

〈중설〉 국내 시판 방진마스크는 나노입자에 적합한가?

한돈희[†]

인제대학교 보건안전공학과

Are Particulate Filtering Respirators Available in Korea Efficient for Nanoparticles?

Don-Hee Han[†]

Department of Occupational Health and Safety Engineering, Inje University

There is widespread concern that particulate filtering respirators (PFRs) available in Korea will be efficient for nanoparticles. The purpose of this review study was to analyse research literature and recommend PFRs suitable for protection against nanoparticles. In all studies, respirators containing electret filter media (N95, P100 and FFP2, FFP3) consistently have their MPPS below 100 nm and particle penetration levels at the MPPS can vary widely, but they comply with NIOSH or EN certification criterion. Electret filtering facepieces respirators (FFRs) were found to shift in the Most-Penetrating Particle Size(MPPS) from 30-60 to 200-300 nm range after the electric charges were removed, and FFRs were above their minimum penetrations of criterion. Korean special class and first class

FFRs (the same as FFP3 and FFP2, respectively) would be efficient for nanoparticles unless FFRs are removed electric charges. It is difficult to evaluate if mechanical PFRs is efficient for nanoparticles due to the lack of related materials.

Key Words : Particulate filtering respirators, Nanoparticles, Penetration, Electret filter media, Korea

접수일 : 2011년 1월 11일, 채택일 : 2011년 2월 8일

† 교신저자 : 한돈희(경남 김해시 어방동 607 인제대학교 보건안전공학과,
Tel: 055-320-3285, Fax: 055-325-2471, E-mail: dhan@inje.ac.kr)

I. 서론

Ultrafine particles(UFPs), 즉, 극미세입자란 전통적으로 산업 및 환경보건 분야에서 100 nm보다 작은 입자에 사용되어 왔으며 의도적으로 만든 것이 아닌 연소, 용접 혹은 디젤엔진과 같은 내연기관에서 자동적으로 만들어지는 에어로졸을 지칭한다. Nanoparticles(NPs), 즉 나노입자는 크기 의존적인 이화화학적 특성 측면에서 자주 사용되는 용어로서 재료공학에서 자주 사용되어 왔다. 두 용어는 공학적으로 의도적으로 만들어진다면 나노입자라고 하고 비의도적 즉, 자동적으로 만들어진다면 UFPs로 구분한다. 특히, 발생원 중심으로 구분한 용어의 정의가 안전보건적인 측면에서 올바른지는 명확하지 않다. 위해도 평가(hazard assessment), 측정법, 노출관리 측면에서 NPs와 UFPs 간에 명확한 차이가 있는 것은 아니다. 예를 들어, UFPs라는 용어가 오래전부터 사용되어져 와서 나노 크기의 입자가 의도적으로 만들어졌다할지라도 (예를 들어, TiO_2) 종종 NPs가 아닌 UFPs로 사용되기도 한다(NIOSH, 2009).

본 연구에서는 입자 크기 단위 때문에 일반적으로 이해하기가 편리하다는 의미에서 나노입자를 쓰지만 여기에서는 발생원 차이에서 오는 UFPs도 포함시킨다.

공학적으로 만들어진 나노입자란 입경 1~100 nm 사이의 입자를 말한다. 이들은 입자가 매우 작아서 이들만의 독특한 이화화학적 특성을 가지고 있으나 인체에 어떠한 영향을 줄 것인지에 대해서는 잘 알려지지 않았다. 지금까지는 특이한 그 이화학적 특성 때문에 나노입자가 생체에 영향을 줄 수 있다(potential)는 정도로서 연구가 진행되어져 왔다.

NIOSH에서는 나노입자에 대한 보고서를 내면서 잠재적인 건강영향을 다음과 같이 정리하였다(NIOSH, 2009).

- ① 나노 입자는 대부분의 인체 침투경로는 호흡기계이다.
- ② 인체 및 동물 연구에서 흡입된 나노입자는 호흡기계에 침적하고 혈류를 통하여 다른 장기로 이동한다.
- ③ 세포배양연구에서 나노입자는 생물학적인 반응이 일어나는 것으로 관찰되었다.
- ④ 화학적 구성, 결정 구조, 입자 크기의 변화가 조직 독성을 다르게 할 수 있다.
- ⑤ 건강에 영향을 줄 수 있는 결정적인 이화학적 특성에 관한 연구가 필요하다.

NIOSH의 보고서처럼 현재 나노입자의 인체 영향은 결정적으로 무엇이라고 단정 지을 수는 없으나 동물실험을 통하여 생체에 악영향을 준다는 것은 잘 알려진 사실이며 점차 악영향을 주는 결정적인 이화학적 증거가 밝혀질 것이다. 현 단계에서는 우선적으로 나노입자의 인체 침투를 막을 수 있는 방법을 찾는 것이 급선무이다. 작업장에서는 환기 등 공

학적 방법을 총 동원해야겠지만 최후의 수단으로 호흡보호구를 착용하는 것이다. 그렇다면 현재 사용되는 특히, 국내에서 시판되는 방진마스크가 나노입자를 막아 줄 것인가에 의문을 갖게 된다.

본 연구에서는 우리나라에서 시판되고 있는 방진마스크의 방진필터-국산이든 외국산이든-가 과연 나노입자를 효과적으로 막아줄 수 있는지 그동안 연구결과를 토대로 고찰해보고자 한다. 현재 우리나라에서는 법적으로 누설현상(face leakage)을 크게 다루지 않기 때문에 이 부분은 본 연구에서 제외하였다.

본 연구에서 사용된 주요 용어는 다음과 같이 정리하였다.

