

# DMF를 사용하는 합성피혁 공장 인쇄공정의 산업환기시스템 평가 및 개선

이선우<sup>1\*</sup> · 김태형<sup>1</sup> · 김정만<sup>2</sup> · 김종철<sup>3</sup>

<sup>1</sup>창원대학교 환경공학과 · <sup>2</sup>동아대학교 예방의학교실 · <sup>3</sup>(주)벤텍

## A Valuation and Improvement of Industrial Ventilation System of Printing Process in Synthetic Leather Factory using Dimethylformamide

Sun Woo Lee<sup>1\*</sup> · Tae Hyeung Kim<sup>1</sup> · Jung Man Kim<sup>2</sup> · Jong Cheul Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Changwon National University

<sup>2</sup>Department of Preventive Medicine, Dong-A University, <sup>3</sup>Ventech Corp

In the recent years, health effect of dimethylformamide(DMF) has been one of critical industrial hygiene issues. There might be many factors to increase the exposure level of DMF. Among those factors, industrial ventilation would be one of the main factors. In this study, industrial ventilation systems of printing processes in synthetic leather factories were thoroughly surveyed and the improved ventilation systems were proposed. 7 synthetic leather factories were selected for this study. After the ventilation systems were visually inspected, each component of the system was tested by using the appropriate instruments. Hood face velocities, fan exhaust flow rates, fan static pressures, fan rotation rates, etc were measured. In addition, flow visualization techniques were used to observe flow patten around hoods and inside the factory buildings. After gathering all qualitative and quantitative information, the test results were analysed to see if any

improvement might be necessary. For the system to be improved, the re-design plans were made by using computational fluid dynamics softwares. The softwares used in this study were AIRPAK and STAR-CD. The effectiveness of the several improvement options were tested, then the best cost effective option was selected. Finally, the standard ventilation systems were proposed to minimize the exposure levels of DMF.

Key Words : Industrial Ventilation System, Dimethylformamide(DMF), Synthetic Leather Industry, Printing Process, Computational Fluid Dynamics

## I . 서 론

DMF(dimethylformamide)는 직물 염색, 염료, 페인트 제거 용액, 코팅, 인쇄, 접착 용액 등에서 수지나 용제로 주로 사용되고 있으며, 특히 일반 유기용제와 달리 물에 대한 용해성이 뛰어나고 원료 표면에 다공성을 부여하므로 합성피혁 제

조사업장을 비롯하여, 섬유코팅가공업 등에서 우레탄 또는 아크릴 섬유의 방사에 수지나 용제로 첨가해 사용한다(ACGIH, 2001; 노동부, 2003). 1993년 DMF의 사용으로 인한 독성간염이 처음 발생한 후(김기웅 등., 1993) 2000년대에 들어서 그 사용량이 증가함에 따라 독성영향이 더욱 증가하였다.

접수일 : 2009년 5월 8일, 채택일 : 2009년 6월 5일

\* 교신저자 : 이선우( 부산광역시 서구 동대신동 3가 1번지 동아대학교병원 건강검진센터 산업의학과, Tel: 051-240-5311, Fax 051-242-8428, E-mail lsw2201@hanmail.net)

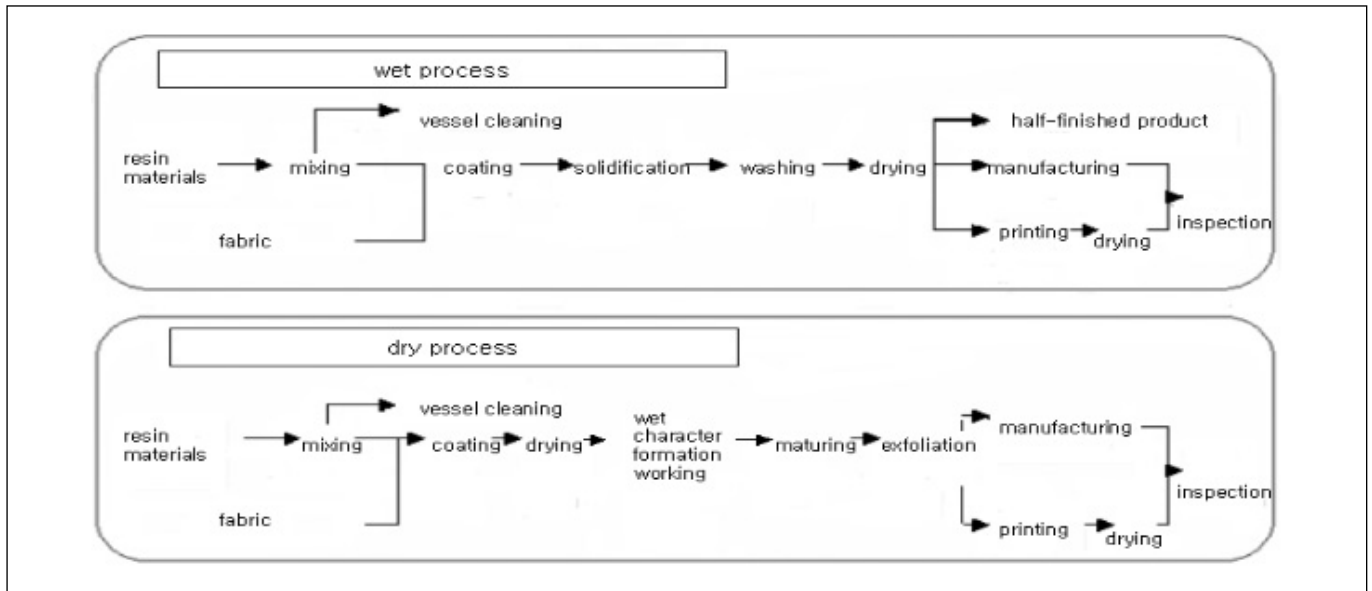


Fig. 1. Synthetic leather manufacturing processes

우리나라의 경우 2004년 DMF 사용량은 73,385,227 kg으로 여러 직종에서 사용되었으며 약 3,600명의 근로자가 노출되고 있다. 이들 근로자의 취업 업종은 화합물 및 화학제품제조업이 전체 취업 근로자수의 45.6%로 가장 많았고, 섬유제품제조업(봉제의복 제외)이 15.8%로 조사되었다(한국산업안전공단, 2007).

화합물 및 화학제품제조업에서 DMF를 가장 많이 사용하는 합성피혁제조업의 경우 가공방법에 따라 건식합성피혁과 습식합성피혁으로 구분되며 제조과정은 다음과 같다(Fig. 1). 습식합성피혁은 물탱크에서 용제를 추출해 내어 가공하는 것을 말하며 습식으로 가공할 경우 가공된 수지층 부분에 연속된 기공이 형성되어 통기성 및 투습성의 기능을 갖게 되며 천연피혁의 기능과 유사한 효과를 갖게 된다. 따라서 용제는 물과 100% 혼합이 되는 DMF 용제만을 사용하게 된다. 습식가공법은 폴리우레탄수지의 코팅에 적합한 점도를 형성하기 위해 DMF 및 각종 첨가제를 섞어 1~2시간 혼합하는 배합공정을 통해 코팅액을 조제한 후 이를 원단 표면에 코팅하여 폴리우레탄 피막을 형성시키고 응고 및 수세 과정에서 물속에 DMF를 추출시킨 후 건조시킨다. 이 후 반제품으로 출고되거나 후처리공정인 가공 및 인쇄 공정을 거쳐 검사, 출고하게 된다.

건식합성피혁은 이름 그대로 물을 사용하지 않는 건식가공방법에 의해 제조된 피혁으로 직포나 부직포를 사용하여 단순히 용제의 증발에 의하여 가공하는 방식으로, 증발이 용이한 MEK나 톨루엔을 용제로 사용하며 DMF는 습식가공법에 비해 적게 사용한다. 건식가공법은 습식가공법과 달리 응고 및 수세과정이 없고, 원단에 종이 가 갖는 무늬를 부여하

기 위해 코팅, 건조 후 이형지와 원단을 합포시키는 수성품 작업이 이루어지며 이를 40~50℃에서 48시간 숙성하는 단계를 거치게 된다. 숙성된 원단에서 종이를 분리하는 박리공정을 거친 후 가공이나 인쇄 공정을 거쳐 검사, 출고하게 된다.

합성피혁 제조과정에서 근로자가 DMF에 노출될 수 있는 공정은 배합, 코팅, 응고, 수세, 건조공정임으로 알려져 있고(한국산업안전공단, 2006), 시간가중평균치(time weight average, TWA)의 기하평균(geometric mean, GM)농도는 인쇄 공정 세척작업이 9.82(5.69-18.26)ppm, 수세조 상부 유입구가 8.63(7.85-10.78)ppm, 함침조 세척공정 함침조 상부가 8.39(3.56-20.26)ppm, 배합공정 탈포기 용기상부는 7.86(4.33-17.42)ppm 순서로 인쇄공정에서 타 공정보다 DMF의 측정된 결과 농도가 높게 나타났다(이선우 등., 2008). 즉, 작업환경이 가장 열악하다고 판단하는 공정이 합성피혁 제조공정의 그라비아 인쇄공정이었다.

