

타코나이트 광산 공정에서의 실시간 질량측정기기와 실시간 수농도의 환산에 의한 질량농도와의 연관성

정은교^{1*} · 장재길 · 송세욱 · 김정호²

¹한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원, ²고용노동부

Relationships between a Calculated Mass Concentration and a Measured Concentration of PM_{2.5} and Respirable Particle Matter Sampling Direct-Reading Instruments in Taconite Mines

Eun-Kyo Chung^{1*} · Jae-Kil Jang · Se-Wook Song · Jeongho Kim²

¹Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA, ²Ministry of Employment and Labor

ABSTRACT

Objectives: The purposes of this study are to investigate workers' exposures to respirable particles generated in taconite mines and to compare two metric methods for mass concentrations using direct-reading instruments.

Methods: Air monitorings were conducted at six mines where subjects have been exposed primarily to particulate matters in crushing, concentrating, and pelletizing processes. Air samples were collected during 4 hours of the entire work shift for similarly exposure groups(SEGs) of nine jobs(N=37). Following instruments were employed to evaluate the workplace: a nanoparticle aerosol monitor(particle size range; 10-1000 nm, unit: $\mu\text{m}^2/\text{cc}$, Model 9000, TSI Inc.); DustTrak air monitors(PM₁₀, PM_{2.5}, unit: mg/m^3 , Model 8520, TSI Inc.); a condensation particle counter(size range; 20-1000 nm, unit: $\#/ \text{cc}$, P-Trak 8525, TSI Inc.); and an optical particle counter(particle number by size range 0.3-25 μm , unit: $\#/ \text{cc}$, Aerotrak 9306, TSI Inc.).

Results: The highest airborne concentration among SEGs was for furnace operator followed by pelletizing maintenance workers in number of particle and surface area, but not in mass concentrations. The geometric means of PM_{2.5} by the DustTrak and the Ptrak/Aerotrak were 0.04 mg/m^3 (GSD 2.52) and 0.07 mg/m^3 (GSD 2.60), respectively. Also, the geometric means of RPM by the DustTrak and the Ptrak/Aerotrak were 0.16 mg/m^3 (GSD 2.24) and 0.32 mg/m^3 (GSD 3.24), respectively. The Pearson correlation coefficient for DustTrak PM_{2.5} and Ptrak/Aerotrak PM_{2.5} was 0.56, and that of DustTrak RPM and Ptrak/Aerotrak RPM was 0.65, indicating a moderate positive association between the two sampling methods. Surface area and number concentration were highly correlated($R^2 = 0.80$), while PM_{2.5} and RPM were also statistically correlated each other($R^2 = 0.79$).

Conclusions: The results suggest that it is possible to measure airborne particulates by mass concentrations or particle number concentrations using real-time instruments instead of using the DustTrak Aerosol monitor that monitor mass concentrations only.

Key words :direct-reading instruments, number and surface area concentration, PM_{2.5}, respirable particles

I. 서 론

미국 EPA(Environmental Protection Agency)에서는 1997년 호흡성분진(Respirable particulate matter)에

대한 새로운 기준으로 PM(Particulate matter)2.5를 채택하여 사용해오고 있다.

즉 PM_{2.5}는 입자크기가 폐의 폐포안에 까지 침투하여 잔류할 정도로 작은 2.5 μm 이하의 공기역학적

*Corresponding author: Eun Kyo Chung, Tel: 052-703-0902, E-mail: jungkek60@naver.com
Occupational Safety and Health Research Institut. KOSHA, 400 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, 681-230
Received: January 16, 2014, Revised: March 10, 2014, Accepted: March 21, 2014

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.

직경(Aerodynamic mass median diameter, Dp)을 가진 초미세먼지를 말하고 있고 PM₁₀은 입자크기가 폐안까지 도달할수 있는 10.0 μm 이하의 직경을 가진 미세먼지를 말한다(Lin et al., 2005; Phee et al., 2013).

반면에, 미국 산업안전보건청(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)은 PM_{2.5}의 직업노출에 대한 규제 기준은 없지만, 호흡성분진에 대한 8시간 가중평균농도(Time-Weighted Average, TWA) 허용기준(Permissible Exposure Limit, PEL)으로 5 mg/m³을 설정하고 있다. 이것은 입자크기가 10 μm이하이고 공기역학적 직경 4 μm에서 폐포 침착률이 50%인 입자들을 의미하는 미국 산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)의 호흡성분진(Respirable Particulate Matter, RPM) 정의를 참고로 하였다. 흉곽성분진(Thoracic Particulate Matter, TPM)은 입자크기가 25 μm이하이고 입경 10 μm에서 기도 및 폐 침착률이 50%인 입자상 물질들을 말한다(ACGIH, 2013). 또한, 영국 BMRC(British Medical Research Council)에서는 호흡성 분진이란 입자크기가 7.1 μm미만이고 입경 5 μm에서 폐포 침착률이 50%인 입자상 물질로 정의하고 있다(Paik, 2000). 그리고 국제표준화기구(International Organization for Standardization, ISO)에서 정의하고 있는 PM₁₀은 미국 ACGIH의 TPM 정의와 개념이 동일하다. 이와같이 국가와 기관마다 호흡성분진의 정의가 약간씩 차이가 있다.

