

원심력 필터 재생기능을 갖춘 오일 미스트 여과 집진장치 개발

김태형^{*} · 서정운 · 하현철 · 김종철 · 조진호

창원대학교 환경공학과

Development of an Oil Mist Collector Equipped with Centrifugal De-oiling System

Tae-Hyeung Kim^{*} · Jeoung-Yoon Seo · Hyun-Chul Ha · Jong-Cheul Kim · Jin-Ho Cho

Department of Environmental Engineering, Changwon National University

Health effects associated with metal working fluid (MWF) exposures include dermatitis, respiratory disease, hypersensitive pneumonitis, and asthma. Frequently, occupational exposures to MWFs are controlled by ventilating an enclosure with an air cleaning unit that includes a fan preceded by various kinds of filtration. There are several kinds of air cleaning units used in machining centers. But the associated troubles have hindered from efficiently using these devices. The main problem is the relatively short period of filter replacement. The reason is that the air cleaning units usually do not have the de-oiling systems, thus leading the earlier clogging of filters and reducing the flow rate of hood. Thus, the first stage of study was conducted to overcome this problem by developing the new oil mist collector equipped with the easy de-oiling system. The principle of de-oiling is that the centrifugal force generated by spinning the drum covered by filter fabric separates oils from the filter fabric. It would be very similar to the spin-dry laundry. By adopting this de-oiling technique, the problems associated with the conventional oil mist collectors could be solved. Several

tests/analyses were performed to make the lab-scale oil mist collector. The collection efficiencies and the de-oiling efficiencies of commercially available filter fabrics were tested. Subsequently, the endurance test were conducted by observing SEM photos of filter fabrics and measuring tensile strength/expansion coefficient after spinning the filter drum for 20 minutes at the different rotation speeds. By doing these experiments, the most appropriate filter fabric and rotation speed/duration were selected. Finally, the new oil mist collector was designed. In the near future, this device must be tested in the real machining center.

Key Words : MWFs, oil mist collector, centrifugal de-oiling system, oil mist removal

접수일 : 2005년 6월 27일, 채택일 : 2005년 9월 16일

^{*} 교신저자: 김태형 (경남 창원시 사림동 9번지 창원대학교 환경공학과

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

I. 서론

우리나라와 같이 제조업이 주를 이루는 산업구조 하에서는 공작기계를 이용한 금속가공이 산업전반에서 필수적으로 이루어지게 된다. 1900년대 초에 처음으로 금속가공장비의 공구 수명을 연장하기 위해 MWFs(metal working fluids)가 사용되었다. MWFs의 기능은 공작기구와 가공금속간의 마찰열을 줄여 변형을 방지 하고, 마멸과 마모를 줄여 가공표면의 특성을 좋게 할 뿐만 아니라 가공칩을 씻어내는 역할을 하게 된다(NIOSH, 1996). 하지만 이 과정에서 필연적으로 오일 미스트(oil mist)가 발생하게 되는데, MWFs의 기능을 향상시키기 위해 방부제, 윤활제, 방청제, 부식 방지제, 세정제, 극압첨가제 등 다양한 화학물질의 첨가로 오일 미스트의 인체 유해성이 증가하여 피부암 및 음낭암, 후두암 등 각종 암을 포함해 호흡기 및 피부에 다양한 질병을 유발시키고 있다(Tolbert et al., 1992).

오일 미스트는 공작기계의 고속회전에 의한 MWFs의 미립화와 가공부위에서 발생하는 고열에 의한 MWFs의 증발 및 응축 과정을 통해 발생되며, $0.1\mu\text{m}$ ~수십 μm 의 입자 크기를 갖는 액적으로, $5\mu\text{m}$ 전후의 입자가 전체 발생량의 대부분을 차지한다(Chen et al., 2001; Heitbrink et al., 2000).

일반적으로 오일 미스트를 집진하기 위해 분립장치(separator)와 필터(filter)를 이용한 다양한 방식의 여과 집진장치를 사용하고 있다. 분립장치는 철 망이나 폴 리프로 필렌(polypropylene) 재질을 이용한 와이어 메쉬(wire mesh)나 쉘브론(chevron)뿐만 아니라 최근 볼 타입(ball type)에 이르기 까지 다양한 형태로 사용되고 있다. 설치공간이 비교적 적게 소요되기 때문에 처리규모가 $100\text{ m}^3/\text{min}$ 이상인 대용량 집진장치에 주로 이용되고, 세척 및 유지관리가 용이하고

압력손실이 필터에 비해 적게 발생하는 반면 조대입자의 제거만 가능해 처리효율이 낮은 단점이 있다. 이 때문에 처리규모가 $100\text{ m}^3/\text{min}$ 이하로 실내에 설치되는 소형 집진기에 적용할 경우 가공 칩(chip)이나 이물질 처리를 위한 전처리용으로만 활용되고 있다.

중·소형 오일 미스트 집진기에 적용되고 있는 필터는 대표적으로 유리 섬유(glass fiber) 필터를 비롯해 헤파(HEPA) 필터, 플라스틱 폼(foam) 필터 등이며 이들을 이용해 포켓형(pocket type), 카트리지형(cartridge type), 캔들형(candle type) 등의 다양한 형태로 제작되어 현장에 설치되고 있다. 필터 방식은 분립장치에 비해 높은 처리효율을 기대할 수 있는 반면 필터 재생기능이 없기 때문에 시간이 지남에 따라 필터에 오일 미스트가 과도하게 부착되는 눈막힘 현상으로 차압이 증가하여 송풍효율을 감소시킬 우려가 있고, 다량의 오일 미스트를 함유한 상태에서 장시간 사용할 경우 부패되어 악취를 유발시키기 때문에 필터의 잦은 교체가 요구되는 등의 적잖은 주의가 필요하다. 특히 필터를 자주 교체할 경우 교체비용뿐만 아니라 경우에 따라 생산 설비의 조업중지를 해야 하는 등 생산성에도 영향을 미치게 된다. 또한 필터 교체시 발생하는 폐 필터는 환경적으로 2차 오염을 유발하는 등 현장 관리자의 입장에서는 큰 부담으로 작용하고 있다.