- CMD(Count Median Diameter): 입자 수를 측정하였을 때 중간 값에 해당하는 입자의 직경
- CPC(Condensation Particle Counter): 입자에 증기를 뿌리고 응결시켜 입자를 키운 다음 에어로졸 수를 세는 장치
- DOP(Dioctyl Phthalate): 미국 NIOSH 검인증시험에서 R-, P-시리즈에 사용하는 오일 에어로졸, 우리나라에서는 파라핀 오일을 사용함.
- Electret filter: 정전기필터 즉, 포집효율을 높이고 호흡저항을 낮추기 위해 정전기력을 입힌 필터를 말하며 직물이 아닌 부직포 polymer fiber(예를 들어, polypropylene)에 전하를 입혀 생산. 습기와 오일미스트에 정전기력이 약해져 포집효율이 급속히 떨어짐. 주로 안면부여과식 호흡보호구(FFP: Filtering Facepiece)를 만드는데 사용됨.
- FFP1, FFP2, FFP3: 유럽 EN의 안면부여과식 방진마스크 기준
- FFR(Filtering Facepiece Respirator): 안면부여과식 호흡보호구. 이것은 방진필터 카트리지를 교체할 수 있는 방진마스크(주로 기계식 방진필터를 사용)와 구별됨.
- HEPA(High Efficiency Particulate Air): 고효율 필터의 약어로 입경 300 nm의 입자가 99.97% 이상 포집 가능한 필터
- MMAD(Mass Median Aerodynamic Diameter): 입자를 질량 중심으로 측정했을 때 중간 값의 공기역학적 직경
- MMD(Mass Median Diameter): 입자를 질량 중심으로 측정했을 때 중간 값의 직경
- Mondisperse: 입경이 단일 크기로 이루어진 입자들
- MPPS(Most-Penetrating Particle Size): 가장 투과가 잘 되는 즉, 포집하기 가장 어려운 입자의 크기로 일반적으로 입경 300 nm (0.3μ)를 의미하며 최근 연구에서 정전기 필터에서는 이 크기가 더 작은 나노입자 쪽으로 이동함.
- N-, R-, P-series: 미국 방진마스크 기준
- Neutralized: 필터에 포집이 잘 안되도록 입자의 정전기력을 없애는 조치를 의미하며 입자를 방사능 물질 ^{85}Kr 튜브를 통과시킴.

- Polydisperse: 입경이 다양한 크기로 이루어진 입자들
- SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer Spectrometer): 에어로졸의 전기적 이동도(electrical mobility)를 이용하여 실시간으로 입경 분포와 농도를 측정하는 장비로서 번역하면 「주사형 이동도 분석 장비」임.
- WPS(Wide Range Particle Spectrometer): 에어로졸의 모든 측정원리 즉, 광산란(laser light scattering), 전기적 이동도(electrical mobility) 및 응결계측법(condensation particle counting)을 한 장비에 복합시켜 입경 10~10,000 nm의 에어로졸 농도와 크기 분포를 측정하는 장비

II. 연구방법

연구는 문헌 고찰로 이루어졌다. 본 연구의 주요 검색어인 nanoparticle, ultrafine particle, particle size, penetration, particulate filtering respirator or mask, MPPS 등을 적절하게 조합하여 나노입자와 방진마스크 필터에 대한 자료를 인터넷을 통하여 수집하였다. 본 연구와 관련된 논문들이 게재되는 주요 저널 예를 들어, Annals of Occupational Hygiene, Journal of Occupational Environmental Hygiene, Journal of International Society for Respiratory Protection, Journal of Aerosol Science 등을 찾아 관련 논문을 구입하였다. 또 주요 정부관련 기관 예를 들어, 고용노동부, 산업안전보건공단(KOSHA), OSHA, NIOSH, HSE 등과 관련 학회 즉, 한국산업위생학회, AIHA, ACGIH, BOHS 등을 찾아 단행본과 자료를 구입하였으며 주로 10년 이내의 자료를 문헌 고찰하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 나노입자의 특성

쥐(rat)를 이용한 실험에서는 동일한 질량의 불용해성 나노입자가 유사한 구성성분의 큰 입자보다 폐렴, 조직손상 그리고 폐종양을 더 잘 일으켰다(Oberdörster와 Yu, 1990;

Oberdörster 등, 1992, 1994; Lison 등, 1997; Tran 등, 2000; Duffin 등, 2002; Renwick 등, 2004). 미세(fine) 입자와 UFPs가 함유된 에어로졸에 노출된 작업자들에 대한 역학연구에서 폐기능이 떨어지고 폐 증상이 악화되며 만성적 폐쇄성 폐질환 및 섬유증을 보고하였다(Kreiss등, 1997; Gardiner 등, 2001). 추가적으로 일부 연구에서는 디젤 내연기관의 UFPs 혹은 용접 흠에 노출된 작업자들에게서 폐암 증가와 신경장애를 포함한 폐질환이 발견되었다(Steenland 등, 1998; Garshick 등, 2004; Hart 등, 2006; Park 등, 2006; Ambroise등, 2007). 이들 연구의 공통점은 공학적으로 의도적으로 만들어진 나노입자는 그 특성이 다를 수 있어서 인체에 대한 영향이 확실치 않을 수 있다고 지적하였다.

2. 우리나라 · 유럽 · 미국의 방진마스크 성능기준

많은 나라에서 방진마스크에 대한 성능기준을 가지고 있으나 크게 미국기준과 유럽기준으로 구분할 수 있다. 미국기준은 캐나다, 멕시코, 칠레 등에서 사용하고 있으며 유럽기준은 영국, 독일 등 유럽의 각 나라에서 사용하고 있다. 우리나라에서 시판되는 방진마스크는 국내산뿐만 아니라 외국 수입품도 있기 때문에 이들 기준을 모두 알고 있어야 한다.

우리나라 방진마스크의 방진필터에 대한 성능시험(인증시험)은 산업안전보건공단 안전인증실(안전인증평가센터)에서 실시하며 2002년부터 우리나라 방진마스크의 성능기준(노동부, 2008)은 유럽의 성능기준인 EN 143:2000 (BS EN, 2000, 2008)과 EN 149:2001(BS EN, 2001)을 준용한다. 따라서 우리나라 방진마스크의 성능기준은 유럽기준과 동일하다. 우리나라와 유럽 방진마스크의 성능기준을 요약하면 다음과 같다(표 1 참조).

① 등급은 3개로 나누며 마스크 부착 필터의 경우 우리나라의 특급, 1급, 2급은 유럽의 P3, P2, P1 그리고 안면부여과식의 경우 FFP3, FFP2, FFP1에 해당한다.

② 최소포집효율은 특급(P3) 99.95%, 1급(P2) 94%, 2급(P1) 80%이다.

③ 실험 입자는 non-neutralized polydisperse의 NaCl과 파라핀 오일 에어로졸을 사용한다.

Table 1. Class of particle filters of Korea and European Nations

Filter penetration limit (at 95 L/min air flow)			
Attached to a face mask (EN 143)		Filtering facepieces (EN 149)	
P1 (Second)*	80%	FFP1 (Second)*	80%
P2 (First)*	94%	FFP2 (First)*	94%
P3 (Special)*	99.95%	FFP3 (Special)*	99%

*Class in parenthesis refers to Korean classification.

