

# 주물 공단 용해공정의 송풍기 및 백필터 관리 실태

김태형<sup>†</sup> · 하현철<sup>1</sup> · 정춘화<sup>2</sup> · 서정윤 · 박승욱 · 양준호 · 이효우

창원대학교 환경공학과 · <sup>1</sup>벤티텍 · <sup>2</sup>세명대학교 보건안전공학과

## The Status of Maintenance of Exhaust Fans and Bag filters in Melting Processes in a foundry industrial complex

Tae Hyeung Kim<sup>†</sup> · Hyun Chul Ha<sup>1</sup> · Chun Hwa Jeoung<sup>2</sup> · Jeoung Yoon Seo · Cheng Xu Piao · Jun Ho Yang · Xiaoyu Li

*Department of Environmental Engineering, Changwon National University<sup>1</sup>VENTECH Corp.*

*<sup>2</sup>Department of Health and Safety Engineering, Semyung University*

18 Local exhaust ventilation systems in 10 melting companies located in an industrial complex were tested to know the status of maintenance. Test items were fan flowrates, fan static pressures, rotational speeds and differential pressures of bag filters. Only 22% of the tested fans has more than 80% flowrate efficiency. 44% of the fans has lower than 60% efficiency. The performance of the fans are not in a good status. For the fans with lower than 60% efficiency, the analysis shows that the lower flowrate might be caused by the degradation of fan performance. On the other hand, for the fans with higher than 60% efficiency, the main cause of flowrate reduction might be too much pressure losses due to clogging of filter bags.

The degradation of fans usually lead the reduction of hood capture efficiency, resulting in the increase of contaminant concentrations in workplace. To keep fans in good status, self inspections should be periodically conducted. This inspection should include the measurements of flowrate and pressures. The most important thing to be performed is the initial test of local exhaust ventilation system because the initial test data should be used to know the level of system degradation.

**Key Words** : Exhaust fan, Bag filter, Melting process, Initial test, Self inspection

## I . 서 론

용융된 금속을 주형에 유입 응고시켜 제품을 생산하는 것을 주조(鑄造)라 하고, 주조된 제품을 주물(鑄物)이라고 한다(강락원과 오덕수, 2007; Burgess, 1995). 주물 제조 공정은 Fig.

1과 같은데, 쇳물을 만드는 용해(Melting), 모래를 이용해서 형틀을 만드는 조형(Molding), 중자(Core making), 쇳물을 합체된 조형에 붓는 주입(Pouring), 주형과 주물을 분리하는 탈형(Shakeout), 후처리(Cleaning & Finishing), 제품 출하(Shipping) 등으로 진행되고, 탈형공정에서 발생된 모래를 재

접수일 : 2007년 7월 25일, 채택일 : 2007년 8월 28일

† 교신저자 : 김태형 (경남 창원시 사림동 창원대학교 환경공학과)

Tel : 055-279-7565, Fax : 055-281-3011, E-mail : thkim@sarim.changwon.ac.kr

이용하기 위한 사처리(Sand treatment)공정이 있다(피영규와 김현욱, 2003; Marcela와 Walter, 2006; 경남지역환경기술개발센터, 2005).

주물 업종은 대표적인 3-D업종으로 용해 및 주입 공정 등에서 발생하는 금속성 흡, 광물성 분진 및 연소 시 발생하는 각종 가스류와 모래 결합을 위해 사용된 수지에서 발생한 화학물질 등 매우 다양한 건강 유해인자들이 발생하여, 작업환경 악화뿐만 아니라 주변 지역의 대기질 문제까지 심각하게 대두되고 있는 실정이다(Burgess, 1995; 김태형, 2005).

주물 공장에 대한 공정별 분진 특성을 평가한 기존 연구를 살펴보면, 용해나 주입 공정보다는 후처리 공정인 탈형 및 후처리 공정에서 높은 분진 농도를 나타내고 있다(피영규와 김현욱, 2003; 피영규 등, 1997; 박용선 등, 2003). 그러나, 현장에서 각 공정별 흡 발생량을 관찰해 보면 용해 공정의 장입과 출탕시 가장 많이 발생할 가능성이 있음을 알 수 있다. 특히, 용해공정에서 발생한 흡은 높은 온도로 인해 강한 부력을 가지고 있어 발생된 후 바로 상승하여 공장 지붕 쪽에 머물다 지붕 모니터를 통해 외부로 배출되거나 공장 전체로 확산된 후 침강한다. 가동되고 있는 용해 공정의 높이별 분진 농도를 측정 한 연구에서 살펴보면, 작업자 높이보다는 천장 높이의 분진 농도가 매우 높게 측정되었다(서정운, 2004). 즉, 기존 작업환경 측정결과에서 용해공정의 분진 농도가 낮게 측정된 것은 분진 발생량이 적은 것이 아니라 부력에 의해 상승하기 때문에 작업자의 노출량이 적었던 것으로 판단된다. 제강공장 작업장 내부 공기유동을 해석한 연구에서 살펴보면 전기로에서 발생한 흡이 공장 전체로 확산되어 작업환경을 악화시키는 것으로 나타났고(조현호 등, 2006), 실제 중소규모 주물공장에서 용해공정에서 발생한 흡이 공장 전

체를 오염시키는 경우가 많기 때문에, 용해공정에서 발생된 흡을 효율적으로 처리하는 것이 작업환경 개선에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

이와 같이 용해 공정에서 발생하는 금속성 흡이 작업장으로 확산되는 것을 방지하기 위해 다양한 형태의 후드가 개발되어 적용되고 있다. 용해로에 적용되는 후드 형태로는 초기 외부식 후드(캐노피 후드, 링후드, 푸쉬-풀 후드 등)에서부터 최근의 직인식 후드(Capture hood)까지 다양하게 적용되고 있다. 기존 외부식 후드형태를 이용하여 출탕 시 발생하는 흡을 제어하기 위한 연구가 있었지만(경남지역환경기술개발센터, 2004; 박현설 등, 2005; Goodfellow, 1985), 기존의 외부식 후드 보다는 충분한 배기유량을 확보한 직인식 후드의 배기 효율이 가장 높은 것으로 알려져 있다.

또한, 조형공정에서 발생하는 분진과 휘발성 유기화합물질을 동시에 제거할 수 있는 시스템을 개발하여 현장에 설치하여 큰 효과를 거둔 연구결과도 있지만(박진수 등, 2006), 자동조형이 아닌 수동조형을 실시하는 공장에서는 현재 환기 시스템이 거의 전무한 상황이다. 이 때문에 조형공정에서 발생된 각종 휘발성 유기화합물에 의한 악취 민원의 원인이 되기도 한다.

주입공정도 자동 주입라인에는 국소배기 장치가 설치되어 있지만 레들을 이동하며 주입하는 수동 주입 공정에는 환기시스템을 설치하지 않은 경우가 많다. 최근 연구에서는 컴퓨터 시뮬레이션과 현장 실험을 통해 수동 주입공정에 푸쉬풀 환기 시스템을 적용한 사례가 발표되기도 하였다(Ilpo 등, 2007). 하지만, 필요 환기량이 너무 많아 중소규모 주물공장에 적용하기는 쉽지 않을 것으로 판단된다. 작업환경 측정결과 분진 농도가 가장 높은 공정 중의 하나인 후처리 공정에

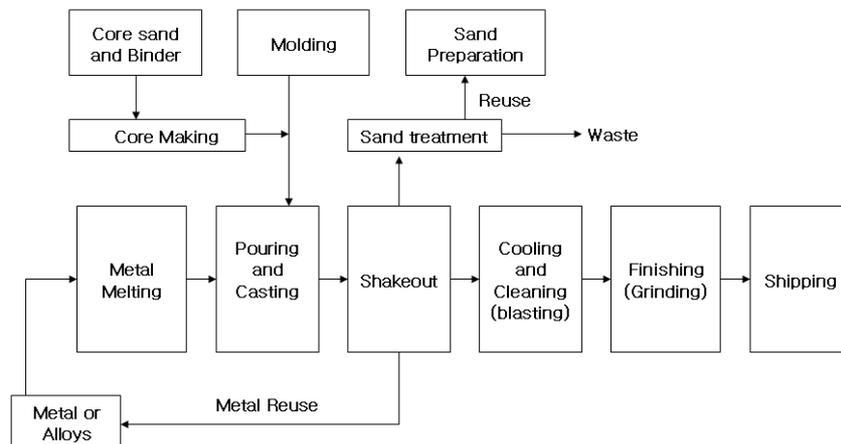


Fig. 1 Metal casting process.

