한국환경위생학회지, 제27권 제2호(2001)
Kor. J. Env. Hlth. Soc., Vol. 27, No. 2, pp 30~36(2001)

방진마스크의 에어로졸 방어효과와 밀착정도

한돈희†
인제대학교 의생명공학대학 산업안전보건학과

Protection against Aerosols by Particulate Respirators and Fit Performance

Don Hee Han†
Department of Industrial Health and Safety, College of Biomedical Sciences and Engineeing, Inje University
(Received 20 February 2001 ; Accepted 10 June 2001)

ABSTRACT

This review begins with a brief expression of aerosol capture mechanism of fibrous filter(s) and performance of particulate removing respirators. The more complicated and detailed discussion is not included in this articles. Filtration efficiency and pressure drop are introduced as quality factor (q_F) and the way in which filtration efficiency varies with particle size is discussed. Quality factors for filters recently certified in USA were found to be very higher than those of filters made in Korea, China and USA filters certified with old certified standards. Electrically charged filters are widely used because they have high filtration efficiency and low pressure drop, but their efficiency decreases sharply at the condition occurring wet and oil mist. A discussion is given of respirator leakage through face seal and filter media with fit testing and total inward leakage testing. Since fit factor (FF) refers to the reciprocal of the fraction of the total air entering a respirator through face seal leakage, the degree of fitting performance for respirators is expected with FF. Because respirators made in Korea had generally lower FFs than respirators made in USA, it is necessary to develope respirators that fit properly for Koreans or establish regulations for fit testing.

Keywords : Respirator, aerosol, filtration efficiency, pressure drop, fit testing, total inward leakage testing(TIL)

Ⅰ. 서 론

에어로졸이란 기체의 매체 속에 관찰이나 측정 가능한 기간동안 부유해 있는 액체 및 고체상의 덩어리를 말한다. 과거에는 액체 속에 부유해 있는 입자상 물질을 의미하였으나 지금은 대기 혹은 작업장 공기 중에 떠 있는 모든 입자상 물질을 의미한다. 여기에는 분진(dust), 안개 혹은 미스트(fog or mist), 흄(fume) 그리고 검댕(smoke)이 포함되며 에어로졸의 크기는 0.001~100 ㎛까지 광범위하다.[1)]

사업장에서 발생하는 에어로졸은 너무도 다양한데 예를 들어, 용접작업에서는 미세입자들이 체인형태로 응집된 흄이 발생하고 그라인딩 작업에서는 큰 입자들이 기계적으로 발생하며 스프레이 페인팅 작업에서는 미스트, 가루로 된 광물질 더미에서는 분진이 발생한다. 이들 대부분은 인체에 해롭기 때문에 이들의 인체 침투를 막아야 한다. 그렇게 하기 위해서는 우선, 에어로졸의 생성억제, 덜 유해한 물질로 대체, 작업자와의 격리 혹은 공학적인 제어가 필요하지만 이것들이 불가능한 경우 최후의 수단으로 보통 마스크라고 하는 호흡기보호구를 착용해야 한다. 호흡기보호구에는 사업장 공기와는 별개로 신선한 공기를 다른 용기에서 공급하는 공기공급식(atmosphere-supplying)과 오염된 사업장 공기를 정화시켜 공급하는 공기정화식(air-purifying) 호흡기보호구로 나눌 수 있는데[2,3)] 본 고에서는 후자에 한정시킨다.

1. 에어로졸 제거에 사용되는 방진 마스크 필터

좋은 필터란 공기가 통과할 때 낮은 기계적 저항

†Corresponding author : Department of Industrial Health and Safety, College of Biomedical Sciences and Engineering, Inje University, Gimhae, Gyongnam-do, Korea, 621-749.
Tel : 055-320-3285, Fax : 055-325-2471
E-mail : dhan@ijnc.inje.ac.kr