Table 2. Class of particle filters of US (42 CFR part 84)

Oil resistance	Rating	Filter penetration limit (at 85 L/min air flow)
Not oil resistant	N95	95%
	N99	99%
	N100	99.97%
Oil Resistant	R95	95%
	R99	99%
	R100	99.97%
Oil Proof	P95	95%
	P99	99%
	P100	99.97%

*No NIOSH approvals are held by this type of disposable particulate respirator.

④ NaCl의 입자크기는 40~1200 nm 범위의 MMD가 600 nm 이고 파라핀 오일은 50~1700 nm 범위의 MMD가 400 nm(EN에서는 number median Stokes diameter가 400 nm이고 GSD=1.82라고 되어 있음)인 입자를 사용한다.

⑤ 실험 유량은 두 입자 모두 95 L/min을 사용한다.

미국은 NIOSH에서 방진마스크에 대한 검인증시험(성능 시험)을 실시하며 성능기준은 42 CFR part 84와 같다(Federal Register, 1995). 미국의 방진필터 여과에 대한 성능실험은 입자 크기와 특성, 유량의 속도 등을 작업장에서 여과가 가장 안 되는 조건 즉, “the worst case test condition”으로 맞춘 다음 실시한다. 미국의 방진마스크에 대한 성능기준을 요약하면 다음과 같다(표 2 참조).

① 등급은 9개 등급으로 나눈다. 용도에 따라서 오일미스트에 사용할 수 없는 N-시리즈, 사용할 수 있는 R-, P-시리즈로 나누고 여기에 최소포집효율에 따라 각 시리즈별로 95, 99, 100으로 나눈다. 즉, N95, N99, N100과 같이 R-과 P-시리즈도 이같이 나누면 총 9개 등급이 된다.

N-시리즈(electret filter를 사용)는 “Not resistant to oil”의 N자를 의미하는 것으로 오일미스트가 있는 작업장에서는 사용할 수 없다. P100은 HEPA 필터와 동일하다.

② 최소포집효율은 95는 95%, 99는 99%, 100은 99.97%를 의미한다.

③ 실험입자는 N-시리즈의 경우 neutralized polydisperse의 NaCl 입자를, R-, P-시리즈는 DOP를 사용한다.

④ NaCl의 입자크기는 CMD가 75 ± 20 nm이고 GSD가 1.86 보다 작은 것을 사용한다(NIOSH, 2005a). 표적으로 삼는 실험 입자의 크기는 MMAD가 347 nm이고 MMD가 238 nm이다.

⑤ DOP의 입자크기는 CMD가 185 ± 20 nm이고 GSD가 1.60보다 작은 것을 사용한다. 표적으로 삼는 실험 입자의 크기는 MMAD가 359 nm이고 MMD는 395 nm이다(NIOSH,

2005b).

⑥ 실험 유량은 두 입자 모두 85 L/min을 사용한다.

3. 단일섬유여과이론(Single-fiber filtration theory)

기존 방진마스크 필터의 여과기전(filtration mechanism)은 단일섬유여과이론이다. 한 입자가 필터를 통과할 때 섬유와 섬유사이 공극의 크기는 일반적으로 이 입자보다 훨씬 크기 때문에 입자가 잡히지 않을 것으로 생각한다. 그러나 이 입자는 여과제(media)를 통과하는 과정에서 적어도 한 섬유(fiber)와 조우하게 될 것이고 그러면 이 입자는 이 섬유에 의해 붙잡히게 된다. 일반적으로 이 이론에 의하면 입경이 300 nm보다 크면 충돌(impaction), 차단(interception) 그리고 중력 침강(gravitational settling)에 의해 대부분이 효과적으로 잡이며 또 200 nm보다 작아도 대부분이 확산(diffusion), 정전기력(electrostatic attraction)에 의해 효과적으로 잡히는 것으로 예측한다(Hinds, 1999). 어떤 메카니즘도 지배하지 않는 중간 크기를 MPPS라고 하며 보통 300 nm를 말한다. 단일섬유여과이론이 잘 정립된 반면 일부 부족한 정보 즉, 현재 시판중인 방진필터에서 20 nm보다 작은 입자와 MPPS에 대한 부분은 최근 들어 연구가 진행되고 있다.

4. 여과(Filtration)

나노입자가 현재 사용 중인 방진필터에 포집될지에 대한 연구는 2000년대 이후에 시작되었으며 주로 미국에서 연구가 진행되었기 때문에 처음에는 미국 방진필터 특히, N95와 P100을 중심으로 이루어졌다(Martin와 Moyer, 2000; Balazy 등, 2006; Huang 등, 2007; Rengasamy 등, 2007, 2008b; Eninger 등, 2008b; Eshbaugh 등, 2009). 이후 유럽 성능기준을 가진 방

