

## 은나노입자에 대한 방진마스크 포집효율 및 총누설율

김종규\*

안전보건공단 산업안전보건연구원

### Filtration efficiency and Manikin-based Total Inward Leakage Study of Particle Filtering Mask Challenged with Silver Nanoparticles

Jong-Kyu Kim\*

Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA

#### ABSTRACT

**Objectives:** The production and use of nanoparticles have been increased. In 2014 Workplace Survey Results, 335 companies produce and treat nanoparticles. However, lack of data on nano-toxicity and a method for risk management and regulation on nanoparticles and the standard test method are not sufficient. Protective equipment selection guidelines for nanoparticles are not established. It is required to carry out respirator efficiency test against nanoparticles.

This study was performed to evaluate filtration efficiency and manikin-based total inward leakage of particle filtering mask using in Korean country challenged with silver nanoparticles.

**Methods:** We investigated filtration efficiency and total inward leakage of 7 respirator with silver nanoparticle.

**Results:** The geometric mean diameters of Silver nanoparticles were 30 nm and number concentration were about  $10^6$  #/cm<sup>3</sup>. Filtration efficiency of six of the seven particle filtering masks was more than 98% and one particle filtering masks filtration efficiency was 94.9%. The filtration efficiency of particle filtering masks to 20 nm silver nanoparticles was highest. Artificial breathing machine with manikin based total inward leakage were 7.6% ~ 42.3%.

**Conclusions:** The results of this study nano-silver filter efficiency was high but the total inward leakage was higher than filter penetration. Therefore, education on how to wear a respirator should be demanded. Especially for workers handling nanoparticles and toxic material, user seal checking and fit test must be performed.

**Key words:** artificial breathing machine, filtration efficiency, silver-nanoparticles, total inward leakage

## I. 서 론

전세계적으로 나노물질 생산과 사용이 증가하고 있으며, 우리나라에서도 2014년 작업환경실태조사 결과 나노물질 합성, 표면처리, 최종제품생산 등 나노물질을 생산 취급하는 사업장이 335개소로 파악되었다(KOSHA, 2014). 그러나 나노기술과 관련한 나노입자독성에 대한 자료와 위험관리 방법에 대한 개

발이 부족한 상태이며, 나노 입자에 대한 법규, 표준 시험방법, 보호구 선택지침이 확립되어있지 않은 실정이다. 따라서 이러한 상황에서는 나노입자관련 방진마스크의 선택이 중요하다. 그러나 근로자를 보호할 수 있는 방진마스크에 대한 연구가 충분치 않아 나노입자 발생 사업장에서 현재 상용되고 있는 방진마스크 사용에 따른 우려가 많다. 이에 따라 나노입자에 대한 방진마스크 포집효율을 측정하였으며 아

\*Corresponding author: Jong Kyu Kim, Tel: 042-869-8524, E-mail: slug011@kosha.or.kr

Toxicity Assessment Department, Occupational Safety and Health Research Institute, Korea Occupational Safety and Health Agency, 339-30 Expo-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 305-380, Korea

Received: May 5, 2016, Revised: September 1, 2016, Accepted: September 22, 2016

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial

License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

올려 사람 호흡 형태와 유사하게 들숨, 날숨이 가능한 인공폐를 연결하여 충누설를 측정하였다. 또한 연속흡입이 가능한 마네킹을 이용하여 충누설를 측정하여 나노입자에 대한 방진마스크 효율을 파악함으로서 방진마스크 선택 및 착용 지침 방향 제시에 필요한 기초자료를 제공하고자 본 연구를 수행하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 방진마스크 선정

포집효율, 인공폐를 이용한 충누설를 시험을 위하여 보호구 안전인증 고시(MOEL, 2014)에 따라 안전보건공단에서 인증되어 국내에서 많이 사용되는 7개사 7개 방진마스크(특급)를 시중에서 구입하여 사용하였다. 그 중 3종류의 방진마스크는 안면부 여과식 마스크(A, B, C)이며, 4종류의 직결식 반면형 마스크(D, E, F, G)이었다. 안면부 여과식 마스크 필터는 3종류 모두 정전필터이었으며, 3종류의 직결식 반면형 마스크 필터는 부직포필터(D, E, F)이었으며, 1종류의 직결식 반면형 마스크필터는 기계식 필터(G)이었다.

포집효율 시험의 시료수는 3개/마스크이었으며, 인공폐를 이용한 충누설를의 시료 수는 5개/마스크이었다.

### 2. 은나노 발생장치

은나노 발생장치는 Kim 등(2007)의 은나노입자 발생장치와 유사하게 구축하였다. 은나노입자는 top-down (bulk 소재를 녹여 입자상 물질을 만드는 방식) 방식의 발생장치를 사용하여 발생시켰으며 본 실험에서는 은 와이어를 기화시킨 후 냉각시켜 입자상 물질을 발생시켰다. 발생방법은 은 와이어(2 cm)의 녹는 점 이상의 온도인 800~900℃에 해당하는 전류 100 volts를 전압조정기인 Slidacs를 이용하여 은 와이어가 놓여 있는 평판 플레이트에 가하였다. 녹은 은 와이어를 통해 발생한 은나노 입자는 청정공기발생기를 통해 주입된 20 L/min의 sheath air로 시험 챔버로 인입되었다.

### 3. 방진마스크 포집효율 측정

여과재의 은나노입자 포집효율시험은 보호구 안전

인증 고시(MOEL, 2014) 여과재의 분진 등 포집효율시험에 준하여 실시하였다. 은나노입자 발생장치에서 발생한 은나노입자를 20 L/min의 유량으로 mixing chamber로 보내고 75 L/min의 신선한 공기를 mixing chamber로 보낸 후 95 L/min 유량으로 여과재에 통과시켜 후 여과재 통과 전후의 농도를 SNPS(Scanning Nano-particle Spectrometer)(HCT, Korea)를 이용하여 입자크기를 측정하였으며, DMA(Differential Mobility Analyzer), CPC(Condensation Particle Counter)(HCT, Korea)를 이용하여 수 농도를 측정하였다(Figure 1). 측정시료수는 3개이었으며, 각 시료의 측정값은 3회 측정한 값의 평균값으로 하였다. 그리고 여과재의 포집효율을 다음과 같이 산출하였다.

$$P(\%) = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100$$

P : 여과재의 은나노입자 포집효율(%)

C<sub>1</sub> : 여과재 통과 전 은나노입자수 농도(#/cm<sup>3</sup>)

C<sub>2</sub> : 여과재 통과 후 은나노입자수 농도(#/cm<sup>3</sup>)

안면부 여과식은 95 L/min의 유량으로 배기밸브가 포함된 상태에서 측정하였으며, 직결식 반면형은 양구 형태로서 시험유량을 1/2로 조정하여 47.5 L/min 유량조건에서 교체식 필터가 카트리지에 장착된 상태에서 측정하였다.

