

직접접촉응축 열교환기의 분류 및 응용

오후규 · 김성규

Classification and Applications of Direct Contact Condensation Heat Exchanger

Hoo-Kyu Oh, Seong-Kyu Kim



- 오후규 (부산수산대학교 냉동공학과)
- 1947년생
- 열공학(냉동공학)을 전공하였으며, 응축기, 증발기 등 고성능 열교환기의 개발에 관심을 가지고 있다.



- 김성규 (한국해양대학교 선박운항시스템공학과)
- 1952년생
- 열공학(냉동공학)을 전공하였으며, 열교환기 및 각종 냉동·공조시스템에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

온도가 서로 다른 두 작동유체가 직접접촉을 하여 열전달이 일어나는 현상 즉, 직접접촉 응축 열교환은 일정체적의 증기속으로 과냉각액(subcooled liquid)을 분사하는가, 아니면 과냉각액 속으로 증기를 분사함으로써, 증기와 과냉각액이 직접접촉하여 발생하는 응축전열 과정이다. 이러한 직접접촉 응축은 여러 형태로 일어나고 있으나, 크게 액적 위에 직접 증기가 응축되어 액적이 자라는 경우와 증기기포(vapor bubble)가 액체 풀(pool) 내에서 응축을 일으켜 점점 작아져서 없어지는 경우 및 기체상과 액체상이 뚜렷한 경계면을 가지면서 경계면에서 응축이 일어나는 형태로 분류할 수 있다. 어느 경우에 있어서나 액체 내에서 얼마나 빨리 열을 전달시켜 경계면에서 계속하여 응축이 발생할 수 있는 조건을 만드느냐에 따라 응축 열전달량은 큰 영향을 받게 된다.

직접접촉 열교환 기술은 냉각탑, 접촉급수 가열기 및 공기분리기 등과 같은 장치에 예전부터 이용되어 왔는데, 그 주요한 적용이유는 가열유체(加熱流體)와 수열유체(受熱流體)의 사이에 일어나는 전열이 일반 열교환기와는 달리 고체벽(금속 열전달표면)을 통과하지 않고 열교환을 함으로써, 종래의 열교환기에 비하여 상대적으로 설비의 간단화, 부식 및 스케일 부착문제가 경감됨에 따른 적은 유지보수비 및 높은 열전달률을 얻을 수 있는 이점이 있으며, 저 온도차에서의 효율적인 사용이 가능하기 때문이다. 이 글에서는 직접접촉응축 현상의 장점을 이용하는 직접접촉식 열교환기의 구조와 형태, 그리고 그 응용분야에 대해서 알아보려고 한다.

2. 직접접촉응축 열교환기의 형태

응축은 계의 조건에 따라서 다양한 응축양식을 가지는데, 일반적으로 적상응축(滴狀凝縮, dropwise condensation), 막상응축(膜狀

凝縮, filmwise condensation), 직접접촉응축(直接接觸凝縮, direct contact condensation), 균질응축(均質凝縮, homogeneous condensation) 등으로 분류할 수 있다.⁽¹⁾ 이 중에서 직접접촉응축은 일정체적의 증기속으로 과냉각액을 분사하든가, 과냉각액 속으로 증기를 분사함으로써 증기와 과냉각액이 직접접촉하여 발생하는 응축과정으로서 직접접촉식 열교환기의 성능은 그 접촉형태에 따라 크게 좌우된다.

그림 1에는 자연환경에서 일어나는 직접접촉응축 열교환의 예를 나타낸 것으로서 구름속의 빗방울이 공기와 직접접촉하는 경우와 화산에서 분출된 용암이 바다 속으로 흘러 들어가 응고되는 현상을 보여주고 있다. 일반공업에서도 그림 1과 같은 열교환원리를 적용하고 있다.

그림 2는 이 원리를 적용한 직접접촉식 열교환기의 전형적인 구조를 나타낸 것이고, 그림 3은 여러가지 직접접촉응축 열교환의 형태를 나타낸 것이다. 이들 형태는 그림에서와 같이 기상속으로 액적(液滴, liquid droplet)을 낙하시키거나(그림 3의 a), 기상속으로 액체막(液體膜, liquid falling film or jet)을 분류(噴流, 그림 3의 b, c)하거나, 액적을 분무(噴霧, spray, 그림 3의 d)하는 형식으로부터, 액체상으로 기포(氣泡, bubble)의 형식으로 분출시켜(그림 3의 e) 접촉시키며, 양 매체의 접촉시간을 증가시키기 위하여 충전층이나 간막이판(packbed or baffle plate, 그림 3의 f, g) 등을 사용하는 경우가 있다. 이 외에는 그림 4에서와 같은 분무를 이용한 직접접촉식 응축기의 형태가 있다.^(2,3)

이러한 직접접촉응축 열교환기는 고체벽을 통해 열교환시키는 종래의 열교환기와 비교하여 다음과 같은 장·단점이 있다.

