

고효율 호흡보호구의 나노물질 입경별 제거 효율

이 광 재¹⁾ · 지 준 호^{1)*} · 김 원 근²⁾ · 육 세 진²⁾ · 김 종 규³⁾ · 김 정 호⁴⁾

¹⁾(주)에코픽처스, ²⁾한양대학교, ³⁾산업안전보건연구원, ⁴⁾고용노동부

(2016년 8월 25일 투고, 2016년 9월 9일 수정, 2016년 9월 30일 게재확정)

Fractional efficiency of Nanomaterials for the High efficiency respiratory filters

Gwang-Jae Lee¹⁾, Jun-Ho Ji^{1)*}, Won-Geun Kim²⁾, Se-Jin Yook²⁾, Jong-Kyo Kim³⁾, Jung-Ho Kim⁴⁾

¹⁾*EcoPictures Co. Ltd., Seoul Korea*

²⁾*Hanyang University, Seoul, Korea*

³⁾*KOSHA, Ulsan, Korea*

⁴⁾*Ministry of Employment and Labor, Sejong, Korea*

Abstract

Controlling exposures to occupational hazards is important for protecting workers. Certified facepiece respirators are recommended when engineering controls do not adequately prevent exposures to airborne nanomaterials. The objective of this study is to carry out the experimental performance test to investigate the fractional efficiencies of the filter media for two grades of facepiece respirators. Experimental performance evaluations were carried out for the test NaCl particles and silver nanoparticles. For media of respirator filter, the penetration of NaCl particles was less than 5% and the most penetrating particle size occurred at about 40 nm. For silver nanoparticles, the most penetrating particle size was about 20nm with higher efficiency than those of NaCl particles. Charge characteristics of airborne nanoparticles is important because the media of respirator filter is made by the electret filter media.

Keywords : facepiece respirators, fractional efficiency, silver nanoparticles, electret filter, filter media

* Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-6959-5899

E-mail : caputjun@gmail.com

1. 서 론

나노기술은 IT, BT, ET 관련 신산업 등 거의 모든 산업에 필요한 핵심 요소기술로 국제적으로도 산업화에 진입하는 단계이고, 다양한 산업의 기반이 되고 있는 등 기술적, 산업적 파급효과가 큰 분야로 관련 소비 상품 또한 지속적으로 증가하고 있다. 소비제품의 개발과 성능 향상이라는 거대한 잠재력 덕분에 나노제품은 시장에서 눈에 띄게 증가하고 있고, 최근 전자소자, 화장품, 자동차, 의약품, 가전 제품에 많은 나노물질이 사용되고 있다. 그렇지만, 아직은 단순한 나노 응용 제품이 대부분을 차지하고 있다.

스미스소니언(Smithsonian Institution)의 연구정책 관련 산하기관인 우드로윌슨 국제학술센터(Woodrow Wilson International Center for Scholars)에서 지원하는 “떠오르는 나노기술 프로젝트(Project on Emerging Nanotechnologies)”는 2007년 5월까지 500 여 종의 소비재 나노제품이 등록되었고 2009년 1,015개까지 지속적으로 증가하고 있다고 보고하고 있다 (<http://www.nanotechproject.org>). 나노룩스 리서치(Nano Lux Research)사의 조사에 따르면 2014년까지 나노기술 관련 제품의 판매량이 2조 6천억 달러로 증가하고, 생산되는 모든 생산품의 약 15 %가 나노기술을 이용한 제품이 될 것으로 예측하였고 (Lux Research, 2004), 2020년까지 전세계적으로 600만 명의 인력을 관련 분야에서 고용할 수 있을 것으로 예상하고 있으며 나노기술을 기반으로 한 시장은 30억 달러에 이를 것으로 기대하고 있다.

