

용접 및 연마에서 발생하는 나노입자 특성 평가 : 수농도 및 입경분포 분석

Characterization of Nanoparticles from Welding and Grinding Processes: Evaluation of Number Concentration and Size Distribution

김부옥 · 김현옥*

Boowook Kim · Hyunwook Kim*

근로복지공단 직업성폐질환연구소 · 가톨릭대학교 의과대학 예방의학교실

¹Occupational Lung Diseases Institute, Korea Workers' Compensation and Welfare Service

²Department of Preventive Medicine, College of Medicine, The Catholic University of Korea

ABSTRACT

Objectives: This study aimed to characterize the nanoparticles produced by welding and grinding processes.

Methods: The number concentrations of particles were mapped to determine the distribution of welding fumes in a workplace atmosphere using a hand-held condensation particle counter. An electrical low-pressure impactor was used for measuring the number concentration and particle size distribution.

Results: High number concentrations were found around arc cutting and welding (grinding) processes. In the worker's breathing zone, the mean number concentration was 655,000 particles/cm³ and the count median diameter (CMD) was 84 nm with several multi peak distributions (~20, 70, 300 nm). However, at a distance of 3 m from the welding position, the number concentration decreased to 153,000 particles/cm³ with a 70 nm single peak size distribution. During a grinding process, peaks with high concentrations of nanoparticles were temporarily observed. The mean number concentration was 1,520,000 particles/cm³, and the CMD was 30 nm. Nanoparticles (<100 nm) made up 58% and 92% of the aerosols produced by welding and grinding processes, respectively.

Key words : Nanoparticle, ELPI, welding fume, grinding particle, exposure assessment

I. 서 론

최근 유럽연합에서는 나노물질의 정의를 새롭게 규정하였는데, 자연적, 비의도적, 그리고 제조된 물질을 모두 포함하는 개별입자, 응집체(agglomerate) 또는 집합체(aggregate)로써, 입자수 크기분포(number size distribution)를 기준으로 최소 1차원의 50% 이상이 1 nm~100 nm 범위의 물질로 정의하였다(EC, 2011).

나노입자는 크기가 작아 흡입시 호흡기 끝부분인 폐포까지 이동하여 침착률이 높는데 15~20 nm 크기의 입자는 50%가 폐포에 침착하고, 100 nm 보다 큰 입자는 20% 미만 침착되며, 10 µm 이상의 입자는 폐

포까지 도달하지 못하고 대부분 상기도에 침착된다(ICRP, 1994). 또한 조직에 침착된 후 다른 조직으로 이동이 가능한데, 입자의 크기가 작을수록 용이한 것으로 알려져 있고(Oberdörster et al, 2004; Kreying et al, 2002), 동일한 입자라도 크기가 작은 나노입자가 단위질량당 독성이 더 큰 것으로 알려져 있다(Donaldson et al, 2000). 따라서 나노입자는 폐질환 및 심혈관계질환과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 왔고(Klot et al, 2002; Pekkanen et al, 2002), 최근에 와서는 우리나라에서도 나노입자의 유해성과 노출 평가에 대한 관심이 증대되었다.

국내에서는 제조나노물질인 탄소나노튜브를 중

*Corresponding author: Hyunwook Kim, 서울시 서초구 반포동 505 가톨릭대학교 예방의학교실, Tel: 02-2258-7363, Fax: 02-590-3820, E-mail: hwkim@catholic.ac.kr, Received: 2012. 4. 19., Revised: 2012. 6. 13., Accepted: 2012. 6. 14.

심으로 노출평가 연구가 있었으나(Han et al, 2008; Lee et al, 2010; 하주현 등, 2010), 비의도적 나노입자에 대한 연구는 부족하였다.

비의도적 나노입자가 발생하는 대표적 공정으로는 금속 제련, 용접, 절단, 가우징 등 고온, 각종 엔진 가동, 소각, 가열 등 연소, 고속 연마 및 드릴링 등의 기계 가공 등으로 알려져 있다(ISO, 2007). 그러나 각각의 공정에서 발생하는 나노입자 농도와 입자 특성에 관한 연구는 매우 부족하다.