즉, 압력강하와 공기 중에 섞여 있는 오염물질에 대한 높은 포집효율을 갖고 있어야 한다. 저항과 포집효율은 필터의 구조에 의해 결정된다. 필터는 크게 직물섬유를 짜서 만드는 것과 미세한 섬유를 공기나 물 속에 침전시킨 후 종이를 만드는 공정과 유사한 공정으로 만드는 것으로 나눌 수 있다. 최근에는 대부분이 후자의 필터를 사용하는데 여기에는 다시 압축 합성 섬유 펠트(felt)에 기계적으로 미세한 바늘로 쳐서 정전기를 만든 다음 얼굴형상대로 잘라서 사용하는 flat disk 타입의 일회용 안면부 여과식 필터와 정전기를 가하지 않는 대신 표면적을 크게 하기 위해서 주름을 잡아 사용하는 기계식 필터로 나눌 수 있다.[4]

2. 압력강하와 공기 흐름 패턴

필터의 포집효율이론에 관한 연구는 매우 많으나 대표적으로 Davies[5]와 Brown[6]에 의한 것을 들 수 있다.

정상적인 상태에서 필터를 통한 공기의 흐름은 공기의 점성에 많은 영향을 받는데 필터의 압력강하는 유량에 비례한다는 Darcy's Law에 기인한다. 공기의 유속 U, 필터의 두께 h, 섬유의 직경 d_f일 때 필터의 압력강하는 간단하게 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\triangle p = \frac{4U\eta \ hf(c)}{d_f^2} \qquad (1)$$

여기서 η은 공기의 동점성계수이고 c는 필터 packing의 분율 즉, 필터 부피의 분율이다. 함수 $f(c)$는 필터 구조에 영향을 받지만 아주 약한 값이다. c가 증가함에 따라 이 값은 증가하며 c가 1에 가까워지면 급격히 증가하지만 대부분의 필터에서 c는 아주 작은 값이다. 여기서 주목할 것은 섬유의 직경이 커지면 압력강하는 급격히 떨어져 저항이 작아지게 된다.

3. 필터의 입자 포집

한 입자가 필터에 포집되기 위해서는 필터섬유 결합체(matrix)에 반드시 걸릴 필요는 없다. 사실 한 작은 입자가 필터의 한 섬유 이상과 접촉하기란 어려운 일이다. 섬유의 직경은 20 ㎛ 이상이고 느슨하게 결합되어 있기 때문에 섬유간 간격은 100 ㎛ 이상이 된다. 이 사이에 예를 들어, 2 ㎛인 입자가 걸린다는 것은 어려운 일이다. 간혹 이 간격보다 큰 입자가 걸릴 수 있는데 이를 absolute filtration이라고 하지만 이런 경우는 매우 드문 일이다(Fig. 1 참조). 한 섬유질에 한 가지 혹은 그 이상의 여러 가지 mechanism에 의해 한 입자가 포집되는 것을 non-absolute filtration이라고 하고 입자에 대한 필터의 포집과정은 대부분 여기에 해당된다(Fig. 2 참조).[4]

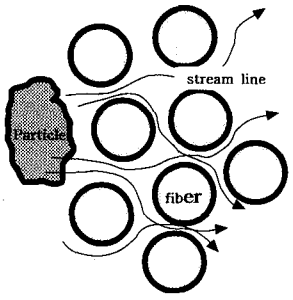

Fig. 1. Absolute filtration by fibrous filters.

섬유에 접근한 입자는 입자를 섬유에서 떨어뜨리려는 작은 공기 흐름의 힘을 극복하고 Van der Waals 힘과 같은 힘에 의해 섬유에 붙게 된다. 입자가 필터를 통과할 때 입자가 어떤 특정한 섬유에 접하는 일은 낮지만 필터는 여러 층으로 만들어져 있어서 필터의 깊이가 깊으면 잡히게 될 것이며 이러한 누적 효과는 커질 것이다. 예를 들어, 한 층의 필터가 총 입자의 5%를 붙잡는다면 100개의 층으로 만든 필터는 99.5%의 포집효율을 갖게 될 것이며 이를 depth filtration이라고 한다.