그리고, 호흡성분진에 대한 표준분석방법으로 미국 산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH) 측정 및 분석방법은 필터를 부착한 펌프를 이용하여 공기 중 입자상 물질을 채취하는 중량 포집방법으로 장점은 에어로졸의 중량분석 후 화학성분 분석도 가능하다는 것이다(NIOSH, 2003).

그러나, 중량법은 시간가중포집방법이므로 순간적인 노출의 양상을 제공하지 못하며 필터를 교체해야 한다거나 측정전·후 준비의 어려움 등 번거로움이 있다. 반면 직독식 측정방법은 장시간 연속 모니터링이 가능하고 특이 시간대의 실시간 측정치를 제공하고 입자농도를 구하기 위해 추가적인 분석이 필요없고 실용적인 데이터베이스로 기록할수 있는 장점이 있는 반면 입자상물질의 화학적 조성을 알수 없고 아직도 직독식 기기의 다양성으로 정확성과 신뢰성을 보장하기에는 어려운 점이 있는 것이 사실이다

(Kim et al., 2004; Zhu et al., 2011).

지금까지 입자상물질의 측정방법으로 중량법과 직독식 측정법간의 비교연구는 많은 편이다. 일반적으로 조사 연구에 사용된 직독식 측정기는 DustTrak 8520 에어로졸 모니터이며 이들 연구 대부분이 DustTrak 8520에 의한 PM_{2.5} 질량농도와 중량법에 의한 호흡성분진 농도 사이에 높은 상관관계가 있음을 보여주고 있다(Williams et al., 2000; Ramachandran et al., 2000; Chung et al., 2001; Yanosky et al., 2002).

그러나, DustTrak 8520 에어로졸 모니터와 다른 직독식 측정기기간 특성에 따라 입자 수 농도로 부터 환산한 질량농도와 비교한 연구는 드문편이다. 지금까지 산업위생분야에서는 전통적으로 질량농도를 측정하여 건강영향을 평가해 왔으나 입자의 크기가 나노미터(nm) 영역에 있는 입자상물질들에 대한 건강영향에 대해서는 평가방법이 없었다. 그러나, 점차 측정기구 및 방법의 진보에 따라 초미세먼지에 대한 측정이 가능해졌다. 그런데, 이러한 나노크기(1~100 nm)의 입자들은 입자의 질량(Mass)보다 입자의 표면적(Surface area)과 입자수(Number)가 인체의 호흡기에 미치는 건강 영향을 더 잘 설명하는 것으로 알려져 있다(Behnoush et al., 2008; Ramachandran et al., 2011). 이것은 입자밀도가 1 g/cm³ 인 구형입자들인 경우, 예를 들어 입경이 10 μm인 입자의 질량은 1 mg이고 표면적은 6.0 x 10⁸ μm², 입자수가 1.9 x 10⁶ 개인 반면, 10 nm 인 초미세먼지의 질량은 똑같이 1 mg이지만 표면적은 1,000배, 입자수는 1,000,000,000 배 더 크다고 할 수 있다. 또한, 입자들이 폐에 침착된 수가 많을수록 건강영향과 관련된 것으로 보고하고 있고 독성 및 역학 연구에서 이들 지표와 관련된 건강영향을 제시한 연구들이 발표되고 있다(Oberdorster, 1994; Donaldson, 1999; Cullen et al., 2000; Oberdorster, 2000; Brown et al., 2001; Renwick et al., 2001; Raynor et al., 2012). 또한, 입자의 표면물질이 건강영향에 중요한 기여인자로 작용하는 것으로 파악되고 있고 입자의 표면적이 다른 입자에 달라붙어 화합물 분해를 억제하는 역할을 하여 환경중에 잔류할 가능성이 있음이 지적되고 있다(Donaldson et al., 1996; Lison et al., 1997; Donaldson et al., 2000; Tran et al., 2000; Dick et al., 2003).

유럽위원회(European Commission)에서는 나노물질이란 “입경분포를 기준으로 입자수의 50% 또는 그

이상이 하나 또는 그 이상의 외형치수(External dimension)가 1~100 nm 인 부유(Unbound) 또는 응집(Aggregate) 또는 덩어리(Agglomerate) 상태의 입자를 포함하는 자연적(Natural) 또는 부수적(Incidental)이거나 제조된(Manufactured) 물질”이라고 정의하고 있다(EU, 2011).

본 연구의 목적은 타코나이트 광산에서 일하는 근로자들의 노출농도를 공정별로 표준측정방법인 필터에 의한 중량법과 크기별 입자의 수 농도로 부터 환산한 질량농도와 비교해 보고자 함이다.

II. 연구대상 및 방법

1. 연구대상

시료포집은 6개 타코나이트 광산의 분쇄(Crushing), 선광(Concentrating), 그리고 조립(Pelletizing) 등 일부 공정을 대상으로 2010년 1월부터 2011년 4월 까지 실시하였다. 타코나이트 철광석은 규산염의 혼합물과 매우 미세한 자철광(Zanko et al., 2008)으로 크게 구성되며 철성분이 30%이하인 저등급의 철광석이다. 가장 일반적인 철광석의 두가지 형태는 흑철광(Fe_2O_3)과 적철광(Fe_3O_4)이다(Berndt & Brice, 2008).