반면에, 나노작업장에서 일하는 근로자에 대한 나노물질의 노출 위험에 대한 우려가 커지고 있다. 원료 소재의 나노물질을 제조하는 작업장이나 나노물질을 원재료로 이용하여 2차 제품으로 제조하는 제품제조공정에서 만들어지거나 사용되는 나노물질은 작업장 내에 작업자에 노출될 가능성이 있다. 나노물질을 제조하거나 다루는 작업장에서 노출된 나노물질은 공기 중 부유하여 작업자가 호흡할 수 있고, 대기 혹은 수중에 배출되어 환경에 영향을 미칠 수도 있다. 특히, 석면과 비슷한 섬유형태의 기하학적 특성을 가지고 있는 탄소나노튜브는 작업장이나 연구실에서 노출되는 경우 작업자에 건강에 나쁜 영향을 미칠 가능성이 매우 크다. 나노입자의 대부분

호흡기계를 통해서 침투된다는 점과 인체 및 동물 연구에서 알려진 것과 같이 흡입된 나노입자는 호흡기계에 침적하고 혈관을 통하여 다른 장기로 이동되기도 한다는 점, 화학적 구성, 입자크기 변화 및 결정구조가 독성을 다르게 할 수 있다는 점으로 인해, 건강에 영향을 줄 수 있는 결정적인 이화학적 특성에 관한 연구의 필요성이 제기되고 있다 (NIOSH, 2009). 현재 나노입자의 인체 영향을 단정할 수는 없지만 동물실험을 통하여 생체에 악영향을 준다는 여러 연구가 있으며, 독성학적 특성을 밝히려는 다양한 연구가 시도되고 있다. 최근 국제암연구소(IARC, International Agency for Research on Cancer)는 다중벽 탄소나노튜브의 한 개의 제품(MWCNT-7)을 잠재적인 발암물질을 나타내는 그룹 2B(Group 2B)로 분류하였다. 이와 같이 나노작업장에서 잠재적인 독성 나노물질로부터 노출을 감소하려면, 다양한 방지대책을 고려해야 한다. 공학적 제어, 행정적 제어와 함께 작업자는 나노물질 제조 작업장에서 개인용 보호구의 착용을 하는 것이 바람직하며, 적절한 보호구의 선택과 올바른 착용과 함께 유지관리에도 주의를 기울여야 한다.

최근 Zhou and Cheng(2016)은 N95 마스크 필터에 대해 탄소나노튜브, 플러렌, 이산화티탄 나노입자의 입경별 통과효율을 평가하였다. 나노물질의 경우, 최대 통과효율이 소금입자보다 약 5% 이상 크게 나타났다고 보고하였다. 초기 소금 입자의 최대통과효율크기(MPPS)가 40nm인 반면, 이소프로필 알콜을 필터 여재 표면에 처리한 경우 약 150nm로 최대통과효율크기가 이동하였다고 보고하였다. 상대적으로 나노물질의 안정적인 발생이 어렵기 때문에, 데이터의 산포가 크게 나타났다. Mahdavi 등(2015)은 N95 필터에 사용시간 증가에 의한 입자가 지속적으로 포집될 때 포집효율이 감소하는 것을 보고하였고, 상대습도가 높을 경우에 효율 감소 특성이 빠르게 나타나는 것을 보였다. 이것은 N95 필터가 정전필터를 사용하기 때문에 나타난 특성으로 보고하였다. Ji 등(2003)은 자동차의 실내로 유입하는 공기를 여과하는 캐빈필터로 사용되는 정전필터에 대해 입경별 집진효율을 평가하였고, 초기의 높은 효율은 시간에 따라 감소하는 특성을 보임을 확인하였다.

본 연구에서는 국내에서 판매되는 호흡용 보호구 필터의 나노물질에 대한 입경별 여과 특성을 시험

하였다. 일반적으로 필터의 입경별 제거효율을 평가하기 위해 사용되는 시험입자인 소금(NaCl) 입자를 평가하였고, 나노물질 제조 작업장에서 노출되는 조건을 모사한 은나노(Ag) 입자를 대상으로 필터 여재의 입경별 집진효율을 평가하였다. 호흡용 보호구 필터는 안면부 여과식 방진마스크인 특급 방진마스크와 1급 방진마스크의 배기밸브 부분을 제외한 부분을 직경 47 mm로 잘라내어 직경 47 mm 필터홀더에 부착하여 시험하였다. 필터 평가에 사용되는 소금 입자에 의한 필터 여재의 입경별 제거효율과 실제 작업장에서 생성되어 노출되는 조건으로 모사된 은나노입자의 입경별 제거효율의 특성을 확인하고, 실제 나노작업장에서 노출되는 나노입자에 대한 적용 문제점을 고찰하고자 한다.

