

방진 마스크 필터 교체와 성능 변화의 상관성 조사

이현웅¹ · 박지훈² · 윤충식^{2*}

¹한국쓰리엠, ²서울대학교 보건대학원 환경보건학과, 보건환경연구소

Evaluation of the Relationship between Filter Replacement and Filter Performance Change in Particulate Respirators

Heonyung Lee¹ · Jihoon Park² · Chungsik Yoon^{2*}

¹3M Korea Company

²Department of Environmental Health Sciences, Institute of Health and Environment,
Graduate School of Public Health, Seoul National University

ABSTRACT

Objectives: This study aimed to evaluate the relationship between filter replacement and filter performance change in particulate filters used in the workplace.

Methods: Three types of particulate respirator filters are mainly used in the workplaces. These were tested against the filter performance safety certification standard for dust masks established by the Ministry of Employment and Labor(MoEL). Used filters were collected to test their performance, such as filter pressure drop, efficiency, and quality factors. All these factors were evaluated by a filter tester. To compare filter performance between used and new ones, the same kinds of new filters were also tested together under the same procedures.

Results: A total of 270 used filters were collected for testing. The main reasons to replace the filters were difficulty in breathing(46.2%), dirty/odor influx(19.7%), and a combination of factors(26.7%). The pressure drop for two special class groups was significantly different(new filters: 20.72 ± 3.33 mmH₂O; used filters: 24.70 ± 5.26 mmH₂O, $p < 0.0001$). In the case of penetration, new filter groups indicated $0.0032 \pm 0.0040\%$, while that of the used filters was $0.0596 \pm 0.1187\%$. The quality factor for the used filters(0.34 ± 0.09) significantly decreased compared to the new filters(0.53 ± 0.08) ($p < 0.0001$).

Conclusions: Filter performance including pressure drop, penetration, and the quality factor was evaluated and compared between new and used filters in the workplace. The results showed that general filter performance deteriorated more for change of pressure drop, penetration and the quality factor.

Key words: breathing resistance, filter replacement, respiratory inhalation resistance, pressure drop

I. 서 론

보호구는 크게 호흡 보호구, 눈과 청각 보호구 그리고 전신 보호구로 나눌 수 있다. 보호구를 착용하는데 있어서 사업자나 착용자가 가장 관심 있어 하는 부분은 착용하는 보호구를 언제까지 계속 착용해

도 안전에 문제가 없는지 하는 수명 관련 부분이라 할 수 있으며, 이에 가장 민감한 보호구가 호흡 보호구이다. 또한 산업안전보건기준에 관한 규칙에서 사업주는 근로자가 허가대상 유해물질을 제조하거나 사용하는 작업을 하는 경우에 근로자의 호흡기를 보호하기 위하여 개인전용의 방진마스크나 방독마스크

*Corresponding author: Chungsik Yoon, Tel: 02-880-2734, E-mail: csyoon@snu.ac.kr

Department of Environmental Health Sciences, Institute of Health and Environment, Graduate School of Public Health, Seoul National University, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Republic of Korea

Received: September 13, 2017, Revised: December 18, 2017, Accepted: December 20, 2017

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.

등을 지급하여 착용하도록 하고 있으며, 마스크를 보관할 수 있는 보관함을 지급해야 하고, 근로자 역시 지급된 방진/방독마스크 등을 사업주의 지시에 따라 착용하여야 한다고 규정하고 있다.

호흡 보호구는 위에서 언급한 바와 같이 유해 가스가 증기를 막아주는 방독마스크와 먼지, 용접 흠을 막아주는 방진 마스크로 구분할 수 있다. 호흡 보호구에 사용 되는 소모품으로는 정화통과 필터가 있는데, 소모품의 수명이 다 되었다고 주관적으로 판단될 시점에 교체가 이루어진다. 이 때 소모품 수명이 다 되었다고 교체되는 기준에 대해 많은 사업장에서 안전과 비용 관련하여 많은 관심이 있는 상황이다.

방독 마스크에서 사용되는 정화통의 경우 주기적으로 교체하거나 유입되었을 때 가스 상 유해물질을 흡착해주는 활성탄의 수명이 다 되었다고 판단하여 교체가 이루어지고 있다. 이러한 정화통 수명 측정 관련해서는 튜브를 이용한 정화통 수명 측정(Cohen et al., 1989)방법과 현재까지 현장 적용에는 한계가 있으나 활성탄 파괴(breakthrough) 시험을 통한 수명 측정 소프트웨어를 이용할 수 있다(Han & Lee, 2008; Han et al., 2009). 방진 마스크의 경우, 착용자 폐의 힘과 호흡에 의해 면체(facepiece) 또는 흡기면을 통해 흡입된 분진 함유 공기를 필터에 통과 할 때에 관성충돌, 직접 차단, 확산 그리고 정전기 등의 여과 기전에 의해 먼지가 제거된다(Byun et al., 1990). 필터에 포집 된 먼지는 필터의 압력 강하(pressure drop)를 촉진시키는데(Nelson et al., 2000; Janssen et al., 2005), 압력 강하의 증가는 호흡 압력 증가와 함께 배기 대비 흡입 비율을 증가시켜 개인 차는 있으나, 신체적으로 흡입에 어려움을 겪게 된다(Lerman et al., 1983; Harber et al., 1988; Caretti & Whitley, 1998; Caretti et al., 2006).