모든 샘플러(Sampler)는 광산근로자의 호흡위치의 작업영역에 설치하였고, 에어모니터가 정상적으로 작동되는지 주기적으로 확인하였다. 모든 시료는 4시간 동안 37개 지역에서 포집하였다.

근로자들의 유사노출군(Similarly Exposed Groups, SEGs)은 각 작업의 빈도 등 근로자가 작업을 수행하는 유형 및 조건에 기초하여 정의하였다. 또한, SEGs 분류는 참여하는 공정과 임무의 관찰 및 이해를 기

초로 하여 정하였다(Hwang et al., 2013). 광산근로자의 SEGs는 Table 1과 같이 9개의 직무노출 매트릭스를 사용하여 분류하였다.

2. PM_{2.5} 및 RPM의 질량농도 측정 및 환산

본 연구에서 사용된 측정장비는 DustTrak(Model 8520, TSI Inc, MN, USA) 모니터와 AeroTrak(Model 9306, TSI, Inc., MN) 및 P-Trak(Model 8525, TSI, Inc., MN) 모니터이다(Table 2). DustTrak은 질량농도에 비례하여 PM_{1.0}, PM_{2.5} 및 PM₁₀으로 구성된 산란하는 빛의 강도를 측정하는 에어로졸 광도계이다. DustTrak 8520의 입자크기 범위는 0.1~10 μm 이고 검출범위는 0.001~100 mg/m³이다. 이 측정기는 아리조나 시험분진(Arizonal test dust)의 중량 호흡분율에 대해 보정한 것이다. AeroTrak 9306은 6 채널(0.3 μm -0.5 μm , 0.5 μm -1.0 μm , 1.0 μm -3.0 μm , 3.0 μm -5.0 μm , 5.0 μm -10 μm , 10 μm -25 μm)을 가진 입자크기 범위 0.3~25 μm 인 광학입자계수기(Optical particle counter)이다. P-Trak 8525는 나노크기의 초미세먼지가 포함된 입자수 농도를 측정할수 있는 기기로서, 입자크기 범위가 0.02~1.0 μm 인 응축입자계수기(Condensation particle counter)이다. 이것은 입자들이 이소프로필알콜과 혼합된 포화튜브를 통해 유입되면 알코올과 혼합된 입자들은 응축냉각관을 통과하면서 큰 물방울로 성장한다. 성장한 물방울은 레이저 빔이 통과될때 섬광을 내면서 산란되는데 이것을 광도계로 포획하여 카운트하는 원리이다. 펄스 카운트율은 입자수 농도에 비례한다.

호흡성분진은 개인시료채취기의 10 mm nylon cyclone에 Pore Size 0.8 μm 인 MCE membrane 필터를

Table 1. Major activities at each process of SEGs

Process	Job category	Task
Crushing	Crusher operator	Check equipment inside the crusher and conveyor belts; clean the area
	Crusher maintenance	Maintain equipment in the crusher building or in crusher maintenance shop
Concentrating	Concentrator operator	Check on rod mills, ball mills, magnetic separators; clean area
	Concentrator maintenance	Maintain equipment in the concentrator building
Pelletizing	Pelletizing operator	Operate and monitor the filter discs; clean areas
	Pelletizing maintenance	Maintain equipment for the pelletizing building
	Balling drum operator	Operate and check on the balling drums and the pellets; clean area
	Furnace operator	Operate and check on the kiln
	Dockman	Load pellets from the loading pocket to the train; mostly inside a enclosed room

Table 2. Summary of instrumentation used for characterization of airborne particles

Instrument	Measurement Metric	Response time (s)	Diameter Range (μm)	Channels	Collection efficiency	Upper range
Model 8520 DustTrak Aerosol Monitor w/ PM _{2.5} inlet, PM ₁₀ inlet	Mass concentration (particle diameter >2.5 μm , >10 μm)	1	0.1 - 10	No size resolution	-	100 mg/m ³
Model 8525 P-Trak Ultrafine Particle Counter (CPC)	Number concentration	1	0.02 - 1.0	No size resolution	Size dependent	~5.0x10 ⁵ #/cm ³
Model 9306 AeroTrak Optical Particle Counter (OPC)	Size distribution by number	1	0.3-25	Size resolution	Size dependent	-
Model 9000 AeroTrak Nanoparticle Aerosol Monitor	Surface area concentration	1	0.01 - 1.0	No size resolution	-	10,000 $\mu\text{m}^2/\text{cc}$

장착하여 1.5~2.0 ℓ/min 의 유량으로 포집하였다. 호흡성분진의 RPM 중량농도는 공시료를 고려하여 시료채취 전, 후의 필터무게를 채취공기량으로 나누어 산출하였다.