여과이론(filtration theory)에서 한 섬유의 포집효율을 E_s라고 하며 이것은 섬유에 접근한 공기가 함유한 입자 중에서 이 섬유에 잡힌 입자 수로 나타낸 것이다. 만약 필터 섬유들의 부피 L, 한 섬유의 포집효율을 E_s라고 하면 에어로졸의 투과율 P는 다음과 같다.

$$P = \exp(-E_s L h d_f) \qquad (2)$$

3.1. 기계적인 포집

포집은 입자와 그와 접하는 섬유의 특성에 따라 구분된다. Fig. 2와 같이 한 입자가 공기와 함께 움직이다가 입자의 반경과 동일한 거리 내에서 섬유에 붙잡힐 때 이것을 차단(interception)이라고 한다. 만약에 공기 흐름의 궤적과 관계없이 브라운 운동(Brownian Motion)과 같은 움직임으로 움직이다가 섬유에 잡히는 것을 확산(diffusion)이라고 하며 궤적을 따라 움직이다가 섬유 앞에서 공기의 궤적이 바뀌는 순간 궤적을 이탈하여 관성력에 의해 그대로 섬유에 달라 붙는 것을 충돌(impaction)이라고 한다. 크고 무거운 입자일수록 충돌과 차단에 의한 포집이 잘되며 작고 가벼울수록 입자일수록 확산에 의한 포집이 잘 이루어진다. 충돌과 차단도 잘 이루어지지 않고 확산도 잘

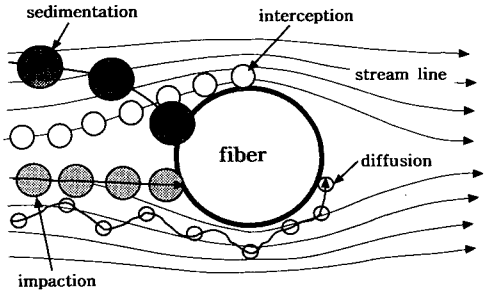

Fig. 2. Non-absolute filtration mechanism by a fibrous filter.

이루어지지 않아 필터에 대한 투과가 잘되는 입자크기는 1.0 ㎛이하에서 0.04 ㎛이상인 것으로 밝혀졌으며[7] 그 후 더 많은 연구에 의하여 투과가 가장 잘되는 입자의 직경은 0.3 ㎛로 알려졌다.[8]

3.1.1. 단순 직물필터 패드

대부분의 단순 직물필터 패드의 섬유 직경은 20 ㎛로 대략 일정하다. 공기의 유속(cm/sec)에서 에어로졸의 투과율은 Fig. 3의 그래프 1과 같다.[9] 이 같은 결과는 차단과 충돌에 의한 포집으로 설명된다. 이 상황에서 한 섬유에 의한 포집효율 Es는 입자의 직경 d_p을 섬유의 직경 d_f로 나눈 제곱으로 나타낼 수 있다.

$$Es \sim \left(\frac{d_p}{d_f}\right)^2 \qquad (3)$$

식 (3)에서 큰 입자에 대한 포집효율은 상당하다고

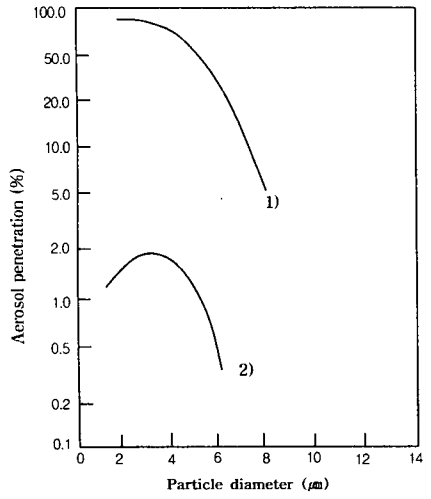

Fig. 3. 1) Penetration of aerosols through a simple mechanical filters.
2) Penetration of aerosols through an electrically charged filter of the same geometry.

할 수 있으나 섬유보다 작은 입자에 대한 포집효율은 낮아서 호흡성분진에 대한 보호정도는 제한적이라고 할 수 있다.