한편, 나노입자는 크기가 매우 작아 질량 보다는 수농도로 평가하는 것이 일반적이며, 흡입된 입자의 호흡기내 침착은 입자크기의 영향을 받으므로 크기 분포를 평가하는 것은 중요하다.

따라서 본 연구의 목적은 용접과 연마작업에서 발생하는 입자의 수농도와 크기분포를 평가함으로써, 유럽연합에서 규정하는 나노물질 유무를 확인하고, 향후 나노입자 노출평가 및 작업환경 개선을 위한 기초자료를 제공하고자 실시되었다.

II. 연구대상 및 연구방법

1. 연구대상

본 연구대상은 산업용 보일러를 제조하는 작업장으로 5개 공정으로 이루어져 있다. 4개 공정은 용접이 주요 작업이고, 나머지 1개는 산소 절단 공정이다. 각 공정 사이는 공구함과 적재장으로 구분되어 있지만, 완전히 격리된 구조는 아니다. 본 연구는 4개의 용접 공정 중 용접시간이 가장 길고, 연마작업도 동시에 이루어지는 공정을 대상으로 실시하였다. 작업 과정은 지름이 수 cm인 56개의 작은 수관(water tube)과 블록을 접합하기 위하여 용접하고, 용접 부위에 발생된 비드(weld bead)를 제거하고 표면을 매끄럽게 하기 위하여 연마한다. 블록과 수관의 재질은 연강(mild steel)이고, 용접봉은 4φ, 400 mm 연강봉을 사용한다. 연마는 20 cm (8 inch) 그라인더를 사용하였다(Fig. 1). 1회 작업은 30분에서 1시간 동안 용접한 후 작업장 바닥 청소와 공구 준비를 한 후 10분에서 20분간 연마한다. 하루 총 4회 또는 5회 반복 작업을 한다.

용접흡은 용접시작과 동시에 다량 발생하고, 용접하는 동안 계속 발생한다. 바닥 청소는 작업장 바닥에 퇴적된 분진을 빗자루로 쓸어 담는 과정에서 분진이 발생한다.

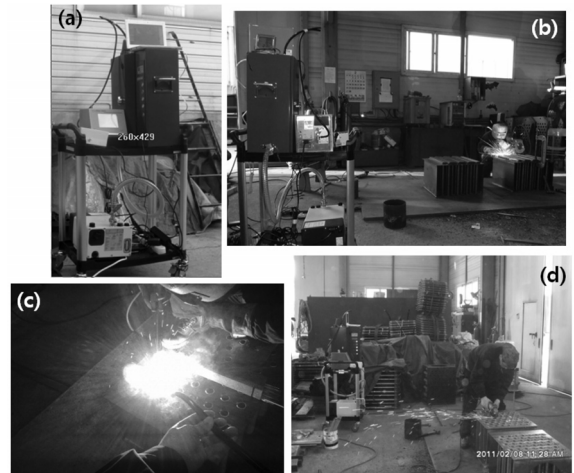


Fig. 1. Various process of welding factory. (a) Electrical low pressure impactor (ELPI) on mobile sampling cart (b) welding process for area sampling (c) welding process for personal breathing zone (d) grinding process.

2. 수농도 지도 (Particle number concentration mapping)

공기중 20~1,000 nm 범위 입자의 수농도를 측정하는 휴대형 CPC(condensation particle counter; P-Trak 8525, TSI Incorporated, USA)로 작업장 Mapping을 실시하였다. Mapping은 작업장 나노입자 평가에 유용한 방법인데, 나노입자 발생원 파악, 작업장 내 나노입자 분포특성 파악, 일시적인 나노입자 발생 확인 등을 위한 용도로 사용된다(Peter et al, 2006; Ramachandran et al, 2011).