2. 호흡기 보호구의 특성

나노물질 작업장에서 사용 가능한 호흡용 보호구는 안면부 여과식 방진마스크가 주로 사용된다. 국내에서 시판되고 있는 국내·외 방진마스크가 효과적으로 나노입자를 막아줄 것인가에 대한 검토가 필요하다. 방진마스크에 대한 성능기준은 크게 미국 기준과 유럽기준으로 구분할 수 있다. 미국기준은 캐나다, 멕시코, 칠레 등에서 사용하고 있으며, 유럽 기준은 영국, 독일 등 유럽의 나라에서 사용되고 있다. 한국의 방진마스크의 방진필터에 대한 성능인증 시험은 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 준용하므로, 방진마스크의 성능기준은 표 1과 같이 유럽기준과 동일하다. 성능 시험에서 시험 입자는 다분산 소금 입자와 파라핀오일 에어로졸이 사용되며 실험 유량은 95 LPM으로 진행된다. 염화나트륨의 경우 1% 용액을 분무식 에어로졸 발생장치로 발생시킨 후, 다분산 염화나트륨 입자의 보호구 통과 전·후의 입자 농도(mg/m^3)를 비교하여 포집 효율을 계산한다. 파라핀 오일은 미스트 발생장치를 이용하고, 다분산 파라핀 오일 입자의 보호구 상류와 하류의 입자 농도(mg/m^3)를 이용하여 포집 효율을 계산한다. 상세한 내용은 방진마스크 안전인

증기준에 설명되어 있다(노동부, 2008). 미국의 경우 NIOSH에서 성능시험을 실시하며, 성능평가에 의한 방진마스크의 등급은 9개 등급으로 구분한다. 용도에 따라서 오일미스트에 사용이 불가능한 N-시리즈와 사용이 가능한 R-시리즈, P-시리즈로 구분되며, 포집효율에 따라 각각 95, 99, 100으로 구분한다. 성능시험에 사용되는 입자는 소금과 DOP(Dioctyl Phthalate)가 사용되며 시험 유량은 85 LPM으로 진행된다.

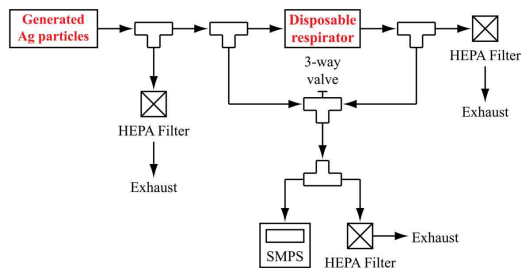
Table. 1. Filter penetration limits for European and Korea.

Classification	Attached to a face mask (EN 143)		Filtering facepieces (EN 149)	
Special	99.95 %	P3	99 %	FFP3
First	94 %	P2	94 %	FFP2
Second	80 %	P1	80 %	FFP1