활성탄이 접촉된 필터 층을 가진 필터는 일정시간 사용 후에는 냄새를 제거해 주는 활성탄 기능이 저하

될 수 있다. 또한 재고용으로 보관 중인 필터 수명에 대한 연구(Viscusi et al., 2009)는 있었으나, 방진마스크 필터가 교체되는 원인으로 판단되는 냄새, 더러움 그리고 숨쉬기가 어려울 경우 등 여러 요인들에 대해서는 주로 어떠한 이유로 그리고 어느 정도 수준에서 버려지는지에 대한 구체적인 연구가 부족하다. 따라서 본 연구에서는 입자상 물질 발생 사업장에서 많이 사용되고 있는 일부 방진마스크를 대상으로 교체된 방진 필터의 압력 강하와 투과율(penetration, P), 품질 계수(quality Factor, QF) 분석을 통해 필터 성능 변화가 어떻게 이루어지는지 평가하고, 필터의 교체 수명과의 연관성을 파악하고자 하였다.

II. 방 법

1. 대상 마스크 필터

본 연구에서는 일반 산업현장에서 광범위하게 사용되는 세 종류의 필터를 선정하였다. 대상 필터의 등급은 KOSHA(Korea Occupational Safety and Health Agency) 인증에 의해 특급(special class level)과 1급(first class Level) 마스크로 구분할 수 있으며, 이 중 두 종류는 P95/P100 Level로 NIOSH(National Institute of Occupational Health and Safety) 인증(NOISH 42 CFR Part 84)도 함께 받은 필터이다. 안전보건공단의 보호구 의무안전인증 고시에 따르면 특급 필터의 경우 베릴륨과 같이 독성이 강한 물질들을 함유한 분진 발생 장소나 석면 취급장소에서 사용되고, 1급 필터의 경우 금속흄 등과 같이 열적으로 생기는 분진 발생이나 기계적으로 생기는 분진 발생장소에서 사용되며, 2급 필터의 경우 특급과 1급 마스크 착용 장소를 제외한 분진 발생 장소에서 사용된다고 명시되어 있다. 각 등급은 안면부 호흡 저항, 필터의 분진 투과율 및 호흡 저항을 포함한 여러 항목에 대해 성능 기

Table 1. Filter type and the number of samples tested in this study

Product	No. of sample	KOSHA Class	Approval	Facepiece
A(Used)	209	Special class	KOSHA/NIOSH	Half/ Full
A(New)	38	Special class	KOSHA/NIOSH	Half/ Full
B(Used)	22	First class	KOSHA/NIOSH	Half/ Full
B(New)	56	First class	KOSHA/NIOSH	Half/ Full
C(Used)	39	Special class	KOSHA	Half/ Full
C(New)	12	Special class	KOSHA	Half/ Full

Table 2. The basic information on the collected filters in this study

Company	Place	Industry	Main process	Particle type	Tested filter	No. of sample
D	Siheung	Smelting&Chemical	Smelting	Mechanical particle	A	90
S	Ulsan	Ship building	Welding	Fume	A, C	55
L	Geojae	Ship building	Welding	Fume	A	40
SS	Sacheon	Ship building	Welding	Fume	A	40
Y	Gimhae	Ship building	Welding	Fume	B	22
B	Sacheon	Ship building	Welding	Fume	A	15
T	Sacheon	Ship building	Welding	Fume	A	4
M	Geojae	Ship building	Welding	Fume	A	4

준에 따라 평가 후 인증이 이루어진다.

세 종류 필터 모두 납작한 원형 형태이며, 흡입구가 2개로 구성된 양구형 면체 마스크 필터로 사용되고 있다. 또한 작업상 발생 할 수 있는 가스 상 유해 물질의 유입을 방지하기 위해 세 종류 필터 모두 카본이 함유된 필터 층을 포함하고 있으며 면 체는 반면형 및 전면형으로 사용될 수 있다(Table 1).

