

# 전자부품의 냉각을 위한 자연대류 상관 관계식의 평가

李 在 憲 譯  
漢陽大學校 機械工學科 教授

□ 이 글은 여러가지 전자기기 프레임 내의 열적 분위기에 관심을 가지는 독자를 위하여 마련되었으며 “전자기기에서의 대량열방출의 처리”(대한기계학회지 제26권 제4호, pp.317~324, 1986)에 이어 두번째의 자료이다. 원문의 출처는 “Evaluation of Correlations for Natural Convection Cooling of Electronic Equipment” Charles E. Johnson, AT&T Bell Laboratories, Whippany, New Jersey, Heat Transfer Engineering, Vol. 7, Nos. 1-2, pp.36~45, (1986)이다. 참고적으로 '87년 12월 12~18일에 개최된 ASME Winter Meeting 에서는 “전자장비의 냉각”에 관하여 참석한 열유체관계 연구자들 거의 모두가 대단히 큰 관심을 보이고 있었다.

〈譯者註〉

## 개 요

복잡한 전자부품의 조립시에 필요한 열적디자인에 관한 정보는 오래전부터 실험을 통하여 얻어지고 있다. 실험적 데이터를 이용하여 무차원 파라미터로 표시된 실험결과는 꼭 같지는 않지만 현상적으로는 비슷한 상황에 응용될 수 있다. 여기서는 학술문헌에 나타나 있는 자연대류에 관한 실험적인 상관 관계식들과 프레임에 수직으로 꽂혀있는 균일가열 전자회로기판의 모델에서 얻어진 무차원 자료들을 비교하고자 한다. 대부분의 자료들은 수평채널 Rayleigh 수( $Ra''$ )가 15~100 범위에 속하며, 이러한 범위는 부품이 조밀하게 배치된 기판이 서로 좁은 채널을 이루고 있으며, 동시에 상당한 전력을 소비하고 있는 경우에 해당한다.

Wirtz와 Stutzman<sup>(4)</sup>, Bar-Cohen과 Rohsenow<sup>(5)</sup>의 일반상관관계식은 AT&T Bell 연구소에서 개발된 전자기기를 이용하여 수집한 실험 데이터를 잘 표현하고 있으며  $10 < Ra'' < 1,000$  범위에서 추천될 수 있다. 두개의 유사한 상관관계식과 비교할 때 상당히 좋은 예측을 보였으

며 또한 Sparrow와 Gregg<sup>(6)</sup>의 연구결과와도 잘 일치하므로  $Ra'' < 10$ 인 경우에 Aung<sup>(2)</sup>의 완전 발달 층류의 채널유동방정식,  $Ra'' > 1,000$ 인 경우에는 Aung 등<sup>(3)</sup>의 단일 수직평판 근사식이 추천될 수 있다.

Coyne<sup>(13)</sup>의 알고리즘에 의한 계산치는  $10 < Ra'' < 1,000$  범위에 관하여 기기 프레임에서 대칭적으로 가열되는 구역의 실험 데이터와 상당히 잘 일치하며,  $1,000 < Ra'' < 10,000$  범위내에서는 꽤 좋은 정확도를 보였다. 원초적으로는 이상적인 유동채널에서 얻어진 것이지만 자연대류에 의하여 냉각되는 전자기판들의 수직배열에서 최대평균 온도 상승치를 예측하고자 하는 전자기기설계자나 분석자들은 이들의 상관 관계식을 안심하고 사용할 수 있을 것이다.

본 글에서 사용되는 기호들의 설명은 다음과 같다.

- $b$  : [(기판간격) - (기판두께)] 혹은 [(기판간격) - (기판부품의 평균높이)],  
m
- $g$  : 중력상수,  $m/s^2$
- $k$  : 열전도율,  $W/(mK)$
- $L$  : 평행기판이 형성하는 연속유동채널의 높이

- 이, m
- Nu : Nusselt 수,  $\dot{q}b/(T_w - T_o)$
- $\dot{q}$  : 열 유속,  $W/m^2$
- $Ra''$  : 수정 채널 Rayleigh 수,  $\dot{q}\beta gb^5/(Lv\alpha k)$
- $T_o$  : 외기온도, °C
- $T_w$  : 유동채널 벽면에서의 최대온도, °C
- $\alpha$  : 열 확산율,  $m^2/s$
- $\beta$  : 체적팽창계수,  $K^{-1}$
- $\mu$  : 점성계수,  $kg/(m \cdot s)$
- $\nu$  : 동점성계수,  $m^2/s$
- $\rho$  : 유체의 밀도,  $kg/m^3$
- $\sigma$  : 실험표준편차, °C

### 1. 머리말

전자기기의 작동온도를 제작자가 지정한 최대치보다 낮게 유지시킨다면 집적회로 및 여타 구성요소의 수명을 연장시킬 수 있다. 그 예로서, 어떤 요소의 작동온도를 최대정격온도치보다 낮출 때 대 10°C(18°F)의 온도 강하에 따라 장기적 신뢰성을 50%까지도 증가시킬 수 있다<sup>(1)</sup>.

프레임이나 캐비넷속에 수직으로 놓여진 전자부품기판을 냉각시키는 가장 간단한 방법은 자연발생된 부력에 의한 공기 순환이다. 이 부력은 가열된 유동 통로의 상단과 하단 사이의 국부적인 공기 밀도 변화에서 기인된다. 간혹 논의되지만 장과장 복사가 전자 장비의 냉각에 관하여서 자연대류의 중요한 동반자기도 하다. 이때 뜨거운 부품과 미지근한 부품 혹은 회로기판 사이의 복사분산은 유동 통로를 균일 가열조건으로 만들어 준다. 이러한 근거에서 현명한 엔지니어라면 아주 뜨겁게 된 부품에서 상대적으로 식어있는 벽이나 천정으로 복사에 의한 열전달이 잘 일어나도록 부품 배치를 할 것이다. 자연대류 냉각을 항상 우선적으로 생각하는 이유는 비용 및 유지비가 적게 들고 電磁氣적(electromagnetic) 간섭이 거의 없기 때문이다.

