

# 플라즈마 영상장치의 채널 사이에 놓인 전자모듈의 자연대류 열전달 해석

## Analysis of Natural Convection Heat Transfer from Electronic Modules in a Plasma Display Panel

최인수\*, 박병덕\*\*, 서주환\*\*\*  
In-Su Choi\*, Byung-Duck Park\*\*, Joo-Hwan Seo\*\*\*

### <Abstract>

The heat transfer characteristics of a plasma display panel has been investigated for cooling an electronic module. Hence, a two dimensional  $\kappa$ - $\epsilon$  turbulent model was developed to predict the temperatures of the panel and module. The heat conduction was solved for the material region. To consider the mixed convection at the solid-fluid interfaces between the air and the panel and module, the energy equation was solved simultaneously.

When the electronic module stands face to face with the panel, the temperatures of panel and module are lower than other arrangement due to the chimney effect. However, the gap between the panel and module does not affect significantly the maximum temperature when the aspect ratio is less than 0.1. To maintain the maximum temperature of the module under a certain limit, the passage of air should be well designed by the optimal layout of electronic modules which have different heat emission.

**key words** : *Plasma display panel, Natural convection, Numerical model, Chimney effect*

### 1. 서론

평판형 표시장치인 플라즈마 디스플레이 패널(Plasma Display Panel)은 기존의 브라운관을 대체할 차세대 대화면 영상장치로서 활발히 연구되고 있다. PDP는 유리기판을 두 장 사용하여 각각의 기판 위에 적당한 전극과 형광체를 도포하고 약 0.1~0.2mm 정도의 간격을 유

지한다. 그리고 그 밀폐 공간에 채워진 방전가스에서 방출된 자외선이 형광체와 부딪쳐 고유의 가시광선을 방출하는 원리로 화면을 구성한다. 또한 PDP의 격벽이나 전극의 온도가 -100~100°C 정도의 범위에서는 각 Pixel에서 생성되는 플라즈마가 거의 영향을 받지 않는 특성을 가지고 있다. 따라서 PDP의 작동온도는 구동회로에 이용되는 전자모듈의 온도한계에 의

\* 정회원, 상주대학교 기계공학부 교수, 工博  
E-mail : ischoi@sangju.ac.kr  
742-711 경북 상주시 가장동 386번지  
\*\* 정회원, 상주대학교 기계공학부 교수, 工博  
\*\*\* 상주대학교 산업대학원 기계공학과

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

해 결정된다고 할 수 있다.

한편 전자회로시스템은 기존의 다수개의 모듈들을 사용한 논리처리기능을 단일 모듈로 집약시키는 추세이다. 이러한 모듈당 소자들의 고집적화가 급속하게 진행됨에 따라 전자부품들의 발열밀도도 증가하여 전자기기의 신뢰성 유지가 중요한 문제로 대두되었다. 대부분의 전자기기 발열부품들의 접합부 최대한계온도는 150°C 이하이지만, 모듈의 안정성을 고려하여 접합부의 온도는 120°C 이하로 유지시켜야 한다. Nelson 등<sup>(4)</sup>의 결과에 의하면, 단일 전자소자의 경우 최대 작동온도를 기준으로 온도가 10°C 증가함에 따라 기기의 수명이 50%로 줄어드는 것으로 알려져 있다.

PDP의 전면 영상패널은 발열량이 가장 크며 패널 앞쪽과 뒤쪽으로 열을 방출한다. 패널 뒤쪽에는 격벽 또는 전자회로기판이 있고 패널과 배면으로 위치하여 모듈들이 설치되어 있다. 그리고 뒷판은 공기가 유입될 수 있는 다수의 구멍들을 갖는 구조이다. 그러므로 패널에서 방출되는 열량의 일부는 모듈들의 온도상승에 기여할 수 있다. 특히 PDP세트의 두께가 얇은 특징을 고려하면, 영상 패널 및 전자 모듈 주위의 열유동 해석이 시스템의 내구성을 확보하기 위해 중요한 기술적인 문제이다.

단일 가열 수직평판에서의 대류열전달 현상은 과거 수십년간 많은 연구가 수행되어왔으며, 수많은 상관식들도 발표되었다.<sup>(2, 3)</sup> 국내에서도 양<sup>(4)</sup> 및 박<sup>(5)</sup> 등에 의해서 수직 평판에서의 혼합대류 열전달 현상이 연구 발표되었으나, 연구 대상이 열교환기로서 PDP패널에서의 열전달 양상과는 다소 차이가 있을 것으로 사료된다.

또한 채널 벽면에 부착된 모듈로부터의 열전달현상에 대해서도 과거 10여년간 많은 연구가 수행되었다. 수직채널의 경우 Fujii 등<sup>(6)</sup>은 실험 및 수치해석을 통해 모듈의 최대온도와 채널의 최적 간격 등을 예측할 수 있는 상관식을 제시하였다. Bessaih 등<sup>(7)</sup>은 수치해석을 통해 수직 채널 벽면에 부착된 모듈에서의 열발산량에 따른 모듈의 배열방법 등을 제시하였다. 국내에서도 김 등<sup>(8)</sup>에 의해 채널 벽면에 단일 모듈이 부착되었을 때의 모듈의 최대온도에 영향을 미치는 변수들에 대한 연구결과가 발표되었다.

많은 연구들이 단일 벽면의 전·후부로의 방열 또는 외부(대기)로의 방열이 없는 상태에서

채널 사이에서의 대류열전달 문제들을 다루었다. 그리고 수직 벽면에서의 모듈냉각도 벽면의 방출열에 대한 영향이 없는 상태에서 자연대류 또는 강제대류 열전달 문제들을 다루었다.

하지만 PDP 세트는 패널의 전면에서 외부에 열을 방출하면서 후면으로도 열을 방출하여 모듈에 영향을 주는 구조이다. 그러므로 본 연구에서는 채널의 높이 및 간격 그리고 패널의 소비전력을 달리하였을 때, 패널 및 전자모듈의 최대 온도를 예측할 수 있는 수치해석 모델을 개발하였다. 또한 PDP 세트를 모사할 수 있는 실험장치를 만들어, 실험결과와 수치해석 결과를 비교 검토하였고, 전자 모듈의 온도 상승을 최소화할 수 있는 자연대류 냉각특성에 대하여 고찰하였다.

## 2. 실험장치

플라즈마 영상장치 세트는 패널과 전자모듈들의 발열량이 패널의 앞쪽과 뒤쪽으로 방출되고, 모듈에서의 소비되는 전력은 패널과 전자회로기판 그리고 기판과 커버 사이의 채널를 통과하는 공기로 방출되는 구조이다. 그러므로 패널에서 방출되는 열량의 크기에 따라 모듈의 온도도 변화할 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 영상패널의 후면으로 방출되는 열에 의한 전자모듈의 온도상승 효과를 고찰하기 위하여, Fig. 1과 같이 고무히터(②,⑤)를 사용하여 발열조건을 부여하고, 동판(③,⑥)을 고전도율 접착제로 부착시켜 균일한 온도분포가 형성되도록 하였다. 패널은 42인치의 크기로서 가로길이는 922mm 그리고 세로