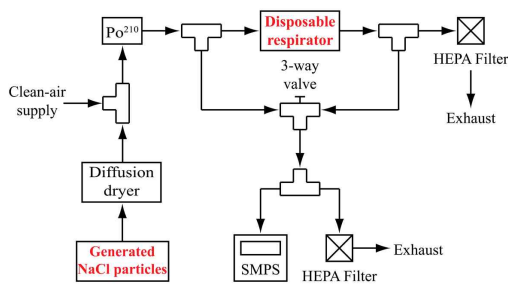
3. 실험

호흡용 보호구 필터의 여과특성을 측정하기 위해서 소금(NaCl) 입자와 은나노(Ag) 입자를 사용하여 실험을 진행하였다. 소금 입자는 분무식 입자발생장치를 사용하였고, 소금물의 농도는 0.1% 조건으로 용액을 제조하였다. 그림 1(a)와 같이 은나노 입자는 ISO(10801) 방법인 기화-응축 방법을 이용하여 은나노입자를 안정적으로 발생시켰다. 발생장치로는 금속나노입자발생시스템(EP-NGS20, EcoPictures Co. Ltd.)을 이용하였다. 금속나노입자발생장치는 100nm 이하의 응집이 되지 않은 구형의 나노입자를 고농도로 만들어 낼 수 있을 뿐 아니라 원하는 크기분포로 제어가 가능하기 때문에, 다양한 나노기술 분야 연구에 적용할 수 있는 장점이 있다(Jung et al., 2006). 또한 운반기체를 불활성 기체가 아닌, 공기를 사용하여 순수한 은나노입자를 생성할 수 있기 때문에 운반 가스의 상태에 민감한 동물 흡입독성 시험 등에 성공적으로 적용되었다(Ji et al., 2007). 또한 안정적인 발생까지 수 분 내에 가능하고, 짧은 시간에 변화된 크기의 나노입자를 안정적으로 발생시킬 수 있다. 그림 1(b)와 같이 소금입자를 시험입자로

사용하는 경우에는 증화기(Po^{210})를 통과시켜 입자를 하전분포를 볼츠만분포에 가깝도록 하전분포를 만들었다. 은나노입자의 경우는 증화기를 사용하지 않았는데, 이것은 나노물질이 공기 중에 생성될 수 있는 조건을 그대로 모사하여 사용하고자 했고, 이 때 은나노입자가 생성되는 과정에서 얻어지는 입경별 하전분포가 정전필터를 여재로 사용하는 호흡기보호구의 성능에 영향을 미칠 것으로 예상하였고, 증화기를 사용한 소금 입자와 다른 특성을 얻을 것으로 예측하여 시험을 진행하였다.



(a) Test schematics for Ag nanoparticles



(b) Test schematics for NaCl particles

8.1, 9.0 L/min로 설정하였고, 이에 해당하는 면속도는 4.8, 6.1, 7.8, 8.7 cm/s 이다. 각 등급의 방진마스크의 면적으로 환산한 전체 추정 유량은 특급 방진마스크는 75, 95, 127, 140 L/min, 1급 방진마스크는 52, 66, 85, 95 LPM 이다.

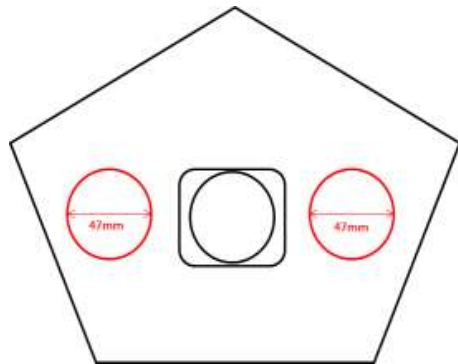
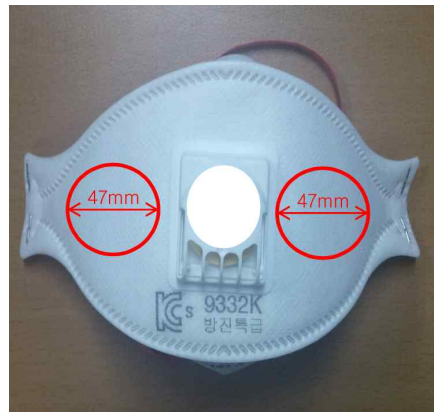


Fig. 2. Facepiece respirators and filter media cutting part.

Fig. 1. Schematics of filter media test.

호흡용 보호구 필터는 2가지 종류를 사용하였다. 안면부 여과식 방진마스크인 특급 방진마스크(A사), 1급 방진마스크(A사)의 배기밸브 부분을 제외한 필터 여재 부분을 직경 47 mm로 잘라내어 47 mm 필터 홀더(Saville社, Model 47 mm single stage filter assembly)에 부착하여 시험하였다. 그림 2는 시험에 사용된 호흡용 보호구와 잘라낸 필터 여재 부분을 나타낸다.

