

축류 팬을 이용한 충돌제트 전자냉각 설계개념에 대한 연구

이 찬* · 길현권*

Study on the Design Concept of Impinging Jet Electronics Cooling by Using Axial Fan

Chan Lee** , Hyun Gwon Kil*

Key Words : Electronics cooling(전자냉각), Impinging jet(충돌제트), Pressure loss(압력손실), Fan noise(팬소음)

ABSTRACT

Flow and noise analyses are conducted for examining a new design concept of impinging jet electronics cooling, and the analysis results are compared with conventional electronics cooling techniques. For the application of impinging jet electronics cooling method, the present study considers the air duct where air is supplied by axial fan and air flow from the duct is impinged vertically onto the electronic component heat source. Applying CFD simulation technique and fan noise model to the present cooling scheme, the cooling performance of the impinging jet as well as the operation condition and the noise characteristics of fan are investigated for various impinging jet nozzle conditions and fan models. Furthermore, the impinging jet electronics cooling analysis results are compared with the conventional parallel-flow cooling scheme to give the design concept and criteria of impinging jet cooling method.

1. 서론

최근 들어 눈부시게 발전하고 있는 전자, IT 및 반도체 산업은 전자부품들의 고집적화, 고성능화를 가속화시키고 있으며 이로 인한 전자부품의 발열문제가 매우 심각한 상황이다. 예를 들어, 중대형 컴퓨터의 발열 밀도는 $0.1\sim 4\text{ W/cm}^2$ 로서, 이러한 발열밀도는 5년마다 약 4배 정도 증가하고 있다. 또한 컴퓨터의 발달에 따른 실장구조와 발열밀도의 증가추세는 1970년대에서 현재까지 실장 효율비는 150배, 발열 밀도비는 100배로 증가되었음을 알 수 있다. 이러한 고밀도의 전자부품 배치 및 발열량의 증가는 점차적으로 전자냉각의 설계를 어렵게 하는 요인으로 작용하고 있다⁽¹⁾.

* 수원대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail : clee@suwon.ac.kr

컴퓨터 내부 전자 부품, 기기 및 시스템의 냉각을 위해서는, 발열체(heat source)로부터 대기(heat sink)로 열을 제거하는 데 필요한 가장 효과적인 경로를 찾아 이를 열 설계에 반영하는 것이 설계자들이 해야 할 일이다. 이를 위해서는, 열을 제거하는데 장애요인으로 작용하는 열저항(thermal resistance) 들을 전자 부품 및 컴퓨터 시스템 차원에서 최대한으로 줄이는 전자냉각 설계 과정이 필요하며 이를 통해 좀 더 쉽게 열이 컴퓨터로부터 빠져나가도록 해야 한다. 이러한 이유로, 최근의 고발열량 전자부품의 냉각을 위해서는 기존의 냉각 설계기술을 탈피하여 좀 더 열전달 성능이 뛰어난 새로운 냉각설계기술의 개발 및 이에 대한 표준화가 필요하다.

기존의 냉각기술은 발열체와 냉각공기의 흐름을 평행하게 유지하는 경향이 있으며, 이외에 팬과 히트싱크(heat sink)의 결합구조가 지나치게 밀착되어 공기의

흐름을 교란하여 히트싱크의 냉각성능을 저하하는 경향이 있었다⁽²⁾. 그러므로 기존의 공기냉각 기술을 탈피하여 냉각성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 새로운 개념의 냉각기술로 총돌제트(impinging jet) 기술이 최근에 부각되고 있다. 총돌제트 냉각기술은 기존의 공기 냉각기술에 비해 열전달성능이 현저히 향상되는 것으로 알려져 있으며, 이러한 총돌제트 기술은 이미 high-end 컴퓨터 및 정보통신 기기에는 냉각수나 냉매를 이용한 설계가 채택되어 사용되고 있다⁽³⁾.