전자회로기판의 배열에서 발생된 열을 제거시킬 때 자연대류만으로 부족한 경우에는 좀더 인위적인 방법을 찾아야 한다. 그러나 믿을 만한

상관 관계식이 없이 특별히 디자인된 장비를 시험하기에는 너무 비싸게 든다. 따라서 열적 성능을 정확하게 추정할 수 있는 믿을 만한 상관 관계식이 있다면 개발 스케줄에서 시간 소모가 많이드는 열적 시험을 간단하게 수행할 수 있을 것이다. 본 자료에서는 여타 과학 학술 논문에 보고된 여러가지 상관 관계식과 균일하게 가열되는 프레임에 수직으로 세워진 PWB(Printed Wiring Board)기판 모델에서 수집된 실험자료들을 비교하고자 한다.

Aung 등<sup>(2,3)</sup>이 제안한 아태 두개의 상호관계식을 검토해 보자.

$$Nu = 0.144(Ra'')^{0.5} \quad (1)$$

$$Nu = 0.524(Ra'')^{0.2} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)는 각각 완전발달층류 채널유동 및 단일수직관에 제한된 것이다. 여기서 수정채널 Rayleigh 수,  $Ra''$ 는 등열속 회로기판에서 다음과 같이 정의된다.

$$Ra'' = \frac{\dot{q}\beta gb^5}{Lv\alpha k} \quad (3)$$

이에 따른 Nusselt 수는 다음과 같이 정의된다.

$$Nu = \frac{\dot{q}b}{k(T_w - T_o)} \quad (4)$$

전자부품에서 전기배선을 위하여 금속을 사용하기 때문에 부품이 조밀하게 배치되어 있는 회로기판의 경계조건으로는 균일가열(uniform heating)이 상당히 타당하다. 이어서 논하는 모든 연구에서, 균열가열은 유동채널의 전체 내부에서 이루어 졌으며 최대 벽온도( $T_w$ )는 유동채널을 형성하는 회로기판의 가장 위쪽에서 관찰되었다.  $T_o$ 는 실험장치로 유입되는 외기의 온도이다.

아울러 Wirtz와 Stutzman<sup>(4)</sup>의 상관 관계식,

$$Nu = \frac{0.144(Ra'')^{0.5}}{[1 + 0.0156(Ra'')^{0.9}]^{0.33}} \quad (5)$$

Bar-Cohen과 Rohsenow<sup>(5)</sup>의 상관 관계식,

$$Nu = \left[ \frac{48}{Ra''} + \frac{2.5}{(Ra'')^{0.4}} \right]^{-0.5} \quad (6)$$

그리고, Birnbrier<sup>(6)</sup>의 상관 관계식

$$Nu = 0.20(Ra'')^{0.31} \quad (7)$$

들이 평가될 것이다. 식 (1), (2), (5), (6) 및 (7)

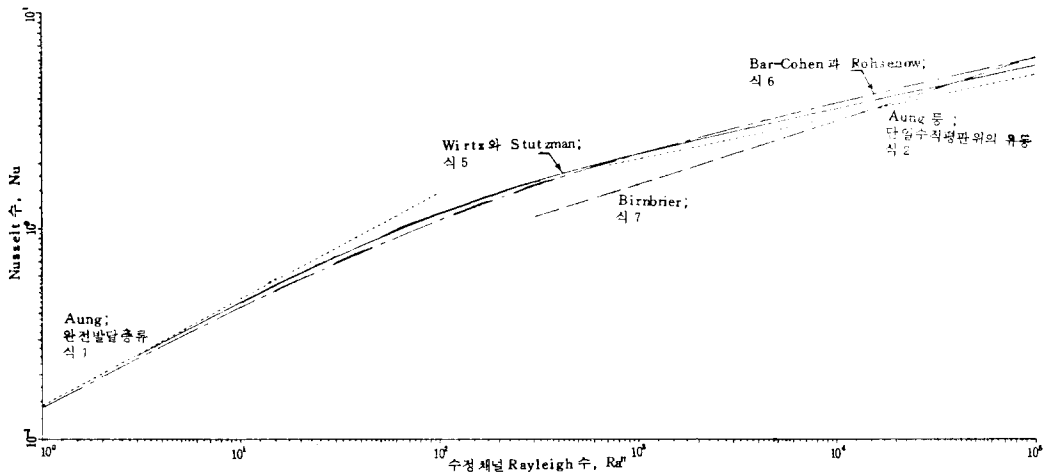


그림 1 식 (1), (2), (5), (6) 및 (7)이 응용되는 주요영역

이 응용되는 주영역을 그림 1에 보여준다.

## 2. 실험장치

근본적으로 Wirtz와 Stutzman<sup>(4)</sup>, Bar-Cohen과 Rohsenow<sup>(5)</sup> 및 Birnbrier<sup>(6)</sup>이 인용한 실험 자료는 선반에 정착된 에폭시-화이버그라스제의 기판으로부터 얻어진 것이다. 여기서는 “Variac”이라는 전압조정기에 의하여 조정되는 분산저항체나 띠모양의 저항체를 회로기판 위에 고르게 분포 시켜서 균일가열조건으로 만들 수 있었다. 그리고 앞면과 옆면의 판넬은 2차원 유동을 보장할 수 있도록 만들어졌다.

Birnbrier의 실험에서는 전자부품의 간헐적 분포에 의한 난류생성 효과를 묘사하기 위하여 0.3 × 0.3 × 1.9 in. (0.76 × 0.76 × 4.83 cm)의 크기를 가진 유동 장애물을 기판 위에 부착 시켰다. Birnbrier<sup>(6)</sup>는 등열유속 조건의 타당성을 검토하고자, 적외선 영상법에 의한 실험과 계산을 모두 수행하였다. 여기서 그는 가열된 저항체의 표면온도가 회로판의 평균 온도보다 몇도(K)정도 밖에 높지 않다는 것을 보여 주었다. 그림 2에서 설명하고 있는 실험자료는 AT&T Bell 실험실에서 몇가지 전자 통신 시스템을 개발하는

동안 얻어진 것이며 각 자료는 저작권 관계로 주요 참가 연구원들의 “성씨”만으로 구별된다.

전자시스템 모델의 설정은 균일 가열, 미끄러운 평판등의 가정을 포함하는 모델에서부터 있는 그대로의 기판을 묘사하는 모델까지 발전하였다. 뒤에 그 예가 보이겠지만, 유동저항과 국부적 난류는 회로판에 부품모델을 부착시켜서 얻을 수 있었다. 이러한 기판은 회로판 위에 균일하게 분포되어 있는 소형 저항체에 의해 가열된다. 또한 회로판에 금속도체를 부착시켜 저항열의 균일한 분포와 기판양면에서의 동등한 열량발산을 유도하였다.

