

태양열원을 위한 직접접촉식 액-액 열교환기에서 메쉬설치에 따른 유동 및 열전달

윤석만 · 김종보*

인하대학교 기계기술공동연구소, *인하대학교 기계공학과

Flow and Heat Transfer with Mesh in Direct Contact Liquid-Liquid Heat Exchanger for Solar Thermal System

Seok-Mann Yoon and Chong-Bo Kim*

Research Institute for Mechanical Eng., Inha University

*Department of Mechanical Eng., Inha University

요 약

태양열 시스템에 사용되는 간접접촉 열교환기는 열전달률 감소, 부식, 스케일링 등의 문제에 기인하는 단점을 갖고 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 직접접촉 열교환기의 사용이 제안된다. 본 연구에서는 직접접촉 열교환기로서 분사칼럼이 도입되었다. 열전달률을 증가시키기 위하여 작동유체는 연속유체와의 접촉면적을 증가시키기 위하여 칼럼내에서 작고 균일한 방울들로 분산된다. 또한 작고 균일한 방울들로 만들기 위하여 열교환기 칼럼내에 메쉬가 설치되었다. 디에틸 프탈레이트(Diethyl Pthalate, 밀도 1.052 g/cm³)가 작동유체로 사용되었고, 메쉬가 있는 경우와 없는 경우로 비교 실험되었다. 실험 중 칼럼의 길이 방향으로 온도측정을 하였고, 두 유체간의 직접접촉 열교환 메커니즘을 알기 위하여 방울의 사진을 통하여 분석하였다. 방울이 제트형태로 형성될때 방울은 작고 균일하였다. 한편 방울형태로 형성될 때는 크고 불균일하게 관찰되었으나, 메쉬를 통해 칼럼내에서 효과적으로 작고 균일한 방울들로 되었다.

Abstract—The use of indirect heat exchanger for the solar system has its short-comings because of reduced heat transfer rates, corrosion and scaling problems. In order to solve these problems use of direct contact heat exchanger is proposed. In the present investigation the spray column has been introduced to represent the direct contact heat exchanger. To improve heat transfer rates, the working fluid is to be dispersed to small and uniform drops in the column to give more contact areas with the continuous fluid. Meshes were also installed within the heat exchanger column to ensure small and uniform drops Diethyl Pthalate of 1.052 g/cm³ was utilized as a working fluid and experiments have been carried out with and without mesh. Temperature measurements have been carried out during the experiments and photos of drops have been analysed to see the mechanisms of direct contact heat transfer between the two fluids. When drops were formed to be jetwise, drops became small in uniform size. On the other hand in dropwise mode, large and irregular drops were observed, but they were made to be effectively small and uniform through meshes in the column.

1. 서 론

직접접촉열교환기는 작은 온도차에서도 열교환이 가능하므로 태양열과 같은 온도가 낮은 열원을 이용하는 데 적합하다. 또한 직접접촉열교환기는 직접접촉에 의해

열교환을 수행하기 때문에 간접 열교환기를 사용하는 데 따르는 부식, 스케일 발생, 판막힘등의 문제점들을 없앨 수 있으며, 상대적으로 높은 열전달률을 얻을 수 있다. 따라서 별도의 열교환 장치 없이 태양열시스템에서의 축열탱크를 그대로 열교환기로 겸용할 수 있어서 장치의

크기를 줄일 수 있고, 곧 큰 경제적 잇점을 가져올 수 있다. 이때 물보다 가벼운 작동유체(Working Fluid)를 분산유체(Dispersed Fluid)로 사용하여 열교환기의 밑에서 분사시키면 물과 작동유체사이의 유착물 축진을 위한 부가적인 장치가 필요하다는 점과 경계면 조정을 위해 열교환기 상단의 가압을 해야한다는 단점을 가지고 있으므로 물보다 무거운 작동유체를 사용하는 것이 보다 유리하다.

Moresco와 Marshall^[1]은 분사칼럼식 직접접촉 열교환기에서 작동유체로서는 Oil을 사용하고 연속유체로는 물을 사용하였다. 이때 연속유체의 온도뿐만 아니라 작동유체 방울의 온도를 직접 측정하여 주요 열전달 저항이 작동유체 방울 내부에 있음을 밝혔고 Handlos와 Baron^[2]은 또한 열전달에 대한 간단한 수학적 모델을 구했고 방울의 내부와 외부에서의 박리 관계를 해석적으로 결정하였으며, Jacobs와 Eden^[3]은 다공판식 직접접촉 액-액 열교환기 실험에서 분산작동유체로 Isobutane과 연속유체로 지열 브라인을 사용하여, 내부 열전달 저항이 확산 모델로 잘 예측된다고 보고하였다. Ward 등은^[4] 분사칼럼에 대하여 작동유체로서 Dimethyl Phthalate, Diethyl Phthalate, Butyl Benzyl Phthalate를 사용하였다. 각 작동유체에 대한 데이터를 제시하였으며, Nu와 Pe와의 관계가 3가지 유체 모두 같았음을 나타내었다.

주어진 작동조건하에서는 작동유체와 물사이의 접촉면적을 증대시키고 충분한 접촉시간을 갖게 함으로써 열전달률을 향상시킬 수 있다. 이를 위해서는 작동유체의 방울(Drop)들을 좀 더 작고 균일하게 형성시키고 좀 더 오랫동안 열교환기내에 머무르게 하는 것이 필요하다. 그 방안으로 나온 것이 다공판식(Sieve Tray) 직접접촉 열교환기이다. 이것은 다공판을 열교환기내에 여러개 설치한 형태를 하고 있다. 하지만 열교환기내의 연속유체인 물이 열교환기내에서 흐르지 않는 본 실험과 같은 직접접촉 열교환기에서는 온도의 증가에 따라 발생된 기포가 밖으로 빠져나가는 것을 다공판이 방해하게 되므로 열교환기내에 기포들이 정체되어 있게 되어 오히려 열전달 감소가 일어날 수 있다. 그러므로 태양열을 이용하는 직접접촉 열교환기에서는 다공판을 설치하는 것보다는 메쉬(Mesh)의 설치가 보다 효과적이다.

