급기-흡기 국소환기시스템의 성능개선에 관한 수치해석

이 중 섭, 서 정 세*†, 윤 지 훈**
경상대학교 BK21사업단(첨단기계), *경상대학교기계항공공학부, **경상대학교 대학원

Numerical Analysis on the Improvement of Fume Mixing Ratio in the Push-Pull Local Ventilation System

Chung-Seob Yi, Jeong-Se Suh*†, Ji-Hoon Yoon**
2nd Stage BK21(AMAEEP), Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea
**School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, ERI, Jinju 660-701, Korea*
***Dept. of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea*

(Received June 29, 2010; revision received October 17, 2010)

ABSTRACT: Numerical analysis has been conducted to investigate the fluid flow and fume mixing ratio characteristics of scattering fume in a push-pull ventilation system and optimally improve the flow patterns of scattering fume in the existing ventilation system. This ventilation system has been simulated by using commercial CFD code. In the case of the existing system, although the air is sprayed from air-curtain to prevent the fume from being scattered in upper hood, the improved air supply hood can remove the fume from the wide area in the high pressure. It is verified that the deeper plating storage is more advantageous. Also, by installing the shied around the plating storage, the scattering of the fume to the atmosphere was prevented effectively by surrounding flux.

Key words: Zinc plating(아연도금), Local ventilation(국소환기), Push hood(급기후드), Pull hood (흡기후드)

기 호 설 명

A	: 덕트의 단면적 [m^2]
D_1	: 급기후드의 높이 [m]
D_2	: 흡기후드의 높이 [m]
F_1	: 후드의 전체높이 [m]
H	: 급기와 흡기후드 사이의 거리 [m]
K	: 누입한계 유량비
L_1	: 후드의 길이 [m]
m	: 안전계수
Q_1	: 풍량 [m^3/min]
V_1	: 풍속 [m/s]
V_t	: 반송속도 [m/s]
S	: 후드의 단면적[m^2]
V_g	: 흄의 비산속도 [m/s]
w_a	: 공기의 밀도 [kg/m^3]
w_g	: 흄의 밀도 [kg/m^3]
ζ.	: 흄의 혼합비, $w_g/(w_g+w_a)$
ϕ	: 속도 및 압력 변수

하첨자

1	: 후드의 급기부
2	: 후드의 흡기부

† Corresponding author
Tel.: +82-55-751-5312; fax: +82-55-757-5622
E-mail address: jssuh@gnu.ac.kr

1. 서 론

밀폐된 공간에서 유해가스 및 입자상 물질이 발생할 경우에 외부로 배출하는 환기기구가 필요하다. 생산 현장이나 지하공간 및 터널 등에서 광범위하게 사용되고 있는 환기는 외부가 아닌 곳에서 발생되는 공기오염물질을 과학적인 방법에 의해 제거시킴으로 인간과 설비에 피해를 줄여주는 역할을 하여 인간과 제반설비를 보호하게 된다. 특히 인간의 경우 산업환기의 중요성을 깨닫기 시작한 것은 사회적으로 이슈화 되었던 직업병에 관한 논란에서 출발하였다. 이에 따라 분야마다 적용되는 환기기준이 마련되었고, 설비에 대한 긍정적 인식을 가지게 되었고, 목적에 따라 일반적인 건출물에서 사용되는 환기시설은 신선한 공기를 공급할 목적으로 환기시설이 필요하며, 병원 등의 크린룸 및 무균실 등은 환자 및 연구자를 감염이나 미생물로부터 보호할 목적으로 환기시설의 필요성을 느끼게 되었다. 그러나 본 논문에서 주목하고 하는 환기시설은 산업환기로 생산활동과 더불어 발생하는 유해물질, 오염물질등 작업환경을 악화시키는 물질을 작업공간으로부터 가능한 빨리 제거하는 시스템에 국한되어 있다. 산업환기는 작업장의 공기 질을 개선할 목적으로 설치되고 있지만 작업환경개선의 근본적인 목적은 유해물질로부터 작업자의 건강을 보호하는 것에 주안점이 두어진다. 그 이유는 산업현장에서 발생되는 유기용제, 특정 화학물질, 중금속, 분진, 화재 및 폭발물질 등에 작업자가 노출되지 않도록 하기 위해서 산업현장의 시설이나 물질을 교체하거나 완전 격리시키는 방법을 채택하고 있다.[1-4]

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 대한 연구 및 실험이 일부 진행되었다.