대한 환기방안에 대한 연구가 진행되기도 하였으나(박종화 등(a, b), 2001), 그라인딩이나 가우징 등의 공정을 적정 환기 시설 없이 공장 한쪽에서 진행하고 있는 경우도 많다.

주물공장의 환기시스템을 살펴보면, 용해공정과 탈사 공정은 대기환경보전법의 적용을 받기 때문에 반드시 국소배기 장치를 설치해야 하지만 주입이나 후처리공정에는 적절한 환기시스템이 없는 경우도 많다.

용해공정의 경우에도 설치 초기에는 흡 포집효율을 어느 정도 유지하다가 시간이 지나면서 후드의 포집 효율이 급격하게 저하되어, 출탕이나 장입 시 발생하는 흡이 용해 공정 전체를 오염시키는 경우가 많다. 하지만, 용해공정에 설치된 국소배기장치에 대한 효율 평가 및 관리방안에 대한 연구는 아직 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 주물공장에서 오염물질 발생량이 가장 많고 모든 공장에 공통적으로 설치되는 용해공정의 환기시스템 효율 및 관리 실태를 파악하여 향후 주물공장 작업 환경 개선을 위한 국소배기장치 관리 방안을 수립하고자 한다. 용해공정의 환기시스템을 효율적으로 관리를 위해서 우선적으로 송풍기의 배기효율을 측정하고 배기효율이 저하된 원인을 파악하기 위해 송풍기 정압, 회전수 및 공기정화기로 설치된 백필터의 압력손실 등을 측정하였다.

본 연구를 통해 파악된 관리실태 평가 자료는 향후 주물주조 공정의 환기시스템 관리 방안 수립에 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

## II. 연구방법

### 1. 연구대상

주물공장 용해 공정의 환기시스템 실태조사는 2005년 6월부터 11월 까지 4개월간 경상남도의 진해마천지방산업단지에 소재한 10곳의 주물 사업장을 대상으로 실시하였다. 진해마천지방산업단지는 수도권의 경인주물공단, 대구의 다산주물공단과 더불어 우리나라 3대 주물 전용 공단으로 1991년 주물공업단지로 개발된 곳으로 현재는 약 40여개의 주물주조 공장이 입주해 있다. 생산품으로는 자동차 부품에서부터 대형 주물물 까지 다양하며, 용해 방법은 유도전기로(Induction furnace)와 용선로(Cupola)를 사용하고 있다. 연구 대상 공장 중에서는 유도전기로를 설치한 곳이 9개 공장이고, 용선로는 1개 공장에서 사용하고 있었다. 용선로는 연속 용해가 가능하고 다양한 형태의 합금 제조가 용이할 뿐만 아니라 용해비용이 기타 용해방법보다 저렴한 장점이 있어 기존 주물 공장에 많이 적용되었다. 하지만, 코크스를 사용하기

때문에 대기오염물질이 가장 많이 배출되는 방법으로 현재 신설 공장에서는 적용을 거의 적용하지 않고 있다(강락원과 오덕수, 2007). 이에 반해 유도 전기로는 열원으로 유도코일에 교류 전류가 흐를 때 발생하는 저항열을 이용하기 때문에 오염물질 발생량이 적고, 특수합금 용해용으로 적합하기 때문에 현재 가장 많이 적용되는 용해 방법이다(강락원과 오덕수, 2007).

유도 전기로에 설치된 후드 형태는 링후드 6개, 측방형 후드 1개, 캐노피 후드 2개, 직인식 후드 6개, 스윙후드 3개 등으로 구성되어 있는데, 초기에는 대부분 링후드, 캐노피 후드와 스윙후드를 설치했지만 공단 주변 지역민으로부터 환경민원이 다발하면서 2000년 이후부터 직인식 후드로 교체하는 추세이다. Fig. 2는 본 연구대상 공장에 설치된 용해공정 후드 모습을 정리한 것이다.

주입공정의 환기 실태를 살펴보면, 주물 제품이 소형이며 다량 생산하는 공정에서는 자동 주입공정이기 때문에 후드 설치가 가능하지만, 대형 주물을 제조하는 공장에서는 주형을 바닥에 일정간격으로 배치를 시키고, 용해된 쇳물을 레들로 이동하여 주입하기 때문에 후드를 설치할 수 없는 실정이다. 본 연구 대상 10개 사업장 중에서 1개 공장만이 자동 주입공정을 갖추고 있었고, 대부분 수동 주입을 실시하고 있어서 국소배기 시스템이 없었다.

일반적으로 주조공장에서 분진 등이 가장 많이 발생하는 공정은 용해(주입 및 출탕 포함) 공정으로 알려져 있고, 주입 공정에서는 조형 및 도형체에 포함된 이소프로필알콜 등 각종 가스상 물질이 많이 발생하는 것으로 알려져 있다(피영규와 김현욱, 2003).

용해 및 주입공정에 대한 환기시스템 실태 조사와 효율평가를 통해 주조공장의 작업환경과 주변 대기질 개선을 달성하기 위한 환기시스템 개선 방법을 모색하는 것이 타당하지만, 조사 대상 공장 중에서 주입공정에 국소배기장치가 설치된 곳이 1곳에 불과하므로 본 연구에서는 용해공정에 대해서만 국소배기장치에 대한 송풍기 효율 및 집진기 관리 실태를 조사하였다.

조사 대상 10개 사업장에 설치된 국소배기장치는 총 18대이고(Table 1 참조), 300m<sup>3</sup>/min용량 2대를 제외하고 배기유량 500m<sup>3</sup>/min이상의 대용량이었다.

### 2. 연구방법

용해공정에 설치된 국소배기장치의 효율을 평가하기 위해 1) 송풍기 유량, 2) 송풍기 정압, 3) 송풍기 회전수, 4) 백필터 집진기 압력손실 등을 측정하였다.

1) 송풍기 유량 측정

굴뚝을 통해 배기되는 송풍량을 측정하기 위해 산업환기 매뉴얼(ACGIH, 2004)에 제시된 것과 같이 10지점을 등면적으로 나누어 측정하는 “10-지점 횡단법(10-point traverse)”을

사용하였다. 산업환기 매뉴얼에서는 10지점 횡단법을 적용하더라도 덕트를 직각방향으로 나누어서 두 방향으로 측정하여 총 20지점을 측정하도록 하고 있다. 하지만, 실제 현장에서는 덕트 출구부분에 동압 측정이 가능한 곳은 대기오염



Canopy hood



Ring hood



Swing type canopy hood



Lateral hood



Capture hood

Fig. 2 Hood types in melting processes.