방진마스크의 흡입유량에 따른 특성을 확인하기 위해, 필터 여재를 통과하는 유량을 각각 5.0, 6.3,

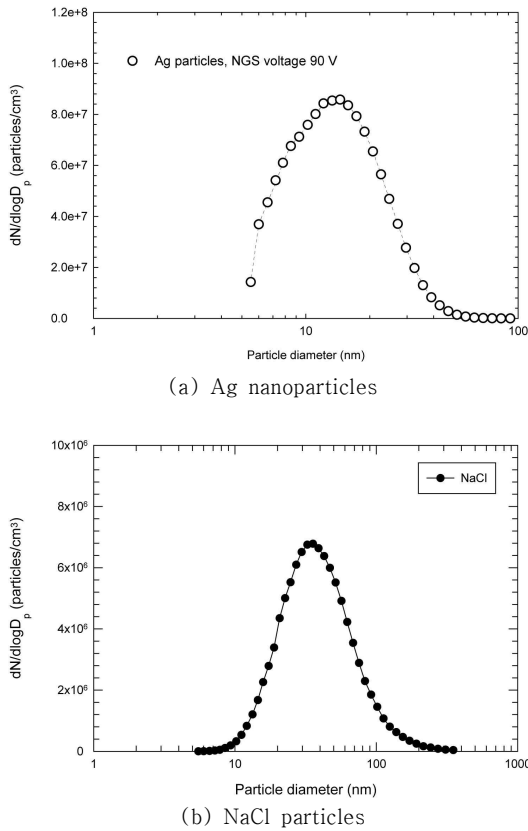
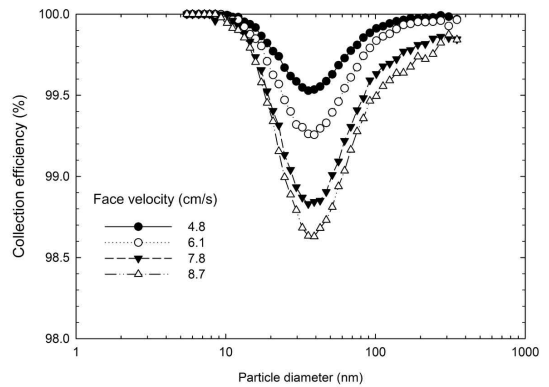


Fig. 3. Size distribution of Ag nanoparticles and NaCl particles.

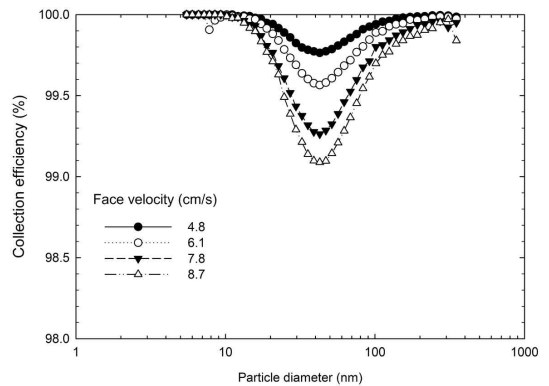
그림 3(a)는 금속나노입자발생시스템(EcoPictures, NGS20)을 이용하여 발생한 필터 전단에서 CPC(Grimm, 5.403)와 DMA(HCT)로 구성된 SMPS 시스템을 이용하여 은나노입자의 입자크기분포를 측정된 결과이다. 시험 은나노입자는 기하평균직경(GMD)이 13.6 nm인 대수정규분포를 나타냈다. 그림 3(b)는 0.1% 소금물을 분무형 입자발생장치를 사용하여 소금 입자를 발생시켰다. 소금 입자는 기하평균직경이 약 40nm인 대수정규분포를 나타낸다.

그림 4(a)와 4(b)는 1급, 특급 마스크 필터의 필터 여재를 통과하는 단면유속에 따른 소금 입자의 입경별 입자제거효율을 나타낸다. 필터를 통과하는 공기 유량이 증가함에 따른 입경별 입자 제거 효율이 감소하는 특성을 나타냈다.