이상섭[5] 등은 국내 조선소내 초대형 용접작업장의 작업환경 개선을 위해 수치해석을 적용하여 용접장의 내부 환기 시스템에 대한 기류와 흄 농도에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 공간환기 시스템이 정지한 경우 작업장 내부 공간에는 자연환기에 의한 기류가 유입되나 작업공간의 대부분 영역에서 흄 농도가 50 ppm 이상 발생하였지만, 환기시스템 가동 시 2.3~8.3 ppm으로 현저히 감소되었다고 보고하였다.

Witt[6]등은 CFD를 이용하여 흄을 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 흄 농도를 65% 저감시킬 수 있다고 보고하였다.

현재 플랜트 관련 업계의 경우 메이저 급 회사를 제외한 대다수 마이너 급 플랜트 회사의 경우 그 설계 및 접근방법이 현장경험과 과거 유사설비에 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 실수를 범할 수 있는 내재적 오류를 안고 있음을 설계자는 인지하고 있어야 된다. 이러한 경우를 대비하기 위해 기존 설계방식의 경우 과대설계를 하게 되고 이로 인한 손실은 굳이 서술할 필요성이 없겠다. 이러한 오류를 미연에 감지하고, 최적설계를 도출하기 위해 앞서 수행된 연구[7]를 기반으로 현행 시스템의 설계오류를 전반적으로 수정하여 현 상태와 설계변경된 시스템에 국한하여 전산유체역학(CFD)을 활용하여 보다 유체거동 및 혼합분포에 대하여 연구하고자 한다.

본 연구는 아연도금공장에서 운용중인 흄(fume) 제거를 위한 기존의 급기-흡기(push-pull) 국소 환기시스템을 개선하기 위해 환기시스템의 구조를 변경하였을 경우에 대해 유동특성 등을 파악하고자 한다.

2. 기존시스템 문제 및 개선

기존에 설치된 후드의 형상이 유체공학적인 측면에서 불합리한 구조를 가지고 있었고, 이로 인한 후드 흡기면의 압력 불평형을 초래하여 각각의 후드에서 흡입되는 흡기속도가 일정하지 않은 것으로 나타났으며, 다음과 같은 항목에서 문제점이 지적

되었다.[7]

(1) 송풍기와 가장 멀리 떨어져 있는 흡기후드(1번 후드)의 경우 나머지 후드와 동일한 형상을 가지고 있고 덕트의 불합리한 구조로 인해 흡기속도가 가장 빨라 나머지 후드와의 속도편차가 심각하게 발생되었다.

(2) 후드와 메인덕트를 연결하는 리듀서로 인해 후드에서 흡입되어 매니폴드로 지나갈 때 각도변화에 의한 유동정체 구간이 발생되어 흡입성능에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

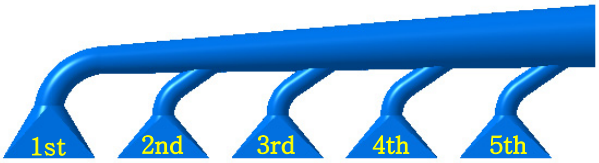
(3) 각각의 메인덕트를 연결하기 위해 계단식 원형 덕트(duct)를 채택함에 따라 축소-확대관 형식이 반복되는 형태였다. 메인덕트가 확대부와 연결되었고, 여기로 유입되는 유동이 확대관 벽면을 타고 회전하면서 2차 유동이 발생되어 확대관을 빠져나가게 되며, 이때 확대관 입구영역 가장자리에 유동 재순환이 발생하게 되어 빠져나가는 유동을 반대로 잡아당기는 역할을 하고 있었다.