그러므로 본 연구는 총돌제트 냉각기술을 공랭식 소형 컴퓨터에 적용하기 위한 기초 연구를 수행하고자 하며, 이를 위해서는 총돌제트 냉각을 위한 공기 덕트, 공기 분사 노즐에 대한 설계 개념을 검토하였으며, 더 나아가 이러한 총돌제트 냉각을 위해 공기를 공급하는 팬과의 연계설계를 위한 작동조건 및 소음에 대한 이론적 분석도 수행하였다.

2. 총돌제트 전자냉각 해석 방법

2.1 총돌제트 전자냉각 설계 개념

Fig. 1 은 총돌제트 전자냉각을 위한 설계 개념을 도시하고 있다⁽³⁾. 다수의 전자부품들(발열체)들이 실장된 컴퓨터 내부에 팬으로 공기를 공급하고, 공기는 덕트를 따라 흐르다 노즐을 통해 발열체 위에 총돌제트 형태로 분사되어 발열체의 냉각이 이루어진다.

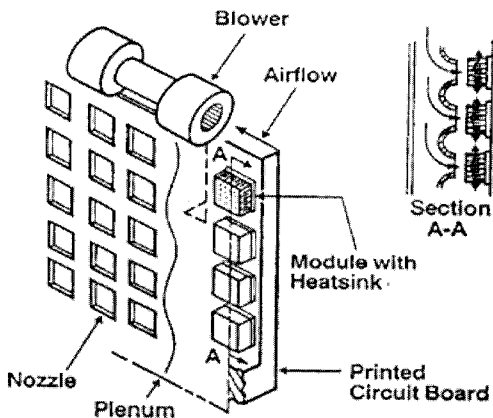
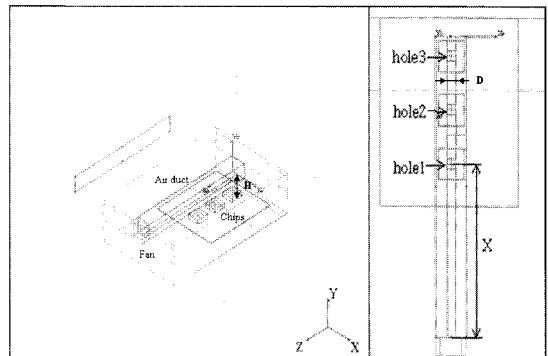


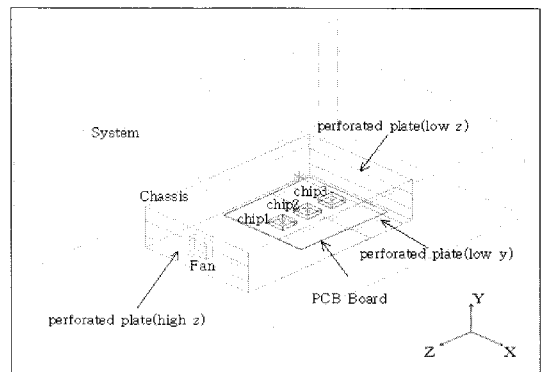
Fig. 1 Schematics of system electronic cooling by impinging jet

이러한 총돌제트 전자냉각의 기초적인 설계 개념 분석을 위해, 본 연구는 Fig. 2 와 같은 단순한 구조의 설계 모델을 고려하였다. Fig. 2(a) 에서 보여 지듯이, 사각 박스형 케이스 내부에 기관이 설치되어 있고, 기관 위에 각 10 W 의 발열량을 가지는 3개의 35x35mm 칩(chip) 발열체를 배치하였다. 35mm 정방형의 발열체를 사용한 이유는 실제 컴퓨터에 사용되는 표준형 칩들의 크기를 감안하였다. 그리고 박스 상부에는 축류 팬으로 공급되는 공기를 위한 덕트(42×42×335mm)를 설치하였고, 덕트 중간에 구멍을 뚫어 칩의 총돌제트 냉각을 위한 공기 노즐로 사용하였다. 이때 노즐의 구멍과 칩 표면과의 거리(H)는 35mm로 고정하였고, 노즐의 크기(D)는 H 의 1/2, 1/3, 1/4 및 1/5 로 변화시켰다.