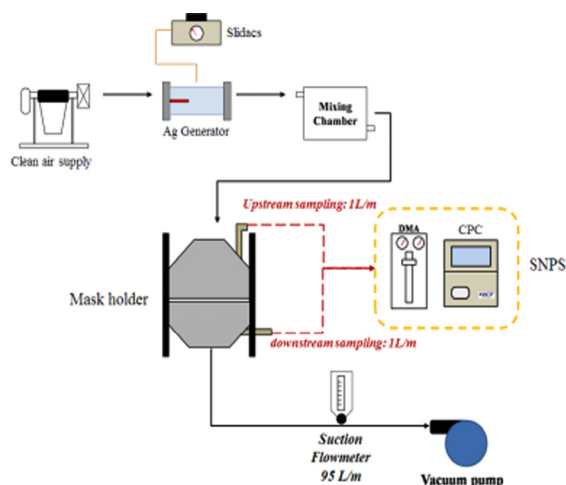


Figure 1. Schematic diagram of particle filtering mask filtration efficiency measurement

#### 4. 인공폐를 이용한 총누설률 측정

Rengasamy & Eimer(2011)이 이용한 인공폐 실험 방법과 유사하며 마네킹(시험인두)은 보호구 안전인증 고시(Ministry of Employment and Labor, 2014)의 방진마스크 전처리에 사용되는 규격의 마네킹 및 인공폐를 사용하였다. 사람이 마스크를 착용한 상태에서 총누설률을 측정하는 것이 바람직하나 본 연구에서는 은나노입자의 독성으로 인하여 마네킹(시험인두)를 활용하여 총누설률을 측정하였다.

마네킹에 마스크를 장착시키고 인공폐를 이용하여 들숨, 날숨을 쉬도록 한 상태에서 은나노입자의 총누설률을 측정하였다.

인공폐의 작동조건으로 호흡파형은 정현파이었으며, 1회 호흡 시 흡기량은  $2 \pm 0.1$  L/min이었고, 호흡 횟수는  $25 \pm 1.25$  회/분이었다. 평균 50 L/min 유량을 흡입하도록 하였다.

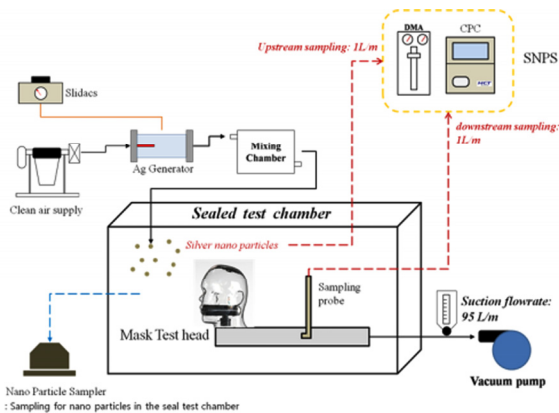


Figure 2. Schematic diagram of manikin-based total inward leakage of particle filtering mask

챔버내에 시험인두를 설치하고, 시험인두에 방진마스크를 착용시키고, 챔버와 연결된 인공폐를 작동시켰다. 그리고 챔버 내 은나노입자 수농도를 측정하고, 은나노입자가 마스크를 통과한 후 수농도를 측정하여 총누설률을 측정하였다(Figure 2).

#### 5. 전자현미경을 이용한 나노입자 분석

방진마스크에 포집된 은나노입자를 초분해능 주사전자현미경(Ultra High Resolution Field Emission Scanning Electron Microscope, Hitachi S-4800, Japan)를 사용하여 분석하였다. 초분해능 주사전자현미경의 가속전압은 3.0 kv로 하였으며, 시료는 초분해능 주사전자현미경으로 5,000배, 10,000배율에서 관찰하였다.

#### 6. 자료 분석

시험결과는 평균과 표준편차로 표시하였으며, SPSS 18을 이용하여 일원배치 분산분석(One-way ANOVA)을 검정하였으며 유의성이 인정된 자료의 사후검증은 Dunnett's test와 Duncan multiple rage test를 이용하여 유의성을 검정하였다.

### Ⅲ. 연구결과

#### 1. 방진마스크 필터의 포집효율

##### 1) 발생 총분진에 대한 필터의 포집효율

발생된 은나노 입자 수농도는  $7.76E+06 \sim 3.16E+07$  #/cc이었다. 7개 방진마스크에 대한 필터 포집효율 측정한 결과 6개 방진마스크(A, C, D, E, F)는 투과율이

Table 1. Particle filtering mask filtration efficiency for silver nanoparticles(n=3)

| Respirator | Particle Concentration(#/cc) |          |          |          | Filtration Efficiency(%) | Penetration Ratio(%) |
|------------|------------------------------|----------|----------|----------|--------------------------|----------------------|
|            | Before                       |          | After    |          |                          |                      |
|            | Mean                         | SD       | Mean     | SD       |                          |                      |
| A          | 9.22E+06                     | 2.96E+05 | 1.75E+05 | 1.09E+05 | 98.1 ± 1.16              | 1.9 ± 1.16           |
| B          | 7.76E+06                     | 9.53E+05 | 3.90E+05 | 5.15E+04 | 94.9 ± 0.79              | 5.1 ± 0.79           |
| C          | 8.69E+06                     | 1.90E+06 | 6.33E+04 | 5.89E+04 | 99.1 ± 0.99              | 0.9 ± 0.99           |
| D          | 1.82E+07                     | 7.23E+06 | 2.87E+05 | 6.69E+04 | 98.4 ± 0.24              | 1.6 ± 0.24           |
| E          | 2.31E+07                     | 1.06E+06 | 3.70E+05 | 1.62E+04 | 98.4 ± 0.12              | 1.6 ± 0.12           |
| F          | 3.21E+07                     | 7.44E+05 | 3.50E+05 | 4.18E+03 | 98.9 ± 0.03              | 1.1 ± 0.03           |
| G          | 3.16E+07                     | 1.75E+06 | 2.81E+05 | 3.54E+03 | 99.1 ± 0.05              | 0.9 ± 0.05           |