본 연구의 Mapping 방법은 작업장 내 25개 지점에

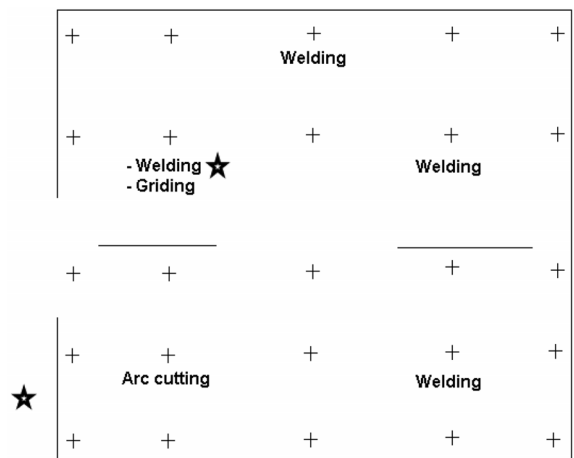


Fig. 2. Maps of the workplace. (+) mapping analysis point, (☆) ELPI sampling point.

서 한 지점에 1분씩 측정하였는데, 오전부터 약 30분 간격으로 총 5회 측정한 후 평균 농도로 나타내었다. 1회 측정하는데 30분(측정시간과 지점간 이동시간의 합) 소요되었고, 점심시간에 작업장 외부 대기중에서 1분간 배경농도를 측정하였다. Mapping 작성은 SigmaPlot(10.0; SYSTAT Software Inc., USA)의 Filled Contour 기능을 이용하였다.

측정위치는 Fig. 2의 (+) 표시된 부분이며, 한 지점의 대표면적은 20 m²이었다(equation).

$$\frac{\text{Total area of a workplace (m}^2\text{)}}{25 \text{ data points}} = \frac{500 \text{ m}^2 (25 \times 20)}{25 \text{ data points}} = 20 \text{ m}^2$$

(equation)

2. 전기저압임팩터를 이용한 수농도 및 입자특성 평가

실시간으로 공기 중 입자의 수농도와 입경분포(7 nm~10 µm, 12단)를 측정하는 전기저압임팩터(ELPI, electrical low pressure impactor, Dekati Ltd, Finland)를 이용하여 용접과 연마에서 발생하는 입자의 수농도와 특성을 평가하였다. ELPI 여과지는 입자의 되튐현상(bouncing)을 줄이기 위해 그리스가 도포된 알루미늄 여과지를 사용하였고, 1초 간격으로 측정하였다. 이동실험장치에서 약 6시간 동안 측정하였고, 점심시간인 12시 부터 13시까지는 작업이 없었다. ELPI와 용접위치간 거리는 용접지점에 따라 변하는데, 1.5 m에서 3 m이었다. 더불어 용접지점에서 30 cm 떨어진 근로자 호흡위치(breathing zone, BZ)에서 13분간(13:18:00~13:31:00) 측정한 후, 지역시료 측정결과와 비교하였다.

3. 배경농도 평가

나노입자 평가를 할 때 배경농도 측정위치와 시점에 대해 규정된 방법은 없고, 연구자와 작업장 상황에 따라 다르게 적용되고 있다(윤충식, 2011). 본 연구에서는 점심시간과 작업장 외부에서 20분간(16:53:29~17:13:35) 측정하였다.

4. 동영상 녹화

동영상을 녹화하여 시간대별 세부작업 구분에 활용하였다.

5. 결과처리 및 통계분석

ELPI 측정 결과는 대수확률지(log probability plot)

에서 직선성을 나타내었다. 따라서 수농도와 중앙직경(count median diameter, CMD)의 대표치로 기하평균(geometric mean, GM)과 기하표준편차(geometric standard deviation, GSD)를 계산하였다. 또한 엑셀(2007; Microsoft Inc., USA)에서 입자크기에 따른 수농도 누적분포곡선을 작성하여 100 nm 미만 크기의 입자 비율을 산출하였다. 또한 용접, 연마, 청소, 배경농도 등 세부작업에 따른 수농도 비교를 위해 SPSS(14.0; IBM Inc., USA) 통계프로그램을 이용해 분산분석과 Scheffe's 사후검증을 하였다. 도표의 작성은 SigmaPlot 10.0과 Matlab(R2010a; MathWorks Inc., USA)을 이용하였다.