4. 결과 및 토의



(a) Filter media for first grade facepiece respirators

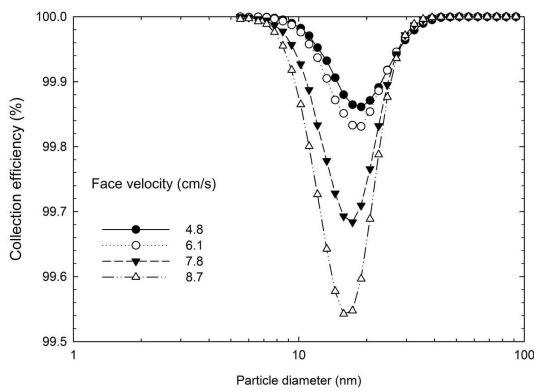


(b) Filter media special grade facepiece respirators

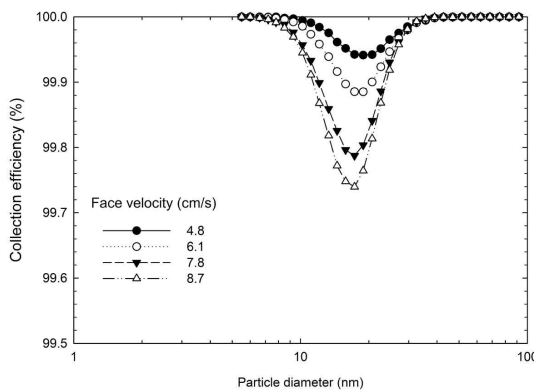
Fig. 4. Fractional efficiencies of filter media for NaCl.

가장 빠른 유속 조건인 8.7 cm/sec 조건에서도 1급 마스크의 경우 98% 이상, 특급 마스크의 경우 99% 이상의 입자 제거효율을 보여준다. 그림 4에서 알 수 있는 것과 같이 단면속도가 같은 동일 유량에서 1급 방진마스크와 특급 방진마스크의 소금 입자 포집효율을 비교할 때, 특급 방진마스크가 1급 방진마스크에 비하여 우수한 효율을 나타냈으며, 유럽 EN 149 기준인 95 LPM 유량의 포집효율에서 1급과 특급 방진마스크 모두 기준 최소포집효율 이상의 포집효율을 나타냈다. 입경별 최소효율이 30~50nm 사이에서 나타나는 특성은 NIOSH나 Mahdavi *et al.*(2015)와 비슷한 결과를 나타냈다. 소금 입자의 경우 분무에 의한 발생단계에서 높게 대전된 입자의

하전 상태를 중화시키기 위해 중화기(Po^{210})를 통과시켰다. 중화기를 통과한 소금입자는 평균적으로 중성인 볼츠만 입자 하전분포를 띄게 된다. 정전필터 여재를 사용하는 마스크 필터의 경우 일반적인 필터에서 나타나는 것처럼 약 300nm에서 입자의 최소 제거효율이 나타나는 않았다. 이것은 필터의 입자 제거 메커니즘으로부터 입자의 확산력과 관성력에 의한 필터 제거 특성 보다 정전기력에 의한 영향이 커지기 때문에 나타난 특성으로, 상대적으로 더 작은 크기에서 최소 입자 제거 효율이 나타나게 된다. 필터의 사용이 계속되면, 필터 여재 표면의 정전기가 하전 입자와 상쇄되어 사라지게 되므로 마스크 필터의 효율은 전체 입경영역에서 감소하게 된다(Ji et al., 2003; Mahdavi et al., 2015).



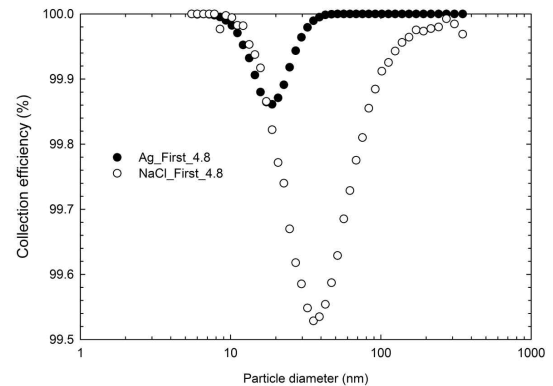
(a) Filter media for first grade facepiece respirators