펌프를 이용한 필터법에 의한 RPM 중량농도는 DustTrak 8520의 호흡성 분율을 보정하는데 이용되었다. 그 측정값에 대한 보정계수 CF(Calibration Factor)는 다음식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{CF for RPM} = \text{Time-average grav RPM} / \text{Time-average DustTrak RPM} \dots(1)$$

PM_{2.5} 중량농도(Gravimetric conc.)는 입자크기별 누적 RPM 농도에 대한 입자크기별 누적 PM_{2.5} 농도의 비를 이용하여 추정하였다. 입자크기별 개수는 OPC로 부터 얻었다.

$$\text{Grav PM}_{2.5} \text{ Conc.} = (\text{Grav RPM conc.} \times \text{Size-integrated PM}_{2.5}) / \text{Size-integrated RPM} \dots(2)$$

PM_{2.5}에 대한 보정계수는 시간평균 PM_{2.5} 중량농도를 시간평균 DustTrak PM_{2.5}농도로 나누어 계산하였다.

$$\text{CF for PM}_{2.5} = \text{Time-average grav PPM}_{2.5} / \text{Time-average DustTrak PM}_{2.5} \dots(3)$$

초미세먼지를 측정할수 있는 P-Trak 8525와 미세먼지를 측정할수 있는 AeroTrak 9306을 사용하여 입경별 입자수농도로 부터 다음방정식을 이용하여 질

량농도로 환산하여 PM_{2.5}(0.02 - 3.0 μm) 및 RPM(0.02 - 10.0 μm) 농도를 산출하였다(Ramachandran, 2005).

$$M_i = (\pi/6) * n_i * \rho_p * (d_i)^3 (\mu\text{g}) \dots(4)$$

여기서, M_i : i번째 입자의 질량,

n_i : i번째 입자수(particle count),

ρ_p : 입자밀도(particle density = 10⁻⁶ $\mu\text{g}/\mu\text{m}^3$),

d_i : i번째 입자의 직경(μm)

비교대상은 동일날짜, 동일장소(위치)에서 측정된 유사노출 근로자 34 쌍(Pairs)에 대해서 분석하였다.

3. 입자수 및 표면적 농도 측정

본 연구에서 입자수농도 측정은 AeroTrak 9306과 P-Trak 8525를 이용하였고 표면적농도 측정은 AeroTrak (Model 9000, TSI Inc., Shoreview, MN, USA)을 사용하였다. AeroTrak 9000은 폐의 기관지 또는 폐포내에 축적되어 있는 입자들의 표면적을 측정하며 입자의 크기 범위는 0.01~1.0 μm 이다(TSI Incorporated, 2011). 이것은 확산원리에 의해 이온들은 서로 충돌에 의해 전하를 갖게 되는데, 이러한 입자들이 혼합챔버내로 유입되면 하전된 입자들이 전위계로 이동되어 전하를 측정하고 그것을 총 표면적으로 변환하는 원리를 이용한 것이다.

4. 자료처리

측정자료에 대한 통계분석은 SPSS 18.0K(SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 이용하였고 그래픽 표현은 SigmaPlot 10.0(Systat Software, Inc., Chicago, IL,

USA)을 사용하였다. 측정자료에 대한 정규분포 검정은 IH DataAnalyst(v1.27) 프로그램을 사용하였다.

III. 연구결과

1. PM_{2.5} 및 RPM의 질량농도 측정치와 환산치 비교

보정된 RPM 및 PM_{2.5}의 질량농도는 로그정규분포 하였다. Table 3과 같이 입자상물질의 RPM 및 PM_{2.5} 농도의 기하평균 및 기하표준편차는 각각 0.16 mg/m³ (GSD 2.24), 0.04 mg/m³(GSD 2.52)으로 두 그룹간에는 통계적으로 유의한 차이가 있었고 유사노출군별로는 볼링드럼 운전작업자가 가장 높은 농도를 보였다(p<0.01).

입자수를 측정하는 Ptrak 8525 및 Aerotrak 9306에

서의 RPM 농도의 기하평균 및 기하표준편차는 0.32 mg/m³(GSD 3.24) 이었고 PM_{2.5} 농도는 0.07 mg/m³ (GSD 2.60) 이었다. 대응표본 t 검정결과, DustTrak의 보정 PM_{2.5} 및 RPM 농도와 Aerotrak 및 Ptrak의 PPM_{2.5} 및 RPM 농도 사이에는 유의한 차이가 있었다(p<0.01).

그러나, 질량농도만으로 표현되는 DustTrak 8520을 이용하여 얻은 호흡성분진의 중량농도 보정값과 입자수 농도만을 측정하는 Ptrak 8525 및 Aerotrak 9306으로 부터 입자수를 질량농도로 환산한 값과 비교한 결과, 두 측정도구에 대한 결정계수(R²)는 각각 0.65, 0.56으로 상관성이 있음을 보여 주었다(Figure 1). 또한, 산술평균에서도 두 측정도구간 평균의 차이가 있었다(p<0.05). 입자의 크기별 질량농도 분포에서는 입

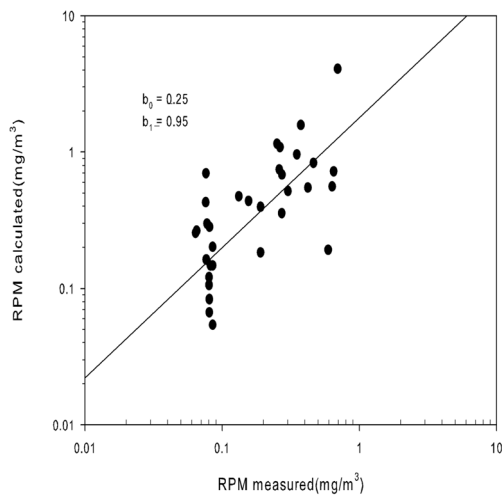
Table 3. Summary of DustTrak PM_{2.5}/RPM measured and Ptrak/Aerotrak PM_{2.5}/RPM calculated