장점으로서는

- (1) 전열저항이 일어나는 전열벽이 없으므로 높은 열전달률을 얻을 수 있다.

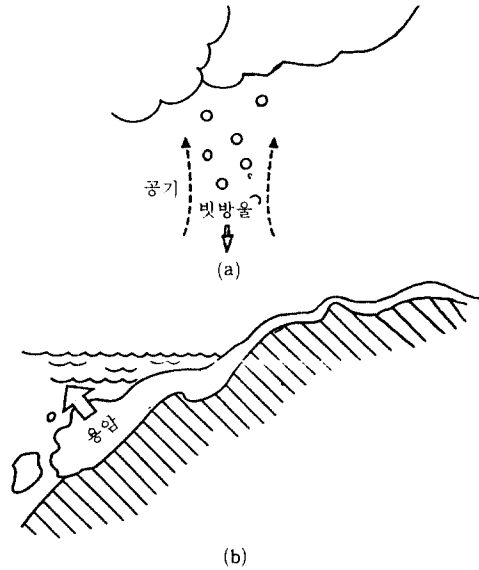


그림 1 자연환경에서의 직접접촉응축 열교환의 예

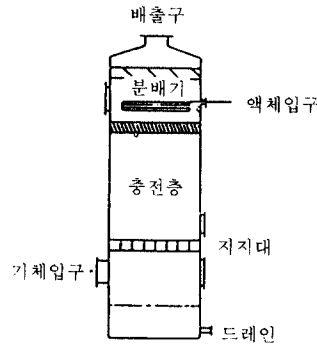


그림 2 직접접촉식 열교환기의 전형적인 구조

- (2) 전열면의 다양한 형태가 가능하다.
- (3) 전열효과가 크고 소형, 경량화가 가능하다.
- (4) 전열벽에 의한 열저항이 없다.
- (5) 부식 및 스케일 부착문제가 적다.
- (6) 유지·보수비가 저렴하다.
- (7) 저 온도차에서의 효율적인 사용이 가능하다.

단점으로서는

- (1) 직접접촉을 하는 양매체의 구성에 제한

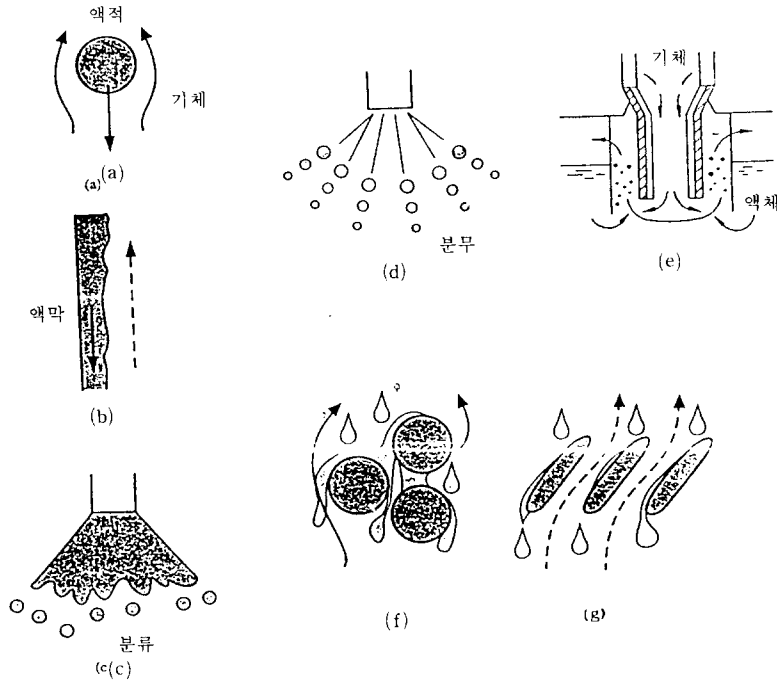


그림 3 직접접촉식 열교환의 형태

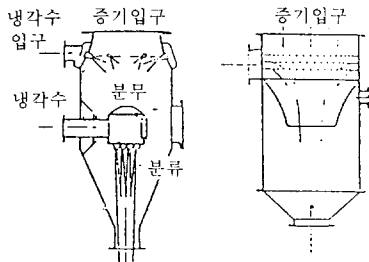


그림 4 분무(噴霧, spray)를 이용한 직접접촉식 응축기

이 있다.