III. 연구결과

1. 수농도 지도

Fig. 3은 휴대형 CPC로 측정한 작업장 내부 수농도 농도지도이다. 평균 100,000 ~ 160,000 particles/cm³으로, 대기중 수농도(79,100 particles/cm³) 보다 1.3~2배 높았다. 산소절단 공정에서 140,000 ~ 160,000 particles/cm³으로 가장 높았고, 본 연구대상 용접공정은 140,000 ~ 150,000 particles/cm³이었다. 각 공정을 중심으로 농도가 높았고, 거리가 멀어질수록 농도는 감소하였다.

2. 세부작업별 나노입자 수농도 및 입자특성

Table 1, Fig. 4-5는 ELPI로 측정한 시간대별 수농도

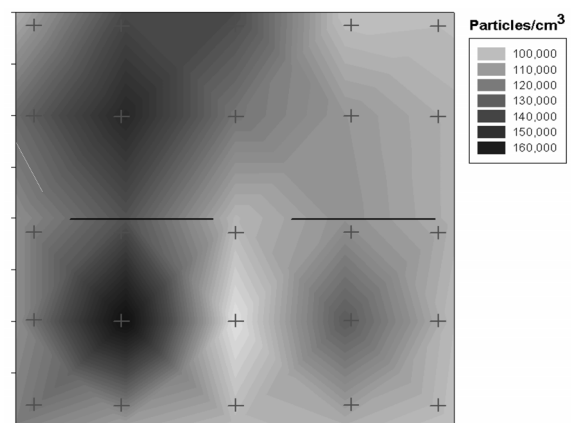


Fig. 3. Maps of mean number concentration measured by CPC. outdoor backgrounds were 79,100 particles/cm³. (+) Mapping point.

결과이다. 평균 농도는 118,000 particles/cm³이었고, 세부 작업에 따라 농도 변화가 컸다. 용접 중 평균 농도는 153,000 particles/cm³으로 평균 59,000 particles/cm³인 배경농도 보다 약 2.6배 높았고, 불규칙한 피크형태로 나타났는데(Fig. 4의 A). 청소 및 준비 작업시 농도는 평균 62,000 particles/cm³으로 배경농도 보다 다소 높았다. 연마 중에 발생하는 나노입자는 약 1분간 고농도 피크로 나타났는데(Fig. 4의 B), 연마 작업 전체의 평균은 85,000 particles/cm³으로 용접의 절반 수준이지만, 피크의 평균은 1,520,000 particles/cm³으로 매우 높았다. 나노입자 비율은 용접은 평균 72%, 연마평균 71%이었으나, 연마 피크의 평균은 92%로써 대부분이 나노입자이었다. 그리고 연마 CMD의 GSD 평균은 4.0으로 매우 컸다.

세부작업별 분산분석 결과 통계적으로 유의한 차

Table 1. Number concentration, CMD and percentage of nanoparticle by tasks in the welding and grinding process

Task	Time	NC (#/cm ³)		CMD (GSD)	<100 nm
		GM (GSD)	Group		
Welding	188	153×10 ³ (2.0)	1	50 (2.7)	72
Cleaning	37	62×10 ³ (2.4)	3	60 (2.6)	63
Grinding	Mean	85×10 ³ (2.1)	2	67 (4.0)	71
	Peak	1,520×10 ³ (1.4)	30 (2.1)	92	
BAG*	In	59×10 ³ (2.8)	4	65 (2.6)	65
	Out	26×10 ³ (1.3)	5	50 (2.5)	73
Total		118×10 ³	P<0.00161	(2.7)	70