물질(분진 농도)측정을 위한 측정구 뿐인데 측정구는 대부분 굴뚝 당 1개만 뚫려 있어, 유속은 한 쪽 단면에 대한 10지점만을 측정할 수밖에 없었다. 용해 공정에서 배기된 가스 온도는 후드 형태에 따라 매우 차이가 난다. 용해시 발생하는 고온의 가스를 직접 배기시키는 직인식 후드의 경우 100℃ 이상의 고온의 가스가 배기되기 때문에 백필터 집진기 입구에 열교환기를 설치하는 것이 일반적이다. 열교환기를 거친 후에도 백필터 집진기 굴뚝으로 배출될 때 온도 범위는 50~80℃ 정도로 높아서 열선 풍속계의 측정 범위를 벗어나, 피토투브(Series 160, Dwyer, USA)와 전자식 아네로이드 압력계(Series 477, Dwyer, USA)를 이용하여 동압을 측정한 후 유속으로 환산하였다. 하지만, 캐노피 후드와 측방형 후드는 공장 내부 공기와 희석된 후 후드로 용해 가스가 유입되기 때문에 백필터 집진기로 유입되는 가스 온도가 높지 않고, 굴뚝으로 배출되는 가스 온도 또한 50℃ 이하이기 때문에 열선 풍속계로 측정 가능한 온도 범위이다. 따라서, 온도가 높지 않은 굴뚝에 대해서는 열선 풍속계(8386, TSI, UAS)를 이용하여 유속을 측정하여 유량으로 환산하였다. 유량 계산 시 각 굴뚝에서 측정된 온도를 보정하여 정확한 송풍기 배기 유량이 측정될 수 있도록 하였다.

2) 송풍기 정압 측정

송풍기의 역할은 송풍기 앞뒤에 걸쳐 있는 압력 차이를 거슬러 후드로부터 일정량의 공기를 배기시키는 것이다. 현재 가동 중인 송풍기의 정압을 측정하면 유량의 감소 원인이 송풍기 효율저하인지 아니면 국소배기 장치의 압력손실 증가에 의한 것인지를 판단할 수 있다. 송풍기 정압(FSP: Fan Static Pressure)은 식 (1)과 같이 계산되기 때문에, 송풍기 정압을 계산하기 위해 송풍기 입·출구 정압과 송풍기 입구 동압을 측정하였다.

$$FSP = SP_{outlet} - SP_{inlet} - VP_{inlet}$$

SP : Static pressure (mmAq)  
 VP : Velocity pressure (mmAq)

현장에서 송풍기 정압을 측정하기 위해서 일반적으로 아네로이드 압력계를 많이 사용한다. 이는 판독이 쉽고, 응답성이 좋으며, 크기가 작고 가벼워 휴대가 간편하고, 유지관리가 용이할 뿐만 아니라 다양한 자세에서도 정확성이 유지되는 장점이 있다. 본 연구에서는 전자식 아네로이드 압력계(Series 477, Dwyer, USA)를 이용하여 송풍기 입·출구 정압을 측정하였다.

3) 송풍기 회전수 측정법

송풍기 회전수는 송풍량과 정비례 관계에 있기 때문에 회전수 변화는 송풍량 변화에 직접적인 영향을 주는 중요한 인자이다. 용해공장에 설치된 송풍기는 팬 벨트를 이용하여 모터 회전력을 송풍기 내부의 임펠러(Impeller)로 전달하는 방식이다. 모터에서 발생된 회전력이 임펠러로 효율적으로 전달되어야만 임펠러가 정격 회전수를 유지할 수 있어 설계 송풍량을 확보할 수 있다. 하지만, 임펠러의 회전은 모터(Motor)의 노후나 팬벨트의 늘어짐 정도에 따라 감소할 수 있기 때문에 송풍기 임펠러가 얼마나 회전하고 있는지 확인하는 것은 송풍기 노후 및 유지관리 상태를 확인할 수 있는 중요한 자료이다. 송풍기 회전수는 접촉식 RPM meter(DT-6236B, CEM, China)를 이용하여 임펠러측 풀리(Pulley)나 모터측 풀리에서 측정하였다.

4) 백필터 집진기 압력손실 측정

주물산업단지의 특성상 용해공정에서 배기된 공기를 분진 제거용 집진장치를 거치고 대기 중으로 방출하도록 되어 있다. 방문한 모든 사업장에는 백필터(Bag filter) 집진기가 설치되어 있고 경우에 따라서 원심력집진장치인 싸이클론(Cyclone)이 전처리용으로 함께 사용되고 있었다. 백필터와 같이 분진 제거용 집진장치의 경우 분진에 의한 필터 막힘이 발생할 경우 필터 압력손실이 증가하여 송풍량을 급격히 감소시킬 우려가 있다. 집진기 압력손실을 측정하면 현재 백필터 관리 상태뿐만 아니라 국소배기시스템에 걸리는 압력손실 증가에 따른 송풍량 저하의 원인도 파악할 수 있기 때문에, 국소배기장치 실태 조사를 위해서는 반드시 측정해야 하는 항목이다(EPA, 1992; 이상권 등, 2004). 집진기 압력손실은 전자식 아네로이드 압력계(Series 477, Dwyer, USA)를 이용하여 집진기 입구와 출구 덕트에 정압구를 뚫어 측정하였다.

### III. 연구결과 및 고찰

#### 1. 송풍기 및 집진기 측정 결과

조사대상으로 선정된 10개 사업장의 18대 송풍기 및 백필터 집진기에 대한 송풍량, 송풍기 정압, 회전수 그리고 백필터 집진기 압력손실을 측정하여 Table 1에 정리하였다.

#### 2. 송풍기 성능평가

1) 송풍기 배기 효율

후드 배기 효율을 유지하기 위해서는 무엇보다도 송풍량

이 초기 설계 값을 유지하는 것이 필요하다. Table 1의 송풍기 유량 측정결과를 분석해보면, 초기 설계 값과 비교하여 80% 이상의 유량을 유지하고 있는 송풍기는 전체의 22%인 4대에 불과하다. 그리고 초기 설계 유량 60% 이하의 송풍량을 배기시키고 있는 송풍기는 44%로 8대에 달하고 있다. 송풍기 측정 결과로 볼 때 마천주물산업단지내 송풍기의 상당수가 효율이 많이 떨어지는 상태임을 가늠할 수 있어 송풍기 효율 향상을 위한 노력이 필요하리라 판단된다. 직인식 후드의 경우 용해 시(출탕 및 장입 포함) 발생하는 흡 포집 효율이 높은 것으로 알려져 있는데, 직인식 후드가 설치된 회사의 작업자들도 설치 초기는 흡이 잘 배기되었는데, 설치 후 시간이 흐를수록 배기가 불량하여 작업장으로 흡이 확산된다는 의견을 많이 제시하였다.

송풍기 유량 측정결과를 살펴보면 초기 송풍량 설계가 잘 되어 흡 환기효율이 우수할 지라도 현재 측정 결과와 같이 초기 설계 유량과 대비해서 80% 미만의 송풍량을 유지하는

77%(14대)의 송풍기는 용해 시 발생하는 흡의 제어 효율이 매우 낮았다. 용해 공정에서 발생하는 흡에 의한 작업환경 악화를 방지하기 위해서는 초기 설계 유량을 유지할 수 있도록 송풍기의 체계적인 관리가 필요한 것으로 판단된다.

2) 송풍기 배기 효율 저하 원인 분석

송풍기 배기 유량저하에는 다양한 원인이 있겠지만 송풍기 정압이 증가하거나 송풍기 회전수가 감소할 때 송풍기 배기유량이 줄어든다. 용해공정에 설치된 송풍기는 백필터 집진기에서 높은 정압손실이 발생하기 때문에 후향날개형 원심력 송풍기(일명, 터보팬)를 사용하고 있다. 후향날개형 원심력 송풍기는 정압이 증가되어도 송풍량이 크게 줄지 않는 장점이 있어(ACGIH, 2004), 공기정화장치가 달린 국소배기 장치에 주로 이용된다.