또한 본 전자냉각의 공기 공급을 위해서, Table 1에서 표시된 것과 같은 2가지 저압 및 고압 축류 팬을 사용하였다.



(a) Cooling by impinging jet flow



(b) Cooling by parallel flow

Fig. 2 Cooling design configurations

Table 1 Specifications of axial flow fans

model	Max. P [Pa]	Max. air flow[m ³ /s]	Diameter [mm]	RPM
HP fan	180	0.007	40	11,500
LP fan	75	0.003	40	4,200

Note) No. of fan blades: 7 , Hub ratio: 0.5

2.2 총돌제트 전자냉각 해석 방법

2.2.1 유동 및 열전달 해석 방법

시스템 내부의 총돌제트 흐름과 그에 따른 열전달 현상을 해석하기 위하여, 본 연구는 전자냉각용 상용 코드인 Flotherm⁽⁴⁾ 을 사용하였다. Flotherm 코드는 다른 범용 CFD 코드들에 비해, 전자냉각을 위한 특화된 모델링 기능과 전자부품들의 물성에 대한 다양한 데이터베이스를 제공하고 있다. Flotherm 을 이용한 발열체인 칩 주위의 유동을 해석하기 위해 시스템 내부의 사각 격자계를 형성하였고, 계산에 사용된 총 격자수는 40,000~50,000개이다. 또한 본 연구에서는 팬 출구, 노즐 출구 및 칩 주변의 난류의 효과를 좀 더 상세히 해석하기 위해 표준 k-ε 모델을 사용하였다.

Flotherm을 이용한 계산과정은 시스템 내부의 유동장 계산과 칩 내부의 열전도 계산으로 구분될 수 있으며, 시스템 내부의 유동장 계산을 통해 구해진 공기의 속도 및 온도 분포는 칩 내부의 열전도 해석을 위한 경계조건으로 사용되고, 이렇게 유동-열전도 현상이 연계된 계산과정은 계산결과가 수렴될 때 까지 수행된다. 그리고 이렇게 수렴된 칩의 온도분포로부터 칩과 기판사이의 접점온도(junction temperature)를 구할 수 있다. 본 방법에 의한 유동장 및 열전달 계산결과로부터 얻어진 접점온도는 실제 측정된 접점온도와 상대오차 7% 범위 내에서 잘 일치하였다⁽⁵⁾.

2.2.2 소음 해석 방법

시스템내부에 장착된 팬의 소음은 팬의 작동조건 및 설계제원에 의해 결정된다. 본 연구에서는 팬의 작동조건은 Flotherm 에 의한 전산해석결과로부터 구하였다. 또한 계산된 작동조건에서의 팬 소음은 블레이드 통과 주파수(BPF) 소음과 광대역 소음으로 나누어 예측하였다. BPF 소음은 팬 정상추력(steady thrust)과 블레이드 간섭(blade interaction)에 대한 소음을 Gutin의 이론⁽⁶⁾ 을 이용하여 예측하였다. 또한 광대역 소음

은 블레이드 표면의 압력 섭동을 유발하는 소음원으로 난류 경계층(turbulent boundary layer)과 후류 와류(vortex wake)에 의한 것으로 간주하였고, 소음예측을 위해 Wright 의 모델⁽⁷⁾을 사용하였다. 본 연구의 팬 소음 예측방법에 대한 상세한 설명은 참고문헌^(8,9) 에 잘 기술되어 있다. Fig. 3 은 본 방법에 의한 축류 팬에 대한 예측결과와 측정결과간의 비교를 보여주고 있으며, 소음 스펙트럼 및 총소음도(예측: 60.0 dBA, 측정: 57.5 dBA) 가 비교 잘 일치하고 있다⁽⁹⁾. 이때 축류 팬의 작동점은 유량 44.4 m³/min, 압력은 49 Pa 이다.