지금까지 개발된 오일 미스트 집진장치의 경우 앞에서 언급한 바와 같이 여러 가지 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 연구를 통해 오일 미스트에 대한 집진효율이 우수하면서도 원심력으로 필터 재생이 가능한 새로운 개념의 오일 미스트 집진장치를 개발하고자 하였다.

본 연구를 통해 개발하고자 하는 원심력 필터재생 기능을 갖춘 오일

미스트 여과 집진장치는 공작기계의 가공과정에서 발생하는 오일 미스트를 고효율의 여과필터에 포집 후 필터가 파과(break-through)되기 전 원심력을 이용해 필터에 부착된 오일 미스트를 털어내어 지속적으로 여과기능을 수행할 수 있도록 하고, 털려진 오일은 드레인(drain) 배관을 통해 신속히 처리될 수 있는 구조를 갖추고자 하였다. 이에 요구되는 성능은 90%이상의 고집진 효율을 가지며, 집진된 오일 미스트에 대해 탈수가 용이하고, 원심력에 의한 잦은 탈수에도 충분한 내구성을 지닐 필요가 있다.

II. 연구내용 및 방법

1. 원심력 필터 재생기능의 오일 미스트 여과 집진장치의 원리

본 연구에서 제안하고자 하는 오일 미스트 여과 집진장치는 필터 표면에 부착된 오일 미스트와 분진을 원심력을 이용하여 탈수시켜 필터의 여과기능을 지속적으로 유지시키는데 주안점을 두었다. 이에 대해 가동원리를 Fig. 1에 나타내었다. 모터에 의해 회전될 수 있는 원통형 필터 카트리지(cartridge)가 설치된 집진장치로 오일 미스트가 유입되면, 원통필터 외부표면부터 부착이 진행되고 일정시간이 지나면 오일 미스트에 의해 필터 표면이 막히면서 과도한 여과저항이 발생하게 된다. 이 때 모터가 연결된 필터 카트리지를 고속으로 회전시켜 필터 표면에 부착된 오일 미스트를 필터의 회전 시 발생하는 원심력에 의해 탈수되도록 하였다. 여기서 필터로부터 오일 미스트를 털어내는 기능을 여러 단어로 표현할 수 있겠으나 혼돈을 방지하기 위하여 “탈수”라 표현하였다.

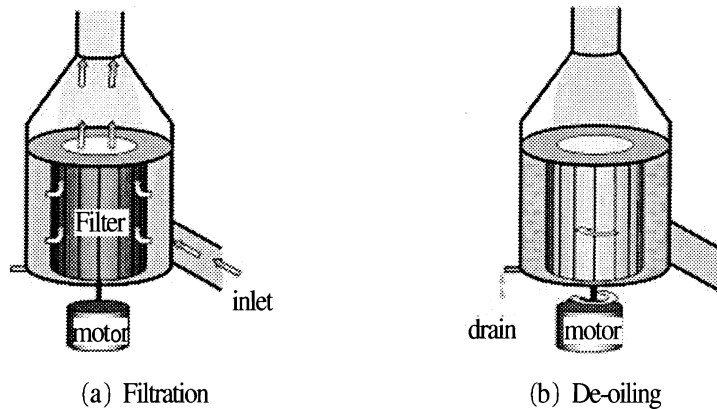


Fig. 1. Mechanism of oil mist collector.

2. 집진장치의 설계변수의 선정

집진장치를 개발하는데 있어서 고려해야 할 중요한 요소는 오일 미스트에 대한 충분한 집진성능과 함께 소형화를 통해 경제성을 높이는 방법이다. 따라서 우선적으로 가능한 한 높은 여과속도에서 집진효율 90% 이상의 성능을 발휘할 수 있는 필터를 선정하였다. 여기서 여과속도가 높을수록 유리한 이유는 필요 송풍량에 대해 요구되는 여과면적이 줄어들어 집진장치를 소형화시킬 수 있기 때문이다.

필터의 재생을 위해서는 필터 카트리지의 회전에 의한 원심력으로부터 오일 미스트의 탈수능력이 우수해야 한다. 이를 위해 집진효율 90% 이

상을 갖는 필터에 대하여 운전조건에 따른 탈수효율을 평가하였다. 이 과정에서 카트리지의 회전수와 탈수 시간을 운전조건으로 정립하였다.

집진장치의 기능상 필터를 고속으로 회전시켜 탈수시키기 때문에 필터의 내구성 또한 집진장치의 중요 고려사항이 된다. 이를 위하여 집진효율이 90% 이상인 필터에 대하여 반복된 탈수작업 후 내구성을 평가하였다. 내구성 평가는 한국표준협회에서 제시한 직물의 내구성 평가방법(한국표준협회, 1998)에 따라 SEM(scanning electron microscope) 촬영, 인장강도 및 신장률 측정, 통기성 등을 평가하는 방법으로 필터 재질의 특성 변화를 비교 분석하였다.

여러 평가를 통해 최종적으로 선정된 필터에 대하여 집진장치의 예

압력손실과 적정한 송풍기 선정을 위한 기초자료로 활용하기 위하여 여과 속도에 따른 필터 차압을 측정하여 압력손실계수(K)를 산출하였다.

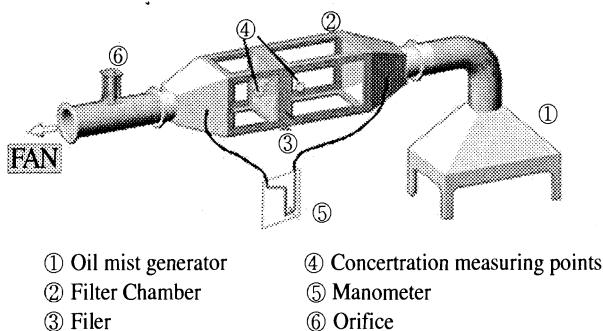
3. 필터 집진효율 및 차압 평가

1) 실험장치

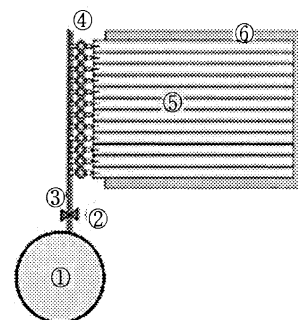
필터의 집진효율 및 차압을 측정하기 위한 실험장치는 Fig. 2와 같이 오일 미스트 발생부, 필터 챔버, 오일 미스트가 함유된 공기를 이송하기 위한 송풍기로 구성되어 있다.