본 실험의 목적은 메쉬를 설치한 열교환기의 열전달 효율을 연구하며 메쉬를 설치하지 않은 분사 칼럼식(Spray Column)직접접촉 열교환기와의 비교 실험을 통해 메쉬에 의한 열전달 증진 가능성을 보는 것이다. 이 실험에 사용된 작동유체는 디에틸 프탈레이트(Diethyl Phthalate)로 85°C에서 밀도는 1.052 g/cm³, 점성계수는 0.0024 g/cm s, 비열은 1.57 J/g°C의 물성치를 가지며, 어는점과 끓는점은 각각 -40.5°C, 298°C이다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 작동유체(여기서는 Diethyl Phthalate)는 탱크로부터 순환펌프(유량 0.05 m³/min., 양정 80 m)에 의해 가열탱크에 채워진 후 적정 온도까지 가열시킨다. 적정 온도에 도달하면, 유량계를 통해서 열교환기의 윗 부분에 유입된다. 작동유체는 분배판을 거쳐서 방울을 형성하여 물속에 분산된 후, 열교환기의 밑부분에 모여 유출된다. 순환에 필요한 유량이 채워지면, 탱크의 밸브는 닫히고 정해진 유량으로 순환하게 된다. 본 열교환기는 축열탱크를 겸하므로 본 실험에서의 연속유체(Continuous Fluid)인 물은 열교환기내에 일정량 채워진 상태로 있게 된다.

Fig. 2와 Fig. 3에서 보여지는 것처럼 열교환기 칼럼(Column)은 외경 120 mm, 총길이 1383 mm, 두께 3 mm의 내열 유리 파이프(Pyrex Glass Pipe)로 제작되었다. 분배판(Distribution Plate)은 두께 3 mm의 동판으로 제작되었으며, 44개의 노즐 구멍이 있다. 각 노즐 구멍의 직경은 1 mm이고, 15 mm 간격을 갖는 정방형으로 배열하였다. 즉 각 2.25 cm² 마다 한개의 노즐이 있는 것이다.

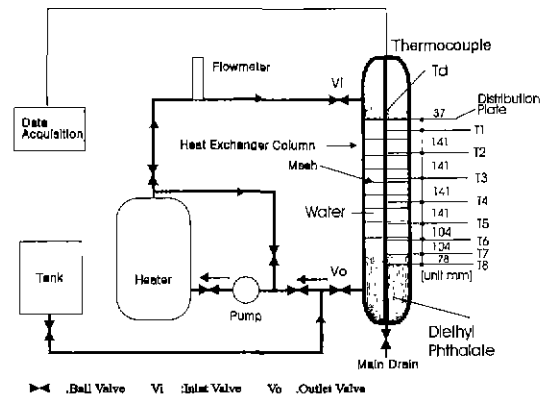


Fig. 1. Schematic diagram of experimental Set-up.

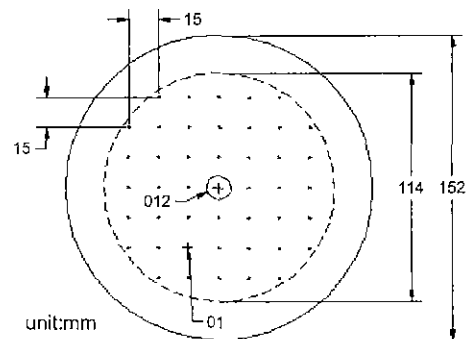


Fig. 2. Distribution plate.

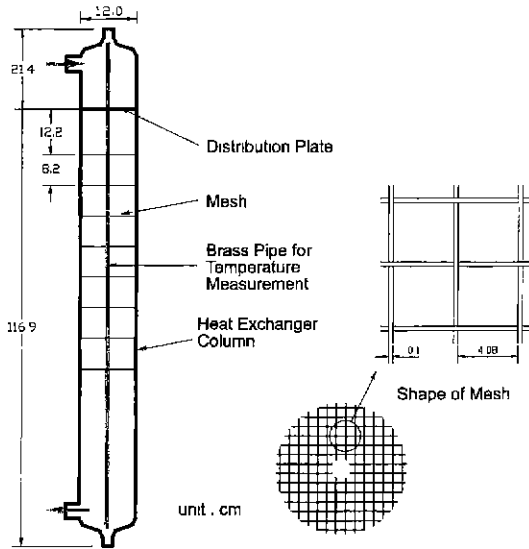


Fig. 3. Spray column of direct contact heat exchanger and Mesh.

메쉬(Mesh)는 8메쉬(인치당 8개의 격자를 가짐)부터 5메쉬까지 테스트하였다. 메쉬의 간격이 작을 경우, 형성된 방울들을 오히려 뭉치게 해서 보다 큰 방울들이 형성되게 하였다. 이 테스트결과를 토대로 효과적으로 방울들을 잘게 나눌 수 있는 메쉬를 사용하였다. 여기에 쓰인 스테인레스스틸 메쉬는 인치당 5개의 격자(5 mesh)를 가지며, 선의 직경은 1 mm이고 선사이의 간격은 4.08 mm이다. 각 메쉬는 분배판 12.22 cm 밑에서부터 8.22 cm 간격으로 온도측정을 위해 설치한 황동관에 끼워서 8개를 설치하였다.

작동유체의 열교환기 칼럼 유입온도를 약 85°C 정도로 유지하였으며, 연속유체인 물은 상온(22~24°C)의 7553 cm³을 사용하였으며 높이에 따른 온도변화를 보기 위하여 순환시키지 아니하였다. 본실험에서는 메쉬가 있을 때와 없을 때에 대해, 각각 작동유체의 유량(이하 유량이라 함)은 10, 20 및 30 cm³/sec로 변화시키며, 공기층간격은 2 cm와 4 cm에 대해서 실험하였다.

