

# 직접방식 열교환기와 전달특성

김 석 현

## A Note on Direct Contact Exchangers

Sukhyun Kim



● 김석현(국민대 기계공학과)  
● 1950년생  
● 열공학을 전공하였으며, 열환경 및 냉동설비 응용관련 에너지시스템과 요소장비의 성능향상에 관심을 가지고 있다.

### 1. 머리말

산업공정 및 에너지변환기의 중요한 요소로서 매우 다양한 종류의 열 및 물질 교환장치가 적용되어 왔으며 유동방식, 전열면 형상, 재질 등이 설계조건에 따라서 달라지므로 이러한 관점에 따라 교환장치를 분류하고 있다. 일례로 양측 매질의 온도변화 형태를 근거로 응축기 등과 같이 한쪽의 온도가 일정하다고 가정되는 단류(單流) 열교환기(single stream heat exchanger)와 일반적으로 양측온도가 다 변화하는 양류(兩流) 열교환기(two stream heat exchanger)로 구분하기도 하며 표 1에 주어진 바와 같이 열설계 특성에 따라 분류할 수도 있다.

많은 경우 열교환기에서 두 작동유체는 사이에 고체벽을 두고 열전달을 하게 된다. 열은 고온측 유체로부터 벽면을 통과하여 저온측 유체로 흐르게 되고 이때 가끔 상변화를 동반하기도 한다. 그러나 구분 II과 III에서 보이는 다상(多相) 매질간의 열 또는 물질이 교환되는 경우 매질을 분리하는 벽이 없이

그 매질 사이의 공유표면(interface)에서의 직접접촉(direct contact)을 통해서 열교환을 시키기도 하는데 이를 직접접촉식 교환장치 또는 직접교환장치(direct contact exchanger)라고 한다. 이 경우 열전달면이 제거됨으로써 제작비용이 작아지고 열전달 저항이 감소됨은 물론 흔히 잠열교환의 큰 효과를 얻을 수도 있어 전체 시스템의 열전달률이 매우 커지고 상대적으로 교환기의 크기를 적게 할 수 있다.

이를 태면 폐열 시스템 등 적은 온도차에서 작동하는 랭킨사이클이나 온열원에서 에너지를 추출하는 장치에서는 일반적으로 전체 시설비중에서 열교환장치가 차지하는 비율이 상당히 크기 때문에 이의 시설비를 최소화하는 것은 곧 시스템 최적설계의 중요한 요건이 된다. 많은 보고에서 잘 설계된 직접식 열교환기로 대체한 경우의 초기 투자비 절감 및 보수유지비 절감효과를 기대하고 있다.

직접열교환기의 단순한 예로는 수조내에 수증기 기포를 분산시키는 단류열교환기형태의 온수장치를 들수 있으며 수증기는 잠열을

표 1 열설계 특성상의 분류

구 분	매질의 형태	열전달 모드	적 용
(일반현열) 열교환기 Category I	single phase/single species 단일용질인 기체, 액체 또는 간혹 고체 * 수분잠열이용의 경우 있음 * 전열소자내는 category III	자연대류 강제대류 복사	shell & tube, plate, double pipe, compact, recuperator, rotary, 각종 방열기, heat pipe ex- changer, 태양열 집열기, 소각 로
(잠) 열교환기 Category II	multi-phase/single species 주로 단일물질의 액체 증기 혼합상태 例 $H_2O_{Liq}-H_2O_{vap}$	비등 증발 응축 기타	증발기 보일러 응축기 (direct contact type이 가능)
열 및 물질교환기 Category III	multi-phase/multi-species 복합물질의 기체, 액체, 고체 혼합상태 例 air-water vapor-water LiBr-water-water vapor	증발 응축 흡수 흡착 화학반응	냉각탑(습식, 건식) 건조탑 흡수기, 발생기 catalytic converter (거의 direct contact type)

전달하여 냉수를 가열하며 응축수는 온수에 합쳐진다. 또한 가장 기본적인 2상교환장치로서 증발기나 응축기 중 직접방식을 도입한 사례가 많으며 James Watt의 최초의 수증기 응축장치도 수증기에 냉수를 분사하는 방식의 직접응축기였다고 한다. 이들 증발기나 응축기는 우리나라의 전체 연료소비의 1/4을 접하는 발전용의 Rankine 사이클을 구성할 뿐 아니라, 폐열회수 기타 유효이용열의 절감에도 그 용도가 극히 넓고 중요하다.