그러나 예측과 측정결과간의 오차가 2 kHz 이상의 고주파 영역에서는 저주파 영역에 비해 상대적으로 크게 나타나며, 이러한 결과는 광대역 소음의 예측 시 주파수 스펙트럼을 필터 이론(filter theory)을 이용하여 단순화 시킨 점에 기인하나⁽⁶⁾, 이러한 차이가 총 소음도 예측에는 큰 영향을 미치지 않는았다.

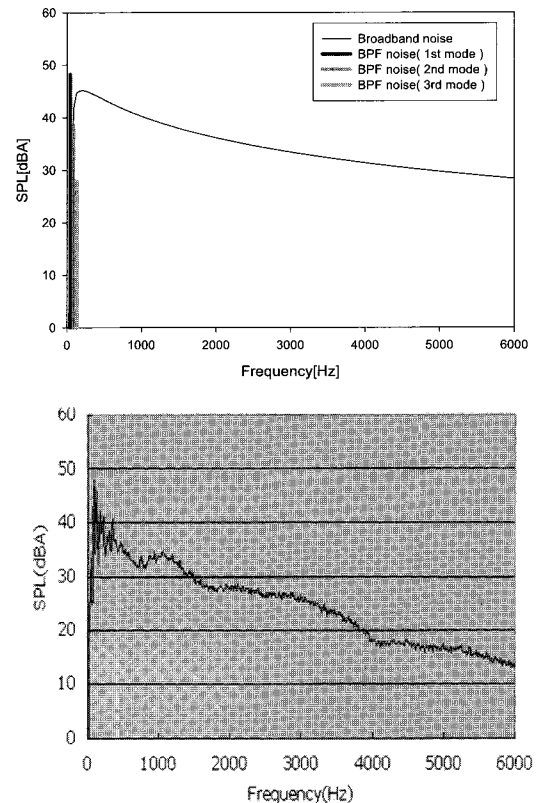


Fig. 3 Fan noise comparison between prediction (upper) and measurement(lower)

3. 해석결과 및 검토

3.1 유동해석 결과

Fig. 4 는 고압 팬으로부터 공급되는 공기가 칩표면에 평행하게 흐르는 경우의 속도 벡터를 보여주고 있다. 팬으로부터 분출되는 공기가 칩 표면 위로 2 m/s 정도의 속도를 가지고 흐르며 대류 냉각이 이루어짐을 알 수 있다. 또한 Fig. 5 의 저압 팬을 사용하는 경우도 고압 팬과 유사한 경향을 보이고 있으며, 칩 표면 위의 속도는 1.3 m/s 정도를 유지하였다.

Fig. 6 은 저압 팬을 이용하여 총돌제트 흐름을 만드는 경우의 속도 벡터들을 H/D 변화에 따라 보여주고 있다. H/D 가 증가할수록, 또는 노즐크기(D)가 줄어들수록, 노즐로부터 칩으로 분사되는 공기가 칩 표면위에 수직하게 충돌하는 경향을 보인다. 또한 공기의 노즐에서의 분출속도도 H/D 가 2, 3, 4, 5로 증가함에 따라 3.9, 4.8, 5.7, 6.4 m/s 로 증가한다. 공기의 분출속도가 노즐크기의 감소에 반비례하여 현저히 증가하지 않고, 속도 증가의 변화 폭이 상대적으로 적은 이유는 노즐의 크기가 줄어들수록 압력손실이 증가하여 팬으로부터 공급되는 유량이 감소되기 때문이다.