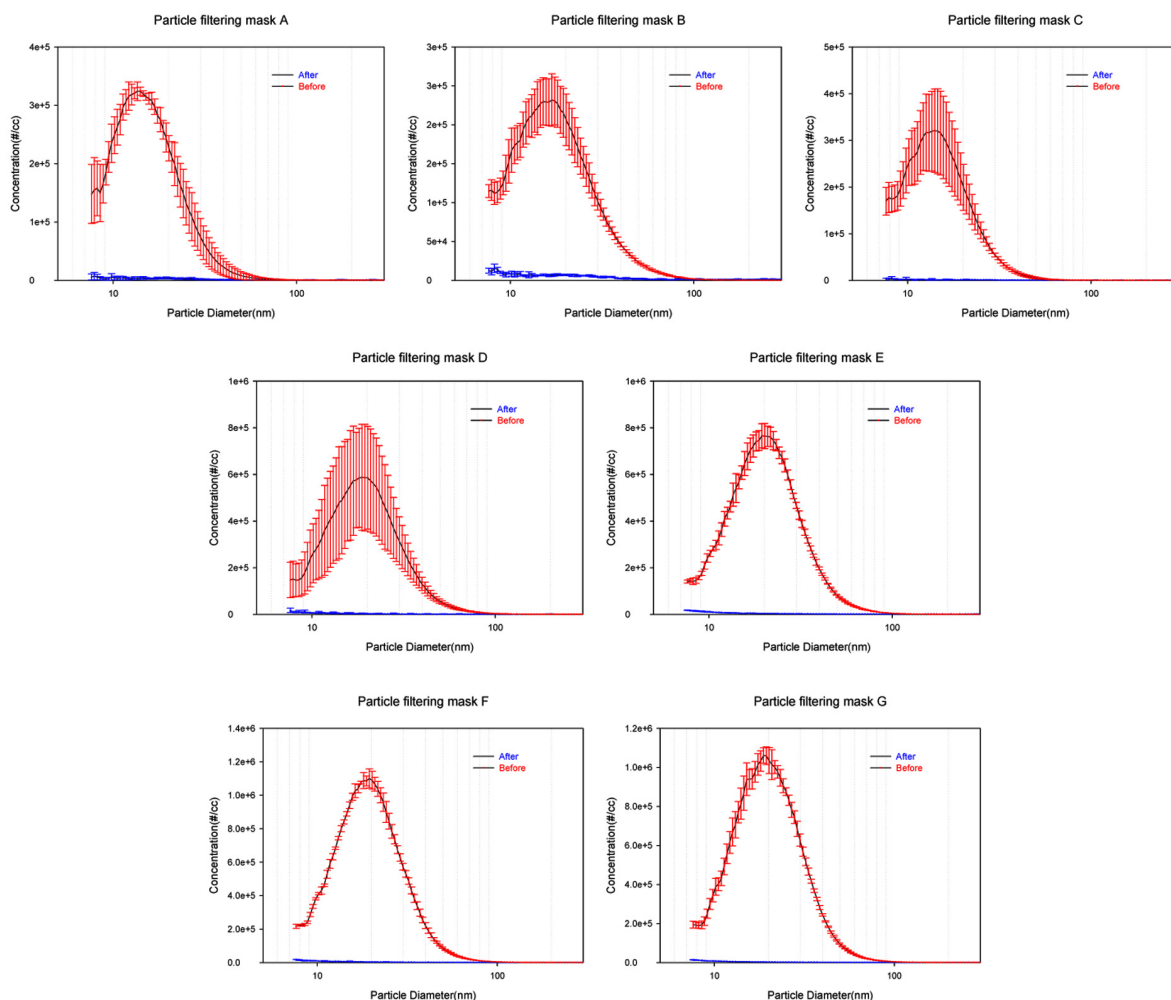


Figure 3. Concentration of silver nano particles before and after particle filtering mask filter

2%이하였으며, 1개 방진마스트(B)는 투과율이 5%이상으로 4개 방진마스크(A, C, D, E, F)보다 통계적으로 유의하게 높았다.

C 마스크의 은나노입자에 대한 투과율(0.9%)이 가장 낮았으며, G(0.9%), F(1.1%), D(1.6%), E(1.6%), A(1.9%), B(5.1%) 순이었다. 그리고 B 마스크를 제외하고 제품 간 투과율은 통계적으로 유의한 차이는 관찰되지 않았다.

B 정전마스크를 제외한 정전마스크의 투과율은 0.73 ~ 1.90%, 부직포마스크의 경우는 1.09 ~ 1.58%, 기계식마스크의 경우는 0.89%로서 필터형식에 따른 투과율은 통계적으로 유의한 차이는 관찰되지 않았다(Table

1, Figure 3).

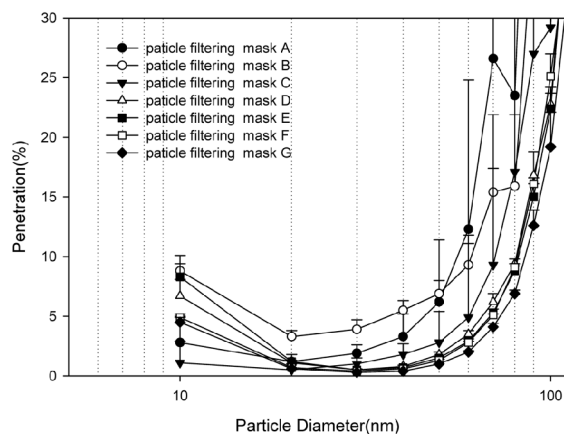
## 2) 은나노입자 입자 크기에 따른 포집효율

정전필터 방진마스크인 A는 50 nm이하, B는 60 nm이하, C는 70 nm이하 은나노입자에 대하여 90%이상의 포집효율을 보였다.