Method		No of pairs	R ²	AM±SD	GM(GSD)	p-value
RPM (≤10.0 μm)	measured	34	0.65	0.23±0.19	0.16(2.24)	0.000
	calculated	34		0.55±0.72	0.32(3.24)	
PM _{2.5} (≤2.5 μm)	measured	34	0.56	0.06±0.08	0.04(2.52)	0.001
	calculated	34		0.09±0.07	0.07(2.60)	

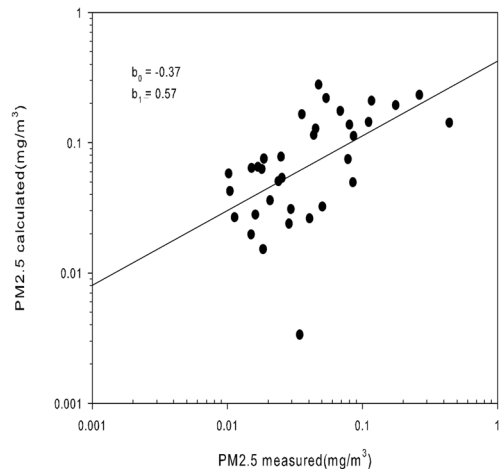
* AM(Arithmetic Mean), SD(Standard Deviation), GM(Geometric Mean), GSD(Geometric Standard Deviation)

† RPM : adjusted RPM concentration

‡ PM_{2.5} : adjusted PM_{2.5} concentration



(a) RPM



(b) PM_{2.5}

Figure 1. Correlation of calculated mass concentration vs measured concentration for RPM or PM_{2.5}

경이 커질수록 질량농도는 증가하는 경향을 보였다.

2. 입자수 농도와 표면적 농도 비교

측정된 입자수 및 표면적농도는 로그정규분포 하였다($p < 0.05$). 타코나이트 전체공정의 입자수 및 표면적농도는 조립>분쇄>선광 공정순으로 높게 나타났고 세부공정별 입자수농도는 용해로작업자가 144,734.7(3.2) #/cm³ 로 가장 높았고 그 다음은 조립기 유지보수작업자로 111,876.5 #/cm³ 이었다. 표면적 농도에서도 용해로작업자가 315.8 μm²/cm³ 로 가장 높았고 유지보수작업자는 299.6 μm²/cm³ 로 그 다음을 차지하여 입자수농도와 비슷한 양상을 보였다(Table 4). 그리고, 세 번째로 높은 농도수준은 입자수 농도에서는 블링드럼 운전작업자인 반면, 표면적농도에서는 운반하역작업자이었다. 작업상황을 보면, 분쇄 및 선광작업에서 미세한 분진이 많이 발생할 것으로 판단되어 입자수 농도가 조립공정보다 높을것으로 예상되었으나 오히려 반대의 결과로 나타났다. 이는 분쇄 및 선광기기들이 밀폐가 잘되어 있고 조립공정에는 다양한 기기들이 존재하고 컨베이어벨트와 같은 개방형 설비 및 용해로 작업 등의 영향에 의한 것으로 볼 수 있다.

입자수 농도를 측정된 유사노출군 9개 직종(N=37)의 평균농도와 입자들의 표면적농도를 측정된 유사

Table 5. Correlation of number concentration vs surface area concentration and RPM vs PM_{2.5}

Metrics	No of samples	R ²
Number concentration	37	0.80*
Surface area concentration	37	
RPM	37	0.79†
PM _{2.5}	37	

* $p < 0.01$
 † $p < 0.05$

노출군 9개 직종의 평균농도와 비교한 결과, 두 측정 도구(Metrics)간에는 높은 상관성이 있음을 확인하였다($R^2=0.80, p < 0.01$). 이것은 입경이 작은 입자들이 많을수록 표면적은 증가하는 원리에서 비롯된다고 볼 수 있다. 또한, 보정된 RPM 농도와 PM_{2.5} 농도사이에도 통계적으로 높은 상관관계가 있음을 알 수 있었다($R^2=0.79, p < 0.05$)(Table 5).

IV. 고 찰

연구대상 공정의 입자상물질의 입경별 분포는 나노크기의 입자수를 정확히 산출하는 것은 불가능하지만, 입경범위가 20~300 nm 인 입자수가 전체의 98.9%를 차지하였고 입경범위가 0.3~0.5 μm, 0.5~1.0

Table 4. GM and GSD by SEG and process for each exposure metric

Process	SEG	N	Number (#/cm ³)		SA (μm ² /cm ³)		RPM (mg/m ³)		PM _{2.5} (mg/m ³)	
			GM	GSD	GM	GSD	GM	GSD	GM	GSD
Crushing	Crusher operator	3	30,545.6	1.7	135.3	1.9	0.12	2.76	0.01	2.62
	Crusher maintenance	4	35,705.3	2.5	172.2	4.6	0.10	2.66	0.02	3.70
Concentrating	Concentrator operator	5	18,854.8	1.9	103.2	2.5	0.12	2.34	0.03	3.11
	Concentrator maintenance	6	19,244.8	2.4	68.8	2.4	0.09	1.51	0.02	1.90
Pelletizing	Pelletizing operator	5	51,971.2	4.0	120.6	4.8	0.11	2.30	0.02	2.58
	Pelletizing maintenance	3	111,555.3	1.8	299.6	2.2	0.25	1.54	0.05	1.84
	Balling drum operator	5	74,385.4	4.0	188.5	2.9	0.31	2.25	0.07	1.86
	Furnace operator	3	144,589.2	3.2	315.8	4.4	0.22	1.50	0.04	1.76
	Dockman	3	30,779.4	5.4	244.7	8.2	0.16	3.69	0.06	4.14