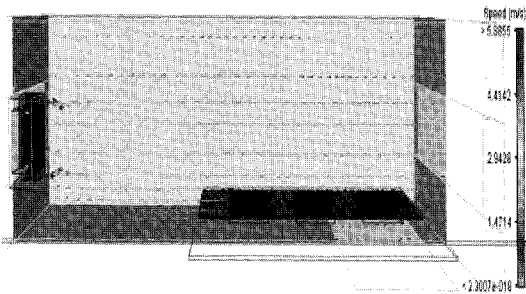


Fig. 4 Velocity vector of the parallel flow by HP fan

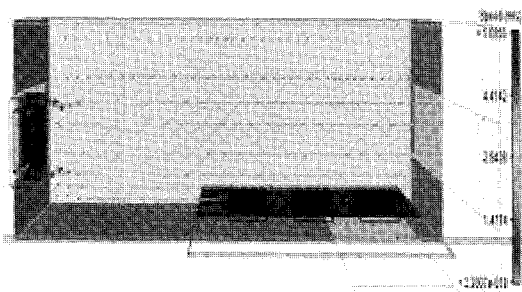
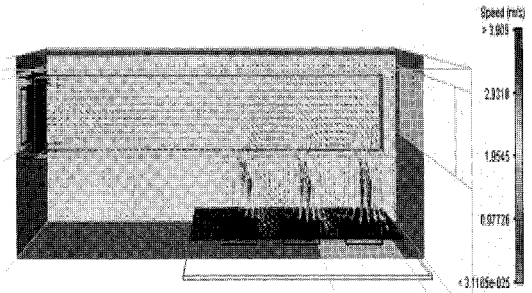
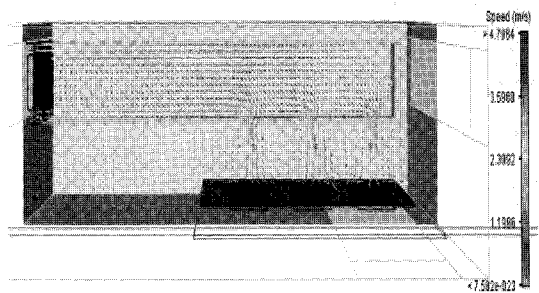


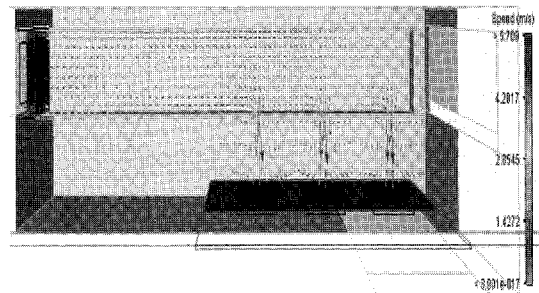
Fig. 5 Velocity vector of the parallel flow by LP fan