부직포필터, 기계식필터 방진마스크 D, E, F, G는 80 nm이하 은나노입자에 대하여 90%이상의 포집효율을 보였다. 그러나 입자의 크기가 증가함에 따라 포집효율이 떨어지는 경향을 보였다. 특히 90 nm이상의 은나노입자에 대한 포집효율이 급격히 떨어지는 경향을 보였다.(Table 2, Figure 4).

**Table 2.** Particle filtering mask filtration efficiency according to the silver nanoparticle size(n=3)

| Particle Size (nm) | Respirators                                |      |      |     |      |      |                           |     |      |     |      |     |      |     |
|--------------------|--|------|------|-----|------|------|---------------------------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
|                    | Filtering Facepiece Respirator(Disposable) |      |      |     |      |      | Half Facepiece Respirator |     |      |     |      |     |      |     |
|                    | A  |      | B    |     | C    |      | D                         |     | E    |     | F    |     | G    |     |
|                    | Mean                                       | SD   | Mean | SD  | Mean | SD   | Mean                      | SD  | Mean | SD  | Mean | SD  | Mean | SD  |
| 7~10               | 97.2                                       | 2.4  | 91.2 | 1.3 | 98.9 | 1.8  | 93.3                      | 1.4 | 91.7 | 1.1 | 95.1 | 0.1 | 95.5 | 0.4 |
| 11~20              | 98.8                                       | 0.6  | 96.7 | 0.5 | 99.5 | 0.5  | 98.9                      | 0.2 | 98.8 | 0.1 | 99.3 | 0.0 | 99.4 | 0.0 |
| 21~30              | 98.1                                       | 0.7  | 96.1 | 0.8 | 99.0 | 0.5  | 99.5                      | 0.1 | 99.5 | 0.0 | 99.6 | 0.0 | 99.7 | 0.0 |
| 31~40              | 96.7                                       | 1.9  | 94.5 | 0.8 | 98.2 | 0.9  | 99.2                      | 0.1 | 99.3 | 0.0 | 99.4 | 0.0 | 99.6 | 0.0 |
| 41~50              | 93.8                                       | 5.2  | 93.1 | 1.1 | 97.2 | 2.6  | 98.2                      | 0.2 | 98.5 | 0.1 | 98.7 | 0.1 | 99.0 | 0.0 |
| 51~60              | 87.7                                       | 12.5 | 90.7 | 2.5 | 95.1 | 6.2  | 96.5                      | 0.3 | 97.1 | 0.2 | 97.2 | 0.1 | 98.0 | 0.1 |
| 61~70              | 73.4                                       | 31.5 | 84.6 | 2.0 | 90.7 | 12.6 | 93.8                      | 0.7 | 94.7 | 0.3 | 94.9 | 0.1 | 95.9 | 0.3 |
| 71~80              | 76.5                                       | 17.2 | 84.1 | 6.0 | 82.9 | 24.5 | 90.6                      | 0.4 | 91.2 | 0.6 | 90.9 | 0.7 | 93.1 | 0.3 |
| 81~90              | 38.2                                       | 63.3 | 62.0 | 8.6 | 73.0 | 39.0 | 83.2                      | 2.0 | 85.0 | 1.1 | 83.9 | 0.5 | 87.4 | 1.3 |
| 91~100             | 47.1                                       | 42.9 | 53.2 | 6.5 | 70.8 | 42.0 | 77.2                      | 0.9 | 77.6 | 1.8 | 74.9 | 1.9 | 80.8 | 2.9 |

**Figure 4.** Percentage penetrations of silver nanoparticles through particle filtering masks

## 2. 인공폐를 이용한 총누설율

### 1) 발생 총분진에 대한 인공폐를 이용한 총누설율

발생된 은나노 입자 수농도는  $1.70\text{E}+06 \sim 6.98\text{E}+06$  #/cc이었다. 들숨, 날숨이 가능한 인공폐를 이용하여 7개 방진마스크에 대한 총누설율을 측정한 결과 C 방진마스크의 총누설율이 7.6%로 가장 낮았으며, G 방진마스크는 8.5%이었다. 그리고 D(21.4%), F(23.8%), A(30.9%), E(31.4%), B(42.3%) 순이었다. C 방진마스크는 안면부 여과식 마스크이나 총누설율이 가장 낮았으며, B 마스크의 경우 총누설율이 42.3%로 가장 높았다. 마스크 C, G의 인공폐 총누설율은 다른 제품 마스크

총누설율보다 통계적으로 유의하게 낮았다. 또한 기계식 필터마스크의 인공폐 총누설율이 정전필터 마스크, 부직포필터 마스크의 총누설율보다 통계적으로 유의하게 낮았다(Table 3).

### 2) 은나노입자 입자 크기에 따른 인공폐 총누설율

방진마스크 C, D는 10 ~ 70 nm 은나노입자에 대한 포집효율이 90%이상이었다. 그리고 D는 74.5 ~ 84.1%, F는 60.8~78.3% 이었다. 그리고 E는 40~74.3%로 포집효율이 감소하였다. B는 필터 포집효율에서도 가장 낮았으며, 인공폐를 이용한 포집효율시험에서도 가장 낮았다(Table 4).

### 3. 마스크별 필터투과율, 인공폐를 이용한 총누설율 비교

필터투과율과 인공폐를 이용한 총누설율 차이는 6.9~37.6%이었다. 필터투과율이 0.73~5.02%임을 감안하면, 마스크와 시험인두 밀착부분에서 누설되는 입자, 마스크 부품을 통과하는 입자가 더 많음을 관찰할 수 있었다.