3.1.2. 미세 섬유필터

식 (3)에서 d_f가 감소하면 포집효율은 상당히 증가하며 극미세의 유리섬유을 사용하였을 경우에는 더 명백해진다. 입자가 극히 작은 경우 차단과 충돌에 의한 포집효율은 낮아지고 확산에 의한 효율은 증가한다. 이것은 Kirsch와 Fuchs는[10] 다음과 같이 표현하였다.

$$Es \simeq 2.7\left(\frac{D}{Ud_f}\right)^{2/3} \qquad (4)$$

여기서 D는 확산계수로 입자크기가 감소하면 급격히 증가한다. 포집효율의 작동기전 즉, 확산과 차단 및 충돌에서 입자 크기가 증가하면 차단 및 충돌에 의한 효율은 커지지만 반대로 확산에 의한 포집효율은 감소하게 되는데 여기에는 입자의 직경이 관여하게 된다. 가장 투과가 잘되는 입자의 크기는 1.0 ㎛이하에서 0.04 ㎛이상인 것으로 밝혀졌으며[7], 특히 입경 0.3 ㎛인 입자의 투과가 가장 잘되어 포집하기 어려운 것으로 알려졌다.[8] 식 (4)에서 보듯이 유속이 증가하면서 효율은 떨어지기 때문에 1998년부터 미국에서는 최악의 포집효율 조건을 방진마스크 검정실험에 적용하여 유속 85±4 L/min, 입경은 약 0.3 ㎛인 에어로졸을 사용하도록 하였다.[11]

미세입자에 의한 필터의 최대 단점은 식 (1)에서 보는 바와 같이 유속에 따른 높은 압력강하이다. 필터에 주름을 주어 표면적을 높여 필터의 유속을 줄이면 어느 정도 압력강하를 줄일 수 있다.

3.2. 정전기력

압력강하를 없애면서 포집효율을 높이는 방법은 전하를 띤 섬유를 사용하는 것이다. 사업장에서 생성되는 상당량의 입자들은 전하를 띠게 된다. 전기력을 띤 섬유 필터의 포집효율은 Fig. 3의 그래프 2가 잘 나타내 주고 있다.

정전기력에 의한 포집 즉, 전하를 띤 섬유질에 전하를 띤 입자의 포집에 관하여 많은 연구가 이루어졌다.[6,12~15] 입자의 섬유에 대한 쿨롱 인력은 차원이 없는 parameter N_{Qq}에 영향을 받는다.[6]

$$Es \sim N_{Qq} = \frac{Qq}{3\pi^2 \eta d_p d_f U \varepsilon_0} \qquad (5)$$

여기서 q는 입자가 지닌 전하, Q는 섬유의 단위 길

이 당 전하 그리고 ε_0는 섬유간 간격이다. 전하간 극력(polarization forces)에 의한 포집은 다시 차원이 없는 parameter N_{Q0}로 표현된다.

$$E_s \sim N_{q0} = \left(\frac{K-1}{K+2}\right) \frac{Q^2 d_p^2}{3\pi^2 \eta d_f^3 U \varepsilon_0} \quad (6)$$

여기서 K는 입자 물질의 탈극 constant이다. 불행히도 섬유의 전하는 쉽게 측정되지 않으며 섬유에서 전하의 분포도 일반적으로 일정하지가 않다. 그렇지만 어떠한 전하 형태가 발생하든 비록 한 섬유에 의한 포집효율 계산이 간단하지는 않아도 식 (5), (6)의 오른쪽 항에 있는 차원이 없는 parameter가 존재한다. 이 같은 제한점에도 불구하고 차원이 없는 parameter는 포집효율이 입자의 직경, 전하 및 유속 같은 parameter에 따라 어떻게 변하는지를 분명하게 보여주고 있다.