- (2) 양유체(고온유체와 저온유체)가 융합하는 유체일 경우에는 별도의 분리공정이 필요하다.
- (3) 양유체는 직접접촉기 내에서 동일한 압력이어야 한다는 제약이 있다
- (4) 냉각매체의 표면상태가 변화하므로 복잡한 현상이 발생하며, 전달현상해석에 대한 이론적 규명이 미비한 점 등이다.

3. 직접접촉응축 열교환기의 분류 및 종류

3.1 직접접촉응축 열교환기의 분류

직접접촉응축은 가열유체(加熱流體)로서의 고온증기와 수열유체(受熱流體)로서의 저온액체가 어느 쪽이 분산상(分散相) 또는 연속상(連續相)인가, 분산상이 막상(膜狀) 또는 구상(球狀)인가, 서로 혼합할 수 있는 물질인가, 서로 혼합할 수 없는 물질인가에 따라서 일반적으로 다음과 같이 분류하고 있다.

(1) 취급매체의 종류에 따른 분류

- ① 동종물질
- ② 이종물질
- ③ 서로 혼합할 수 있는 물질
- ④ 서로 혼합할 수 없는 물질

(2) 양유체의 형상에 따른 분류

- ① 가열유체로서의 고온증기에 의한 분류

- 분산상-막상 또는 구상
- 연속상
- ② 수열유체로서의 저온액체에 의한 분류
 - 분산상-막상 또는 구상
 - 연속상

이 외에도 Samuel Siedman and David Moalem-Maron⁽⁴⁾의 분류법과 H. R. Jacobs⁽⁵⁾의 분류법 등이 있으나 일반적이지 못하다.

3.2 직접접촉응축 열교환기의 종류

앞절(3. 1)에서 분류한 것과 같이 취급매체의 종류, 가열유체 및 수열유체의 형상에 따라서 다양한 형태의 직접접촉식 열교환기의 장치설계가 가능하다.^(2,4,5)

3.2.1 기-액 직접접촉 열교환기

화학 및 산업생산 공정 등에서 기체와 액체의 직접접촉 열교환장치는 많이 사용되어 왔는데, 이들 기-액 열교환기에서 요구되는 기본적인 사항은 적은 에너지 비용으로 큰 접촉면적을 확보하는 것이고, 기-액 양측의 계면에서 높은 열전달률을 얻는 것이다. 이것은 기체측을 연속상으로 유도시키고 액체를 액적이나 엷은 액막의 분산상으로 분류시키든가 또는 이와는 반대로 액체를 연속상으로 기체를 기포형으로 분류시킴으로써 상당히 높은 열전달률을 얻을 수 있다. 기-액 직접접촉 열교환기는 양유체의 흐름양상과 장치의 모양에 따라 다음의 4가지로 분류할 수 있다.

1) 수직원통분사형 (vertical spray columns and packed columns)

이 형식의 직접접촉 열교환기의 개략은 그림 5와 같다. 그림 5의 a는 액상이 상부측의 분무관으로 유입되어 분무(spray)되고, 분무된 액적은 중력으로 하강하여, 하부측에서 연속상으로 공급되는 기상 상승류와 직접접촉하면서 열교환을 하게 된다. 이 형식은 호