인쇄공정은 합성피혁 제조공정 중에서 후가공 공정에 속하며, 대부분의 인쇄공정의 경우 직접 도료를 묻힌 후 원단에 전사하는 직접코팅방식 인쇄기(direct gravure coater)를 사용하고 있다. 직접코팅방식 인쇄기에서 합성피혁의 색상을 교체할 때 마다 롤(roll)과 인쇄기를 세척하여야 하며, 이때 세척제로 사용되는 용제가 DMF이다. 이처럼 DMF를 세척제로 사용하는 이유는 다른 유기용제에 비해 세척력이 월등히 우수하기 때문이었다.

이선우 등(2008)이 인쇄공정의 DMF 발생 과정을 확인하기 위해 세척과정과 세척이 완료되고 30분경과 후에 DMF 발생 농도를 측정한 결과, 세척시 DMF가 기하평균 157.25(147.33-175.26) ppm으로 가장 많이 발생되며, 이후 잔류된 DMF에 의

해 인쇄과정에서도 지속적으로 기하평균 48.07(22.26-84.52) ppm이 발생되었다. 이것은 대표적인 DMF의 노출 공정으로 알려진 옹고, 코팅의 공정에서 조사된 노출수준과 비교하여 월등히 높은 수준이다.

2000년대에 들어서면서 우리나라 DMF사업장의 건강진단에 따른 독성간염으로 사망하는 근로자가 발생하면서 DMF 취급근로자들의 보건안전대책에 관한 관심이 높아지고 있는 현실이다. DMF의 대표적 질환인 간독성의 사망이나 급성 질환은 작업장의 작업환경과 관계있으며 특히, 효과적으로 기능을 하지 못하는 산업환기시스템과 관련이 많은 것으로 판단된다. DMF 취급사업장에 설치된 산업환기시스템의 대부분이 설계에 대한 고찰부족과 시공의 정밀도등이 결여되어 있어 충분한 제어효과를 발휘하지 못하고, 이로 인해 DMF 취급 근로자들이 건강에 위협을 받으며 작업하는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 DMF의 노출수준이 타 공정 보다 높은 그라비아 인쇄공정에 대하여 작업공정의 특성과 환기시스템의 문제점 등을 파악하여, 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 방법을 이용한 인쇄공정 및 기계에 적합한 산업환기시스템 시설의 설계 인자를 찾아내어 효과적인 방법의 산업환기시스템 효율 방안을 제시하고 하였다.

## II. 연구방법

### 1. 연구대상 및 기간

경기도 4곳, 인천광역시 1곳, 부산광역시 2곳 등 총 7곳 합성피혁 제조업 사업장의 그라비아 인쇄공정에 대하여 2006년 3월부터 2007년 3월까지 인쇄와 세척작업에 따른 DMF 사용 실태와 국소배기시설을 1차 조사하였고, 2007년 4월부터 2008년 4월까지 2차 실태 및 조사를 하였다.

### 2. 산업환기시스템 및 전산유체역학

#### 1) 인쇄공정의 후드 및 덕트 성능평가

##### (1) 후드 흡인유량 측정

후드의 흡인유량은 후드 개구면이나 덕트에서 측정하였다. 덕트에서의 유량 측정법은 피토투브(series 160, Dwyer, USA)와 열선풍속계(8386, TSI, USA)를 사용하였다. 후드와 덕트내에 흐르는 공기의 유속은 단면에 따라 일정하지 않으므로 산업환기매뉴얼(ACGIH, 2004)에 제시된 것과 같이 10 지점을 등면적으로 나누어 측정하는 “10-지점 횡단법(10-point traverse)”을 사용하였다. 공장 및 공정마다 후드 형태가 각각 다른데 따른 흡인유량의 변화폭이 넓어 유량을 범위로

나타내었다.

#### (2) 기류 가시화 실험

오염물질 발생원에서 저유속으로 분사시킨 후 기류 관찰을 통해 후드의 배기능력을 평가하는 연막발생기(ZR33 HIMASS, Jem, USA)와 스모크 테스트(Gastec M-801, JAPAN)를 이용한 기류 가시화 실험을 통하여 오염물질 발생에 따른 제어 능력을 평가하였다.

#### 2) 송풍기 성능평가 및 관리실태 조사

##### (1) 송풍기 유량측정

굴뚝을 통해 배기되는 송풍유량의 측정은 후드나 덕트의 유량 측정법과 동일하게 수행하였다.

##### (2) 송풍기 정압 측정

아네로이드 압력계(series 477, Dwyer, USA)를 사용하여 송풍기 전후의 압력 차이를 측정하였고, 송풍기 정압(fan static pressure, FSP)을 조사하였다. 송풍기 정압은 식 (a)와 같다.

$$FSP = SP_o - SP_i - VP_i \quad (a)$$

$SP_o$  : outlet static pressure (mmAq)

$SP_i$  : inlet static pressure (mmAq)

$VP_i$  : inlet velocity pressure (mmAq)

##### (3) 송풍기 회전수 측정법

송풍기 내부 임펠러(impeller)의 회전은 모터(motor)의 노후나 팬벨트의 늘어짐 정도에 따라 감소할 수 있으므로 임펠러 회전수의 확인이 송풍기 노후 및 유지관리 상태를 확인할 수 있는 중요한 자료이다. 송풍기 회전수의 측정은 접촉식 RPM meter(series 1026001, SHIMPO EE-1, JAPAN)를 이용하여 임펠러측 풀리(pulley)나 V-벨트에서 측정하였다.

##### 3) 공기정화장치 차압 측정

공기정화장치의 압력손실 측정은 현재 관리 상태뿐만 아니라 국소배기시스템에 걸리는 압력손실에 따른 송풍량 저하의 원인도 파악할 수 있기 때문에, 국소배기장치 실태 조사를 위해서는 반드시 측정해야 하는 항목이다(EPA, 1992; 이상권 등, 2004). 공기정화장치 차압은 전자식 아네로이드 압력계(series 477, Dwyer, USA)를 이용하여 공기정화장치 입구와 출구의 덕트 부위에 정압구를 뚫어 측정하였다.

##### 4) 전산유체역학 프로그램을 이용한 환기 개선방안 개발

표준 환기방안을 마련하기 위해 상용 전산유체역학 프로그램은 AIRPAK(ver. 2.1, Fluent Co.)과 STAR-CD (ver 3.26, CD-adapco Co.)으로 연구기간 내 신속하고 정확한 결과를 도출하기 위해 병행하여 사용하였고, 이산화 방법으로 유한체적법

(finite-volume method)을 사용하였다. 모든 수치 해석은 상류 차분 도식(upwind differencing scheme)을 이용하여 수행하였고, 난류모델은 Standard K- $\epsilon$ , 압력장을 구하기 위해 연속방정식과 운동량방정식을 조합시키는 방법으로 SIMPLE(Semi-Implicit Method Pressure- Linked Equations) 알고리즘을 사용하였다(명현국, 1997; 이재현, 1997).

공정별 현장 실태조사 결과를 토대로 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하기 위해 제어체적(control volume)의 설정이 필요하여 공정 주변 지형, 지물 배치를 조사하였고, 주계산영역이 되는 발생원(오염원 온도, 방해기류 등)을 형성하기 위해 현장 실태 조사시 측정된 발생원과 후드의 크기 및 제원을 파악한 후 경계조건 입력에 필요한 자료(오염원 온도, 방해기류 세기 등)를 측정하였다.

컴퓨터 시뮬레이션에서 경계조건을 설정하기 위해 발생원 표면의 온도를 비접촉식 적외선 온도계(Raytek ranger 3i, USA)로 측정하였고, 공정 주변 방해기류를 열선풍속계(8386, TSI, USA)로 측정하였다.

### III. 연구결과 및 고찰

#### 1. 산업환기시스템 관리 실태

##### 1) 후드

인쇄공정은 합성피혁 제품의 색상을 정밀하게 완성시키는 작업이기 때문에 인쇄기가 단독으로 운영되는 것이 아니라 2대 또는 3대가 연속적으로 배치되고, 인쇄공정마다 다양한 배기후드가 설치되어 있다(Fig. 2).

후드와 덕트내에 흐르는 공기유속은 불규칙적인 단면의 조건에 따라 일정하지 않으므로 유속은 그라비아 인쇄기 각 부분별 위치에 따라 설치되어 있는 후드를 10지점 등면적으로 나누어 측정하였다. 인쇄기 상부에 설치되어 있는 배기후드는 인쇄 후 건조로로 이동되는 합성피혁 표면에서 발생하는 유기화합물을 주로 배기시키고, 인쇄기 하부에 설치되는 배기후드는 인쇄조에 담겨 있는 도료에서 발생하는 유기화합물을 배기시키기 위해 설치되어 있다(Fig. 3).