(1) 오일 미스트 발생부(Oil mist generator)

오일미스트 집진장치의 집진 효율을 정확하게 평가하기 위해서는 실제로 현장의 공작기계에서 발생되고 있는 오일미스트를 사용하는 것이 바람직하다. 그러나, 실험실에서 그런 작업을 하기란 현실적으로 거의 불가능하다. 그리고, 본 연구의 목적이 집진장치의 개발 및 초기 평가라는 점을 고려해 볼 때 실험실에서 간단하게 오일미스트를 발생시킬 수 있는 장치가 필요하였다. 여러 가지 시행착오 끝에 Fig. 3에 보인 바와 같이 열판을 이용한 증발장치를 최종적으로 사용하였다. 발생 장치의 원리는 바닥의 열판(hot plate)에 의해 가열된 경사진 알루미늄 트레이(tray) 위를, 공급 밸



- ① Oil mist generator
- ② Filter Chamber
- ③ Filter
- ④ Concentration measuring points
- ⑤ Manometer
- ⑥ Orifice



- ① MWFs tank
- ② PVC Valve
- ③ PVC tube
- ④ Speed control valve
- ⑤ Aluminum tray
- ⑥ Hot plate

Fig. 2. Schematic drawing of experimental set up.

Fig. 3. Schematic drawing of oil mist generator.

브(speed control valve)를 이용해 오일을 일정하게 흘러내릴 수 있도록 하여, 오일이 트레이를 흘러내리는 동안 증발되도록 하였다. Heitbrink(2000) 등의 연구에서 절삭가공을 할 경우 가공물체의 표면에서 발생하는 온도는 250~350℃가량 되는 것으로 보고된 바가 있어 여기서는 트레이의 온도를 300℃로 일정하게 유지하였다.

(2) 필터 챔버(Filter chamber)

필터의 오일 미스트 집진효율과 차압을 측정하기 위하여 일반적으로 생산업체에서 필터 검사방법으로 채택하고 있는 ASHRAE(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) Standard 52.1(1992)의 규격에 만족하도록 가로 0.61m × 세로 0.61m 크기로 제작하였으며, 챔버 내에서 기류가 편향되지 않고 균일할 수 있도록 챔버 유입구는 45°확대관을 사용했으며 유입구로부터 1m 지점에 필터를 설치하였다.

(3) 필터(Filter)

실험에 사용된 필터는 국내에서 가장 널리 사용되는 오일 미스트 집진용으로써 3종(glass fiber, HEPA, plastic foam) 8가지 필터를 대상으로 하였다.

(4) 오리피스(orifice) 및 송풍기(fan)

오일 미스트의 정확한 농도를 측정하기 위해서는 등속흡인을 통한 샘플링이 무엇보다 중요하다. 특히 필터가 오일 미스트를 많이 포집할수록 압력손실이 증가하여 유량변화를 일으키기 때문에 실험하는 동안 주기적인 유량 확인이 필요하다. 따라서 이를 확인하기 위하여 송풍량 측정용 오리피스(sharp-edged orifice)를 설치하여 오리피스 전·후단의 차압으로 송풍량 변화유무를 확인하였다. 오리피스의 교정은 피토크와 디지털 마이

크로 마노미터(digital micro manometer, FCO-12, Furness Control)를 사용하였다.

본 연구에 있어서 실험장치 내로 오일 미스트 함유공기 이송을 위해서 100 m³/min × 150 mmAq 용량의 터보형(turbo type) 송풍기를 사용하였으며, 실험 조건에서 필터 여과속도 변화를 위해 송풍기 모터(motor)에 주파수 변환기(inverter)를 연결하여 전류의 주파수를 0~60Hz로 변화하였다.

2) 집진효율 평가

NIOSH(National Institute for Occupational Safety and Health)의 오일 미스트 측정방법인 NIOSH Method #0500(NIOSH, 1996)에 의하면 오일 미스트는 5μm, 37mm PVC 여지를 사용하여 1~2 l/min으로 흡입하여 중량법으로 측정하도록 되어 있다. 하지만 이 측정방법은 덕트 내의 빠른 기류조건과는 달리 기류가 거의 없는 실내공기 중의 미스트 포집방법으로 기류가 0.03 m/s 이내의 매우 낮은 유속에 적용하도록 되어 있다. 본 실험장치는 실험 성격상 필터 챔버 내부에서 최대 1.2 m/s 가량의 높은 유속이 형성되기 때문에 샘플링 방법을 그대로 적용하기는 어려웠다. 국내 대기오염공정시험법의 입자상물질 시료포집방법(환경부, 1997)을 살펴보면, 입자상 물질을 포집하기 위해서는 굴뚝의 배출속도와 같은 유속의 등속흡인(isokinetic sampling)으로 포집하도록 되어 있다. 만약 등속흡인되지 않을 경우 측정농도에 오차가 발생할 수 있기 때문이다.

따라서 덕트 내의 미스트 측정에 있어서 아직까지 명확하게 정리된 포집 방법이 없기 때문에 본 연구에서는 5μm, 37mm PVC 여지를 이용하여 등속흡인을 통해 오일 미스트를 포집하여 중량법으로 분석하였다. 시료포집시간은 매 측정 시 20분간으로

동일하게 하였으며, 동일 조건에서 5회 이상 반복 측정하였다.

필터에 의한 오일 미스트의 집진효율을 평가하기 위하여 필터 앞·뒤에서 동시에 시료를 포집하여 포집된 필터의 무게로 농도를 환산한 후 집진효율을 평가하였다. 일반적으로 여과 필터의 집진효율은 여과속도가 낮을수록 증가한다(Buonicore et al., 1992; 이상권 등, 2004). 따라서 여과속도가 느릴수록 효율이 증가될 것으로 기대하지만 제품 특성상 경제성을 고려해 소형화, 경량화를 위해서는 여과속도를 낮추는데 한계가 있다. 본 실험에서는 이를 고려하여 실험 중 오일 미스트 제거용 필터의 여과속도에 따른 집진효율 변화를 확인하기 위하여 챔버내 유속을 0.4~1.2 m/s의 범위에서 단계적으로 변화시키며 실험하였다.