필터는 사용 전 후의 필터 성능 변화 분석을 위해 필터를 사용하는 작업장을 선정, 방문하여 수거하였다. 작업장에서 수거된 필터의 경우 각 작업장의 작업 특성에 따라 필터 교환이 이루어 질 수 있으므로 한 곳의 사업장이 아닌 여러 사업장에서 필터를 수거하였으며 부산, 울산 그리고 경기도 시흥에 위치한 사업장 8곳(Table 2)을 방문하였다. 방문한 사업장에서는 필터의 추가 오염을 방지하기 위해 작업자들에게 지퍼 백을 제공하여 필터 사용 후 교체 시 사용된 필터를 넣어 지정된 장소에 모으도록 요청한 후 필터를 수거하였다. 또한 필터가 버려진 이유를 파악하기 위해 버려진 각 필터가 어떠한 이유로 버려졌는지(더러움, 주기적, 숨쉬기, 기타 등) 지퍼 백에 부착된 스티커에 명기하도록 하였다.

2. 필터 시험 방법

사용된 필터와 동시에 성능 비교를 위해 동일 종류의 새 필터를 동일한 방법에 의해 평가를 실시하였다. 새 필터와 사용 후 수거된 모든 필터의 성능 평가는 NIOSH 기준에 따른 투과율 및 안면부 흡기 저항 시험방법을 채택하였다. 필터의 성능 평가를 위해 본 연구에서는 염화 나트륨(sodium chloride, NaCl)을 선정하여 고체 입자 포집을 가정한 평가를 실시하였다(Louhevaara et al., 1985; Cho et al., 2011). 필

Table 3. TSI(AFT 8130) test condition for Filter performance test

Instrument	Experimental conditions
TSI (AFT 8130)	Aerosol: Sodium chloride
	Concentration : 23.5 mg/m ³
	Mass mean diameter: 0.26 μm
	Airflow : 42.5 L/min
	Technique : Electronic pressure transducer
	Pressure measure
	- Range : 0 to 15 cmH ₂ O
	- Accuracy : 2% of full scale

터의 압력 강하 및 침착율을 평가하기 위해 분진 발생기를 장착한 TSI 8130 Automatic Filter Tester (AFT) 장비를 사용하였으며, 평균 입경이 0.2 μm인 2% NaCl을 이용하여 42.5 L/min의 연속 유량으로 통과시켰을 때의 필터 통과 전후 압력 차이와 NaCl 농도를 측정하였다(Table 3).

TSI 8130 AFT 장비는 광산란 방식으로 마스크 외부(upstream)와 내부(downstream)의 입자 농도를 측정하며, 이를 이용하여 다음과 같은 계산식으로 필터의 분진 투과율을 산정하였다.

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

P: 필터의 투과율(%)

C₁: 필터 통과 전의 NaCl 농도(mg/m³)

C₂: 필터 통과 후의 NaCl 농도(mg/m³)

일반적으로 투과율이 좋은 필터의 경우 필터 내부의 섬유 밀도가 조밀하고 공기 흐름이나 공극이 감소하여 이에 따른 압력 강하가 증가할 수 있다. 반대

로 압력 강하가 낮아 상대적으로 호흡하기 편한 필터의 경우 투과율이 떨어질 수 있기 때문에 투과율이나 압력 강하 값 중 한 가지 척도에 의해 판단하기 어려우므로 두 항목을 이용하여 다음과 같이 품질 계수를 계산하였다(Hinds, 1999; Hanet et al., 2000; Eninger et al., 2008).

$$QF = \frac{\ln \frac{1}{P}}{\Delta P}$$

P: Penetration at a given time

ΔP: Pressure drop at the corresponding penetration point

위 계산식에서 유추해 볼 수 있듯이, 성능이 좋은 마스크 필터는 압력 강하가 낮은 동시에 분진의 포집 효율이 높은 것이라고 할 수 있으며(Chen et al., 1992), 따라서 품질 계수 값이 높을수록 필터의 성능과 비례한다고 할 수 있다.

3. 자료처리

새 필터와 각 요인 별로 수거, 분류된 필터 간의 압력 강하와 투과율 값의 유의성 검증을 통해 필터 성능과 교체 요인과의 상관 관계를 평가하고, 필터 성능 변화와 필터 교체(수명)과의 관계를 분석하였다. 자료 분석은 Minitab®(Minitab Inc., USA) 프로그램을 이용하였고, 제품별 그리고 사용 전후의 필터 성능 차이 비교를 위해 T-검정과 분산분석(analysis of variation, ANOVA)을 실시하였다.

III. 결 과

1. 필터 교체 원인 조사 결과

수거된 270개의 필터를 가지고 버려진 이유에 대해 조사한 결과, 약 125개(46.2%)가 호흡이 불편하여 교체되었고, 외관상 더러움 때문에 교체한 필터가 28개(10.4%)였다. 또한 냄새 유입으로 인한 이유가 25개(9.3%)로 파악되었고, 복합적인 이유(숨쉬기, 냄새, 더러움 등 2가지 이상)로 인해 교체된 필터가 72개(26.7%)를 차지하였으며, 나머지는 정기적인 교체 등 기타로 분류되었다. 특히, 복합적인 이유로 버려진 필터 중에서도 호흡이 불편하여 교체하였다는 필터 수가 총 72개 샘플 중 54개(75%)가 포함되어 있어

Table 4. Survey results on the reasons for filter replacement

Filter replace reason	Hard breath	Odor	Dirt	Complex	Etc.	Total
No. of sample(N)	125	25	28	72	20	270
Ratio(%)	46.2	9.3	10.4	26.7	7.4	100.0

호흡의 불편함에 의한 요인이 상대적으로 크게 작용하는 것으로 조사되었다(Table 4).

