

Push-Pull 국소환기시스템 개선에 관한 수치해석

이 증 섭[†], 장 성 철, 윤 강 로
삼원기술(주) 기술연구소

A Numerical Analysis on Improvement of Push-Pull Local Ventilation System

Chung Seub Yi[†], Sung Cheol Jang, Kang Ro Yoon
[†] Samwon Tech co.,LTD, Gimhae 586-1, Korea

ABSTRACT: This study represents numerical analysis on the fluid flow and concentration characteristics by scattering fume at push-pull ventilation system. And the principal point is making optimum on improve an existing ventilation system. This phenomenon simulated about local ventilation system by using commercial CFD tool and base on these fact has find improvements. Advanced model shows most low different pressure and velocity which are suction capability at inlet surface of pull hood has most uniformity. When compared with existing model, Improved model has more good ventilation performance.

Key words: Push-Pull(급-배기), Local ventilation(국소환기), Hood(후드)

기 호 설 명

- D_1 : Push 측 토출높이 [m]
- D_2 : Pull 측 흡입높이 [m]
- F_1 : Push 측 전체높이 [m]
- F_2 : Pull 측 전체높이 [m]
- L_1 : Push 노즐의 길이 [m]
- L_2 : Pull hood의 길이 [m]
- Q_1 : Push 측 급기풍량 [m^3/min]
- Q_2 : Pull 측 흡기풍량 [m^3/min]
- V_1 : Push 측 급기풍속 [m/s]
- V_2 : Pull 측 흡입풍속 [m/s]
- H : Push와 Pull 사이의 거리 [m]
- V_g : Fume의 비산속도 [m/s]

1. 서 론

본 연구는 기존 자사에서 설계된 Push-Pull 국소 환기시스템이 아연도금공장에서 운용중인 fume 제거에 관한 국소환기 시스템에 대한 자사 기존 시스템에 대한 설계변경에 따른 유동현상을 파악하고자 한다.

일반적으로 환기라 함은 밀폐된 공간에서 유해 가스 및 입자상 물질을 외부로 배출하는 것이라 할 수 있다. 생산 현장이나 지하공간 및 터널 등에서 광범위하게 사용되고 있는 환기는 외부가 아닌 곳에서 발생하는 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 건축물에서 사용되는 환기시설은 신선한 공기를 공급할 목적으로 환기시설이 필요하며, 병원 등의 크린룸 및 무균실 등은 환자 및

[†] Corresponding author
Tel.: +82-55-340-7183; fax: +82-55-342-9038
E-mail address: cs_yi@hotmailil.com

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 것이 주안점이 두어진다. 그 이유는 산업현장에서 발생하는 유기용제, 특정 화학물질, 중금속, 분진, 화재 및 폭발물질 등에 작업자가 노출되지 않도록 하기 위해서 산업현장의 시설이나 물질을 교체하거나 완전 격리시키는 방법을 채택하고 있다.¹⁻³⁾

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.

이상섭⁴⁾ 등은 국내 조선소내 초대형 용접작업장의 작업환경 개선을 위해 수치해석을 적용하여 용접장의 내부 환기 시스템에 대한 기류와 fume 농도에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 공간환기 시스템이 정지한 경우 작업장 내부 공간에는 자연환기에 의한 기류가 유입되거나 작업공간의 대부분 영역에서 fume 농도가 50 ppm 이상 발생하였지만, 환기시스템 가동 시 2.3~8.3 ppm으로 현저히 감소되었다고 보고하였다.

P.J.Witt⁵⁾ 등은 CFD를 이용하여 fume을 배출시키는 hood의 최적형상에 대한 연구를 수행하였다. 다른 선행 연구자들은 실내의 오염물질을 신속하고 효과적으로 배출시키는데 중점을 두었다면 Witt는 hood 내부까지 흡입되는 것을 고려하여 hood의 형상을 최적화 시키고자 하였다. 그가 제안한 hood의 경우 충전포트로부터 달아나는 fume 농도를 65 % 저감시킬 수 있다

고 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 이로인한 손실은 굳이 서술할 필요성이 없겠다. 이러한 오류를 미연에 감지하고, 최적설계를 도출하기 위해 앞서 수행된 연구⁶⁻⁷⁾를 기반으로 현행 시스템의 설계오류를 전반적으로 수정하여 현 상태와 설계변경된 모델에 국한하여 전산유체역학(CFD)을 활용하여 보다 유체거동 및 농도분포에 대하여 연구하고자 한다.