오일 미스트 집진효율은 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$\text{Removal efficiency}(\%) = \frac{(C_i - C_o)}{C_i} \times 100$$

여기서, C_i는 필터 앞의 오일 미스트 측정농도(mg/m³)이고, C_o는 필터 뒤의 오일 미스트 측정농도(mg/m³)이다.

3) 필터 차압 측정

여과식 오일 미스트 집진장치를 설계하기 위해서는 필터의 여과속도에 따른 집진효율뿐만 아니라 그때 발생하는 압력손실도 중요하다. 즉 개발된 집진장치에서 적절한 송풍량을 발생시키기 위해서는 집진장치의 압력손실을 정확하게 예측하여 적절한 송풍기를 선정해야 하기 때문이다.

본 연구에서는 필터의 여과속도에 따른 압력손실 변화를 측정하기 위하여 필터 전·후단에 정압 측정구를 설치하여 디지털 마이크로 마노미터를 이용해 압력손실을 측정하였다. 측정된 필터 차압은 필터 앞·뒤의

정압차를 말하며, 최종적으로 단위 속도압에 대한 압력손실계수(K)로 나타내었다.

필터에 의한 압력손실은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta P = KV_p$$

여기서, ΔP 는 필터에 의한 압력손실(mmAq)이고, V_p 는 여과 속도압(mmAq)이다.

4. 탈수시험

탈수 시험을 위한 실험장치는 Fig. 4에 도식화 하였다. 실험 장치는 필터를 장착하여 회전시킬 수 있는 필터 지지대(filter supporter)가 내장된 본체와 이를 구동시키기 위한 모터(AC motor)로 구분된다. 필터 지지대는 다공판으로 구성되어 있으며 지지대 외장을 필터가 둘러싸고 있는 구조로서, 필터를 지지대에 쉽고 견고하게 탈·부착할 수 있도록 제작하였다. 또한 본체 하부에는 탈수된 오일 미스트가 원활히 배출될 수 있도록 경사지게 제작하였다.

필터를 고속으로 회전시키기 위해 0.75kW, 4극 모터를 필터 지지대와 직결식으로 연결하여 최대 1,800 rpm으로 회전할 수 있도록 하였으며, 주

파수 변환기(inverter)를 설치하여 회전수를 조절하였다.

탈수 시험을 위해서는 오일 미스트가 필터에 충분히 집진되어 있어야 한다. 본 실험에서는 미립화 된 오일 미스트 대신 살충제 분무용 분무기를 이용하여 인위적으로 미립화 시킨 금속가공유 1ℓ를 필터에 균일하게 도포하여 이 과정을 대신하였다. 탈수 시간은 매 실험마다 20분으로 동일하게 하였으며, 회전수는 장비의 내구성을 고려해 150~450 rpm 범위에서 수행하였다.

필터의 탈수효율은 금속가공유의 초기 도포량에 대한 탈수량의 비율로써, 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$De - Removal\ efficiency(\%) = \frac{M_o}{M_i} \times 100$$

여기서, M_i 는 금속가공유의 초기 도포량(ℓ)이고, M_o 는 탈수된 금속가공유의 양(ℓ)이다.

5. 내구성 평가

1) SEM (Scanning Electron Microscope) 촬영

탈수 후 필터 조직 변화를 관찰하기 위하여 SEM(S-3000H, HITACHI) 촬영을 수행하였다. 탈수시험 방법과 동일하게 금속가공유 1ℓ를 분무기를 이용해 도포시킨 후 탈수효율이 가장

우수한 조건인 20분간 450rpm에서 탈수 시험한 것을 1주기(cycle)라고 하면 각 필터당 총 30주기를 반복한 후 필터의 일부를 잘라내어 SEM 촬영하였다. SEM 촬영을 위해 필터를 $55 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 의 건조로 내부에서 2시간 방치하고, 건조제가 들어 있는 데시케이터(desiccator)에서 24시간 이상 보관하여 충분히 건조시킨 후 시편으로 제작하였다. SEM 촬영은 사용하지 않은 필터와 탈수 시험을 반복한 필터에 대해 비교 평가하였다.

2) 인장강도 및 신장률 시험

필터의 내구성에 관련해 직접적인 판단 기준이 되는 인장강도와 신장률을 측정하였다. 인장강도와 신장률은 인장강도 시험기(Tensile Strength Tester, Dtu-900MH A, 대경테크)를 이용해 측정하였다. 측정방법은 한국표준협회의 KS K 0520 직물의 인장강도 및 신도 측정 방법(1998)에 준하여 실시하였으며, 인장강도 시험기에 사용할 시편은 앞선 SEM 촬영에서와 같이 탈수 시험을 반복한 필터를 폭 50mm, 길이 76mm로 제작하여 폭과 길이방향의 인장강도와 신장률을 측정하여 평가하였다.

3) 통기도 시험

통기도란 필터의 여과 저항을 나타내며 필터 전·후에 일정한 압력차를 만들고 단위 시간에 단위 면적을 통과하는 공기량을 이용하여 측정한다. 통기도는 통기도 측정기(Air Permeability Tester, Textest FX 3300, Textest, AG)를 이용하여 측정하였다. 측정방법은 한국표준협회의 KS K 0570 천의 공기 투과도 측정방법(한국표준협회, 1998)에 준하여 실시하였으며, 통기도 측정기에 사용한 시편은 앞선 SEM 촬영에서와 같이 탈수 시험을 반복한 필터를 가로 700mm, 세로 700mm로 제작하여 시험하였다.

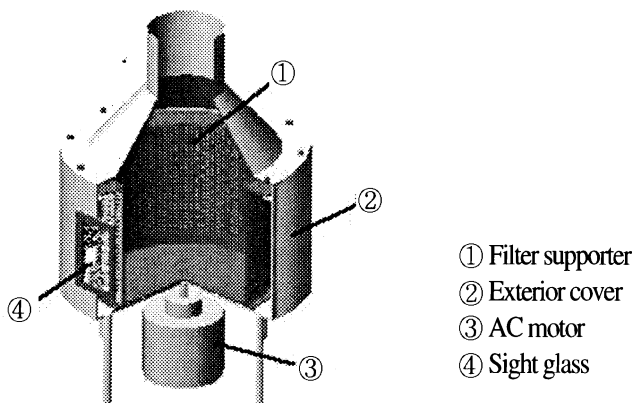


Fig. 4. Schematic drawing of de-oiling experimental set-up.

