

가열 수직 평판과 마주보는 전자모듈의 복사 및 대류 냉각에 대한 실험적 고찰

Experimental Study on the Radiative and Convective Cooling of Electronic Modules opposed to a Heated Vertical Plate

최인수*
In-Su Choi*

<Abstract>

The characteristics of natural convection heat transfer combined with radiation in a vertical parallel plates has been investigated experimentally. The vertical channel is consisted with a heated wall and three protruding heating sources attached on the opposite wall. The cooling of modules has been experimented with heating the wall as well as modules themselves at different aspects ratios and heating fluxes. As the location of module is higher, the temperature becomes higher, but the increasement is smaller. When the aspect ratio is lower than 26, its effect on the temperature is not significant rather than that of the radiation heat transfer. Furthermore, the correlation of Nusselt number with the Rayleigh number are attempted, but additional treatment is needed to accommodate the cases of heating module and/or opposite wall.

Key words : *Natural convection cooling, Radition heat transfer, Chimney effect, Vertical channel*

1. 서론

최근 전자제품의 성능 및 기능이 향상됨에 따라서 소비층은 공간 디자인, 소형화, 경량화 등의 요구가 계속 높아지고 있다. 그로 인하여 장비의 크기는 작아지는 반면 선명한 대화면화 질과 설치공간을 절약할 수 있는 평판형 표시 장치 기기로 LCD, PDP 등이 각광을 받고 있다. 이러한 영상장치는 제작기술이 발전하여 대화면화 되고 있으며, 그에 따라 기기 내부에 발

생하는 열량도 계속 증가되고 있다. 하지만 발열량이 증가되어 전자부품의 최대 허용온도를 초과하면 전자부품의 내구성 및 기능의 저하를 초래하므로 전자장비 설계시 작동온도를 최대 허용 온도보다 낮게 유지시켜야 한다.⁽¹⁾

한편 전자회로시스템은 기존의 다수개의 모듈들을 사용한 논리처리기능을 단일 모듈로 집약시키는 추세이다. 이러한 모듈당 소자들의 고집적화가 급속하게 진행됨에 따라 전자부품들의 발열밀도도 증가하여 전자기기의 신뢰성 유

* 정희원, 상주대학교 자동차공학과 교수, 工博
742-711 경북 상주시 가장동 386번지
E-mail : ischoi@sangju.ac.kr

* Professor, Department of Automotive Engineering
Sangju National University, Kyungbuk, 742-711, Korea
E-mail : ischoi@sangju.ac.kr

지가 중요한 문제로 대두되었다. 특히 평판형 표시장치의 두께가 얇은 특징을 고려하면, 전자 모듈의 냉각이 시스템의 내구성을 확보하기 위해 중요한 기술적인 문제이다.

단일 가열 수직평판에서의 대류 열전달 현상은 과거 수십년간 많은 연구가 수행되어왔으며, 수많은 열전달계수 상관식들이 발표되었다.

국내에서 양성환 등⁽²⁾은 등온인 수직 평행평판에서의 혼합대류 냉각 그리고 김의광 등⁽³⁾은 단열 채널의 한 벽에 돌출된 열원으로부터의 복합 열전달, 이주형 등⁽⁴⁾은 2개의 돌출 열원이 존재하고 단열 수평 채널 내의 난류 혼합대류 및 복사에 의한 유동 및 열전달에 대한 연구를 수행하였다. 박희용 등⁽⁵⁾ 및 박중홍 등⁽⁶⁾은 다수개의 전자기관들로 수직 유동채널을 형성하여 강제 대류 냉각특성에 대하여 연구하였다.

국의 연구의 경우 Fujii 등⁽⁷⁾는 한 수직 평판 채널 벽에 다수의 돌출 발열체의 냉각에 대하여 연구하였고, Gururaja Rao⁽⁸⁾는 수직 채널의 양면에 부착된 비돌출 발열체에서 복사를 포함한 혼합 열전달을 그리고 Salah El-Din⁽⁹⁾는 서로 다른 두 벽면의 가열 조건에서 수직 채널내의 양상을 수치해석으로 고찰하였다.