Fig. 3과 Fig. 4는 송풍기 유량 저하의 원인을 파악하기 위해 송풍량과 송풍기 정압, 송풍량과 임펠러 회전수와의 상관관

Table 1. Measurement results of fan volume flow rates, static pressures, rotational rates and bag house differential pressures

Fan No.	Volume Flow Rate(m <sup>3</sup> /min)			Static Pressure(mmAq)			Rotational Rate(rpm)			Bag House
	Designed (a)	Measured (b)	Ratio (b/a × 100) (%)	Designed (c)	Measured (d)	Ratio (f/e × 100) (%)	Designed (e)	Measured (f)	Ratio (f/e × 100) (%)	Differential Pressure (mmAq)
#1	1,200	870	72	350	431	121	1,300	1,671	129	245
#2	500	314	63	350	394	113	1,300	1,280	98	292
#3	800	398	50	400	198	50	1,720	1,290	75	256
#4	800	477	60	300	245	82	1,550	1,158	75	197
#5	1,400	1,726	123	350	401	115	1,180	1,255	106	215
#6	800	670	84	300	320	107	1,200	1,180	98	266
#7	600	425	71	350	394	113	1,500	1,390	93	256
#8	600	331	55	350	398	114	1,500	1,380	92	265
#9	1,100	712	65	400	524	131	1,170	1,250	107	233
#10	850	272	32	350	306	87	1,181	377	77	68
#11	800	386	48	350	340	97	1,180	1,020	86	181
#12	1,000	552	55	350	335	96	1,180	390	79	197
#13	700	398	57	360	312	87	1,200	850	71	182
#14	300	181	60	300	439	146	1,300	1,190	92	229
#15	750	661	88	300	423	141	1,550	1,480	95	174
#16	800	537	67	350	462	132	1,180	1,092	93	222
#17	300	283	94	300	431	144	1,550	1,620	105	285
#18	800	596	75	400	457	114	1,250	1,175	94	153

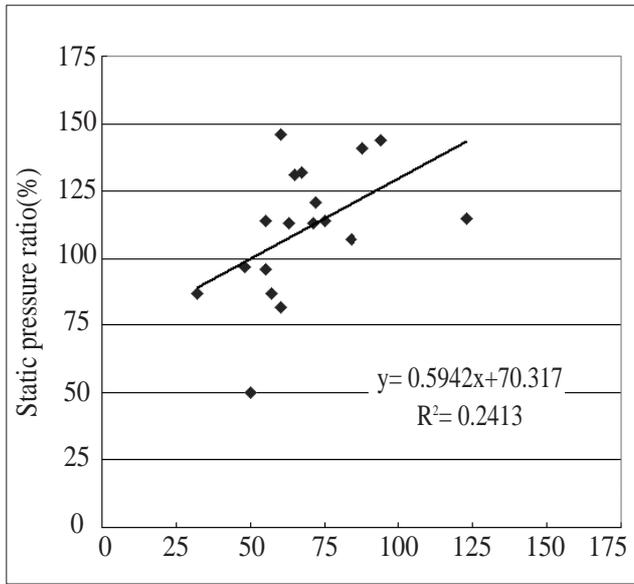


Fig. 3 Relationship between volume flowrate ratio and fan static pressure ratio.

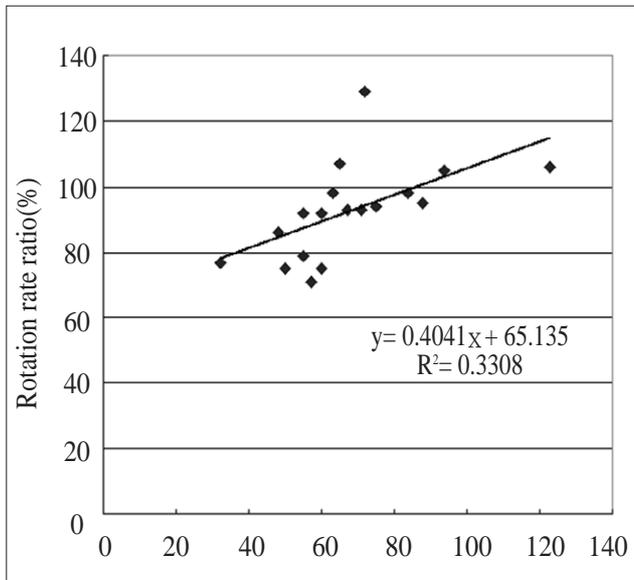


Fig. 4 Relationship between volume flowrate ratio and fan rotational rate ratio.

계를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 3에서 살펴보면 정압비와 유량비 사이에 회귀계수( $R^2$ )는 0.24로 매우 낮게 나타났다. 일반적으로 송풍기 정압이 증가하면 송풍기 배기유량이 줄어들어야 되지만, Fig. 3의 추세선 그래프를 살펴보면 기울기가 양(+)의 값을 나타내어 송풍기 정압비가 증가할수록 유량비가 오히려 증가하는 양상을 보이고 있다. 이러한 이유에 대한 원인을 정확하게 알 수는 없지만, 송풍기 측면에 부착된 명판(Name plate)에 기록된 정격유량과 정격정압이 잘못된 것일 가능성이 높다. 소규모 송풍기 제작업체의 경우 송

풍기 테스트 장비를 갖추고 있지 않기 때문에 송풍기 제작 후 효율을 평가할 수가 없다. 이 때문에 송풍기 제작 후 정확한 송풍기 테스트를 실시하지 않고 기존 자료에 있는 값을 그대로 명판에 기록하는 경우가 많은데, 이 기록된 자료가 실제 송풍기 효율과 큰 차이가 발생하였기 때문에 Fig. 3과 같은 현상이 발생된 것으로 판단된다.

Fig. 4는 송풍기 회전수비와 송풍량비의 관계를 그래프로 나타낸 것인데, 일반적으로 송풍기회전수와 송풍량은 1:1로 정비례한다. 즉 송풍기 회전수가 설계 값 대비 20% 증가하면 송풍기 유량도 설계 값에 비해 20% 정도 증가해야 한다. 하지만, Fig. 4 그래프를 살펴보면, 송풍기 회전수비가 증가할수록 송풍량은 증가하는 추세이지만 회귀계수( $R^2$ )는 0.33에 불과한 것을 알 수 있다. 즉, 송풍기 회전수가 증가한다고 해서 꼭 송풍량이 증가하지 않는다는 것은 의미하는데, 이러한 원인도 송풍기에 부착된 명판의 정확성을 알 수 없기 때문에 정확한 원인 파악이 어려운 상황이다.

또한, 송풍기 설치 후 현장에서 송풍기 유량, 송풍기 정압, 회전수 등을 측정한 후 효율 평가를 실시하고 그 결과를 기록해 두었다면 사용 중인 송풍기에 대한 평가 결과를 비교 분석하여 송풍기 효율 저하 원인을 정확하게 파악할 수 있었을 것이다. 하지만, 현재 송풍기 설치 후 효율 평가를 법적으로 실시하도록 되어 있지만, 실제 측정 결과를 비치하고 있는 회사는 많지 않았고, 송풍기 자체검사도 육안 검사로 대체하고 있어 송풍기 운전 실태를 관리자가 전혀 파악하지 못하고 있는 실정이었다.

송풍기 효율 저하의 원인을 확인하기 위해 설계용량 대비 효율 60% 이하인 8대의 송풍기에 대해 정압비(정격정압에 대한 측정정압)와 회전수비(정격회전수에 대한 측정회전수의 비)를 분석한 결과를 Fig. 5에 정리하였다. 일반적으로 송풍기 유량이 감소하는 경우에는 송풍기 정압이 설계 값보다 증가하거나 회전수가 감소해야 하는데, Fig. 5을 살펴보면, 측정정압이 설계 값보다 높아서 정압비율이 100%를 초과하는 경우는 8번과 14번 송풍기뿐이고, 나머지 6대의 송풍기는 정압비율이 100% 이하로 초기 설계 값보다 낮음에도 불구하고 유량이 감소하고 있다. 회전수비도 모든 송풍기에서 100% 이하로 측정되어 실제 설계 값보다 회전수가 적음을 알 수 있다. 송풍량비율이 60% 이하로 효율이 낮은 송풍기에서는 공통적으로 송풍기 회전수가 설계 값을 만족하지 못하는 것이 효율저하의 가장 큰 원인임을 알 수 있다.

