

## 국소환기시스템의 후드형상 개선에 따른 수치해석

이 중 섭<sup>†</sup>, 장 성 철<sup>\*</sup>, 최 주 흥<sup>\*\*</sup>

경상대학교 기계항공공학부, <sup>\*</sup>삼원기술(주) 기술연구소, <sup>\*\*</sup>경상대학교 생명화학공학과

### Numerical Analysis on Hood Shape Improvement of Local Ventilation System

Chung Seub Yi<sup>†</sup>, Sung Cheol Jang<sup>\*</sup>, Joo Hong Choi<sup>\*\*</sup>

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, 900, Gaja-dong, Jinju, Korea

<sup>\*</sup>Samwon tech co.,LTD R&D Center, Gimhae 586-1, Korea

<sup>\*\*</sup>Department of Chemical and Biological Engineering, Gyeongsang National University, 900, Gaja-dong, Jinju, Korea

(Received July 21, 2008; revision received March 9, 2009)

**ABSTRACT:** The aim of this study is to remove crack on a ventilation device at the suction part of zinc plating factory, and the main point is making optimum configuration by improving an existing hood system. The result shows that existing hood system has problem with duct configuration, angle and reducer. Model-5 shows lowest pressure difference as meaning of suction capability. The hood inlet surface has most uniform suction capability.

**Key words:** Zinc plating(아연도금), Local ventilation(국소환기), Hood(후드), Duct(덕트)

#### 1. 서 론

본 연구는 아연도금 공장의 도금공장에서 운용 중인 흠 제거에 관한 국소환기 설비 중 흡입부에 대한 최적형상을 제시하는데 목적이 있다.

일반적으로 환기라 함은 밀폐된 공간에서 유해 가스 및 입자성 물질을 외부로 배출하는 것이라 할 수 있다. 따라서 목적에 따라 일반적인 건축물에서 사용되는 환기시설은 신선한 공기를 공급할 목적으로 환기시설이 필요하며, 병원등의 크린룸 및 무균실등은 환자 및 연구자를 감염이나 미생물로부터 보호할 목적으로 환기시설이 필요하다. 그러나 본 보고서에서 주목하고 하는 환기 시설은 산업환기로 생산활동과 더불어 발생하는 유해물질, 오염물질 등 작업환경을 악화시키는 물질을 작업공간으로부터 가능한 빨리 제거하는 시

스템에 국한되어 있다. 산업환기는 작업장의 공기 질을 개선할 목적으로 설치되고 있지만 작업 환경개선의 근본적인 목적은 유해물질로부터 작업자의 건강을 보호하는 것이 주안점이 두어진다. 그 이유는 산업현장에서 발생하는 유기용제, 특정 화학물질, 중금속, 분진, 화재 및 폭발물질 등에 작업자가 노출되지 않도록 하기 위해서 산업 현장의 시설이나 물질을 교체하거나 완전 격리시키는 방법을 채택하고 있다.<sup>(1-3)</sup>

현재 국내-외적으로 생산시설 및 작업장에 대한 환기 시스템의 실험에 대한 고찰은 다수 있었고, 수치해석을 통한 기류분포의 예측과 농도 예측에 대한 연구는 미진하였다. 이와 유사한 문제로 일반 주택 및 식당의 환기시설에 관한 연구는 국내-외적으로 활발한 연구가 진행되고 있음을 확인할 수 있었다. 생활의 질이 향상됨에 따라 가정 내에서의 실내공기 질에 대한 관심이 증가하였고, 가전제품의 발달로 인해 자연스럽게 연구가 진행되고 있었다. 반면 산업환기에 대한 인식은 최근에 몇몇 업체들이 관심을 가지고 이에

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-55-340-7183; fax: +82-55-342-9038

E-mail address: cs\_yi@hotmail.com

대한 연구 및 실험이 일부 진행되었다.

Lee et al.<sup>(4)</sup> 등은 국내 조선소 내 초대형 용접 작업장의 작업환경 개선을 위해 수치해석을 적용하여 용접장의 내부 환기 시스템에 대한 기류와 흡 농도에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 공간환기 시스템이 정지한 경우 작업장 내부 공간에는 자연환기에 의한 기류가 유입되나 작업공간의 대부분 영역에서 흡 농도가 50 ppm 이상 발생하였지만, 환기 시스템 가동시 2.3~8.3 ppm으로 현저히 감소되었다고 보고하였다.