가장 정밀한 실험장치에서는 전반적인 조건을 묘사하기 위하여 전기적 조건을 실물 기판에서와 동일하게 설정 하였으며 공기침투를 극소화하기 위해서 유동채널의 앞면과 뒷면은 평판으로 막았다. 이렇게 하여 기판이 수직으로 장착된 여러 개의 선반으로 형성된 유동채널의 아랫쪽에서 윗쪽으로 공기가 유동될 수 있었다.

여러가지 실험장치로 부터 수집된 자료들은 기구오차를 교정한후 무차원화하여 그림 2에 나타내었다. 계산에 사용된 공기의 물리적 상태량은 혼합공기온도, 실험 장치의 입구, 혹은 출구에서의 공기온도를 기준하여 선택되었다.

### 3. AT&T Bell 연구소의 실험자료

그림 2에는 네가지 그룹의 무차원화 된 데이터가 18~4,800 범위의 Ra"값에 걸쳐서 그려져 있다. 표 1에는 Ra"의 범위, 측정점의 수효 그리고 주요 연구자들이 요약되어 있다. 깨끗하게 보이도록 하기 위해서 그림 2에는 이번 해석에서 사용된 데이터점(data point)의 일부만을 나타내었다. 하지만 모든 데이터값들을 가지고 정확하게 그리더라도 그림 2와 마찬가지로일 것이다. 실험의 측정점은 모두 57개이지만 550~1,050의 Ra"값 범위에서는 네개의 측정점 뿐이며 3,000~4,800의 범위에서는 단지 두개의 측정점 뿐이다. 대부분의 데이터점은 Ra"가 15~100인 범위에 모여있는데 이 영역은 좁고 조밀하게 배치된 대량전력소비회로기관의 상태에 해당된다. 그림 2에 나타낸 Ra"의 범위에 대한 데이터들은 너무 산재해 있어서 어떠한 상관 관계식의 정확도에 관하여 통계적 기반을 둔 결론을 내리기가 어렵다. 하지만 적절한 추리나 추측을 하는 것은 가능하다. 확실한 것은 조밀하게 분포된 15~100사이의 Ra"범위내에서 실질적인 결론을 내

릴 수 있다는 것이다.

표 1 실험자료의 요약

Ra"범위	자료의 수효	주 연구자
18~35	26	Johnson과 Duffy
25~85	15	Starkey
550~1,050	4	Saxena
3,000~4,800	2	Smith

#### 실험데이터의 수학적 근사

실험데이터로 부터 아주 정확한 최소자승 회귀곡선(least square regression curve)이 얻어졌다. 그림 2에서 회귀곡선의 위와 아래의 점선은 실험 데이터에 대한 표준오차를 나타낸다. 이것은 통계적인 표준오차와 유사하며 근본적으로 같은 표현식으로 정의된다<sup>(7)</sup>. 표준오차밴드(2σ)는 실험 데이터의 95%가 이 밴드안에 무작위로 분포됨을 뜻한다. 그림을 그리기 위하여 선택된 데이터는 주의깊게 선별되었다. 예를들면 측정치들은 기구교정오차로써 수정되었고 센서는 그들의 도선을 통한 전도손실이 최소가 되도록 설치되었다. 따라서 2개의 표준오차범위는 디자인에서 발생할 수 있는 정상편차(normal varia-

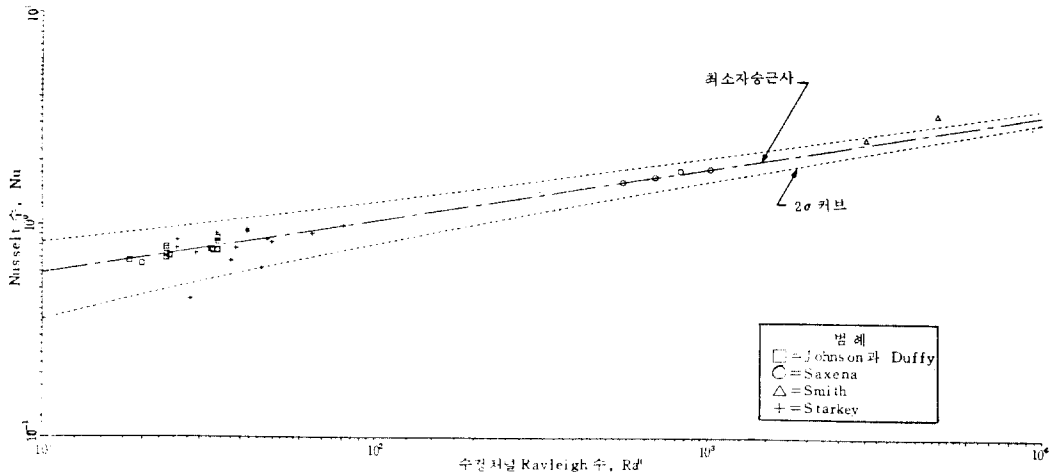


그림 2 AT&T Bell의 기기모델로부터의 실험자료 최소자승근사; 점선은 2× 표준편차(2σ)를 나타내고 이 밴드내에 자료의 95%가 분포된다.

tion)로 생각할 수 있다. 그러므로 어떤 상관 관계식을 만들 때 데이터가 표준오차밴드내에 있게 되면 이 상관 관계식은 실험데이터를 잘 나타내었다고 할 수 있다.

#### 4. 자연대류 상관 관계식들의 평가

##### 4.1 Aung 등의 관계식

그림 3은 두가지 제한된 경우인  $Ra''$ 가 낮은 경우의 완전발달 층류의 채널유동 [식 (1)]과  $Ra''$ 가 비교적 높은 경우의 단일 수직평판 부근의 유동 [식 (2)]에서의 상관 관계를 보여주고 있다. Aung 등<sup>(2,3)</sup>에 의한 식 (1)과 식 (2)는 모사(simulated)회로판을 통한 실험적 연구에 의해 도출되었다. 단일 수직평판 근사에 의한 식 (2)는 일찌기 Sparrow와 Gregg<sup>(6)</sup>에 의해 보고된 것과 잘 일치한다. 단일 수직평판 주위의 유동으로 근사되는 유동은 채널의 폭이 넓거나 또는 그 길이가 상대적으로 짧을 때 가능하다. 둘중 어떤 배열이든 서로 이웃한 회로판에서의 경계층은 채널높이 전체에 걸쳐서 독립적이다. 반대로 완전발달 층류의 채널유동을 폭이 좁거나 또는 긴 유로에서 서로 이웃한 회로

판의 경계층들이 합쳐질 때 발생된다. 이들 현상은 알려진지 얼마되지 않았는데 Eckert와 Drake<sup>(10)</sup>에 의해 보고된 바와 마찬가지로 Carlson<sup>(9)</sup>은 1956년대에 채널유동을 Mach-Zehnder 간섭계로써 연구할 때 이들 두가지 제한된 경우를 관찰한 바 있다.