기존연구의 대부분은 한 면은 가열하고 상대면을 단열조건 또는 한 면은 단열하고 상대벽면에 전자모듈을 부착시킨 조건에서 채널 내부 유동의 양상 및 발열체의 냉각에 관한 연구들이다. 그러나 평판형 영상장치의 대부분은 한쪽의 패널 그리고 다른 한쪽의 전자회로기관으로 구성되고 있는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 한 면이 가열되고 반대편 벽면에 모듈이 장착된 채널에서 일어나는 열적 상호간섭을 실험하였다. 그리고 벽면 또는 발열체의 가열량 및 채널간격비 변화에 따른 대류 및 복사 열전달 특성을 고찰하였으며, 이러한 제반인자가 고려된 평균 Nusselt수와 Rayleigh수와 상관식을 도출하였다.

2. 실험장치

Fig. 1은 실험에서 사용한 장치들의 배열을 개략적으로 나타낸 그림이다. 실험장치는 크게 실험장치부 ①, 전원공급부 ②, 데이터처리부 ③로 구성된다.

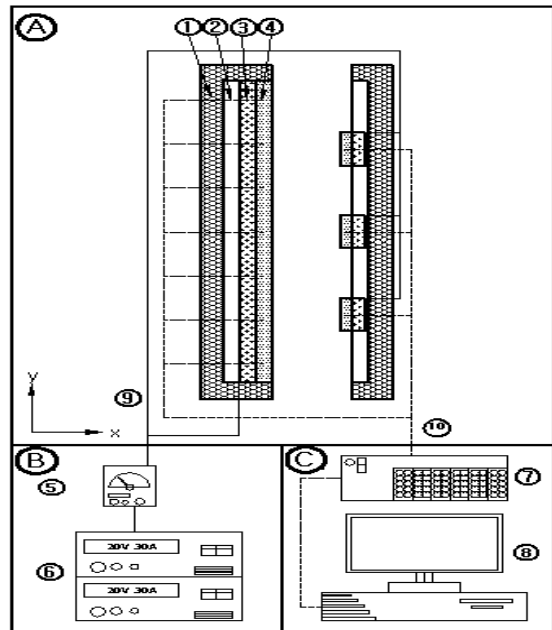
실험장치부 ①는 스티로폼 ①, 합판 ②, 고무

히터 ③, 동판 ④로 구성되어 있다. 채널은 두께 12mm, 가로길이 922mm, 세로높이 520mm 합판으로 제작하였고, 채널의 폭을 조절할 수 있도록 하였다. 그리고 채널 외벽에서의 열손실을 차단하기 위하여 10mm 두께의 스티로폼을 발포제로 부착시켜 단열시켰다. 두께 2mm 고무히터를 사용하여 발열 조건을 부여하였고, 두께 3mm 동판을 고전도율 접착제로 부착시켜 균일한 온도분포가 형성되도록 하였다.

전원공급부 ②는 발열체에 공급되는 전류, 전압을 측정하기 위한 멀티메타 ⑤와 실험조건에 맞는 전압을 적절히 변화시켜 공급할 수 있는 직류 전원공급장치 ⑥으로 구성하였다.

데이터처리부 ③는 데이터처리장치 ⑦과 컴퓨터 ⑧로 구성되어 있으며, 실험부 각 위치의 온도를 측정하기 위하여 패널측의 동판과 모듈측의 동판에 열전대를 설치하여 자료처리장치에 연결하였다. 이때 데이터 처리장치에 노이즈의 영향을 배제하기 위하여 데이터 처리부와 전원공급부를 접지시켰으며 실험장치부 동판도 동선을 이용하여 접지시켰다.

Fig. 2는 수직채널의 단면도로, 발열체의 위치 및 크기를 나타낸 그림이다. 모듈측은 합판



Styrofoam ① D.C Power supply ⑥
 Wood plate ② Data Acquisition ⑦
 Rubber heater ③ Personal computer ⑧
 Copper plate ④ Power supply lines ⑨
 Digital multimeter ⑤ Thermocouples ⑩

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

식 (6)에서 Q_p 는 패널층의 공급열량, Q_{m1} , Q_{m2} , Q_{m3} 는 모듈층의 열량을 각각 의미한다. 그리고 L , H_p , H_m , t_m 은 채널의 가로길이, 패널의 세로 높이, 모듈의 세로높이 및 모듈두께를 각각 나타낸다.