* BAG: background, In: indoor, Out: outdoor

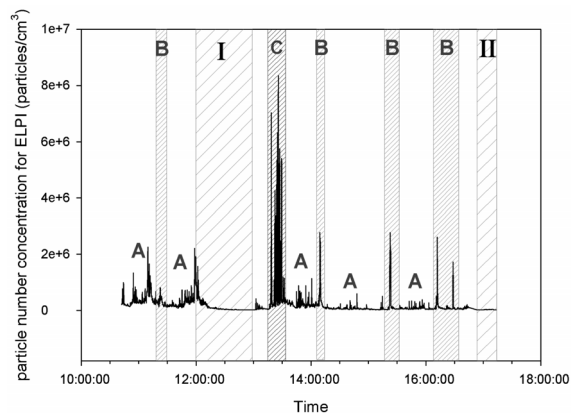
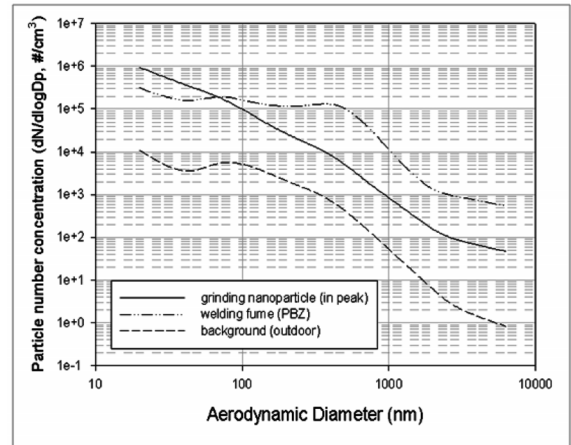
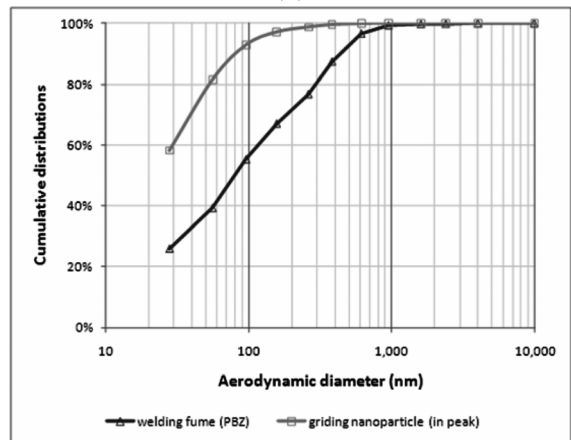


Fig. 4. Time series of number concentration at workplace and outdoor: Events were (A) welding at area sampling, (B) grinding, and (C) welding at BZ: (I) workplace background (lunch time), (II) outdoor background.



(A)



(B)

Fig. 5. (a) Average particle size distribution by task (during a grinding, welding, and outdoor background). (b) Cumulative distribution for percentage of nanoparticle

이가 있었고($P<0.001$), Scheffe's 사후검증 결과 용접, 연마, 청소 그리고 배경농도 순으로 농도가 높았다.

3. 호흡기영역과 지역시료에서의 용접흄 특성 비교

BZ에서 수농도는 평균 655,000 particles/cm³으로 지역시료(153,000 particles/cm³)와 비교하여 약 4.3배 높았다(Table 2). 입자의 특성도 달랐는데, BZ의 CMD는 87 nm, 나노입자 비율은 58%였지만, 지역시료는 CMD 50 nm, 나노입자 비율은 72%로써 BZ에서 입자크기가 더 크고, 나노입자 비율은 낮았다(Table 2). Fig. 6은 BZ와 지역시료의 입경분포를 나타내는데, BZ는 20, 70, 300 nm 다중피크분포를 나타내지만, 지역시료에서는 70 nm 단일피크분포이었다. 이상의

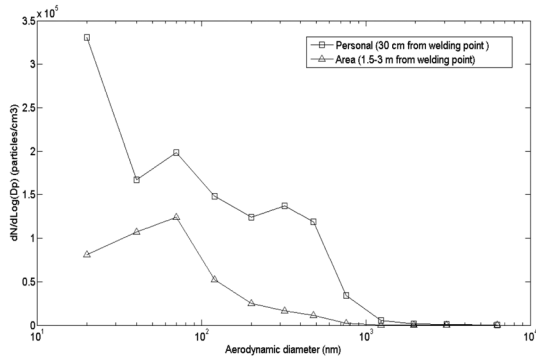


Fig. 6. Average size distribution (dN/dLog Dp) according to the distance from welding source. The y-axis represents the relative number concentration, whereas the x-axis the geometric mean of ELPI each channel