Koo et al.<sup>(5)</sup> 등은 가정용 후드에서 오염공기 확산방지 에어커튼 렌지후드의 실험적인 연구에서 에어커튼을 적용할 경우 실내의 온도와 습도변화는 50% 감소하며, 급기량 풍속이 증가하면 배기 풍속의 증가량은 30% 가량 더 증가하여 실내오염 공기 확산방지 및 배출에 유리하다고 보고하였다. 또한 실내공기의 환기성능이 평균 1.63배 높아진다고 하였다.

Witt et al.<sup>(6)</sup> 등은 CFD를 이용하여 흡을 배출시키는 후드의 최적형상에 대한 연구를 수행하였다. 다른 선행 연구자들은 실내의 오염물질을 신속하고 효과적으로 배출시키는데 중점을 두었다면 Witt는 후드 내부까지 흡입되는 것을 고려하여 후드의 형상을 최적화 시키고자 하였다. 그가 제안한 후드의 경우 충전포트로부터 달아나는 흡 농도를 65% 저감시킬 수 있다고 보고하였다. 현재 플랜트 관련 업계의 경우 매이저 급 회사를 제외한 대다수 마이너 급 플랜트 회사의 경우 그 설계 및 접근방법이 현장경험과 과거 유사 설비에 대한 역설계 및 1차원적이고 보간식에 근거하여 설계 및 시공을 수행하고 있다. 이러한 경우 기본적인 성능 및 제품에 대한 품질은 만족할 수 있을지도 모른다. 그러나 기하학적 형상의 변화에 대한 공학적인 타당성 검사가 결여될 경우 예상치 못한 오류를 범할 수 있는 내재적 오류를 안고 있음을 설계자는 인지하고 있어야 된다. 이러한 경우를 대비하기 위해 기존 설계방식의 경우 과대 설계를 하게 되고 이로 인한 손실은 굳이 서술할 필요성이 없겠다. 이러한 오류를 미연에 감지하고, 과대 설계된 부분의 살빼기 및 최적설계를 도출하기 위해 현재 시스템 중 흡입 후드에 국한하여 현 상태를 전산유체역학(CFD)을 도입하고자 한다. 이러한 최신 설계기법으로 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 현재 적용중인 후드

에 대한 현상을 고찰 및 탐구하여 최적형상을 도출하고자 한다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 지배방정식

본 연구에서는 도금 공정시 유해물질의 배출에 대한 유동현상을 기술하는 지배방정식에 대하여 3차원 정상상태의 난류유동으로 가정하였으며, 도금 작업장 내부는 공기속도로 표현되기 때문에 공기유동에 관한 연속 방정식, 운동량 방정식, 난류운동에너지 방정식 그리고 난류운동량 소산 방정식이 함께 계산되었다. 또한 유동장 내의 밀도 변화에 대한 부력항을 사용하기위해 에너지 방정식도 포함되어 있다. 난류모델은 이미 공학적으로 타당성을 검증 받은 표준  $\kappa-\epsilon$  모델을 사용하였다. 식(1)~식(9)는 본 연구에 사용된 지배방정식을 나타내고 있다.

#### ■ 연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

#### ■ 운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_u \quad (2)$$

#### ■ 난류에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j} + u_t G - \sigma \epsilon \quad (3)$$

#### ■ 난류에너지 소산방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} + \frac{\epsilon}{k} (C_1 \mu_t G - C_2 \rho \epsilon) \quad (4)$$

#### ■ 에너지 방정식

$$\frac{\partial (\rho u_i T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t}) \frac{\partial T}{\partial x_i} + S_T \quad (5)$$

여기서

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

$$\tau_{ij} = -(\mu + \mu_t) (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \quad (7)$$

$$S_u = -\frac{2}{3}(\mu + \mu_i) \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

$$\mu_i G = \mu_i \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \left( \rho k + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \quad (9)$$

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0,$$

$\sigma_\epsilon = 0.9$  의 값을 갖는다.