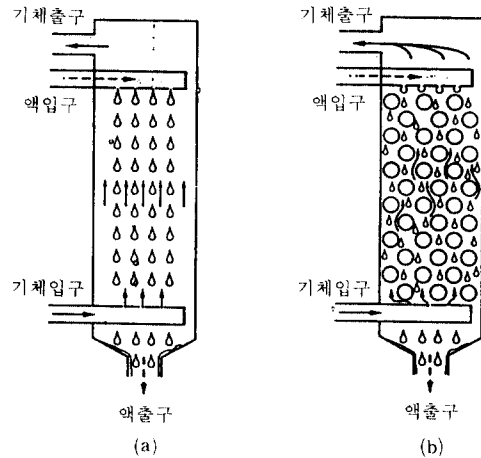


그림 5 수직원통분사형 기-액 직접접촉 열교환기

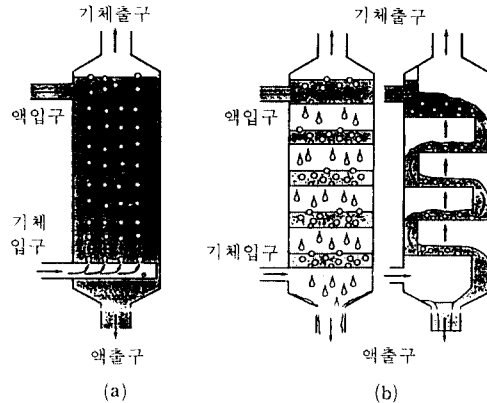


그림 6 수직기포분류형 기-액 직접접촉 열교환기

름이 대향류(counter flow)이므로 낙하액적의 낙하속도가 지연되어 양유체가 접촉하는 시간이 증가되므로 열교환량은 증가된다. 그림 5의 b는 기상과 액상의 접촉시간을 더욱 증가시키기 위하여 접촉 통로 속에 충전물(packed packing)을 삽입하여 열전달을 증가시킨 형태이다.

2) 수직기포분류형 (vertical bubble columns and perforated plate columns)

그림 6의 a에는 기포분류형의 개념도를 나

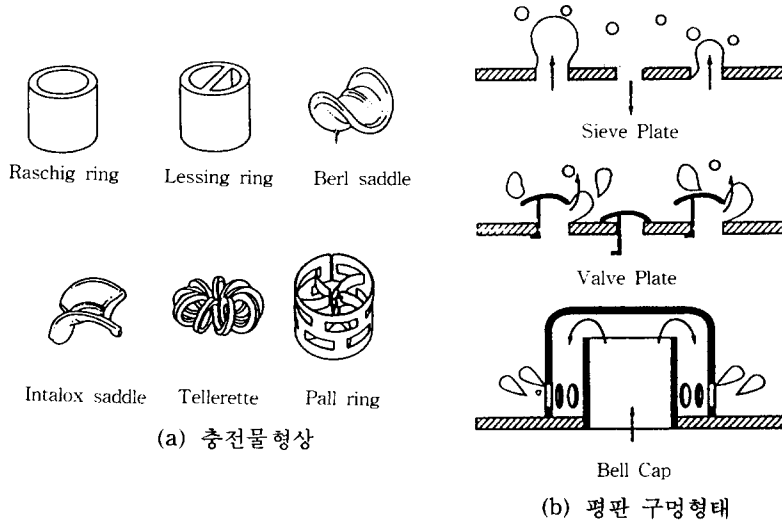


그림 7 충전물형상과 평판 구멍형태

타내었는데, 원통분사형 (spray column) 과의 차이는 양유체의 흐름이 반대이다. 기체가 하부측에서 기포상으로 공급되고 상부측에서 액체가 연속상으로 공급되어 열교환이 이루어진다. 그림 6의 b에는 통로의 중간 중간에 구멍을 뚫은 평판(perforated plates)을 설치하여 양유체의 접촉시간을 증가시켜 열전달을 증가시킨 구조를 보여주고 있다.

그림 7의 a에는 충전물의 형태를, 그림 7의 b에는 평판의 구멍(perforated plates) 형상들을 나타낸 것이다.

3) 액적·액막 분류형 (spray and jet contactors)

열·물질전달이 동시에 일어나는 기-액 직접접촉 장치에서는 충분한 기-액 계면 접촉면적을 형성하기 위하여 액상을 아주 적은 액적으로 분무시킬 필요가 있다. 이러한 분무장치를 가진 직접접촉 교환기는 그림 8과 같다. 이 때 액적의 분무는 쇄상의 순환과 난류를 유발시킴으로써 열전달을 더욱 촉진시키는 효과도 있다.