우리는 식 (1)(완전발달 층류의 채널유동)을 낮은  $Ra''$ 의 영역에서 열전달량을 계산할 때 채택 하였는데 이는 실험데이터들과 잘 일치하기 때문이다. 균일 가열된 회로기판에 대하여 식 (1)은  $0 < Ra'' < 50$ 의 범위에 대해 확실하게 사용되어질 수 있다. Aung<sup>(11)</sup>의 지금까지 보고에 의하면 식 (2)(단일 수직평판 주위의 유동)는  $Ra'' > 700$ 의 범위에 대해 우선적으로 선택되는데 그 이유는 Sparrow와 Gregg<sup>(6)</sup>의 결과와 잘 일치하고 더우기 그림 3에서 Smith의 높은  $Ra''$  위치에 있는 두개의 데이터점들을 잘 표시해 주기 때문이다. 비록 Saxena의 몇 개의 데이터점들이 식 (2)보다 다소 아래에 있지만 Aung이 추천한 적용영역에 도전해 보기 전에는 더 많은 데이터에 대해서 많은 검토가 필요하다고 생각된다. 식 (1)과 식 (2)는 이 논문의 나머지 부분을 통털어 비교를 위한 표준으로 사용될 것이다.

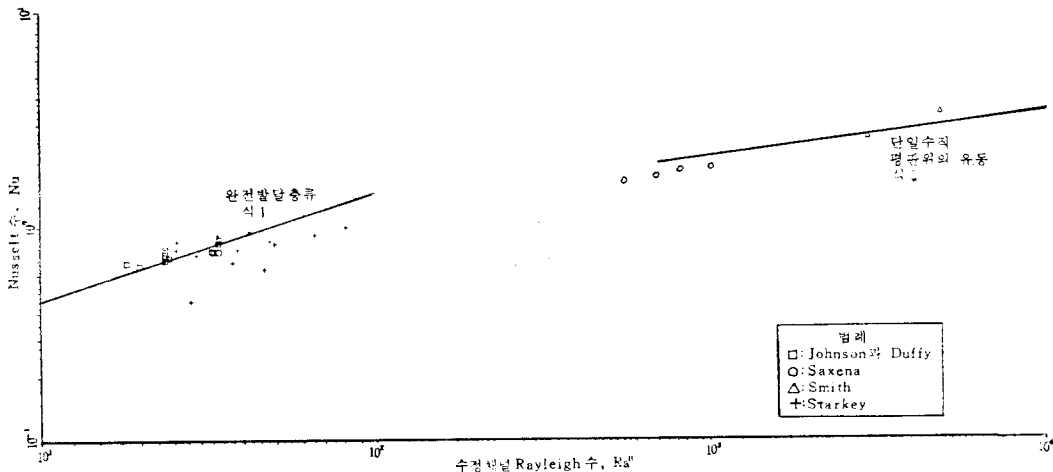


그림 3 완전발달 층류의 채널유동에서 Aung<sup>(2)</sup>의 결과와 단일수직 평판에서의 Aung<sup>(3)</sup>의 결과가 각각 두 가지 한정된 경우인 낮은  $Ra''$ 수에서와 높은  $Ra''$ 수 범위에 실험치와 잘 일치한다. 식 (1)과 식 (2)가 각각  $0 < Ra'' < 50$ 과  $Ra'' > 700$ 인 범위에서는 설계해석에 추천된다.

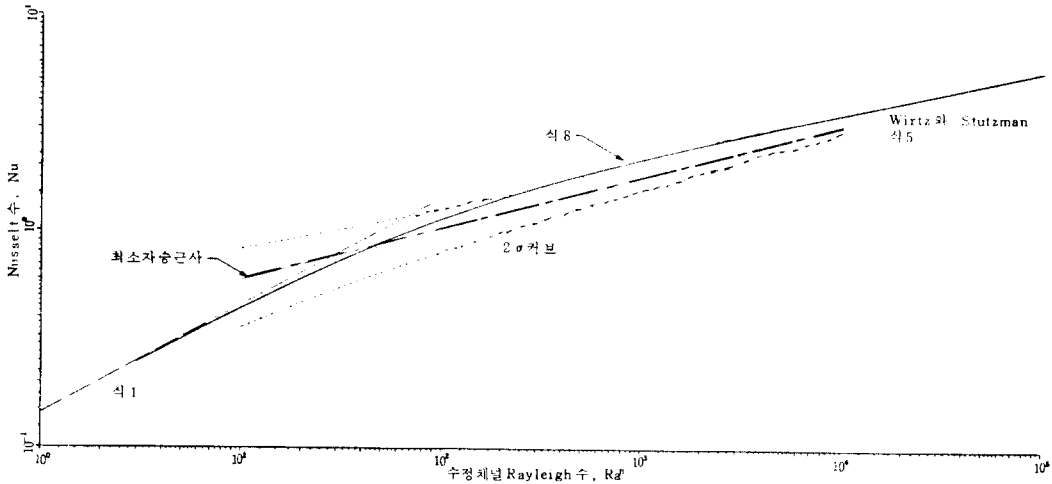


그림 4 Wirtz와 Stutzman<sup>(4)</sup>은 그들의 상관 관계식을  $3 < Ra'' < 1,000,000$ 의 범위에서 추천한다. 이 상관 관계식은 온도와 간섭계 자료에 의하여 개발되었지만 Aung<sup>(3)</sup>의 단일 평판근사인 식 (2)와 거의 유사하다. 최소자승근사 및 2σ 밴드가 실험자료 존재범위에서만 그려져 있다.