기존의 흡기후드 시스템을 Fig. 1과 같이 개선하였고, 각 후드 입구면에 대한 압력과 속도를 식(1)과 같이 면적 평균하여 Fig. 2와 같이 나타내었다. 따라서 결과에서 보듯이 개선된 시스템의 경우 각각의 후드에서 일정한 압력과 속도를 유지하고 있음을 확인 할 수 있었다.

$$\phi_{m,i} = \frac{\int \phi_i \cdot dS_i}{\int dS_i} \tag{1}$$

여기서 ϕ_i는 각 후드의 국소 속도 또는 압력 값이며, S_i는 각 후드의 단면적, $\phi_{m,i}$은 각 후드의 면적 평균값이다.

(a) before (existing system)



(b) after (improved system)

Fig. 1 Geometry of pull hood system.

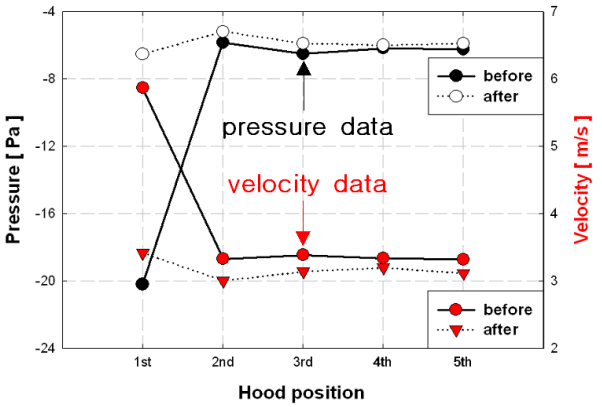


Fig. 2 Distributions of pressure and velocity in the hood inlet.

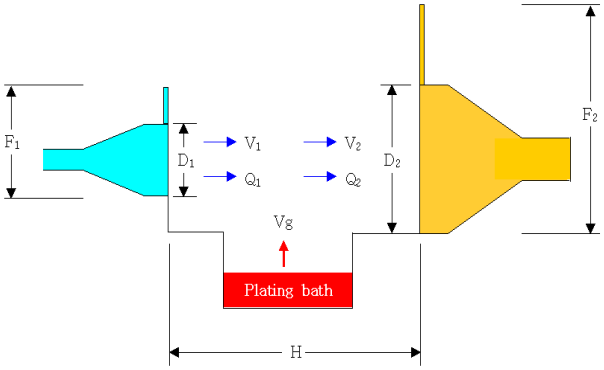


Fig. 3 Schematic of push-pull ventilation system with design parameter.

기존시스템을 개선하기 위하여 시스템 전반에 대한 개선안을 아래와 같이 마련하게 되었고, Fig. 3은 기하학적 설계변수를 나타내고 있다.

2.1 급기풍량

$$Q_1 = V_1 \times D_1 \times L_1 = 3\ \mathrm{m/s} \times 0.3\ \mathrm{m} \times 7.5\ \mathrm{m} = 405\ \mathrm{m^3/min} \tag{2}$$

여기서 D_1은 H의 1/7로 설정하였고, F_2/H와 H/D_1에 대한 값은 급기-흡기형 국소환기장치에서 F_2/H에 대한 V_1/V_g의 산출도표를 사용하여 V_1/V_g 값을 구한 후 그 결과 값에 V_g 값을 곱하여 급기풍속을 구하였다.

$$\frac{F_2}{H} = \frac{2\ \mathrm{m}}{2\ \mathrm{m}} = 1,\quad \frac{H}{D_1} = \frac{2\ \mathrm{m}}{0.3\ \mathrm{m}} = 6.67,\quad \frac{V_t}{V_g} \fallingdotseq 1.5$$

따라서 $V_1 = 1.5 \times V_g(2\ \mathrm{m/s}) = 3\ \mathrm{m/s}$ (3)