III. 결과 및 고찰

1. 오일 미스트 집진 효율 평가

앞에서 설명한 여과속도 범위(0.4~1.2 m/s)에서 가장 높은 효율을 보일 것으로 예상되는 0.4 m/s에서 3종 8가지 필터에 대해 실험한 오일 미스트 집진효율 평가 결과를 Table 1에 나타내었다. 집진효율이 가장 우수한 경우는 Type 1로 99.3%의 집진효율을 나타내었으며 Type 4 필터도 95% 이상의 집진효율을 보였다. 실험 결과 유리섬유계 필터가 비교적 처리효율이 우수한 것으로 나타났으나, 폴리프로필렌(polypropylene)계 HEPA 필터와 polyester계 플라스틱 폼(plastic foam) 필터는 각각 33%와 20.4%로

낮은 집진효율을 나타내었다. 따라서 개발하고자 하는 집진장치에 적용가능한 필터로는 95% 유리섬유 필터 Type 1과 Type 4의 두 종류로 한정하였다.

0.4 m/s의 여과속도에 대해 90% 이상의 집진효율을 나타낸 95% 유리섬유 Type 1과 Type 4에 대해 보다 세밀한 평가를 위해 여과속도를 변화시켜 집진효율을 확인하였다. 이에 대한 결과는 Table 2에 나타내었다. 여과속도가 증가할수록 Type 1은 99.3%에서 86.9%로 감소되고, Type 4도 91.7%에서 76.5%로 감소되어 Buonicore 등(1992)이 언급한 것과 동일하게 여과속도가 증가할수록 필터의 집진효율이 감소된다는 사실을 확인하였다.

전반적으로 Type 1이 Type 4에 비해 우수한 효율을 보였으며, 두 필터 모두 여과속도 0.8 m/s 이하에서는 오일 미스트의 집진효율이 90% 이상으로 매우 양호하였다.

2. 탈수 시험

일 미스트 집진효율 평가에서 90% 이상의 우수한 성능을 발휘한 95% 유리섬유인 Type 1과 Type 4에 대해 탈수 시험을 실시한 결과는 Table 3에 나타내었다. 필터 회전수가 증가할수록 Type 1은 25.2%에서 94.1%로 증가하고, Type 4는 7.0%에서 44.8%로 증가하였다. 전반적으로 Type 1이 Type 4에 비해 탈수효율이 상대적으로 우수한 것으로 나타났다.

Table 1. Removal efficiencies of oil mist with various filters

Filter type	Filter No.	Specific properties	Filtration velocity of 0.4m/s
			Removal efficiency (%)
Glass fiber A	Type 1	95% Glass fiber	99.3
	Type 2	85% Glass fiber	78.6
	Type 3	65% Glass fiber	56.1
	Type 4	95% Glass fiber	91.7
Glass fiber B	Type 5	85% Glass fiber	76.7
	Type 6	65% Glass fiber	62.4
HEPA	Type 7	Polypropylene	33.0
Plastic foam	Type 8	Polyester	20.4

Table 2. Removal efficiencies of oil mist with different filtration velocities (Type 1 and Type 4)

Filter type	Filter No.	Specific properties	Filtration velocity (m/s)		
			0.4	0.8	1.2
Glass fiber A	Type 1	95% Glass fiber	99.3%	94.7%	86.9%
Glass fiber B	Type 4	95% Glass fiber	91.7%	89.8%	76.5%

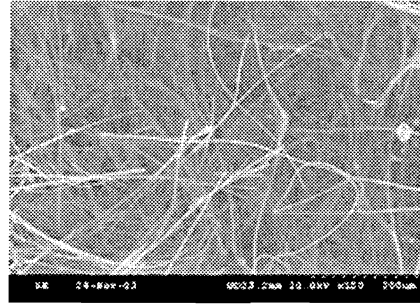
탈수 효율은 필터 재생효율을 의미하며 Type 1의 경우 탈수 후 94% 이상 필터가 재생되어 그만큼의 오일 미스트를 새롭게 집진할 수 있음을 의미한다. 따라서 Type 1이 원심력 필터 재생기능을 갖춘 집진장치에 적합한 필터임을 확인하였다.

3. 내구성 평가

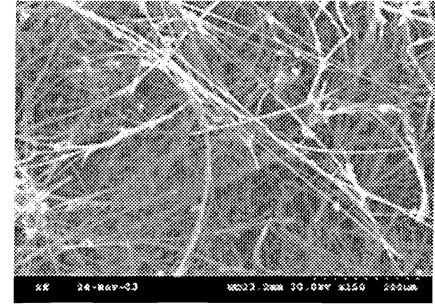
1) SEM(Scanning electron microscope) 분석

오일 미스트 집진효율이 90% 이상으로 우수한 Type 1과 Type 4에 대해 탈수 시험을 30회 이상 반복 수행한 후 필터 섬유조직 변화를 관찰하기 위해 SEM 촬영을 수행하였다. 이에 대한 결과는 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. Type 1과 Type 4 모두 실험 전의 새 필터와 비교해 실험 후 뚜렷한 조직 변화는 관찰되지 않았다.

두 필터에 대한 또다른 관찰 내용은 Type 1에 비해 Type 4의 섬유소가 굵게 제작되어 있다는 사실이었다. 이는 섬유소 간의 공극이 클 수 있음을 의미한다. 일반적으로 여과 집진기의 입자에 대한 중요 집진원리는 관성충돌(*inertial impaction*), 직접차단(*direct interception*), 확산(*diffusion*) 등에 의해 집진되는 것으로 알려져 있다. 1 μ m 이상의 비교적 큰 입자의 경우가 이러한 관성충돌과 직접차단에 의해 집진되는 것으로 알려져 있다. 반면 1 μ m 이하 미세입자의 경우는 브라운 운동(*Brown Motion*)을 하며 섬유소에 붙게 된다(이상권 등, 2004). 따라서 오일 미스트의 입경이 대부분

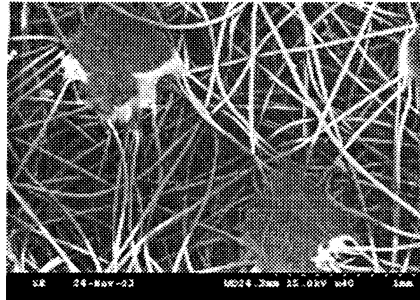


(a) Before



(a) After

Fig. 5. SEM results of filters (Type 1)



(a) Before



(a) After

Fig. 6. SEM results of filters (Type 4)

5 μ m 전후임을 감안해 볼 때 집진은 대부분 관성충돌과 직접차단에 의해 발생되었을 것으로 판단된다.