각 인쇄기 위치별 후드 형태에 따른 흡인유량의 경우는 인쇄기 전면 상부 슬롯 후드는  $5 \sim 15 \text{ m}^3/\text{min}$  이하, 인쇄기 전면 하부 앞·양 측면 외부식 후드는  $10 \text{ m}^3/\text{min}$  이하, 인쇄기 후면 측방 외부식 후드는  $15 \text{ m}^3/\text{min}$  이하, 인쇄기 후면 하부 배기 후드의 외부식 후드(부분 배기)는  $5 \sim 15 \text{ m}^3/\text{min}$  이하, 슬롯 후드(전면 배기)는  $10 \sim 20 \text{ m}^3/\text{min}$  이하로 인쇄조 길이에 대한 유량 차이에 대비하여 배기후드의 환기 기능을 다하지 못하고 있는 실정이었다. 특히, 인쇄액 교체 전 청소작업시 인쇄의 다양한 작업내용에 따라 DMF를 사용하여 수작업으로 세척작업을 하는 경우, 현 가동중인 배기후드 유량은 기능을 다하지 못하고 있었다.

##### 2) 송풍기

인쇄공정과 관련된 총 20대의 송풍기를 조사한 결과 후드, 덕트 등과 연결된 송풍기는 모두 원심력 송풍기(centrifugal fan)였으며, DMF를 정화하기 위한 송풍기의 경우 높은 압력을 형성하는 후향날개형 송풍기(turbo fan)가 75%로 대부분이었고, 일부 타 공정의 수세조나 간헐적으로 사용되는 공정에서는 전향날개형 송풍기(sirocco fan)가 25% 설치되어 있었다.

국소배기장치 송풍기의 풍량 대비 효율을 분석한 결과 측

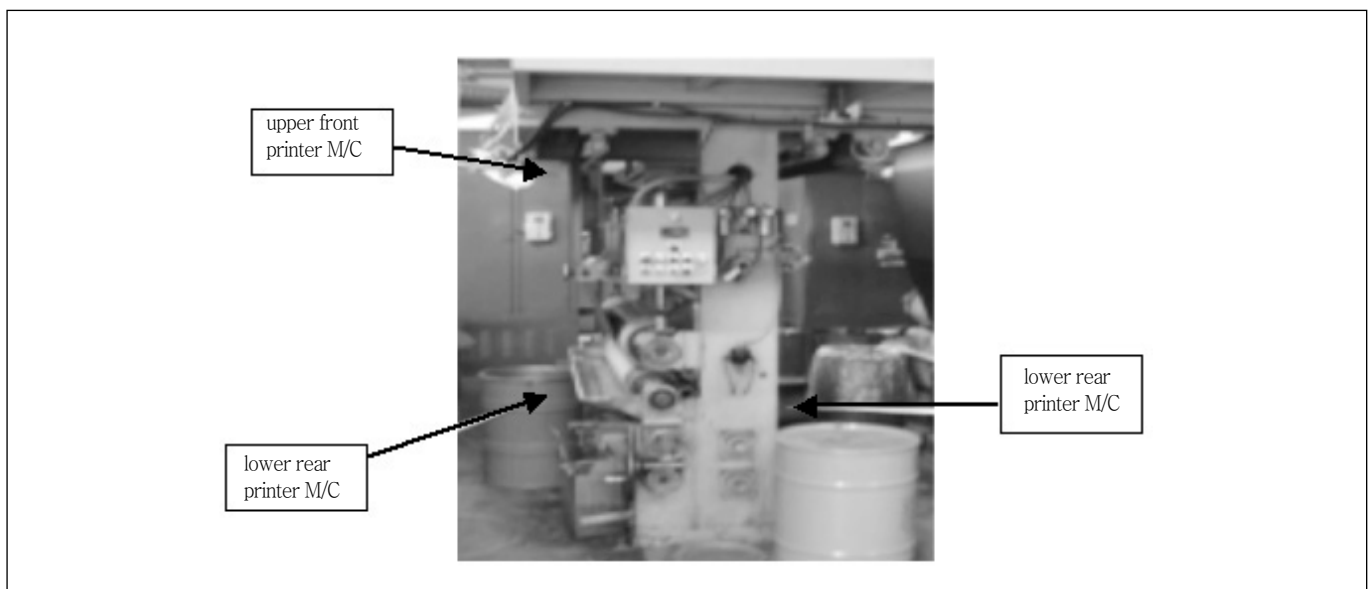


Fig. 2. Gravure printer M/C

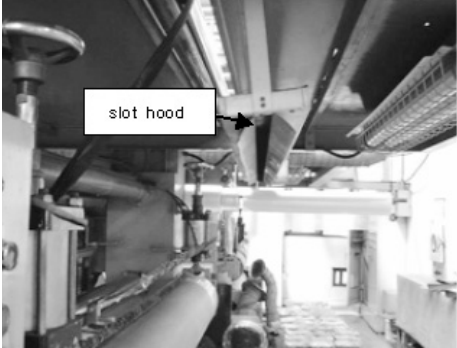
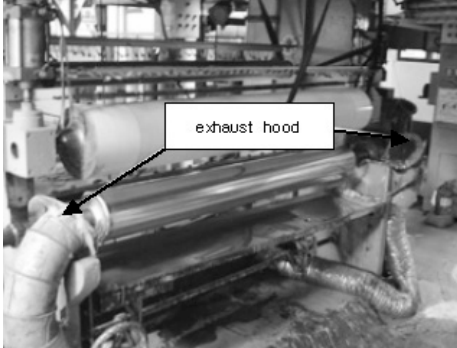



 <p>A black and white photograph showing a slot hood installed above a printing machine. A label 'slot hood' with an arrow points to the hood.</p>	 <p>A black and white photograph showing an exhaust hood installed on the side of a printing machine. A label 'exhaust hood' with an arrow points to the hood.</p>
<p>Upper front slot hood (5 ~ 15 m<sup>3</sup>/min or below)</p>	<p>Both sides of lower front exterior hood (10 m<sup>3</sup>/min or below)</p>
 <p>A black and white photograph showing a lateral rear exterior hood installed on the side of a printing machine. A flexible duct is connected to the hood.</p>	 <p>A black and white photograph showing a lower rear exhaust hood installed on the side of a printing machine. A flexible duct is connected to the hood.</p>
<p>Lateral rear exterior hood (15 m<sup>3</sup>/min or below)</p>	<p>Lower rear exhaust hood, exterior hood (5 ~ 15 m<sup>3</sup>/min or below)</p>
 <p>A black and white photograph showing a lower rear exhaust hood, slot hood installed on the side of a printing machine. A flexible duct is connected to the hood.</p>	
<p>Lower rear exhaust hood, slot hood (whole surface exhaustion) (10 ~ 20 m<sup>3</sup>/min or below)</p>	

Fig. 3. Various hoods installed in printer M/C

정대상 송풍기 20대중 풍량 대비 효율이 60%미만은 8대로 40% 비율을 차지하였고, 반면에 풍량 대비 효율이 80% 이상인 경우는 전체중 7대로 35%의 비율을 보였다. 평가된 결과가 국내 모든 DMF 사업장을 대표하는 것으로 판단할 수는 없겠지만 현장에 설치된 송풍기의 상당수가 효율이 부족한 상태임을 추정할 수 있어 송풍기 효율 향상을 위한 노력이 필요할 것으로 판단하였다. 송풍기 효율 저하의 원인을 확인하기 위하여 풍량 대비효율이 60% 이하로 낮은 8대의 송풍기에 대해 정압비(정격정압에 대한 측정정압)를 분석한 결과 송풍기 정격정압에 비해 측정정압이 작은 경우(정격정압 미만)가 4대로 50%를 차지하고 있었다(Table 1).

송풍량 비율이 60% 이하로 효율이 낮은 송풍기에서는 공통적으로 송풍기 회전수가 설계 값을 만족하지 못하는 것이 효율저하의 가장 큰 원인인 것을 알 수 있다. 송풍기 정압 비율이 100% 이하로 측정된 것은 회전수 감소로 인해 송풍기의 배기 풍량이 줄어든 결과로도 판단된다. 하지만, 초기 송풍기정압과 회전수를 측정할 자료가 없기 때문에, 송풍기가 초기부터 효율이 저하된 불량 송풍기인지 아니면 사용하면 효율이 저하된 것인지 정확한 원인을 파악할 수는 없는 실정이다.

미국산업환기매뉴얼(ACGIH, 2004)에 언급된 내용과 같이 송풍유량과 정압, 회전수의 초기 설계값과 측정값의 비교를 통하여 송풍기 성능 변화에 따른 송풍기 성능곡선으로 송풍기 문제점의 원인을 찾을 수 있었다.

송풍기 5번, 8번, 9번, 10번, 11번, 16번, 19번은 송풍량의 설계값에 비해 측정값은 감소하고, 이에 대비하여 정격정압이 설계값보다 측정값이 감소하는 경우이고, 2번, 3번, 4번, 6번, 7번, 12번, 13번, 14번, 15번, 17번, 18번, 20번은 송풍량의 설계값에 비해 측정값은 감소하나 이에 대비하여 정격정압이 설계값보다 측정값이 높은 값을 나타내는 경우였다. 1번의 경우와 같이 송풍량의 설계값이 측정값보다 낮은 경우는 송풍기 용량 설계값을 잘못 기재한 경우였다.

