

위상차 현미경법에 의한 인조광물섬유 분석 변이 Analytical Variability of Airborne Man-made Mineral Fibers by Phase Contrast Microscopy

신용철^{1*} · 이광용² · 김부옥³

Yong Chul Shin^{1*} · Gwang Yong Yi² · Boowook Kim³

¹인제대학교 보건안전공학과, ²안전보건공단 산업안전보건연구원, ³근로복지공단 직업성폐질환연구소

¹Department of Occupational Health and Safety Engineering, Inje University, Gimhae

²Occupational Safety & Health Research Institute, Korea Occupational Safety and Health Agency, Incheon

³Occupational Lung Diseases Institute, Korea Workers Compensation and Welfare Service, Ansan

ABSTRACT

Objectives: This study was conducted to study the analytical variability of A & B counting rules in counting using a phase contrast microscope airborne fibers collected on filters in man-made mineral or vitreous fibers (MMMFs) industries.

Methods: Fibers in filters were counted using A & B rules of NIOSH Method 7400. Intra-counter and inter-counter variations by fiber type and density were obtained. The types of MMMFs analyzed were glass wool fiber, rock wool fiber, slag wool fiber, and refractory ceramic fibers. The densities of fibers classified were <20 fibers/mm², 20 - <50 fibers/mm², 50 - <100 fibers/mm², and ≥100 fibers/mm², respectively.

Results: Intra-counter relative standard deviations by rule A were 0.084, 0.102, 0.071 for glass wool fibers, rock wool fibers and refractory ceramic fibers, and those by rule B were 0.139, 0.120 and 0.142, respectively. Inter-counter relative standard deviations by rule A were 0.281, 0.296, 0.180 for glass wool fibers, rock wool fibers and refractory ceramic fibers, and those by rule B were 0.396, 0.337 and 0.238, respectively.

Conclusions: Intra-counter variation was not different significantly among fiber types ($p>0.05$), but B rule variation for ceramic fibers approximately 2 times greater than corresponding A rule estimates, and intra-counter and inter-counter variations were higher in the low fiber density.

Key words : Man-made mineral fibers, Counting rule A & B, Phase contrast microscopy, Analytical variability

I. 서 론

인조광물섬유(man-made mineral or vitreous fibers, MMMFs or MMVFs)는 유리섬유(glass wool fiber), 장 유리섬유(continuous filament glass fibers), 암면섬유(rock wool fibers), 슬래그울(slag wool fibers), 내화성 세라믹섬유(refractory ceramic fiber), 실리콘 카바이드(silicon carbide) 등이 대표적인 종류이며 이들은 다양한 용도로 사용되고 있고 공기 중으로 발생되는

섬유로 인체에 노출될 수 있다(ICPS, 1988).

일반적으로 알려진 MMMFs의 건강 영향은 자극(irritation) 작용이며, 섬유에 노출되었을 때 나타나는 일반적인 증상은 가려움증이다. 유리섬유는 피부 뿐만 아니라 눈, 상기도에도 자극을 유발할 수 있다(Bender et al, 1991; Kojola & Moran, 1992). International Agency for Research on Cancer(IARC)에서는 possible human carcinogen (Group 2B)으로 분류하고 있다(IARC, 1988). American Conference of Govern-

*Corresponding author: Yong Chul Shin, 경남 김해시 어방동 607번지 인제대학교 보건안전공학과, Tel: 055-320-3676, Fax: 055-325-2471, E-mail: yeshin@inje.ac.kr, Received: 2012. 2. 25., Revised: 2012. 3. 28., Accepted: 2012. 4. 22.

mental Industrial Hygienists(ACGIH)에서는 인조광물 섬유(synthetic vitreous fibers)인 유리면섬유, 암면섬유, 슬래그울섬유 및 특수유리섬유(special purpose glass fibers)는 동물발암물질(confirmed animal carcinogen, A3), 장유리섬유는 인체발암물질로 분류할 수 없는 물질(not classifiable as a human carcinogen, A4)로 규정하고, 이들의 Threshold Limit Values(TLV)를 1 fiber/cc로 설정하고 있다. 한편, 세라믹섬유는 인체발암 의심물질(suspected human carcinogen, A2)로 규정하고 TLV를 0.2 fibers/cc로 설정하고 있다(ACGIH, 2011).