따라서, 공극이 클수록 직접차단에 의한 집진효과를 떨어뜨려 오일 미스트의 집진효율을 감소시키는 직접적인 원인이 되었을 것으로 판단되며, 이는 앞의 집진효율 평가에서 Type 1이 Type 4에 비해 집진효율이 높게 나타난 결과를 뒷받침해주고 있다.

Type 1과 Type 4 모두 섬유소를 무작위로 포개어 만든 부직포(*felt*) 형태이지만 특히 Type 4의 경우에는 접착제에 의해 추가적으로 섬유소가 서로 부착되어 있음을 SEM 촬영을

통해 확인할 수 있었다.

2) 인장강도 및 신장률

오일 미스트 집진효율이 90% 이상으로 우수한 Type 1과 Type 4에 대하여 인장강도 및 신장률을 측정하여 Fig. 7과 Fig. 8에 결과를 나타내었다. 이를 참조하면, 필터 초기 인장강도 및 신장률은 Type 4(가로 8.4 kg/5cm, 세로 5.3 kg/5cm)가 Type 1(가로 3.9 kg/5cm, 세로 2.7 kg/5cm)에 비해 월등히 우수함을 알 수 있다. 이는 SEM 분석결과에서 보았듯이 필터를 구성하는 섬유 조직이 Type 1에 비해 Type 4가 굵고 섬유소를 접착제를 이

Table 3. De-oiling efficiencies of filters with different rotation speeds

Filter type	Filter No.	Specific properties	Revolutions per minute (rpm)		
			150	300	450
Glass fiber A	Type 1	95% Glass fiber	25.2%	50.7%	94.1%
Glass fiber B	Type 4	95% Glass fiber	7.0%	15.8%	44.8%

이용해 추가적으로 부착시켰기 때문으로 판단된다. 하지만 탈수 시험 후 Type 4는 인장강도 및 신장률(가로 8.0 kg/5cm, 세로 3.8 kg/5cm)이 줄어드는 것에 반해 Type 1(가로 4.9 kg/5cm, 세로 3.0 kg/5cm)은 오히려 증가하는 것을 확인할 수 있다. Type 1의 인장강도 및 신장률이 증가되는 원인을 명확히 규명할 수는 없었으나 입자상 물질 처리에 사용되는 대표적인 필터인 백(bag) 필터와 같이 실을 규칙적으로 짜서 만든 엮임(woven) 필터와 달리 Type 1은 섬유소를 무작위로 포개어 만든 부직포(felt)의 형태이기 때문에 탈수 시 원심력에 의한 섬유조직 간에 압착이 발생되어 섬유소 간의 결합력이 증가했기 때문으로 판단된다. 반면에 Type 4의 경우는 SEM 분석결과에서 언급하였듯이 섬유소 간의 부착을 위해 사용한 접착제가 원심력에 의한 탈수과정에서 파손되고, 일부 파손되지 않은 접착제 부분이 섬유소 간의 압착을 방해하였기 때문에 인장강도 및 신장률이 감소된 것으로 판단된다. 따라서 여과식 집진장치에 적합한 필터는 탈수 후 인장강도 및 신장률이 증가되는 Type 1이 그렇지 않은 Type 4에 비해 적합한 것으로 판단되었다.

3) 통기도 시험

오일 미스트 집진효율이 90% 이상으로 우수한 Type 1과 Type 4에 대하여 통기도를 시험하여 Fig. 9에 결과를 나타내었다. Type 1은 실험 전 27.8 $\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{sec}$ 에서 실험 후 25.0 $\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{sec}$ 로 감소하였고, Type 4의 경우 19.5 $\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{sec}$ 에서 14.5 $\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{sec}$ 로 감소하여 Type 1의 통기도 변화가 상대적으로 적었다. 이는 탈수 시 원심력에 의한 섬유소 간의 압착으로 공극이 좁혀졌기 때문으로 판단된다.

통기도가 우수하다는 것은 공기가 필터를 쉽게 통과할 수 있다는 것을 의미하기 때문에 탈수 후 필터가 재생되었을 때 필터의 여과저항이 적게

발생된다는 것이다. 따라서 탈수 전 통기도가 우수하고, 탈수 후에도 통기도 감소율이 적은 Type 1이 개발하고자 하는 오일 미스트 여과 집진장치에 적합한 필터로 확인되었다.

4. 필터 차압 측정

오일 미스트 집진효율 실험에서 가장 우수한 성능을 발휘한 Type 1에 대하여 여과속도에 따른 압력손실을 측

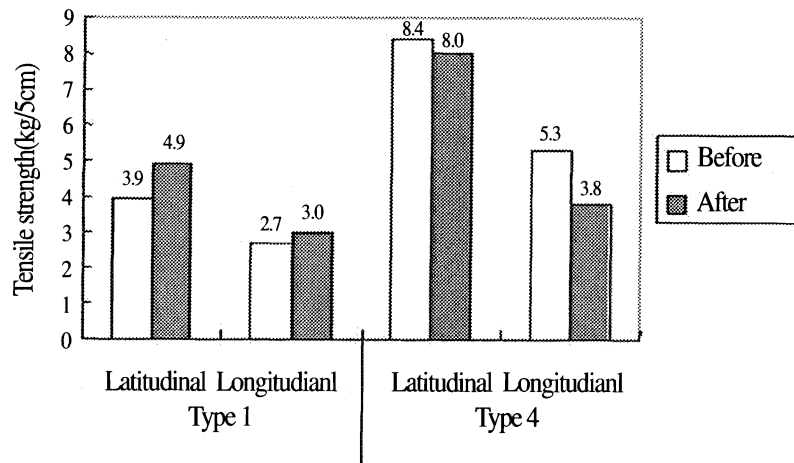


Fig. 7. Tensile strengths of filters before and after de-oiling.