필터 7개 마스크 중 필터투과율 및 총누설율이 적은 C, G마스크의 경우 필터투과율과 인공폐를 이용한 총누설율 차이는 6.9~7.6%로서 총누설율이 8.5~9.5배 높았다. 부직포필터 마스크 D, E, F 마스크의 경우 필터투과율과 인공폐를 이용한 총누설율 차이는 19.8~29.8%

**Table 3.** Manikin-based total inward leakage of particle filtering mask for silver nanoparticles(n=5)

| Respirator | Particle Concentration(#/cc) |          |          |          | Total Inward Leakage (%) | Filtration Efficiency(%) |
|------------|------------------------------|----------|----------|----------|--------------------------|--------------------------|
|            | Before                       |          | After    |          |                          |                          |
|            | Mean                         | SD       | Mean     | SD       |                          |                          |
| A          | 1.70E+06                     | 1.78E+05 | 5.23E+05 | 5.24E+04 | 30.9 ± 2.03              | 1.9 ± 2.03               |
| B          | 4.68E+06                     | 3.53E+05 | 2.00E+06 | 3.85E+05 | 42.5 ± 7.10              | 5.1 ± 7.10               |
| C          | 3.19E+06                     | 4.50E+05 | 2.42E+05 | 6.36E+04 | 7.8 ± 2.65               | 0.9 ± 2.65               |
| D          | 4.08E+06                     | 1.08E+06 | 8.72E+05 | 4.81E+05 | 20.9 ± 9.45              | 1.6 ± 9.45               |
| E          | 6.50E+06                     | 9.23E+05 | 2.04E+06 | 3.32E+05 | 31.4 ± 2.96              | 1.6 ± 2.96               |
| F          | 6.98E+06                     | 8.51E+05 | 1.66E+06 | 4.55E+05 | 23.6 ± 4.66              | 1.1 ± 4.66               |
| G          | 6.62E+06                     | 1.61E+05 | 5.60E+05 | 4.85E+05 | 8.4 ± 7.14               | 0.9 ± 7.14               |

**Table 4.** Manikin-based total inward leakage of particle filtering mask according to the silver nanoparticle size

| Particle Size (nm) | Respirators                                |      |      |      |      |     |                           |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------|--|------|------|------|------|-----|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
|                    | Filtering Facepiece Respirator(Disposable) |      |      |      |      |     | Half Facepiece Respirator |      |      |      |      |      |      |      |
|                    | A  |      | B    |      | C    |     | D                         |      | E    |      | F    |      | G    |      |
|                    | Mean                                       | SD   | Mean | SD   | Mean | SD  | Mean                      | SD   | Mean | SD   | Mean | SD   | Mean | SD   |
| 7~10               | 72.5                                       | 7.1  | 44.5 | 6.2  | 91.8 | 3.3 | -                         | -    | 81.3 | 2.8  | 78.7 | 4.8  | 85.4 | 7.7  |
| 11~20              | 72.9                                       | 2.0  | 59.4 | 7.6  | 92.5 | 2.7 | 74.5                      | 16.5 | 74.3 | 2.9  | 78.3 | 3.8  | 92.8 | 6.4  |
| 21~30              | 69.8                                       | 2.8  | 63.2 | 8.3  | 92.5 | 2.5 | 82.4                      | 5.4  | 68.3 | 3.6  | 78.2 | 4.5  | 93.7 | 7.6  |
| 31~40              | 67.7                                       | 2.8  | 62.8 | 8.9  | 92.0 | 2.6 | 84.1                      | 4.5  | 62.9 | 3.7  | 75.7 | 6.0  | 93.5 | 7.4  |
| 41~50              | 65.4                                       | 3.0  | 58.1 | 8.6  | 91.5 | 2.6 | 84.0                      | 4.7  | 55.9 | 4.5  | 70.8 | 7.2  | 92.0 | 7.6  |
| 51~60              | 64.3                                       | 5.4  | 53.8 | 9.7  | 91.0 | 2.4 | 83.1                      | 4.2  | 49.3 | 6.0  | 66.9 | 9.0  | 90.4 | 9.1  |
| 61~70              | 63.3                                       | 7.3  | 45.5 | 9.5  | 89.8 | 2.6 | 80.1                      | 5.9  | 40.8 | 10.8 | 60.8 | 9.5  | 88.2 | 8.5  |
| 71~80              | 62.0                                       | 8.9  | 37.3 | 9.5  | 88.4 | 2.6 | 77.2                      | 7.4  | 31.1 | 16.1 | 54.7 | 12.2 | 80.9 | 11.6 |
| 81~90              | 60.2                                       | 11.4 | 23.8 | 11.2 | 86.5 | 3.6 | 71.4                      | 12.4 | 18.2 | 23.6 | 46.7 | 12.1 | 72.9 | 15.7 |
| 91~100             | 57.4                                       | 12.6 | 13.6 | 5.7  | 85.7 | 3.0 | 67.0                      | 16.1 | 14.3 | 24.8 | 41.5 | 14.9 | 60.3 | 19.6 |

**Table 5.** Particle filtering mask penetration ratio compared to manikin-based total inward leakage

| Respirator | Penetration Ratio(%) <sup>(a)</sup> | Total Inward Leakage of Artificial Breathing(%) <sup>(b)</sup> | Difference (a) and (b) (%) |
|------------|-------------------------------------|--|----------------------------|
| C          | 0.73                                | 7.6  | 6.9                        |
| G          | 0.89                                | 8.5  | 7.6                        |
| F          | 1.09                                | 23.8   | 22.7                       |
| D          | 1.58                                | 21.4   | 19.8                       |
| E          | 1.6                                 | 31.4   | 29.8                       |
| A          | 1.9                                 | 30.9   | 29.0                       |
| B          | 5.02                                | 42.6   | 37.6                       |

로서 총누설률이 12.5~20.8배 높았다. 안면부여과식 마스크 A, B의 경우 필터투과율과 인공폐를 이용한 총누

설률 차이는 29.0~37.6%로서 가장 컸으며 총누설률이 7.5~15.3배 높았다(Table 5).

#### 4. 전자현미경을 이용한 나노입자 분석

초분해능 주사전자현미경(Ultra High Resolution Field Emission Scanning Electron Microscope, UHR-FE-SEM)을 이용하여 마스크 필터에 포집된 나노입자크기를 분석한 결과 34~172 nm이었다.