### 2.2 경계조건

실제 도금공정 시 설치되는 국소환기 설비 전체에 대한 시뮬레이션에 대한 해석은 수행하지 않고, 흡을 흡입하는 후드와 덕트에 한정하여 시뮬레이션을 수행하기 때문에 흡입되는 외부는 대기로 가정하였고, 후드입구 면에서 작용하는 압력 및 속도분포와 질량유량을 측정하여 각각의 모델에 대한 상대적인 평가를 수행하므로 최적 형상을 역 추적하는 방식을 채택하였다. 따라서 Fig. 1과 같이 계산모델을 선정하였으며, Fig. 2와 같이 후드와 리듀서를 변경하였다. 또한 경계조건은 Fig. 3과 같이 경계면을 설정하였다.

model-2의 경우 model-1과 비교할 경우 후드의 모서리각을 없앴고, model-3부터는 그림에 설명되어 있는 부분을 조금씩 수정하여 최적의 조건을 찾으려 노력하였다.

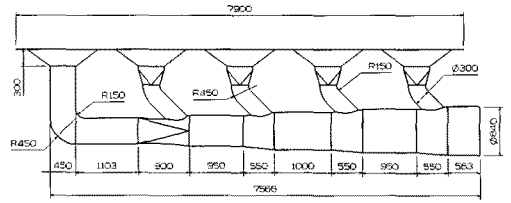
입구에서의 난류운동에너지는 평균 입구유속의 5%로 가정하고, 식(10)과 같이 계산하였다. 또한 난류소산율은 식(11)의 관계식으로부터 계산하였다.

$$k = \frac{3}{2} I^2 U_{IN}^2 \quad (10)$$

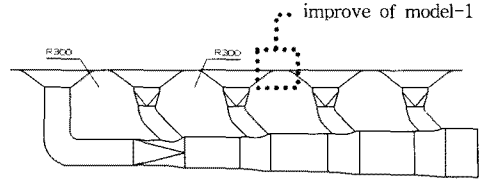
$$\epsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (11)$$

여기서  $I$ 는 난류 강도,  $U_{IN}$ 는 입구유속을 나타내고 있으며,  $C_\mu = 0.085$ 로 난류모델의 계수이다. 또한  $l$ 은 난류혼합거리를 나타내고 있다.

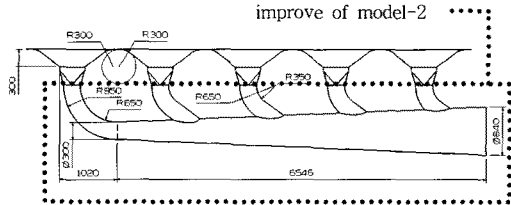
도금 작업장 주위는 대기압이 작용하고 있는 것으로 가정하였다. 또한 벽면에서의 경계조건은 모두 점착조건인 No-slip 조건을 적용하여, 벽면에서의 난류운동에너지의 확산은 Zero가 되며, 난류에너지의 생성율과 소산율은 아래의 식(12)과 식(13)으로부터 계산되어진다.



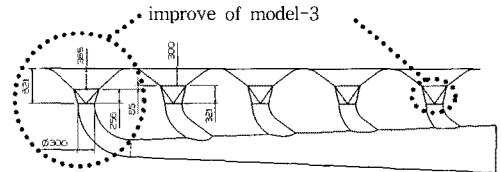
(a) model-1



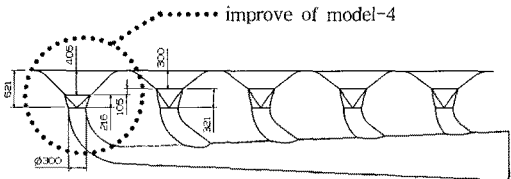
(b) model-2



(c) model-3



(d) model-4



(e) model-5

Fig. 1 Calculation domains of ventilation hood system.

$$G = \frac{\rho C_\mu^{3/4} k_P^{3/2} y_P^+}{y_P^+} \quad (12)$$

$$\epsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k_P^{3/2}}{k y_P^+} \quad (13)$$

여기서  $k = 0.41$ 이며 하첨자  $P$ 는 벽면으로부터

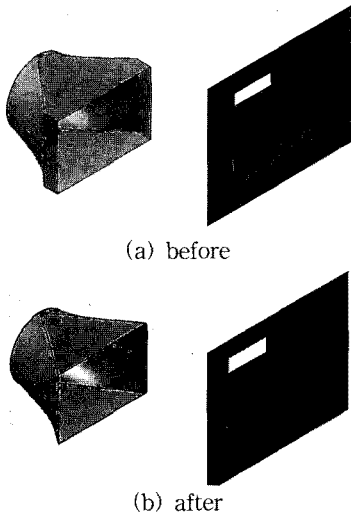


Fig. 2 Improved shape of hood and reducer.