종횡비(Aspect Ratio)는 식 (7)과 같이 채널의 폭에 대한 채널의 높이로 나타내었다.

$$A_R = \frac{H}{W} \quad (7)$$

본 연구의 경우는 종횡비가 최대 26 (채널간격 20mm)으로 매우 크므로 패널층과 모듈층의 복사열 전달량이 상당하다. 그러므로 패널층과 모듈층의 방사량 균형을 고려하여 각각의 복사열전달량을 계산하고, 공급열량에 복사 열전달량을 가감하여 식 (8)과 같이 대류 열전달계수를 구하였다.

$$h_{cv,p} = \frac{Q_{in,p} \pm Q_{rad,p}}{A_p(T_p - T_{in})} \quad (8)$$

$$h_{cv,m} = \frac{Q_{in,m} \pm Q_{rad,m}}{A_m(T_m - T_{in})}$$

그리고 패널 및 모듈의 Nusselt number는 대류 열전달계수에 특성길이(H)를 고려하여 식 (9)와 같이 계산하였다.

$$Nu_p = \frac{h_{cv,p} H_p}{k A_R} \quad (9)$$

$$Nu_m = \frac{h_{cv,m} (H_m + 2 t_m)}{k A_R}$$

한편 벽면에 부착된 모듈발열체와 패널의 복사에 의한 열교환량은 에너지보전의 원리에 의하여 계산할 수 있다. 패널과 모듈의 복사량은 식 (10) 및 (11)과 같이 자체 복사량(E)에서 방사량(J)을 뺀 값이다.

$$Q_p = \frac{\epsilon_p A_p}{1 - \epsilon_p} (E_p - J_p) \quad (10)$$

$$Q_{m,i} = \frac{\epsilon_{m,i} A_{m,i}}{1 - \epsilon_{m,i}} (E_{m,i} - J_{m,i}) \quad (11)$$

그리고 패널과 모듈간의 순수 열교환량은 식 (12)와 같고, 방사율과 서로의 형상계수에 의하여 결정되고, 형상계수는 Hottel and Sarofim⁽¹¹⁾의 끈(String)법칙에 의하여 결정하였다.

$$Q_{p-m,i} = J_p A_p F_{p-m,i} - J_{m,i} A_{m,i} F_{m,i-p} \quad (12)$$

$$= (J_p - J_{m,i}) A_p F_{p-m,i}$$

모듈들과 상대 벽면의 순수 복사열 교환량의 식(13)과 같이 절대값은 동일하고 부호가 반대이다. 그리고 이들의 합은 패널층 복사량과 같으므로 식(14)와 같이 방사율을 결정한 후 순수 열교환량을 계산할 수 있다.

$$Q_{p-m,i} = - Q_{m,i} \quad (13)$$

$$(J_p - J_{m,i}) A_p F_{p-m,i} = - \frac{\epsilon_{m,i} A_{m,i}}{1 - \epsilon_{m,i}} (E_{m,i} - J_{m,i})$$

$$Q_p = - \sum_{i=1}^3 Q_{m,i}$$

$$= - \sum_{i=1}^3 \frac{\epsilon_{m,i} A_{m,i}}{1 - \epsilon_{m,i}} (E_{m,i} - J_{m,i}) \quad (14)$$

$$= \sum_{i=1}^3 (J_p - J_{m,i}) A_p F_{p-m,i}$$

4. 결과 및 고찰

4.1 가열량에 따른 온도변화

Fig. 3은 종횡비(A_R)가 17이고 모듈층 공급열량(Q_m)이 30W (열유속 582 W/m²)일 때, 패널층 공급열량(Q_p)에 따른 패널층 온도변화를 나타낸 그림이고, Fig. 4는 동일조건에서 모듈층 온도변화를 나타낸 것이다.