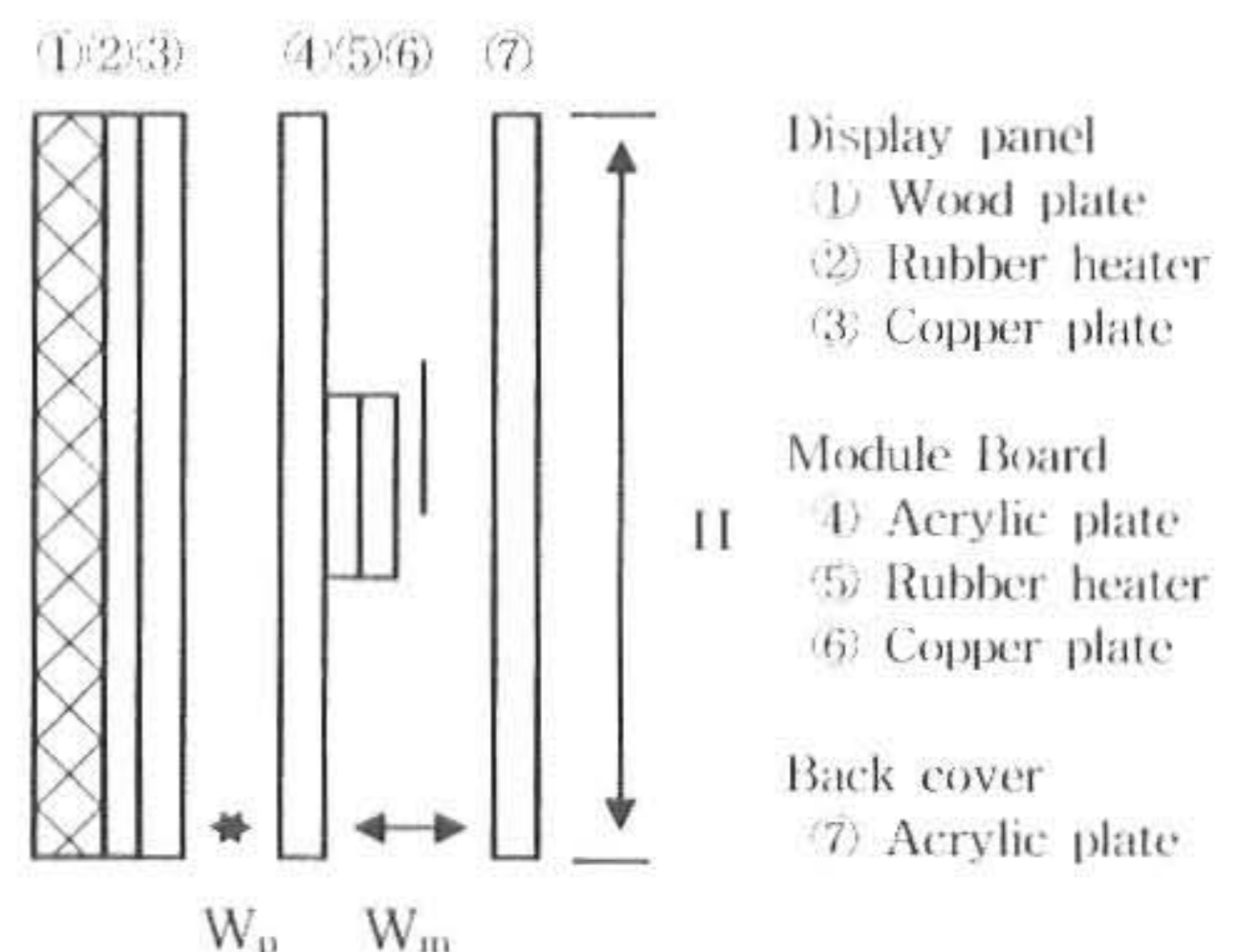


Fig. 1 Illustration of a simulated plasma display panel for experiments

높이(H)는 520mm이다.

전원공급장치를 사용하여 고무히터에 전원을 공급하고, 패널측의 동판에는 30개의 열전대를 그리고 모듈측의 동판에는 6개의 열전대를 설치하여 측정하고 자료처리장치에 연결시켜 컴퓨터에 저장되도록 하였다. 합판의 두께는 12mm, 발열체인 고무히터는 2mm, 동판은 3mm이고 아크릴판의 두께는 6mm이다. 그리고 실험장치 주변으로의 열손실을 최소화시키기 위하여 패널 전면과 커버 후면에 100mm 두께의 스티로폼을 부착시켰다.

### 3. 수치해석

PDP 영상패널 주위의 열전달현상을 해석하기 위하여 공기유동양상은 2차원 유동으로 가정하였고, 패널의 후면부에서는 격벽으로 이루어진 제한된 공간으로 열전달이 이루어진다. 그리고 패널의 전면부와 커버 뒷면은 단열조건으로 처리하였다.

채널내의 공기유동상태는 정상상태로 기본방정식은 식(1)과 같이 대류항, 확산항 그리고 원천항( $S_\phi$ )으로 나타낼 수 있다.

$$\text{div}(\rho u \phi) = \text{div}(\Gamma_\phi \text{grad} \phi) + S_\phi \quad (1)$$

식 (1)을 공기유동의 2방향 속도성분 운동량, 에너지(온도), 난류운동에너지 및 소멸율에 대하여 각각 SIMPLE<sup>(8)</sup>방법으로 연산하고, 벽면과 공기의 열전달량은 에너지 방정식의 원천항으로 처리하였다. 이러한 기본방정식들은 유한체적법(Finite Volume Method)<sup>(9)</sup>을 사용하여 이산화시키고, 공기의 유동은  $k-\epsilon$ 난류모델<sup>(10)</sup>을 그리고 난류모델의 벽면 경계조건의 수정을 위하여 저레이놀즈 모형<sup>(11)</sup>을 사용하여 계산하였다.

수치해석모델의 검증을 위하여 실험결과와 동일한 조건(외기온도 24.3°C, 패널측 공급열량 96W 그리고 모듈측 공급열량 20W)에서 비교하였다. Fig. 2는 패널과 모듈이 마주보도록 배열하였고 간격은 25mm 그리고 커버와의 간격은 10mm일 때, 패널측 동판온도와 모듈측 동판온도를 비교한 그림이다. 전반적인 온도분포 양상은 수치해석결과와 실험결과와 유사하며 2°C 정도의 차이를 보이고 있다. 이는 계산시 패널과 커버의 대기와 접촉한 면을 단열조건으로

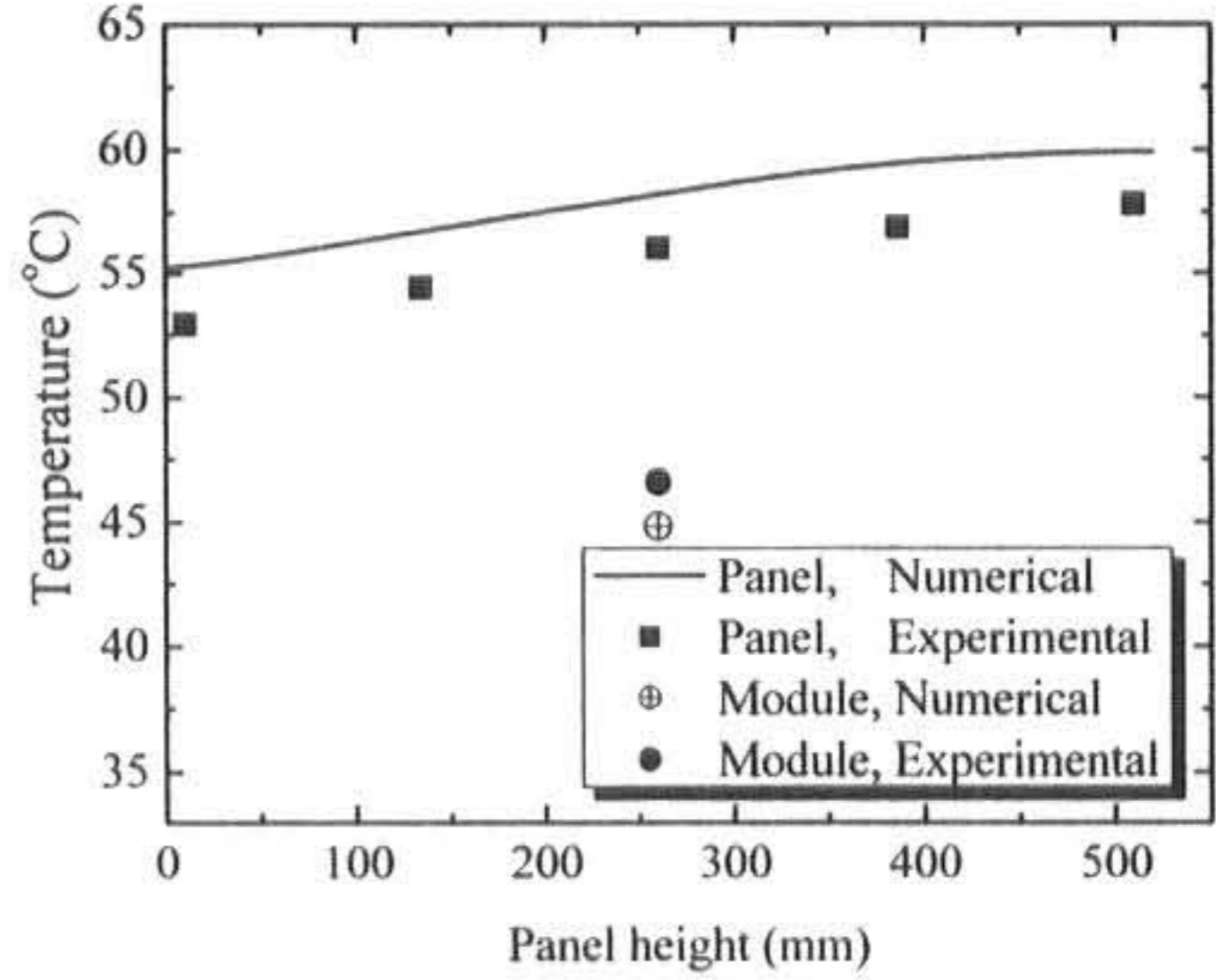


Fig. 2 Comparison of temperatures between numerical and experimental results (Forward :  $W_n = 25\text{mm}$ ,  $W_m = 10\text{mm}$ )