## IV. 고 찰

7개 방진마스크에 대한 필터 투과율을 측정한 결과 6개 방진마스크는 투과율이 2%미만 이었다. 제품에 따라 투과율은 다르게 관찰되었으나 통계적으로 유의

**Table 6.** Particle size mean, median, geometric mean, mode, geometric standard deviation and total concentration before and after particle filtering mask filter

| Respirator | Position | Parameters |        |                |      |                              |                     |
|------------|----------|------------|--------|----------------|------|------------------------------|---------------------|
|            |          | Mean       | Median | Geometric mean | Mode | Geometric Standard Deviation | Total Concentration |
| A          | Before   | 16.6       | 14.4   | 15.2           | 13.8 | 1.5                          | 9.22E+06            |
|            | After    | 31.2       | 17.2   | 20.4           | 11.8 | 2.1                          | 1.75E+05            |
| B          | Before   | 19.6       | 16.3   | 17.3           | 16.3 | 1.6                          | 7.76E+06            |
|            | After    | 35.6       | 17.4   | 21.2           | 8.1  | 2.4                          | 3.90E+05            |
| C          | Before   | 15.8       | 13.9   | 14.6           | 13.5 | 1.5                          | 8.69E+06            |
|            | After    | 28.5       | 18.2   | 20.5           | 17.1 | 1.9                          | 6.33E+04            |
| D          | Before   | 21.4       | 18.5   | 19.1           | 19.2 | 1.6                          | 1.82E+07            |
|            | After    | 39.5       | 13.9   | 20.8           | 7.8  | 2.7                          | 2.87E+05            |
| E          | Before   | 22.3       | 19.6   | 20.1           | 20.5 | 1.6                          | 2.31E+07            |
|            | After    | 39.4       | 13.7   | 20.6           | 7.9  | 2.7                          | 3.70E+05            |
| F          | Before   | 21.1       | 18.6   | 19.1           | 18.8 | 1.5                          | 3.21E+07            |
|            | After    | 39.6       | 13.8   | 20.7           | 7.7  | 2.7                          | 3.50E+05            |
| G          | Before   | 21.6       | 19     | 19.5           | 18.6 | 1.5                          | 3.16E+07            |
|            | After    | 39.6       | 13.9   | 20.8           | 7.9  | 2.7                          | 2.81E+05            |

**Table 7.** Particle size mean, median, geometric mean, mode, geometric standard deviation and total concentration before and after manikin-based filtering mask filter test

| Respirator | Position | Parameters |        |                |      |                              |                     |
|------------|----------|------------|--------|----------------|------|------------------------------|---------------------|
|            |          | Mean       | Median | Geometric mean | Mode | Geometric Standard Deviation | Total Concentration |
| A          | Before   | 16.6       | 14.4   | 15.2           | 13.8 | 1.5                          | 9.22E+06            |
|            | After    | 31.2       | 17.2   | 20.4           | 11.8 | 2.1                          | 1.75E+05            |
| B          | Before   | 19.6       | 16.3   | 17.3           | 16.3 | 1.6                          | 7.76E+06            |
|            | After    | 35.6       | 17.4   | 21.2           | 8.1  | 2.4                          | 3.90E+05            |
| C          | Before   | 15.8       | 13.9   | 14.6           | 13.5 | 1.5                          | 8.69E+06            |
|            | After    | 28.5       | 18.2   | 20.5           | 17.1 | 1.9                          | 6.33E+04            |
| D          | Before   | 21.4       | 18.5   | 19.1           | 19.2 | 1.6                          | 1.82E+07            |
|            | After    | 39.5       | 13.9   | 20.8           | 7.8  | 2.7                          | 2.87E+05            |
| E          | Before   | 22.3       | 19.6   | 20.1           | 20.5 | 1.6                          | 2.31E+07            |
|            | After    | 39.4       | 13.7   | 20.6           | 7.9  | 2.7                          | 3.70E+05            |
| F          | Before   | 21.1       | 18.6   | 19.1           | 18.8 | 1.5                          | 3.21E+07            |
|            | After    | 39.6       | 13.8   | 20.7           | 7.7  | 2.7                          | 3.50E+05            |
| G          | Before   | 21.6       | 19     | 19.5           | 18.6 | 1.5                          | 3.16E+07            |
|            | After    | 39.6       | 13.9   | 20.8           | 7.9  | 2.7                          | 2.81E+05            |

한 차이는 관찰되지 않았다. 미국 NIOSH에서 N95의 반면형 마스크의 검정기준은 투과율이 5%미만이다. 많은 연구자들은 시중에 시판되고 있는 반면형 마스크를 이용하여 나노입자에 대한 투과율을 연구하였다.

NaCl을 발생시켜 N95 반면형 마스크(FFR)의 투과율을 측정한 Martin & Moyer(2000)의 연구결과는 5.0%~10.0%로 성능검정기준보다 높았으며, Balazy et al. (2006)의 연구에서는 5.0%~6.0%, Huang et al.(2007)의

연구에서는 5.8%로 성능검정기준보다 약1% 높았으며, Rengasamy et al.(2007)은 1.4%~5.2%, Rengasamy et al.(2009)의 연구에서는 2.3%~4.3%로 성능검정기준보다 낮았다. Eninger et al.(2008)의 연구에서는 0.7%~8.8%로 제품에 따라 큰 차이를 보였다. P100 반면형 마스크(FFR)의 투과율을 측정한 Rengasamy et al.(2008)의 결과는 0.0004%~0.009%로 성능검정기준보다 낮았다. 본 연구에서 사용된 방진마스크는 우리나라 인증기관에서 모두 합격한 제품으로 성능기준을 모두 만족한 제품이다. 그러나 본 연구에서 사용된 방진마스크의 은나노 입자에 대한 포집효율은 98%(투과율 2% 미만)이었다. 이러한 차이는 NIOSH에서 사용되는 유량이 85 L/min이며, 우리나라 인증기준에서는 95 L/min 유량을 사용하며, 본 연구에서도 95 L/min을 사용하였다. Huang et al.(2007)은 유량을 30, 60, 85 L/min 달리하여 NaCl에 대한 필터의 투과율을 측정한 결과 유량이 증가함에 따라 투과율은 증가하였다. 이와 같이 유량의 차이가 포집효율 차이에 영향을 주었을 것으로 사료된다. 선행연구에서는 밀도가 2.165 g/cm<sup>3</sup>인 NaCl 나노입자를 사용하였으며, 본 연구에서는 밀도가 10.49 g/cm<sup>3</sup>인 나노입자를 사용한 차이가 있다. 그러나 비중의 차이가 포집효율에 영향을 미칠 지에 대한 고찰이 더 필요할 것으로 판단된다.