패널층 온도는 하부에서 상부로 갈수록 높아지고, 공급열량이 높아질수록 최하부와 최상부의 온도차가 커진다. 이는 공급열량이 많아짐에 따라 하부에서 데워진 공기가 벽면을 따라 상승하면서 대류열전달은 약화되기 때문인 것이다. 또한 모듈의 온도를 보면 상부로 갈수록 온도상승은 둔화되어, 최하부 모듈과 중간 모듈의

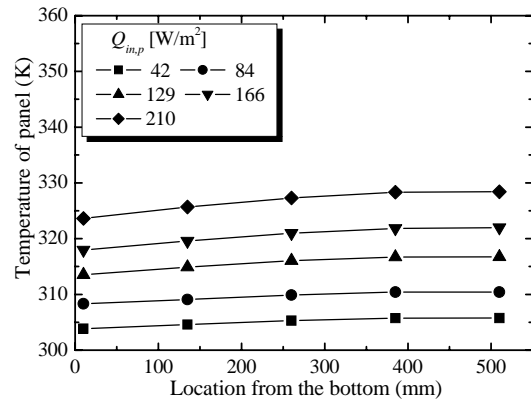


Fig. 3 Variation of panel temperatures with various heat flux at the panel ($A_R=17$, $Q_{in,m}=582W/m^2$)

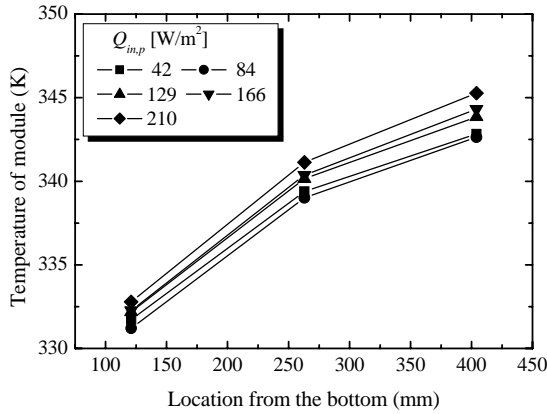


Fig. 4 Variation of module temperatures with various heat flux at the panel ($A_R=17$, $Q_{in,m}=582W/m^2$)

온도가 크고, 중간과 최상부 모듈의 온도차는 작아지는 것으로 나타났다. 상부로 갈수록 온도 상승이 커지는 것이 일반적인 현상으로 예측되나, 본 실험에서는 상부로 갈수록 온도상승이 둔화되는 양상을 보이고 있다. 이는 모듈측 벽면에서 일정 두께까지만 열경계층이 존재하여 상부로 갈수록 벽면의 온도상승이 둔화된 것으로 예상된다.

Fig. 5는 중횡비(A_R)가 17일 때, 패널측과 모듈측의 공급열량의 변화에 따라 패널측 벽면의 최고온도를 비교한 그림이고, Fig. 6은 가장 높이 장착된 모듈 3의 최고온도를 비교한 것이다.

패널측의 최고온도는 가열량에 따라 거의 선형적으로 높아지고, 모듈의 가열량에 따른 영향은 복사열전달에 의존하며 일정하게 나타났다. 하지만 모듈측의 최고온도는 모듈 가열량에 의해 좌우되며, 패널측과 동시에 가열될 때는 패널측의 가열량에 의한 영향은 줄어드는 것으로 나타났다.

즉, 한쪽 벽면만 가열될 때는 온도가 낮은 쪽의 벽면온도 상승은 복사열전달에 의하여 뚜렷하게 나타나고, 양쪽 벽면 모두가 가열될 때는 온도차가 줄어들어 복사열전달에 의한 영향도 감소하는 것이다.

4.2 채널 간격의 영향

Fig. 7은 패널측 공급열량(Q_p)이 60W (열유속 $129W/m^2$)이고 모듈측 공급열량(Q_m)이 20W (열유속 $390W/m^2$)일 때 중횡비(A_R)에 따른 패널측 온도변화를 나타낸 그림이고, Fig. 8은