또한, 송풍기 정압 비율이 100% 이하로 측정된 것은 회전수 감소로 인해 송풍기의 배기 풍량이 줄어 든 결과로도 판단해 볼 수 있다. 하지만, 초기 송풍기정압과 회전수를 측정한 자료가 없기 때문에, 송풍기가 초기부터 효율이 저하된 불량 송풍기인지 아니면 사용하면서 효율이 저하된 것인지

정확한 원인을 파악할 수는 없다.

Fig. 6은 3번 송풍기의 성능 변화를 송풍기 성능 곡선으로 도식화 한 것이다. 초기 설계 송풍량 800 CMM, 송풍기 정압 400 mmAq인데 일정기간 사용 후 송풍량은 398 CMM, 송풍기 정압은 198 mmAq로 감소하여 전체적인 송풍기 성능 곡선이 이동한 것을 볼 수 있다. 이와 같이 송풍기 성능 곡선 자체가 이동하는 것은 미국산업환기 매뉴얼에서 (ACGIH, 2004) 제시한 것과 같이 전형적인 송풍기 성능 감소에 의한 것으로, 국소배기장치를 관리하지 않고 방치하는 많은 공장에서 이런 현상이 발생되고 있다. 초기에 설치된 송풍기는 시간이 지남에 따라 송풍기 장력이 감소하거나 임펠러에 이물질 부착 등 다양한 원인에 의해 효율이 감소하기 때문에 주기적인 관리가 반드시 필요하다. 따라서, 국소배기 장치 자체검사 시에도 송풍기에 대한 사항은 반드시 측정을 통해 기록을 관리하고 송풍기 효율이 일정수준 이하로 저하된 경우에는 수리/보수 등의 조치가 필요할 것으로 판단된다.

송풍기 풍량 대비효율이 60% 이상인 12대의 송풍기에 대해 정압비(정격정압에 대한 측정정압)와 회전수비(정격회전수에 대한 측정회전수의 비)를 분석한 결과를 Fig. 7에 정리하였다. 송풍기 회전수비는 4번 송풍기를 제외하고는 전체적으로 90%를 유지하고 있기 때문에 송풍량 감소에 큰 영향을 주지 않고 있는 것을 알 수 있다. 하지만, 송풍기 정압비는 4번 송풍기를 제외하고 모두 100%를 초과하고, 특히 14번, 15번 그리고 17번 송풍기는 송풍기 정압비가 140%를 초과하는 것으로 나타났다. 즉, 4번 송풍기를 제외한 송풍기는 정압 증

가에 의한 송풍량 저하 현상이 발생하였고, 4번 송풍기는 송풍량비 60% 이하의 송풍기에서 나타났듯이 송풍기 효율 저하에 의한 유량 감소현상이 발생한 것임을 알 수 있다.

송풍량 비율 60% 이상인 송풍기 중 15번 송풍기의 풍량과 정압 변화를 송풍기 성능곡선을 이용하여 설명하면 Fig. 8과 같다. 송풍기의 정격 풍량은 750 CMM이지만 측정결과 661 CMM으로 감소한 대신, 송풍기 정격 정압은 300 mmAq에서 측정결과 423 mmAq로 증가하였다. 이러한 현상은 국소배기 장치 시스템 곡선이 변한 것으로 백필터 막힘, 덕트 막힘, 댐퍼 조정 불량 등 다양한 원인에 의한 시스템 손실 증가로 인해 송풍량이 감소한 전형적인 현상이다. 이러한 경우에는 국소배기장치 점검을 통해 막힘 등의 정압 증가의 원인을 찾아 해결을 해 주면 송풍량이 초기 값을 회복할 수 있다. 즉, 송풍기 풍량 비율이 60% 이상인 송풍기는 송풍기 자체의 문제보다는 공기정화장치를 포함하는 대기오염방지시스템에서 정압이 증가하여 유량이 감소한 것이 주원인을 알 수 있었다.

### 3. 백필터 관리 실태

용해공정에서 발생된 분진 처리를 위해서 모든 국소배기 장치에 대기오염방지시설로 백필터(Bag filter)를 설치해 두고 있었다. 백필터는 분진 제거 효율이 높지만, 적절하게 관리하지 않을 경우에 필터 표면에 분진이 과도하게 부착되고 그로 인해 집진기 전체 압력손실이 증가하게 된다. 집진기

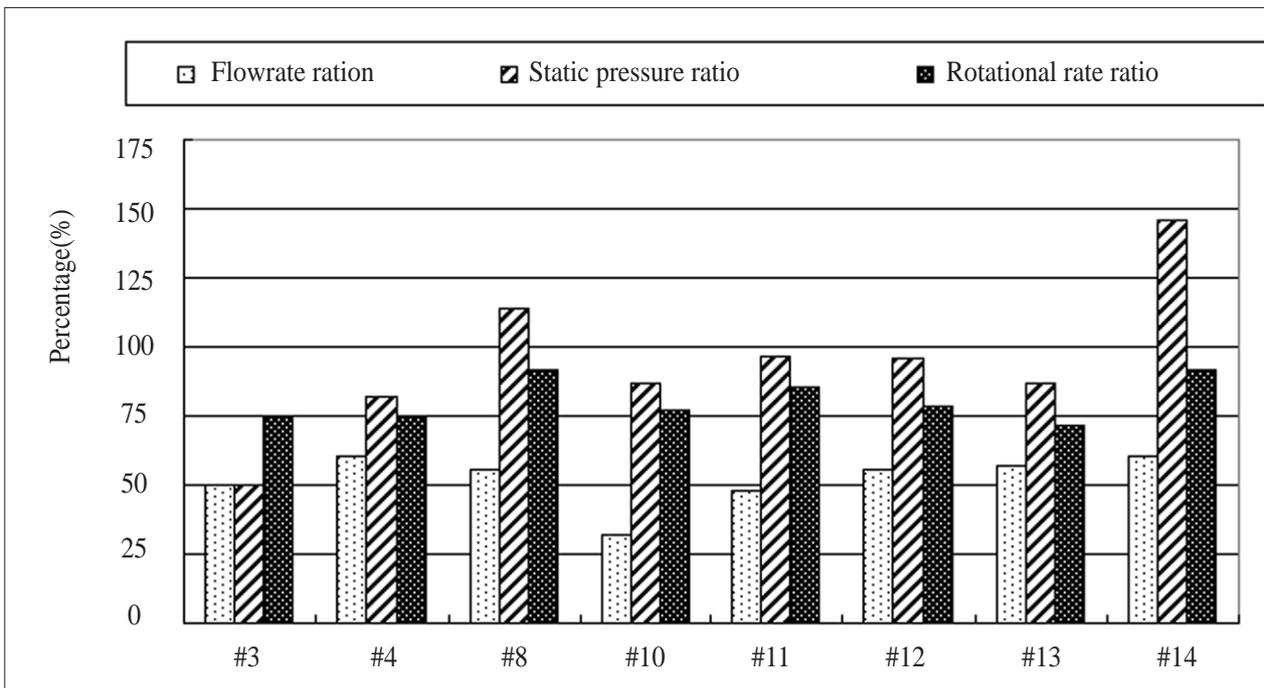


Fig. 5 Fan measurement results under 60% of volume flowrate ratio.