2. 기존시스템 문제 및 개선

기존에 설치된 hood의 형상이 유체공학적인 측면에서 불합리한 구조를 가지고 있었고, 이로 인한 hood 흡기면의 압력 불평형을 초래하여 각각의 hood에서 흡입되는 흡기속도가 일정하지 않은 것으로 나타났으며, 다음과 같은 항목에서 문제점이 지적되었다.

- (1) 송풍기와 가장 멀리 떨어져 있는 pull hood(1번 후드)의 경우 나머지 hood와 동일한 형상을 가지고 있고 duct의 불합리한 구조로 인해 흡기속도가 가장 빨라 나머지 hood와의 속도편차가 심각하게 발생되었다.
- (2) Hood와 main duct를 연결하는 reducer가 hood에서 흡입되어 매니폴드로 지나갈 때 각도변화에 의한 유동정체 구간이 발생하고, 이로인한 흡입성능에 미세한 영향을 미치는 것으로 판단된다.
- (3) 각각의 main duct를 연결하기 위해 계단식 원형 duct를 채택함에 따라 축소-확대관 형식이 반복되는 형태였다. Main duct가 확대부와 연결되어 유입되는 유동이 확대관 벽면을 타고 회전

하면서 secondary flow가 발생하면서 확대관을 빠져나가며, 이때 확대관 입구영역 가장자리에 recirculation이 발생하게 되어 빠져나가는 유동을 반대로 잡아당기는 역할을 하고 있었다.

기존의 pull hood 시스템을 Fig. 1과 같이 개선하였고, 각 hood 입구면에 대한 압력과 속도를 식(1)과 같이 면적 평균하여 Fig. 2와 같이 나타내었다. 여기서 ϕ 는 압력과 속도를 나타내는 변수이다. 따라서 결과에서 보듯이 개선된 모델의 경우 각각의 hood에서 일정한 압력과 속도를 유지하고 있음을 확인 할 수 있었다.

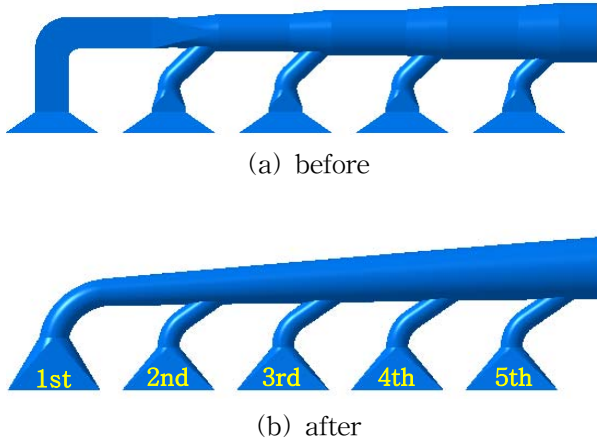


Fig. 1 Geometry of improved pull hood design.

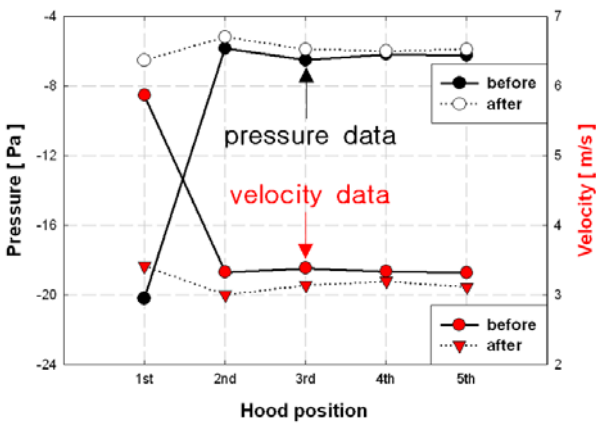


Fig. 2 Comparisons of pressure and velocity distribution in hood inlet face.

$$Mean = \frac{\sum_i \phi_i \cdot dS_i}{\sum_i S_i} \quad (1)$$

기존모델⁶⁻⁷⁾을 개선하기 위하여 다음과 시스템 전반에 대한 개선안을 아래와 같이 마련하게 되었고, Fig. 3은 기하학적 설계변수를 나타내고 있다.