여기서 공기층 간격은 분배판과 수면 사이의 간격으로 공기층 간격이 없게 되면 작동유체의 유입을 방해할 수 있다. 연속유체의 온도증가가 거의 이루어지지 않고, 온도성층(Stratification) 현상이 없다면 체적비(Hold up)를 측정하고 실험을 종결하였다. 체적비는 실제 열교환이 이루어지는 체적중 작동유체가 차지하는 비로 다음과 같이 구할 수 있다. 열교환기 하단에서의 물과 작동유체와의 경계면을 통해서 전체 열교환 체적을 구할 수 있고 여기서 연속유체인 물의 부피를 제한 값이 열교환이 이루어지는 작동유체의 부피를 나타낸다. 이 값을 전

체 열교환 체적으로 나눈 값이 체적비이다.

T형(Copper-Constantan) 열전대를 사용하여 온도를 측정하였다. 분배판의 약 3 mm 상단 부분에 위치한 열전대 Td로 작동유체의 유입온도를 측정하였다. 열교환기의 중앙에 위치한 외경 12 mm의 황동 관(Pipe) 내에 T1부터 T8의 열전대를 설치하였다. 황동관에는 관 내부로 물이 들어가기도록 적절한 위치에 구멍을 내어 열전대와 물이 직접 접촉되어 물온도를 측정할 수 있도록 하였고, 구멍에는 스테인레스스틸 메쉬(80 mesh)를 부착해 작동유체의 방울이 황동관내로 들어가지 않도록 하여 순수한 물의 온도만이 측정되도록 하였다.

방울직경은 사진촬영으로 측정하였다. 측정을 위해 열교환기 칼럼의 곡선벽면에 의한 왜곡효과를 줄이기 위해 물로 채운 투명 아크릴 상자를 칼럼의 바깥쪽, 촬영할 위치에 설치하였다. 촬영된 동일크기의 흑백사진에 1 cm 간격의 격자를 가진 투명판을 중첩하여 각 격자점에 위치한 방울들을 선정하여 직경을 측정하였다. 측정수치는 모두 가능한 평균치를 취하도록 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 작동유체 방울의 크기와 분포

본 실험의 경우 작동유체 유량이 10 cm³/sec 일 때는 분배판으로부터 방울이 형성되어 떨어지는 방울형태(Dropwise)를 띄었으며, 유량이 그 이상(20 cm³/sec, 30 cm³/sec)일 때는 제트 실린더의 형태로 떨어져서 물과 접촉한 후에 방울을 형성하는 제트형태(Jetwise)를 띄었다. 각 유량에 따라 공기층간격(Air space)의 영향이 다르게 나타났다. 유량이 10 cm³/sec인 경우에는 분배판을 통과할 때 방울형태를 띄었으며 따라서 공기층간격에 대한 영향이 거의 없었다. 또한 유량이 30 cm³/sec인 경우에도 공기층간격에 대한 영향이 거의 없었으며 2 mm 정도의

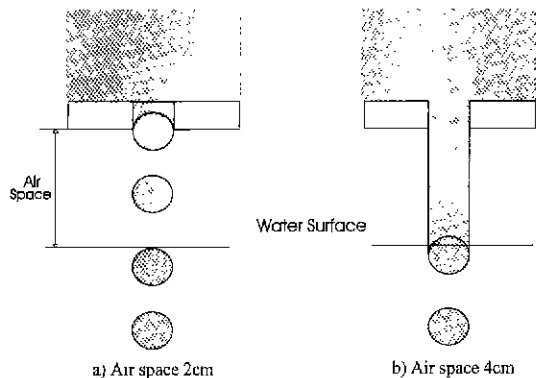


Fig. 4. Drop formations at the flowrate of 20 cm³/sec.

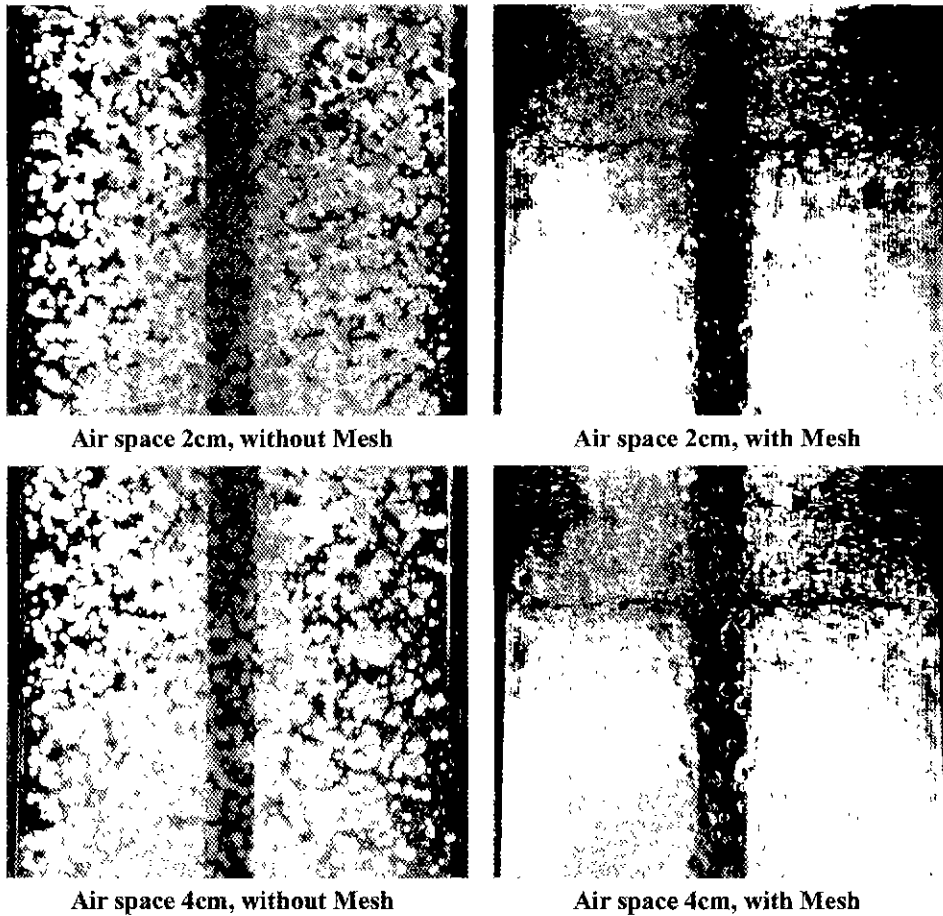


Fig. 5. Formation of droplets in the column (20 cm³/sec).