* N(Number of samples), GM(Geometric Mean), GSD(Geometric Standard Deviation)
 † Number : Number concentration of particles
 ‡ SA : Surface area concentration
 § RPM : adjusted RPM concentration
 || PM_{2.5} : adjusted PPM_{2.5} concentration
 ¶ SEG : Similarly Exposed Group

μm , 1.0~3.0 μm , 3.0~5.0 μm , 5.0~10.0 μm , 10.0~25.0 μm 일 때 입자수는 각각 0.5%, 0.3%, 0.2%, 0.06%, 0.03%, 0.005% 를 차지하였다. 즉 측정된 입자상물질의 1% 정도만이 입경 0.3 μm 이상 이었다. 이것은 유럽위원회의 정의를 기준으로 보면 연구대상 공정에서 발생하는 입자상물질은 나노물질이라고 볼 수 있다. Neulicht 및 Shular(2011)에 따르면, 타코나이트 철광석 광산의 제조공정에서의 입자상물질의 발생원은 건식 분쇄공정에서 가장 높다. 특히 크기별로 철광석을 분리하는 장소와 공정과 공정사이의 컨베이어벨트 위치에서 높다. 분쇄공정을 거친후 조립공정에서는 처음에 습식작업으로 이루어져 입자상물질의 발생은 적은 편이나, 용해로(Furnace), 펠릿을 다루는 공정 및 냉각공정에서는 나노크기의 입자상물질이 발생할 수 있다. 또한, 생산설비 및 엔진에서 발생하는 디젤엔진 배출물질도 발생원으로 배제할 수 없는 상황이다. 이와같은 타코나이트 광산의 입자상물질의 발생특성을 고려하여 나노크기의 입자상물질을 질량농도로 평가하기 위한 노력을 시도해 보았다.

질량농도만을 측정하는 DustTrak 8520에서의 보정된 $\text{PM}_{2.5}$ 및 RPM 농도와 입자수 농도만을 측정하는 Ptrak 8525와 Aerotrak 9306의 $\text{PM}_{2.5}$ 및 RPM 농도사이에는 상관성이 있음을 보여주었기 때문에 입자수만을 측정하는 측정기기로도 질량농도 평가는 어느 정도 가능하다는 것을 증명할 수 있었다. 이것은 입경별 표면적 농도를 측정할 수 있는 측정기기로도 DustTrak 8520을 대신할 수 있음을 의미하고 있다. 그리고 DustTrak 8520을 사용하거나 Aerotrak 9306을 사용하거나 측정기기의 사용면에서 본다면 호흡성분진에 대해 어떤 기준을 적용하든 별 문제가 없음을 알 수 있다. 그러나, 입자상물질의 입경이 아주 작은 초미세먼지의 경우에는 전통적으로 평가해 온 입자의 질량보다는 입자의 표면적과 입자수가 인체의 호흡기에 더 영향을 미치는 것으로 보고하고 있다(Ramachandran et al., 2005; Milind et al., 2007; Park et al., 2010; Ramachandran et al., 2011). 그러므로 다수의 나노크기의 입자들을 포함하는 입자상물질에 대해 노출실태를 평가하고자 할때에는 입자수나 표면적을 고려하여 질량농도를 평가할 필요가 있다. 본 연구에서도 나노크기의 입자를 포함하는 입자수 측정기기에 의해 질량농도로 환산한 값이 질량농

도만을 측정하는 DustTrak 8520에서의 측정값보다 더 높게 나타나 나노크기의 입자를 고려하지 않고 있는 DustTrak 8520을 이용한 질량농도 평가방법 보다는 비교적 더 바람직한 방법이라고 볼 수 있다.

본 연구에서 입자수 농도와 표면적 농도 사이에는 강한 상관관계($R^2 = 0.8$)가 있는 것으로 나타났으며 이것은 William et al.(2009)이 발표한 논문에서도 이를 뒷받침 해주고 있다. 그리고 Park et al.(2009) 연구에서도 측정된 입자수로부터 산출한 표면적 농도와 직접 측정기기로 부터 얻은 표면적 농도 사이에 유의한 상관성($R^2 = 0.82\sim 0.93$)이 있음을 보고하고 있다(Woo et al., 2001). 또 트럭내에서 측정된 DustTrak 8520에 의한 $\text{PM}_{2.5}$ 질량농도와 중량법에 의한 호흡성분진 질량농도 사이에서도 상관계수(R^2)가 0.63($n = 30$)이었고(Zhu et al., 2011), 주거지 내·외부의 거친입자(Coarse particles)들에 의한 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 질량농도의 회귀계수는 0.90 이상임을 발표하고 있다(Williams et al., 2000). 지금까지 연구결과를 보면, 대부분이 DustTrak 8520에 의한 $\text{PM}_{2.5}$ 질량농도와 중량법에 의한 $\text{PM}_{2.5}$ 질량농도 비교, 그리고 측정장소간 PM_{10} 및 $\text{PM}_{2.5}$ 질량농도 비교이다. 그런데, 본 연구에서는 중량법에 의해 보정된 DustTrak 8520을 이용하여 얻은 $\text{PM}_{2.5}$ 및 RPM의 질량농도 측정값과 입자수만을 측정하는 기기로 부터 환산한 질량농도 값을 비교한 것이다. 비록 본 연구결과가 시료수가 적어 제한적이지만, 나노크기의 입자상 물질을 포함하는 직독식의 입자수 농도 측정기기에서 얻은 $\text{PM}_{2.5}$ 및 RPM의 질량농도 환산치와 보정된 DustTrak 8520에 의한 $\text{PM}_{2.5}$ 및 RPM 질량농도사이의 관련성을 입증함으로써, 나노크기의 입자수를 측정할 수 있는 직독식 측정기기를 이용해서도 노출평가가 가능하다는 것을 보여 주었다.