공기중 섬유의 측정은 National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH) 공정시험법인 NIOSH Method 7400(NIOSH, 1994)가 국제적으로 널리 이용되고 있다. 초기의 NIOSH 방법에는 A 규칙만 포함되어 있었으며(NIOSH 1984), 미국 Occupational Safety and Health Administration(OSHA)도 NIOSH A 규칙에 따라 분석하도록 규정하였다(OSHA, 1986). A 규칙은 주로 석면계수에 이용되며 길이 5 μm 를 초과하고 길이:직경비(aspect ratio)가 3:1이상인 섬유를 계수하며 직경에 대한 제한은 없다.

1987년에 NIOSH 방법에 유리섬유와 같은 인조광물섬유의 분석을 위해 B 규칙이 도입되었다. B 규칙은 영국 Institute of Occupational Medicine(IOM)에 의한 연구결과(Cowie AJ와 Crawford NP, 1982)로 채택되었으며 비흡광성 섬유 또는 비호흡성 섬유(non-

thoracic fiber 또는 non-respirable fiber)를 배제하기 위해 직경을 제한하고 있다(Baron, 1987). B 규칙은 길이 5 μm 초과, 직경 3 μm 미만, 길이:직경 비가 5:1 이상인 섬유를 계수하도록 정하고 있다.

석면 섬유에 대해 위상차 현미경으로 A 계수 규칙에 따라 계수시의 분석 변이에 관한 논문들(Paik et al, 1994; Pang, 2000; Schlecht & Shulman, 1995)이 보고된 바 있으나, MMMFs에 대해서는 A 및 B 규칙으로 계수시의 분석변이에 관한 연구는 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 MMMFs를 B 계수 규칙으로 분석시 섬유 밀도, 섬유 종류 등 주요 요인에 따른 분석 변이를 파악하고 이것을 A 계수 규칙에 의한 것과 비교하였다.

II. 연구방법

본 연구를 위해 MMMFs 및 그 제품을 제조하거나 가공하는 사업장 공기 중에서 섬유 시료를 채취하였다. 연구대상 MMMFs 종류는 유리면섬유, 암면섬유 및 세라믹섬유 등 3 종류였다.

공기중 MMMFs 시료는 직경이 37 mm인 mixed cellulose ester membrane(MCE) 여과지(0.8 μm , Millipore AA Type, Millipore Co., USA)에 1.5 - 2.5 L/분의 유량으로 채취하였다. MMMFs 시료가 채취된 여과지의

Table 1. Comparison of the counting rules, A and B

A Rule	B Rule
1. Count only fibers >5 μm in length.	1. Count only ends of fibers >5 μm in length and <3 μm in diameter.
2. Count only fiber with a length-to-width ratio $\geq 3:1$	2. Count only fiber with a length- to-width ratio $\geq 5:1$
3. For fibers that cross the boundary of the graticule field area and meet the criteria of rules 1 and 2	3. For fibers that cross the boundary of the graticule field area and meet the criteria of rules 1 and 2
a. Count any fiber with only one end lying within the graticule area as one half.	a. Count each fiber end that lies within the graticule area as one end. Add split ends to the count if the split meets the criteria of rules 1 and 2
b. Do not count any fiber that crosses the graticule boundary more than once.	b. Count visible ends when the fiber appears to be attached to another particle, regardless of the size of the particle. Count the end of a fiber obscured by another particle if the particle covering the fiber is less than 3 μm in diameter.
4. Count bundles of fiber unless the individual fibers can be identified, observing both ends and meeting the criteria of rules 1 and 2	4. Count free ends of the fibers from large clumps and bundles up to a maximum of ten ends, provided that each segment meets the criteria of rules 1 and 2
5. Count enough graticule fields to yield 100 fibers. Count a minimum of 20 fields. Stop at 100 graticule fields regardless of the count.	5. Count enough graticule fields to yield 200 ends. Count a minimum of 20 fields. Stop at 100 graticule fields regardless of the count. Divide the total count by 2.