양류 직접열교환기의 경우 그 적용방식은 더욱 다양하나 간단한 사례로서 상호 혼합되지 않는 기름과 물 등을 그림 1에 보인 바와 같이 배열하여 직접열교환을 시키는 장치들 들 수 있으며 표 2에 비교된 바와 같이 전술한 특징에 부가하여 열전달면의 부식, 스케일 퇴적(fouling), 보수유지의 모든 문제가 크게 감소하기 때문에 최근 많은 에너지시스템의 효율향상에 이의 사용이 제안되고 있다.

직접접촉의 양식(mode)으로는 초보적인 개수로(open channel)의 형태, 또는 분무(spray), 기포(bubble)의 형식으로부터 본격

적인 충전층을 사용하는 경우 등이 있다. 충전층 형태로는 자유낙하하는 액체막(falling film) 또는 액체분류(jet)가 흔히 사용되거나 기타 다양한 고체 충전물을 쓰기도 하며 이외에도 다공질 건조제의 충전층, 회전식 또는 정지식의 충전층 열회수기(regenerator), 유동층(fluidized bed)장치, 공해물질회수용 촉매 장치(catalytic converter)나 세정기(scrubber) 등의 형태가 넓은 의미의 직접식 교환장치(contact-type exchanger)로 분류되기도 한다. 그림 2에 양류형의 기포방식 직접교환기를 적용한 랭킨 사이클 사례를 보인 다.

## 2. 직접계면에서의 전달특성

직접교환기의 설계 목표도 통상의 열교환기의 경우와 마찬가지로 여러가지 주어진 설계제약조건을 만족시키면서 전달능력의 단위(Ntu 등)를 최대로 해주는 데 있다. 그러나 교환장치들의 유형이나 형상에 따라 지배적인 전달현상은 상이하다. 직접식 교환기내에서의 열 및 물질전달의 복합적 현상을 지배