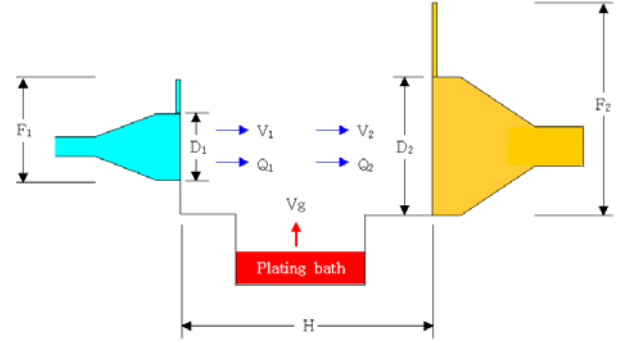


Fig. 3 Schematic of push-pull ventilation system for design parameter

2.1 급기풍량

$$Q_1 = V_1 \times D_1 \times L_1 = 3 \text{ m/s} \times 0.3 \text{ m} \times 7.5 \text{ m} = 405 \text{ m}^3/\text{min} \quad (2)$$

여기서 D_1 은 H 의 1/7로 설정하였고, F_2/H 와 H/D_1 에 대한 값은 Push-Pull형 국소환기장치에서 F_2/H 에 대한 V_1/V_g 의 산출도표를 사용하여 V_1/V_g 값을 구한 후 그 결과 값에 V_g 값을 곱하여 급기풍속을 구하였다.

$$\frac{F_2}{H} = \frac{2 \text{ m}}{2 \text{ m}} = 1, \quad \frac{H}{D_1} = \frac{2 \text{ m}}{0.3 \text{ m}} = 6.67, \quad \frac{V_1}{V_g} \approx 1.5$$

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

2.2 흡기풍량

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

여기서 m 은 안전계수를 나타내며, K 는 누입한계 유량비를 나타낸다.

$$m = \frac{L + 2D_1}{L} \times 1.1 = \frac{7.5 + (2 \times 0.3)}{7.5} \times 1.1 = 1.19 \quad (5)$$

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

2.3 Duct 단면적과 직경

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

여기서 V_t 는 반송속도를 나타내며, A 는 duct의 단면적을 나타낸다. Duct는 원형으로 설계하고 직경 D 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 1.5}{3.14}} = 1.38 m \tag{8}$$

3. 수치해석 방법

3.1 지배방정식

본 연구에서는 도금 공정시 유해물질의 배출에 대한 유동현상을 기술하는 지배방정식에 대하여 3차원 정상상태의 난류유동으로 가정하였으며, 작업장 주위에서의 fume 농도분포를 예측하기 위해 농도방정식을 도입하여 계산을 수행하였다. 농도 방정식에는 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 사용하기 위해 에너지 방정식도 포함되어 있다. 난류 모델은 이미 공학적으로 타당성을 검증 받은 표준 $\kappa-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 이러한 일련의 방정식에 대한 계산은 범용 CFD 툴인 STAR-CD를 사용하여 계산을 수행하였다.

3.2 경계조건

도금 작업장 주위는 대기압이 작용하고 있는 것으로 가정하였다. 또한 벽면에서의 경계조건은 모두 점착조건인 No-slip 조건을 적용하여, 벽면에서의 난류운동에너지의 확산은 Zero가 되도록 하였다. 현재 아연도금 공장에 설치되어 있는 국

소환기 시스템을 수치해석시 필요없는 부분은 단순화시켜 계산시 불필요한 격자의 생성을 억제하고자 하였다.