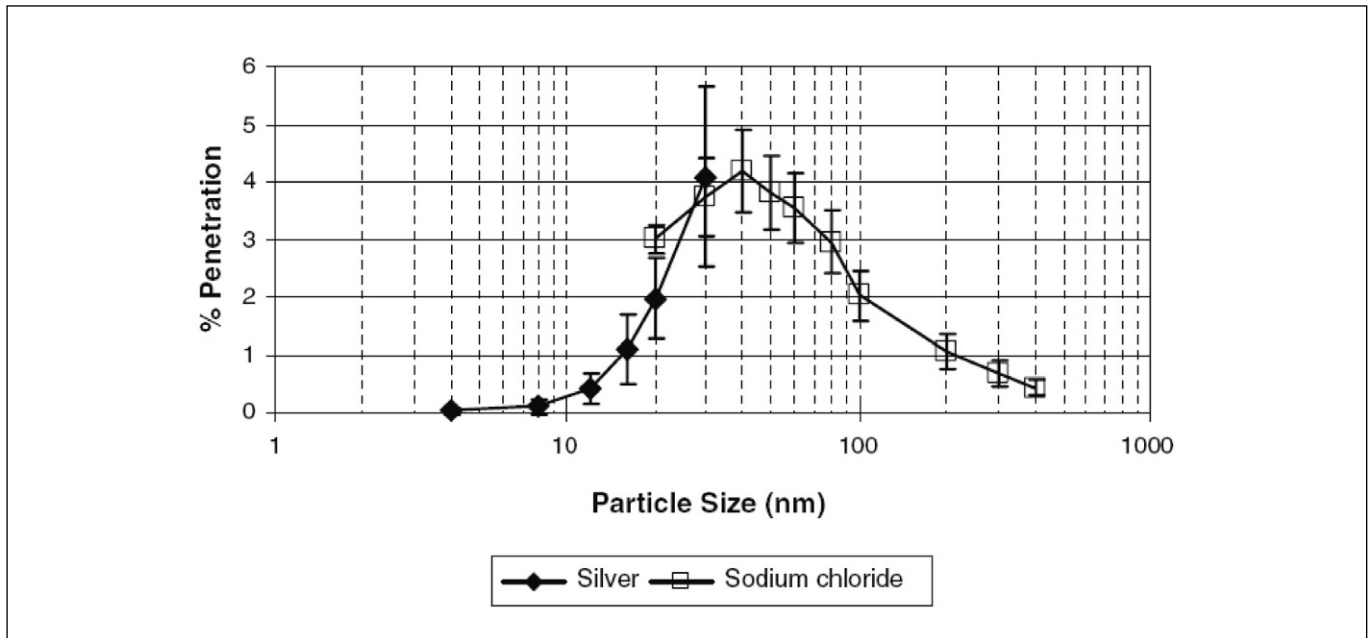


Fig. 1 Monodisperse silver (4~30 nm) and monodisperse NaCl (20~400 nm) aerosol particle penetration levels for one model of an N95 FFR. Each data point represents the mean and standard deviation from the evaluation of five respirators(Source: Rengasamy 등, 2008b).

진필터에 대한 연구도 진행되었다(Rengasamy 등, 2009). 이들 연구의 공통점은 유량속도를 85 L/min로 하였으며 입자는 NaCl을 사용하였다. 그러나 이들 연구들은 입자 크기만을 기준으로 연구한 것이기 때문에 실험방법이 다른 NIOSH의 성능기준과 직접적으로 비교할 수는 없다. 또 이상에서 언급한 여러 연구들의 입자크기와 수를 측정하는 방법이 서로 다르기 때문에 직접적으로 비교할 수는 없을 것이다. 예를 들어, 일부는 WPS를 사용하였고(Balazy 등, 2006; Eninger 등, 2008b), 다른 것은 SMPS를 사용하여 측정하였다(Huang 등, 2007; Rengasamy 등, 2007; Rengasamy 등, 2008a, 2009; Eshbaugh 등, 2009).

모든 연구에서 미국의 방진마스크(P100, N99, N95)와 유럽의 방진마스크 (FFP1, FFP2, FFP3)의 MPPS는 200 nm이하였다. 모든 연구에서 정전기 필터의 MPPS는 100 nm이하였으며 N95에서는 40~60 nm 사이였다. MPPS에서 투과율의 차이가 심하였다. Rengasamy 등(2007)은 20~400 nm인 11개의 monodisperse NaCl 입자를 5개의 N95 모델에 통과시키는 실험을 하였는데 40 nm의 평균 투과율은 1.4~5.2%이었다. 다른 연구에서는 N95에서 8.8% (Eshbaugh 등, 2009), 10% (Martin와 Moyer, 2000)까지 나왔다. 이런 차이가 있는 것은 테스트 간 차이, 마스크 제조과정의 차이, 디자인의 차이 등 여러 가지 변수가 작용한 것으로 사료된다. 그림 1은 N95에서 4~400 nm입자의 투과율 커브이다(Rengasamy 등, 2008b). 이 그림은 유량속도 85 L/min으로 단일입자크기의 은나노입자(4~30

nm)와 NaCl나노입자(20~400 nm)를 FFP에 통과시켰을 때의 투과율이다. 여기서 MPPS는 40 nm이고 MPPS에서 평균 투과율은 4.2%이었다. 단일섬유여과이론에서 예측했던 것처럼 MPPS 아래 영역에서는 입자크기가 작아지면 입자의 투과율도 떨어졌다. 이는 이 영역의 입자들은 확산력(diffusion)에 의해 포집된다는 것을 보여주는 것이다.

이상에서 언급한 모든 연구에서 MPPS가 200 nm이하로 일정하게 보인 반면 일부의 차이가 나는 것에 대해서는 앞으로 더 많은 연구가 필요하다. 특히, 필터의 종류 즉, 정전기 필터(electret)와 기계식 필터(mechanical)에 차이가 있는 것으로 밝혀졌다. 전통적인 단일섬유여과이론에서 말하는 MPPS가 200~400 nm인 것은 기계식 필터를 사용하였을 때를 말한다. 최근 연구에서는 정전기 필터에 극성전하(polarization forces)를 입히자 MPPS는 100 nm로 떨어졌다(Balazy 등, 2006). MPPS에 영향을 주는 또 다른 파라메타는 테스트조건이다. 예를 들어, 유량 속도와 호흡 패턴이 중요하게 작용한다고 하였다(Haruta 등, 2008; Eshbaugh 등, 2009). 일반적으로 더 높은 유량 속도에서는 MPPS가 입자가 더 작은 쪽으로 이동하였다.

MPPS가 나노입자 쪽으로 이동하는 것을 토의할 때에는 테스트 방법에 대한 것을 빼놓을 수 없다. 앞서서도 언급하였듯이 NIOSH의 검인증실험에서 대략 MMAD가 300 nm입자를 사용한 것은 MPPS를 고려한 “the worst case”의 투과율 때문이었다. 그런데 오늘날 사용하는 정전기 필터의 경우