균일한 방울분포를 보였다. 유량 20 cm³/sec인 경우에는 공기층간격에 따라 방울의 지경과 분포가 다소 차이를 보였으며 Fig. 4는 그러한 개념도를 보인다. 공기층간격 2 cm의 경우가 직경 2 mm의 작고 균일한 방울분포를 보였으며, 공기층간격 4 cm의 경우에는 물의 표면과 접촉하자마자 곧 방울들로 분산되었으며 1에서 5 mm의 다소 불균일한 방울들을 형성하였다.

Fig 5는 유량 20 cm³/sec에 대하여 공기층 간격 2 cm와 4 cm일 때 방울의 직경과 분포를 나타낸다. 공기층간격 2 cm의 경우가 직경 2 mm 정도의 좀더 작고 균일한 분산유체 방울의 분포를 보였는데, 이것은 분배판을 나온 작동유체 제트가 물의 표면과 접촉한 후에도 제트 실린더(Cylinder)를 형성하다가 방울들로 분산되었기 때문이다. 공기층이 4 cm의 경우는 물의 표면과 닿자마자 방울들로 분산되었으며, 1에서 5 mm 정도의 방울들이 다소 불균일하게 형성되었다. 한편, 유량이 10 cm³/

sec 및 30 cm³/sec에 대해서는 방울분포에 대한 공기층간격의 영향이 거의 나타나지 않았다. 유량 10 cm³/sec인 경우는 분배판을 통과 할때 방울형태를 띠기 때문에 각 공기층 간격에 대해 거의 차이를 보이지 않았다. 이때 형성되는 방울의 직경은 2에서 7 mm 정도로 불균일하고 크게 나타났다. 유량이 30 cm³/sec인 경우 역시 공기층 간격에 따른 차이를 거의 보이지 않았으며 2 mm 정도의 균일한 방울 분포를 보였다. 수면에 침투한 후에도 제트실린더를 형성하는 것이 균일하고 조밀한 방울을 형성시키며, 이것은 유량이 많을 수록, 또한 공기층간격이 작을 수록 잘 나타난다.

메쉬를 설치했을 때, 유량이 10 cm³/sec인 경우는 공기층간격 2 cm와 4 cm 모두 방울의 평균 직경이 3.7 mm에서 3.0 mm로 19% 감소하였고, 유량이 20 cm³/sec, 공기층간격 4 cm인 경우는 2.7 mm에서 2.5 mm로 7% 감소하였다. 하지만 유량이 20 cm³/sec, 공기층이 2 cm의

Table 1. Drop diameters and Holdups.

| 공기층 간격 (cm) | 유량 (cm ³ /sec) | 직경(mm) | | | | 홀드업(%) | |
|----------------|------------------------------|--------|------|------|------|--------|------|
| | | 메쉬 무 | 메쉬 유 | 메쉬 무 | 메쉬 유 | 메쉬 무 | 메쉬 유 |
| 2 | 10 | 3.7 | 3.0 | 0.7 | 1.7 | | |
| | 20 | 2.1 | 2.2 | 2.6 | 3.5 | | |
| | 30 | 2.0 | 2.1 | 5.7 | 5.7 | | |
| 4 | 10 | 3.8 | 2.9 | 0.7 | 1.8 | | |
| | 20 | 2.7 | 2.5 | 2.6 | 3.7 | | |
| | 30 | 2.1 | 2.3 | 5.7 | 5.7 | | |

경우와 유량이 30 cm³/sec인 경우는 메쉬를 통과하기 전에 작고 균일한 방울이 형성되기 때문에 메쉬에 의한 방울모양의 향상은 보기 어려웠다. 오히려 평균 방울의 크기가 증가된 것을 볼 수 있다. Table 1은 각 조건에 따른 관찰된 방울의 직경과 체적비이다.

3-2. 체적비(Holdup)

공기층간격에 따른 체적비의 차이는 그다지 볼 수 없었다. 메쉬를 설치했을 때는 공기층이 2 cm일 때, 유량 10 cm³/sec인 경우는 0.7%에서 1.7%로 1.42배 증가 하였으나, 유량 20 cm³/sec에서는 0.34배 증가, 유량 30 cm³/sec에서는 변화가 거의 없었다. 유량이 많을 때는 메쉬 설치에 따른 체적비의 증가를 볼 수 없었으나, 유량이 적을 때 그 효과는 현저하게 나타났다. 즉 유량이 적을 때는 분배판을 통하여 형성되는 큰 직경의 방울이 메쉬에 의해 작게 쪼개어지면서 방울의 하강속도가 다소 늦추어 지게되어 열교환기 내의 작동유체의 전체 체적이 증가하는 것으로 사료된다.

3-3. 온도분포

각유량에 따른 열교환 종결 시간 및 열교환 종결시 연속유체의 최종온도는, 축열탱크를 겸한 본 실험과 같은 열교환기의 경우에서 중요한 관점이다. 열교환기를 단열하지 않은 상태에서는 열교환기 내의 온도가 모두 같아지는 데 꽤 많은 시간(5시간 이상)이 소요된다. 열교환기내의 온도가 10분에 1°C 이내의 증가를 보일 경우 실험을 종결하였다.