Fig. 4는 본 연구에 사용된 계산모델을 나타내고 있다. (a)의 경우 기존모델로서 도금욕조의 길이 7500 mm, 폭은 1500 mm이며, 5개의 pull hood가 설치되어 있다. 또한 push hood의 경우 기존모델은 push nozzle과 air-curtain을 각각 설치하여 분사되는 속도를 각각 5 m/s와 20 m/s로 토출되고, air-curtain의 경우 pull hood쪽으로 5° 기울어져 토출되도록 설계되어있다. 한편 pull hood의 경우 36 m/s로 흡입된다. (b)의 경우 개선된 모델로 hood와 duct의 형상이 설계변경되었고 분사 nozzle을 대신하여 push hood를 설치하였다. 또한 도금욕조 깊이를 300 mm로 깊게 설치하였다. 각각의 push hood 입구에서 5.97 m/s로 토출되며, pull hood에서 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 유지한다고 가정하였으며, 주변의 벽은 500 K로 가정하였다. 또한 파이프에서 비산되는 fume은 2 m/s로 수직방향으로 비산되는 것으로 가정하였다.

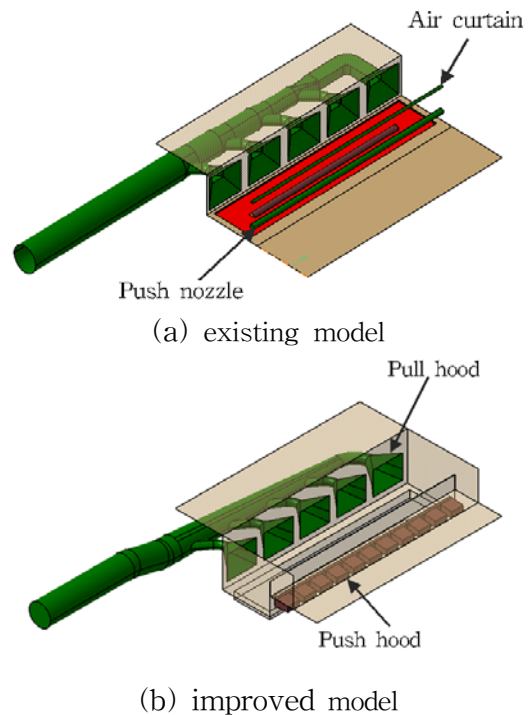


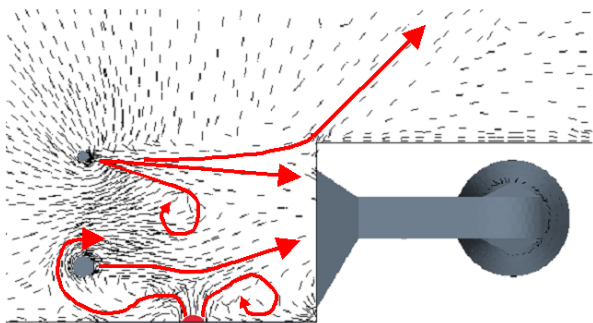
Fig. 4 Geometry of calculation domain.

4. 수치해석 결과 및 고찰

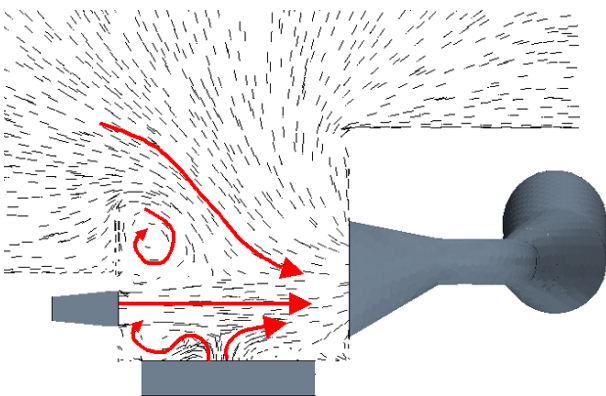
기존모델에 대한 개선안을 수치해석하여 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

Fig. 5는 중심단면에 대한 속도분포를 나타내고 있다. 결과에서 보듯이 air-curtain에서 분사된 공기는 pull hood 상부에 일부 충돌한 후 대기쪽으로 반사되어 빠져나가는 것을 확인할 수 있었다. 또한 nozzle과 air-curtain 사이의 공간에서 대기 쪽에서 공기가 유입되기 때문에 유동이 복잡하게 발생됨을 알 수 있었다. 반면 개선된 모델의 경우 대기에서 원활하게 흡입되고, push hood에서 토출되는 유동이 pull hood 입구까지 외부유동의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 따라서 기존모델에 비해 환기능력이 뛰어난 것으로 판단된다.