2. 사용된 필터의 압력 강하 성능 변화

수거된 세 종류의 필터에 대해 필터 성능인 필터 압력 강하, 투과율, 품질 계수를 측정한 결과는 Table 5와 같다. 필터의 압력 강하와 관련하여 특급 필터인 A와 C의 새 필터(50개)와 수거된 필터(248개)의 압력 강하 값에 대한 분석을 실시한 결과 새 필터의 평균 압력 강하 값은 20.72±3.33 mmH₂O, 수거된 필터의 평균값은 24.70±5.26 mmH₂O로 값이 증가하는 경향을 보였다($p < 0.0001$)(Figure 1). 추가로 새 필터(50개)와 수거된 필터 중 숨쉬기가 어려워 교체된 필터(114개)의 압력 강하 값에 대한 유의성 여부를 분석한 결과에 따르면, 수거된 필터의 평균값은 24.54±5.96 mmH₂O로, 사용된 전체 필터의 압력 강하 값과 유사하게 증가하는 형태를 보였으며, 새 필터와 유의한 상관 관계를 보였다($p < 0.0001$).

수거된 필터 중에서 숨쉬기가 어려워 버려진 필터(122개)의 압력 강하 값을 종류별로 측정한 결과 각 필터 종류별(A, B, C) 평균값은 각각 26.63±5.47 mmH₂O, 19.62±2.50 mmH₂O, 18.95±2.75 mmH₂O였으며, 각 필터 종류 사이의 압력 강하 값은 서로 유의한 차이를 보였다($p < 0.0001$). 특히, 교체된 필터의 압력 강하 값은 특정 임계치(threshold)가 존재하는 것이 아니라 필터 종류에 상관없이 불규칙 하였다.

A 필터의 경우 사용되지 않은 새 필터(38개)와 교체된 필터(209개) 중 호흡이 불편하여 교체된 필터(83개)만을 선별하여 압력 강하 값을 비교한 결과 새 필터의 평균값이 22.43±1.41 mmH₂O를 보였으며, 두 집단 간에도 유의한 차이가 있었다($p < 0.0001$). 또한 교체된 모든 필터(209개)의 압력 강하 평균값은 25.76±4.92 mmH₂O로, A제품의 새 필터 집단과 유의성 평가 또한 두 집단간 유의성 차이가 있는 것으로 분석되었으며($p < 0.0001$)(Figure 1), 호흡이 불편하여 교체된 필

Table 5. Filter performance result based on pressure drop, penetration and quality factor

Product(Class)	Type	No. of Sample(N)	Pressure drop(mmH ₂ O) Mean±SD	Penetration(%) Mean±SD	Quality factor(1/mmH ₂ O) Mean±SD
A (special class)	New filter	38	22.43±1.41	0.0027±0.0042	0.50±0.06
	Used filter	209	25.76±4.92	0.0628±0.1259	0.32±0.08
	Used filter(hard breath)	83	26.63±5.47	0.0724±0.1650	0.31±0.08
B (first class)	New filter	56	15.13±1.66	0.0634±0.0322	0.50±0.04
	Used filter	22	18.53±2.04	0.1100±0.1258	0.40±0.07
	Used filter(hard breath)	8	19.62±2.50	0.2008±0.1683	0.33±0.06
C (special class)	New filter	12	15.28±0.60	0.0049±0.0025	0.66±0.03
	Used filter	39	19.03±2.76	0.0422±0.0661	0.45±0.09
	Used filter(hard breath)	31	18.95±2.75	0.0290±0.0270	0.46±0.08
A+C (special class)	New filter	50	20.72±3.33	0.0032±0.0040	0.54±0.09
	Used filter	248	24.70±5.26	0.0596±0.1187	0.34±0.09
	Used filter(hard breath)	114	24.54±5.96	0.0606±0.1426	0.35±0.10

터의 압력 강하 평균값은 교체된 전체 필터의 평균 값보다 높았다.

B필터의 경우 사용되지 않은 새 필터(56개 필터)의 압력 강하 평균값을 조사한 결과 15.13±1.66 mmH₂O 였으며, 교체된 필터(22개) 중 호흡이 불편하여 교체된 필터(8개)와 비교했을 때 집단 간 유의한 차이를 보였다($p<0.05$). 또한 버려진 모든 필터(22개)의 압력 강하 평균값이 18.53±2.04 mmH₂O로, A제품 군과 동일하게 새 필터 집단 과도 유의한 차이를 보였다

($p<0.0001$)(Figure 1).