#### 4.2 Wirtz와 Stutzman의 상관 관계식

Wirtz와 Stutzman<sup>(4)</sup>은 3~10 범위의  $Ra''$ 에 대해서 Churchill과 Usagi<sup>(12)</sup>의 수학적 기법을 이용하여 식 (5)를 개발하였다. 이 기법은 완전 발달 층류의 채널 유동(낮은  $Ra''$ )과 단일 수직 평판 유동(높은  $Ra''$ )의 두 제한된 경우에 점근적으로 접근하는 수학적 함수를 사용하여 중간 영역의 Rayleigh 수들을 정확히 나타내기 위하여 시도되었다. 그림 4에는 Wirtz와 Stutzman의 일반(universal) 상관 관계[식 (5)]와 아주 크고 아주 작은 두가지  $Ra''$ 의 경우에서의 실험 데이터에 의한 최소자승근사(그림 2), 그리고  $\pm 2\sigma$  범위 등을 나타내었다. 그림 4에서 단일 평판근사는 Aung<sup>(3)</sup>에 의한 식 (2)와 약간 다르며 식 (8)로 표시된다.

$$Nu = 0.577 (Ra'')^{0.2} \quad (8)$$

Wirtz와 Stutzman<sup>(4)</sup>은 수직등열유속평판에 대한 그들의 실험 데이터와 Aung<sup>(3)</sup>이 유한차분 방법을 사용하여 얻은 값들과 비교후에 이 식을 개발하였다. 비록 Wirtz와 Stutzman의 데이터가 Aung 등의 예측과 아주 잘 일치하지만 포괄적인 식 (5)를 개발할 때 열전대와 간섭장치를

이용한 실험에 의하여 구하여진 식 (8)을 선호하였다. 그림 4를 고찰하면 Wirtz와 Stutzman의 상관 관계가  $Ra'' = 250$ 에서, 신뢰성을 나타내는  $\pm 2\sigma$  범위의 윗쪽 선과 교차되는 것을 알 수 있을 것이다.  $10 < Ra'' < 100$ 의 경우, 상관 관계식과 실험에 의한 회귀선과의 차이는 평균 18.0%이다.  $Ra''$ 가 100,000보다 큰 경우에(나타내지 않았음) 일반 상관 관계식과 Aung 등<sup>(3)</sup>에 의한 높은  $Ra''$ 로의 점근선과의 차이는 10%이다.

#### 4.3 Bar-Cohen과 Rohsenow의 상관 관계식

Bar-Cohen과 Rohsenow<sup>(5)</sup> 역시 Churchill과 Usagi<sup>(12)</sup>의 수학적 방법을 사용하여 포괄적인 상관 관계식을 개발하였다. Bar-Cohen과 Rohsenow가  $1 < Ra'' < 10$ 에 대해 추천한 식 (6)을 그림 5에 나타내었다. 흥미롭게도 Bar-Cohen과 Rohsenow에 의하여 완전발달 층류유동에 대해 해석적으로 유도된 상관 관계식은 Aung<sup>(2)</sup>에 의해 개발된 식 (1)과 동일하였다[Wirtz와 Stutzman<sup>(4)</sup> 역시 식 (1)을 그들의 완전발달 층류유동에 대한 점근관계로 사용한 것을 상기하기 바람]. 그러나 Bar-Cohen과 Rohsenow는 Aung의 작업과는 독립적으로 상관 관계식을

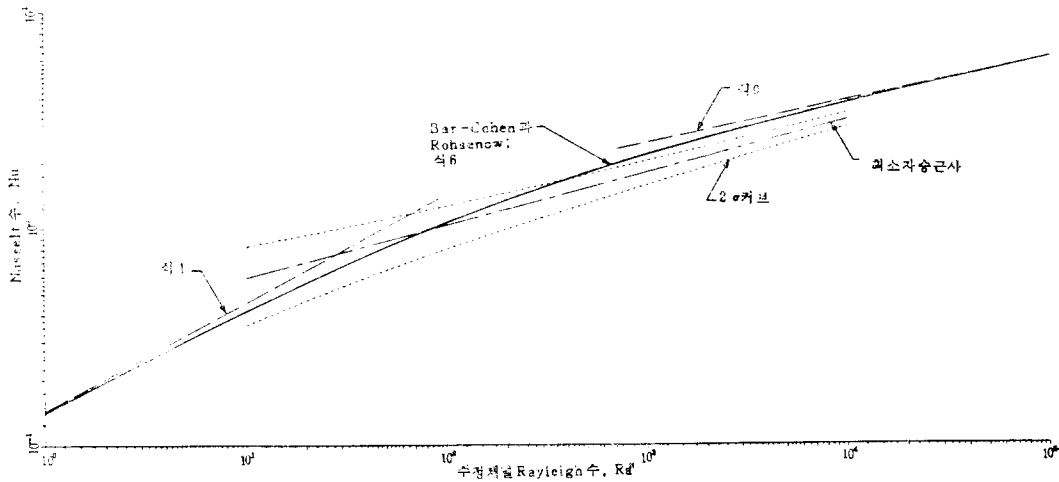


그림 5 Bar-Cohen 과 Rohsenow<sup>(5)</sup>는 그들의 상관 관계식은  $1 < Ra'' < 1,000,000$  범위에서 추천하였다. 이들은 몇몇 연구자들의 실험자료로부터 단일평판한계영역에 관하여 식 (9)를 유도하였다. 최소자승근사와 2σ 밴드가 실험자료 존재 범위에서만 그려져 있다.

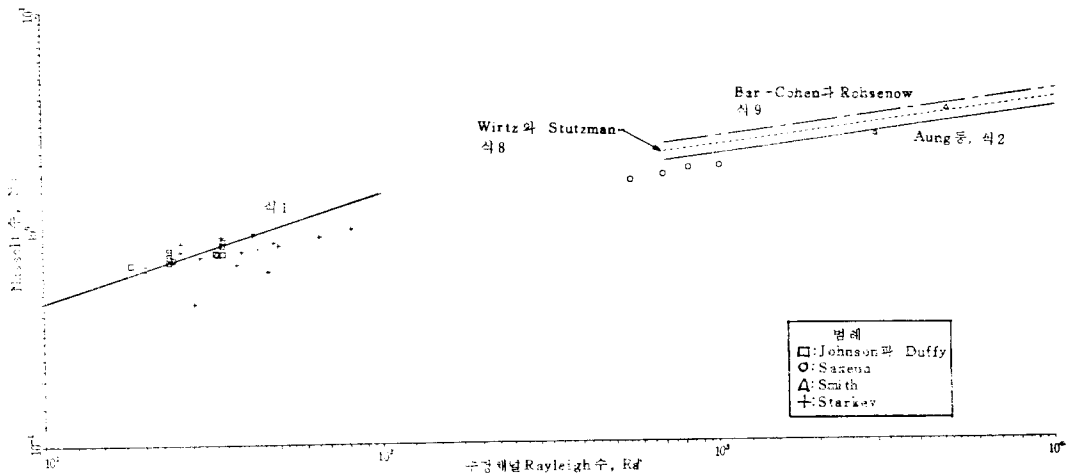


그림 6 단일 수직평판에서의 자연대류 열전달에 관하여 누구의 상관 관계식을 사용하느냐에 따라서 아주 높은  $Ra''$  수 영역에서 생길지도 모르는 Nusselt 수의 변동을 보여준다.