일부를 잘라 acetone/triacetin으로 투명화시킨 후, Walton-Beckett graticule이 삽입된 위상차 현미경 (Carl Zeiss, Axioskop, German)으로 400 배의 배율에서 A 규칙 및 B 규칙에 따라 섬유를 계수하였다. 두 계수 규칙의 차이는 Table 1에 제시된 바와 같다 (NIOSH, 1994). A 규칙에 따라 길이가 5 μm 이상이고 길이대 직경비가 3:1 이상인 섬유를 계수하였다. B 규칙에 따라 길이가 5 μm 를 초과하고 길이대 직경의 비가 5:1 이상인 섬유 중에서 직경이 3 μm 이하인 섬유(호흡성 섬유)만을 계수하였다. 분석자내 분석변이를 계산하기 위하여 2명의 분석자가 2회 반복 분석하였으며, 분석자간 변이를 계산하기 위하여 2명의 분석자가 2회 분석 후 비교하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 분석자내 분석변이(Intra-counter variation)

Table 2는 A 규칙 및 B 규칙에 의한 섬유 계수에 있어서 분석자내 변이(intra-counter variation)를 MMMFs 종류 및 섬유 밀도별로 살펴본 결과이다.

1) 계수 규칙

유리섬유, 암면섬유 및 세라믹섬유를 A 규칙으로

계수할 때 분석자내 변이는 각각 0.084, 0.102 및 0.071이었으며, B 규칙으로 계수할 때 분석자내 변이는 유리섬유, 암면섬유 및 세라믹섬유 각각에 대해 0.139, 0.120 및 0.142이었다. B 규칙의 변이는 A 규칙보다 큰 경향을 보였으나 Wilcoxon signed-rank test 결과 계수 규칙간에 유의한 차이는 없었다($p > 0.05$). 그러나 세라믹섬유의 경우 B 규칙의 변이는 A 규칙의 변이보다 약 2배 컸다.

이와 같이 유리섬유 및 암면 시료에 대한 B 규칙의 변이는 통계적인 유의성은 없지만 A 규칙의 변이보다 약간 큰 경향을 보이며, 세라믹섬유의 경우 B 규칙의 변이는 A 규칙의 변이보다 통계적으로 유의하게 큰 것으로 나타났다. 이와 같은 차이는 A 규칙의 경우 직경에 대한 제한이 없으나 B 규칙의 경우 직경에 대한 기준이 있는데 이러한 기준은 분석자내 변이를 증가시킨 요인으로 작용하는 것으로 판단된다. 더불어 직경 기준은 A 규칙에 의한 섬유 밀도가 B 규칙에 의한 섬유 밀도보다 높게 나타나는 것에도 작용한다 (Breyse, 1999; 신용철, 2006).

2) 섬유 종류

Figure 1에서 보듯이 섬유 종류에 따라 분석자내 변이는 A 규칙으로 계수시 암면섬유에 대한 변이가 다른

Table 2. Intra-counter variations by fiber type, density and counting rule

Fiber Type	Average Fiber Density, fibers/mm ²		Intra-counter Sr*	
	A Rule	B Rule	A Rule	B Rule
Glass wool fibers	31.5	23.1	0.132	0.196
	87.8	70.9	0.061	0.149
	165.2	122.0	0.044	0.121
	306.2	230.2	0.073	0.044
	Overall	Overall	0.084	0.139
Rock wool fibers	29.5	20.1	0.164	0.155
	65.7	49.5	0.105	0.098
	131.4	104.3	0.029	0.110
	336.4	260.4	0.055	0.107
	Overall	Overall	0.102	0.120
Ceramic fibers	23.6	23.8	0.122	0.190
	54.6	56.3	0.054	0.132
	180.6	164.9	0.015	0.132
	326.7	292.9	0.044	0.097
	Overall	Overall	0.071	0.142