C필터의 경우 사용되지 않은 새 필터(12개 필터)의 압력 강하 평균값은 15.28±0.60 mmH₂O로, 교체된 필터(39개) 중 호흡이 불편하여 교체된 필터(31개)집단 과 유의한 차이를 보였다($p<0.0001$). 또한 교체된 모든 필터(39개)의 압력 강하 평균 값은 19.03±2.76 mmH₂O로 새 필터 집단 과도 유의한 차이를 보였다 ($p<0.0001$)(Figure 1).

한편, 필터 별로 새 필터와 교체된 필터 간 압력 강하 값의 변화를 확인하였으나, 교체된 필터의 압력 강하 값은 특정 임계치가 있는 것이 아니라 필터 종류에 상관없이 불규칙하였다. 따라서, 특정 압력 강하의 변화 값에 따라 작업자들의 필터 교체가 이루어질 수 있다고 판단되어, 이에 대한 분석을 진행하였다. 각 종류 별 교체된 필터(122개)와 새 필터 간 압력 강하 평균 값 차이를 평가한 결과, A, B, C 종류의 새 필터 압력 강하 평균값과 교체된 필터의 평균 값 간의 차이는 각각 4.20 mmH₂O, 4.49 mmH₂O, 그리고 3.67 mmH₂O로 나타났으며(Table 6), 3.50-4.50 mmH₂O의 압력 강하 변화 값에서 필터 교체가 이루어졌다(Figure 2). 또한, 각 필터의 사용 전 초기 압력 강하 값을 기준으로 변화 비율을 보면, 초기 값이 높은 A필터의 경우 18.7%, 상대적으로 값이 낮았던 B와 C필터는 24.0%와 29.7%를 보여 약 15.0-30.0%의 압력 강하 변화가 있을 때 필터를 교체한 것으로 나타났다(Figure 3).

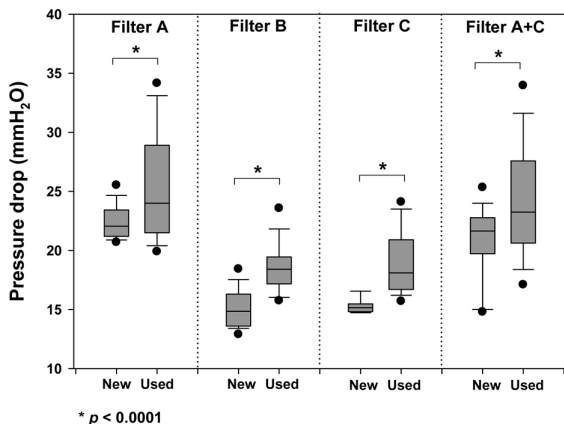
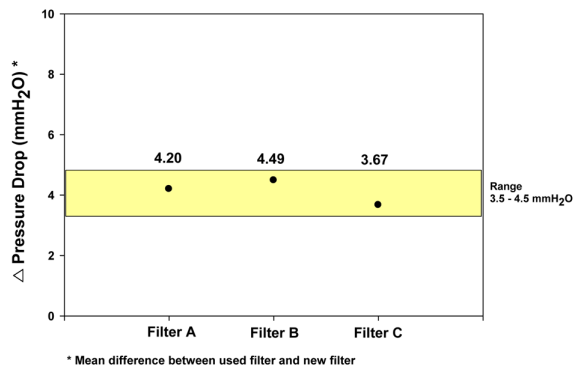
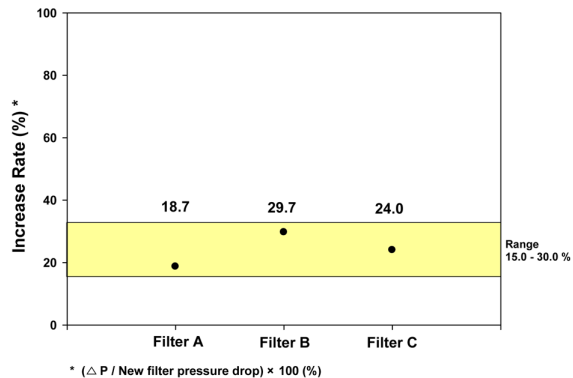


Figure 1. Comparative analysis of Pressure drop between new filter and used filter by product: Values shown are median(line within box), 25th and 75th percentiles(bottom and top of box, respectively), 10th and 90th percentiles(lower and upper bars on whisker, respectively), and outliers(circles)