정전기력을 이용한 필터는 낮은 압력강하에 높은 포집효율을 가지고 있어 사업장에서 폭넓게 사용되고 있으나 이 필터의 최대 단점을 oil mist나 습기에 정전기력이 약해진다는 점이다.[4] 이 같은 점을 고려하여 미국에서는 1998년부터 방진 마스크 필터의 검정규격을 새로 개정하여 N-type은 oil mist가 있는 작업장에서는 사용하지 못하며 R-과 P-type만 사용하도록 하였다.[11] 또 구입한 후 포장용기를 제거하였을 때 사용하지 않더라도 시간경과에 따라 포집효율이 저하되는데 이는 기계식 필터와는 달리 압력강하를 유발하지 않은 상태에서 포집효율이 저하되기 때문에 사용할 때 이 점에 주의해야 한다.[16]

4. 포집효율과 압력강하에 대한 평가

앞에서도 언급하였듯이 좋은 방진 마스크 필터의 조건은 낮은 투과율 즉, 높은 포집효율과 낮은 압력강하의 특성을 지니고 있어야 한다.[17] 일반적으로 방진 마스크 필터의 질을 평가할 때 양질계수(q_F)를 사용하는데 이는 필터의 성능을 투과율과 압력강하로 표현한 것으로 다음과 같이 나타낸다.

$$q_F = \frac{\ln\left(\frac{1}{P}\right)}{\Delta p}$$

여기서, P : 에어로졸 투과율, %

Δp : 압력강하(흡기저항),

mmH_2O 혹은 cmH_2O

위 식에서 표현된 것과 같이 양질계수가 커지기 위해서는 에어로졸의 투과율과 압력강하가 동시에 낮아야만 한다. 같은 부류의 방진 마스크 필터를 비교할 때 양질계수가 높을수록 우수한 성능을 가지고 있다고 할 수 있기 때문에 최근에서는 양질계수를 이미 개발된 필터의 성능을 점검하거나 새로운 필터를 개발하는 데 활용한다.[18,19] 국내에서도 양질계수를 이용하여 방진마스크를 평가하였다.[20] Fig. 4는 국내에서 시판되는 1/4형 방진마스크 필터에 대해 유속에 따라 양질계수를 비교한 것이다. 기계식 필터인 경우 필터 S(국산)가 필터 K보다 우수하였고 안면부 여과식의 경우에는 필터 M(미국산), 필터 C(국산) 그리고 필터 S(중국산) 순이었다. 특히, 안면부 여과식 필터 M은 기계식 필터 K보다도 모든 유속에서 우수한 것으로 나타났다.

한편, 미국의 경우 최근 바뀐 검정규격에 따라 방진 마스크 필터의 포집효율과 압력강하 실험자료를[21] 가지고 양질계수를 산출하여 한국의 그것과 비교하여 보았다. 미국의 검정규격은 유량이 85 Lpm에서 실시하기 때문에 오직 이 유량에서만 국내 것과 비교하였으며 필터의 종류도 미국의 등급 중에서 가장 저급인 N95 정전기식 필터를 국내 것과 비교하여 보았다. 미국산 필터의 양질계수는 0.0257~0.0667(1/cmH_2O)로 국내산 S의 0.0070, 중국산 0.0080보다 훨씬 우수하였으며 검정규격이 바뀌기 전 미국산 M의 0.0114보다도 품질이 훨씬 향상되었음을 알 수 있었다.

따라서 국내에서도 보다 좋은 방진마스크 필터의

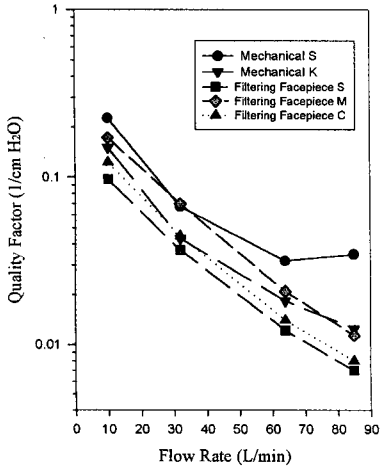

Fig. 4. Quality factors of respirators with flow rates.

개발이 시급한 실정이다.