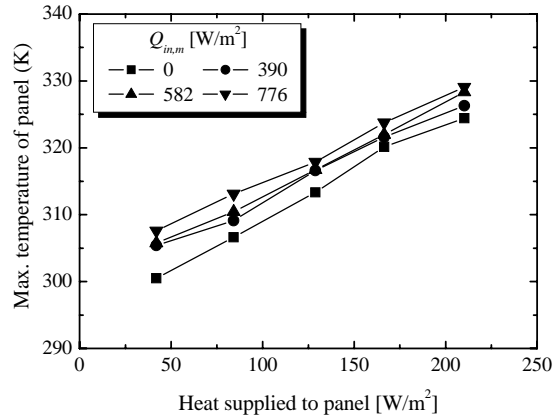


Fig. 5 Maximum temperature of panel at various heat supply to panel and module ($A_R = 17$)

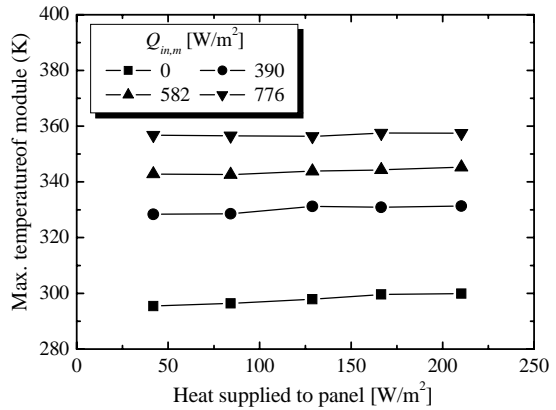


Fig. 6 Maximum temperature of module at various heat supply to panel and module ($A_R = 17$)

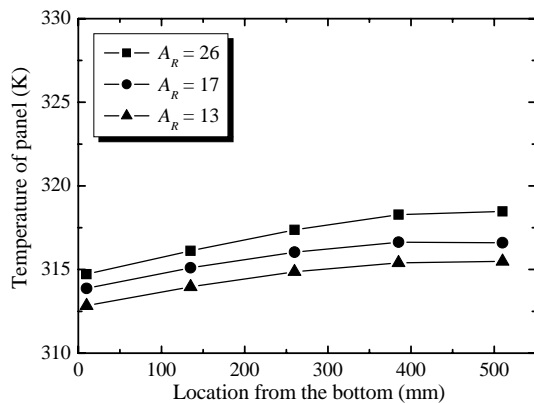


Fig. 7 Variation of panel temperatures with various aspect ratios ($Q_{in,p}=129W/m^2$, $Q_{in,m}=390W/m^2$)

동일조건에서의 모듈측 온도변화를 나타낸 것이다. 패널측 온도분포는 중횡비에 따라 증가하지만, 그 차이는 미소하다. 이는 대류와 복사열전

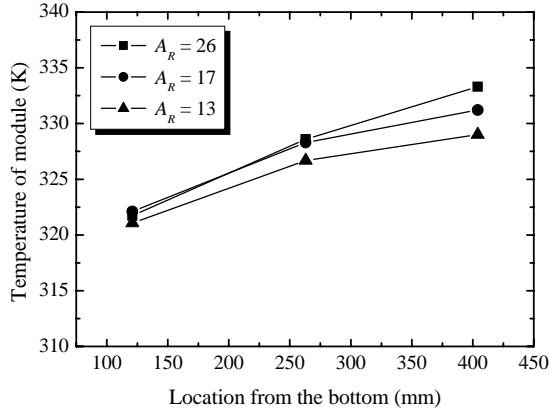


Fig. 8 Variation of module temperatures with various aspect ratios ($Q_{in,p}=129W/m^2$, $Q_{in,m}=390W/m^2$)

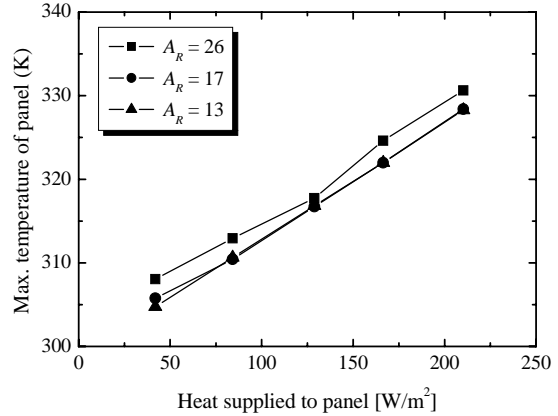


Fig. 9 Maximum temperature of panel at various heat supply to panel and aspect ratios ($Q_{in,m}=582W/m^2$)

달의 복합적인 영향으로 보인다.