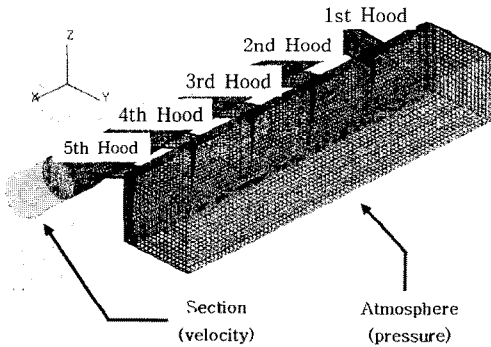


Fig. 3 Boundary conditions for ventilation hood system.

첫 번째 격자점을 의미하며  $y_p^+$ 는 벽면으로부터의 무차원 수직거리를 나타낸다.

### 3. 수치결과 및 고찰

#### 2.1 지배방정식

Fig. 4는 경계조건이 설정된 대기 면에서 추적 입자를 띄웠을 때 후드로 유입되는 시점까지인 0.6 초 때의 입자추적 결과를 나타내고 있다. model-1의 입자추적 결과 1번 후드에서 가장 먼저 흡입되고 있음을 알 수 있었다. 모든 면에서 균일한 흡입이 이루어져야 되는 시스템임에도 불구하고 현행 운용중인 국소환기 시스템의 구조적인

문제점이 발견되었다. 또한 model-2의 경우 단지 후드 흡입 측에 유동저항을 다소 감소시키기 위해 처리만 하였기 때문에 유입되는 시기는 model-1과 유사함을 알 수 있었다. model-3의 경우 이전 모델에 비해 균일한 흡입성능이 향상됨을 알 수 있었다. 이러한 이유는 후드 입구와 대기관 (manifold) 출구와의 압력차가 낮아지기 때문이므로 인한 후드로 유입될 때 저항이 적게 발생하기 때문인 것으로 사료된다. model-3에서 model-5까지의 매니폴드는 거의 동일하고, 후드와 덕트를 연결하는 리듀서(reducer)의 형상변경과 1번 후드에서 약간의 체적변화만 있기 때문에 전체적인 경향은 비슷하게 나타났다. 그러나 2번 후드가 다소 늦게 유입되는 것을 알 수 있었다.

도금육조의 길이 방향으로 설치된 후드는 실제

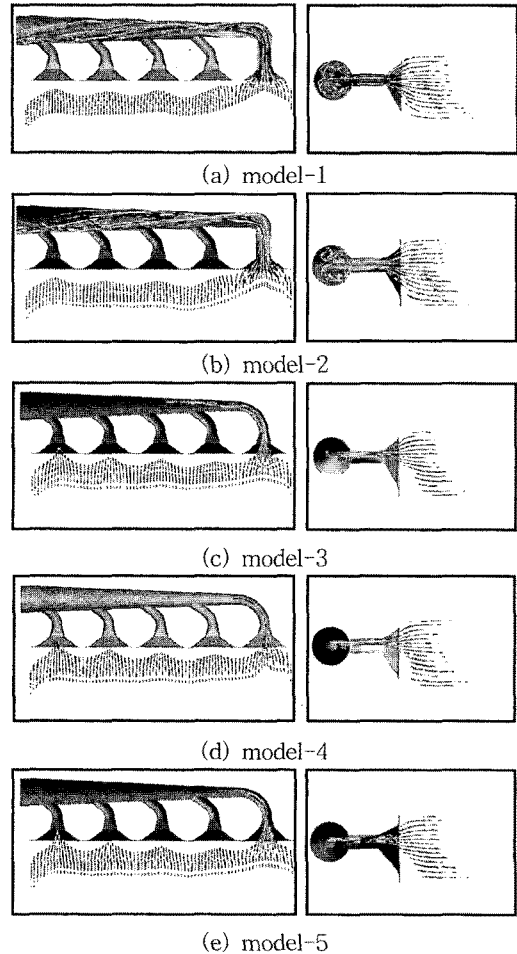


Fig. 4 Results of particle tracking at 0.6 sec.