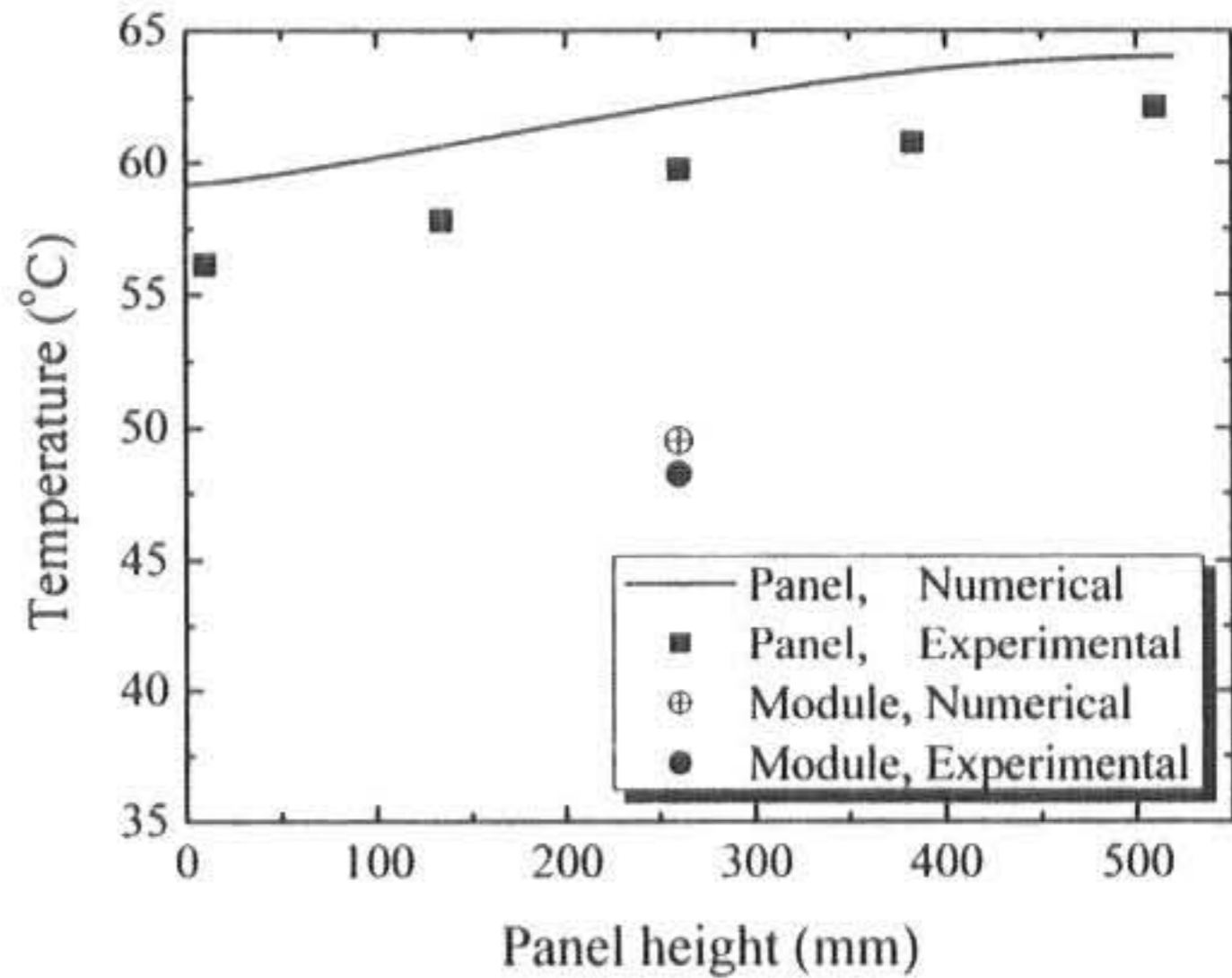


Fig. 3 Comparison of temperatures between numerical and experimental results (Backward :  $W_n = 10\text{mm}$ ,  $W_m = 25\text{mm}$ )

처리하였는데, 실제로는 열손실이 존재하기 때문으로 판단된다. 특히 패널 전면으로의 열손실이 가장 큰데 외기와 접한 단열재 표면의 온도가 외기온도보다 최대 2°C 정도 높았다. 아울러 기판으로 사용한 아크릴판이 패널과 마주보는 면만 열을 받아 다소 변형을 일으켰고 동판과 고무히터의 접촉이 불완전해지는 문제점이 발생하였다. 이 때문에 고무히터에서 발생한 열의 일부가 아크릴판으로 원활히 전도되지 못하였고, 실험치의 모듈온도가 계산치보다 1.8°C 정도 높게 나타났다.

Fig. 3은 모듈이 기판과 등진 형태로 간격은 10mm 그리고 기판과 커버의 간격은 25mm일 때 온도를 비교한 그림이다. Fig. 2와 같이 패널의 실험치 온도는 계산치보다 2~3°C 낮다. 열손실이 주요 원인이지만 하단부의 온도차이

는 고무히터의 가열부가 다소 불균일하기 때문으로 추정된다. 즉, 계산치는 균일한 열유속 조건으로 가정하였으나, 실제 고무히터는 하단부에서 일정거리 떨어진 부위부터 가열되는 차이가 있다. 하지만 모듈온도는 Fig. 2와 상이하게 계산치가 실험치보다 1.3°C 높게 나타났다. 이 경우는 기판의 양면이 열을 받아 고무히터와 아크릴판의 접촉이 양호하였으나, 패널부의 열손실 영향으로 모듈부의 실험치 온도가 약간 낮게 나타난 것으로 사료된다.

하지만 전반적으로 수치해석모델의 계산결과는 실험치와 비교하여 상당히 근사한 온도분포를 보여준다. 그러므로 PDP 영상패널의 열전달 양상을 고찰하는데 충분히 사용할 수 있을 것으로 판단되므로 여러 설계인자들의 변화에 따른 온도변화를 고찰하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

외기조건을 101.3kPa, 30°C 상태로 하고 영상패널과 격벽의 간격, 전력소비량, 모듈기판의 배열을 달리하여 계산을 수행하였다. 이 때 고무히터의 열전도도는 동판과 같이 400W/m.K로 가정하였고 아크릴판의 열전도도는 0.209W/m.K로 하여, 패널과 모듈의 국소 최고온도 변화를 살펴보았다.

##### 4.1 모듈기판 배열의 영향

패널에 공급된 열유속량은 200W/m<sup>2</sup>으로 동일할 때, 모듈의 공급 열유속량이 300~900W/m<sup>2</sup>(13.83~41.49W)으로 변화함에 따른 패널 및 모듈부의 최고온도 변화를 살펴보았다. Fig. 4는 Fig. 1에 도시한 바와 같이 모듈이 기판의 중간 높이에 그리고 패널과 등지게 배치된 경우이고, Fig. 4는 마주보게 배치하였을 때의 최고온도 변화를 나타낸 그림들이다. 모듈이 커버쪽을 향한 경우는 패널과 모듈기판의 간격(W<sub>p</sub>)이 10mm이고, 기판과 커버의 간격(W<sub>m</sub>)은 25mm이다. 그리고 모듈이 패널과 마주보는 경우는 W<sub>p</sub>가 25mm이고 W<sub>m</sub>은 10mm로, 패널과 커버의 총 간격은 35mm로 두 경우 모두 동일하다.

