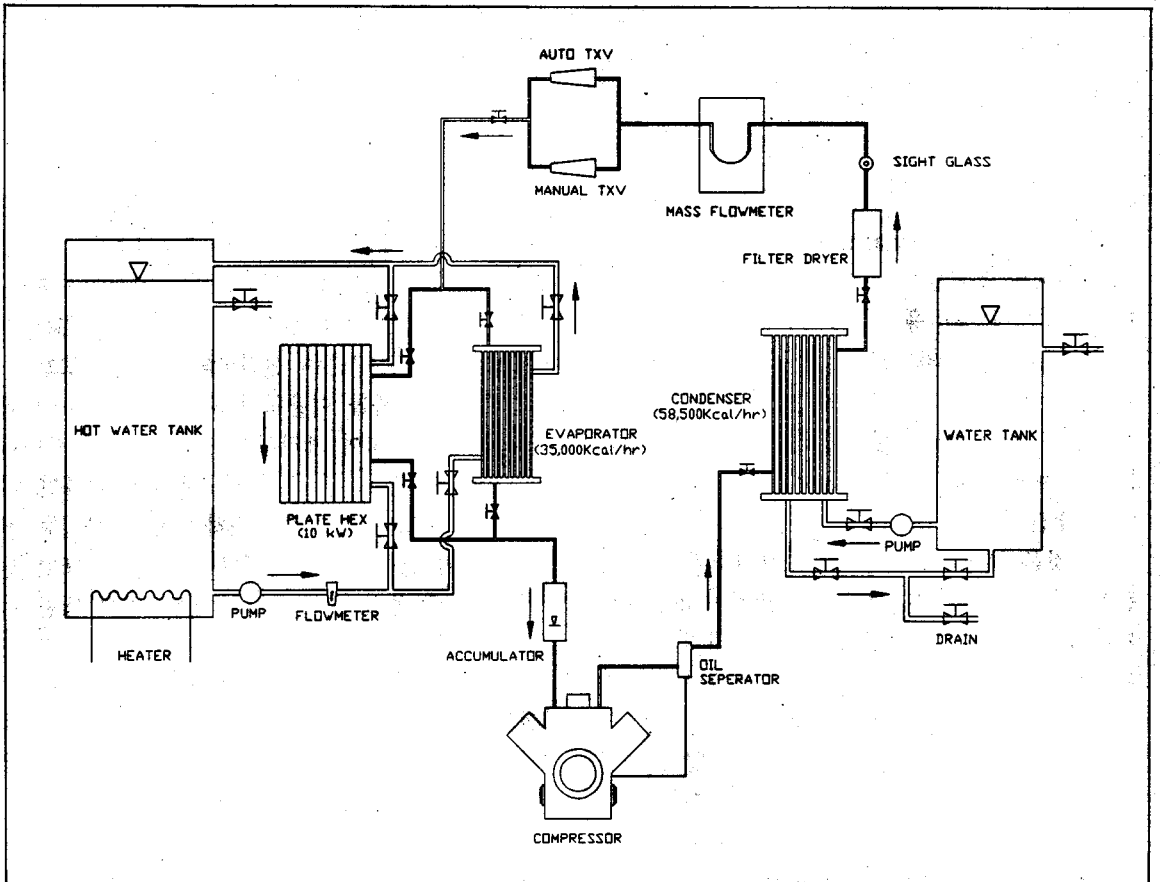


그림 6. 시험 장치의 개략도

고 냉매의 유량은 100 kg/min 용량의 fisher and porter계 유량계를 사용하였다. 또한 열교환기 주위의 온도 분포를 측정하기 위하여 Thermal Vision System을 이용하여 측정하였다. 이 시스템은 온도를 직접 측정할 수 없거나, 어떤 부분에서 온도 분포를 측정하여 분석하고자 할 때 사용한다.

### 5.3 실험 방법

압축기의 토출 압력은 인버터를 이용한 압축기 속도 조절과 응축기로 들어가는 물유량을 조정하여 원하는 목표치에 도달하도록 하였다. 증발기 출구 압력과 냉매 유량은 수동 팽창 밸브를 이용하여 목표치에 도달하도록 하였다. 원하는 목표치에 도달하여 토출 압력과 냉매 유량이 변화가 없을 때 시스템이 정상 상태에 도달한 것으로 간주하여 증발기 입출구의 냉매 라인과 물라인에서 온도와 압력을 측정하였다.