모듈층의 온도변화를 보면 다소 불규칙적인 면이 있으나, 전반적으로 패널층과 유사하다. 하지만 종횡비가 26일 때 최하부 모듈과 최상부 모듈의 온도차가 다른 종횡비에서 보다 높게 나타난다. 이는 열경계층에 비하여 채널간격이 좁아 발열체 주변의 공기온도가 상대적으로 더 높아지고 대류열전달이 저하되었기 때문으로 판단된다.

Fig. 9는 모듈층의 공급열량이 30W (열유속 $582W/m^2$)일 때, 종횡비에 따른 패널층의 최고 온도 변화를 나타낸 그림이고, Fig. 10은 모듈층의 최고온도 변화를 나타낸 것이다. 종횡비가 커짐에 따라 패널층의 최고온도는 전술한 바와 같이 약간 증가하나, 종횡비 17이하에서는 거의 차이가 없다. 이는 종횡비가 작아짐에 따라 채널의 간격이 넓어지면서 양 벽면의 열경계층이 상호 간섭하는 형상이 없어진다고 판단된다.

하지만 모듈의 최고온도는 17이하의 종횡비에서도 조금씩 낮아지고 있다. 양 벽면의 열경계층이 주로 채널 상부에서 상호 간섭을 하고 모듈의 최고온도는 최상부에 장착된 모듈에서 나타나므로, 모듈의 최고온도는 종횡비가 줄어들에 따라 미소하나마 점차 낮아지는 것으로 사료된다. 하지만 복사열전달의 영향으로 그 증가폭은 크지 않는 것이다.

4.3 Rayleigh수의 영향

채널의 폭을 20~40mm (종횡비 26~13), 패널의 공급열유속을 42~210W/m² 그리고 모듈층

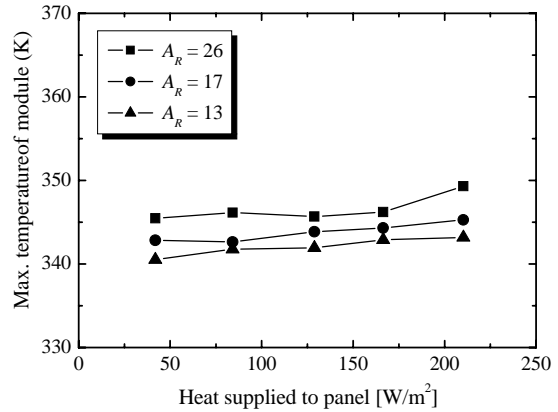


Fig. 10 Maximum temperature of module at various heat supply to panel and aspect ratios ($Q_{in,m}=582W/m^2$)

의 공급열유속을 390~776W/m²로 변화시키며 실험한 결과로 상관식을 유도하였다. 이 때 Rayleigh 수는 $7.5 \times 10^5 \sim 3.3 \times 10^7$ 이다.

4.3.1 패널층의 Nusselt 수

Fig. 11은 실험자료의 계산에서 언급한 식 (5)로 계산한 Rayleigh 수와 식 (9)의 패널층 Nusselt 수와의 관계를 나타낸 그림이다.

패널층의 Nusselt 수는 3가지의 종횡비에서 유사한 경향을 보이며, Rayleigh 수의 증가에 따라 식(15)와 같이 비례하는 경향을 보인다. 특히 채널의 폭이 넓어질수록, 종횡비가 작아질수록, Nusselt 수는 Rayleigh 수에 영향이 점점 커지는 것으로 나타났다.