모듈이 패널과 마주보는 경우에 모듈이 등진 경우에 비하여 패널의 최고온도는 약 4~5°C 정도 낮고, 모듈의 최고온도는 약 4~6°C 낮게 나타났다. 그리고 모듈과 패널이 마주보게 배치한 경우는 전체적인 온도도 낮지만, 모듈의 공

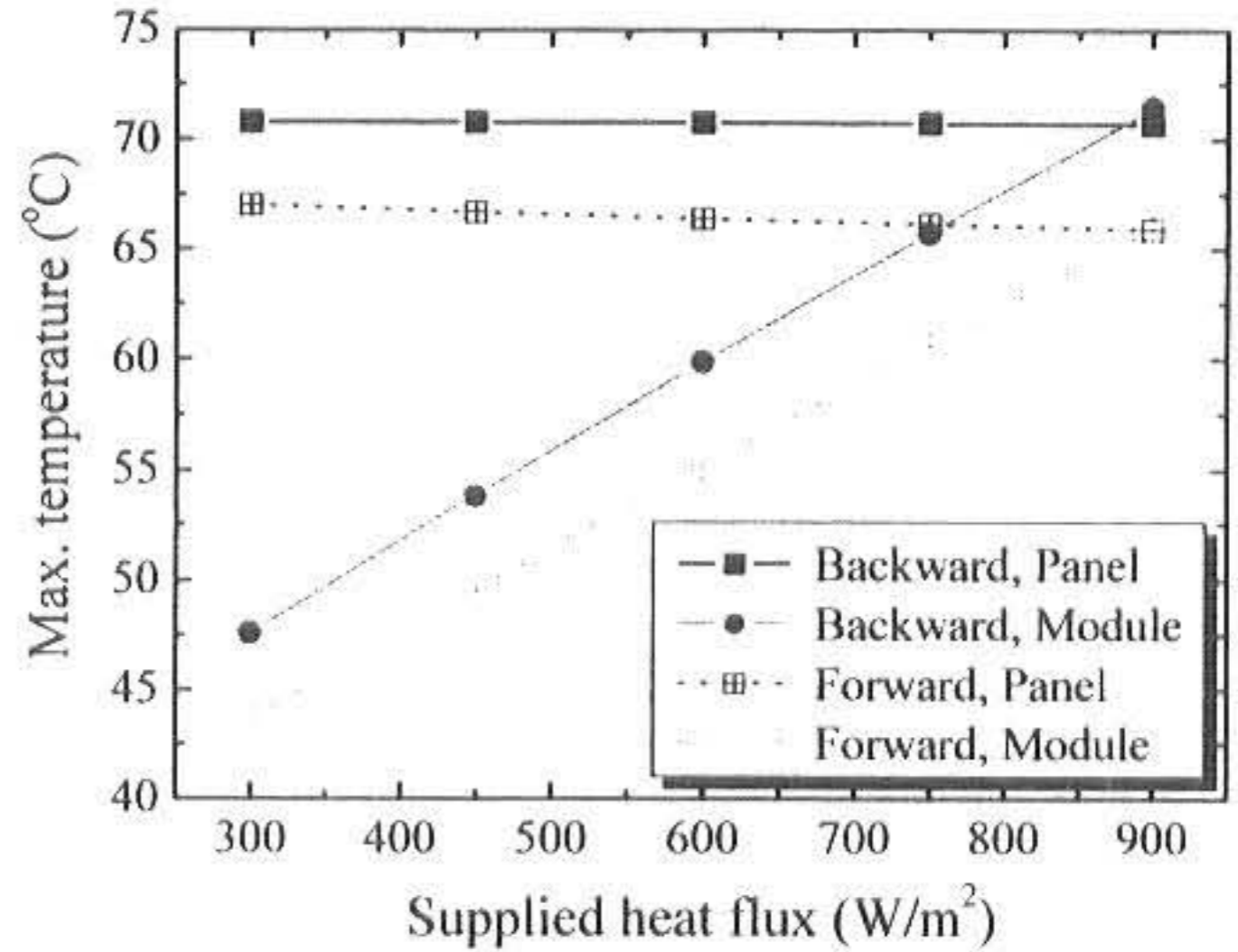


Fig. 4 Maximum temperatures at varying heat flux (Backward : W<sub>p</sub> = 10mm, W<sub>m</sub> = 25mm) (Forward : W<sub>p</sub> = 25mm, W<sub>m</sub> = 10mm)

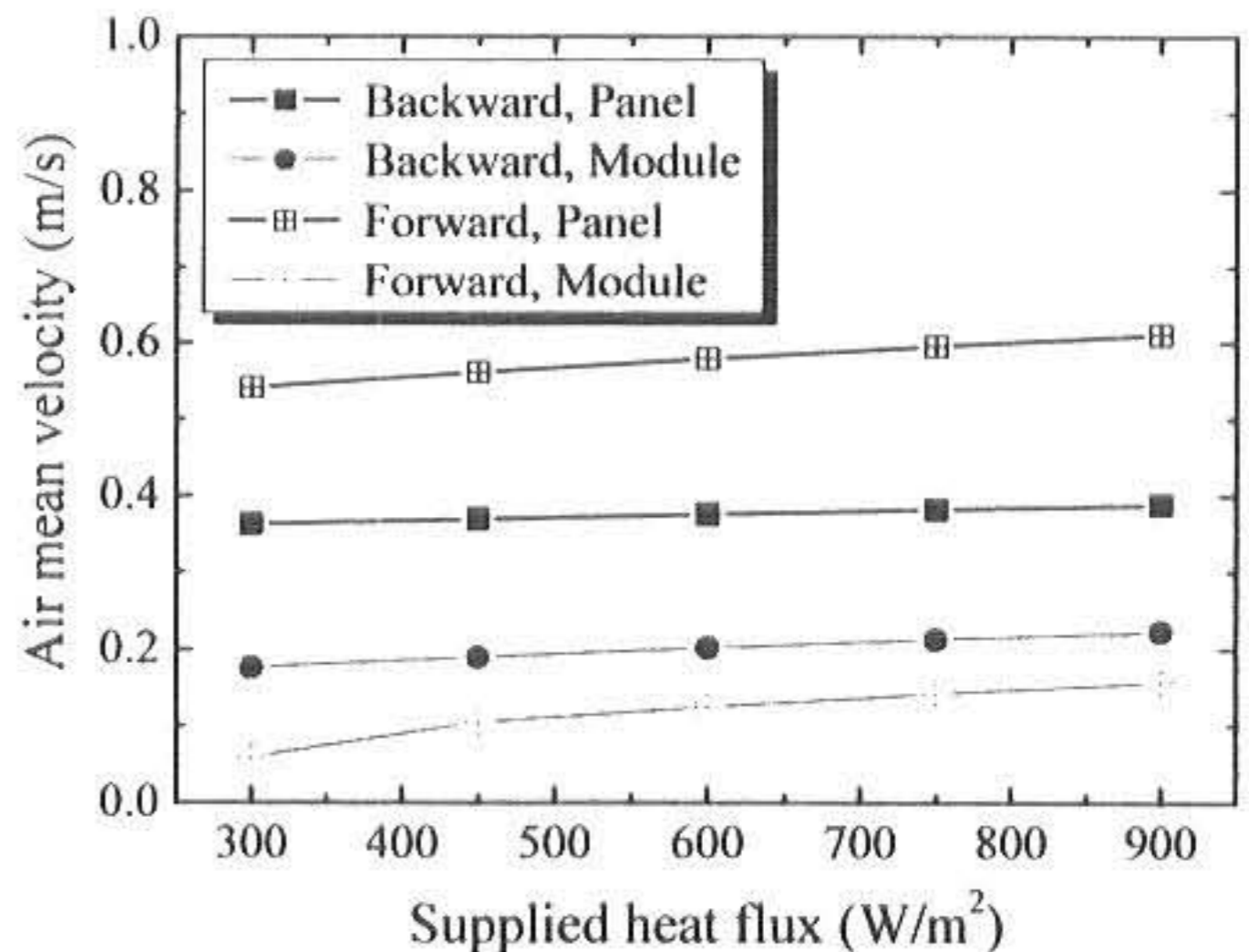


Fig. 5 Air velocities at channel inlets vs. heat flux (Backward : W<sub>p</sub> = 10mm, W<sub>m</sub> = 25mm) (Forward : W<sub>p</sub> = 25mm, W<sub>m</sub> = 10mm)

급 열유속이 증가함에 따라 패널의 온도도 낮지는 경향을 보이고 있다.