### 5.4 실험 결과

Thermal Vision System을 이용하여 열교환기 뒷면의 온도 분포를 측정해 본 결과 플레이트 열교환기 맨 뒷면의 유로에는 냉각수가 흐르고 있었으며 맨 아래쪽의 냉각수 출구 포트에서 온도가 제일 낮은 것으로 나타났다. 플레이트 열교환기를 수직으로 세운 상태에서 옆면으로의 온도 분포를 보면 양가장자리의 모서리 부분은 온도가 낮고 중간 부분에서 가장 높은 온도를 나타내었다. 이것은 열교환기 양쪽에서 냉각수의 흐름이 원활하지 않기 때문에 발생한다. 따라서 포트에서 유량 분배 설계가 잘 되어야 적절한 압력 손실에서 유량이 잘 분배되어 유로에서 최대의 열교환으로 온도 분포가 존재할 수 있다.

압축기 출구의 압력, 증발기 출구의 압력을 일정하게 하고 증발기에 흐르는 냉매 유량의 변화를 살펴보았다. 그림 7은 냉매의 유량 변화에 대한 총괄 열전달 계수와와의 관계를 나타내며 냉매의 유량이 증가할수록 열전달 계수가 미세하게

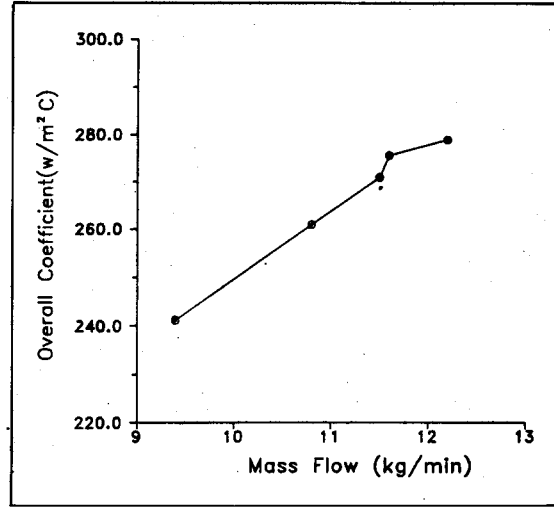


그림 7. 냉매 유량에 따른 열전달 계수의 변화

증가하는 것을 알 수 있으며 그 값은 200 ~ 300 W/m<sup>2</sup> C 사이에 존재한다.

## 6 결 론

국내의 플레이트 열교환기의 사용은 석유정제, 석유화학, 화학공정, 철강, 핵발전, 열회수, 금속공정, 조선공업, HVAC, 식품공업등 광범위하게 이용되고 있다. 그러나 가스켓형 플레이트 열교환기의 설계, 제작 수준은 선진국의 설계 프로그램으로 계산한 결과를 이용하여 외국에서 플레이트와 가스켓을 수입하여 제작하고 있다. 용접형 플레이트 열교환기는 전량 수입에 의존하여 판매만 하고 있는 실정이며 이를 용접하기 위한 용접용 진공로 조차 보유하고 있지 않는 수준이다. 또한 전 세계적으로 용접형 플레이트 열교환기에 대한 이론, 열전달 상관식, 설계 기술, 제조 기술 등과 관련하여 공식적으로 출판된 보고서는 거의 없으며 외국의 제작사에서조차 자체 설계 기술등에 관해 많은 특허를 가지고 있다. 따라서 고효율 열교환기인 플레이트 열교환기에 대한 자료 조사, 기초 연구, 제작 기술등을 수행하여 이 분야에 대한 많은 기술 축적이 필요하며 국내에서도 용접형 플레이트 열교환기에 대한 수요가 급속도로 증가하

고 있으므로 이에 대한 연구는 매우 절실한 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

- [1] 상자부, 고효율 에너지 변환 축적 시스템 개발에 관한 연구 기획, 1993
- [2] NEDO, Japan, R&D on Super Heat Pump Energy Accumulation System, Final Report, 1993
- [3] S. Kakac, R. K. Shah, A. E. Bergles, Low Reynolds Number Flow Heat Exchanger
- [4] W. M. Kays and London, Compact Heat Exchanger, 3rd ed. McgrawHill, 1984
- [5] E.A.D Saunders, Heat Exchanger
- [6] Mori, Sheindin, Afgan, High Temperature Heat Exchanger
- [7] G. Walker, Industrial Heat Exchanger
- [8] 신경 건설, 민의동 부장 : “플레이트 열교환기”에 관한 개인적인 접촉
- [9] 한국기계연구원, 고효율 증발기 및 응축기 개발(I), 1994
- [10] 日本機械學會, 流體の熱物性値集