Fig. 4는 9번 송풍기의 성능곡선을 나타낸 것으로 송풍기 풍량이 감소하는 방향으로 곡선이 이동하여 운전점이 280m<sup>3</sup>/min에서 164m<sup>3</sup>/min으로, 송풍기 정압 역시 60mmAq에서 6mmAq로 감소하게 된다. 전형적인 송풍기 성능 감소에 의한 것으로, 국소배기장치를 관리하지 않고 방치하는 많은 공장에서 이런 현상이 발생되고 있다. 송풍기는 시간이 지남에 따라 송풍기 벨트의 장력이 감소하거나 임펠러에 이물질 부착 등 다양한 원인에 의해 효율이 감소하기 때문에 주기적인

Table 1. Fan test results

Fan No.	Volume flow rate(m <sup>3</sup> /min)			Static pressure(mmAq)			Rotational rate(rpm)			Fan type
	Designed	Measured	Ratio(%)	Designed	Measured	Ratio(%)	Designed	Measured	Ratio(%)	
#1	250	289	116	280	234	84	1,650	1,600	97	Turbo
#2	500	325	65	230	298	130	1,750	1,650	94	Turbo
#3	800	385	48	220	280	127	1,130	1,100	97	Turbo
#4	500	291	58	200	211	110	1,400	1,360	97	Turbo
#5	500	474	95	200	145	73	1,400	1,390	99	Turbo
#6	650	427	66	200	220	110	1,778	1,690	95	Turbo
#7	500	119	24	250	260	104	1,500	1,480	99	Turbo
#8	280	77	28	60	6	10	450	310	69	Sirocco
#9	280	164	59	60	6	10	450	325	72	Sirocco
#10	300	48	16	70	5	7	600	420	70	Sirocco
#11	300	46	15	70	5	7	600	435	73	Sirocco
#12	200	168	82	230	265	115	1,750	1,700	97	Turbo
#13	450	398	88	230	332	144	1,650	1,845	112	Turbo
#14	500	390	78	210	290	138	1,450	1,367	94	Turbo
#15	600	535	89	230	270	117	1,500	1,500	100	Turbo
#16	245	205	84	100	90	90	1,370	1,324	97	Turbo
#17	300	210	70	200	245	120	1,450	1,350	93	Turbo
#18	500	324	65	230	265	115	1,750	1,660	95	Turbo
#19	350	290	83	230	166	72	1,540	1,977	128	Turbo
#20	63	15	23	20	30	150	1,750	1,750	100	Sirocco

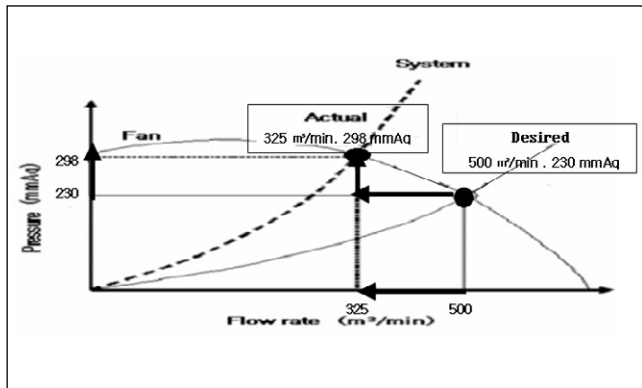


Fig. 4. Actual versus desired point of operation for #9 Fan

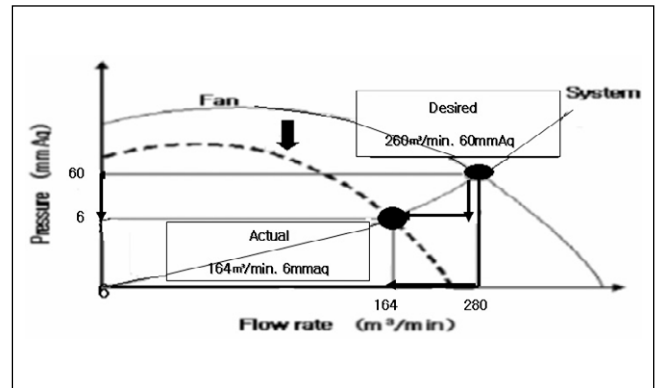


Fig. 5. Actual versus desired point of operation for #2 Fan

Table 2. Measurement results of activated carbon adsorption tower pressure losses

Fan No.	Volume flow rate(m³/min)			Static pressure(mmAq)			Air cleaning device differential pressure (mmAq)
	Designed	Measured	Ratio(%)	Designed	Measured	Ratio(%)	
#1	250	289	116	280	234	84	110
#2	500	325	65	230	298	130	256
#3	500	390	78	210	290	138	210
#4	600	535	89	230	270	117	190

관리가 반드시 필요하다. 따라서, 국소배기 장치 자체 검사 시에도 송풍기에 대한 사항은 반드시 측정을 통해 기록을 관리하고 송풍기 효율이 일정수준 이하로 저하된 경우에는 수리/보수 등의 조치가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 5는 2번 송풍기의 성능곡선을 다른 변화율로 나타낸 것으로 송풍기 풍량이 500m³/min에서 325m³/min으로 감소한 반면에 송풍기 정압은 230mmAq에서 298mmAq으로 증가됨을 알 수 있다. 이는 공기정화장치의 오랜 사용으로 인해 활성탄 층이 분진에 막혀있을 경우, 국소배기장치의 잘못된 시공으로 인해 압력손실이 과도하게 발생할 경우, 송풍기 용량 설계를 잘못된 경우 등의 다양한 원인에 의한 시스템 손실 증가로 인해 송풍량이 감소한 전형적인 현상이다. 국소배기 장치 점검을 통해 막힘 등의 정압 증가의 원인을 찾아 해결을 해주면 송풍량이 초기값을 회복할 수 있다. 즉, 송풍기 풍량 비율이 60% 이상인 송풍기는 송풍기 자체의 문제보다는 공기정화장치를 포함하는 산업환기시스템에서 정압이 증가하여 유량이 감소한 것이 주 원인임을 알 수 있었다(김태형 등., 2007).

송풍기 성능을 장시간 유지 가능하게 하는 방법으로 여과 필터의 원심회전에 의해 지속적으로 재생되는 외면 여과식 정화장치를 개발하여 필터의 탈진효율을 향상시켜 송풍기 성능을 장시간 유지 가능하게 하는 방법도 있었다(한국산업 안전공단, 2003).

결론적으로 본 연구대상 DMF 사업장의 경우 송풍기의 자체 성능 감소와 시스템의 과도한 압력손실로 송풍성능이 대부분 감소된 상황이었으며 현장에서의 지속적인 관리 감독이 필요하다고 판단되어졌다. 향후 송풍기의 지속적인 유지 관리를 위해서는 최초 설치 송풍량과 송풍정압 성능을 반드시 확인하여 자료를 확보하는 것이 중요하였는데(김태형 등., 2007), 초기 성능평가 자료를 확보하고 있는 업체가 없어 관리적 주의가 요구되었다.

### 3) 공기정화장치

인쇄공정에 설치된 산업환기시스템의 공기정화장치는 활성탄 흡착탑이 설치되어 있었다. 활성탄 흡착탑은 오염물질 발생량과 활성탄 교체주기에 따라 다소 차이가 있겠으나 일반적으로 50~150mmAq 범위에서 압력손실이 발생되도록 설계하고 있는데, 그 이유는 이보다 높은 경우 필요 이상의 고압력 송풍기가 요구되기 때문이다. Table 2는 현장 여건상 측정이 가능한 경우에 대해 활성탄 흡착탑의 압력손실을 측정 한 자료이다. 하지만 고농도의 유기용제가 발생되기 때문에 화재의 위험으로 드릴 작업을 할 수 없는 경우가 많아 자료가 충분하지 못하였다.

측정결과를 살펴보면 대부분 설계범위 보다 높은 공기정화장치 차압이 발생하여 송풍량이 감소하는 것을 확인할 수 있고 활성탄 교체시기가 지난 상태임을 간접적으로 확인할

수 있었다. 따라서 국소배기장치의 성능 향상이나 지역 주민의 악취 민원 문제를 고려하여 활성탄을 자주 교체하는 것이 필요하리라 판단되었다.

## 2. 전산유체역학 프로그램을 이용한 산업환기시스템 개선 방안

대상사업장 그라비아 인쇄공정에서의 산업환기시스템의 실태는 주로 상방향 캐노피 후드나 측, 하방향의 슬롯 후드와 동시에 덕트가 후드 역할을 겸하여 가동되고 있는 경우가 많이 있었으며, 현재의 산업환기시스템으로는 인쇄와 세척작업에서 DMF에 높게 근로자가 노출되고 있었다. 인쇄작업의 DMF증기 발생은 인쇄조(printing vessel)와 인쇄된 원단 그

리고 세척후 잔류된 DMF가 휘발되어 인쇄기 표면에 발생하는 경우이며, 세척작업은 합성피혁의 색상을 교체할 때마다 롤(roll)과 인쇄기를 DMF 용제를 사용하여 세척할 때와 세척제 자체의 휘발에 의해 DMF가 고농도로 발생하는 경우이다 (Fig. 6).

전산유체역학 프로그램을 통해 인쇄 및 세척공정에 적합한 특수한 형태의 후드를 설계하여 시간과 비용면에서 매우 효과적인 방법의 산업환기시스템 방식을 제시하고자 하였다. 또한 근로자가 인쇄와 세척작업을 수행하는 과정에서 인쇄기를 다양하게 조작하여 인쇄조 하부 배관, 인쇄조의 상하 이동, 진동 나이프의 회전 작업시 이에 방해되지 않는 표준화된 환기방안을 설계하고자 하였다.