Table 2. Number concentration, CMD and percentage of nano-particle by sampling types in welding

Sampling type	Sampling time	NC (#/cm ³)	CMD (GSD)	<100 nm
		GM (GSD)		
Area*	188	153×10 ³ (2.0)	50 (2.7)	72
Personal†	10	655×10 ³ (2.9)	84 (2.8)	58

* 1.5 ~ 3 m away from welding point

† 30 cm away from welding point

결과로 보아 작업장 공기 중에서 입경분포는 변하고 수농도는 감소한다는 것을 알 수 있다.

4. 배경농도 평가 결과

작업이 없는 점심시간의 평균 수농도는 59,000 particles/cm³으로써, 외부 배경농도(26,000 particles/cm³)와 비교하여 약 2.3배 높았는데, 그 이유는 작업장 내부에 잔류하는 용접흄이 외기와 희석되거나 외부로 방출되는데 일정한 시간이 소요되기 때문이다 (Table 1).

IV. 고 찰

용접과 연마가 반복되는 공정에서 발생하는 나노입자를 수농도와 입경분포 분석을 중심으로 평가하였다. 휴대형 CPC를 이용한 Mapping을 통해 용접과 산소절단 작업이 이루어지는 공정에서 나노입자가 발생한다는 것을 확인하였고, 용접지점에서 거리가 멀어지면 나노입자 농도가 감소한다는 것도 확인할 수 있었다. 추후 산소 절단 작업시 발생하는 나노입

자 특성 평가도 필요하였다.

다중피크분포(20, 70, 300)로 발생한 용접흄은 공기 중을 이동하면서 단일피크(70)분포로 변하고 농도는 급격히 감소하였는데, 20 nm 나노입자가 빠르게 응집하여 70 nm 이상으로 변하는 것으로 판단되며, 300 nm 이상의 입자는 20 nm 입자와 마찬가지로 응집된 후 소멸된 것인지, 지역시료(~3 m)까지 이동하는 과정에서 이동속도의 차이, 작업장내 기류 등 기타 요인으로 인하여 큰 입자가 ELPI에 포집되지 않은 것인지는 불분명하다.

Stephenson 등(2003)은 연강 SMAW(shielded metal arc welding) 용접시 SMPS(scanning mobility particle sizer)와 OPC(optical particle counter)를 이용하여 나노입자 평가를 하였다. 용접지점에서 8.5 m 떨어진 곳에서 측정하였는데, 평균 200,000 particles/cm³이었으며, CMD는 120 nm, GSD 2.07이라고 하였다.

EEPS(Engine Exhaust Particle Sizer)를 이용하여 알루미늄 마찰교반용접(friction stir welding, FSW)에서 발생하는 나노입자를 평가한 연구(Pfefferkorn 등, 2010)에 의하면, 용접지점에서 20 cm와 92 cm에서의 최고농도는 10~100배까지 차이가 있었고, 30 nm와 550 nm 이중피크분포를 나타낸다고 하였다.

Buonanno 등(2011)은 FMPS(fast mobility particle sizer)를 이용하여 자동차 공장의 다양한 용접에서 평가하였는데, 평균 100,000 particles/cm³ 정도이었고, 국소배기 시설이 없는 산소 아세틸렌 용접이 평균 230,000 particles/cm³으로 가장 높다고 하였다. 그리고 입경분포는 저항용접은 60 nm 단일피크분포를 나타내었지만 GMAW(Ar 80%, CO₂ 20%) 용접은 10 nm, 93 nm 이중피크분포를 나타낸다고 하였다.

Zimmer 등(2002)에 의하면 GMAW에서 CO₂ 가스 농도 증가는 작은 크기의 나노입자 발생을 증가시키는데, 핵화(nucleation) 반응에 의해 금속 증기의 발생을 증가시키고, 결과적으로 나노입자 농도가 증가한다고 하였다.