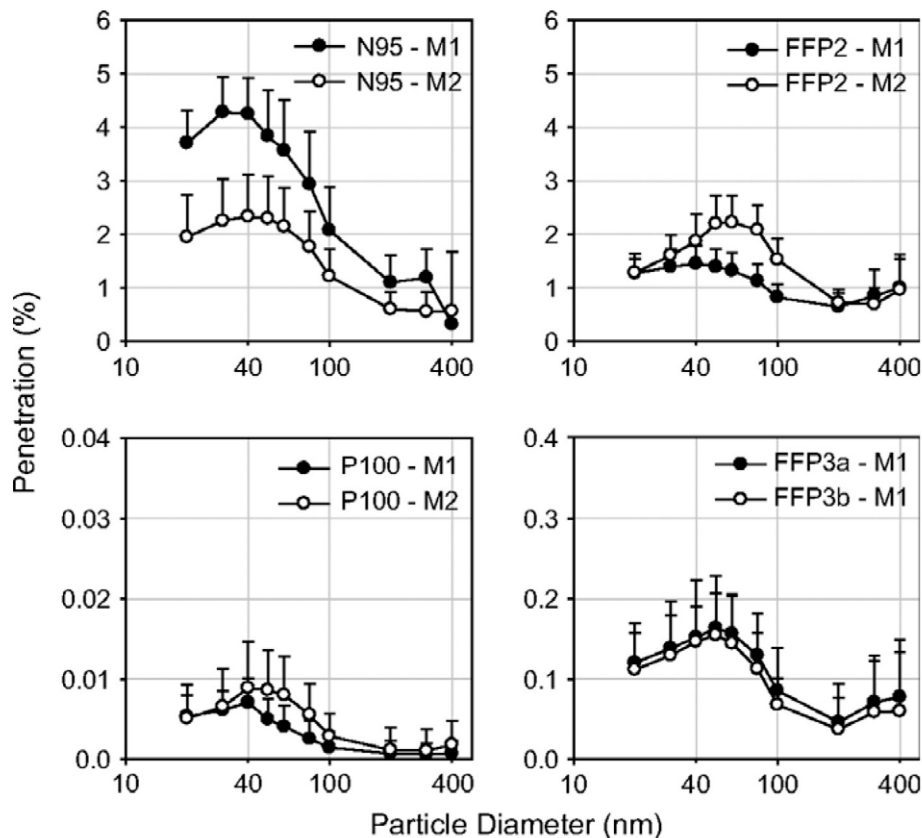


Fig. 2. Percentage penetrations of monodisperse NaCl (20~400 nm) particles through N95, FFP2, P100 and FFP3 FFR from two manufacturers (M1 and M2) at 85 L/min (MAT-2 method). Error bar represents the 95% confidence interval (n = 5)(Source: Rengasamy 등, 2009).

NIOSH의 검인증 실험에서도 MPPS가 나노입자 쪽으로 이동한 것이다. NIOSH에서 검인증에 사용하는 입자 측정 장비는 전방광산란광도계(forward light scattering photometer)로 이는 polydisperse 에어로졸을 실험 입자로 사용하고 광도계가 질량중심측정(mass-based detection)으로 계산한 것이다. EN의 검인증 실험도 이와 유사하다. 광도계가 파장별로 입자에서 산란된 빛의 양을 측정하여 크기에 따라 에어로졸의 질량으로 계산하는 것이다(Eninger 등, 2008a). 그런데 이런 타입의 측정 장비(예를 들어, TSI 8130)는 100 nm 이하 영역의 모든 입자의 광 산란 양을 측정할 수 없다는 것이다. 그래서 NIOSH에서는 앞으로 입자의 개수중심측정(count-based method) 방법을 이용하는 측정 장비로 개정을 고려할 것을 제안하였다(Eninger 등, 2008a). 여러 연구에서 입자개수중심으로 측정한 monodisperse 입자들의 투과율이 질량중심으로 측정한 투과율보다 높은 것으로 나타났다(Martin과 Moyer, 2000; Rengasamy 등, 2007; Eninger 등, 2008a).

5. 열반동(Thermal rebound) 효과

단일섬유여과이론에 의하면 MPPS 이하 영역에서 여과효율은 입자가 작을수록 증가한다. 입자가 분자 크기에 접근하면 입자가 필터를 통과할 때 필터에 부딪혀서 포집되기 보다는 열적 속도(thermal velocity)에 의해 튕겨져 나가는 열반동 효과가 나타난다. 이 결과 입자의 투과율이 증가하게 된다. 열반동 효과가 일어나는 정확한 크기는 분명하지 않다. 필터를 이용한 연구에서 2.5 nm 입자에서 이 같은 이론을 입증할 만한 이탈현상은 발견되지 않았다(Heim 등, 2005; Kim 등, 2006; Kim 등, 2007). 미국 NIOSH의 N95, P100과 유럽 EN의 FFP2, FFP3의 방진마스크에 4 nm 입자를 이용한 투과율 실험에서도 열반동 현상을 보여주는 증거는 나타나지 않았다((Rengasamy 등, 2008b, 2009). FFP1(Huang 등, 2007)과 FFP3(Golanski 등, 2008)에서도 유사한 결과가 나타났다. 따라서 MPPS 이하 나노입자 크기 영역에서는 입자가 작을수록