*Intra-counter relative standard deviation

섬유에 비해 약간 크나 뚜렷한 차이는 없었다. B 규칙의 경우 반대로 유리섬유 및 세라믹섬유가 약간 크나 뚜렷한 차이는 없었다. A 계수 규칙과 B 계수 규칙의 변이를 섬유 종류에 따른 차이를 Kruskal-wallis test 결과, 섬유 종류간 두 계수 규칙의 변이는 유의한 차이가 없었다($p>0.05$). 섬유 종류에 따른 분석자내 변이 차이는 분석자 및 시료 수가 제한되기 때문에 일반적인 결론을 내릴 수 없으므로 추가적인 연구가 필요하다.

3) 섬유 밀도

각 계수 규칙의 변이는 섬유 밀도에 따라 분석자내 변이는 뚜렷한 차이를 보이고 있었다. Figure 1 및 Figure 2에서 보듯이 낮은 섬유 밀도에서는 변이가 비교적 높았으며 섬유 밀도가 클수록 대체적으로 변이가 작게 나타났다. 앞의 Table 2에서 보듯이 유리섬유에 대한 A 규칙 및 B 규칙의 분석자내 변이는 섬유 밀도가

50 fibers/mm² 미만에서는 각각 0.132 및 0.196로 이 값 이상에서의 변이(각각 0.044 - 0.061 및 0.044 - 0.149)보다 크게 나타났다. 세라믹섬유에 대한 A 규칙 및 B 규칙의 분석자내 변이는 50 fibers/mm² 이하에서는 각각 0.122 및 0.190이었으나 이보다 높은 밀도에서는 각각 0.015 - 0.054 및 0.097 - 0.132로 나타나 섬유 밀도에 따른 차이가 있었다. 이와 같이 A 규칙 및 B 규칙 모두 섬유 종류에 관계없이 섬유 밀도가 50 fibers/mm² 이하에서 분석자내 변이가 가장 높았으며 이보다 높은 밀도에서는 변이가 대체적으로 일정하게 낮은 경향을 보이고 있었다.

특히, Figure 1에서 보듯이 A 규칙의 분석자내 변이는 세 가지 광물 섬유의 섬유 밀도가 131 - 180 fibers/mm² 일 때 가장 낮은 변이 값을 보여 이 밀도 수준에서 재현성이 가장 높았다. 그러나 Figure 2에서 보듯이 B 규칙의 경우 A 규칙과는 차이가 있었으며 섬유 밀도가 가장 큰 시료, 즉 230 fibers/mm² 이상의 섬유 밀도를 가진 시료에서 낮은 변이를 보였다.

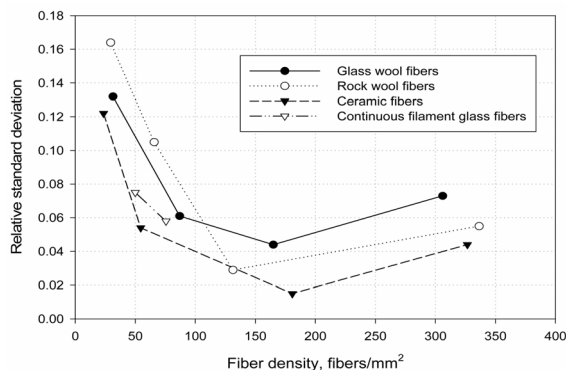


Figure 1. Intra-counter variation using A rule by fiber type and density.