5. 누설현상

오염물질 제거기능이 뛰어난 고효율의 필터나 카트리지를 가진 호흡기보호구를 착용하였다고 하더라도 얼굴 피부와 호흡기보호구의 안면부가 적합하게 밀착되지 않으면 호흡으로 인한 압력으로 오염물질이 마스크 안으로 침투하게 되는데 이것을 보호구와 피부간 누설현상(faceseal leakage)이라고 하며 심할 경우 마스크를 착용하고도 작업자는 심각한 정도의 오염물질을 흡입하게된다. 밀착도 검사(fit test)란 착용자의 얼굴피부와 마스크가 얼마나 적합하게 밀착되는지 그 정도를 측정하는 것으로 그 목적은 작업자가 작업장에 들어가기 전 누설정도를 최소화시키고 어떤 형태의 마스크가 작업자에게 가장 적합한지 마스크를 선택하는데 도움을 주어 작업자의 건강을 보호하기 위함이다.[22] 현재 미국, 캐나다, 호주 그리고 뉴질랜드에서는 밀착도 검사가 제도화되어 사용되고 있다.[23]

밀착도 검사는 호흡기보호구안의 에어로졸은 100% 보호구와 피부 사이로 침투한 것으로 간주하는 반면 이와 비슷한 개념의 TIL(total inward leakage)은 보호구 안의 에어로졸은 faceseal leakage 뿐만 아니라 필터, 밸브 등으로 침투한 것으로 간주하는데 유럽에서는 이를 누설현상으로 인정한다.[24] 국내에서는 밀착도 검사에 관한 법적인 규제는 하고 있지 않으나 2000년 7월 1일부터 새로 개정된 호흡기보호구 검정규격실험에 유럽과 같은 안면부 누설율 실험을 실시하여 실험을 통과한 마스크만 판매를 허가하고 있다.[25]

밀착도 검사를 통하여 밀착정도를 밀착계수(FF:fit factor)로 나타낼 수 있는데 이는 호흡기보호구의 안과 밖에서 그 농도를 측정하여 비(ratio)로 나타낸 것이다.[4]

$$\text{Fit Factor} = C_o / C_i$$

C_o:호흡기보호구 밖의 aerosol 농도
C_i:호흡기보호구 안의 aerosol 농도

따라서 밀착계수 값은 높을수록 얼굴 피부와 보호구간의 밀착정도가 우수하다고 할 수 있다. 밀착계수는 착용자의 얼굴에 알맞은 즉, 밀착정도가 좋은 호흡기보호구의 안면부를 개발하는데 활용되어 왔다. 1982년에 이미 미국에서는 얼굴체형과 밀착정도의 관계를 규명하기 위한 연구가 시작되었다.[26] 최근에는 밀착정도에 영향을 주는 얼굴 사이즈 parameter가 명확하게 규명되지 않아[27,28] 대부분의 착용자 얼굴에 알맞은 마스크의 개발은 쉽지 않으며 결국 착용자의 얼굴에 알맞은 마스크 선정은 밀착도 검사를 통해야만 된다는 것을 시사하고 있다.

한편, 불행히도 대부분의 국내산 호흡기보호구가 외국산 호흡기보호구보다 밀착계수가 낮아 오히려 국산 마스크가 한국인의 얼굴에 더 잘 맞지 않는 것으로 밝혀졌다.[29~32]

Fig. 5에서 국산 전면형 마스크의 S와 C는 미국산 마스크 M과 N에 비하여 밀착계수가 현저히 낮음을 알 수 있다.[30] 또 반면형 마스크에서도 미국산 마스크인 M과 N이 기타 국산 마스크보다 밀착계수가 현저히 높을 뿐만 아니라 미국산 반면형 마스크 M과 N인 전면형의 국산 S와 C 보다 밀착계수가 높은 것을 알 수 있다. 따라서 하루속히 한국인의 얼굴에 알맞은 호흡기보호구의 개발이 시급하며 더 나아가 국내에서도 외국과 같이 밀착도 검사의 법적인 제도화가 필요하다고 사료된다.