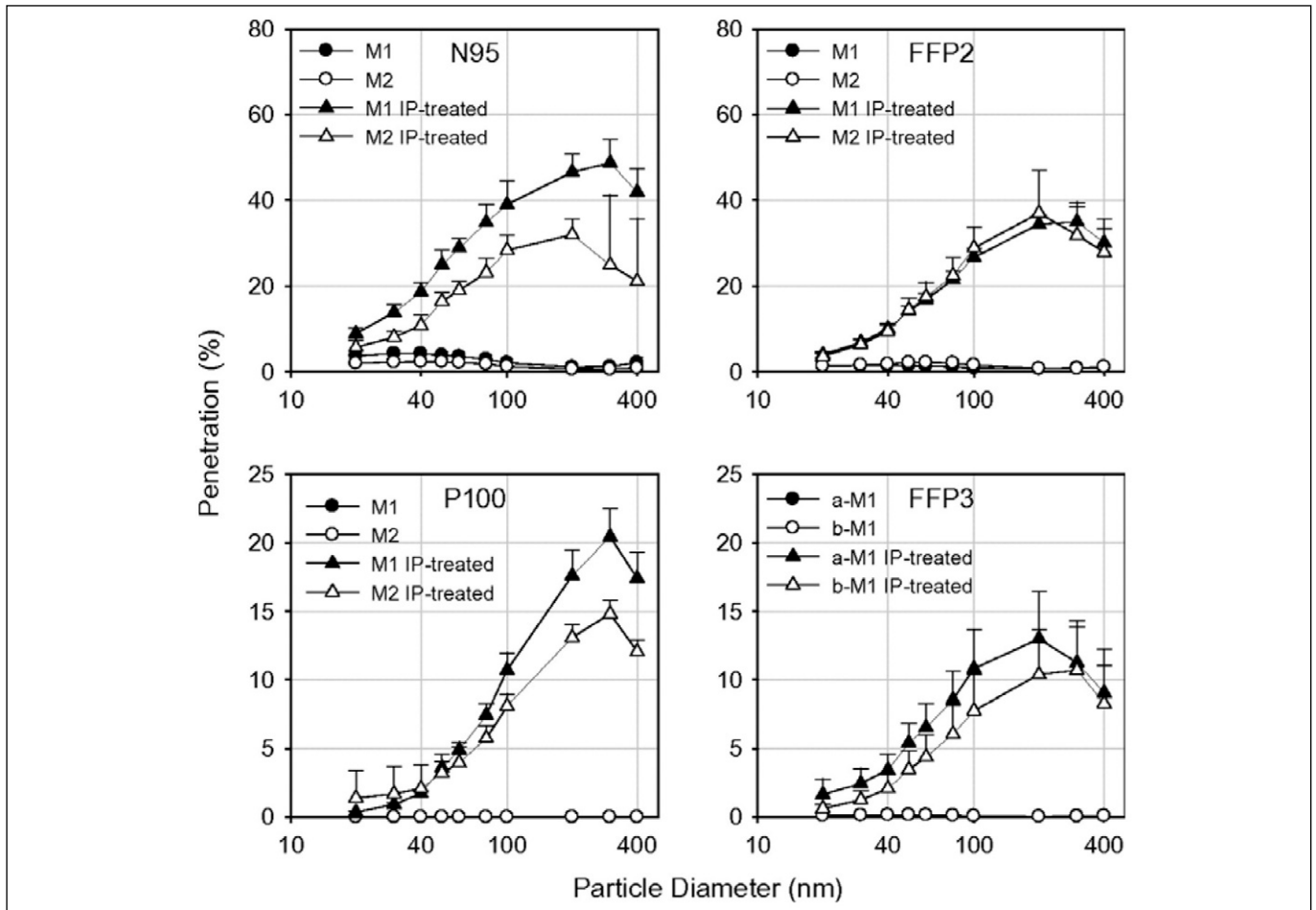


Fig. 3. Percentage penetrations obtained using the MAT-2 method of monodisperse NaCl (20~400 nm) particles for different FFR types and manufacturers (M1 and M2) before and after liquid isopropanol treatment (IP-treated) at 85 L/min. Error bar represents the 95% confidence interval (n = 5)(Source: Rengasamy 등, 2009).

여과효율은 증가한다.

6. N95, P100과 FFP2, FFP3의 나노입자 포집효율 비교

앞서 언급하였듯이 우리나라 방진마스크는 EN 기준을 따르고 있기 때문에 FFP1, FFP2, FFP3(각각 우리나라의 2급, 1급, 특급에 해당)이 나노입자에 대해 어느 정도의 포집효율을 갖는지를 아는 것이 매우 중요하다. 우리나라 2급 마스크(FFP1)의 포집효율에 대한 성능기준을 보면 NaCl 및 파라핀 오일(Paraffin oil)로 시험했을 때 80%이상의 효율을 유지해야 하기 때문에 실제 작업장에 2급 마스크를 쓸 수는 없는 일이다. 2급 마스크는 단지 청소작업 정도하는데 필요하며 작업장에서는 적어도 1급(FFP2) 이상의 마스크를 착용해야 한다. 따라서 우리나라 기준으로 볼 때 1급, 특급 즉, EN기준 FFP2,

FFP3에 대한 포집효율을 알아보아야 한다.

Rengasamy 등(2009)은 N95, P100과 FFP2, FFP3에 현행 방진 마스크의 성능시험과 같은 polydisperse 입자와 현행 성능시험과 다른 monodisperse 입자를 가지고 포집효율 연구를 하였다. Polydisperse에는 MMD가 238 nm의 NaCl 입자(PAT: 현행 NIOSH 검인증실험과 동일)를, monodisperse에는 4~30 nm의 은나노입자(MAT-1)와 20~400 nm의 NaCl 입자(MAT-2)를 사용하였으며 실험조건은 NIOSH의 검인증실험과 같이 입자의 전하를 중성화시키고 유량속도 85 L/min으로 실험공기를 통과시켰다.

PAT 실험에서 N95와 FFP2의 투과율은 1% 이하, P100과 FFP3는 0.03% 이하로 나타나 현행 NIOSH 성능기준보다 훨씬 높은 포집효율을 보여주었다. MAT 실험에서 MPPS는 모든 모델(총 4개)에서 30~60 nm이었으며 투과율은 N95, FFP2, P100 그리고 FFP3에서 각각 <4.28%, <2.22%, <0.009% 그리고