3-3-1. 유량 10 cm³/sec

Fig. 6, 7은 유량 10 cm³/sec에서 공기층간격이 각각 4 cm, 2 cm일 때의 열교환기 칼럼높이에 따른 온도분포를 보이고 메쉬의 유무에 따라 비교한 것이다. 각조건 모두 온도 성층현상을 보이고 있다. 특히 메쉬를 설치했을 때가 두드러지게 나타난다. 공기층 4 cm인 경우, 70°C까지 도달하는 데, 열교환기내의 윗부분 온도인 T2가 메쉬를 설치한 쪽이 25분, 설치안한 쪽이 45분 소요되었으며, 공기층이 2 cm인 경우는 메쉬가 없는 경우 35

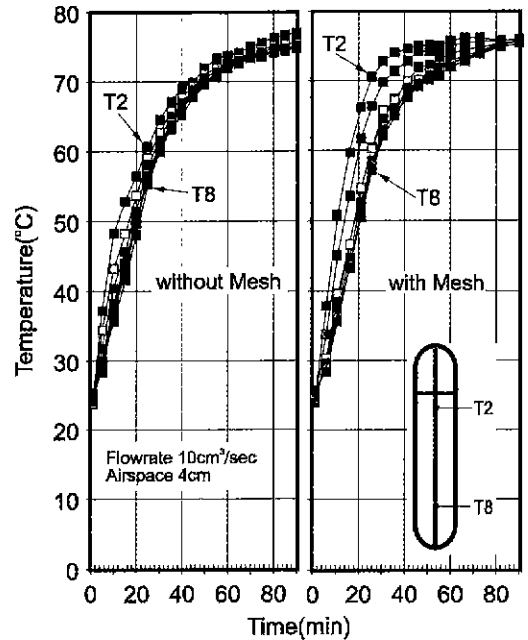


Fig. 6. Temperature distributions in the column (flow-rate 10 cm³/sec, airspace 4 cm).

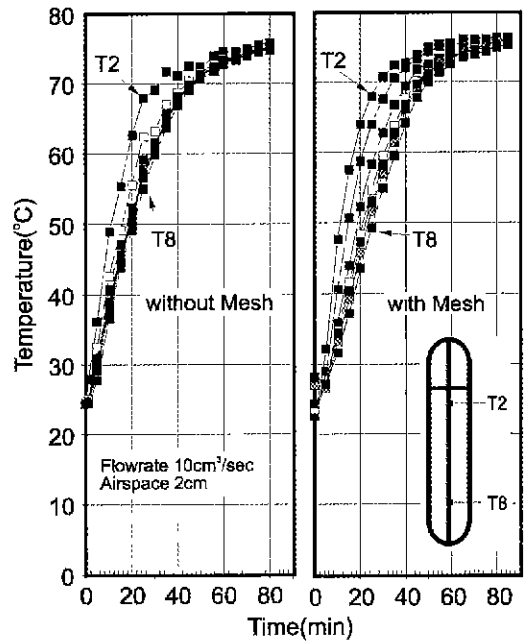


Fig. 7. Temperature distributions in the column (flow-rate 10 cm³/sec, airspace 2 cm).

분, 메쉬가 있는 경우 28분 정도 소요되었다. 하지만 열교환기내의 밑부분의 온도인 T8이 70°C까지 도달하는데

는 각 조건 모두 약 50분 정도 걸렸다. 또한 열교환 종결시간은 80분에서 90분 정도로 거의 비슷함을 알 수 있다.

메쉬를 설치한 경우, 열교환기 상단의 온도가 높은 온도에 일찍 도달하는 데 이것은 메쉬에 의해 열전달률이 향상됨을 보인다.

3-3-2. 유량 20 cm³/sec

Fig 8, 9는 유량 20 cm³/sec에서 공기층간격이 각각 4 cm, 2 cm일 때의 칼럼높이에 따른 온도분포를 보이고 메쉬의 유무에 따라 비교한 것이다. 공기층간격이 4 cm인 경우, T2가 70°C까지 도달하는 데, 메쉬가 없는 경우 27분, 메쉬가 있는 경우 13분 소요 되었으며, 공기층 간격이 2 cm인 경우는 메쉬가 없는 경우 16분, 메쉬가 있는 경우 13분 정도 소요되었다. 공기층간격이 2 cm와 4 cm일 때 차이가 두드러지게 나타나고 있는데, 공기층간격 4 cm의 경우는 열교환기 칼럼내의 높이에 따른 온도차이가 별로 나타나지 않지만 2 cm의 경우는 높이에 따른 온도 성층현상이 나타난다. 이는 공기층 간격이 4 cm일 경우에는 메쉬에 의한 열전달 향상 효과가 크고, 공기층 간격이 2 cm일 경우는 메쉬 통과전에 이미 작고 균일한 방울들로 형성되어 있기 때문에 메쉬에 의한 효과가 크지 않다고 판단된다. 한편, 공기층간격이 2 cm일 경우는 상대적으로 공기층 4 cm의 경우에 비해 작동유체의 방울이 보다 작고 균일해서 그에 따른 열

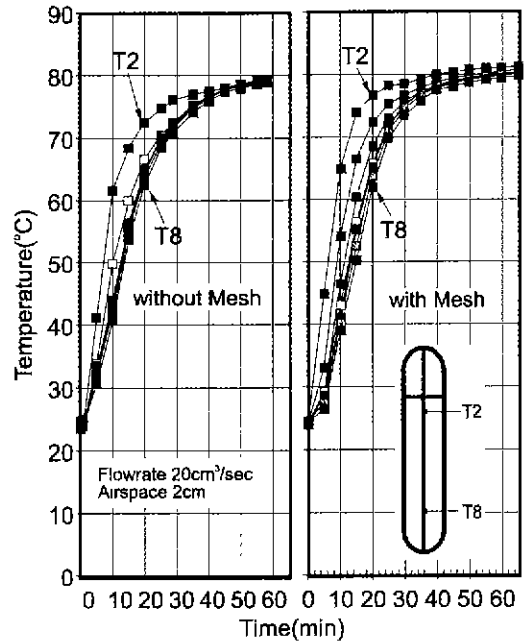


Fig. 9. Temperature distributions in the column (flow-rate 20 cm³/sec, airspace 2 cm).