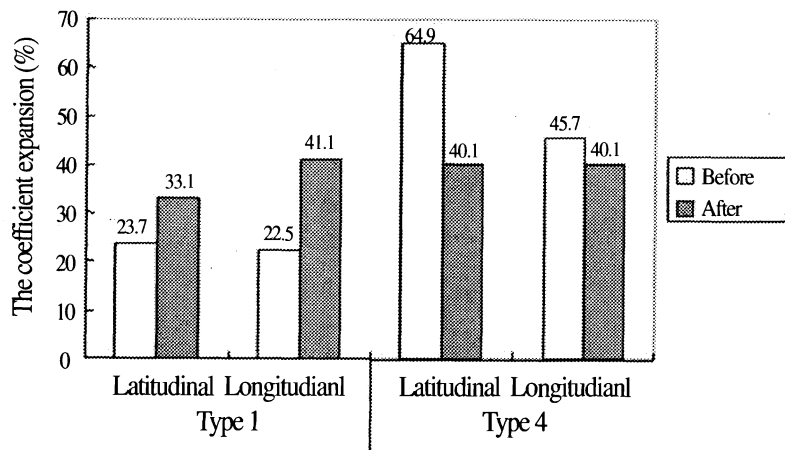


Fig. 8. Expansion coefficients of filters before and after de-oiling.

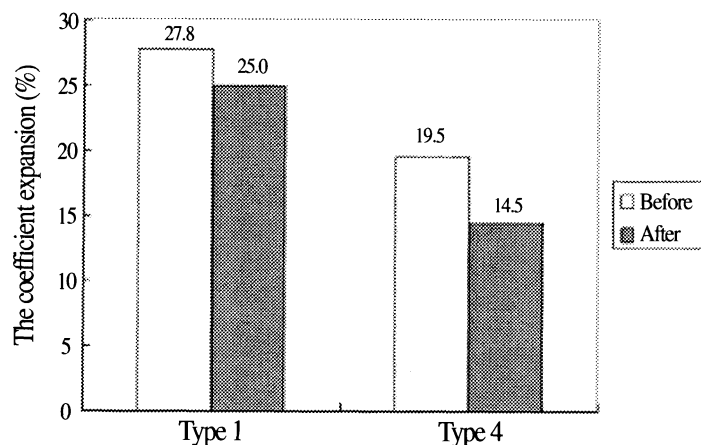


Fig. 9. Permeability coefficients of filters before and after de-oiling.

정하여 Fig. 10에 결과를 나타내었다. 여과속도가 0.4 m/s에서 1.2 m/s로 증가할수록 필터 차압이 8 mmAq에서 45 mmAq로 증가되어, 여과속도가 증가할수록 필터 차압도 증가하는 것을 알 수 있었다. 일반적으로 산업환기 시스템에 있어서 압력손실은 속도의 제곱에 비례하게 된다(ACGIH, 2004). 따라서 필터 차압에 대한 비례상수(압력손실계수, K)를 구하기 위하여 여과속도를 여과속도압으로 전환시켜 도식화한 결과는 Fig. 11에 나타내었다. 필터 차압과 여과속도압과의 관계는 1차 함수의 관계로 서로 비례하고 있음을 확인하였으며, 비례상수인 압력손실계수(K)는 522.27로 산출되었다.

5. 원심력 탈수 기능을 갖춘 여과식 오일 미스트 집진장치의 설계

본 연구 결과를 바탕으로 15 m³/min 소용량의 원심력 필터 재생기능을 갖춘 오일 미스트 여과 집진장치를 설계한 예를 Table 4와 Table 5에 나타내었고, 이에 대한 설계 모식도 및 제작된 시제품은 Fig. 12에 나타내었다. 필터의 선정은 상대적으로 우수한 성능을 가진 Type 1로 하였고, 여과속도는 90% 이상의 집진효율을 기대할 수 있는 유속 범위가 0.8 m/s 이하로 연구되었기 때문에 현장 적용상의 여유율을 고려하여 0.5 m/s로 설계하였다. 여과속도가 0.5 m/s 일때 Type 1의 필터 차압은 압력손실계수(K)인 522.27

을 곱하여 8 mmAq로 계산되었다. 필터의 탈수는 94% 이상의 탈수효율을 보인 450 rpm으로 20분 동안 탈수하도록 하였다.

집진장치의 크기를 설계한 결과는 Table 6에 나타내었는데, 처리풍량이 15 m³/min이고, 여과속도가 0.5 m/s 일때의 여과면적은 0.5m²이었다. 이와 동일한 여과면적을 갖는 필터의 가로(L), 세로(H)의 길이는 각각 1m, 0.5m가 되고, 길이방향으로 원통형 카트리지를 만들면 직경(D2)이 0.32m가 되었다. 따라서 카트리지 필터의 직경(D2)은 0.32m, 집진기의 높이(H)는 0.5m가 되었다.

집진장치의 유입 덕트 직경(D3)은 오염물질이 오일 미스트임을 감안하

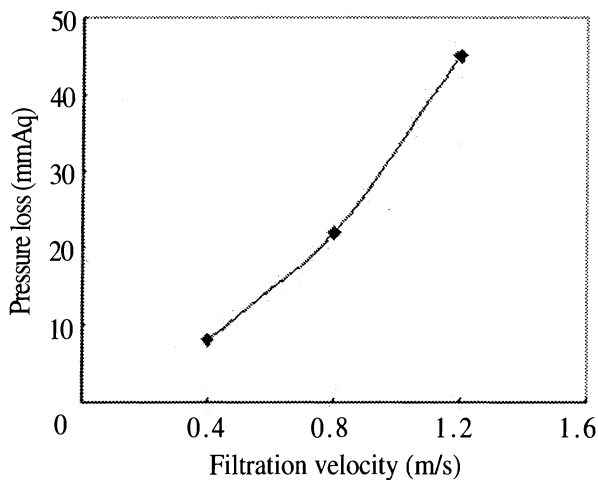


Fig. 10. Pressure losses of filter with different filtration velocities.