$$Nu_p = 4.318 \times 10^{-2} Ra^{0.314} \quad (15)$$

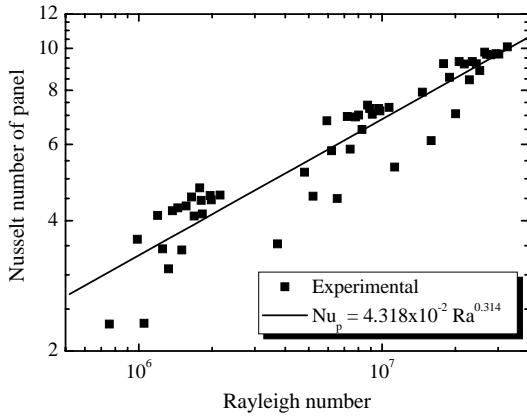


Fig. 11 Nusselt number of panel at various Rayleigh number

Fig. 11에서 상관식 (15)와 실험결과의 편차가 보이는데, 주로 가열량이 최소일 때와 최대일 때의 오차가 큰 것으로 나타났다. 대류 열전달계수를 계산하는데 양 벽면의 발열체간의 복사 열교환량을 가감하여야 하는데, 여러 가지의 다른 재질로 구성된 벽면 물체의 방사율의 불확실성이 편차를 야기할 주요한 원인으로 사료된다. 또한 자연대류 냉각의 특성상 안정된 결과를 얻기 위해서는 장시간이 소요되는데, 실내공기의 온도조절장치 및 공기순환이 이러한 편차를 야기할 수도 있다고 본다.

4.3.2 모듈층의 Nusslet 수

Fig. 12는 Rayleigh 수의 변화에 따른 모듈층 Nusslet 수와의 관계를 나타낸 그림이다. 앞에서 언급한 3가지 중횡비 조건에서 실험을 실시하였는데, 모든 위치의 모듈들에서 Rayleigh 수에 따른 거의 동일한 양상을 보이고 있다. 하지만 모듈이 하부에서 상부로 부착될수록 열전달계수는 작아지며, 그 증가폭도 둔화되는 것으로 나타났다. 이는 연돌효과에 의하여 공기가 하부에서부터 데워지면서 상부로 상승하는데, 상부에 위치한 모듈일수록 열방출이 둔화되기 때문일 것이다. 그러나 최상부로 갈수록 공기밀도는 낮아지고 속도는 높아져 열경계층 두께의 증가가 없으므로 열전달계수 및 Nusselt 수의 증가폭이 줄어드는 것으로 판단된다.

그러므로 Rayleigh수에 대한 모듈층 Nusselt 수의 관계는 식(16)과 같이 채널 높이에 대한 모듈 각각의 설치높이의 비를 추가하였고, 상부에 위치하는 모듈일수록 낮아지는 Nusslet 수

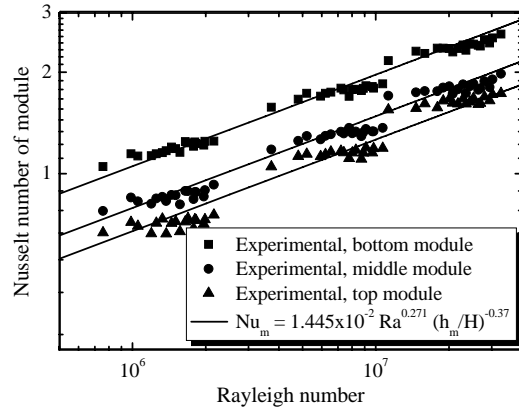


Fig. 12 Nusselt number of module at various Rayleigh number

의 추세를 반영하였다.

$$Nu_{m,i} = 1.445 \times 10^{-2} Ra^{0.271} \left(\frac{h_{m,i}}{H} \right)^{-0.37} \quad (16)$$

하지만 3가지의 중횡비에서 가열량이 최소일 때와 최대일 때 비슷한 정도의 편차를 보이고 있다. 이는 앞에서 언급한 복사열 전달량의 계산에서 야기된 오차 및 식 (6)의 채널 총 열유속 - 패널과 모듈의 총 표면적 대비 전체 공급열량 - 의 정의에서 야기된 오차일 수도 있다.

그러므로 모듈층만 가열한 경우와 마주보는 반대 벽면도 동시에 가열되는 조건을 모두 내포할 수 있는 상관식을 개발하기 위해서는 식 (6)의 총 열유속과 식(9)의 Nusselt 수에 대한 정의의 합당성을 재고해볼 필요가 있다.