전달률 향상을 나타내고 있다. 메쉬의 유무에 관계없이 각 조건 모두 약 60분 정도에서 열교환이 종결되었다.

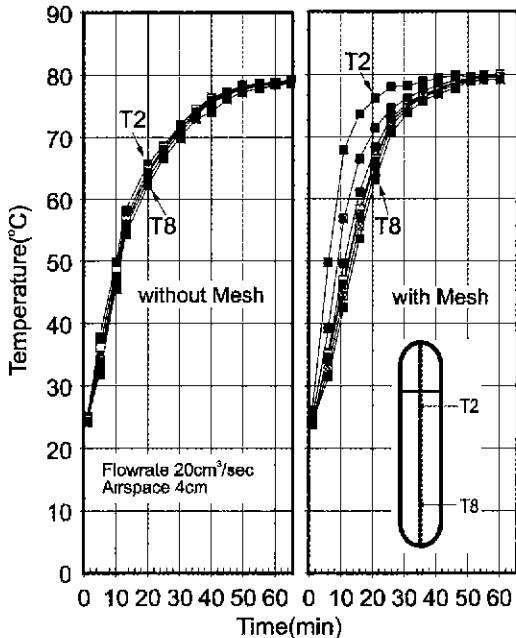


Fig. 8. Temperature distributions in the column (flow-rate 20 cm³/sec, airspace 4 cm).

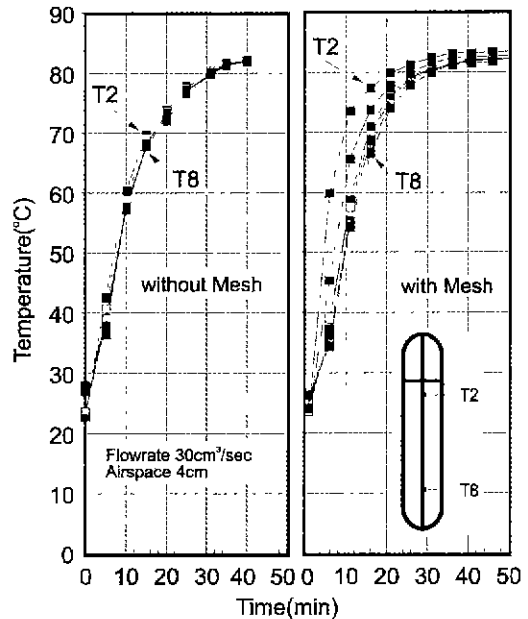


Fig. 10. Temperature distributions in the column (flow-rate 30 cm³/sec, airspace 4 cm).

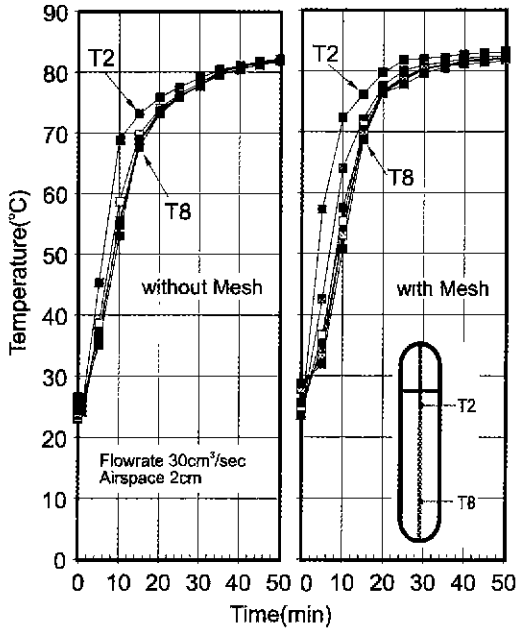


Fig. 11. Temperature distributions in the column (flow-rate 30 cm³/sec, airspace 2 cm).

3-3-3. 유량 30 cm³/sec

Fig. 10, 11은 유량 30 cm³/sec에서 공기층간격이 각각 4 cm, 2 cm일 때의 칼럼높이에 따른 온도분포를 보이고 메쉬의 유무에 따라 비교한 것이다. T2의 온도가 70°C까지 도달하는 데, 공기층 4cm인 경우 메쉬가 없는 경우 15분, 메쉬가 있는 경우 9분 소요 되었으며, 공기층이 2 cm인 경우는 메쉬가 없는 경우 12분, 메쉬가 있는 경우 8분 정도 소요되었다. 각 조건 모두 40분에서 50분 경과 후에 열교환이 종결되었다.

3-4. 열전달 결과

직접접촉 열교환에서의 총괄열전달계수(Overall Heat Transfer Coefficient), U는 두 유체사이의 매개물이 없기 때문에 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_a} + \frac{1}{h_c} \tag{1}$$

이 경우 열전달 저항은 대부분 작동유체 방울들에 있기 때문에, $h_c \gg h_a$ 라 쓸 수 있으며, 따라서 U는 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$U = h_a \tag{2}$$

열전달률 Q는

$$Q = c_a \rho_a F \Delta T \tag{3}$$

$$Q = U A \Delta T \tag{4}$$

이다.