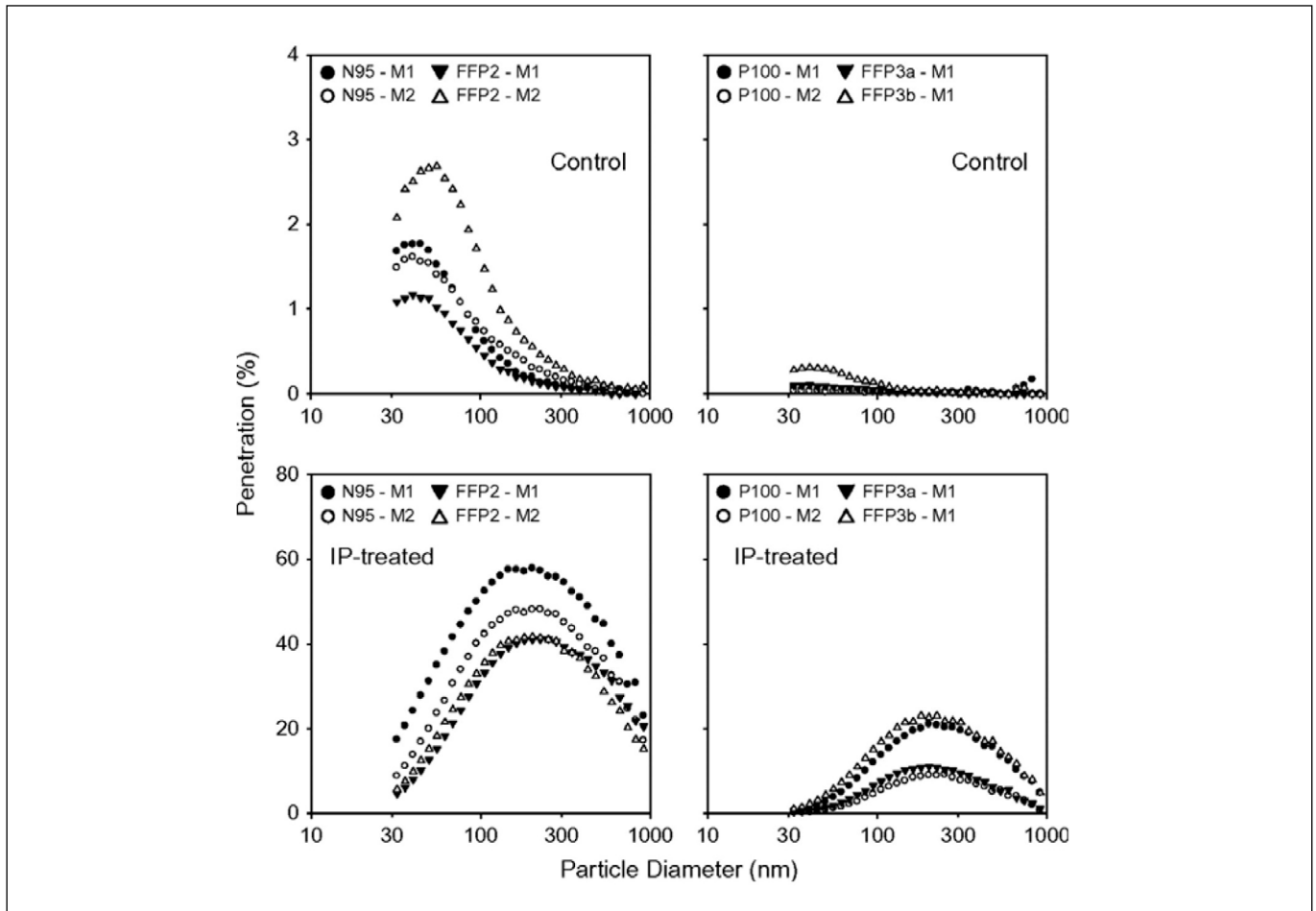


Fig. 4. Average penetration levels of NaCl particles as a function of particle size (30~1000 nm) particles through N95, FFP2, P100 and FFP3 respirators from two manufacturers (M1 and M2) before (control) and after isopropanol treatment (IP-treated) at 85 L/min (n = 4)(Source: Rengasamy 등, 2009).

<0.164%이었다(그림 2 참조). 이때 포집기전은 정전기력에 의한 것으로 예측되었다.

정전기력을 없애기 위하여 액체 isopropanol로 FFR을 처리하고 실시한 실험에서 MPPS는 200~300 nm로 이동하였으며 PAT 및 MAT 실험 모두에서 모든 모델의 투과율이 극적으로 증가하여 포집기전이 정전기력에 좌우됨을 알 수 있었다(그림 3참조). 또 정전기력의 메커니즘을 더 명확하게 하기 위하여 ^{85}Kr neutralizer를 이용하여 전하를 중성화시킨 30~1000 nm의 NaCl 입자를 가지고 isopropanol로 처리 전후를 비교하는 실험을 하였다. 이때 SMPS를 이용하여 30~1000 nm의 입자 크기를 측정하고 CPC를 이용하여 입자의 수를 측정하였다. 그 결과 그림 4와 같이 정전기를 떨어뜨리자 급격히 투과율이 증가함으로 방진마스크 필터의 여과 메커니즘이 정전기력에 의존하고 있음이 밝혀졌다.

IV. 결 론

모든 연구에서 정전기 필터(electret FFR)의 MPPS는 100 nm 이하였으며 Rengasamy 등(2009)의 연구에서는 N95, P100과 FFP2, FFP3의 MPPS는 30~60 nm 사이였다. 연구자들에 따라 MPPS에서 투과율은 차이가 심하였다. 그러나 대다수의 연구에서 MPPS의 투과율이 현행 유럽의 EN이나 미국 NIOSH 성능기준에 부합되는 것으로 나타났다. 그러나 정전기력을 떨어뜨리는 조치를 취한 정전기 필터에서는 MPPS가 30~60 nm에서 200~300 nm로 이동하였고 투과율 역시 급격하게 증가하여 EN이나 미국 NIOSH 성능기준에 전혀 부합되지 않았다. 나노입자(<100nm)에서 투과율 증가는 N95와 FFP2가 P100과 FFP3보다 심하였다.

따라서 현재 EN 및 미국 NIOSH의 기준으로 볼 때 나노입자에 적합한 방진마스크는 미국 N-, P-시리즈 모두와

FFP2(우리나라 1급), FFP3(우리나라 특급)의 정전기필터이다. 만약 정전기력이 약화되면(예를 들어, 습기가 많은 곳이나 오일미스트가 존재하는 곳에서 사용하거나 장기간 보관했을 때) 이들 모두 부적합한 것으로 나타났다.

정전기력이 부착되지 않은 기계식 필터에 대한 연구는 전혀 없었기 때문에 현 상태에서 적합여부를 결론 내리기는 어렵다.