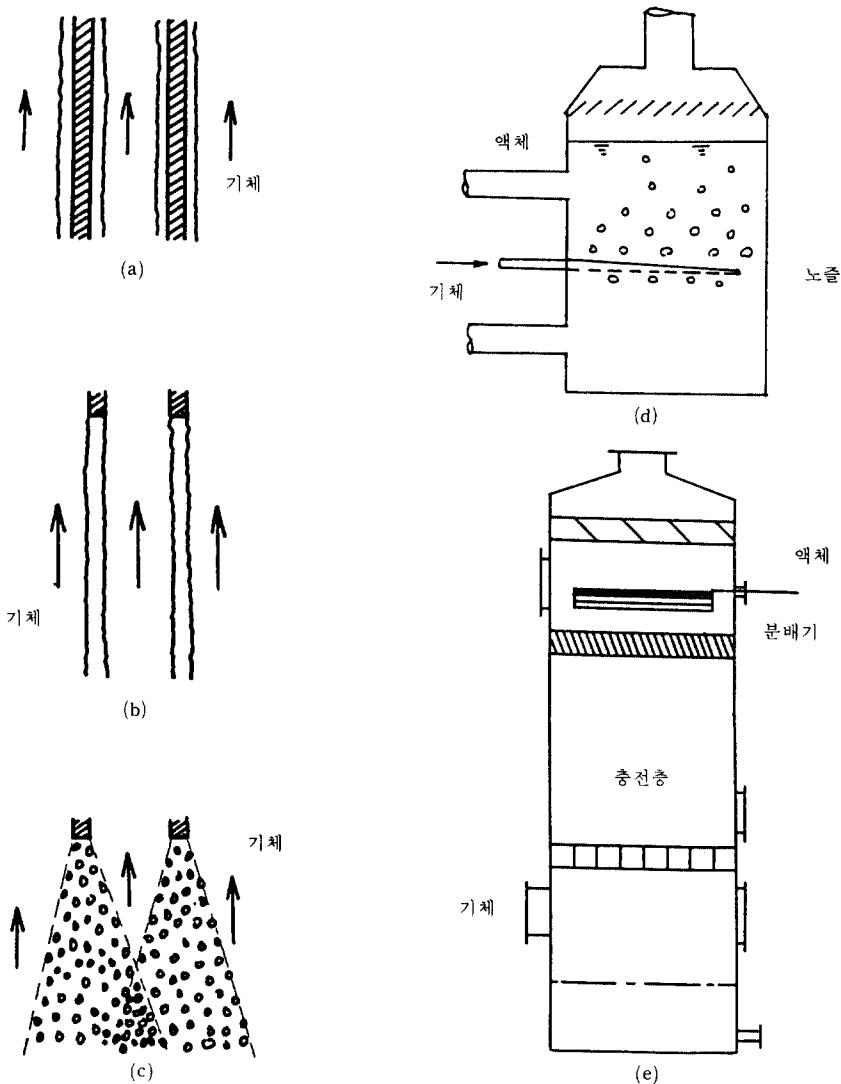


그림 1 직접 (direct contact) 열교환 형태

표 2 직접식 응축기 (direct contact condenser) 의 특징

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 항상 새로운 전열면을 공급한다.</li> <li>2. 다양한 전열면의 형태가 가능하다.</li> <li>3. 전열계수가 매우 크고 형태에 따라 전열면적이 크게 된다.</li> <li>4. 따라서 전열효과가 크고 소형경량화가 가능하다.</li> <li>5. 냉각수의 압력손실이 적다.</li> <li>6. 제작 및 보수유지가 쉽다.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 매체의 조합에 제한이 있다.</li> <li>2. 양 매체의 작동압력이 동일 하여야 한다.</li> <li>3. 매체종류에 따라 용해의 문제가 발생할 수 있고, 이 경우는 별도의 분리공정이 요구된다.</li> <li>4. 상문의 자유 표면에서의 전달현상 해석이 난이하다.</li> </ol>
---	--

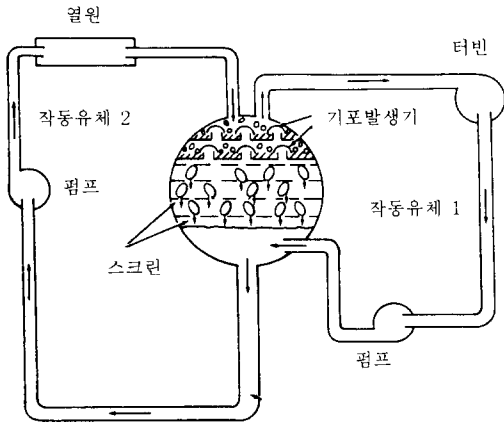


그림 2 직접교환기를 적용한 랭킨 사이클<sup>(3)</sup>

하는 일반적인 내용들을 열거하면 다음과 같다.

- (1) 기체측 열전달문제
- (2) 기체측 물질전달문제
- (3) 액체측 열전달문제
- (4) 기체측 공유표면에서의 열역학적 성분 평형
- (5) 표면에서의 잠열효과를 포함하는 에너지 방정식
- (6) 자유표면에서의 전달저항에 관한 식

이 여섯 개 현상들을 교환장치의 특성에 따라 수식으로 구성하고 여기에 포함되는 여섯개의 미지수를 구하는 것이 문제가 된다.

- (1)  $\dot{q}_G''$ , 기체측 열전달률(또는 온도분포)
- (2)  $\dot{q}_L''$ , 액체측 열전달률(또는 온도분포)
- (3)  $\dot{m}''$ , 자유표면에서의 물질전달률(또는 농도분포)
- (4)  $m_{1, s}$ , 기체측 자유표면에서의 질량비
- (5)  $T_u$ , 액체측 자유표면의 온도
- (6)  $T_s$ , 기체측 자유표면의 온도

경우에 따라서는 기체측 또는 액체측의 운동량 방정식(momentum equation)에 대한 해가 요구되어 지배방정식의 수가 더욱 늘어나게 되고 수정이 필요하다. 이 글에서는 매

질 양측의 열 및 물질전달현상자체보다 전달 계면에서의 열 및 물질전달 특성만을 정리한다.