유도하였다. Bar-Cohen 과 Rohsenow<sup>(5)</sup>에 의해 높은  $Ra''$ 의 점근으로 채택된 식 (9)는 식 (2)의 형태와 유사하지만 0.63의 계수를 가진다. Bar-Cohen 과 Rohsenow<sup>(5)</sup>는 몇몇 연구자의 실험으로부터 식 (9)를 유도하였다.

$$Nu = 0.63 (Ra'')^{0.2} \quad (9)$$

그림 6은 단일 수직평판으로 부터의 자연대류 열전달에 대한 세가지 근사식을 보여주고 아울러 사용된 상관 관계식에 따라서는 아주 높은  $Ra''$ 수에서 나타날지도 모를 차이점을 설명해 준다. 아래쪽에서 부터 Aung 등<sup>(3)</sup>, Wirtz와 Stutzman<sup>(4)</sup>, 그리고 Bar-Cohen 과 Rohsenow<sup>(5)</sup>의

각각의 식 (2), 식 (8) 그리고 식 (9)가 지적되어 있다. 그림 5를 다시보면 Bar-Cohen과 Rohsenow의 일반 상관 관계식 [식 (6)]이  $Ra''=400$ 에서 신뢰성을 나타내는  $\pm 2\sigma$  선의 윗부분을 지나는 것을 알 수 있다. 이 상관 관계식과 실험적인 회귀곡선이  $10 < Ra'' < 100$  범위에서 보이는 차이는 평균 21.0%이다. 100,000보다 큰  $Ra''$  (나타내지 않았음) 범위에서 일반관계식과 Aung 등<sup>(3)</sup>이 단일 수직평판에서 나타낸 값과의 차이는 17%이다.

#### 4.4 Birnbrier의 상관 관계식

마지막 포괄적인 상관 관계인 식 (7)은 Birnbrier<sup>(6)</sup>에 의해 고안 되었으며 그림 7에 제시하였다. 이 상관 관계는 그의 실험 자료를 이용한 실험곡선이다. 그는 이것이  $Ra''$ 가 300~1,000,000인 범위에서 사용될 수 있다고 추천하고 있다. 이 곡선은 그림 7에서 보는 바와 같이  $Ra''$ 가 높은 범위에서 Aung 등<sup>(3)</sup>의 식 (2)에 의한 곡선보다 약간 위에 그려지며 이  $Ra''$ 범위는 상당히 넓은 기판간격에 해당된다. Birnbrier<sup>(6)</sup>는 이 차이가 그의 실험장치의 상부선반에 있는 많은 기판면들의 방향이 외부를 바라보고 있음으로

기인되는 복사냉각효과 때문이라고 설명하였다. 그는 이 때문에 기판의 온도상승이 감소되고 아울러 Nusselt 수가 증가 되었다고 주장하였다.

낮은  $Ra''$ 수에서 Birnbrier<sup>(6)</sup>는 그의 상관 관계가 다른 연구자의 결과와 잘 일치하지 않음을 알았다. Birnbrier는 좁은 기판간격인 경우의 이러한 불일치는 기판위의 모사전자부품에 의한 유동 장애 때문이라 하였으며, 이런 것들이 평행회로판에 의해 형성되는 채널에서 높은 압력강하를 유발시키고 공기유량을 감소시키는 난류를 형성한다고 설명하였다. 복합적인 기판 배열에 의하여 생기는 매우 좁은 유동채널에 관하여서는 이러한 생각이 타당하다.

그림 7의 식 (7)은 실험 데이터가 많지 않은 300보다 큰  $Ra''$ 영역을 포괄하고 있다. 유감스럽게도 대부분의 데이터는  $Ra''$ 가 300보다 훨씬 작은 영역의 것이며 따라서 최소자승 회귀곡선 [식 (2)]이 낮은  $Ra''$ 영역에서는 더욱 정확하다. 높은  $Ra''$  값에서 식 (7)은 Aung 등<sup>(3)</sup>의 단일평판 점근선 [식 (2)]과 상당한 차이를 보인다.

이상의 이유와, 100보다 큰  $Ra''$ 에서의 실험 데이터의 빈약성과 그리고  $300 < Ra'' < 1000$ 에서 식 (7)과 우리의 최소자승근사 [식 (2)]와의 불일

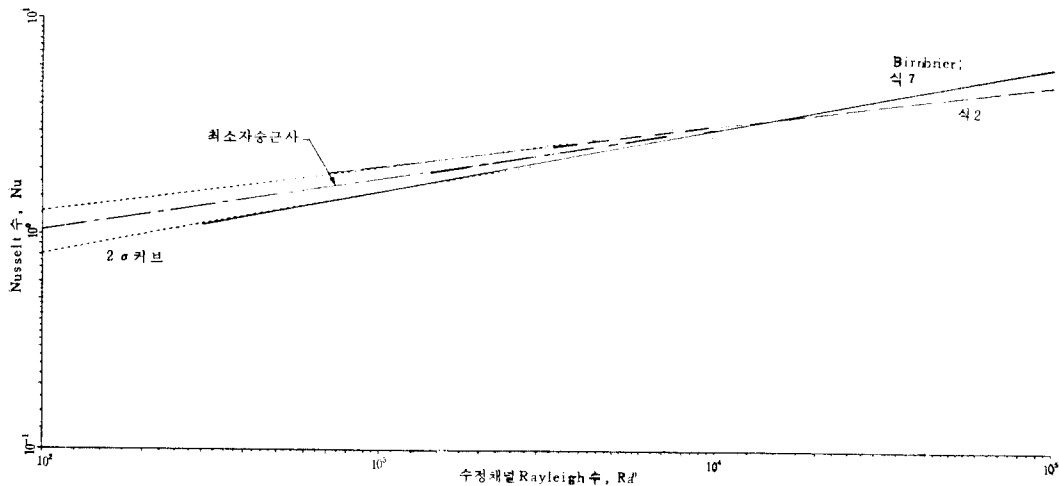


그림 7 Birnbrier<sup>(6)</sup>는 그의 실험적 상관 관계식을  $300 < Ra'' < 1,000,000$  범위에서 추천하였다. 그는 높은  $Ra''$ 수인 수직평판관계에서 Aung 등<sup>(3)</sup>의 결과와 차이 나는 이유를 실험장치의 복사냉각 때문이라 설명하였다. 최소자승근사와 2 $\sigma$  밴드는 실험자료 존재범위에서만 그려져 있다.