압력손실이 증가하면 송풍기 정압이 증가하여 유량 감소에 직접적인 원인이 되기 때문에 집진기 압력손실을 적정 수준으로 관리하는 것은 매우 중요하다. 일반적으로 용해공정에 적용되는 필터 재질은 대부분 PE(Polyester) 소재를 사용하고 있기 때문에 여재에 의한 압력손실은 별로 큰 차이가 없다. 하지만, 여재에 부착된 분진 퇴적에 의한 압력 손실은 분진의 두께와 필터 여과속도에 큰 영향을 받기 때문에, 분진 퇴

적량을 줄이거나 필터 여과속도를 낮추는 것이 백필터 압력 손실을 줄이는 방법이 된다(이상권 등, 2004).

필터 여재에 분진이 과잉으로 퇴적되는 것을 방지하기 위해 일정 시간 간격으로 탈진을 하게 되는데, 본 연구 대상 공장에 적용된 모든 백필터는 충격기류형(Pulse air jet type) 탈진 방식을 채용하고 있었다. 일반적으로 여과포 자체의 초기 압력손실은 25 mmAq 전후이며, 운전 중에는 150~200 mmAq 범위의 압력 손실을 보인다. 그리고 200 mmAq 이상일 경우에는 압력손실이 과다하기 때문에 일반적으로 필터를 교체해 주어야 한다(이상권 등, 2004, 서정민, 2004).

연구 대상인 18대 집진기의 압력손실을 측정한 결과 56% 가량인 10대의 백필터가 200 mmAq 이상에서 운전되고 있었다. 백필터의 압력손실이 증가한 원인은 일정 시간 주기로 압축공기를 이용하여 필터 표면에 부착된 분진을 탈진해 주는데, 탈진이 원활하게 이루어지지 않기 때문에 여재표면에 분진층이 두꺼워졌기 때문이다. Fig. 9는 집진 압력손실이 200 mmAq를 초과하는 백필터 집진장치의 필터표면에 분진 퇴적 모습이다. 이를 살펴보면 필터에 상당량의 분진이 퇴적되어 있으며, 이로 인해 필터 눈막힘 현상이 발생되고 있음을 알 수 있다. 따라서 필터의 잦은 교체와 더불어 보다 효율적인 탈진 기술의 적용을 통해 백필터 집진장치의 과도한 압력손실로 인한 성능 저하를 예방할 수 있도록 해야 한다.

또 하나의 압력손실 증가 원인으로는 여과 속도가 있는데 여과속도는 일반적으로 1 m/min 전후로 설계하는 것이 타당하다.(이상권 등, 2004). Fig. 10은 현장에 설치된 백필터 내부

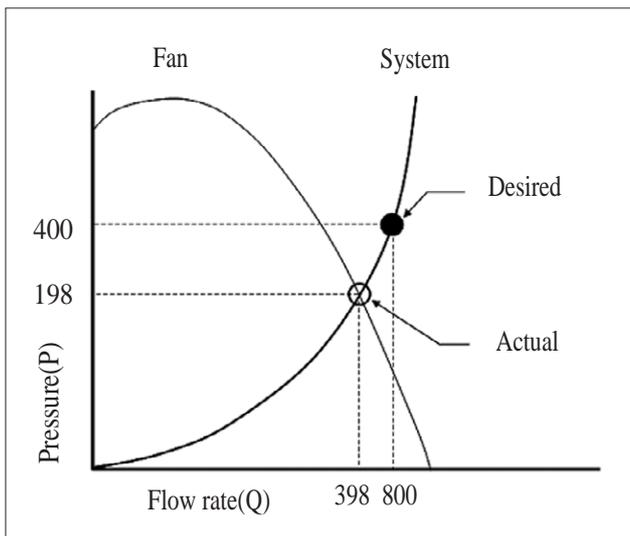


Fig. 6 Actual versus desired point of operation for # 3 fan.

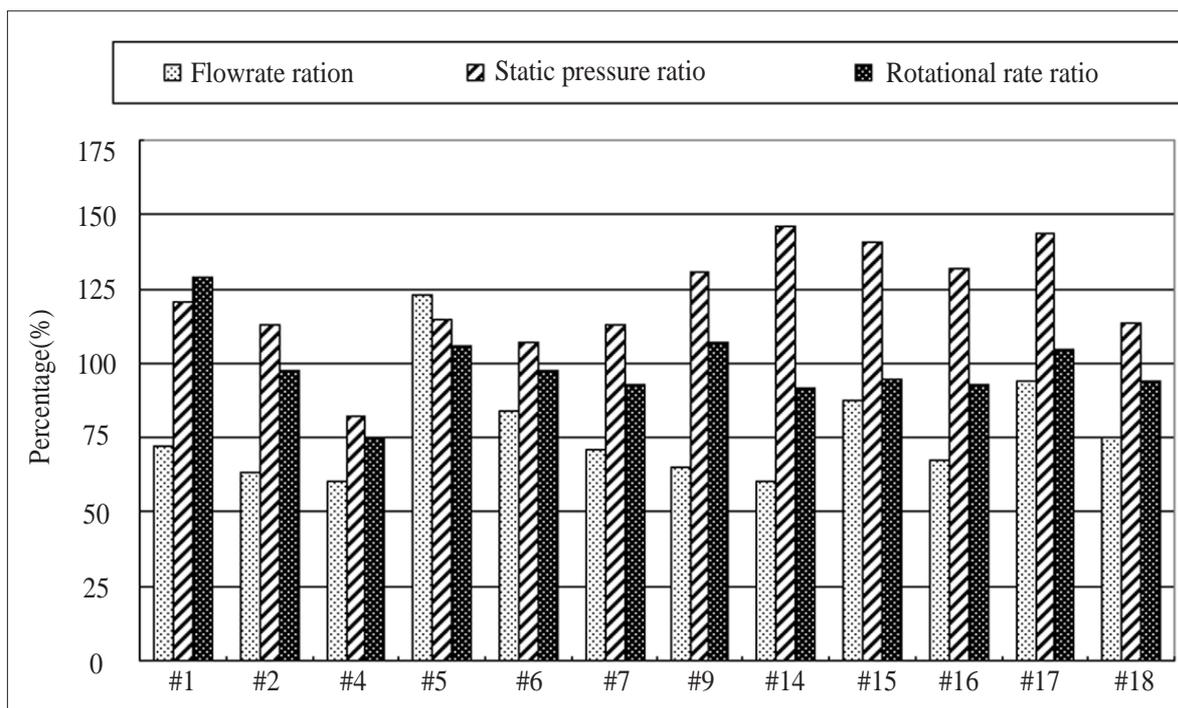


Fig. 7 Fan measurement results over 60% of volume flowrate ratio.

기류 흐름을 나타낸 것이다. 챔버 하부로 분진을 함유한 가스가 유입되어 필터를 통과한 후 청정 공기를 챔버 상부로 배출되는 상방향 흐름을 보이고 있다. 일반적으로 백필터 내부에서는 제진과 탈진이 동시에 진행되고 있기 때문에 여과속도가 빠른 경우에는 탈진된 분진이 상방향 기류에 의해 재비산되어 제진이 되고 있는 여재에 재부착되는 현상이 발생하게 된다. 이러한 현상은 비중이 낮거나 입경이 작은 분진을 처리할 경우 더욱 많이 발생하는데, 용해공정에서 발생하는 분진은 매우 가볍고 입자 크기도 작기 때문에 재비산에 의한 재부착 문제가 자주 발생한다. 이 때문에 과거에는 용

해공정 백필터를 설계할 때 여과속도를 1.2 m/s 정도로 적용을 했는데, 최근에는 0.9 m/s 이하로 설계하는 경우가 많다. 하지만 본 연구대상 18대 집진기의 경우 여과속도가 1.2~1.5 m/s로 매우 높게 설계되어 있어 송풍기 유량이 감소했음에도 불구하고 필터 여과속도가 높아 전체적인 집진기 압력손실이 증가한 것으로 판단된다.