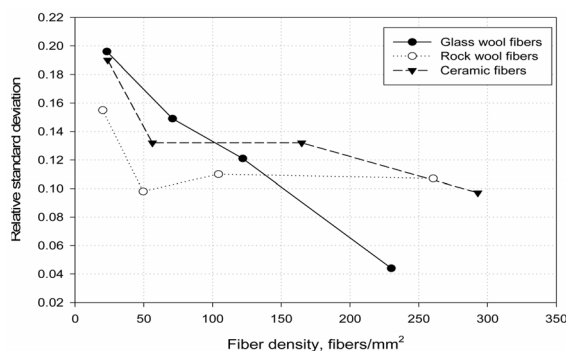


Figure 2. Intra-counter variation of results using B rule by fiber type and density.

2. 분석자간 분석변이(Inter-counter variation)

유리섬유, 암면섬유 및 세라믹섬유 시료에 대한 분석자간변이(inter-counter variation)는 Table 3과 같

Table 3. Inter-counter variations by fiber type, fiber density, and counting rule

Fiber type	Fiber Density, fibers/mm ²		Inter-counter Sr*, %	
	A Rule	B Rule	A Rule	B Rule
Glass wool fibers	<20	<15	0.344	0.509
	20 - <50	<30	0.273	0.246
	50 - <100	30 - <70	0.100	0.234
	100 and Over	50 and Over	0.163	0.160
	Overall	Overall	0.281	0.396
Rock wool fibers	<20	<30	0.422	0.550
	20 - <50	<40	0.283	0.252
	50 - <100	40 - <60	0.233	0.080
	100 and Over	60 and Over	0.127	0.111
	Overall	Overall	0.296	0.337
Ceramic Fibers	<20	<20	0.216	0.266
	20 - <50	20 - <50	0.210	0.316
	50 - <100	50 - <90	0.170	0.188
	100 and Over	70 and Over	0.119	0.134
	Overall	Overall	0.180	0.238

*Inter-counter relative standard deviation

고 계수 규칙, 섬유 종류 및 섬유 밀도 별로 분석자간 변이를 보여주고 있다.

1) 계수 규칙

A 규칙과 B 규칙간의 분석변이는 저 섬유 밀도에 서 뚜렷한 차이가 있었으나 고 섬유 밀도에서는 뚜렷한 차이를 보이지 않았다.

2) 섬유 종류

섬유 종류에 따라 A 규칙의 개인간 변이는 유리섬유 0.281, 암면섬유 0.296, 세라믹섬유 0.180로 세라믹섬유 시료를 계수할 때 가장 변이가 작았다. 이러한 경향은 특히 저 섬유 밀도 (20 fibers/mm²) 시료에서의 변이 차이에 기인하는 것으로 고 섬유 밀도 시료에서는 뚜렷한 차이가 없었다. B 규칙의 개인간 변이는 유리섬유 0.396, 암면 섬유 0.337, 세라믹 섬유 0.238로 나타나 A 규칙의 경우와 마찬가지로 분석변이의 차이는 저 섬유 밀도에서의 변이 차이에 기인하는 것으로 보인다.

3) 섬유 밀도

계수 규칙에 상관없이 섬유 밀도가 증가함에 따라 개인간 분석변이가 현저하게 감소하는 것으로 나타났다. B 규칙에 의해 유리섬유를 계수한 자료의 개인간 분석변이는 섬유 밀도가 < 20 fibers/mm²인 시료에서 0.509로 나타났으나 이 밀도 이상의 시료에서는 0.160 - 0.246으로 현저한 차이가 있었다. 암면의 경우도 유리섬유에서와 같이 밀도 감소 폭이 컸다. 그러나 세라믹섬유의 경우 밀도에 따른 차이 폭은 유리섬유 및 암면에 비해 비교적 작았으나 밀도에 따라 분석변이가 감소하는 경향이 뚜렷하였다.

B 규칙의 경우 직경에 대한 계수기준 때문에 A 계수 규칙에 비해 분석이 까다롭다. 따라서 개인 간에 차이가 비교적 크게 발생하며, 이러한 계수 규칙 차이에 따른 영향은 밀도가 낮은 시료에서 크게 작용하는 것으로 생각된다.