수직 채널에서 패널과 모듈 주변의 공기는 발산열에 의하여 더워지고 밀도는 낮아지므로 부력효과에 의하여 상승하게 된다. 즉, 연돌효과(chimney effect)에 의하여 자연대류 효과가 증대된다. 그러므로 Fig. 5에 나타낸 채널 입구로 유입되는 공기의 평균속도는 패널과 모듈이 마주할 때 패널측의 속도는 등진 경우보다 약 1.5배 높고, 커버측의 속도는 오히려 훨씬 낮다. 모듈의 공급 열량이 증가할수록 그 차이는 다소 줄어들는데, 그 이유는 모듈에 공급된 열의 일부가 기판을 타고 전도되고, 기판으로 전도된 열의 일부는 모듈기판의 뒷면으로 방출되기 때문으로 판단된다.

전자모듈의 최고온도는 모듈기판 재료의 열

전도도에 의한 영향도 있지만, 패널과의 상대적인 배열에 따라 보다 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 그러므로 전자기판의 모듈이 패널의 후면과 마주하게 설치하는 것이 자연대류 냉각에 유리할 것으로 사료된다. 즉, Fig. 1과 같이 패널의 후면과 모듈면에 별개의 채널이 형성되도록 하는 배열보다는, 하나의 공기유동 채널만 형성되도록 하면 연돌효과가 커져서 모듈 자체의 온도 및 패널의 온도도 저하될 것이다.

4.2 채널 간격의 영향

Fig. 6은 패널과 모듈이 마주보게 배치될 때 채널 간격의 변화에 따른 최고온도 변화를 나타낸 그림이고, Fig. 7은 채널 출구에서의 속도 분포를 비교한 그림이다. 모듈기판과 커버의 간격은 10mm로 동일하고, 패널에 공급되는 열유속은  $200W/m^2$ 이며 모듈은  $900W/m^2$ 이다.

패널과 모듈기판의 간격이 15mm에서 55mm로 증가되면, 패널의 최고온도는 2°C 정도 더 높아지고 모듈의 온도는 4°C 높아진다. 한쪽 면만 가열되고 다른 벽면은 단열조건인 채널의 경우<sup>(13,14)</sup>와는 상반되는 결과이다. 채널의 폭이 넓어짐에 따라 입구의 평균유속은 다소 상승하지만, Fig. 7에 나타난 바와 같이 층류유동의 포물선 형태에서 난류유동의 등속형태로 변화되고, 최고속도는 둔화되는 경향을 보인다. 그리고 모듈의 돌출높이가 5mm인 점을 감안하면 채널의 폭이 넓어짐에 따라 모듈 주변에서의 공기유속은 오히려 떨어진다. 그러므로 채널의 폭이 커짐에 따라 채널을 통과하는 공기량은 증가하지만, 모듈의 온도는 상승하는 것으로 판단된다. 또한 패널측에서도 다소의 속도변화가 있어서 패널의 온도 또한 상승하는 것이다. 물론 채널의 폭이 일정 한계이상으로 벌어지면 패널과 모듈의 최고온도는 더 이상 올라가지 않고 일정한 형태를 유지할 것으로 예상된다. 하지만 박막형 영상장치의 장점은 두께가 얇은 것으로 최대한 채널의 폭을 좁히는 것이 관건이다.

계산결과로 비추어 볼 때, 채널높이와 폭의 비(종횡비)가 0.1이하에서는 종횡비에 따른 온상승 효과는 크지 않을 것으로 판단된다. 그러므로 이러한 박막형 영상장치의 제작시 기술적으로 가능한 범위에서 채널의 폭을 가능한 좁게 하여도 전자모듈의 냉각에는 무리가 없을

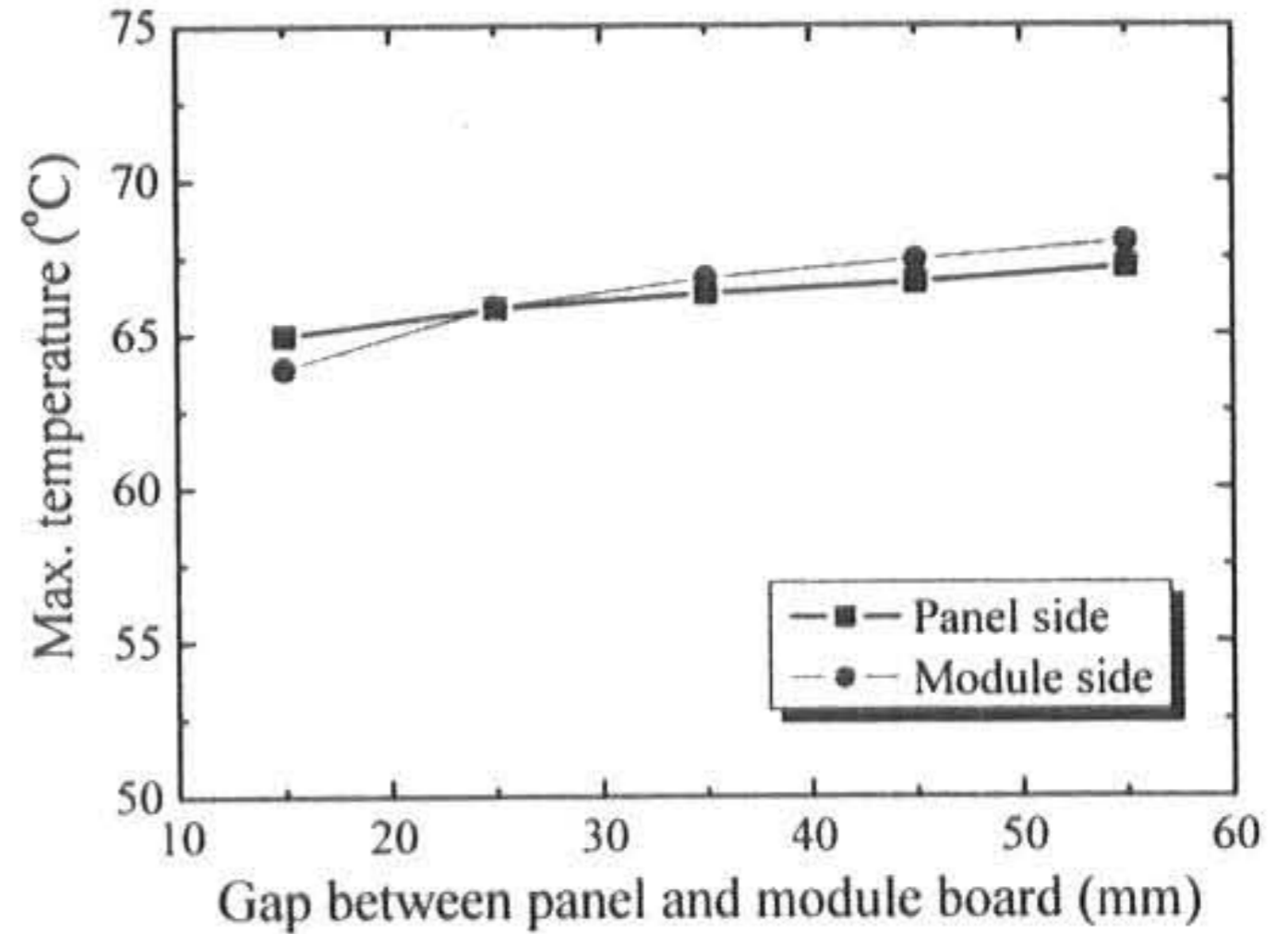


Fig. 6 Maximum temperatures at varying gap between plate and module board ( $W_m = 10mm$ )