2.2 흡기풍량

$$Q_2 = Q_1[1+(m\times K)] = 405[1+(1.19\times 2.7)]$$
$$= 1{,}706\ \mathrm{m^3/min} \quad (4)$$

여기서 m은 안전계수를 나타내며, K는 누입한계 유량비를 나타낸다.

$$m = \frac{L+2D_1}{L}\times 1.1 = \frac{7.5+(2\times 0.3)}{7.5}\times 1.1$$
$$= 1.9 \quad (5)$$

$$K = 0.28\left(\frac{H}{D_1}\right)^{1.1}\left\{0.46\left(\frac{F_2}{D_1}\right)^{-1.1}+0.13\right\}\times \left\{5.8\left(\frac{v_g}{v_1}\right)^{1.4}\left(\frac{H}{D_1}\right)^{0.25}+1.0\right\}$$
$$= 2.26\ \{0.19\}\{6.3\}$$
$$= 2.7 \quad (6)$$

2.3 Duct 단면적과 직경

$$A = \frac{Q}{V_t} = \frac{1800\,(\mathrm{m^3/min})}{20\,\mathrm{m/s}}$$
$$= \frac{30\,(\mathrm{m^3/s})}{20\,(\mathrm{m/s})} = 1.5\ \mathrm{m^2} \quad (7)$$

여기서 V_t는 반송속도를 나타내며, A는 덕트의 단면적을 나타낸다. 덕트는 원형으로 설계하고 직경 D는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4\times 1.5}{3.14}} = 1.38\ \mathrm{m} \quad (8)$$

3. 수치해석 방법

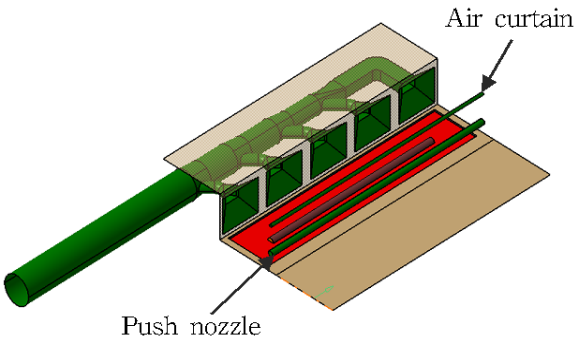
3.1 지배방정식

본 연구에서는 도금 공정시 유해물질의 배출에 대한 유동현상을 기술하는 지배방정식에 대하여 3차원 정상상태의 난류유동으로 가정하였으며, 작업장 주위에서의 흄의 혼합비(ζ)를 예측하기 위해 혼합 방정식을 도입하여 계산을 수행하였다. 도금 작업장 내부의 공기속도로 표현되기 때문에 공기유동에 관한 연속 방정식, 운동량 방정식, 난류운동에너지 방정식 그리고 난류운동량 소산 방정식이 함께 계산되었다. 또한 유동장 내의 밀도변화에 대한 부력항을 사용하기위해 에너지 방정식도 포함되어 있다. 난류모델은 이미 공학적으로 타당성을 검증 받은 표준 $\kappa-\varepsilon$모델을 사용하였다. 이러한 일련의 방정식에 대한 계산은 범용 CFD 코드인 STAR-CD를 사용하여 계산을 수행하였다.

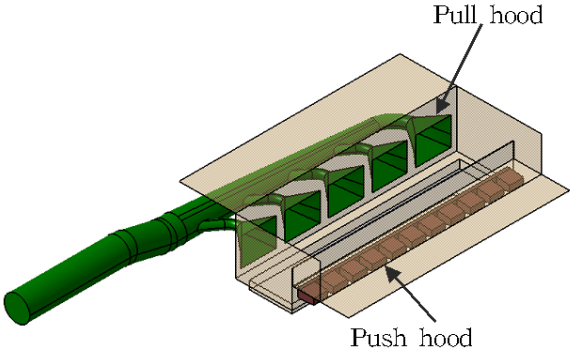
3.2 경계조건

도금 작업장 주위가 대기압 하에 있는 것으로 가정하였다. 또한 벽면에서의 경계조건은 모두 점착조건을 적용하여, 벽면에서의 난류운동에너지의 확산은 없도록 하였다. 현재 아연도금 공장에 설치되어 있는 국소환기 시스템을 수치해석시 필요 없는 부분은 단순화시켜 계산시 불필요한 격자의 생성을 억제하고자 하였다.