다른 유사한 분야에서도 그렇듯이 물질전달현상의 경우 지배식들은 보존법칙(conservation law)과 전달법칙(transport law)으로 주어진다. 전자는 질량뿐만 아닌 물질자체(species 또는 matter)의 보존을 의미하며 대수식 형태로 주어지는 반면, 후자는 소위 Fick의 법칙과 같은 미분방정식 형태로 주어진다. 이들은 결국 타원형(elliptical) 특성을 갖는 편미분방정식의 해를 구하는 것으로 귀결되며 특히 경계층(boundary layer) 문제와 같이 한 좌표 방향의 유동이 지배하는 경우, 포물형태(parabolic)의 선형 또는 비선형(non-linear) 지배방정식으로 단순화하기도 한다. 그러나 물질전달이론은 성격이 서로 다른 학문이나 산업들 간에 자생적으로 발전되어 왔기 때문에 분야간의 상호교류의 결여로 인하여 체계적 이론확립이 늦어져 있다. 특히 각 분야의 독특한 편의를 위하여 취급되는 변수들이 다르고(molar, mass 단위 또는 number density 등)정의, 개념, 부호 등이 다르며, 상호간 환산도 단순치 않다. 여기서는 직접식 교환장치에 관련되는 최소한의 개념만을 도입하여 계면에서의 현상을 기술하고자 하였다.

### 2.1 공유표면의 정의 및 경계조건

다성분계 2상간의 공유 표면에서 물질농도는 온도의 경우와는 달리 통상 불연속이다. 예를 들면 물과 공기가 접촉하는 공유 표면의 안쪽(액체측)과 바깥쪽(기체측)에서 온도는 연속적이지만 농도는 전혀 다르다. 공유 표면 주위의 물질농도를 명확히 정의하기 위해서 그림 3에 보이는 바와 같이 공유 표면을 포함하는 미소한 체적을 고려한다. 이 체적의 바깥쪽 면은 공기에 접하고 있으며 s면(s-surface)이라 부르고, 안쪽 면은 물속에 있어 u면(u-surface)이라고 명명한다. 또한

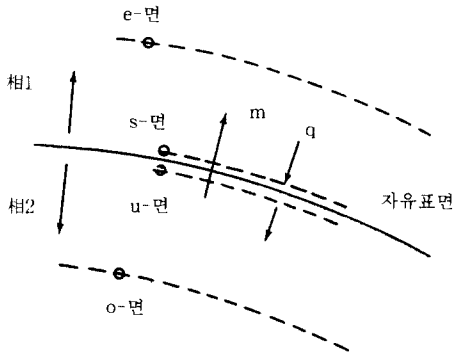


그림 3 물질 전달 해석에 사용되는 가상 표면들의 모델

공유 표면의 영향을 받지 않는(이론상으로는 공유 표면으로부터 무한히 먼곳에 위치하겠지만)면 e와 o면(e-surface, o-surface)을 가상한다. 물리적으로 s면과 u면 사이의 거리는 분자의 평균자유이동거리(mean free path)의 3~4배 정도라고 본다. 계면온도에 해당하는 수증기 분압, 용해특성자료(solubility), Dalton의 법칙, Henry의 법칙, 상도(phase diagram) 등을 이용하여 s면에서의 경계조건을 정해주게 된다.