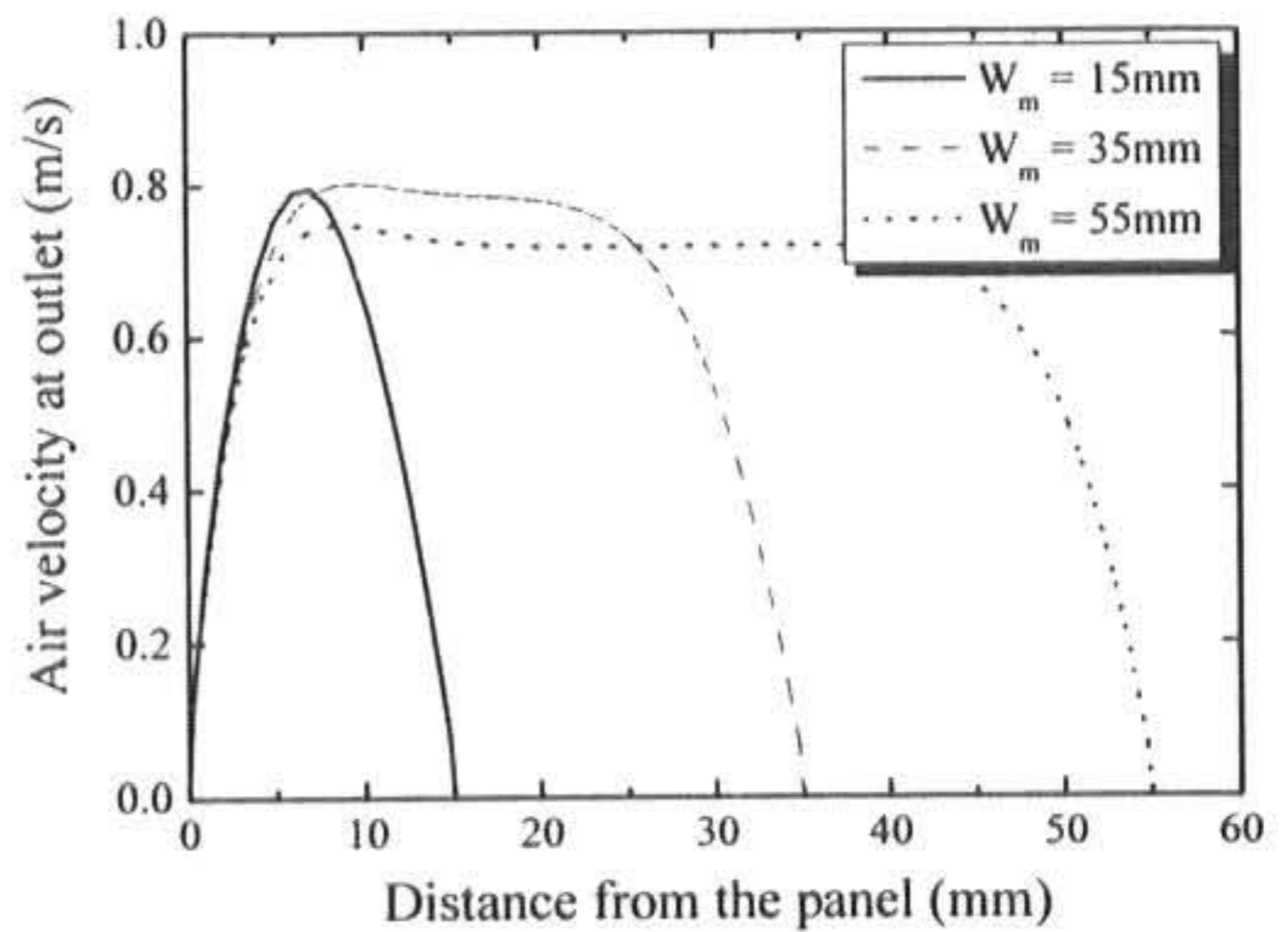


Fig. 7 Air velocity profiles at the channel outlets with different gaps between panel and module board ( $W_m=10mm$ )

것으로 사료된다. 오히려 공기가 패널과 기판 사이를 원활히 통과하면서 대류냉각효과를 충분히 발휘할 수 있도록 열유로를 적절히 설계하는 것이 바람직할 것이다. 즉, 모듈의 크기, 발열량 그리고 상대적인 위치 등을 고려하여 전자기판에 모듈의 배열을 중요시하여야 할 것이다.

4.3 다중 모듈의 영향

Fig. 8은 패널과 모듈이 마주보고, 기판에 모듈이 수직으로 배치된 경우에 열유속의 변화에 따른 최고온도를 나타낸 그림이다. 그리고 Fig. 9는 유입공기의 평균유속을 나타낸 것이다. 이 때 모듈들은 채널 높이의 1/3과 2/3에 동일하게 각각 설치된 것으로 고려하였다. Fig. 4의 모듈이 하나일 때와 Fig. 8의 두 개일 때를 비교하면, 패널의 온도는 모듈이 두 개일 경우 모든 열유속 조건에서 7°C 정도 낮게 나타난다. 하지만 모듈측 최고온도는 아래쪽의 경

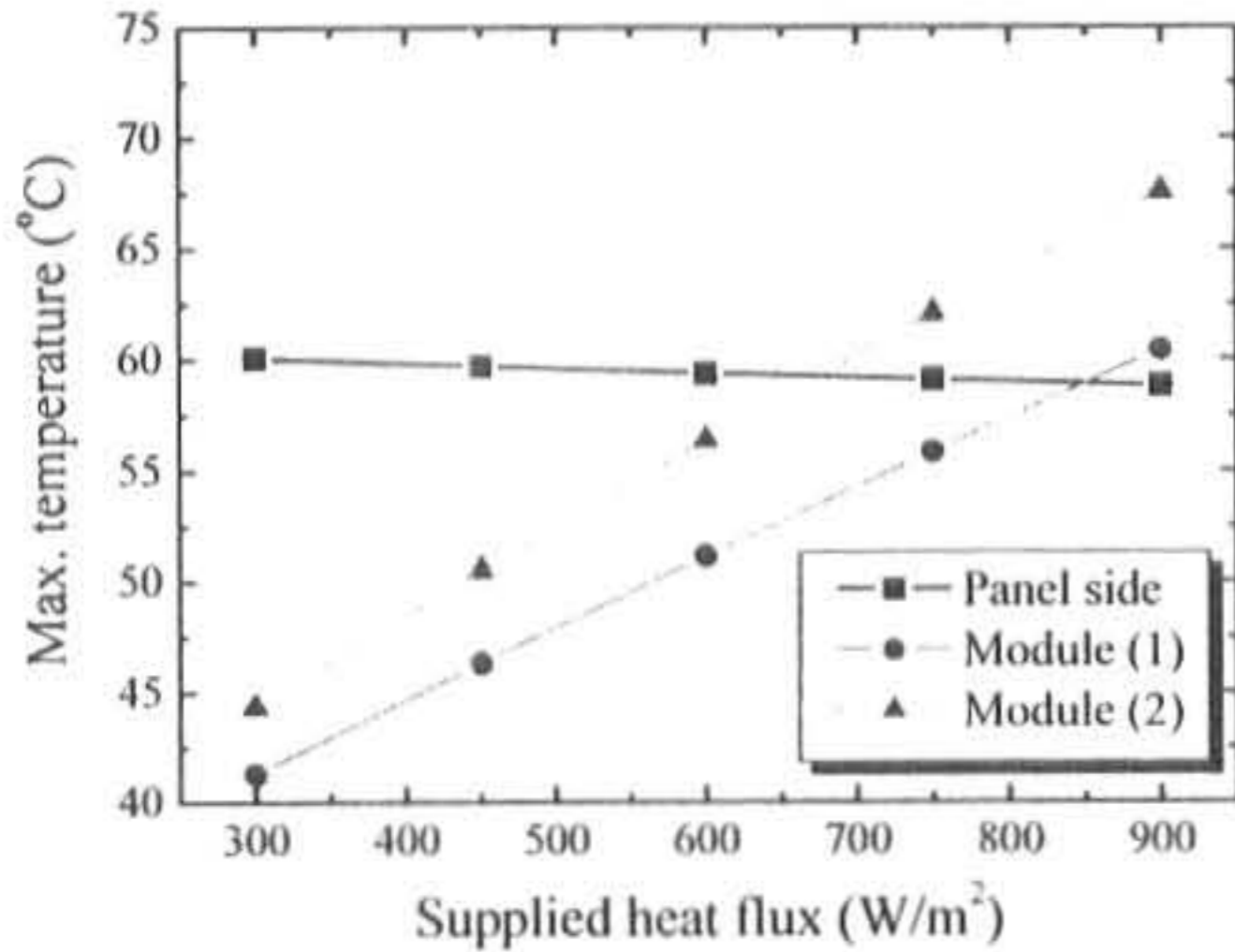


Fig. 8 Maximum temperatures at varying heat flux ( $W_n = 25\text{mm}$ ,  $W_m = 10\text{mm}$ )