4) 수냉각탑형 (water cooling towers)

그림 9에 수냉각탑의 개념도를 나타내었

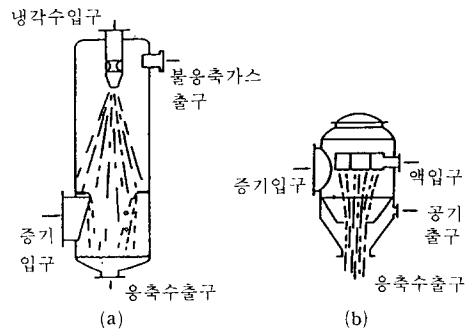


그림 8 액적·액막 부류 기-액 직접접촉 열교환기

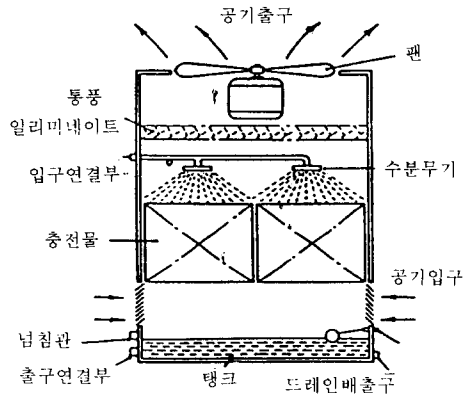


그림 9 수냉각탑 (water cooling tower)

다. 이는 기-액 직접접촉 열교환기 중에서 예전부터 냉동·공조 장치의 응축기로서 또는 산업설비의 대기 냉각장치 등으로 많이 채용되고 있는 장치이다. 액상은 장치 중간 분무기에서 분무되고 냉각 공기는 장치의 하부측에서 공급되어 상부측으로 팬의 강제 통풍력에 의하여 배출되도록 하였고, 수분무 바로 밑에 증진물을 삽입하여 접촉면적 및 시간을 증가시킨 구조로 되어 있다.

3.2.2 액-액 직접접촉 열교환기

그림 10과 같이 액-액 직접접촉 열교환기는 양유체가 모두 액상으로서, 무거운 액을 상부측에서 연속상으로 흘리고 가벼운 액을 하부측에서 액적상태로 분무하여 대향류로 유동시켜 열교환을 시키는 구조이다.

액-액 직접접촉 열교환기는 대부분이 양유체가 융합하지 않고 밀도 차이가 있는 액체들을 열교환하도록 하고 있다. 최근 이 형식은 지열발전시스템과 같은 저 온도차 이용을 위한 물 또는 브라인과 이소부탄(isobutane)이나 이소펜탄(isopentane)과 같은 유기질 액체 사이의 열교환장치에 채용되

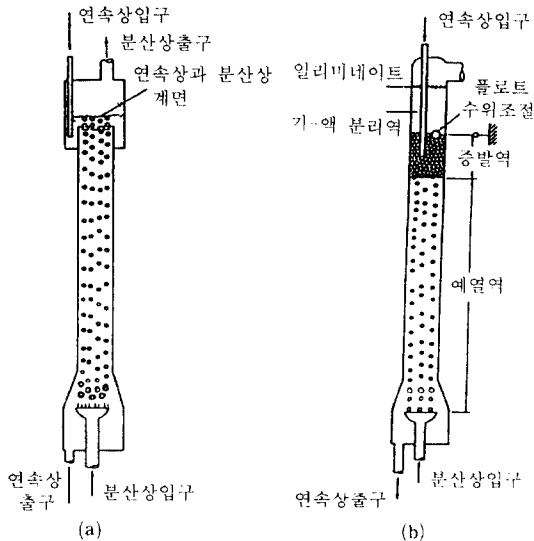


그림 10 액-액 직접접촉 열교환기

고 있다. 그림 10에서 a는 전형적인 형태를 나타낸 것이고, b는 하부측에서 분산상으로 공급된 액적이 증발하는 즉, 상변화를 일으키는 장치를 나타낸 것이다.

그림 11에는 상부에 부착된 전동기의 회전으로 열교환기 내부의 회전체(paddle or impeller)를 회전시켜 양유체의 혼합을 촉진 시킴으로써 열전달을 증대시킨 형태이다.