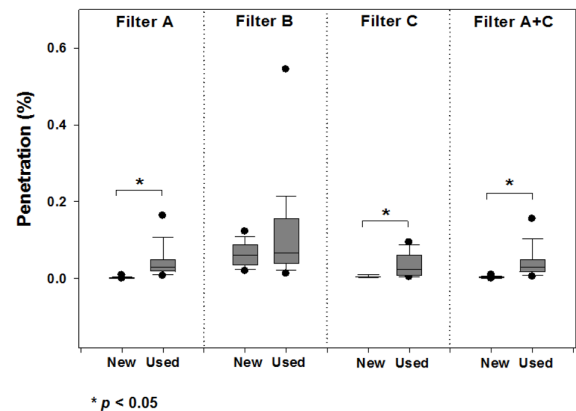
Table 6. Changes in pressure drop values between new filters and used filters (hard breath)

Product	New filter		Used filter(hard breath)		ΔP	Pressure drop increase
	No. of Sample(N)	Pressure drop (mmH ₂ O) Mean \pm SD	No. of Sample(N)	Pressure Drop (mmH ₂ O) Mean \pm SD	Pressure drop (mmH ₂ O) Mean	ΔP / New filter pressure drop (%)
A	38	22.43 \pm 1.41	83	26.63 \pm 5.47	4.20	18.7%
B	56	15.13 \pm 1.66	8	19.62 \pm 2.50	4.49	29.7%
C	12	15.28 \pm 0.60	31	18.95 \pm 2.75	3.67	24.0%

**Figure 2.** Analysis of pressure drop change values between new filters and used filters by product**Figure 3.** Analysis of ΔP / new filter pressure drop between new filters and used filters by product

3. 사용된 필터의 분진 투과율 성능 변화

필터 투과율 평가 결과, 특급 필터인 A와 C의 새 필터(50개)의 경우 평균 투과율이 $0.0032 \pm 0.004\%$, 사용된 필터(248개)의 경우는 $0.0596 \pm 0.1187\%$ 로 증가하였고, 사용 전과 후의 투과율에는 유의한 차이가 있었으나(Figure 3, $p < 0.0001$), 평균값 기준으로만 보았을 때 여전히 평균 99.9% 이상의 초기 투과율을 유지하고 있는 것으로 나타났다.

**Figure 4.** Comparative analysis of Penetration between new filter and used filter and by product: Values shown are median(line within box), 25th and 75th percentiles(bottom and top of box, respectively), 10th and 90thpercentiles (lower and upper bars on whisker, respectively), and outliers (circles)

A필터의 투과율 값은 새 필터군과 교체된 필터군(209개)이 각각 $0.0027 \pm 0.0042\%$ 와 $0.0628 \pm 0.1259\%$ 로 나타났으며($p < 0.0001$), B필터는 새 필터군(56개)과 교체된 필터군(22개)이 각각 $0.0633 \pm 0.0322\%$ 와 $0.1100 \pm 0.1258\%$ 로 두 집단 간에는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다($p > 0.05$). C필터의 경우, 새 필터군(12개)과 교체된 모든 필터군(39개)이 각각 $0.0049 \pm 0.0025\%$ 와 $0.0422 \pm 0.0661\%$ 로 두 집단간 유의한 차이를 보였으며($p < 0.05$), 호흡이 불편하여 교체된 필터군(31개)도 $0.0290 \pm 0.0270\%$ 로 새 필터 군과 차이를 보이는 것으로 나타났다($p < 0.0001$)(Figure 4). 특히, C필터의 경우 사용 전후 필터 성능 비교 결과, 교체된 필터의 압력 강하 값과 투과율 값 모두 변화된 것으로 확인되었다.

4. 품질 계수 분석 결과

새 필터 군과 교체된 필터 군의 품질 계수를 산출

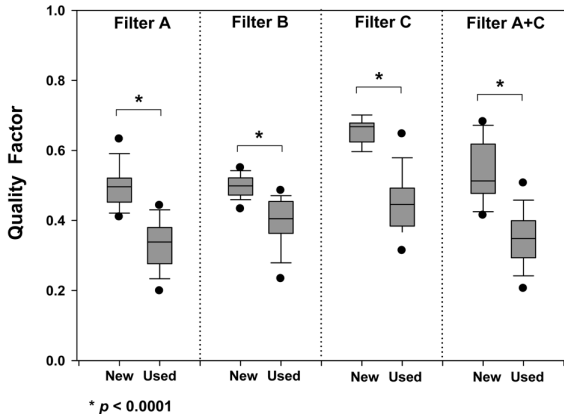


Figure 5. Comparative analysis of Quality Factor between new filter and used filter by product: Values shown are median (line within box), 25th and 75th percentiles (bottom and top of box, respectively), 10th and 90th percentiles (lower and upper bars on whisker, respectively), and outliers (circles)