V. 결 론

본 연구결과는 필터에 의한 중량법에 의해 보정된 DustTrak 8520의 $\text{PM}_{2.5}$ 및 RPM의 질량농도와 Ptrak 8525 및 Aerotrak 9306으로 측정된 입자수 농도로부터 환산한 $\text{PM}_{2.5}$ 및 RPM의 질량농도 사이에는 상관성이 있음을 보여주었다. 전통적으로 질량농도를 측정하는데 사용되어 온 DustTrak 8520 대신 이와는

다른 측정원리를 사용한 입자수를 측정할 수 있는 비교적 저가의 직독식 측정기기를 이용해서도 질량 농도를 얻을 수 있음을 보여주었다. 이를 통해 나노 크기의 입자상물질의 평가를 고려한 CPC 및 OPC의 활용을 기대해 본다.

감사의 말씀

본 연구는 저자가 미국 미네소타주립대 보건대학원 연수중 Minnesota's Iron Range에서의 타코나이트 철광근로자의 건강 문제를 다룬 동 대학교 보건대학원, 의과대학 및 천연자원 연구소 등이 참여한 프로젝트(\$4.9million)의 일부를 발췌한 것으로 연구 수행에 도움을 준 Ramachandran 지도교수께 감사드립니다.

References

- ACGIH. Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati, Ohio : American Conference of Governmental Industrial Hygienists; 2013. p. 74-77
- Behnouth Y, Christy MK, Matthew SH, Linsey CM. Characterization of airborne particles during production of carbonaceous nanomaterials. *Environ Sci Technol* 2008;42:4600-4606
- Berndt ME, Brice WC. The origins of public concern with taconite and human health: Reserve mining and the asbestos case. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 2008;52:S31-S39
- Brown DM, Wilson MR, MacNee W, Stone V, Donaldson K. Size-dependent proinflammatory effects of ultrafine polystyrene particles: A role for surface area and oxidative stress in the enhanced activity of ultrafines. *Toxicol Appl Pharm* 2001;175:191-199
- Chung A, Chang DP, Kleeman MJ, Perry KD, Cahill TA et al. Comparison of real-time instruments used to monitor airborne particulate matter. *J Air Waste Manage Assoc* 2001;51:109-120
- Cullen RT, Tran CL, Buchanan D, Davis JM, Searl A et al. Inhalation of poorly soluble particles: I. Differences in inflammatory response and clearance during exposure. *Inhal Toxicol* 2000;12:1089-1111
- Dick CAJ, Brown DM, Donaldson K, Stone V. The role of free radicals in the toxic and inflammatory effects of four different ultrafine particle types. *Inhal Toxicol* 2003;15:39-52
- Donaldson K, Beswick PH, Gilmour PS. Free radical activity associated with the surface of unifying factor in determining biological activity. *Toxicol Lett* 1996;88:293-298
- Donaldson K. Mechanisms for toxicity, in vitro in IEH report on: Approaches to predicting toxicity from occupational exposure to dusts. UK: Page Bros.; 1999. p. 17-26
- Donaldson K, Stone V, Gilmour PS, Brown DM, MacNee W. Ultrafine particles: Mechanisms of lung injury. *Philos T Roy Soc A* 2000;358:2741-2749
- EPA. Emission factor documentation for AP-42 section 11.23 : Taconite ore processing, Final report. 1997. p. 1-43. Available from: <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch11/bgdocs/b11s23.pdf>
- EU. Commission recommendation of 18 October 2011 on the definition of nanomaterial (2011/696/EU). *Official Journal L* 275; 2011. p. 38-40
- Hwang JY, Ramachandran G, Raynor PC, Alexander BH, Mandel JH. Comprehensive assessment of exposures to elongate mineral particles in the taconite mining industry. *Ann Occup Hyg* 2013; 57(8):966-978
- Kim JY, Magari SR, Herrick RF, Thomas JS, David CC. Comparison of fine particle measurements from a direct-reading instrument and a gravimetric sampling method. *J Occup Environ Hyg* 2004;1:707-715
- Lin CC, Chen SJ, Huang KL, Hwang WI, Chang-Chien GP et al. Characteristics of metals in nano/ultrafine/fine/coarse particles collected beside a heavily trafficked road. *Environ Sci Technol* 2005;39(21):8113-8122
- Lison D, Lardot C, Huaux F, Zanetti G, Fubini B. Influence of particle surface area on the toxicity of insoluble manganese dioxide dusts. *Arch Toxicol* 1997;71:725-729
- Milind K, Ramachandran G, Andrew M, Barbara M, William AT. Health risk assessment for nanoparticles: A case for using expert judgment. *Journal of Nanoparticle Research* 2007; 9:137-156
- Neulicht R, Shular J. Taconite ore processing, Final report. Retrieved January19, 2011. Available from: <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch11/bgdocs/b11s23.pdf>
- NIOSH. NIOSH Manual of Analytical Method(0600). 3rd ed. Cincinnati, Ohio: National Institute of Occupational Safety and Health; 2003.
- Oberdorster G. Toxicology of ultrafine particles: In vivo studies. *Philos T Roy Soc A* 2000; 358:2719-2740
- Oberdorster G, Ferin J, Lehnert BE. Correlation between particle size, in vivo particle persistence, and lung