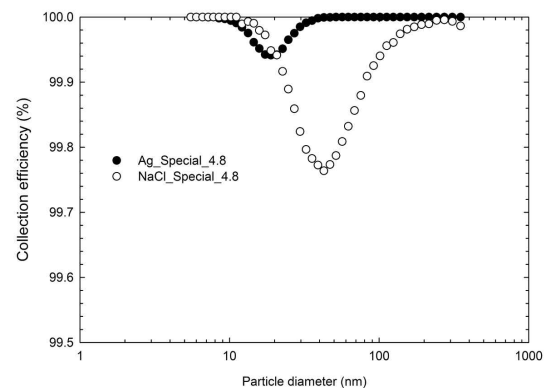
(b) Filter media special grade facepiece respirators

Fig. 5. Fractional efficiencies of filter media for Ag nanoparticles.

그림 5(a)는 1급 방진마스크를 통과한 은나노 입자의 포집효율로 필터 여재를 통과하는 공기의 단면속도가 증가함에 따라 입경별 제거효율이 감소함을 알 수 있다. 동일한 조건에서 수행한 특급 방진마스크를 통과한 은나노입자의 평균 크기분포와 포집효율도 1급 방진마스크와 동일한 결과를 보였다. 최소 포집효율이 나타난 구간은 약 15~20 nm 구간이다. 같은 면속도 조건인 동일 유량에서의 1급 방진마스크와 특급 방진마스크는 동일한 유량 조건하에 특급 방진마스크가 1급 방진마스크에 비하여 우수한 효율을 나타냈으며, 유럽 EN 149 기준인 95 LPM 유량의 포집효율에서 1급과 특급 방진마스크 모두 기준 최소포집효율 이상의 포집효율을 나타냈다.



(a) Filter media for first grade facepiece respirators



(b) Filter media special grade facepiece respirators

Fig. 6. Fractional efficiencies of filter media for First grade and Special grade facepiece respirators.

그림 6(a)와 그림 6(b)는 1급 호흡기 보호구 여재와 특급 호흡기 보호구 여재의 은나노 입자와 소금 입자의 입경별 효율 특성을 비교한 것이다. 은나노 입자의 경우, 1급 마스크 필터와 특급 마스크 필터 모두에서 같은 입경에서 소금 입자보다 높은 효율을 나타내고 있는데, 이것은 은나노입자의 발생 특성에 의한 것으로 보인다. 본 연구에서는 작업장에서 은나노 입자가 고농도로 노출될 경우를 모사하여, 기화-응축에 의한 방법의 은나노발생장치를 적용하였고, 중화기를 통과시키지 않았는데, 이 때 생성된 은나노입자의 경우 볼츠만 하전 분포에 비해 상대적으로 높게 대전된 입자들이 많이 만들어진다(Jung et al., 2006). 이로 인해, 정전필터인 마스크 필터의 입경별 효율이 높아진 것으로 보인다.

5. 요약

본 연구에서는 호흡용 보호구 필터의 나노물질에 대한 여과특성을 측정하기 위해서 소금(NaCl)과 은나노입자(Ag)를 대상으로 입경별 집진효율을 평가하였다. 호흡용 보호구 필터는 특급 방진마스크와 1급 방진마스크의 두 가지 안면부 여과식 방진마스크인 사용하였고, 마스크의 배기밸브 부분을 제외한 필터 여재 부분을 직경 47 mm로 잘라내어 필터홀더에 부착하여 입경별 입자제거효율을 시험하였다.

시험입자는 일반적으로 시험 입자로 사용되는 소금입자는 분무형 입자발생장치를 사용하여 발생하였고 중화기를 통과시켜 입자의 하전특성을 볼츠만 분포로 만들어 공급하였다. 은나노입자의 경우, 기화-응축 방법을 이용한 금속나노입자 생성방법인 ISO10801 방법을 사용하였다. 작업장의 은나노입자의 고농도 노출을 모사하기 위해, 중화기를 통과하지 않은 나노입자를 시험입자로 사용하였다. 은나노입자의 경우 소금입자로 만들기 어려운 20nm 이하의 입자를 안정적으로 효과적으로 만들어 시험에 적용하였고, 나노 크기에서도 매우 안정적인 데이터를 확보할 수 있었다.