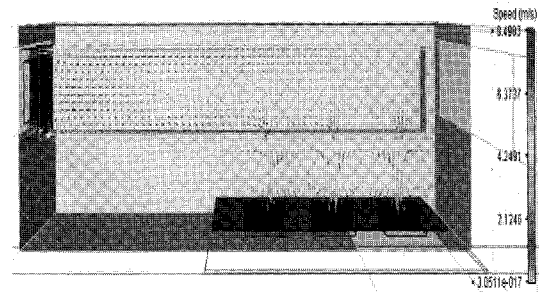
(a) H/D = 2



(b) H/D = 3

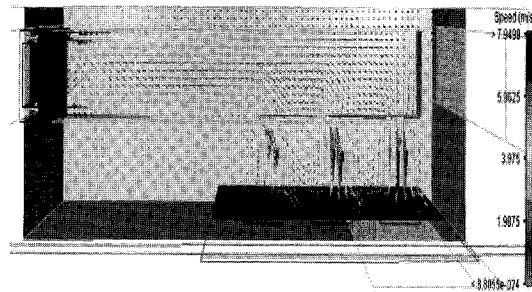


(c) H/D = 4

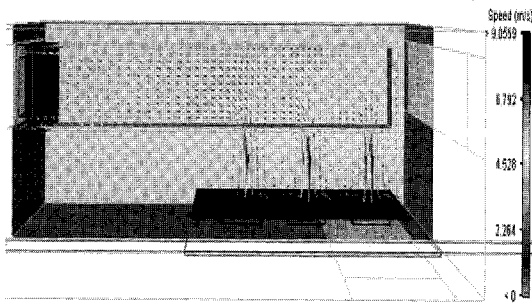


(d) H/D = 5

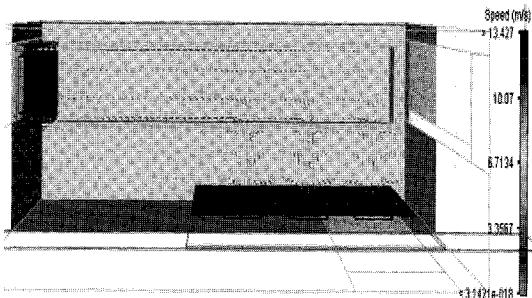
Fig. 6 Velocity vector of the impinging jet flow by LP fan



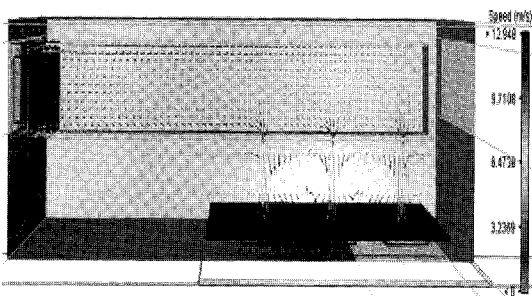
(a) $H/D = 2$



(b) $H/D = 3$



(c) $H/D = 4$



(d) $H/D = 5$

Fig. 7 Velocity vector of the impinging jet flow by HP fan

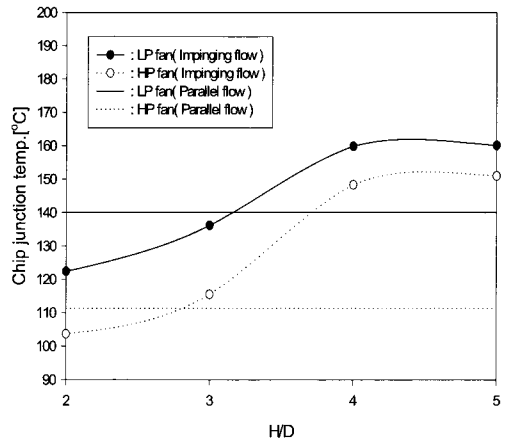


Fig. 8 Chip junction temperature vs H/D

Fig. 7 은 고압 팬을 이용한 총돌제트 흐름에 대한 속도 벡터들을 보여주고 있으며, 저압 팬의 해석결과인 Fig. 6 과 유사한 경향을 보여주고 있다. 그러나 고압 팬을 사용하는 경우에는, 공기의 노즐에서의 분출 속도는 H/D 가 2, 3, 4, 5로 증가함에 따라 7.2, 8.3, 8.5, 8.8 m/s 로 증가한다. 이러한 속도증가의 경향은 노즐내의 압력손실에 의한 것으로 판단되며, 앞서의 저압 팬의 경우와 비교해 볼 때, 노즐의 압력손실 특성과 팬의 성능곡선 특성의 상호작용에 의해 총돌제트 분사속도가 매우 현저히 영향을 받을 수 있다.

3.2 온도해석 결과

Fig. 8 은 총돌제트에 의해 냉각된 칩의 온도를 H/D 변화에 따라 도시하고 있으며, 총돌제트 계산결과를 평행류에 의한 계산결과와 비교하고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 고압 팬을 사용하는 경우의 냉각성능이 저압 팬의 경우에 비해 현저히 향상됨을 알 수 있다.