3.2.3 고상-기상 또는 고상-액상 직접접촉 열교환기

고상입자와 기상 또는 고상입자와 액상과의 직접접촉 열교환 형상을 그림 12에 나타

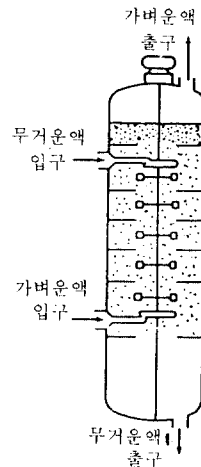


그림 11 기계식 교란장치를 가진 액-액 직접접촉 열교환기

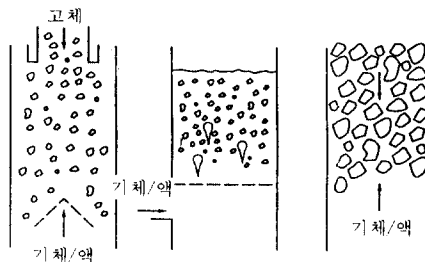


그림 12 고상-기상 또는 고상-액상 직접접촉 열교환기 형태

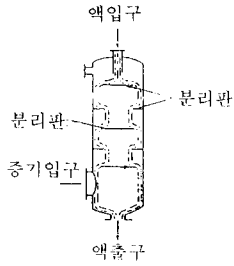


그림 13 분리판형 (baffle tray type) 직접접촉 열교환기

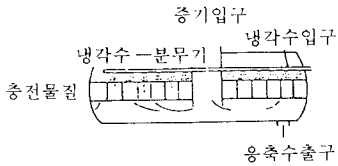


그림 14 충전체형 (packed bed type) 직접접촉 열교환기

내었다. 화학공정이나 발전설비 등에서 발생하는 고온의 물체를 공기나 물 등으로 냉각하는 장치 등에 사용되고 있다.

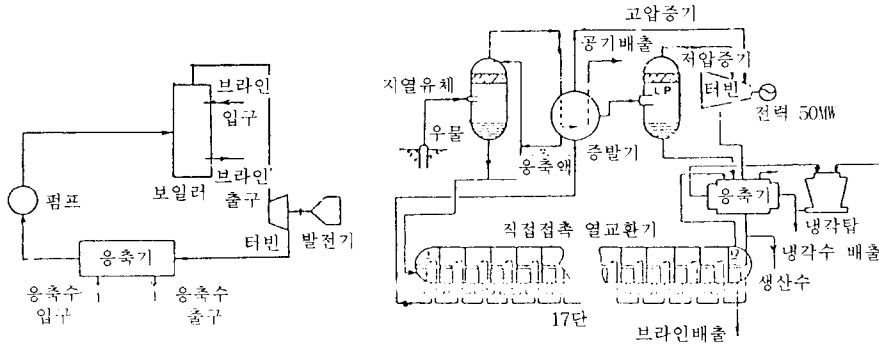
이 외에 공업상에 적용되고 있는 직접접촉 열교환기로는, 그림 13과 같은 분리판형 (baffle tray type) 직접접촉 열교환기, 그리고 그림 14와 같은 충전체형 (packed bed type) 직접접촉 열교환기 등이 있다.

4. 직접접촉응축 열교환기의 응용

직접접촉응축 열교환기는 냉각탑, 접촉급수가열기 및 공기분리기 등과 같은 장치에 예전부터 이용되어 왔으며, 최근에는 해수담수화장치 (海水淡水化裝置), 지열발전 (地熱發電), 해양온도차 발전 (海洋溫度差發電), 폐열이용기술 (廢熱利用技術) 등에도 적용하고 있다. 이것은 직접접촉응축 열교환기의 장점인 저 온도차에서의 효율적인 사용이 가능하기 때문이다.

직접접촉 열교환을 이용한 장치로서 저온 열원을 사용한 발전시스템, 이를 테면 해양 온도차발전 시스템 (OC-PTEC: open cycle ocean thermal energy conversion)이나 지열 발전시스템 등의 증발기 및 응축기, 또는 환경보존 등과 관련된 건식 냉각탑시스템 (Heller system) 등에서 직접접촉 열교환기가 적용되고 있다.⁽⁶⁾

또한 공해물질인 분진이나 부식성물질을 많이 품고 있는 유체의 열교환에는 부식이나 손상, 오염이 될 고체벽이 없는 직접교환장치를 이용하는 것이 유리하다. 저온배기가스 (100℃ 이하) 중의 폐열회수장치는 종래의 밀폐형 열교환기 채용의 경우 그 효율도 문제이지만 분진 및 배기물질의 응축으로 인한