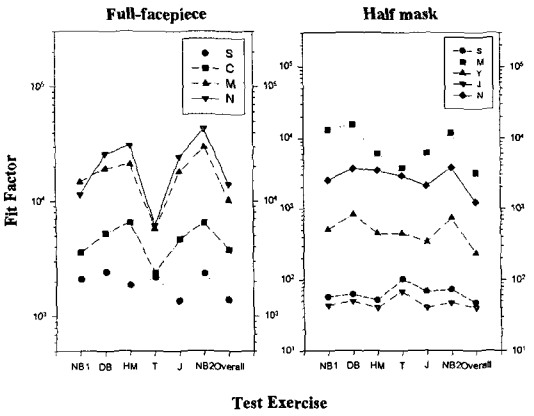

Fig. 5. Geometric mean values of fit factors of respirators.

II. 결 론

작업장에서 발생하는 각종 유해한 에어로졸을 방진마스크 필터를 이용하여 제거하기 위해서는 우선, 에어로졸의 특성을 알아야 하며 두 번째는 방진마스크 필터의 특성을 알아야 한다. 방진마스크 필터는 크게 기계식 필터와 정전기 필터로 나눈다. 좋은 필터의 조건은 낮은 압력강하와 높은 포집효율을 갖고 있어야 한다. 정전기 필터는 좋은 필터조건을 가지고 있으나 습기와 oil mist에 약하기 때문에 사용 시 유의하여야 한다. 포집효율이 좋고 압력강하가 낮으면 양질계수는 커지게 되는데 최근 검정규격에 의해 합격한 미

국의 필터는 국내 및 중국산 필터는 물론 미국의 이전 검정규격에 합격한 필터보다도 훨씬 높은 양질계수를 가지고 있었다. 얼굴의 피부와 마스크가 잘 맞지 않으면 누설현상으로 오염물질이 침투하기 때문에 이에 대한 대비가 필요하다. 밀착도 검사나 TIL 방법을 이용하여 자신에 맞는 마스크를 선별해야 한다. 국산 마스크가 미국산 마스크보다 한국인 얼굴에 잘 맞지 않는 것으로 밝혀져 한국인의 얼굴에 잘 맞는 마스크의 개발이 시급하다.

참고문헌

1) Willeke, K. and Baron, P.A. : Aerosol Measurement. New York, Van Nostrand Reinhold, p8-22, 1993.
2) DiNardi, S.R. (eds) : The Occupational environments-Its evaluation and controls. AIHA press, Fairfax, p975-1000, 1997.
3) Plog, B.A., Niland, J. and Quinlan, P.J. (eds) : Fundamentals of industrial Hygiene. National safety Council, Itasca, p619-654, 1996.
4) National Institute for Occupational safety and Health (NIOSH) : NIOSH guide to industrial respiratory protection, DHHS No. 87-116. Cincinnati, p13-27, 1987.
5) Davies, C.N. : Filtration of aerosols. Journal of Aerosols Science, **14**, 147-161, 1983.
6) Brown, R.C. : Air Filtration-An integrated approach to the theory and application of fibrous filters. Oxford, UK : Pergamon, 1993.
7) Sinclair, D. : Penetration of HEPA filters by submicron aerosols. Journal of Aerosol Science, **7**, 175-179, 1976.
8) Lee, K.W. and Liu, B.Y.H. : On the minimum efficiency and the most penetrating particle size for fibrous filters. Journal of Air Pollution Control Association, **30(4)**, 377-381, 1980.
9) Brown, R.C. : Protection against dust by respirator. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, **1(1)**, 14-28, 1995.
10) Kirsh, A.A. and Fuchs, N.A. : Studies on fibrous aerosol filters-III. Diffusional deposition of aerosol in fibrous filters. Annals of Occupational Hygiene, **11**, 299-304, 1968.
11) National Institute for Occupational safety and Health (NIOSH) : NIOSH Guide to the selection and use of particulate respirators(certified under 42 CFR 84), p6, Cincinnati, NIOSH, 1996.
12) Lathrache, P., Fissan, H.J. and Neumann, S. : Deposition of submicron particles on electrically charged fibers, Journal of Aerosol Science, **17(3)**, 446-449, 1986.
13) Pich, J., Emi, H. and Kanaoka, C. : Coulomic deposition mechanism in electret filters, Journal of Aerosol Science, **18(1)**, 29-35, 1987.
14) Liebhaber, F.B., Juozaitis, A., Willeke, K., Baron, P., Talaska, G. and Chen, C.-C. : Technique for assessing the electrical charge levels of aerosols, American Industrial Hygiene Association Journal, **55(7)**, 610-618, 1994.
15) Chen, C.-C., Huang, S.-H. : The effects of particle charge on the performance of a filtering facepiece, American Industrial Hygiene Association Journal, **59(4)**, 227-233, 1998.
16) Moyer, E.S. and Bergman M.S. : Electrostatic N-95 respirator filter media efficiency degradation resulting from intermittent sodium chloride aerosol exposure, Applied Occupational and Environmental Hygiene, **15(8)**, 600-608, 2000.
17) Revoir, W.H. and Bien, C.-C. : Respiratory protection handbook. New York : Lewis Publishers, p51-56, 1997.
18) Chen, C.C., Lehtim ki, M. and Willeke, K. : Aerosol penetration through filtering facepieces and respirator cartridges. American Industrial Hygiene Association Journal, **53(9)**, 566-574, 1992.
19) Chen, C.C., Lehtim ki, M. and Willeke, K. : Loading and filtration characteristics of filtering facepieces. American Industrial Hygiene Association Journal, **54(2)**, 51-60, 1993.
20) Han, D.-H. : Performance of respirator filters using quality factor in Korea. Industrial Health, **38**, 380-384, 2000.
21) Martin, S.B. and Moyer, E.S. : Electrostatic respirator filter media : filter efficiency and most penetrating particle size effects, Applied Occupational and Environmental Hygiene, **15(8)**, 609-617, 2000.
22) Colton, C.E., Birkner, L.R. and Brosseau, L.M.