### 2.2 자유표면에서의 전달저항

많은 경우 자유표면에서의 전달저항(Interfacial Resistance)은 매우 작고 따라서 자유표면에서의 열역학적 평형을 가정할 수 있어서 상기된 지배식 및 미지수가 하나씩 줄게 된다. 그러나 이부분 계면저항이 중요한 역할을 하는 경우에 있어서 예를 들면 응축이나 증발이 일어나는 속도가 커짐에 따라 자유표면에서의 전달저항이 점차 전체전달현상을 지배하게 되며 그 속도에는 분자운동의 크기로서 정해지는 최대치가 존재한다. 금세기 초 저압에서의 물질 증발 및 응축에 관한 Hertz-Knudsen의 이론에 근거를 두고 제안된 Schrage의 식<sup>(5)</sup>을 보면 다음과 같다.

$$\dot{m}'' = f \left[ \frac{p_s}{(2\pi RT_s)^{1/2}} \Gamma - \frac{P_u}{(2\pi RT_u)^{1/2}} \right] \quad (1)$$

여기서,  $f$ 는 증발 및 응축에 관한 Langmuir계수 ( $f_E = f_C$ ),  $P$ 는  $T_s$  또는  $T_u$ 에 해당하는 증기의 포화압력,  $R$ 는 기체상수  $\Gamma$ 는 Schrage의 보정계수를 나타내며, 하첨자  $s, u$ 는 각각 s면과 u면을 나타낸다.

Schrage의 보정계수에 대한 표현식은 자유표면에 수직한 증기의 속도성분과 분자의 확률 속도(most probable speed  $c = \sqrt{2RT/M}$ )와의 비를 분자의 속도비  $s$  (molecular speed ratio)라 할 때, 식 (2a)와 식 (2b)로 얻어지며, 식 (1)은 식 (3)으로 주어진다.

$$\Gamma = 1 - \sqrt{\pi s} : 0.0 < |s| < 0.001 \quad (2a)$$

$$\Gamma = 1 - 1.85s : 0.001 < |s| < 0.1 \quad (2b)$$

$$\dot{m}'' = \frac{f}{1 - af} \cdot \left[ \frac{P_s}{(2\pi RT_s)^{1/2}} - \frac{P_u}{(2\pi RT_u)^{1/2}} \right] \quad (3)$$

$$a = 0.500 - 0.523$$

Hertz-Knudsen 이후 이 분야의 연구들은 주로 Langmuir계수  $f$ 를 얻는 것이 되어왔는데  $f_E$ 와  $f_C$ 가 일괄적으로 또는 개별적으로 고찰되었다. 충돌계수(striking coefficient)라고 부르는  $f (< 1)$ 은 응축/증발시의 분자운동의 물리적현상을 나타내는 숫자로서 증기 분자가 액체표면에 충돌하게 되면 응축을 하든지 탄력적 반사를 한다는 단순과정(one-step process) 가정에 근거를 두고 있다. 그러나 Volmer 등<sup>(6)</sup>이 제안한 복합과정(two-step process) 개념에 의하면 분자충돌시에 그 운동에너지가 충돌체(특히 결정구조인 경우)에 아주 급속히 흡수되는 것이 보여지는 등 당초의 가설에 수정이 가해지고 있으며, Hertz-Knudsen이론에서 가정된  $f_E = f_C = f$ 의 관계도 불평형조건하에서는 의문시되고 있다. 한편 Mills의 보고<sup>(7)</sup>에 따르면 물-증기계 응축현상에 대해  $f_C = 1$ 을 택할 것을 추천하

고 있다. 여기서는 식 (3)에서  $a=0.523$ 인 경우를 택하고  $T_s \approx T_u$ 인 것을 가정하면 식 (4)가 되고 또한  $\Delta P$ 가 작다는 가정하에 증기압과 온도관계를 나타내는 Clausius-Clapeyron식 (5)를 이용하면 식 (6)를 얻게 된다.

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} = \frac{h_{fg}}{V_s T_u} \quad (5)$$

$$\dot{m}'' = \frac{0.84}{(RT_u)^{1/2}} \frac{h_{fg}(T_s - T_u)}{V_s T_u} \quad (6)$$

식 (5)에서  $V_s$ 는  $T_s$ 에서의 비체적을 나타낸다.