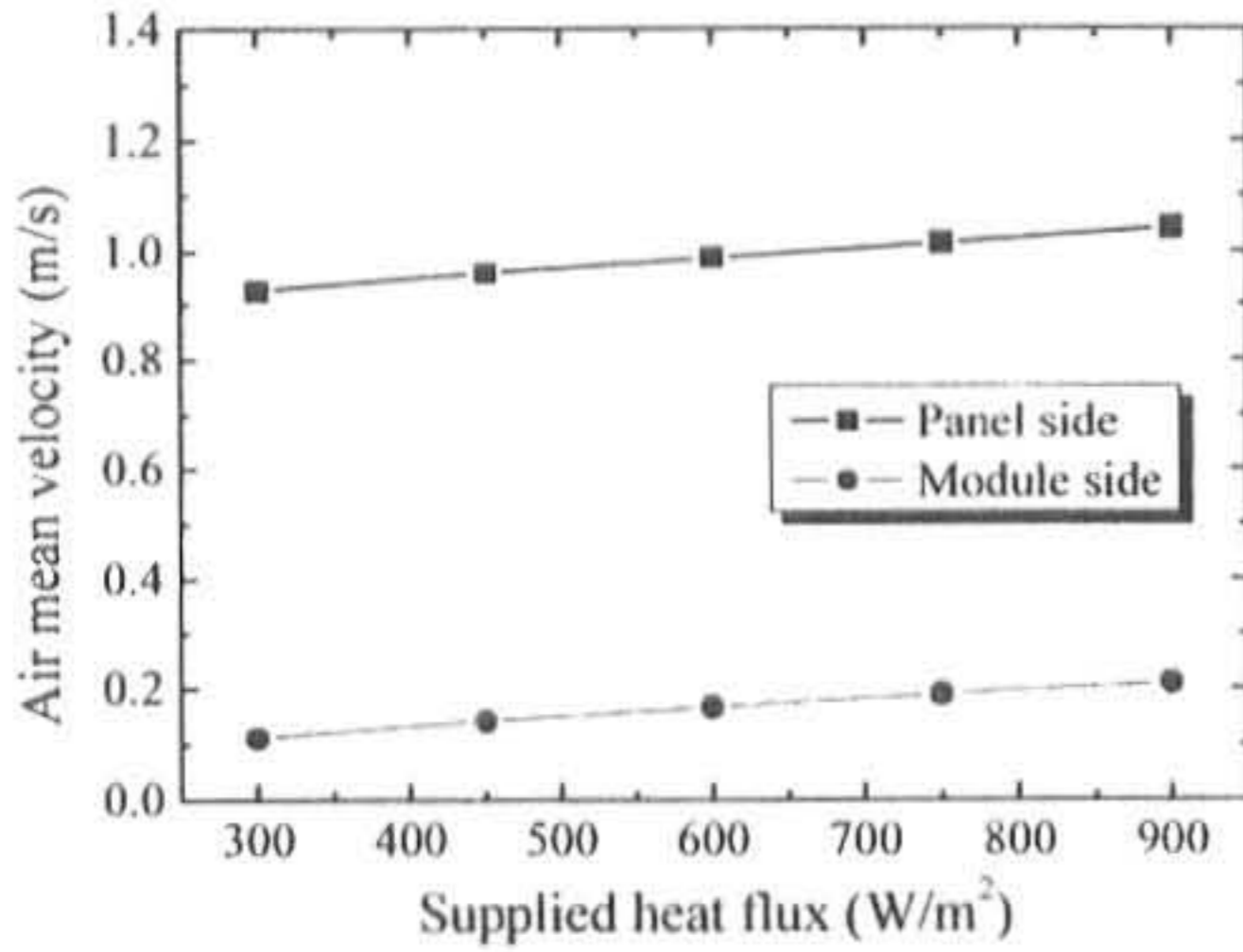


Fig. 9 Air velocities at channel inlets vs. heat flux ( $W_n = 25\text{mm}$ ,  $W_m = 10\text{mm}$ )

우는 낮고, 위쪽에 경우는 높다. 아래쪽에 위치한 모듈의 최고온도는 단일로 중간에 위치한 경우에 비하여 공급열량에 따라 2~4°C 정도 낮지만, 윗쪽에 위치한 모듈의 최고온도는 중간에 비하여 1~2°C 높게 나타났다.

모듈이 중간에 하나일 때에 비하여 모듈이 2개 상하로 장착되었을 경우 패널의 최고온도가 낮아진 이유는 전술한 연돌 효과가 커지기 때문으로 생각된다. 즉, 모듈들의 총방열량이 커지면서 모듈 주변의 공기가 데워져서 상승하고 맞은편 패널 주변의 공기도 쉽게 상승할 것이다. 그러므로 모듈의 방열량이 커지면 공기 유속은 높아지고 패널의 온도는 낮아지는 것이다. 하지만 상부에 있는 모듈은 아래쪽의 위치한 모듈의 방열 영향을 받아 단일 모듈일 경우보다 최고온도가 높아진 것으로 보인다.

Fig. 10의 속도벡터와 Fig. 11의 온도분포를

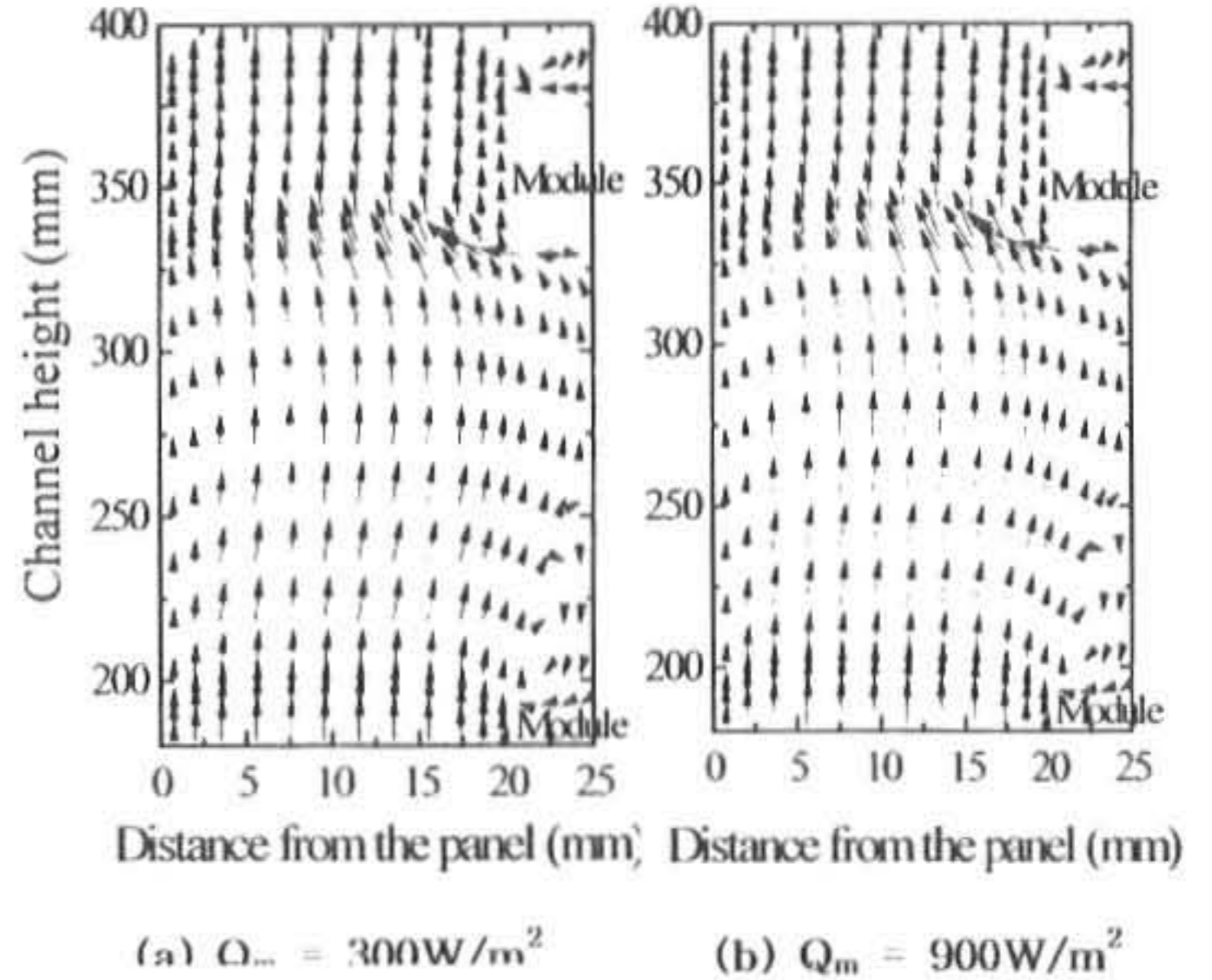


Fig. 10 Vector plots at different heat flux of module ( $W_n = 25\text{mm}$ ,  $W_m = 10\text{mm}$ )