인쇄기의 국소배기시설 경우, 인쇄기 상부 다중 슬롯 후드

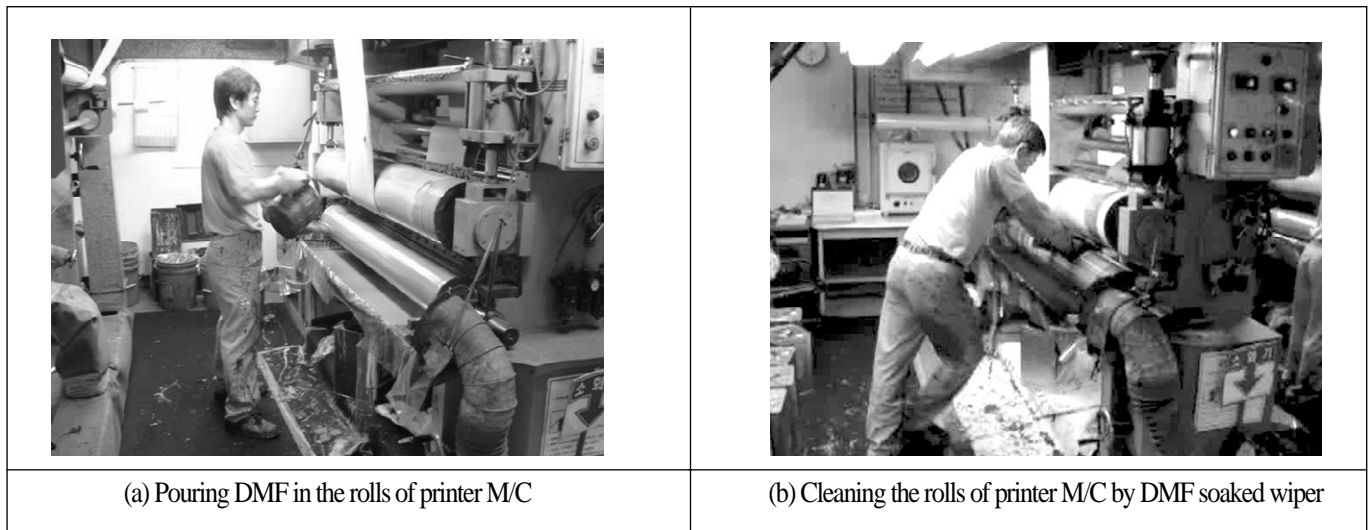


Fig. 6. Printing and cleaning processes of printer M/C

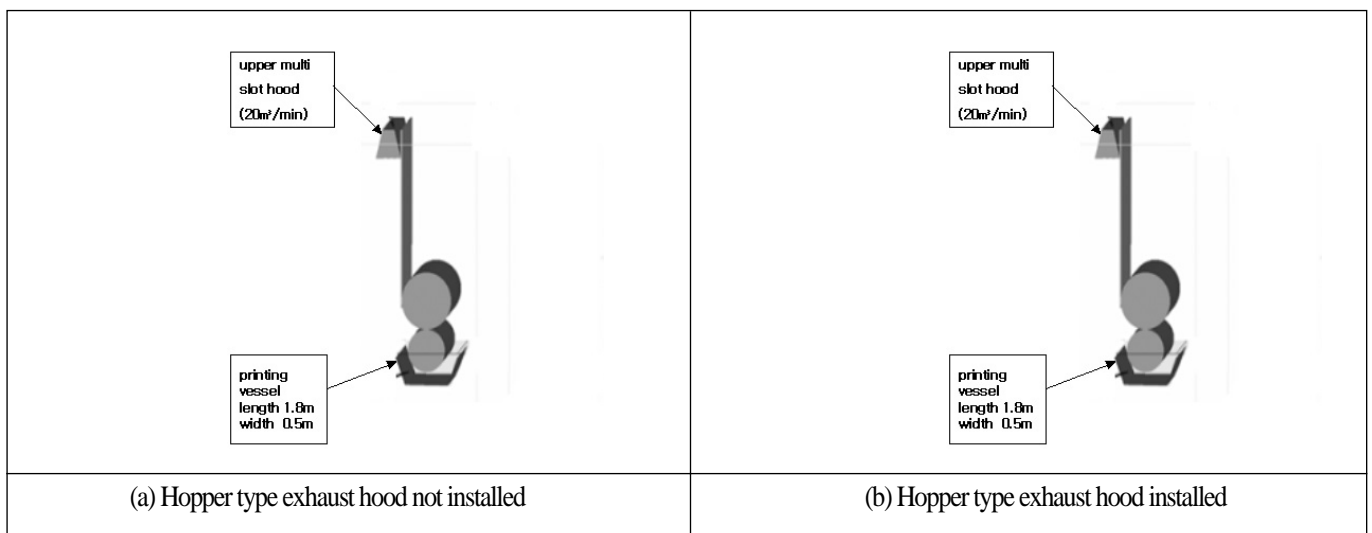


Fig. 7. Control volumes and hood informations for computational modelling



Table 3. Boundary conditions for computational modeling

Classifications		Boundary conditions	Remarks
Contaminant Source	Source position(size, mm)	Printer M/C vessel surface (width 1,800 length 500)	The Same condition as the site
	Contaminant Source concentration (ppm, SF <sub>6</sub> gas)	100	-
Exhaustion hood	Upper multi slots hood	Hood size(mm)	width 1,800 length 200
		Volume flow rate(m <sup>3</sup> /min)	20
		Slot velocity(m/s)	10
	Hopper exhaustion hood	Hood size	width 100 length 1,800
		Volume flow rate(m <sup>3</sup> /min)	0, 50, 70
		Hood velocity(m/s)	0, 2.5, 3.2

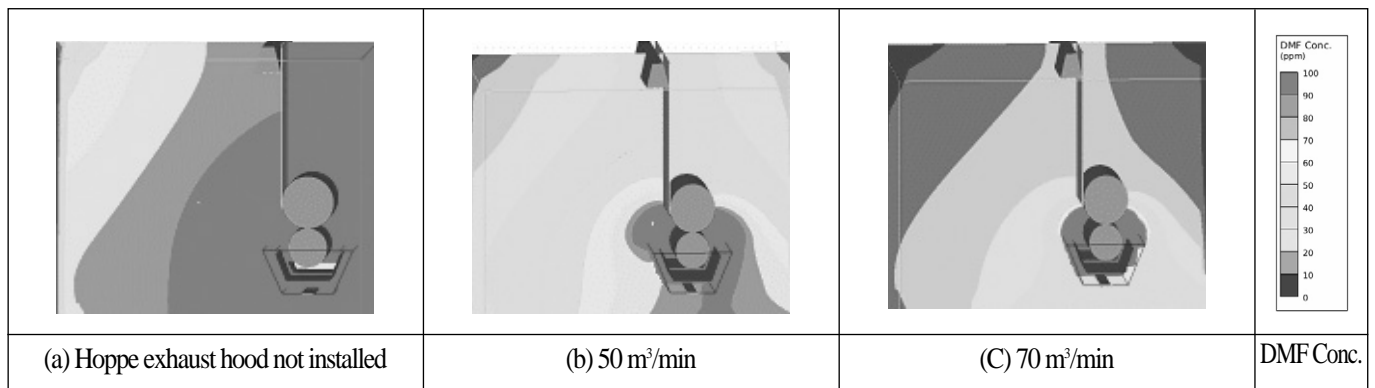


Fig. 8. Modeling results with the different exhaust rates of hopper exhaust hoods

의 송풍유량을 일정값으로 하고 인쇄조의 하부 호퍼식 배기 유량의 변화에 따른 배기효율성과 인쇄조 배기후드 설치후 플랜지 설치에 따른 배기효율성을 확인하였고, 전체환기시설의 경우, 인쇄기 세척시 오염물질이 주위공정으로 확산되지 않는 적절한 전체환기 배기효율은 어느 정도인가의 표준화된 방안 연구를 하고자 하였다.

#### 1) 배기유량 변화에 따른 후드 성능평가 및 설계자료 도출 (제1안)

호퍼식 배기후드의 배기유량 변화에 따라 오염물질 확산 정도를 비교하기 위한 모델링 제어체적으로 조건은 Fig. 7 및 Table 3과 같이 현장과 동일하게 설정하였다.

전산유체역학을 이용한 모델링 결과를 살펴보면, 상부 다중 슬롯형 후드의 배기유량을 20m<sup>3</sup>/min, 하부 호퍼식 배기후드의 개구면 유속을 각각 0m/s, 2.5m/s, 3.2m/s으로 하고 이에 대응하는 배기유량을 0m<sup>3</sup>/min, 50m<sup>3</sup>/min, 70m<sup>3</sup>/min으로 설정

하여 배기시킬 경우, 개구면 유속과 배기유량이 높을수록 오염물질을 효과적으로 제어하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 오염물질을 완전히 제어하지 못하고 일부가 주위로 확산되고 있는데, 그 농도가 미약하고 배기시스템(덕트)의 설치 공간 부족으로 더 이상의 배기유량 증가는 어려울 것으로 판단되었다(Fig. 8).