ΔT 는 기존의 열교환기에서는 대수평균온도차(LMTD)로 구하지만 직접접촉열교환기 경우에는 연속유체와 작동유체 사이의 온도차가 열교환기 하단에서는 거의 없기 때문에 $\Delta T = \Delta T/2$ 가 된다¹⁾. ΔT 는 작동유체의 입구 온도인 T_d에서 열교환이 종결된 후의 연속유체 온도를 뺀 값이다. 체적 열전달 계수 U_v는 식(3)과 식(4)를 이용하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$U_v = U \cdot a = U \cdot \frac{A}{V} = \frac{2Q}{V \Delta T} = \frac{2c_a \rho_a F}{V} \tag{5}$$

식(5)에서 나타나는 바와 같이 체적열전달계수(Volumetric Heat Transfer Coefficient), U_v는 일정한 물성치와 정해진 실험장치에 대해서는 단지 유량만의 함수이다.

또한 무차원 변수 Pe, Nu와 Re는 다음과 같다.

$$Pe = \frac{c_a \rho_a V_s d}{k_a} \tag{6}$$

$$Nu = \frac{U d}{k_a} \tag{7}$$

$$Re = \frac{V_s \rho_a d}{\mu_a} \tag{8}$$

여기서 V_s는 연속유체가 고정되어 있으므로 다음과 같이 정의된다.

$$V_s = \frac{F/S}{H} \tag{9}$$

Table 2는 실험이 종결된 후의 정상상태(Steady state)에서 계산된 열전달 결과이다. 실험으로부터 구해진 작동유체와 연속유체와의 온도차 ΔT , 방울직경 d와 체적비 H를 통해서 총괄열전달계수 U, 체적열전달계수 U_v, 무차원 변수 Nu, Re, Pe를 구하였다

$$Nu = -0.683 + 0.00145 Pe(\text{without mesh}) \tag{10}$$

$$Nu = -1.673 + 0.00223 Pe(\text{with mesh}) \tag{11}$$

Fig. 12는 Pe에 대한 Nu의 값이다. 각 실험조건들을 비교할 수 있는 무차원 수로서 Pe를 사용하여 Nu를 비교하였다. Pe가 클 수록 메쉬를 설치한 경우가 설치하지 않은 경우보다 큰 Nu 값을 가진다. 동일한 Pe에 대해서는 메쉬를 설치하는 것이 효과적이라는 의미이다. 현상적으로 본 실험에서는 유량이 작은 경우에 Pe가 크게 나타나고 있으며, 작동유체 방울이 방울형태(Dropwise)

Table 2. Heat Transfer Results.

| | Airspace | F | ΔT | d | H | V_s | U | U_v | Nu | Re | Pe |
|--------------|----------|----|------------|------|-------|-------|--------|---------|-------|--------|------|
| without mesh | 2 | 10 | 7.2 | 0.37 | 0.007 | 14.85 | 0.0412 | 0.00467 | 11.76 | 242.68 | 6710 |
| | | 20 | 5.61 | 0.21 | 0.026 | 7.51 | 0.0118 | 0.00877 | 1.92 | 71.94 | 1989 |
| | | 30 | 2.14 | 0.2 | 0.057 | 5.17 | 0.0077 | 0.01317 | 1.20 | 45.65 | 1262 |
| | 4 | 10 | 7.84 | 0.38 | 0.007 | 14.85 | 0.0423 | 0.00468 | 12.40 | 249.24 | 6891 |
| | | 20 | 5.74 | 0.27 | 0.026 | 7.46 | 0.0151 | 0.00872 | 3.16 | 91.79 | 2538 |
| | | 30 | 2.74 | 0.21 | 0.057 | 5.17 | 0.0081 | 0.01319 | 1.32 | 47.93 | 1325 |
| with mesh | 2 | 10 | 8.56 | 0.3 | 0.017 | 5.73 | 0.0128 | 0.00435 | 2.97 | 73.62 | 2098 |
| | | 20 | 3.49 | 0.22 | 0.035 | 5.60 | 0.0092 | 0.00878 | 1.57 | 54.42 | 1504 |
| | | 30 | 1.88 | 0.21 | 0.057 | 5.16 | 0.0081 | 0.01319 | 1.32 | 47.84 | 1322 |
| | 4 | 10 | 8.98 | 0.29 | 0.018 | 5.33 | 0.0116 | 0.00432 | 2.59 | 68.23 | 1886 |
| | | 20 | 5 | 0.25 | 0.037 | 5.30 | 0.0099 | 0.00879 | 1.92 | 58.50 | 1617 |
| | | 30 | 1.56 | 0.23 | 0.057 | 5.16 | 0.0089 | 0.01323 | 1.58 | 52.40 | 1448 |

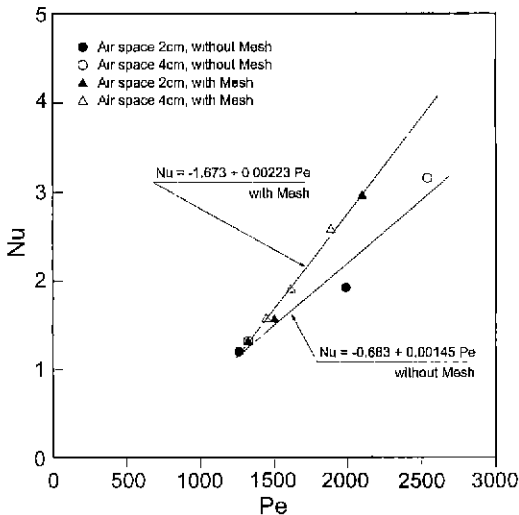


Fig. 12. Heat transfer results with and without mesh.

로 형성되므로 방울들의 형태가 매우 불규칙적이며 크게 된다. 이 경우는 열교환기내에 설치한 메쉬들이 효과적으로 작고 균일한 형태의 방울들로 분할시켜주기 때문에 실제 열교환되어지는 면적이 증가하여 열전달률이 증가하였다고 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 태양열시스템의 활용을 위한 직접접촉 열교환기(Direct Contact Heat Exchanger)의 작동특성에 대한 연구로서 작동유체는 디에틸프탈레이트(Diethyl Phthalate)를 사용했으며, 열교환기내에 메쉬(Mesh)를 설치하여 열전달률이 향상되는 효과를 보았다. 본 실험결과에

대한 결론은 다음과 같다.