(eds) : Respiratory Protection-A Manual and Guideline, 2nd ed., Akron, AIHA, p81-88, 1991.

23) Han, D.-H., Willeke, H., Colton, C.E. : Quantitative fit testing techniques and regulations for tight-fitting respirators-Current methods measuring aerosol or air leakage, and new developments, American Industrial Hygiene Association Journal, **58(3)**, 219-228, 1997.

24) European Standards : EN 136 and 140 Respiratory Protective Devices;Full-face masks, half-masks, quarter-masks;requirements, testing, marking, Brussels, Belgium : European Committee for Standardization, 1989.

25) 노동부 (2000). 방진마스크 검정규격, 노동부 고시 2000-15 (2000. 5. 8).

26) Liau, Y.-H., Bhattacharya, A., Ayer, H. and Miller, C. : Determination of critical anthropometric parameters for design of respirators, American Industrial Hygiene Association Journal, **43(12)**, 897-899, 1982.

27) Oestenstad, R.K. and Perkins, L.L. : An assessment of critical anthropometric dimensions for predicting the fit of a half-mask respirator, American Industrial Hygiene Association Journal, **53(10)**, 639-644, 1992.

28) Brazile, W.J., Buchan, R.M., Sandfort, D.R., Melvin, W., Johnson, J.A. and Charney, M. : Respirator fit and facial dimensions of two minority group, Applied Occupational and Environmental Hygiene, **13(4)**, 233-237, 1998.

29) 박은주, 김현욱 : 반면형 방진 마스크의 밀착도 계수에 영향을 미치는 요인, 한국의 산업의학, **34(4)**, 133-143, 1995.

30) 한돈희, 나명채, 이상곤 : 호흡기보호구에 대한 Saccharin QLFT와 CNC QNFT간 상관성에 관한 연구, 한국산업위생학회지, **7(1)**, 99-112, 1997.

31) 한돈희 : 호흡기보호구의 밀착계수와 안면구조의 관계, 예방의학회지, **31(3)**, 440-448, 1998.

32) Han, D.-H. : Fit factors for quarter masks and facial size categories, Annals of Occupational Hygiene, **44(3)**, 227-234, 2000.