Fig. 6은 기존모델에 대한 해석결과를 입자추적 결과로 나타내고 있다. 계산결과 피도금소재인 파이프에서 발생하는 fume이 push nozzle 뒤로 이동하면서 다시 hood쪽으로 빨려 들어가는 것을 확인할 수 있었다. 이는 push nozzle에서



(a) existing model



(b) improved model

Fig. 5 Results of velocity vector at center.

분사되는 유속이 상대적으로 크기 때문에 속도 기울기 차에 의한 와류가 시계방향으로 발생하였기 때문에 fume이 밖으로 밀려나가는 현상이 발생하였다. 또한 air-curtain에서 분사되는 공기가 fume의 비산을 차단하고 있는 것으로 확인되어 기본성능은 만족하고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 7은 기존모델의 불합리한 요소를 개선한 모델에 대한 입자추적 결과를 나타내고 있다. 기존 모델에 비해 fume의 흡입이 매끄럽고, 흡입되어지면서 recirculation이 많이 억제되어 흡입압력 손실을 최소화 할 수 있는 구조임을 확인할 수 있었다.

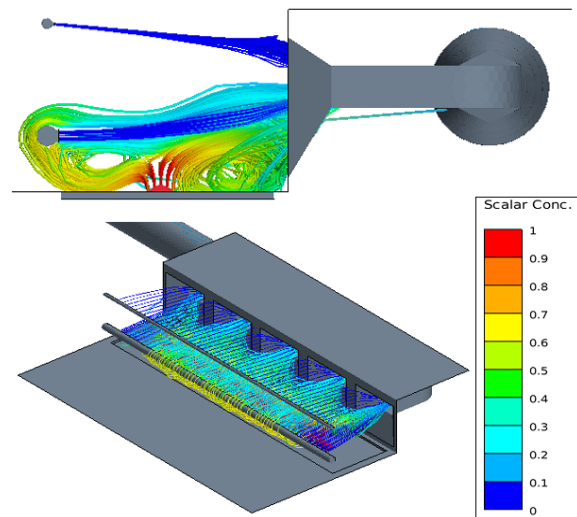


Fig. 6 Result of particle tracking for existing model.

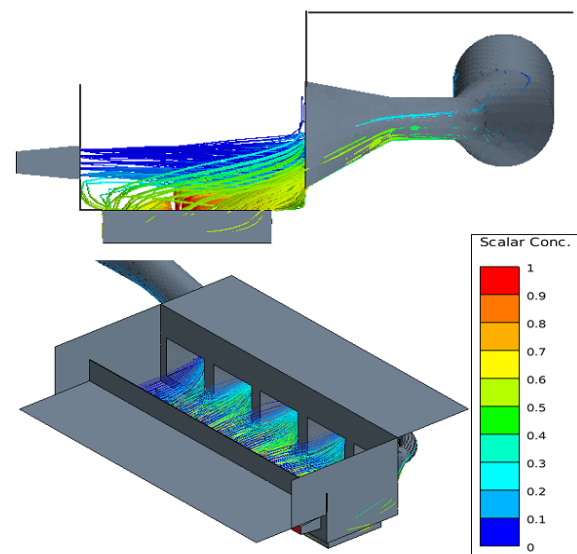
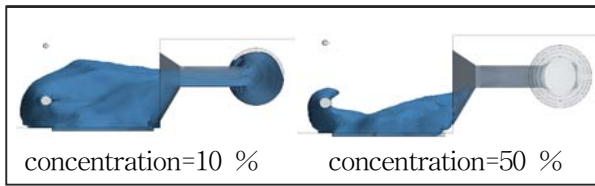
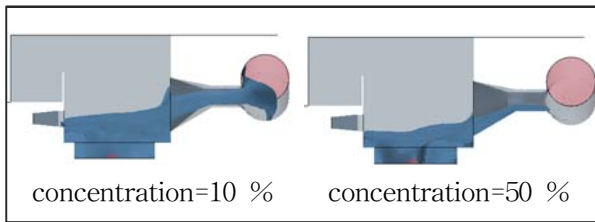