치성 때문에 이번에는 이 상관 관계식을 평가하지 않으려고 한다.

### 5. 추천사항

#### 4.5 Coyne의 상관 관계식

Coyne<sup>(13)</sup>은 수직기관의 다중선반으로 구성된 프레임의 열적분석을 수행하였다. 그는 각각의 수직기관에 관하여서, 인접한 기관으로 부터의 열입력과 아래쪽에서 상승하는 열입력을 고려하여 열평형식을 기술하였다. 대칭적으로 가열되는 채널에 대한 Coyne의 알고리즘<sup>(13)</sup>에 의한 수치해석 수행 결과가 그림 8에 나타나 있다. 평균적으로 Coyne의 예측은  $10 < Ra'' < 1,000$  범위에서 실험 데이터의 최소자승법 결과와 10% 이내로 일치한다.

$Ra''$ 가 1,000~10,000 범위에서는, 단일수직평판으로 제한되는 Aung 등<sup>(3)</sup>의 결과와 매우 잘 일치한다. 그림 8에 나타나지 않았지만, Coyne 곡선은 10,000보다 큰  $Ra''$  값에서 단일수직평판에서의 결과와 차이를 보였다. 그러나 Coyne<sup>(13)</sup>가 매우 큰  $Ra''$ 수에서는 그의 수치 알고리즘이 부정확하다고 하였기 때문에 이러한 차이는 예측된 것이다.

확실히 Wirtz와 Stutzman<sup>(4)</sup>의 식 (5)와 Bar-Cohen과 Rohsenow<sup>(5)</sup>의 식 (6)과 같은 일반 상관 관계식은  $Ra'' < 300$  범위에서 (그림 9 참고) AT&T Bell 실험실의 데이터와 잘 일치하였다. 식 (5)와 식 (6)은 전자 장치를 설계할 때 안심하고 사용할 수 있을 것이다. 다행히도,  $Ra'' < 300$ 인 영역은 밀집되고 좁은 채널 그리고 전력소비가 많은 기관이 해당되는 영역을 포함하고 있다.  $300 < Ra'' < 1,000$ 인 영역에서, 두 개의 상관 관계식은 그림 9에 그려진 상위 오차한계를 약간 초과하며 실험 데이터를 잘 나타내기 위한 기준에는 도달되지 못한다.

그림 2는 이러한 상관 관계식이 절대적인 정확성을 가지기 위하여서는  $100 < Ra'' < 1,000$  영역에서 상당히 많은 실험 데이터가 더 필요하다는 것을 보여준다. 두 개의 상관 관계식은  $10 \sim 300$ 의  $Ra''$  범위에서 Nusselt 수를 믿을 만하게 예측시켜 주지만,  $300 < Ra'' < 1000$ 인 범위에서는 대략적으로 예측시켜준다고 평가할 수 있다.

$Ra'' < 10$  정도되는 매우 낮은 Rayleigh 수의 경

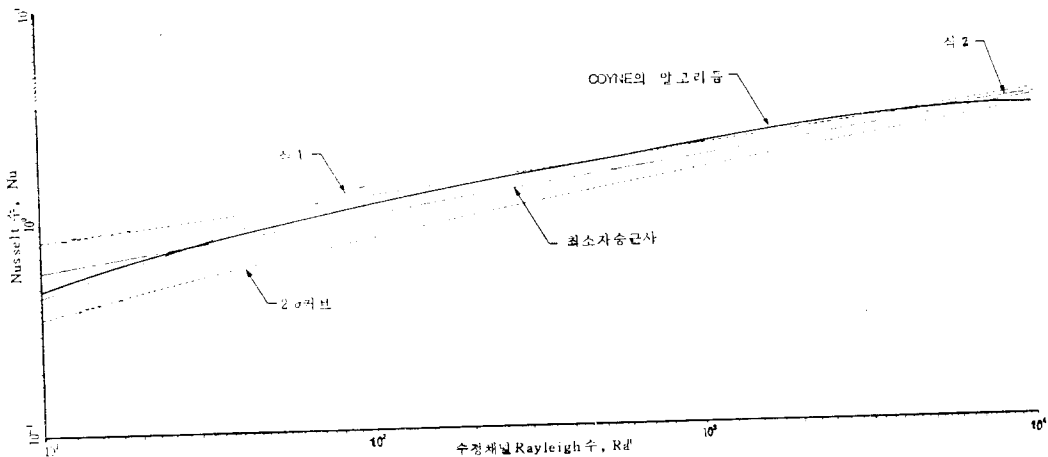


그림 8 대칭적으로 가열되는 채널에 관한 Coyne<sup>(13)</sup>의 알고리즘에 따른 수치계산 결과는  $10 < Ra'' < 1000$  범위에서 최소자승근사와 평균 10% 이내로 비교되었다. Coyne의 결과는  $1,000 < Ra'' < 10,000$  범위에서 식 (2)와 아주 잘 일치하지만  $Ra'' > 10,000$  범위에서는 맞지 않는다.