1. 열교환기 윗부분의 공기-물 경계면과 밑부분의 물-작동유체 경계면이 부수적인 조절장치 및 구조물의 사용없이 거의 안정적으로 유지되었다.

2. 태양열시스템을 위한 직접접촉 열교환기로는 축열탱크(Heat Storage Tank)를 결합할 수 있는 것이 더 경제적이다. 이 경우 열교환기내의 다공판(Sieve Tray)의 설치보다는 메쉬의 설치가 더 효과적이다.

3. 유량이 적은 경우는 방울형태(Dropwise)로 방울이 형성되며, 유량이 점차 증가함에 따라 제트형태(Jetwise)로 방울이 형성되는 경향을 볼 수 있다. 이때 제트형태로 분산된 경우 공기층 간격이 작을 수록 제트 분사가 수면에 침투하는 데 용이하며 물속에서 작고 균일한 방울 형성에 기여하고 있다.

4. 메쉬를 설치한 경우는 특히 유량이 적을 때 크고 불규칙적인 방울들을 메쉬가 균일하고 작게 분할시켜주는 역할을 효과적으로 하고 있음을 볼 수 있으며, 제트 분사류의 경우는 이미 균일한 방울이 형성되었으므로 메쉬의 역할이 감소되고 있다.

5. 메쉬를 설치한 경우, 유량이 적을 수록 열교환기내의 상단이 높은 온도로 형성하는 경향이 있다. 즉 전체적으로 메쉬를 설치한 경우 온도분포의 칼럼 높이에 따른 성층현상이 나타나고 있다.

6. 정상상태에서의 Pe와 Nu와의 상관관계는 선형적으로 나타낼 수 있으며, Pe가 클 수록 Nu는 메쉬를 설치한 경우가 보다 높게 나타나고 있다.

사용기호

a : interfacial area per unit volume. cm^{-1}

A : area through which heat transfer occurs. cm^2

- d : drop diameter, cm
- F : flowrate of the dispersed fluid, cm³/sec
- h : heat transfer coefficient, J/(sec)(cm²)(°C)
- h_c : continuous fluid (water) heat transfer coefficient, J/(sec)(cm²)(°C)
- h_d : dispersed fluid heat transfer coefficient, J/(sec)(cm²)(°C)
- H : the fraction of the effective volume of the heat exchanger occupied by the dispersed fluid (holdup), dimensionless
- k : thermal conductivity, J/(sec)(cm)(°C)
- Q : rate of the heat transfer, J/sec=W
- S : horizontal cross sectional area of the heat exchanger, cm²
- ΔT : temperature difference, °C
- ΔT̄ : representative temperature difference, °C
- T_c : temperature of the continuous fluid, °C
- T_d : temperature of the dispersed fluid, °C
- U : overall area heat transfer coefficient, J/(sec)(cm²)(°C)
- U_v : volumetric heat transfer coefficient, J/(sec)(cm³)(°C)
- V : effective volume of heat exchange, cm³
- V_s : slip velocity (relation velocity between the dispersed and continuous fluid in the column), cm/sec
- μ : viscosity, g/(cm)(sec)
- ρ : mass density, g/cm³
- Nu : Nusselt Number
- Pe : Peclet Number
- Re : Reynolds Number

참고문헌

1. Moresco, L.L. and Marshall, E.: "Liquid-Liquid Direct Contact Heat Transfer in a Spray Column", Trans. of ASME, Vol. 120, pp. 684-686 (1980).
2. Handlos, A.E. and Baron, T.: "Mass and Heat Transfer from Drop in Liquid-Liquid Extration", AIChE J. Vol. 3, pp. 127-136 (1957).
3. Jacobs, H.R. and Eden, T.J.: "Direct Contact Heat Transfer in a Sieve Tray Column", Proceedings of the 8th International Heat Transfer Conference, San Francisco, CA (1986).
4. Ward, J.C., Loss, W.M. and Lof, O.G.: September "Direct Contact Liquid-Liquid Heat Exchanger For Solar Heated And Cooled Building", Solar Energy Application Laboratory, Colorado State University, Fort Collins, Colorado (1977).
5. Spiegler, K.S.: Principles of Desalination, Academic Press, New York, pp. 134-145 (1966).
6. 김종보: "저열원용 분사칼럼식 직접접촉 열교환기의 열전달 특성에 관한 연구". 한국에너지기술연구소, 대전, p. 94 (1992)
7. Lin, F. and Ford, J.D.: "Drop Size Distribution in a Liquid-Liquid Spray Column via a Photographic Technique", The Canadian J. of Chem. Eng., Vol 66, pp. 150-153 (1988).
8. Garwin, L. and Smith, B.D.: "Liquid-Liquid Spray Tower Operation in Heat Transfer", Chem. Eng. Progr., No. 49, pp. 1174-1181 (1950).
9. Christiansen, R.M. and Hixon, A.N.: "Breakup of a Liquid Jet in a Denser Liquid", Ind. Eng. Chem., 49, pp. 1017-1024 (1957).
10. Steiner, L. and Hartland, S.: "Hydrodynamics of Liquid-Liquid Spray Columns", Handbook of Fluid in Motion, Ann Arbor Science Publishers, Michigan, pp. 1049-1092 (1983).
11. Jacobs, H.R.: "A Manual for the Thermal and Hydraulic Design of Direct Contact Spray Column for Use in Extracting Heat From Geothermal Brines". Final Report, U.S. Dept. of Energy Contract No DE-AS07-76ID 01523 (1985).
12. Parsons, R.A. etc. "Solar Energy Equipment", ASHRAE Handbook Equipment, pp. 44.1-44.20 (1988).
13. Kreith, F. and Boehm, R.F.: Direct Contact Heat Transfer, Hemisphere Publishing Corp., New York, pp. 110-225 (1988).