슬롯후드의 효과는 페인트 제조공정의 회분식 반응조(batch type reactor)에서 직경 457.2mm 크기의 탱크조(change port) 후드에 외부식 다중 슬롯 후드를 설치하여 28.3~56.6m<sup>3</sup>/min으로 배기시킬 때, 90% 이상의 유해가스 배기 효율(Burgess 등., 1994)이 있었고, 자동차 조립공장의 검차라인공장 바닥환기에 적용되고 있는 원통형 후드에 슬롯후드를 제안하고, 배기유량을 후드 길이당 30m<sup>3</sup>/min로 하는 경우, 원통형 후드에 비해 균일류 형성이 월등히 우수함을 증명한 바 있었다(김태형 등., 2004). 이러한 슬롯후드의 효율을 이용하여 그라비아 인쇄공정의 표준 환기방안으로 인쇄소에서

Table 4. Designed exhaust flow rates of gravure printer M/C

Exhaustion Hood	Modeling condition		Designed exhaust flow rate per length of the printer vessel( $\text{m}^3/\text{min}/\text{m}$ )
	Volume flow rate( $\text{m}^3/\text{min}$ )	Printer vessel length(m)	
Upper multi slot hood	20	1.8	11( $\approx 15$ )
Hopper exhaustion hood	70		39( $\approx 40$ )

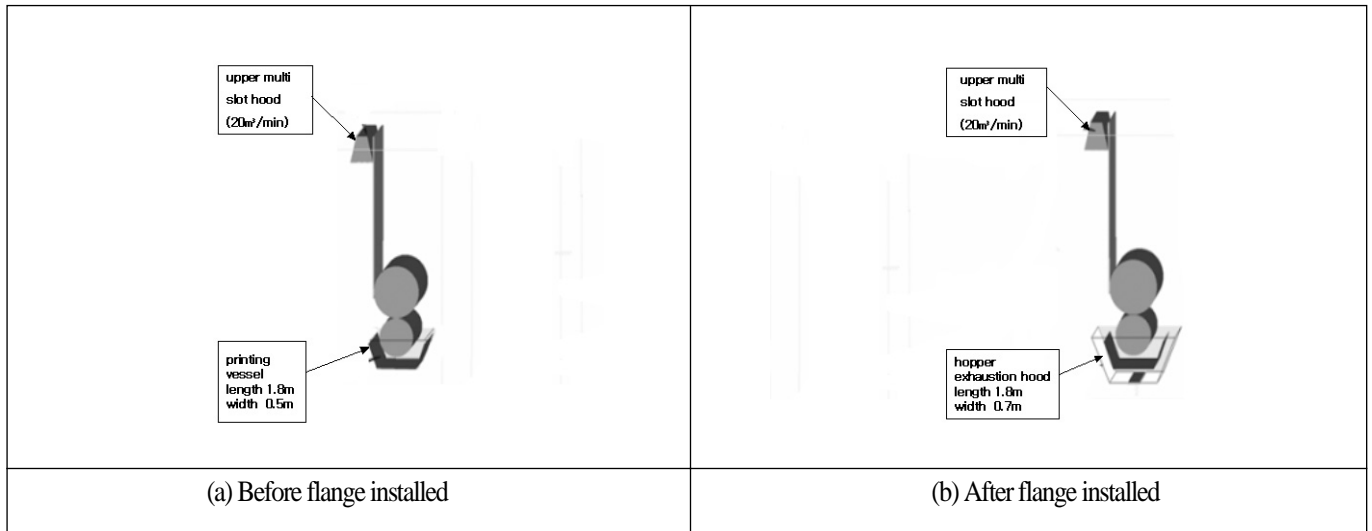


Fig. 9. Control volumes and hood informations for computational modelling

발생되는 오염물질을 호퍼식 배기후드를 이용해 배기시키고, 이동하는 원단 표면에서 발생하는 오염물질은 상부 다중 슬롯형 후드를 이용해 배기시키는 방안을 제안하였다.

그라비아 인쇄기의 구조는 거의 일정하기 때문에 인쇄조 길이가 증가할수록 배기유량 또한 증가되어야 하는 관계를 이용하여 앞선 모델링 결과를 토대로 인쇄조 길이당 필요 배기유량으로 정리하여 Table 4에 나타내었다.

## 2) 인쇄조 전/후단 배기후드의 성능 평가 및 설계자료 도출 (제 2 안)

인쇄조에 설치되는 배기후드의 성능을 평가하고 필요 배기량을 설계하기 위해 인쇄조 전, 후단에 배기후드를 설치했을 경우, 플랜지 설치 유무에 대한 모델링 제어체적으로 사용된 모델링 조건은 현장과 동일하게 Fig. 9. 및 Table 5와 같이 설정하였다.

전산유체역학을 이용한 모델링 결과를 살펴보면, 플랜지를 설치하지 않은 경우는 상당량의 오염물질이 주위로 확산되는데 반해, 플랜지를 설치하면 대부분의 오염물질이 후드로 제어되고 주위로 확산되는 농도가 미비하다는 것을 알 수 있었다(Fig. 10).

그라비아 인쇄기 환기방안중 다른 하나로 인쇄조를 감쌀

수 있는 배기후드를 설치할 경우, 인쇄조에서 발생하는 유기 용제를 효과적으로 제어할 수 있는 장점이 있었으나, 인쇄조에 도료를 보충할 때 후드 플랜지가 작업에 방해될 수 있고, 도료가 후드로 유입되어 덕트 막힘이 발생하는 경우가 있었다(작업환경기술협의회, 1998).

배기후드의 효과적인 면은 용제를 배합하는 공정의 드럼통(drum)에 담겨 있는 솔벤트를 회분식 반응기에 주입할 때 뚜껑 주위를 둘러싼 외부식 후드를 설치하고 배기유량을  $45.72\text{m}^3/\text{min}$ 으로 할 경우 오염물질을 거의 완전히 배기시키는 효과도 있었다(Ellenbecker 등., 2004).

환기를 위한 인쇄기 전체를 포위하는 작업방법 상의 어려움에 대한 해법과 외부식 후드의 효율을 이용하여, 인쇄조 전, 후단에 배기후드를 설치하고, 이동하는 원단 표면에서 발생하는 오염물질은 상부 다중 슬롯형 후드를 이용해 배기시키는 방안을 제안하였다.

앞선 모델링 결과를 토대로 인쇄조 길이당 필요 배기유량으로 정리하여 Table 6에 나타내었다. 여기서 설계된 배기유량은 작업환경을 개선하기 위해 필요한 최소의 유량이지만 실제 현장에서는 인쇄액의 과도한 증발을 유도할 수도 있다. 따라서 여기서 도출되는 설계자료를 토대로 현장에서 생산성과 작업환경을 적절히 조화시킬 필요가 있을 것으로 생각

Table 5. Boundary conditions for computational modeling

Classifications		Boundary conditions	Remarks
Pollution source occurrence	Occurrence position(size, mm)	Printer M/C vessel surface (width 1,800 length 500)	The Same condition as the site
	Pollution source concentration (ppm, SF6 gas)	100	-
Exhaustion hood	Upper multi slots hood	size(mm)	width 1,800 length 500
		Volume flow rate(m <sup>3</sup> /min)	20
		Slot opening velocity(m/s)	10
	Printer vessel front exhaustion hood	Opening surface size	width 100 length 1,800
		Volume flow rate(m <sup>3</sup> /min)	35
		Opening surface velocity(m/s)	3.2
	Printer vessel rear exhaustion hood	Slot size(mm)	(width 20 length 1,800) 4ea
		Volume flow rate(m <sup>3</sup> /min)	43
		Slot velocity(m/s)	5

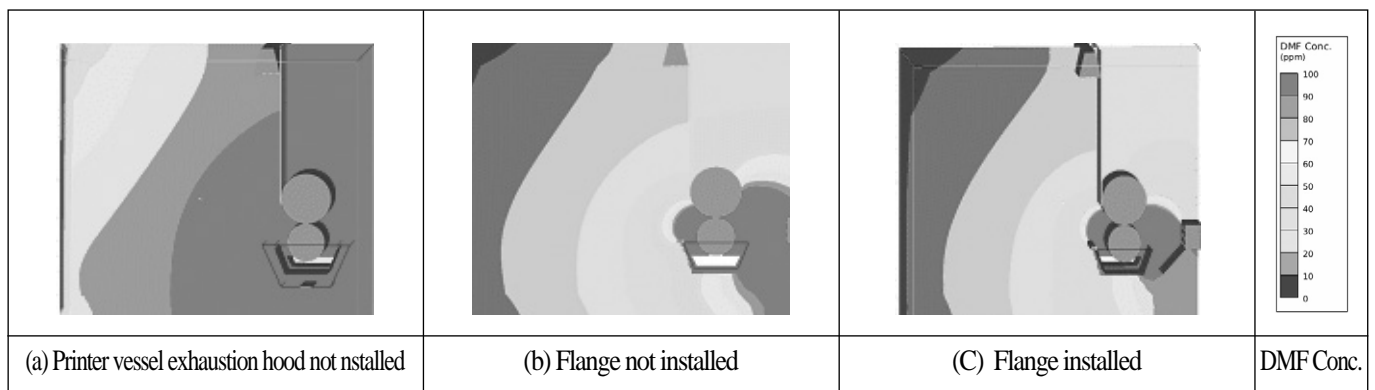


Fig. 10. Modeling results according to condition change of printer vessel exhaust hoods

되었다.