저압 팬의 경우 총돌제트에 의한 냉각 방식이 평행류 냉각 방식에 비해 H/D 가 3 이하인 경우 우수하나, H/D 가 3 보다 큰 경우에는 오히려 냉각방식이 저하되는 결과를 볼 수 있다. 이러한 결과는, 앞서 유동계산의 결과에서 언급한 바처럼, H/D 증가에 따라 노즐의 압력손실이 급격히 증가하여 노즐의 공기 분사속도는 다소 증가하나 노즐로부터 칩으로 분출되는 공기 유량은 현저히 줄어들기 때문이다. 또한 H/D 가 4, 5

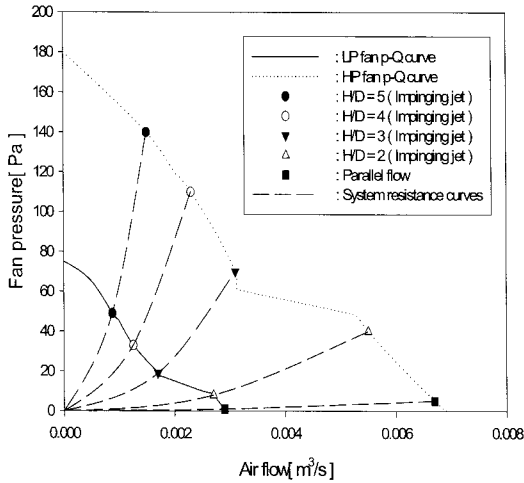


Fig. 9 Fan operation condition vs H/D

인 경우는 칩의 온도가 거의 일정한 양상을 보인다. 고압 팬의 경우는 저압 팬에 비해 충돌제트 냉각방식이 좀 더 작은 H/D 범위 내에서 평행류 냉각방식에 비해 우수한 냉각성능을 보여주고 있다. 반면 H/D 가 4, 5로 증가됨에 따라, 냉각효율은 저압 팬에 비해 훨씬 저하됨을 알 수 있다. 이러한 결과들로부터 충돌제트 냉각방식은 공기를 공급하는 팬의 성능특성과 노즐의 압력손실 특성간의 상호작용을 고려하여, 노즐 크기 및 노즐과 칩 간의 간격에 대한 최적 설계가 이루어져야 함을 알 수 있다.

3.3 팬 작동조건 해석 결과

3.1, 3.2절에 언급한 바처럼, H/D 증가는 노즐의 압력손실 증가를 초래하여, 팬의 작동점을 저유량 조건으로 이동시킨다. Fig. 9는 대기압을 기준으로 한 팬의 성능곡선과 H/D 변화에 따른 팬의 작동점을 보여주고 있다. Fig. 9에서 보여 지듯이, 평행류 냉각의 경우 압력손실(또는 시스템저항)이 매우 적어, 팬의 작동점은 거의 최대 유량점에 위치하나, 충돌제트 냉각 팬의 경우 H/D가 증가할수록 압력손실이 증가되어 팬의 작동점은 급격히 저 유량점으로 이동함을 알 수 있다. 이러한 팬의 저 유량 작동으로 인하여, H/D가 큰 경우의 충돌제트 냉각 성능이 급격히 저하되는 것이다.

또한 팬의 성능곡선과 시스템 저항곡선의 결과로부터, 본 연구에서 고려한 팬들이 변곡점 근처에서는 작

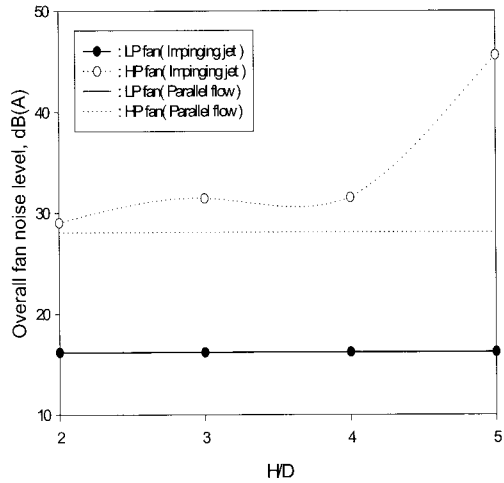


Fig. 10 Fan noise level vs H/D

동하지 않는 것으로 판단되며, 즉 팬 내부의 유동 불안정성과 이로 인한 소음은 야기되지 않을 것으로 판단된다.