(a) 지열발전사이클

(b) 지열발전시스템 장치도

그림 15 지열발전시스템의 직접접촉 열교환기 채용 예

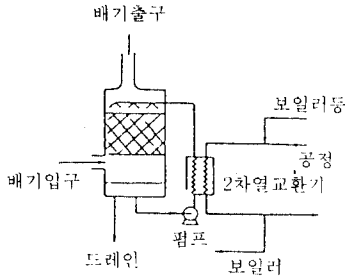


그림 16 지온 폐열회수용 직접접촉 열교환기

부식성 산의 형성으로 생기는 여러가지 문제가 있다. 이를 해결하기 위하여 그림 16의 개념과 같은 폐열회수용 직접접촉식 열교환기를 채택한 장치가 구미지역에 가동중에 있다.^(3,7)

이 외에도 직접접촉 열교환과정을 밀폐형 열교환기에 병합시켜 그 성능을 향상시킬 수도 있는데 관 외벽에서의 열전달을 증가시키기 위해 유동층 열교환장치를 병행시킨다든지 증발냉각(evaporative cooling)의 효과를 위하여 관 외벽에 액체분무를 해주는 방식 등이 있다. 최근에는 잠열축열기에서 일반적으로 열전도율이 낮은 축열재의 전열을 촉진하기 위하여 흰을 사용하는 등 수동적인 방법과 병행하여 상호 불용성 작동유체 조합을 이용한 직접접촉식 축열기가 제안되고 있어서 에너지의 유효이용 관점에서 기대를 모으고 있다.^(6,7)

이와 같이 직접접촉 열교환의 기술축적은 상변화를 동반하는 열전달 문제의 기초지식은 물론, 담수플랜트(desalination process)의 기본 요소설계, 원자로의 냉각계통사고(LOCA: loss of coolant accident) 대책, 증발기(evaporator), 건조장치(drier), 화학공정(化學公程)장치 설계 등 매우 광범위한 기술 파급효과도 기대할 수 있다.

5. 맺음말

직접접촉응축 열교환은 일정 체적의 증기

속으로 액을 분사하든가, 과냉각액 속으로 증기를 분사하여 직접접촉시킴으로써 발생하는 열교환과정으로서, 고체벽을 개재시킨 종래의 열교환기에 비하여 설비의 간단화, 적은 유지보수비 및 높은 열전달률을 얻을 수 있는 장점이 있다. 이러한 직접접촉응축 열교환의 장점에도 불구하고 이에 관한 연구는 부족한 실정이다. 이것은 직접접촉응축이 발생하는 경계면의 특성이 복잡하여 실험적으로 응축열전달률이나 경계면의 면적 등을 측정하기가 어렵고, 또 이를 이론적으로도 해석하기 어렵기 때문이라 생각된다. 오늘날 산업기술이 발전하고 다양화, 그리고 첨단화 되어감에 따라 직접접촉 응축 열교환기를 응용할 수 있는 범위가 점점 확대되고 있다. 따라서 이 글에서는 직접접촉 응축 열교환기의 개요 및 분류와 응용 등에 대하여 소개하였으며, 앞으로의 이 분야 연구에 참고가 되었으면 한다.

참고문헌

- (1) Bell, K. J. and Panchal, C. B., 1978, *Proc. 6th Int. Heat Transfer Conference*, Toronto, 2, pp. 361~375.
- (2) Jacobs, H. R., 1988, "Direct Contact Heat Transfer for Process Technologies," *ASME Journal of Heat Transfer* Vol. 110(Nov. 1988), pp. 1259~1270.
- (3) Frank Kreith and Boehem, R. F., 1988, "Direct Contact Heat Transfer," Hemisphere Publishing Corporation, pp. 1~40, 223~236.
- (4) Samuel Sideman and "David Moalem-Maron, 1982, "Direct Contact Condensation," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 15, pp. 228~283.
- (5) Jacobs, H. R., 1983, "Direct Contact Condensers," *Heat Exchanger Design Hdbk*, E. U. Schlunder, p. 2. 6. 8., Hemisphere

- phere Publishing Corp., New York.
- (6) Hewitt, G. F., Shires, G. L. and Bott, T. R. 1993, "Direct Contact Heat Transfer," Process Heat Transfer, Chapter 21, pp. 693~723, *CRC Press*.
- (7) 김석현, 1986, 고효율 직접교환기 (direct contact exchanger)의 특성과 응용, 공기조화·냉동공학, 제15권 제2호, pp. 1~7. 