한 결과, 특급 필터인 A와 C의 새 필터 군(50개)의 평균 값은 0.54 ± 0.09 였으며, 교체된 필터는 0.34 ± 0.09 로 나타났다. 필터를 사용함에 따라 압력 강하와 투과율을 이용하여 필터의 전반적인 성능을 평가할 수 있는 품질 계수를 통해 사용된 필터의 성능이 저하됨을 확인할 수 있었다. 각 제품 종류별로 분석한 품질 계수 결과에 따르면 모든 제품에 있어서 사용 전보다 사용 후의 값이 낮아졌다($p < 0.0001$) (Figure 5). A필터의 경우, 새 필터군(39개)과 교체된 필터군(209개)이 각각 0.50 ± 0.06 과 0.32 ± 0.08 을 보여 사용 전후 필터 성능 비교에 있어 품질 계수의 변화가 있음을 확인하였다($p < 0.0001$). B필터에 있어서도 새 필터군(56개)과 교체된 필터군(22개)이 각각 0.50 ± 0.04 와 0.40 ± 0.07 로 나타났으며($p < 0.0001$), C필터 또한 새 필터군(12개)과 교체된 모든 필터군(39개)이 각각 0.66 ± 0.03 과 0.45 ± 0.09 를 보여 사용 전후 필터 성능의 차이가 있었다.

IV. 고 찰

본 연구에서는 필터 사용 전후의 필터 성능 변화를 평가하고 필터 교체에 대한 원인을 파악하고자 하였다. 연구 결과에 따르면, 필터 압력 강하와 투과율, 품질 계수 값을 이용하여 사용 전후의 성능을 비교한 결과 작업자가 실제 사업장에서 필터를 사용한 후 필터를 교체할 때 필터의 성능의 변화가 있다고 할 수 있다.

각 사업장에서는 여러가지 요인에 의해 많은 방진 필터들이 교체된 후 버려지고 있는데, 설문조사를 통해서 주요원인이 마스크 착용하면서 숨쉬기가 어렵다는 부분임을 확인할 수 있었으며, 더러움과 냄새로 인하여 버려지는 필터도 일부분을 차지하였다. 이는 필터 사용 전 후의 압력 강하 값의 변화를 분석한 결과, 세 종류의 필터 모두 사용 후의 값이 사용 전에 비해 유의하게 상승한 것으로 나타나, 호흡 불편이 필터 교체의 주요 원인임을 나타낸 설문조사 결과와도 일치하였다. 교체된 필터 세 종류의 압력 강하 값을 각각 측정한 결과에 따르면, 각 필터 종류별로 특정 범위를 가지고는 있으나 모든 제품이 어느 특정한 값에서 버려지지 않고 제품별로 상이함을 확인하였으며, 이를 통해 필터 교체를 위한 특정 임계치가 존재하지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 이전 실험실 연구에서 높은 압력 강하가 작업자의 활동을 저하시키는 요인이긴 하나 어느 특정 임계치에 직면하였을 때 활동에 영향을 주는지 명확하지 않다는 연구 결과와도 일치하였다(Johnson et al., 1999).

필터 교체에 영향을 줄 수 있는 압력 강하 변화량을 분석한 결과, A, B, C 필터 각각 $4.20 \text{ mmH}_2\text{O}$, $4.49 \text{ mmH}_2\text{O}$, 그리고 $3.67 \text{ mmH}_2\text{O}$ 를 보였으며, 약 $3.67\text{--}4.50 \text{ mmH}_2\text{O}$ 범위에서 필터 교체가 이루어졌음을 확인할 수 있었다. 또한, 각 필터의 사용 전 초기 압력 강하 값을 기준으로 한 변화율은 초기 값이 높은 A필터의 경우 18.7%, 상대적으로 값이 낮았던 B, C필터는 24.0%와 29.7%로 나타났으며, 이는 18.7%–29.7%의 압력 강하 변화가 있을 때 작업자의 필터 교체가 이루어짐을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통하여 실제 사업장에서 사용되는 필터의 경우 사용 전후 압력 강하 변화 값을 포함한 필터 성능 변화를 추정할 수 있었으며, 마스크 개발과정에서 중요하게 여겨지는 분진 포집 효율 증대와 필터 압력 강하 최소화 에 있어 구체적인 변화 값을 확인함으로써 추후 필터 개발에 긍정적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

V. 결 론

필터 교체에 대한 설문조사에 따르면 사업장에서 방진 필터의 주된 교체 요인은 사용자가 주관적으로 느끼는 호흡 불편이었으며, 더러움과 냄새의 유입도

필터 교체의 주요 원인으로 나타났다. 사업장에서 사용되고 있는 방진 마스크의 사용 전 새 필터와 사용 후 수거된 필터들의 압력 강하와 분진 투과율, 품질 계수의 차이를 분석한 결과, 압력 강하는 증가하고 투과율 및 품질 계수 값은 감소하여 필터 성능 또한 저하된 것으로 나타났다. 특히, 필터의 압력 강하는 모든 필터가 어느 특정 임계치에서 필터 교체가 이루어지지 않았으며, 압력 강하 값의 증가와 초기 저항 대비 상승률은 모든 필터가 동일하지는 않지만 일정 범위 내에서 존재하는 결과를 보였다. 본 연구 결과를 통해 필터 교체가 이루어 질 때까지 필터 성능 변화를 파악함으로써 추후 필터 성능 개선을 위한 자료로 활용 가능할 것으로 기대된다.