1급 마스크 필터와 특급 마스크 필터에 대한 소금 입자의 평가에서, 입경별 최소효율이 30~50nm 사이에서 나타나는 특성은 기존 연구와 비슷한 결과를 얻었다. 반면, 은나노입자의 경우 1급 마스크 필터

와 특급 마스크 필터 모두에서 비슷한 크기의 소금 입자와 비교할 때 높은 효율을 나타냈다. 이것은 소금 입자의 경우 중화기를 통과시켜 시험입자로 사용한 반면, 은나노입자의 경우 중화기를 통과시키지 않았기 때문이다. 본 연구에서는 작업장에서 은나노입자가 고농도로 노출될 경우를 모사하여, 기화-응축에 의한 방법의 은나노입자 발생장치를 사용하였는데, 이 때 상대적으로 높게 대전된 입자들이 많이 만들어진다(Jung et al., 2006). 이로 인해, 정전필터인 마스크 필터의 포집 효과가 상대적으로 크기 때문에, 입경별 효율이 높아진 것으로 생각된다.

본 연구에서 평가한 1급 및 특급 방진마스크 여재의 최소 포집효율은 유럽 EN 149 기준인 95 LPM 유량 기준을 만족하는 것으로 나타났지만, 이것은 여재에 대한 평가 결과로, 실제 마스크에 대해서는 여재의 구조적인 불균일성이나 마스크를 착용하는 과정에서 밀착이 되지 않아 누출될 가능성은 마스크 사용에 고려되어야 한다, 불시에 발생할 수 있는 작업장 내 안전사고의 예방을 위하여 적절한 보호구의 선택과 올바른 착용 및 유지관리가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- 노동부(2008), 보호구 의무안전인증 고시, 노동부고시 제2008 - 77호 (2008. 12. 3)
- Han D, (2011), Are Particulate Filtering Respirators Available in Korea Efficient for Nanoparticles?, J Korean Soc Occup Environ Hyg, 21(1), 62-71
- ISO10801, (2010), Nanotechnologies-Generation of Metal Nanoparticles with the Evaporation/Condensation Method for Inhalation Toxicity Testing.
- Ji, J.H., Bae, G. N., Kang, S. H., and Hwang, J. H. (2003), "Effect of Particle Loading on the Collection Performance of an Electret Cabin Air Filter for

- Submicron Particles," *J. Aerosol Sci.*, 34, pp. 1493-1504.
- Ji, J.H., Jung, J.H., Kim, S.S, Yoon, J.U., Park, J.D., Choi, B.S., Chung, Y.H., Kwon, I.H., Jeong, J., Han, B.S., Shin, J.H., Sung, J.H., Song, K.S. and Yu, I.J. (2007), Twenty eight day inhalation toxicity study of silver nanoparticles in Sprague Dawley Rats, *Inhalation Toxicology*, 19 (10), 857-871.
- Jung, J.H., Oh, H.C., Noh, H.S., Ji, J.H., Kim, S.S. (2006), Metal nanoparticle generation using a small ceramic heater with a local heating area, *J. Aerosol Sci.* 2006;37:1662-1670.
- Lux Research, (2007), *The nanotech report*. 5th ed. New York: Lux Research.
- Mahdavi A., Haghghat F., Bahloul A., Brochot, C. and Ostiguy, C. (2015), Particle Loading Time and Humidity Effects on the Efficiency of an N95 Filtering Facepiece Respirator Model under Constant and Inhalation Cyclic Flows. *Ann. Occup. Hyg.* 59(5), 1-12
- NIOSH, (2009), *Approaches to Safe Nanotechnology : Managing the Health and Safety Concerns Associated with Engineered Nanomaterials*.
- Zhou, Y. and Cheng, Y.S. (2016), Evaluation of N95 Filtering Facepiece Respirators Challenged with Engineered Nanoparticles, *Aerosol and Air Quality Research*, 16, 212-220.