3) 그라비아 인쇄기 세척작업시 전체환기의 성능 평가 및 설계도출 (제 3 안)

세척 작업에서의 DMF 발생은 인쇄조와 같이 특정 부위에 국한되는 것이 아니라 그라비아 인쇄기 전체에서 발생된다고 보아야 한다. 또한 세척시 인쇄기 1대만 하는 것이 아니라 인쇄기 전체(2~3대)를 동시에 세척하기 때문에 Fig. 11과 같이 그라비아 인쇄공정을 밀폐한 후 전체적으로 배기시키는 환기방안에 대해 연구하였다.

세척작업에서 전체환기로 작업자의 호흡영역을 보호하는

일은 엄청나게 많은 환기량이 요구되기 때문에 현실적으로 어려운 일이다. 따라서 여기서 제안한 전체환기 방안은 작업자의 호흡영역 보호를 위한 것이라기 보다는 주위 공정으로 확산되지 않고 적은 배기량으로 신속히 배기될 수 있도록 하는데 의미가 있으며, 더불어 세척 근로자의 노출농도도 감소하는데 의미가 있다.

전체 환기방안에 대해 필요한 환기량을 도출하기 위해 형성된 모델링 제어체적으로 인쇄기가 3대가 설치되어 있는 경우에 대해 환기용 배기후드는 인쇄기 측면 바닥 부분에 위치시키고, 배기유량을 증가시키면서 오염물질의 확산 형태를 비교하였다(Fig. 12).

Table 6. Designed exhaustion flow rate of exhaustion hood of gravure printer M/C

Exhaustion Hood	Modeling condition		Designed exhaustion flow rate per length of the printer vessel (m <sup>3</sup> /min/m)
	Volume flow rate(m <sup>3</sup> /min)	Printer vessel length(m)	
Upper multi slot hood	20	1.8	11(≒15)
Printer vessel front exhaustion hood	35	1.8	19(≒20)
Printer vessel rear exhaustion hood	43	1.8	24(≒25)

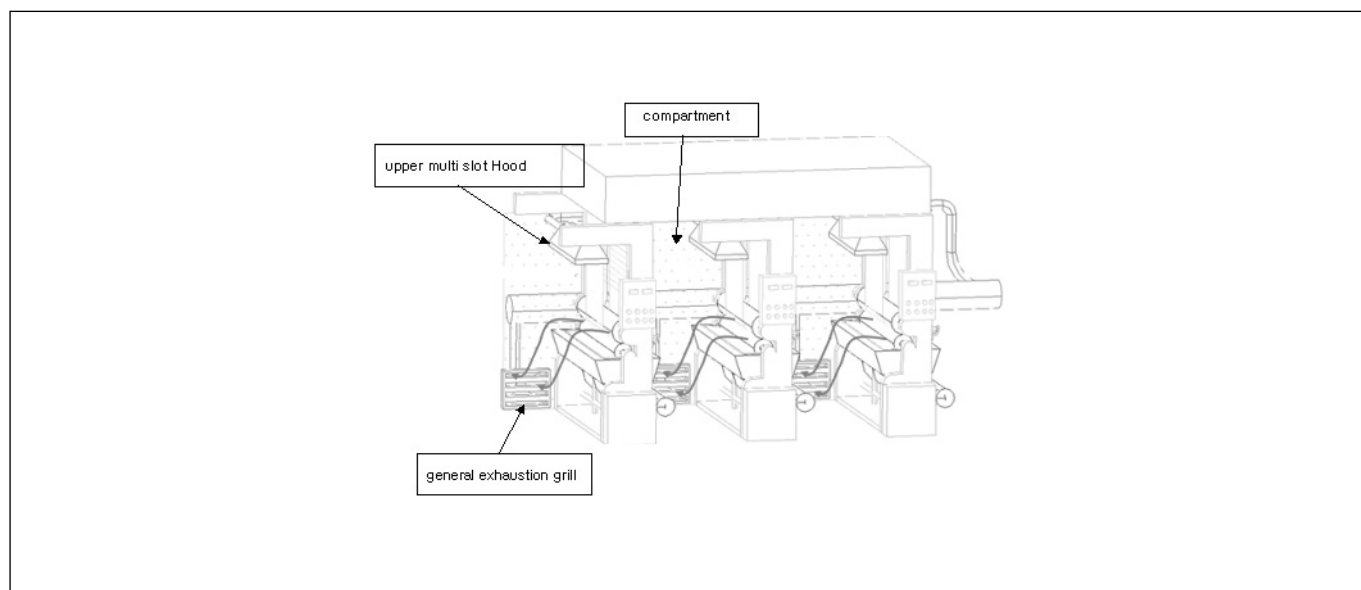


Fig. 11. Cleaning processes of gravure printer M/C

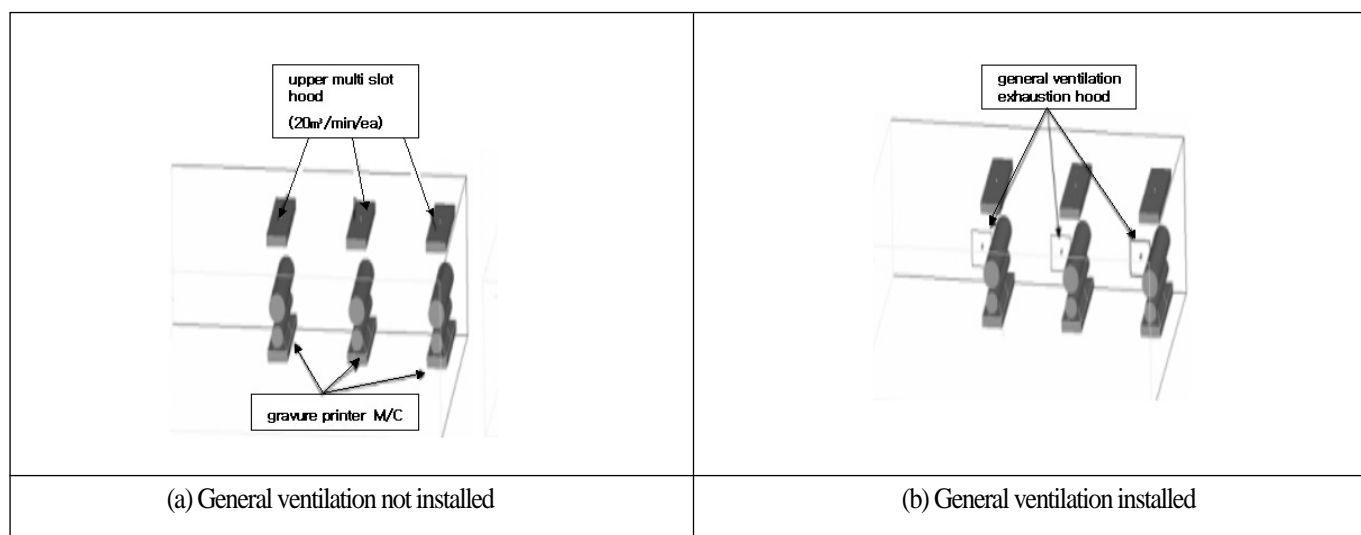


Fig. 12. Control volumes and hood informations for computational modelling

Table 7. Boundary conditions for computational modeling

Classifications		Boundary conditions	Remarks
Pollution source occurrence	Occurrence position	Printer M/C surface	The Same condition as the site
	Occurrence position(size, mm)	100	-
Exhaustion hood	Upper multi slots hood	Size(mm)	width 1,800 length 200
		Volume flow rate(m <sup>3</sup> /min)	20 (per printer M/C )
		Slot opening velocity(m/s)	10
	Exhaustion hood for ventilation	Opening surface size	width 500 length 500
		Volume flow rate(m <sup>3</sup> /min)	100
		Opening surface velocity(m/s)	7