Fig. 4는 본 연구에 사용된 시스템의 계산영역을 나타내고 있다. Fig. 4(a)의 경우 기존 시스템에서 도금욕조의 길이 7500 mm, 폭은 1500 mm이며, 5개의 흡기후드가 설치되어 있다. 또한 급기후드의 경우 기존시스템은 급기노즐과 에어커튼을 각각 설치하



(a) existing system



(b) improved system

Fig. 4 Geometry of calculation domain.

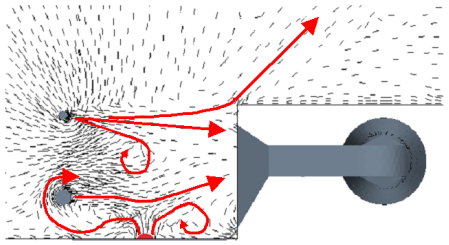
여 분사되는 속도를 각각 5 m/s와 20 m/s로 토출되고, 에어커튼의 경우 흡기후드 쪽으로 5° 기울어져 토출되도록 설계되어있다. 한편 흡기후드의 경우 36 m/s로 흡입된다. Fig. 4(b)의 경우 개선된 시스템으로 후드와 덕트의 형상이 설계변경 되었고 분사노즐을 대신하여 급기후드를 설치하였다. 또한 도금욕조 깊이를 300 mm로 깊게 설치하였다. 각각의 급기후드 입구에서 3 m/s로 토출되며, 흡기후드에서 44.7 m/s로 흡입되도록 설계하였다. 여기서 토출면에서의 속도는 약 3 m/s 정도로 배출되기 때문에 앞서 설계된 급기유속과 유사하였다. 도금조 내의 용융도금액은 1000 K로 유지된다고 가정하였으며, 주변의 벽은 500 K로 가정하였다. 또한 파이프에서 비산되는 흄은 염화수소(HCl)로 가정하여, 2 m/s로 수직방향으로 비산되는 것으로 가정하였다.

4. 수치해석 결과 및 고찰

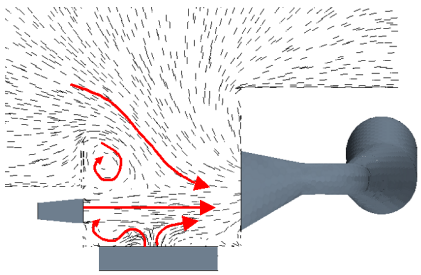
개선된 시스템에 대한 수치해석을 하여 다음과 같은 결과들을 도출할 수 있었다.

Fig. 5는 중심단면에 대한 속도분포를 나타내고 있다. 결과에서 보듯이 에어커튼에서 분사된 공기는 흡기후드 상부에 일부 충돌한 후 대기쪽으로 반사되어 빠져나가는 것을 확인할 수 있었다. 또한 노즐과 에어커튼 사이의 공간에서 대기 쪽에서 공기가 유입되기 때문에 유동이 복잡하게 발생됨을 알 수 있었다. 반면 개선된 시스템의 경우 대기에서 원활하게 흡입되고, 급기후드에서 토출되는 유동이 흡기후드 입구까지 외부유동의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 따라서 기존시스템에 비해 환기능력이 뛰어난 것으로 판단된다.