1번과 5번에서 가장 먼저 유입시켜야 도금욕조 중간지점으로 흡을 몰아넣을 수 있다. 이러한 관점에서 볼 때 기존에 설치된 후드 시스템의 효과적인 흡입능력이 문제가 있음을 반증하고 있다.

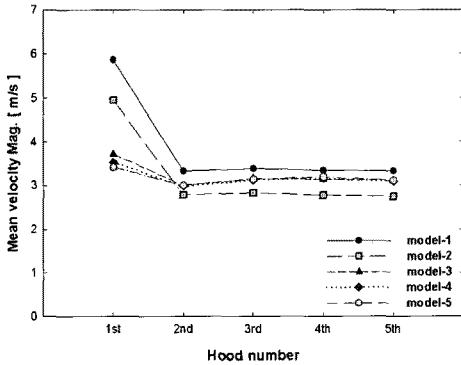


Fig. 5 Comparison of mean velocity magnitude at hood inlet.

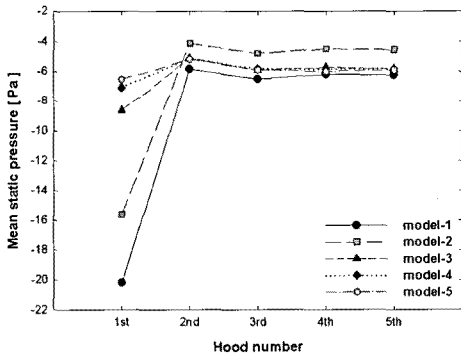


Fig. 6 Comparison of mean static pressure at hood inlet.

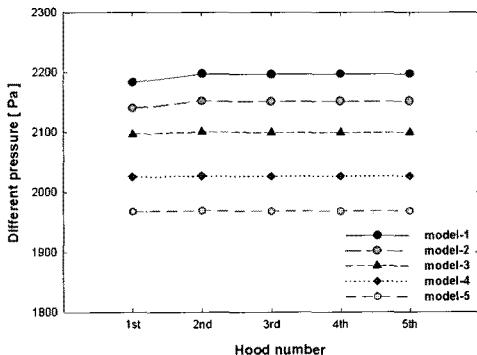


Fig. 7 Comparison of different pressure at ventilation system.

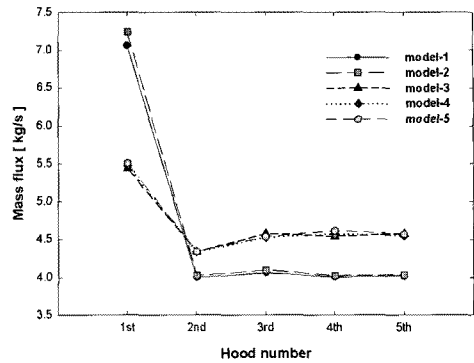


Fig. 8 Comparison of mass flux at hood inlet.

Fig. 5는 후드입구 면에서 유입되는 속도크기를 면적 평균한 값이다. 전반적으로 1번 후드에서 유입되는 속도가 가장 빨랐고, model-5가 가장 낮음을 알 수 있었다. 따라서 균일한 흡입을 위해서는 모든 후드에서 일정한 속도로 유입되어야 함을 상기한다면 model-1의 경우 환기시스템의 구조적인 문제가 있는 것으로 판단된다. 반면 model-5의 경우 1번 후드에 유입되는 속도가 다소 높지만 전반적으로 3m/s 근처에서 균일하게 유입됨을 알 수 있었다.

□ 평균속도

$$V_{mean} = \frac{\sum_i V_i \cdot dS_i}{\sum_i S_i} \quad (14)$$

□ 평균압력

$$P_{mean} = \frac{\sum_i P_i \cdot dS_i}{\sum_i S_i} \quad (15)$$

□ 질량유량

$$m = \sum \rho \cdot \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (16)$$

앞서 정성적인 결과를 분석하였다. 보다 모델에 대한 정량적인 평가를 위해 Fig. 4에서 Fig. 6까지 속도와 압력 그리고 질량유량에 대한 고찰은 식(14)에서 식(16)에 의해 결과를 도출하였으며 이를 근거로 분석하였다. 여기서  $S_i$ 는 제어체적의 단면을 나타내는 것이고,  $V_i$ 는 제어체적 cell에서의 속도크기,  $P_i$ 는 단면에서의 압력을  $\vec{V}$ 는 속도방향을 나타내고 있다.