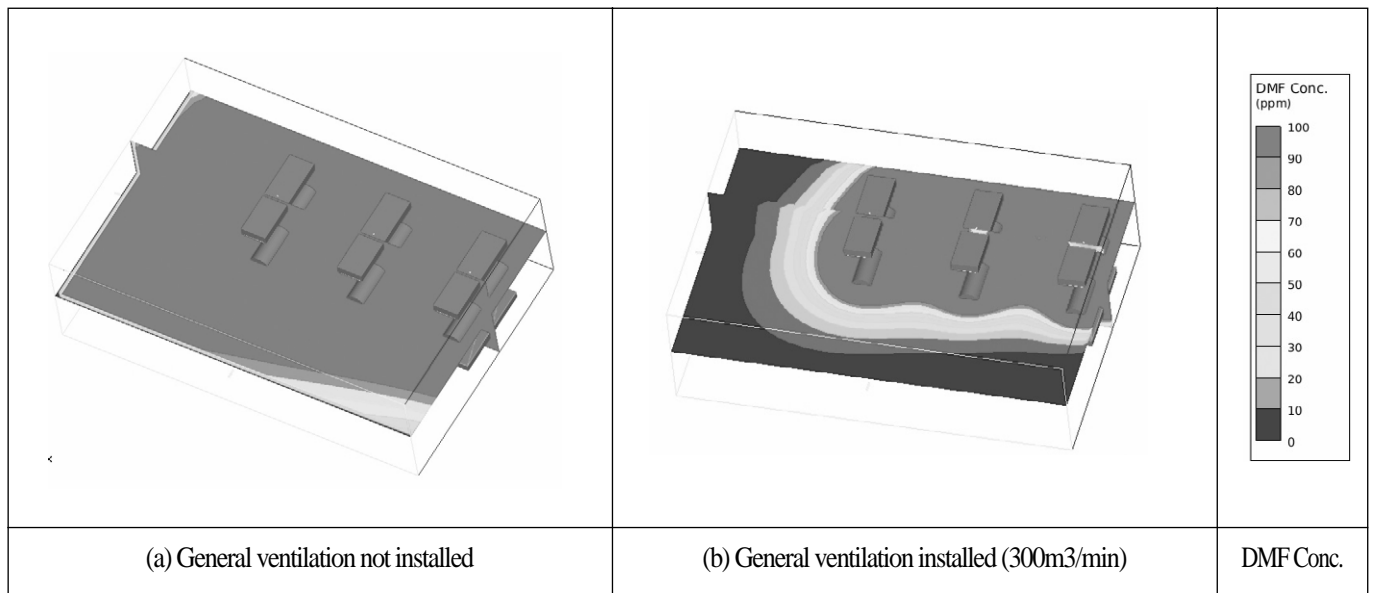


Fig. 13. Modeling results according to condition change of gravure printer M/C general ventilations

각 인쇄기의 상부에 앞서 제안한 상부 다중 슬롯형 후드는 설치되어 있는 것으로 가정하였으며 기타 모델링 조건은 Table 7.과 같이 현장 조건을 고려하여 형성하였다.

전산유체역학을 이용한 모델링 결과를 살펴보면, 각 인쇄기 마다 상부 다중 슬롯형 후드의 배기유량을 20m<sup>3</sup>/min로 하고, 측면 바닥에 설치된 배기후드로 100m<sup>3</sup>/min 씩 배기시킬 경우 인쇄기에서 발생하는 오염물질이 주위로 확산되지 않고 배기후드를 통해 효과적으로 제어되고 있는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 13).

그라비아 인쇄공정의 세척작업에서 발생하는 오염물질이 주위 공정으로 확산되지 않도록 최소의 필요 환기량을 전산

유체역학을 이용해 산출한 결과 그라비아 인쇄기 1대당 최소 100m<sup>3</sup>/min 이상이 필요한 것으로 설계되었다.

#### IV. 결 론

7개 합성피혁공장 인쇄공정의 DMF 노출농도에 따른 20대의 산업환기시스템 실태 조사를 파악하기 위해 후드의 형태와 성능, 송풍기에 대한 유량, 정압, 회전수 그리고 공기정화장치의 압력손실을 측정하여, 그 결과를 근거로 한 인쇄공정에 적합한 산업환기의 표준화 방안을 제시하였다.

1. 각 인쇄기 위치별 후드 형태에 따른 흡인유량의 경우는 인쇄기 전면 상부 슬롯 후드는  $5\sim 15\text{m}^3/\text{min}$  이하, 인쇄기 후면 측방 외부식 후드는  $15\text{m}^3/\text{min}$  이하, 인쇄기 전면 하부 앞, 양 측면 외부식 후드는  $10\text{m}^3/\text{min}$  이하, 인쇄기 후면 하부 배기 후드의 외부식 후드(부분 배기)는  $5\sim 15\text{m}^3/\text{min}$  이하, 슬롯 후드(전면 배기)는  $10\sim 20\text{m}^3/\text{min}$  이하로 배기후드의 환기 기능을 다하지 못하고 있는 실정이었다.

2. 산업환기시스템의 송풍기 풍량 대비 효율을 분석한 결과 측정대상 송풍기 20대중 풍량 대비 효율이 60%미만은 8대로 40% 비율을 차지하였고, 반면에 풍량 대비 효율이 80% 이상인 경우는 전체중 7대로 35%의 비율을 보였다. 현장에 설치된 송풍기의 상당수가 효율이 정격 유량 및 정압이 아님을 알 수 있었다.

3. 조사된 사업장중 황성탄 흡착탑의 경우 초기 설계값이  $50\sim 150\text{mmAq}$ 로 설계되어 있으나  $110\sim 256\text{mmAq}$ 의 측정치로 압력손실의 초기 설계값을 초과하는 측정치를 나타내었다. 송풍량 감소와 교체시기가 지난 상태임을 알 수 있었다.

4. 전산유체역학 프로그램을 이용한 상부 다중 슬롯형 후드의 경우, 배기유량  $20\text{m}^3/\text{min}$ , 인쇄조 길이 1.8m, 인쇄조 길이당 설계유량  $11(=15)\text{m}^3/\text{min}/\text{m}$ 으로, 호퍼식 배기후드를 설치할 경우, 배기유량  $70\text{m}^3/\text{min}$ , 인쇄조 길이 1.8m, 인쇄조 길이당 설계유량  $39(=40)\text{m}^3/\text{min}/\text{m}$ 으로의 설계자료를 도출하였다.

5. 전산유체역학 프로그램을 이용한 인쇄조 전, 후단 배기 후드의 설계 표준화 자료는 상부 다중 슬롯형 후드 경우, 배기유량  $20\text{m}^3/\text{min}$ , 인쇄조 길이 1.8m, 인쇄조 길이당 설계유량  $11(=15)\text{m}^3/\text{min}/\text{m}$ 으로, 인쇄조 전단 배기후드를 설치할 경우, 배기유량  $35\text{m}^3/\text{min}$ , 인쇄조 길이 1.8m, 인쇄조 길이당 설계유량  $19(=20)\text{m}^3/\text{min}/\text{m}$ 으로, 인쇄조 후단 배기후드를 설치할 경우, 배기유량  $43\text{m}^3/\text{min}$ , 인쇄조 길이 1.8m, 인쇄조 길이당 설계유량  $24(=25)\text{m}^3/\text{min}/\text{m}$ 으로의 설계자료를 도출하였다.

6. 전산유체역학 프로그램을 이용한 그라비아 인쇄기 세척 작업시 발생하는 오염물질이 전체적으로 타 공정에 확산되지 않도록 최소의 필요 환기량의 설계표준화 자료는 그라비아 인쇄기 1대당 최소  $100\text{m}^3/\text{min}$  이상의 환기량이 필요한 것으로 설계자료를 도출하였다.

물공단 용해공정의 송풍기 및 백필터 관리 실태. 한국산업위생학회지 2007;제17권 제3호.

김태형, 하현철, 박승철, 김종철. 자동차 조립공장의 검차라인 환기방안. 한국산업위생학회 2004;14권 1호

노동부. 유해물질총람;2003.(101쪽.)

명국현. 수치유체공학. 한미; 1997.(163-179쪽.)

이상권, 김신도, 김태형, 오세원, 이병규, 이승목, 이세근, 전의찬, 정장표, 박기학, 대기오염제어. 동화기술;2004.(269-280쪽.)

이선우, 김태형, 김정만. 디메틸포름아미드(DMF)에 대한 단시간 노출기준 설정의 필요성에 관한 연구-합성피혁사업장 중심으로-. 한국산업위생학회지 2008;제18권 제1호.

이재현. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. 대한 교과서 주식회사;1997.(16-17쪽.)

작업환경측정기술협의회. 산업환기이론과 실무;1998.(177-180쪽.)

하현철, 김태형, 심광진. 전산유체역학을 응용한 산업환기공학 연구. 한국산업위생학회지 2008;제8권 제2호.

한국산업안전공단. 점성물질처리 국소배기장치의 효율제고 방안 연구. 2003.

한국산업안전공단. 화학물질유통 사용실태조사결과보고서;2007.(3-11쪽.)

한국산업안전공단. 합성피혁 제조과정에서 DMF 사업장 보건진단 결과서. 2006.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Documentation for DMF. Cincinnati, OH, ACGIH 2001.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Industrial Ventilation a Manual of Recommended Practice 25th ed. 2004;6:1-37,9:1-49.

Burgess WA. Foundry Operations. In Recognition of Health Hazards in Industry(A Review of Materials and Processes) 2th ed. John Wiley & Sons, Canada, 1995;106-135.

M.J. Ellenbecker, R.D. Treitman. Ventilation for Control of the Work Environment. Wiley Publi. 2004.

Air Pollution Engineering Manual. EPA 1992;116-130.

## REFERENCES

김기웅, 최병순, 강성규, 문영한. 합성피혁제조업체 근로자들에 있어서 N-methylformamide 배설속도에 관한 연구.

대한산업의학회지 1999;11(1):106-112

김태형, 하현철, 정춘화, 서정윤, 박승욱, 양준호, 이효우. 주