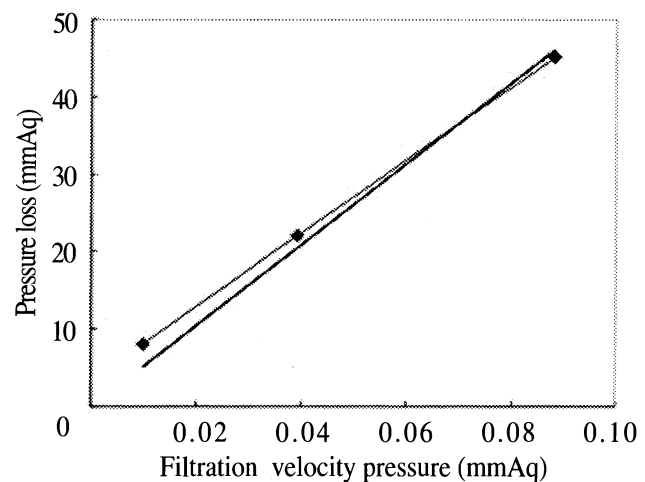


Fig. 11. Pressure losses of filter .vs. filtration velocity pressures.

Table 4. Design conditions and driving condition of oil mist collector developed in this study

Air volume (m ³ /min)	Design condition		Driving condition	
	Filtration velocity (m/s)	Filter pressure loss (mmAq)	De-oiling rpm	De-oiling time (min)
15	0.5	8	450	20

Table 5. Dimensions of proto-type oil mist collector

Filter area (m ²)	Filter Length L(m)	Filter height H (m)	D1 (m)	D2 (m)	D3 (m)
0.5	1	0.5	0.45	0.32	0.13

여 덕트 최소반송속도를 18 m/s 이상으로 설계하여 0.13m가 되었다. 따라서 집진장치의 몸통경(D1)은 카트리지 필터 직경(D2)인 0.32m와 집진장치의 유입 덕트 직경(D3)인 0.13m를 합한 0.45m로 설계하였다.

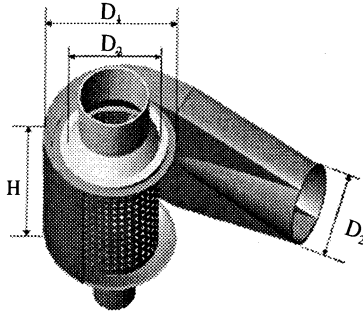


Fig. 12. Schematic drawing and photo of proto-type collector.

IV. 결 론

본 연구를 통해 기존 오일미스터 콜렉터의 단점인 유지관리의 어려움을 극복한 원심력을 이용한 콜렉터를 개발하였다. 일련의 실험을 통해 필터의 재질을 선정하였고, 적합한 탈수기능의 세부조건을 찾아내었으며, 콜렉터의 형상 등을 설계할 수 있는 기초단계를 마련하였다.

본 연구에서 얻은 기초자료를 요약해보면 다음과 같다.

1. 95% 유리섬유(glass fiber) 필터는 여과속도 0.8m/s 이하에서 90% 이상의 집진효율을 발생하므로 평가되었고, 특히 Type 1의 경우 0.4m/s의 여과속도에서 99.3%의 고집진효율을 나타내었다.

2. 95% 유리섬유 필터 중 Type 1이 450rpm으로 탈수할 경우 94.1%로 가장 우수한 탈수 효율을 보여 필터 재생능력이 우수하였다.

3. 95% 유리섬유 필터의 내구성 평가를 위한 SEM 촬영결과 10시간 이상 지속적으로 탈수하여도 Type1과 Type 4 모두 섬유조직의 변화는 발생하지 않았다.

4. 95% 유리섬유 필터의 내구성 평가를 위한 인장강도 및 신장률 측정결과, 필터의 초기 인장강도 및 신장률은 Type 4가 우수하나 탈수 시험 후에는 Type 1의 경우 오히려 증가되어 내구성이 향상되었다.

5. 95% 유리섬유 필터의 통기도 시험결과 탈수 전·후 모두 Type 1이 우수하였으며, 탈수 후의 통기도 변화량($2.8 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{sec}$) 역시 Type 4($5 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{sec}$)에 비해 작아 탈수 후에도 필터 여과저항이 낮았다.

지금까지의 연구결과를 현장에 실제로 적용할 수 있는 방법과 개발된 소형 용량을 중대형으로 중대시킬 수 있는 방법에 대한 지속적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

REFERENCES

- 이상권, 김신도, 김태형, 오세원, 이병규 등. 대기오염제어. 동화기술사; 2004. (269-280쪽)
- 환경부. 배출허용시험방법-입자상물질 시료채취법. 대기오염공정시험법; 1997
- 한국표준협회. KS K 0520 직물의 인장강도 및 신도 측정 방법. 한국공업진흥청; 1998.
- 한국표준협회. KS K 0570 천의 공기투과도 측정 방법. 한국공업진흥청; 1998.
- American Conference of Governmental Industrial Hygienist. Industrial VVentilation-A Manual of Recommended Practice 25th Edition; 2004. p. 1.2-1.10
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Stand 52.1 Gravimetric and Dust-Spot Procedures for Testing Air-Cleaning Devices Used in General Ventilation for Removing Particulate Matter. 1992.
- Buonicore A.J. and Davis W. , Air pollution engineering manual. Air & Waste Management Association; 1992. p. 114-131.
- National Institute of Occupational Safety and Health. Criteria for a Recommended Standard Occupational Exposures to Metal Working Fluids. Cincinnati, Ohio; 1996.
- National Institute for Occupational Safety and Health. Method #0500 Particulate Not Otherwise Regulated. 1993.
- Tolbert P.E., Eisen E.A., Pothier L.J., Monson R.R., et al., Mortality Studies of Machining-Fluid Exposure in the Automobile Industry II . Risks Associated With Specific Fluid Types. Scand J. Work. Environ. Health; 1992. p. 351-360.
- Heitbrink W.A., Deye G.J., Spencer A.B.. Mist Control at a Machining Center. AIHAJ 2000 Vol. 61, pp275-281.
- Chen Z., Wong K., Li W., Liang S.Y. et al., Cutting fluid aerosol generation due to spin-off in turning operation: analysis for environmentally conscious machining. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, Vol 123, p506-512.