Fig. 6은 기존시스템에 대한 해석결과를 입자추적한 결과를 나타내고 있다. 계산결과 피도금소재인 파이프에서 발생되는 흄이 급기노즐 뒤로 이동하면서 다시 후드쪽으로 빨려 들어가는 것을 확인할 수 있었다. 이는 급기노즐에서 분사되는 유속이 상대적으로 크기 때문에 속도기울기 차에 의한 와류가 시계방향으로 발생하였기 때문에 흄이 밖으로 밀려나가는 현상이 발생하였다. 또한 에어커튼에서 분사되는 공기가 흄의 비산을 차단하고 있는 것으로 확인되어 기본성능은 만족하고 있음을 알 수 있었다. 이러한 이유는 급기후드에서 토출되는 유동장형태가 기존시스템에서 밀어주는 유동이 선(line)이라면 개선된 시스템의 경우 면(area)개념으로 흄을 밀어주는 압력장이 넓게 형성되기 때문으로 판단된다. 따라서 Fig. 7에 나타낸 흄의 혼합분포면에

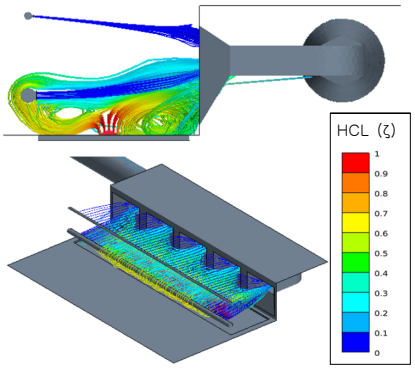


(a) existing system

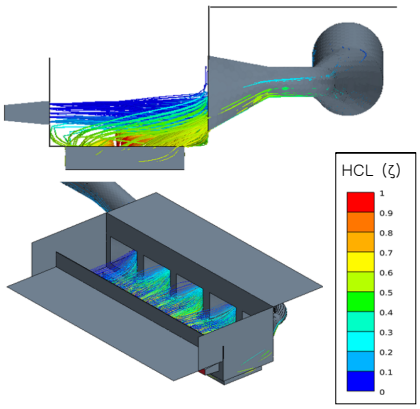


(b) improved system

Fig. 5 Velocity vector at the center of hood.

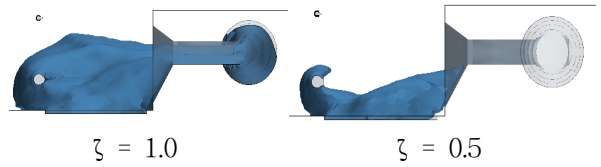


(a) existing system

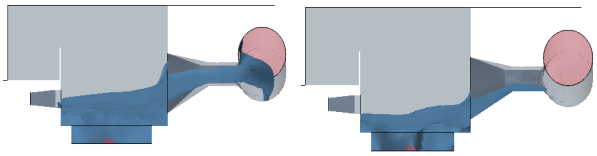


(b) improved system

Fig. 6 Particle tracking of ventilation system.



(a) existing system



(b) advanced system

Fig. 7 Variation of iso-surface of mixing ratio of fume in ventilation system.

서 개선된 시스템의 경우 흄의 비상영역이 기존 시스템에 비해 상당히 좁아졌음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

기존 환기시스템에 대해 CFD를 이용하여 유동해석 등을 분석한 결과 기존 시스템의 경우 비록 에어커튼에서 분사되는 공기가 후드 상부에서 흄이 비산되는 것을 잘 막고 있지만, 개선된 시스템에서 급기후드를 설치하는 것이 넓고 큰 압력으로 흄을 제거시킬 수 있었으며, 그리고 도금조가 깊을수록 유리함을 확인할 수 있었다. 또한 도금조 주변에 차폐막을 설치함으로써 주변 유동에 의한 대기로의 흄 이동을 효과적으로 방지할 수 있었다.

후 기

본 연구의 일부는 2단계 BK21 대학원 육성사업지원으로 이루어 졌으며, 이에 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. 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.
5. 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.
6. Witt, P. J., Solnorda, 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. Yi, C. S., Jang, S. C. and Choi, J. H., 2009, Numerical Analysis on Hood Shape Improvement of Local Ventilation System, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering Vol. 21, No. 4, pp. 260-265.