많은 방진 필터들은 필터 섬유에 정전기 처리를 하고 있어 정전기적 상호 인력으로 입자포집 능력을 향상시킬 것으로 가정하고 방진 마스크 필터재질형식(정전마스크, 부직포마스크, 기계식마스크)에 따라 투과율의 차이가 발생할 것으로 예상하고 포집율을 측정한 결과 정전필터마스크 C의 포집효율이 가장 높았으며, 기계식마스크 G의 포집효율도 높게 측정되었으나 통계적 유의한 차이는 관찰되지 않았다. 정전필터는 필터가 정전기를 가지고 있어 공기 중의 미세한 입자와 먼지를 흡착한다. 고압 전류로 정전 처리된 정전필터는 일반필터에서는 걸러지지 않는 연기나 미세한 먼지를 걸러준다. Kim et al.(2006)의 연구에서는 3 ~ 20 nm 크기의 은나노입자를 발생시켜 유리섬유필터와 정전필터의 투과율을 측정하였다. 유리섬유의 경우, 20 nm 은나노입자에 대한 공극(pore size)이 큰 유리섬유의 투과율이 약 20%이었으며 공극이 작은 유리섬유의 투과율은 약 1%이었으나, 정전필터의 경우, 투과율은 약 0.6 ~ 5%이었다. 특히 재질이 expanded polytetrafluoroethylene의

투과율은 약 0.2%이었다. 그리고 Huang et al.(2007)의 연구에서 정전필터를 이용하여 투과율을 측정한 결과 50 nm 입자에서 투과율이 약 5%로서 가장 높았으며, 입자의 크기가 증가함에 따라 투과율이 감소하였다. 그러나 isopropanol로 정전기를 제거한 필터의 투과율 200 nm 입자에서 투과율이 약 20%로 증가하였다. Martin & Moyer(2000)의 연구에서도 isopropanol로 정전기를 제거한 결과 입자크기가 증가함에 따라 투과율이 증가하였다. 본 연구에서 은나노입자 크기에 따른 방진마스크 포집효율을 분석한 결과 정전필터가 부직포마스크, 기계식마스크보다 적은 입자를 더 잘 포집하고 있음을 관찰할 수 있었다. 정전필터 방진마스크 A는 50 nm이하, B는 60 nm이하, C는 70 nm이하 은나노입자에 대하여 90%이상의 포집효율을 보였다.

그러나 입자의 크기가 증가함에 따라 포집효율이 떨어지는 경향을 보였다. 특히 90 nm이상 은나노입자에 대한 포집효율은 떨어지는 경향을 보였다. 이는 Kim et al.(2006)의 연구에서 200 nm까지 입자의 크기가 증가함에 따라 투과율이 증가한 결과와 같은 경향을 보였다.

보호구 안전인증 고시(고용노동부고시 제2014-46호)에서 누설률 시험은 깨끗하게 면도한 10명을 피시험자로 선정한 후 안면걸이, 안면넓이, 안면깊이 및 입의 가로크기를 측정한다. 염화나트륨 에어로졸이 챔버로 들어가도록 하고, 최소한 0.12 m/s의 속도로 피시험자의 머리위로 직접 흘러내리도록 하고, 피시험자는 5가지 운동을 순서에 따라 실시하면서 안면부 내부 및 챔버내의 염화나트륨 에어로졸의 농도는 총누설률시험장치를 이용하여 측정한다. 그러나 본 연구에서는 은나노입자의 독성이 우려되어 마네킹을 이용하여 총누설률을 측정하였다.

총누설률은 필터투과율 뿐만 아니라 얼굴과 마스크 간의 틈으로 누설된 입자의 누설률을 합한 것이다. 본 연구에서 은나노입자의 필터투과율이 0.75~5.02%이었으나, 총누설률은 7.6~42.6%로 얼굴과 마스크 간의 틈으로 누설된 입자가 11.2~29.9%이었다. 즉 호흡보호구가 착용자의 얼굴과 잘 맞지 않아서 생기는 누설현상이 훨씬 많음을 관찰할 수 있었다.

필터 포집효율과 총누설률을 비교한 결과 방진마스크 필터 포집효율은 C, G, F, D, E, A, B 순 이었으며, 이 결과는 총누설률이 C, G, D, F, A, E, B 순인 것과



전반적으로 비슷한 경향을 보였다. 포집효율은 F가 D보다 좋으나, 총누설률에서는 F가 높은 것으로 보아 본 실험에서 사용된 마네킵과의 밀착도가 낮은 것으로 추정되며, 마스크 A, E의 경우에도 마스크 E의 포집효율이 좋으나, 총누설률에서는 E가 높게 관찰되었다. 마스크 C, G의 경우 포집효율이 높음에도 불구하고 총누설률은 7.6~8.5%로 9.5~10.4배 높았다.

안면부여과식인 마스크 A, B, C의 총누설률은 7.6~42.6%이었으며, 직결식 반면형 마스크는 21.4~23.8%로서 직결식 반면형 방진마스크가 안면부여과식 방진마스크보다 총누설률이 낮았으나 통계적 유의한 차이는 관찰되지 않았다.