IV. 결 론

A 및 B 계수 규칙에 따른 개인내 분석변이를 살펴본 결과, 유리섬유, 암면섬유 및 세라믹섬유 시료종

류에 따른 두 계수 규칙의 개인내 변이는 통계적으로 유의한 차이가 없었으나, 세라믹섬유의 경우 B 규칙의 변이는 A 규칙의 변이보다 약 2배 크게 나타났다. 이와 같은 차이는 A 규칙의 경우 직경에 대한 제한이 없으나 B 규칙의 경우 직경에 대한 기준이 있는데 이러한 기준은 분석자내 변이를 증가시킨 요인으로 작용하는 것으로 판단된다. 각 계수 규칙의 분석자간 및 분석자내 변이는 섬유 밀도에 따라 변이는 뚜렷한 차이가 있었으며, 섬유 밀도가 낮을수록 변이가 증가하는 경향이 있었다.

참고문헌

- 신용철. 인조광물섬유에 대한 NIOSH 7400 방법의 A 및 B 계수규칙 비교. 한국산업위생학회지 2006; 16(1): 11-16.
- International Programme on Chemical Safety. Environmental Health Criteria 77: Man-Made Mineral Fibers. World Health Organization, Geneva, Switzerland, 1988.
- Bender, JR, Konzen JL, Devit GE. Occupational Exposure Toxic Properties, and Work Practice Guidelines for Fiber Glass. Fairfax, VA, AIHA, 1991.
- Kojola WH and Moran JB. Exposure Limits for Man-Made Mineral Fibers. Position of the Building and Construction Trades Department, AFL-CIO. Appl Occup Environ Hyg 1992;7(1):724-733.
- International Agency for Research on Cancer(IARC). Monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Human Man-Made Mineral Fibers and Radon. Vol. 43, World Health Organization/International Agency for Research on Cancer, Lyon, France, 1988.
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists. 2011 TLVs & BEIs Based on the Documentation of the Threshold Limit Values for Chemical Substances & Physical Agents and Biological Exposure Indices. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati, Ohio, 1998.
- National Institute for Occupational Safety and Health. Method 7400: Asbestos and Other Fibers by PCM. In: NIOSH Manual of Analytical Methods, 4th ed. DHHS(NIOSH) Pub. No. 94-113, NIOSH, Cincinnati, Ohio, 1994.
- Revised Recommended Asbestos Standard, U.S. Department of Health, Education, and Welfare, Publ. (NIOSH) 77-169 (1976); as amended in NIOSH sta-

- tement at OSHA Public Hearing, June 21, 1984.
- Occupational Safety and Health Administration, U.S. Department of Labor, Occupational Exposure to Asbestos, Tremolite, Anthophyllite, and Actinolite Asbestos; Final Rules, 29 CFR Part 1910.1001. Amended June 20, 1986.
- Cowie AJ, Crawford NP. A Comparison of the Effects of Different Counting Rules and Aspect Ratios on the Level and Reproducibility of Asbestos Fibre Counts: Part II: Effects on Reproducibility. TM/82/23. Sheffield, UK: Health and Safety Executive. 1982.
- Breyse PN, Lees P, Rooney BC. Comparison of NIOSH Method 7400 A and B Counting Rules for Assessing Synthetic Vitreous Fiber Exposures. AIHAJ 1999; 60: 526-532.
- Baron P. Asbestos Analysis-NIOSH Method 7400. Appl Ind Hyg 1987;2:R8-10
- Schlecht PC and Schulman SA. Phase Contrast Microscopy Asbestos Fiber Counting Performance in the Proficiency Analytical Testing Program. AIHAJ 1995; 56:480-489.
- Pang TW. Precision and accuracy of asbestos fiber counting by phase contrast microscopy. AIHAJ 2000; 61:529-538.
- Paik NW, Levine SP, Schork MA. Intracounter, Intralaboratory, and Interlaboratory Variation of Asbestos Counting with Phase Contrast Microscopy. Appl Occup Environ Hyg 1993;9(7):510-516.