윗 식에서 보여 주듯이 물질전달(증발이나 응축)이 일어나는 곳에는 반드시  $(T_s - T_u)$ 가 존재하여야만 한다. 즉 자유표면에서의 열전달저항은 항상 존재한다고 판단할 수 있으며, 따라서 합당한 열전달 계수가 정의될 수 있다. Nabavian과 Bromley<sup>(8)</sup>에 의하면, 식 (7)을 주고 식 (6)으로부터 식 (8)을 얻게 된다.

$$h_i \equiv \frac{\dot{m}'' h_{fg}}{T_s - T_u} \quad (7)$$

$$h_i = \frac{0.84}{(RT_u)^{1/2}} \frac{h_{fg}^{2as}}{V_s} [W/m^2 K] \quad (8)$$

최종적으로 얻은 식 (8)은  $P_s - P_u$  혹은  $T_s - T_u$ 가 Clausius-Clapeyron관계의 적분이 가능할 정도로 작은 경우에 한하여 의미가 있는데 Rohsenow와 Sukhatme<sup>(9)</sup>는  $P_s$ 와  $P_u$ 의 차이가 5% 미만일 것을 요구하고 있다.

### 3. 맺음말

통상의 열교환기에서 전열면이 제거된 형태의 직접열교환을 통하여 제작비나 열전달 특성에 큰 효과를 얻을 수도 있어 에너지이용 합리화에 기여하는 특성과 사례를 언급하였다. 또한 통상의 열교환기 설계와 다른 매질간의 공유계면에서 발생 가능한 전달특성

을 위주로 설계상의 일부 유의사항을 기술하였다.

물-증기 자유표면에서의 열전달 계수를 식 (8)에 의해 확인하면 상온 이하의 온도에서는  $h_i$ 는 매우 커서 다른 막저항 등에 비해 전달저항을 무시할 정도가 되겠으나 저온의 영역에서는  $h_i$ 의 크기가 점점 작아지고 따라서 전달저항은 커지는 것을 볼 수 있다. 특히 대부분의 응축장치들은 가능한 한 낮은 온도에서 전달되도록 설계되고 있으므로 주의가 요한다.

또한  $f$ 의 값이 1보다 적어지는 경우  $h_i$ 의 값은 크게 달라지는데 특히 고가의 직접 접촉식 열교환장비의 최적설계에는 총괄 열전달계수의 정확한 파악이 필수적이며 아울러  $f$ 의 정확한 값을 얻는 것이 매우 중요한 과제가 된다. 예로써 해수담수화설비(desalination)의 경우 저압단은 해수와 비슷한 온도까지 운전온도가 내려가게 되므로 상당한  $h_i$ 의 영향이 예상되며 증발기부분의 계면저항과 특히 자유표면 부근의 염분농도증가로 인한  $f$ 또는  $h_i$ 에의 영향도 검토해보는 것이 바람직하다.

직접열교환의 기술축적은 상변화를 동반하는 열전달(two phase heat transfer)문제의 기초지식은 물론, 염수플랜트(desalination)의 기본 요소설계, 원자로의 냉각계통사고(LOCD)대책, 기타 냉각탑, 탱크가열, 증발기(evaporator), 건조장치(drier), 각종 기계, 화공 공정장치 설계 등 매우 광범위한 기술과급 효과도 기대할 수 있으므로 관련 기술자들의 많은 관심을 기대한다.

### 참고문헌

- (1) 김석현, 1984, "직접접촉방식 열 및 물질교환장치의 전달현상(I)," 대한기계학회지, 제24권 제5호, pp. 358~366.
- (2) Schlunder, E. U., et. al., 1983, *Heat Exchanger Design Handbook*, Hemisphere

- Pub. Corp., Washington DC.
- (3) Mechanical Engineering, Vol. 102, No. 7, p. 43
- (4) Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N., 1960, *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, NY.
- (5) Schrage, R. W., 1950, "A Theoretical Study of Interface Mass Transfer," Columbia University, NY.
- (6) Volmer, M, 1939, "Kinetic der Phasenbildung," Dresden & Leipzig.
- (7) Mills, A. F., "The Condensation of Steam at Low Pressures," 1965, Final Report, USNSF GP-2520.
- (8) Nababian, K and Bromley, L. A., 1963, "Condensation Coefficient of Water," *Chem. Engr. Sci.*, Vol. 18, pp. 651~660.
- (9) Rohsenow, W. M. and Sukhatme, S. P., *Developments in Heat Transfer*, MIT Press. 