3.4 팬 소음 해석 결과

Fig. 10은 충돌제트 설계 시의 팬 소음도를 보여주고 있다. 낮은 회전수에서 작동하는 저압 충돌제트 냉각팬의 경우 H/D의 변화에 따라 팬 작동점이 변화되기는 하나, 팬 작동조건은 팬의 총 소음도에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있으며, 또한 평행류 설계의 경우와 거의 비슷한 소음도를 보여주고 있다. 그러나 높은 회전수를 가지는 충돌제트 냉각 팬의 경우는 H/D의 증가에 따라 매우 급격한 소음도의 증가를 보인다. 이러한 결과는 고압 팬의 경우 작동점이 저유량점으로 이동할수록 팬으로 유입되는 공기의 입사각이 증가되고, 입사각의 증가는 팬 블레이드 표면의 난류 경계층 영역을 확장시키며, 이로 인해 난류경계층에 의한 광대역소음이 기하급수적으로 증가하는 것에 기인한다^(6,7). 즉 고압 팬의 경우는 저압 팬에 비해 노즐 설계에 의한 팬 작동점의 변화가 소음발생에 매우 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

4. 결론

충돌제트를 이용한 전자냉각의 설계개념 정립을 위

한 유동-열전달-소음 해석을 수행하였다. 충돌제트의 냉각성능은 노즐의 크기, 노즐과 발열체간의 간격 및 냉각 팬의 성능특성간의 상호작용에 의해 크게 영향 받음을 알 수 있었다. 기존의 평행류 전자냉각방식 보다 개선된 충돌제트의 냉각효과를 구현하기 위해서는, H/D 가 3이하로 분사노즐을 설계하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 냉각 팬으로 저압 팬을 사용하는 경우에는 H/D 의 설계 조건에 팬 소음도는 큰 변화가 없으나, 고압 팬을 사용하는 경우에는 노즐 설계 시 H/D 가 4이상 증가하는 경우에는 팬으로 유입되는 공기의 입사각 증가로 인한 광대역 소음의 증가가 급격히 야기되므로, 실제 전자냉각 설계 단계 시 이에 대한 신중한 고려가 필요한 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 지식경제부 전략산업기술개발 사업의 연구비 지원에 의해 이루어 졌음을 밝힙니다.

참고문헌

(1) 이찬, 2008, 컴퓨터의 충돌제트 냉각 및 유동/냉각/

소음 상호작용 예측연구, 삼보컴퓨터.

- (2) Kim, S. J. and Lee, S. W., 1996, Air Cooling Technology for Electronic Equipment, CRC Press
- (3) Kacker, S., Yuncu, H. and Hijikata, K., 1993, Cooling of Electronic Systems, Kluwer Academic Publishers.
- (4) Flotherm v6.1 User's Manual, 2000.
- (5) 이찬, 2006, 컴퓨터 시스템 차원 전자냉각 및 소음 저감을 위한 설계-분석 체계에 관한 연구, 삼보컴퓨터.
- (6) 이성일, 1991, 회전기계용 소음설계 소프트웨어 개발, KAITECH-91-PNR0140, 한국생산기술연구원.
- (7) Wright, S.E., 1976, "The acoustic spectrum of axial flow machines," J. of Sound and Vibration, vol.45, no.2, pp. 165~223.
- (8) 이찬, 윤재호, 권오경, 2007, "시스템 전자 냉각 팬의 선정 및 소음평가 기법," 유체기계저널, 제 10권 제 3호, pp. 33~38.
- (9) Lee, C. and H.G. Kil, 2008, "Noise Prediction Method of the Axial Fan in Electronic and Air Cooling Systems," 15th International Congress on Sound and Vibration Proceedings, pp. 1940~1947.