5. 결론

한 벽면이 가열되고 반대측 벽면에 다수의 돌출 발열체가 부착된 수직채널에서 발생하는 자연대류 열전달 특성에 대하여 고찰하였다. 실제 사용되는 평판형 영상장치의 냉각을 고려하여 42인치 크기의 가열 벽체를 제작하였고, 마주보는 벽면에 3개의 발열체를 부착시켜 채널의 중횡비, 양 벽면의 공급열량을 달리하여 실험하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

수직 채널에서 패널층의 최고온도와 최저온도의 차는 작으나, 모듈층의 온도는 상부에 위치할수록 뚜렷하게 높아진다. 하지만, 중간부와 최상부의 온도차는 최하부와 중간부에 위치한 모듈들의 온도차보다 작게 나타났다. 그러므로

발열량이 가장 큰 모듈은 최하부에 위치시키는 것이 바람직하다고 판단된다.

중횡비의 영향을 보면, 중횡비가 17이하에서는 패널측의 온도 저하는 거의 없으나, 모듈측은 중횡비가 작아질수록 온도가 미소하게 낮아지는 것으로 나타났다. 대체적으로 중횡비 26이하에서 그의 영향은 크지 않으며, 발열량이 클수록 그 영향력은 더욱 저하되었고, 복사 열전달에 의한 온도변화가 지배적이었다. 그러므로 한계온도를 초과하지 않도록 모듈의 배치 및 열유로의 설계가 주요한 요소로 판단된다.

열전달계수 또는 Nusslet 수와 총 발열량을 기준으로 한 Rayleigh수의 관계는 지수함수관계를 보였다. 하지만 모듈측만이 가열된 경우와 상대 벽면도 가열되는 경우를 모두 하나의 관계식으로 나타내기 위해서는 복사열 전달량의 계산이 주요한 요소이며, 모듈측에서 기관으로 손실되는 전도열 전달량과 기관과 상대 벽면간의 이차적인 복사열 전달량도 함께 고려되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) Nelson, L. A. and Sekhon, K. S., "Direct heat pipe cooling of a semi-conductor devices," Proc. of Int. Heat Pipe Conf., pp. 373~376, (1978)
- 2) 양성환, 권순석, "수직 평형평판에서의 혼합 대류 열전달," 대한기계학회 논문집 (B), 제 13권, 제2호, pp. 299~306, (1989)
- 3) 김의광, 백병준, 박복춘, 조병수, "돌출된 열원이 부착된 수직 채널내 복합 열전달," 대한기계학회 논문집 (B), 제20권, 제2호, pp. 741~751, (1996)
- 4) 이주형, 박경우, 박희용, "3차원 PCB 채널내에서의 복사-혼합대류 열전달 특성", 공기조화·냉동공학 논문집 제8권 제4호, pp. 561~575, (1996)
- 5) 박희용, 박경우, "PCB 구조변화가 전자장비 냉각에 미치는 연구에 관한 수치적 연구", 대한기계학회논문집 제19권 제12호, pp. 3329~3343, (1995)
- 6) 박종홍, 이재현, "전자장비 캐비닛의 냉각특성에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집(B) 제20권 제7호, pp. 2356~2366, (1996)
- 7) Fijji, M., Gima, S., Tomomura, T. and Zhang, X., "Natural convection to air from an array of vertical parallel plates with discrete and protruding heat sources," Int. J. of Heat and Fluid Flow, Vol. 17, No. 5, pp. 483~490, (1996)
- 8) Gururaja Rao, C., Balaji, C. and Venkateshan, S. P. "Effect of surface radiation on conjugate mixed convection in a vertical channel with a discrete heat source in each wall", Int. Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 45, pp. 3331~3347, (2002)
- 9) Salah El-Din, M. M., "Effect of thermal and mass buoyancy forces on the development of laminar mixed convection between vertical parallel plates with uniform wall heat and mass fluxes", Int. Journal of Thermal Sciences, Vol. 42, pp. 447~453, (2003)
- 10) Welty, J. R., Wilson, R. E. and Wicks, C. E., "Fundamentals of Momentum Heat and Mass Transfer", 3rd Ed., pp. 756, (1984)
- 11) Hottel, H. C. and Sarofim, A. F., "Radiative Heat Transfer", McGraw-Hill, New-York, (1967)

(2004년 12월 2일 접수, 2005년 5월 20일 채택)