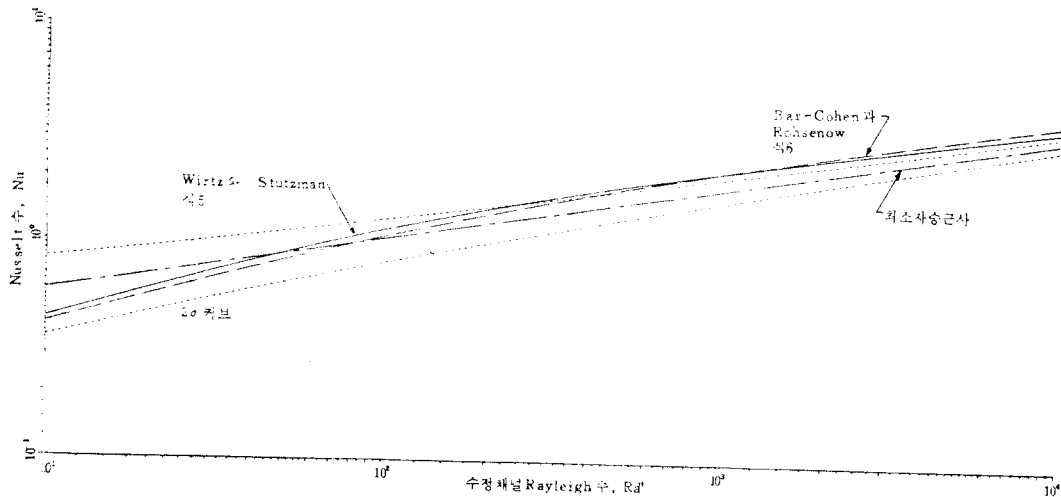


그림 9 Wirtz 와 Stutzman<sup>(4)</sup> 그리고 Bar-Cohen 과 Rohsenow<sup>(5)</sup>의 상관 관계식은 둘다 인접되게 조밀히 배치되고 높은 전력소비량을 가지는 기관인 경우인  $15 < Ra < 100$  인 영역에서  $2\sigma$  범위내에 들어간다.

우에 Aung<sup>(2)</sup>의 식 (1)은 (Wirtz, Stutzman, 그리고 Bar-Cohen 과 Rohsenow 에 의해서도 선택됨) 완전발달 층류의 채널 유동한계 부근의 상관 관계식으로 선호되고 있다.  $Ra > 1,000$  에서 식 (2) [Aung 등<sup>(3)</sup>]는 단일 수직평판에서의 다른 2개의 근사식과 비교했을 때(그림 6) 상당히 좋은 예측이었으므로 권할 만 하다. 이 식은 또한 Sparrow 와 Gregg<sup>(8)</sup>의 결과와도 잘 일치한다.

여기서 추천되는 상관 관계식을 이용하여, 여러 형태의 전자회로기관이 자연대류에 의하여 냉각되는 동안에 기관에서의 온도증가를 예측할 수 있다. 그 하나의 응용으로서는 전자시스템에서 여러가지 프레임 구성 방법이 열적으로 가장 민감한 영역에 어떠한 영향을 미치는가를 평가하는 것이다.

각각의 상관 관계식은 기존 장치에서 전력소모율의 영향을 결정할 수 있도록 해 준다. 이러한 방법은 상관 관계식들이 계산기나 퍼스널 컴퓨터에 프로그래밍 되어 있을 때 한층 효율적이다.

이미 그림 8에서 보여 주었듯이, Coyne<sup>(13)</sup>의 알고리즘을 이용한 수치적인 환산은 균일하게 가열되는 프레임 상부에 위치한 균일가열기관의

온도를 아주 정확하게 예측할 수 있게 한다. Coyne 는 비대칭적으로 가열되는 기관부위의 온도 예측을 위한 알고리즘을 발전시켰지만, 이것의 능력은 여태껏 평가되지 못하였다. 그러나 Coyne 의 알고리즘은 상호적인 특성이 있으므로 일단 어떤 물리적인 구성이 정하여진 후에 회로기관 온도 상승 과정을 단계적으로 평가하는 데 사용될 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

- (1) Genot, M., 1982, in COMMUNICATION PII8: "Thermal Architecture Made with Specific Components, Session PII: Components Manufacturing Technologies", pp.377~803.
- (2) Aung, W., 1972, "Fully Developed Laminar Free Convection between Vertical Plates Heated Asymmetrically", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 15, pp.1577~1580.
- (3) Aung, W., Fletcher, L.S., and Sernas, V., 1972, "Developing Laminar Free Convection between Vertical Flat Plates with Asymmetric Heating", *Int. J. Heat Mass Transfer*,

- Vol. 15, pp.2293~2308.
- (4) Wirtz, R.A. and Stutzman, R.J., 1982, "Experiments on Free Convection between Vertical Plates with Symmetric Heating", *J. Heat Transfer*, Vol. 104, pp.501~507.
- (5) Bar-Cohen, A., and Rohsenow, W.M., 1984, "Thermally Optimum Spacing on Vertical Natural Convection Cooled, Parallel Plates", *J. Heat Transfer*, Vol.106, pp.116~123.
- (6) Birnbrier, H., 1981, "Experimental Investigations on the Temperature Rise of Printed Circuit Boards in Open Cabinets with Natural Ventilation", in *Heat Transfer in Electronic Equipment*, M.D. Kelleher and M.M. Yovanvich, eds., HTD Vol. 20, pp.19~23, American Society of Mechanical Engineers, New York.
- (7) Schenck, H., 1979, "*Theories of Engineering Experimentation*", 3d ed., McGraw-Hill, New York, pp.234~244.
- (8) Sparrow, E.M. and Gregg, J.L., 1956, "Laminar Free Convection from a Vertical Plate with Uniform Surface Heat Flux", *Trans. ASME*, Vol. 78, pp.435~440.
- (9) Carlson, W.O., 1956, Ph. D Thesis, Univ. of Minnesota, Minneapolis.
- (10) Eckert, E.R.G. and Drake, R.M., Jr., 1959, *Heat and Mass Transfer*, 2d ed., McGraw-Hill, New York, pp.328~331.
- (11) Aung, W., 1973, "Heat Transfer in Electronic Systems with Emphasis on Asymmetric Heating," *Bell Syst. Tech. J.*, Vol. 52, No. 6, pp.907~925.
- (12) Churchill, S.W. and Usagi R., 1972, "A General Expression for the Correlation of Rates of Heat Transfer and Other Phenomena", *AIChE J.*, Vol. 18, No.6, pp.1121~1128.
- (13) Coyne, J.C., 1984, "An Analysis of Circuit Board Temperatures in Electronic Equipment Frames Cooled by Natural Convection", in *Fundamentals of Natural Convection/Electronic Equipment Cooling*. L.C. Witte and L.S. Saxena, eds., HTD Vol. 32, pp.59~65, American Society of Mechanical Engineers, New York.