국소배기장치에 설치된 집진기의 경우 대부분 환경팀에서 관리를 하기 때문에 굴뚝으로 배출되는 분진농도에만 관심이 있고 송풍기유량에는 큰 관심이 없다. 하지만 작업환경 개선을 위해서는 송풍기가 항상 일정 유량 이상 배기유량을 확보하는 것이 매우 중요하기 때문에 집진기 압력손실을 주기적으로 체크해서 필요시 필터 교체 및 청소 등의 조치를 취해야 한다. 최근에는 집진기 외부에 압력손실 측정 장치를 부착한 백필터가 많이 설치되고 있어, 관리자가 쉽게 확인하고 조치를 취할 수 있게 된 경우가 많다. 따라서, 향후 집진기 관리의 편리성과 효율성을 제고하기 위해서는 반드시 백필터 설치시 압력손실 측정 장치를 부착하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 또한, 국소배기장치 신설 시 초기 측정자료를 확보하여 시스템이 정상적으로 가동되는지 확인할 필요가 있고, 향후 효율저하를 판단할 수 있는 근거자료를 확보해야만 한다.

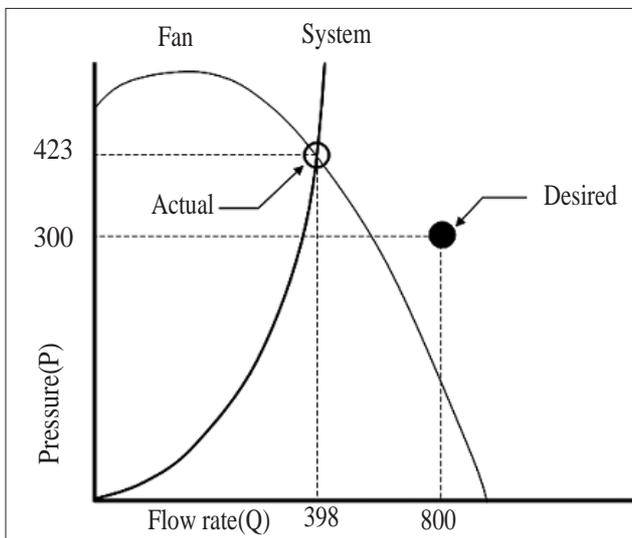


Fig. 8 Actual versus desired point of operation for #15 fan.

#### IV. 결론

10 개 주물공장의 용해공정에 설치된 18대의 국소배기장치 관리 실태를 파악하기 위해 송풍기에 대한 유량, 정압, 회전수 그리고 백필터 압력손실을 측정하였고, 그 결과는 다음

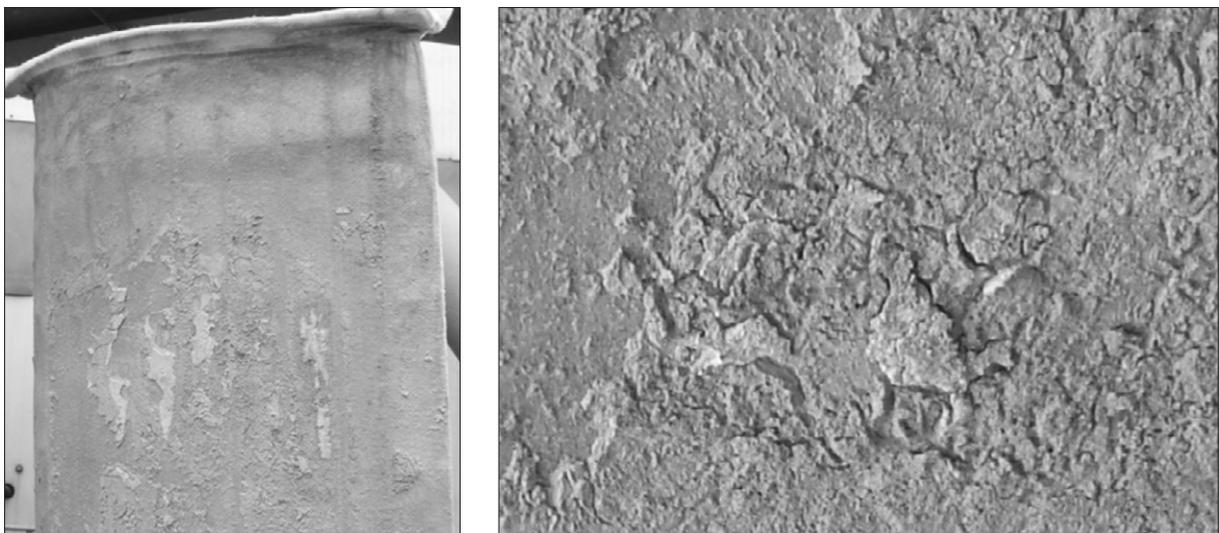


Fig. 9 Dust cake formed on filter surface.

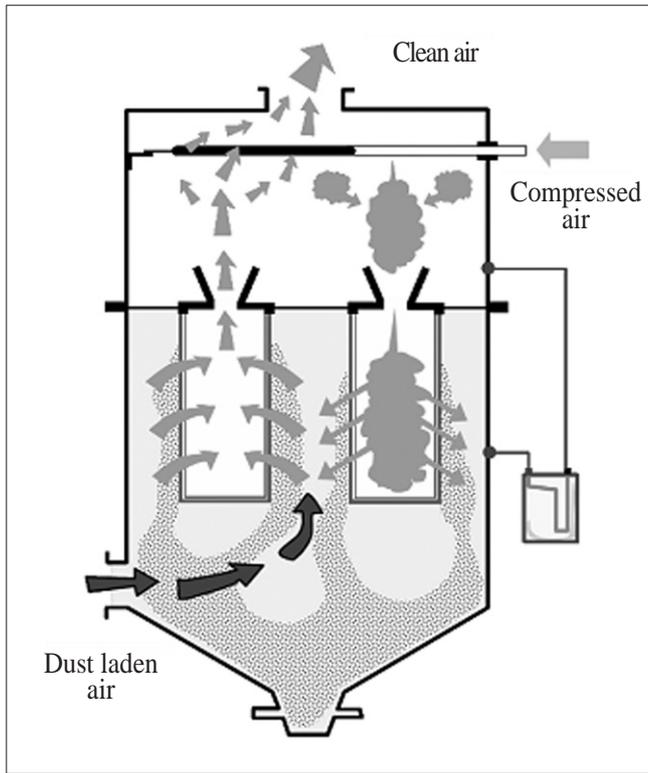


Fig. 10 Flow patterns in pulse-air-jet bag filter.

과 같다.

1. 18대 송풍기의 배기 풍량을 측정한 결과 설계 풍량의 80% 이상 양호한 상태로 운전되는 송풍기는 22%인 4대에 불과하였다. 특히, 설계 풍량의 60% 이하로 송풍량이 크게 감소한 송풍기는 8대로 무려 44%를 차지하여 주물공장 용해공정에 설치된 송풍기의 관리상태가 매우 불량하다는 것을 알 수 있었다.

2. 설계 풍량 60% 이하의 낮은 배기유량으로 가동되는 송풍기 유량저하 원인을 파악하기 위해 송풍기 정압 및 회전수를 측정한 결과 8대 모두가 설계 회전수보다 낮게 측정되었다. 또, 송풍기 정압도 2대를 제외하고는 모두 설계 정압보다 낮은 값으로 측정되어, 송풍기 풍량 저하의 원인이 송풍기 성능이 저하되었기 때문인 것으로 나타났다. 하지만, 송풍기 설치 초기의 측정값을 알 수 없기 때문에, 송풍기 명판(Name plate)에 붙어 있는 정격 사양이 잘못된 것인지, 설치 초기부터 효율이 안 좋은 불량 송풍기가 설치된 것인지, 아니면 송풍기를 장기간 사용하여 효율이 저하된 것인지 정확히 판단할 수가 없었다.