REFERENCES

- 노동부. 보호구 의무안전인증 고시(노동부고시 제2008-77호); 2008, p103-124.
- Ambroise D, Wild P, Moulin J-J. Update of a meta-analysis on lung cancer and welding. *Scand J Work Environ Health* 2007;32(1):22-31.
- Balazy A, Toivola M, Reponen T, Podgorski A, Zimmer A, Grinshpun SA. Manikin-based performance evaluation of N95 filtering-facepiece respirators challenged with nanoparticles. *Ann Occup Hyg*. 2006;50:259-269.
- BS EN. Respiratory protective devices. Filtering half masks to protect against particles. Requirements, testing, marking (BS EN 149). London, UK: BSI British Standards. 2001.
- BS EN. Respiratory protective devices-Methods for test-Part 7: determination of particle filter penetration (BS EN 13274-7). London, UK: BSI British Standards. 2008.
- BS EN. Respiratory protective devices. Particle filters-Requirements, testing, marking (BS EN 143). London, UK: BSI British Standards. 2000.
- Duffin R, Tran CL, Clouter A, Brown DM, MacNee W, Stone V, Donaldson K. The importance of surface area and specific reactivity in the acute pulmonary inflammatory response to particles. *Ann Occup Hyg* 2002;46:242-245.
- Eninger RM, Honda T, Reponen T, McKay R, Grinshpun SA. What does respirator certification tell us about filtration of ultrafine particles- *J Occup Environ Hyg*. 2008a; 5:286-295.
- Eninger RM, Honda T, Adhikari A, Heinonen-Tanski H, Reponen T, Grinshpun SA. Filter performance of N99 and N95 facepiece respirators against viruses and ultrafine particles. *Ann Occup Hyg*. 2008b;52:385-396.
- Eshbaugh JP, Gardner PD, Richardson AW. N95 and P100 respirator filter efficiency under high constant and cyclic flow. *J Occup Environ Hyg*. 2009;6:52-61.
- Federal Register. Respiratory protective devices. Final Rules and Notice. 60:30335-98. 1995.
- Gardiner K, van Tongeren M, Harrington M. Respiratory health effects from exposure to carbon black: results of the phase 2 and 3 cross sectional studies in the European carbon black manufacturing industry. *Occup Environ Med* 2001; 58(8):496-503.
- Garshick E, Laden F, Hart JE, Rosner B, Smith TJ, Dockery DW, Speizer FE. Lung cancer in railroad workers exposed to diesel exhaust. *Environ Health Perspect* 2004;112(15):1539-1543.
- Golanski L, Guiot A, Tardif F (2008) Are conventional protective devices such as fibrous filter media, respirator cartridges, protective clothing and gloves also efficient for nanoparticles- In: *European Strategy for Nanosafety*, 2008;pp1-8.
- Hart JE, Laden F, Schenker MB, Garshick E. Chronic obstructive pulmonary disease mortality in diesel-exposed railroad workers. *Environ Health Perspect* 2006;114(7):1013-1017.
- Haruta H, Honda T, Eninger RM, Reponen T, McKay R, Grinshpun SA. Experimental and theoretical investigation of the performance of N95 respirator filters against ultrafine aerosol particles tested at constant and cyclic flow rates. *J Int Soc Res Prot* 2008; 25:75-88.
- Heim M, Millins BJ, Wild M, Meyer J. Filtration efficiency of aerosol particles below 20 nanometers. *Aerosol Sci Technol* 2005; 39:782-789.
- Hinds WC. Properties, behavior, and measurement of airborne particles, 2nd edn. Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc, New York. 1999.
- Huang SH, Chen CW, Chang CP, Lai CY, Chen CC. Penetration of 4.5 nm to 10 nm aerosol particles through fibrous filters. *J Aerosol Sci*. 2007; 38(7):719-727.
- Kim CS, Bao L, Okuyama K, Shimada S, Niinuma H. Filtration efficiency of a fibrous filter for nanoparticles. *J Nanopart Res* 2006; 8:215-221.
- Kim SE, Harrington MS, Pui DYH. Experimental study of nanoparticles penetration through commercial filter media. *J Nanopart Res* 2007; 9:117-125.
- Kreiss K, Mroz MM, Zhen B, Wiedemann H, Barna B. Risks of beryllium disease related to work processes at a metal, alloy, and oxide production plant. *Occup Environ Med* 1997; 54(8):605-612.
- Lison D, Lardot C, Huaux F, Zanetti G, Fubini B. Influence of particle surface area on the toxicity of insoluble manganese dioxide dusts. *Arch Toxicol* 1997;71(12):725-729.
- Martin SB Jr, Moyer ES. Electrostatic respirator filtermedia: filter

- efficiency and most penetrating particle size effects. *Appl Occup Environ Hyg*. 2000;15:609-617.
- NIOSH. Approaches to Safe Nanotechnology: Managing the Health and Safety Concerns Associated with Engineered Nanomaterials. Available from: URL: <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-125/pdfs/2009-125.pdf>; 2009.
- NIOSH. Procedure No. RCT-APR-STP-0051, 0052, 0053, 0054, 0055, 0056, Revision 1.1, Pittsburgh, PA: DHHS, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, National Personal Protective Technology Laboratory. Available from: URL: <http://www.cdc.gov/niosh/npptl/stps/pdfs/RCT-APR-0051%2052%2053%2054%2055%2056.pdf>; 2005b.
- NIOSH. Procedure no. RCT-APR-STP-0057, 0058, 0059, Revision 1.1, Pittsburgh, PA: DHHS, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, National Personal Protective Technology Laboratory. Available from: URL: <http://www.cdc.gov/niosh/npptl/stps/pdfs/RCT-APR-0057%2058%2059.pdf>; 2005a.
- Oberdörster G, Ferin J, Gelein R, Soderholm SC, Finkelstein J. Role of the alveolar macrophage in lung injury-studies with ultrafine particles. *Environ Health Perspect* 1992;97:193-199.
- Oberdörster G, Ferin J, Lehnert BE. Correlation between particle-size, in-vivo particle persistence, and lung injury. *Environ Health Perspect* 1994; 102(S5):173-179.
- Oberdörster G, Yu. The carcinogenic potential of inhaled diesel exhaust: a particle effect? *J Aerosol Sci* 1990;21:S397-S401.
- Park RM, Bowler RM, Eggerth DE, Diamond E, Spencer KJ, Smith D, Gwiazda R. Issues in neurological risk assessment for occupational exposures: the Bay Bridge welders. *Neurotoxicology* 2006;27(3):373-384.
- Rengasamy A, Verbofsky R, King WP, Shaffer RE. Nanoparticle penetration through NIOSH-approved N95 filtering-facepiece respirators. *J Int Soc Res Prot*. 2007; 24:49-59.
- Rengasamy S, Eimer B, Shaffer RE. Comparison of nanoparticle filtration performance of NIOSH-approved and CE marked filtering-facepiece respirators. *Ann Occup Hyg* 2009;53:117-128.
- Rengasamy S, Eimer B, Shaffer RE. Nanoparticle filtration performance of commercially available dust masks. *J Int Soc Respir Prot* 2008a; 25:27-41.
- Rengasamy S, King WP, Eimer B, Shaffer RE. Filtration performance of NIOSH-approved N95 and P100 filtering-facepiece respirators against 4-30 nanometer size nanoparticles. *J Occup Environ Hyg* 2008b; 5:556-564.
- Renwick LC, Brown D, Clouter A, Donaldson K. Increased inflammation and altered macrophage chemotactic responses caused by two ultrafine particles. *Occup Environ Med* 2004;61:442-447.
- Steenland K, Deddens J, Stayner L. Diesel exhaust and lung cancer in the trucking industry: exposure-response analyses and risk assessment. *Am J Ind Med* 1998;34(3):220-228.
- Tran C, Buchanan LD, Cullen RT, Searl A, Jones AD, Donaldson K. Inhalation of poorly soluble particles. II. Influence of particle surface area on inflammation and clearance. *Inhal Toxicol* 2000;12(12):1113-1126.