References

- Byun IK, Yi YS. An experimental study on the performance of filter-integrated half-masks, The Korea Society of Safety. 1990(5).
- Caretti DM, Whitley JA. Exercise performance during inspiratory resistance breathing under exhaustive constant load work. *Ergonomics*. 1998;41(4):501-511.
- Caretti DM, Coyne K, Johnson A, Scott W, Koh F. Performance when breathing through different respirator inhalation and exhalation resistances during hard work. *J Occup Environ Hyg* 2006;3(4):214-224.
- Chen C, Lehtimäki M, Willeke K. Aerosol penetration through filtering facepieces and respirator cartridges. *Am Ind Hyg Assoc J* 1992;53(9):566-74.
- Cho HW, Yoon CS, Lee JH, Lee SJ, Viner A, Johnson EW. Comparison of pressure drop and filtration efficiency of particulate respirators using welding fumes and sodium chloride. *Ann Occup Hyg* 2011;55(6):666-680.
- Cohen HJ, Garrison RP. Development of a Field Method for Evaluating the Service Life of Organic Vapor Cartridges: Results of Laboratory Testing Using Carbon Tetrachloride. *Am Ind Hyg Assoc J* 1989;50(9):486-495.
- Eninger RM, Honda T, Adhikari A, Heinonen-Tanski H, Reponen T, Grinshpun SA. Filter performance of N99 and N95 face piece respirators against viruses and ultrafine particles. *Ann Occup Hyg* 2008;52(5):385-396.
- Han DH. Performance of respirator filters using quality factor in Korea, *Ind Health* 2000;38:380-384.
- Han DH, Lee SY. Development of exchange period program for chemical cartridge feasible in the work spot-Experiment of estimated breakthrough time using discarded cartridges. *J Korean Soc Occup Env Hyg* 2008; 18(3):204-215.
- Han DH, Kang MS, Yi GY. Development of feasible program of exchange period for chemical cartridge in the workplace (2) -Method of using odor threshold. *J Korean Soc Occup Env Hyg* 2009; 19(2): 102-112.
- Harber P, SooHoo K, Lew M. Effects of industrial respirators on respiratory timing and psychophysiologic load sensitivity. *J Occup Environ Med* 1988;30(3):256-263.
- Harber P, Shimozaki S, Barrett T, Losides P, Fine G. Effects of respirator dead space, inspiratory resistance, and expiratory resistance ventilatory loads. *Am J Ind Med* 1989;16(2):189-198.
- Hinds WC, Kadrichu NP. The effect of dust loading on penetration and resistance of glass fiber filters. *Aerosol Sci Technol* 1997;27(2):162-73.
- Janssen L, Weber R. The effect of pressure drop on respirator face seal leakage. *J Occup Environ Hyg* 2005;2(7): 335-340.
- Korean Ministry of Employment and Labor(KMOEL). Particulate and Gas Respirator safety certification standards (Notice No.2008-73). 2008.
- Korean Ministry of Employment and Labor(KMOEL). Notification of personal protective equipment obligatory safety certification (Notice No. 2012-83). 2012
- Korean Ministry of Employment and Labor(KMOEL). Regulation of the Occupational Safety & Health standard (Article 469 of the KMOEL Decree 77). 2013.
- Lerman Y, Shefer A, Epstein Y, Keren G. External inspiratory resistance of protective respiratory devices: Effects on physical performance and respiratory function. *Am J Ind Med* 1983;4(6):733-740.
- Louhevaara V, Tuomi T, Smolander J, Korhonen O, Tossavainen A, Jaakkola J. Cardiorespiratory strain in jobs that require respiratory protection. *Int Arch Occup Environ Health* 1985;55(3):195-206.
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). 42 CFR Part 84 Respiratory Protective Devices. Available from: <http://www.cdc.gov/niosh/npptl/topics/respirators/pt84abs2.html>
- Nelson TJ, Colton CE. The effect of inhalation resistance on face piece leakage. *Am Ind Hyg Assoc J* 2000;61(1): 102-105.
- T. Johnson, William H. Scott, Christopher G. Karen M. Coyne. Effect of respirator inspiratory resistance level on constant load treadmill work performance. *Am Ind Hyg Assoc J* 1999;60(4):474-479.
- Viscusi DJ, Bergman M, Sinkule E, Shaffer RE. Evaluation of the filtration performance of 21 N95 filtering face piece respirators after prolonged storage. *Am J Infect Control* 2009;37(5):381-386.