3. 설계 풍량 60% 이상으로 비교적 양호한 배기유량으로

가동되는 송풍기의 유량 저하 원인을 파악하기 위해 송풍기 정압과 회전수를 측정한 결과 1대의 송풍기를 제외하고는 정격 송풍기 정압보다 높게 측정되었다. 용해공정에 설치된 후향날개형 원심력송풍기는 다른 형태의 원심력 송풍기보다는 송풍기 정압 증가에 따른 유량 감소가 적은 특성이 있지만, 백필터 등에서 과도한 압력손실이 발생하여 송풍량이 감소한 것으로 나타났다. 즉, 설계 풍량 60% 이상 효율을 유지하고 있는 송풍기의 경우에는 송풍기 정압을 설계 값 범위로 맞춰 주면 현재보다 송풍량이 증가할 것으로 판단되어, 청소 및 백필터 교환 등의 조치가 필요한 실정이다.

4. 용해공정에 설치된 백필터의 압력손실을 측정한 결과 56% 인 10대의 백필터 압력손실이 200 mmAq를 초과하였다. 일반적으로 백필터의 경우 150 ~ 200mmAq범위에서 운전을 하고 200 mmAq를 초과하는 경우에는 필터를 교체해 주어야만 송풍기 정압 증가를 막아 송풍기 유량 감소를 예방할 수 있다. 하지만, 현재 설치된 백필터의 압력손실은 송풍기 유량 저하를 일으킬 수 있을 정도로 높게 측정되어 필터 교체가 필요한 것으로 판단된다.

5. 백필터 압력손실을 낮추기 위해서는 탈진 시스템의 개선과 필터 여과 속도를 적정하게 유지시킬 필요가 있다. 특히, 필터 여과속도는 사용 중 백필터 압력손실 증가에 직접적인 영향을 주게 되는데, 측정대상 백필터의 통과 유속이 1.2~1.5 m/s로 매우 높게 설계되어 있었다. 하지만, 상방향 백필터는 발생하는 분진 입자의 비중과 입경이 작을 경우에 필터 통과 유속이 높으면 분진 재부착현상이 심하게 발생하여 탈진 효율이 급격하게 저하된다. 최근에는 용해공정의 경우, 탈진효율을 높이고 백필터 시스템을 안정적으로 사용하기 위해 필터 통과 유속을 0.9 m/s 이하로 유지하는 경우가 많다. 따라서, 향후 용해공정에 백필터를 설치할 경우 여과 속도를 0.9 m/s 이하로 유지할 수 있도록 고려해야 한다.

6. 용해공정에 설치된 송풍기 배기유량을 측정한 결과 송풍량이 비교적 불량한 것으로 조사되었지만, 자체검사를 실시하지 않거나 육안검사만 실시하기 때문에 송풍량이 감소했다는 것을 관리자가 모르고 있는 경우가 대부분이었다. 또, 송풍기 설치 후 성능 평가 자료가 없기 때문에 정확한 효율 저하의 원인을 파악할 수 없었다. 따라서, 용해공정 뿐만 아니라 현장에 설치된 송풍기가 정상적으로 가동되기 위해서는 설치 후 초기 성능 평가 자료를 확보해야 하고, 매년 실시하는 자체검사도 육안 검사가 아닌 송풍기 유량, 송풍기 정압 및 송풍기 회전수 등의 기본 자료를 측정하여, 송풍기 성능 저하 시 수리 및 교체가 이루어 질 수 있도록 하는 것이

필요하다.

## V. 감사의 글

이 논문은 2005년도 창원대학교 연구비 및 경남지역환경기술개발센터의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

강락원, 오덕수. 신편 주조공학. 보성각; 2007.(13-17쪽, 213-265쪽.)  
 경남지역환경기술개발센터. 금속주조업 환경시설운용 Manual; 2005.(76-101쪽.)  
 김태형. 경남지역 대기오염물질(호흡성분진 및 악취)현황조사 및 배출저감대책 수립-진해 마천지방산업단지를 중심으로. 경남 지역환경기술개발센터; 2005.  
 김태형, 하현철, 김종철. 산업환기 및 공조진단. 경남지역환경기술개발센터; 2005.(265-289쪽.)  
 박용선, 노영만, 김현욱, 한진구, 안연순, 강성규, 김정만. 주물사업장에서 발생하는 호흡성분진의 농도 및 석영함유량에 관한 연구. 한국산업위생학회지 2003;13(1):90-97  
 박종화, 이동호, 손두익. 주물공장 후처리공정 작업환경 개선에 관한 연구(1)-발생분진처리 system중심-. 대한설비공학회 2001하계학술발표회 논문집 2001; 919-923  
 박종화, 이동호, 손두익, 김종윤. 주물공장 후처리공정 작업환경 개선에 관한 연구(2)-PIV를 활용한 성능해석-. 대한설비공학회 2001동계학술발표회 논문집 2001; 542-547  
 박진수, 정재학, 이태진. 주물공장의 Furan 공정에서 발생하는 휘발성 유기 화합물 및 분진의 동시제거 시스템 개발 및 현장설치 연구. Korean Chem Eng Res 2006;44(2):136-148

박현설, 송창병, 임경수. 주물공장 작업환경 개선을 위한 국소배기시스템 개발. 한국대기환경학회 2005 추계학술대회 논문집 2005;499-500  
 서정운. 용해로 출탕시 발생하는 흠 제어를 위한 환기량 산정. 경남지역환경기술개발센터; 2004.(21-40쪽.)  
 이상권, 김신도, 김태형, 오세원, 이병규, 이승목, 이재근, 전의찬, 정장표, 박기학. 대기오염 제어. 동화기술; 2004.(269-280쪽.)  
 조현호, 홍미옥, 조석연. 제강 작업장내 삼차원 유동장 및 먼지농도의 수치 모사. 한국대기환경학회지 2006;22(1):35-41  
 피영규, 김현욱. 우리나라 철강주조업의 공정별 유해인자 노출 현황. 한국산업위생학회지 2003;13(2):99-106  
 피영규, 노영만, 이광목, 김형아, 김용우, 원정일, 김현욱. 주물사업장 주공정별 발생하는 분진의 석영함유량 및 크기분포 연구. 한국산업위생학회지 1997;7(2):196-208  
 American Conference of Governmental Industrial Hygienists : Industrial Ventilation a Manual of Recommended Practice 25th Edition, 2004. p. 6:1-37, 9:1-49.  
 Burgess WA. Foundry Operations. In : Recognition of Health Hazards in Industry(A Review of Materials and Processes), 2th Edition, John Wiley & Sons, Canada, 1995. p.106-135.  
 EPA. Air Pollution Engineering Manual. EPA; 1992. p.116-130.  
 Howard Goodfellow. Advanced Design of Ventilation Systems for Contaminant Control. Elsevier; 1985. p. 359-378.  
 Ilpo Kulmala, Pasi Hynynen, Irma Welling, Arto Saamanen. Local Ventilation Solution for Large Warm Emission Sources. Ann Occup Hyg 2007;51(1):35-43  
 John C. Mycock, John D. Mckenna, Louis Throdore. Air Pollution Control Engineering and Technology. Lewis Publishers; 1995. p.105-132.  
 Marcela G. Ribeiro, Walter R.P. Filho. Risk assessment of chemicals in foundries: The International Chemical Toolkit pilot-project. Journal of Hazardous Materials A136. 2006;432-437