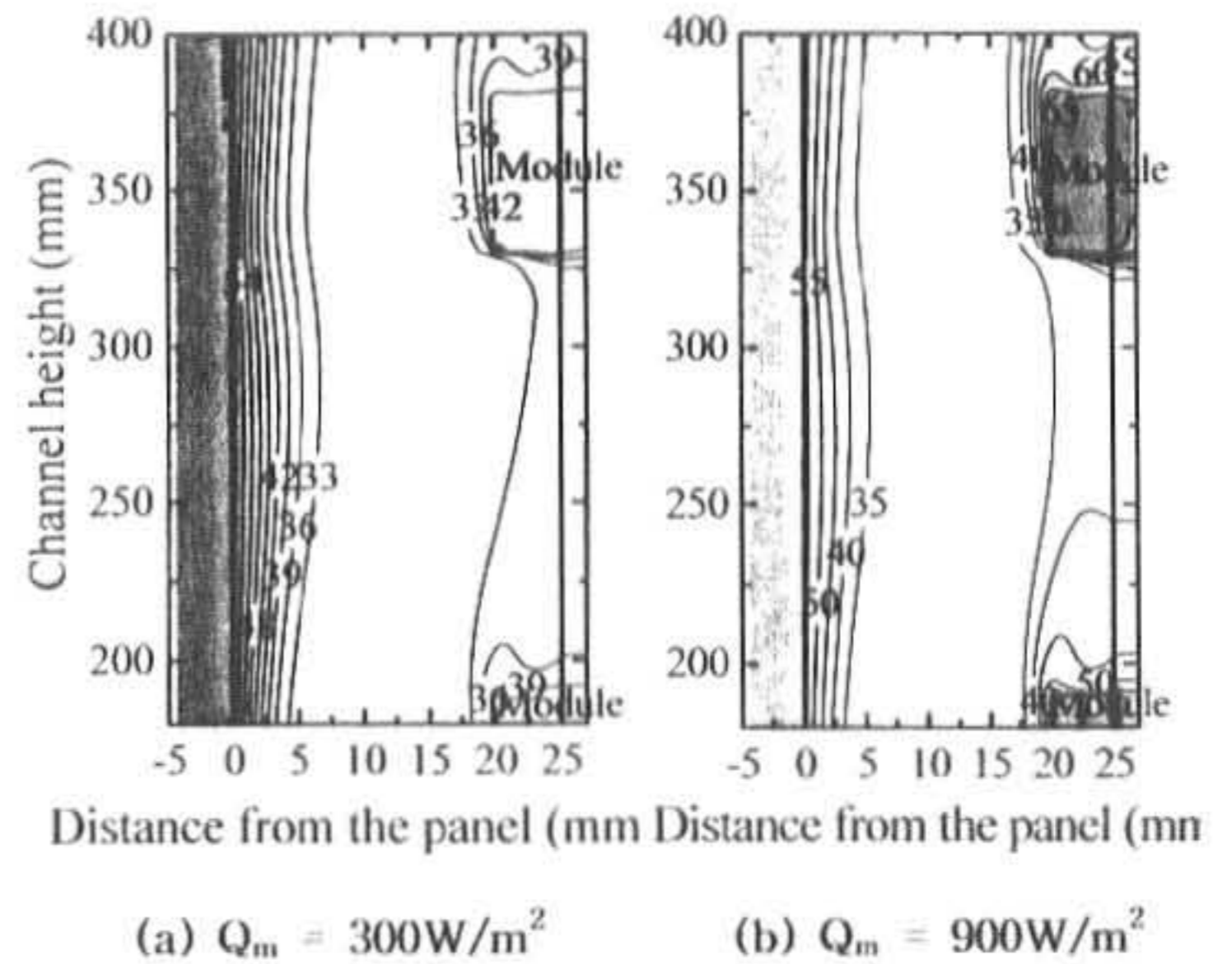


Fig. 11 Isotherms at different heat flux of module ( $W_n = 25\text{mm}$ ,  $W_m = 10\text{mm}$ )

보면, 모듈의 공급 열유속에 따른 유통패턴의 변화는 거의 없고 단지 속도크기가 커짐을 알 수 있다. 하지만 모듈 전면의 기관과 접한 부위에서 정체현상이 보이고, 특히 모듈 뒷부분에서는 재순환 영역이 발생되고, 이러한 재순환 영역의 존재는 모듈의 냉각에 악영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서 모듈 뒤편에 열후류가 발생하고, 모듈의 열유속이 커지면 열후류의 두께도 두터워지고 있다. 모듈의 거리가 가까울수록 열후류의 영향은 더욱 커질 것이고, 전자회로의 신뢰성 저하에 주요한 원인이 될 것이다.

그러므로 방열량이 큰 모듈은 가능한 다른 모듈의 방열에 의한 영향이 최소화될 수 있도록 배열하여야 할 것이다. 그리고 기관과 모듈

사이에 공기가 통과할 수 있는 간격을 두고 설치하는 것도 모듈 뒤편의 재순환영역을 발생시키지 않아 방열에 도움을 줄 것으로 기대된다.

## 5. 결론

플라즈마 영상장치는 최근 각광받고 있는 박막형 표시장치이나, 그 크기가 대형화되면서 전자회로 집합체를 효율적으로 냉각시키는 문제가 대두되었다. 그러므로 플라즈마 영상패널 및 모듈을 모사할 수 있는 실험장치와 이의 자연대류 냉각특성을 파악할 수 있는 수치해석모델을 개발하고, 주요 인자들이 패널 및 모듈의 최고온도에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

영상패널의 후면과 마주하게 전자회로기판을 설치하는 것이 자연대류 냉각에 유리하다. 연돌 효과의 증대로 패널 및 모듈의 온도도 다른 배열에 비하여 낮다. 하지만 종횡비가 0.1이하인 경우 채널의 간격에 따른 온도변화는 크지 않으므로, 간격보다는 열유로의 설계가 중요하다.

수직기판에 여러개의 모듈이 장착되는 경우, 열후류의 영향으로 모듈이 위쪽에 위치할수록 온도는 높아진다. 그러므로 모듈의 크기, 방열량 그리고 이들의 배열 등에 관한 3차원모델의 개발 및 연구가 필요하다.

## 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) Churchill, S. W. and Chu, H. H. S., "Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate," Int. J. of Heat Mass Transfer, Vol. 18, pp. 1323-1329, (1975)
- 3) Aydin, O. and Guessous, L., "Fundamental correlations for laminar and turbulent free convection from a uniformly heated vertical plate," Int. J. of Heat Mass Transfer, Vol. 44, pp. 4605-4611, (2001)
- 4) 양성환, 권순석, "수직 평형평판에서의 혼합대류 열전달," 대한기계학회 논문집 (B), 제13권, 제2호, pp. 299-306, (1989)
- 5) 이재신, 양성환, 권순석, "등온 수직 평판에 서의 혼합대류 열전달," 대한기계학회 논문집 (B), 제14권, 제6호, pp. 1645-1651, (1990)
- 6) 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)
- 7) Bessaih, R. and Kadja, M., "Turbulent natural convection cooling of electronic components mounted on a vertical channel," Applied Thermal Engineering, Vol. 20, pp. 141-154, (2000)
- 8) 김의광, 백병준, 박복춘, 조병수, "돌출된 열원이 부착된 수직 채널내 복합 열전달," 대한기계학회 논문집 (B), 제20권, 제2호, pp. 741-751, (1996)
- 9) Patankar, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing Co., (1980)
- 10) Launder, B. E. and Spalding, D. B., "The numerical computation of turbulent flow," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, pp. 269-289, (1994)
- 11) Frans. S., Lakshiminarayana, B. and Barnett, M., "A low-Reynolds number  $\kappa$ - $\epsilon$  model for unsteady turbulent boundary layer flows", AIAA J., Vol. 31, No. 10, pp. 1777-1784, (1993)
- 12) Kang, B. H. and Jaluria, Y., "Mixed convection transport from an isolated heat source module on a horizontal plate," J. Heat Transfer, Vol. 112, pp. 653-661, (1990)
- 13) Miyatake, O. and Fujii, T., "Free convection heat transfer between vertical plates-one plate isothermally heated and the other plate insulated," Heat transfer-Japanese Research, Vol. 2, No. 4, pp. 30-38, (1973)
- 14) Fedorov, A. G. and Viskanta, R., "Turbulent natural convection heat transfer in an asymmetrically heated, vertical parallel-plate channel," Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 40, No. 16, pp. 3849-3860, (1997)

(2003년 9월8일 접수, 2004년 2월20일 채택)