- injury. *Environ Health Perspect* 1994;102:173-179
- Oberdorster G, Sharp Z, Atudorei V, Elder A, Gelein R et al. Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhal Toxicol* 2004;16:437-445
- Paik NW. Introduction to industrial hygiene. Korea Shin-Kwang Press.; 2000. p. 105-125
- Park JY, Ramachandran G, Raynor PC, Olson Jr GM. Determination of particle concentration rankings by spatial mapping of particle surface area, number, and mass concentrations in a restaurant and a die casting plant. *J Occup Environ Hyg* 2010;7:466-476
- Park JY, Raynor PC, Andrew DM, Lynn EE, Ramachandran G. Comparison of two estimation methods for surface area concentration using number concentration and mass concentration of combustion related ultrafine particles. *Atmospheric Environment* 2009;43:502-509
- Paul Hewett. IHDataAnalyst V1.27 (IHDA). Exposure Assessment Solutions, Inc. Available from: <http://www.oesh.com/x%20Software/IHDA.php>
- Phee YG, Jung JH, Nam MR. Exposure assessment of PM2.5 in manufacturing industry office building. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2013;23(4):356-366
- Raynor PC, Cebula JI, Spangenberg JS, Olson BA, Dasch JM et al. Assessing potential nanoparticle release during nanocomposite shredding using direct-reading instruments. *J Occup Environ Hyg* 2012;9:1-13
- Ramachandran G. Occupational Exposure Assessment for Air Contaminants. Boca Raton, FL: CRC Press (ISBN: 1-56670-609-2); 2005. p. 109-128
- Ramachandran G, Adgate JL, Hill N, Sexton K, Pratt GC et al. Comparison of short-term variations (15-minute averages) in outdoor and indoor PM2.5 concentrations. *J Air Waste Manage Assoc* 2000; 50:1157-1166
- Ramachandran G, Ostraat M, Douglas EE, Mark MM, Patrick O'Shaughnessy et al. A strategy for assessing workplace exposures to nanomaterials. *J Occup Environ Hyg* 2011;8:673-685
- Ramachandran G, Paulsen D, Watts W, Kittelson D. Mass, surface area and number metrics in diesel occupational exposure assessment. *J Environ Monit* 2005;7:728-735
- Renwick LC, Donaldson K, Clouter A. Impairment of alveolar macrophage phagocytosis by ultrafine particles. *Toxicol Appl Pharm* 2001;172:119-127
- Tran CL, Buchanan D, Cullen RT, Searl A, Jones AD et al. Inhalation of poorly soluble particles: II. Influence of particle surface area on inflammation and clearance. *Inhal Toxicol* 2000;12:1113-1126
- TSI. Model 8520 DustTrak Aerosol Monitor, Model 9306 Aerotrak, Model 8525 Ptrak, Model 9000 Aerotrak, Operation and Service Manual. St. Paul, Minnesota : TSI Incorporated, 2011. Available from: <http://www.tsi.com/Products/>
- Warheit DB, Laurence BR, Reed KL, Roach DH, Reynolds GA et al. Comparative pulmonary toxicity assessment of single-wall carbon nanotubes in rats. *Toxicol Sci* 2004;77:117-125
- William AH, Douglas EE, Ku BK, Andrew DM, Thomas JS et al. Relationships among particle number, surface area, and respirable mass concentrations in automotive engine manufacturing. *J Occup Environ Hyg* 2009;6:19-31
- Williams R, Suggs J, Rodes C, Lawless P, Zweidinger R et al. Comparison of PM2.5 and PM10 monitors. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 2000;10(5):497-505
- Woo K, Chen D, Pui DYH, Wilson WE. Use of continuous measurements of integral aerosol parameters to estimate particle surface area. *Aerosol Science and Technology* 2001;34:57-65
- Yanosky JD, Williams PL, MacIntosh DL. A comparison of two direct-reading aerosol monitors with the federal reference method for PM2.5 in indoor air. *Atmos Environ* 2002;36:107-113
- Zanko L, Niles H, Oreskovich J. Mineralogical and microscopic evaluation of coarse taconite tailings from Minnesota taconite operations. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 2008;52:51-65
- Zhu Y, Thomas JS, Mary ED, Jonathan IL, Robert H et al. Comparing gravimetric and real-time sampling of PM2.5 concentrations inside truck cabins. *J Occup Environ Hyg* 2011;8:662-672