Fig. 7 Result of particle tracking for improved model.



(a) existing model



(b) advanced model

Fig. 8 Comparisons of iso-surface in ventilation system.

이러한 이유는 push hood에서 토출되는 유동장 형태가 기존모델에서 밀어주는 유동이 선(line)이라면 개선된 모델의 경우 면(area)개념으로 fume을 밀어주는 압력장이 넓게 형성되기 때문으로 판단된다. 따라서 Fig. 8의 iso-surface에서 확인되는 바와 같이 개선된 모델의 경우 push hood에서 직선으로 일정하게 밀어주고 있기 때문에 push hood 상부로 비산되는 것을 차단할 수 있는 구조임을 확인할 수 있었다.

4. 결론

기존모델에 대한 불합리한 CFD를 통해 분석한 결과 기존 환기시스템의 경우 설계 변경된 모델에 비해 문제점이 발생하였으며, Branch duct의 형상과 각도 및 reducer의 설계에 문제점 들어났다. 따라서 pull hood와 branch duct를 연결하는 reducer를 제외시켜 직결로 연결하는 것이 유리하다.

기존모델의 경우 air-curtain에서 분사되는 공기가 hood 상부에서 fume이 비산되는 것을 잘 막고 있지만 개선된 모델과 같이 push hood를 설치하는 것이 넓고 큰 압력으로 fume을 제거시키고, 도금조가 깊을수록 유리함을 확인할 수 있었다. 또한 도금조 주변 차폐막을 설치하여 주변 유동에 의한 대기층으로 이동하는 것을 방지하는 것이 바람직하다.

후 기

본 연구를 위해 실무적인 조언과 많은 도움을 주신 윤경로 본부장, 정홍렬 차장과 경상대학교 정한식, 정효민, 서정세 교수께 감사드립니다.

참고문헌

1. Byoungguk Kim, Hyounggwon Choi, Hotaek Yong, Myeongho Lee, 2005, Horizontal air-jet effect on the natural convection around a range-hood system, SAREK Vol. 4, pp. 333-340.
2. Kyungbin Lim, Kwangsub Lee, Changhee Lee, 2006, A numerical study on the flow characteristics of kitchen hood system, SAREK Vol. 18, pp. 359-369.
3. Kyoungbin Lim, Kwangsub Lee, Changhee Lee, 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, Journal of KSME B, Vol. 30, No .2, pp. 177-185.
4. Sangsub Lee, Junghwan Moon, Taegu Lee, Yuncheol Lim, Jaeheon Lee, 2004, Improvement of working environment by the space ventilation system in a large welding factory, Proceeding of the SAREK winter conference, pp. 345-350.
5. P. J. Witt, C. G. Solnordal, L. J. Mittoni, S. Finn, J. Pluta, 2006, Optimising the design of fume extraction hoods using a combination of engineering and CFD modelling, Applied Mathematical Modelling, Vol. 30, pp.1167-1179.
6. Chung seub Yi, Sung Cheol Jang, Kang Ro Yoon, Keon Je Oh, 2007, A Study of Local Ventilation Hood for Improvement with Zinc Plating Process, Proceeding of the SAREK Summer Annual Conference, pp. 1212-1218.
7. Chung seub Yi, Sung Cheol Jang, Kang Ro Yoon, Han Shik Chung, Hyo Min Jeong, 2007, A Study on Flow Analysis of Local Ventilation System with Zinc Plating Process, Proceeding of the SAREK Summer Annual Conference, pp. 1219-1224.