Fig. 6은 속도와 같은 지점에서의 평균압력을 나타내고 있다. 전반적으로 흡기부압이 많이 발생하는데 이는 대기압이 송풍기 쪽으로 흡입되기 때문이다. 따라서 1번 후드의 경우 모든 모델에서 부압이 크게 작용하고 있음을 알 수 있었고, 이러한 결과는 결국 압력강하가 크게 일어나 흡입속도가 빨라지게 된다. 따라서 균일한 압력이 작용하는 모델이 최적이라 할 수 있으며, 후드 입구 면에서 model-5가 가장 균일한 압력분포를 나타내고 있었다.

Fig. 7은 각 모델별 후드 입구 면과 매니폴드 출구 면과의 압력차를 나타내고 있다. model-1의 경우 압력차가 가장 많이 발생하였고, model-5로 갈수록 감소하는 경향을 나타내고 있었다. 따라서 압력차에 대한 결과를 후드별로 보면 선형적인 감소가 있음을 확인할 수 있었다.

Fig 8은 후드 입구 면으로 유입되는 작동유체에 대한 질량유량을 나타낸 것이다. 앞서 확인한 결과와 마찬가지로 1번 후드에서 단위시간당 가장 많이 양의 작동유체를 흡입하고 있음을 확인할 수 있었다. model-1과 model-2의 경우 다른 모델과 비교할 때 1번 후드에서 높고 2번부터는 오히려 낮은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 model-1과 model-2를 제외한 나머지 모델의 경우 1번 후드와 2번 후드에 대한 보다 세심한 설계변경이 요구된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 대형 구조물에 대한 아연도금 도금 공장에서 운용중인 흡 제거에 관한 국소환기 설비 중 흡입부에 대한 최적형상을 제시하기 위해 기존의 후드 시스템을 개량하여 최적화 시키는데 주안점을 두었으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 기존 후드 시스템의 경우 설계변경 된 모델에 비해 문제점이 발생하였으며, 덕트의 형상과 각도 및 리듀서의 설계에 문제점 들어났다.

(2) 후드 입구 면에 유동저항이 발생하지 않는 구조로 되어야 하며, 모서리를 제거할 경우 보다 흡입 성능이 향상될 여지가 있는 가능성이 보였다.

(3) 후드와 덕트를 연결하는 리듀서의 경우 후드 축소관과 각도를 최소화 시키는 것이 흡입성능에 유리하다.

(4) 흡입성능을 나타내는 인자 중 압력차는 model-5가 가장 낮게 발생하고, 흡입풍속 또한 후드 입구 면에서 가장 균일한 흡입성능을 확보할 수 있다.

#### 후 기

본 논문은 2008년도 산학공동기술개발지원사업과 경상대학교 BK21 사업단의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Kim. B. G., Choi. H. W., Yong. H. T., and Lee. M. H., 2005, Horizontal air-jet effect on the natural convection around a range-hood system, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering Vol.17, No. 4, pp. 333-340.
2. Lim. K. B., Lee. K. S., and Lee. C. H., 2006, A numerical study on the flow characteristics of kitchen hood system, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering Vol. 18, No. 4 pp. 359-369.
3. Lim. K. B., Lee. K. S., and Lee. C. H., 2006, A numerical study on the characteristics of flow field, temperature and concentration distribution according to changing the shape of separation plate of kitchen hood system, Transactions of the KSME B, Vol. 30, No. 2, pp. 177-185.
4. Lee. S. S., Moon. J. H., Lee. T. G., Lim. Y. C., and Lee. J. H., 2004, Improvement of working environment by the space ventilation system in a large welding factory, SAREK winter conference, pp. 345-350.
5. Koo. N. Y., Lee. Y. K., and Young. Y. S., 2002, An experimental study on the air curtain range hood interrupting the diffusion of polluted air, SAREK winter conference, pp. 382-387.
6. Witt. P. J., Solnorda. I. C. G., Mittoni. L. J., Finn. S., and Pluta. J., 2006, Optimising the design of fume extraction hoods using a combination of engineering and CFD modelling, Applied Mathematical Modelling, Vol. 30, pp. 1167-1179.
7. Suh. J. S. and Yi. C. S., 2006, STAR-CD exercises text book, Inter-vision, Korea, pp. 297-344.