Rengasamy & Eimer(2011)은 나노입자의 안면부 여과마스트 총누설률에 대한 자료가 부족하여 NIOSH기준에(OSHA, 2008) 만족하는 N95, P100와 유럽에서 인증된 FFP2, FFP3 호흡용보호구를 인위적으로 작은 구멍을 만들고, 인공호흡 manikin에 장착하여 총누설률을 측정하였다. 입자는 전자스프레이(electrospray)를 이용하여 8~80 nm 단분산 sucrose를 발생시켰으며, 아토마이저(atomizer)를 이용하여 20~1000 nm 다분산 NaCl 에어로졸을 발생시켰다. 또한 호흡량(breathing flow rates)을 20, 30, 40 L/min으로 변화시키면서 총누설률을 측정하고 결과 총누설량은 유량이 증가할수록 증가하였으며, 누설 구멍 크기가 증가할수록 증가하였다. 누설 구멍 크기가 2.41 mm인 경우 입자크기 50nm에서 누설률은 약6~10%이었다. 이 연구에서는 마스크를 마네킵에 장착시키고 마스크 가장자리를 실리콘 봉합제(silicon sealant)로 봉합한 후 측정하였다. 그러나 본 연구에서는 마스크 가장자리를 봉합처리 하지 않은 상태로 총누설률을 측정하여 본 연구의 총누설률이 Rengasamy연구보다 높게 관찰된 것으로 사료된다. 본 연구결과와 직접적으로 비교하기에는 무리가 있으나 총누설률이 최고 42.6%임을 감안하면 보호구와 시험인두와 잘 맞지 않아서 생기는 누설현상(faceseal leakage)이 많이 발생하였음을 추정할 수 있었다.

Balazy et al.(2006)은 유량이 30, 85 L/min 연속흡입방식으로, 발생입자는 NaCl 에어로졸을 발생시키고, 마네킵에 마스크를 실리콘 봉합제(silicon sealant)를 이용하여 밀봉시킨 상태에서 N95 안면부 여과식 마스크에 대한 총누설률을 측정하였다. 발생한 입자 중 20 nm입자수는  $6 \times 10^5$  으로 가장 많았다. 연속흡

입 유량이 85 L/min인 경우 A종류 마스크는 10개 시료 중 6개가 누설률 5%를 넘었으며, B종류 마스크는 10개 시료 중 9개가 누설률 5%를 넘었다. 실리콘 봉합제를 이용한 실험에서도 누설률이 5%를 넘는 경우가 60~90%발생하였다. 본 연구에서는 마스크 가장자리를 봉합처리 하지 않은 상태로 총누설률을 측정한 결과와 비교 시 누설현상(faceseal leakage)이 많이 발생하고 있음을 확인할 수 있었다. Holton et al.(1987)도 필터의 포집효율이 높으면 필터를 통한 누설은 무시할 정도이나 안면부 누설이 많이 발생한다고 보고하고 있다.

따라서 총누설을 최소화하기 위해서는 호흡보호구의 올바른 착용방법 및 관리에 관한 지침에 따라 호흡보호구의 착용방법에 대한 교육이 반드시 이루어져야 하며, 밀착도 검사가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

## V. 결 론

본 연구결과 7개 방진마스크에 대한 필터 포집효율 측정한 결과 6개 방진마스크는 포집효율은 98% 이상이었으며, 1개 방진마스크는 94.9%이었다. 안면부 여과식 마스크는 20 nm 은나노입자에 대한 포집효율이 가장 높았다. 인공폐를 이용하여 방진마스크 총누설률을 측정한 결과 7.6%~42.3%로 제조사에 따라 많은 차이가 있었다. 인공폐에 의한 총누설률은 필터투과율에 비하여 7.5~20.8배 높았다. 방진마스크의 총누설률이 높은 이유는 필터의 투과율과 비교 시 인두와 마스크의 밀착도가 낮아 발생하기 때문이다. 따라서 총누설을 최소화하기 위하여 호흡보호구의 올바른 착용방법 및 관리에 관한 지침에 따라 호흡보호구의 착용방법에 대한 교육이 반드시 이루어져야 하며, 밀착도 자가점검(user seal check)을 실시하고, 밀착도 검사(fit test)를 실시하여야 한다. 특히 독성이 확인되지 않은 나노물질, 독성이 강한 무질을 취급하는 근로자의 경우는 정성적 밀착도 검사뿐만 아니라 정량적 밀착도 검사를 실시하도록 보건관리자, 안전관리자 등의 세심한 관리가 필요하다. 또한 향후 NaCl 을 이용한 나노입자 포집효율 비교 연구가 필요하며, 사람이 마스크를 착용한 상태에서 총누설률의 연관성 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## References

- Balazy A, Toivola M, Reponen T, Podgorski A, Zimmer A, et al. Manikin-based performance evaluation of N95 filtering-facepiece respirators challenged with nanoparticles. *Ann Occup Hyg* 2006;50:259-269
- 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* 2008;5: 286-295
- Holton PM, Tackett DL, Willeke K. Particle size dependent leakage and losses of aerosols in respirators. *Am Ind Hyg Assoc J* 1987;48:848-54
- Huang SH, Chen CW, Chan CP, Lai CY, Chen CC. Penetration of 4.5 nm to 10 μm aerosol particles through fibrous filters. *Aerosol Science* 2007;38:719-727
- Kim CS, Bao L, Okuyama K, Shimada Manabu, Niinuma H. Filtration efficiency of a fibrous filter for nanoparticles *Journal of Nanoparticle Research* 2006;8:215-221
- Kim SC, Harrington MS, Pui DYH. Experimental study of nanoparticles penetration through commercial filter media. *Nanotechnology and Occupational Health* 2007; 117-125
- Korean Occupational Safety and Health Department (2014) 2014 national industry workplace environment survey D/B
- Martin SB Jr, Moyer ES. Electrostatic respirator filter media: filter efficiency and most penetrating particle size effects. *App Occup Environ Hyg* 2000;15:609-617
- Ministry of Employment and Labor. (2014) Personal protective Equipment Safety Certification Notice. Notification No. 2014-46
- OSHA. Respiratory protection. 2008. 29 CFR 1910.134 Washington, DC: Occupational Safety and Health Administration. Available at [http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show\\_document?p\\_table=STANDARDS&p\\_id=12716](http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=12716).
- 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, 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* 2008;5: 556-564
- 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 BC. Total Inward Leakage of Nanoparticles Through Filtering Facepiece Respirators *Ann. Occup. Hyg.* 2011;55,(3):253-263