이상의 내용을 종합하여 볼 때, 용접작업에서 나노입자가 고농도로 발생한다는 점은 일치된 결과이지만, 용접 종류별 나노입자 발생수준과 CMD, GSD, 입경분포 등으로 대표되는 입자특성은 각 연구마다 결과가 달랐다. 그 이유는 용접흄 발생에 영향을 미치는 요인들이 각각의 연구마다 다르고, 용접흄 분석에 사용된 실시간 측정기기의 종류도 다르기 때문이다. 따라서 용접방식, 보호가스 종류와 비율, 모재

및 용가재의 화학적 조성, 전압, 전류 조건 등에 따라 체계적인 추가 연구가 필요하다. 그리고 ELPI, SMPS, FMPS, EEPS 등의 실시간측정기기는 기기마다 측정 범위가 다르고, 입경 분해능과 최소 측정시간에 차이가 있기 때문에 CMD, GSD 및 입경분포는 다르게 나타날 수 있다. 따라서 향후 측정기기간 비교 연구도 필요하다.

연마작업에서는 기계적 마찰에 의해 입자가 발생되므로, 용접흡과 비교하여 상대적으로 크기가 큰 입자가 발생하는 것으로 생각되어 왔다. 그러나 Maynard와 Zimmer의 연구(2002)를 통해 연마과정에서도 고농도의 나노입자 발생된다는 것이 확인되었고, 본 연구도 이들의 연구와 일치된 결과를 보였다.

한편 나노입자는 작업이 끝난 후에도 일정시간 동안 공기 중에 잔류하므로, 배경농도 평가는 작업 시작 전이나 작업장 외부에서 하는 것이 바람직할 것이다.

V. 결 론

본 연구는 산업용 보일러를 제조하는 작업장에서 휴대형 CPC를 이용하여 Mapping 평가를 실시하였고, 용접과 연마가 반복적으로 이루어지는 작업을 대상으로 ELPI를 이용하여 수농도와 입경분포를 분석하였다.

1. Mapping 결과 용접과 연마작업 부근에서 나노입자가 고농도로 발생하였고, 산소 절단작업에서도 고농도의 나노입자가 발생한다는 것을 알 수 있었다.

2. 용접시 발생하는 나노입자는 작업자 호흡위치에서 CMD 84 nm, 다중피크분포(~20, 70, 300 nm)로 고농도(655,000 particles/cm³)였으나, 3 m 떨어진 위치에서는 CMD 50 nm, 단일피크분포(70 nm) 이었고, 농도는 77% 감소(153,000 particles/cm³)하였다.

3. 연마 중에도 일시적으로 고농도(1,520,000 particles/cm³) 나노입자가 발생하며, 이때의 CMD는 30 nm이었다.

4. 세부작업에 따른 평균 농도는 통계적으로 유의한 차이가 있었고, 용접, 연마, 청소, 배경농도 순으로 나타났다.

5. 용접흡과 연마입자의 나노입자 비율은 각각 58%, 92%로써 유럽연합에서 정의하는 나노물질(50%이상 나노입자)에 해당되었다.

용접과 연마 중에는 나노입자가 고농도로 발생하고, 농도와 입자 특성은 세부작업에 따라 달랐다. 따라서 다양한 용접과 연마 작업을 대상으로 추가 연구가 필요하고, 근로자의 나노입자 노출저감을 위한 적절한 관리기준도 설정되어야 할 것이다.

참고문헌

- 윤충식. 나노물질의 측정전략의 주요 쟁점. 한국환경보건학회지 2011; 37 (1): 73~79
- 하주현, 신용철, 이승철, Samuel Y.Paik, 김부욱 등. 탄소나노튜브 표면 처리 실험실 종사자의 공기중 나노입자 노출에 관한 연구. 한국환경보건학회지 2010; 36 (5): 343~350
- Buonanno G, Morawska L, Stabile L. Exposure to welding particles in automotive plants. J Aerosol Sci 2011; 42: 295~304
- Donaldson K, Stone V, Gilmour PS, Brown DM, MacNee W. Ultrafine particles : mechanisms of lung injury. Phil Trans R Soc Lond A 2000; 358: 2741~2749
- European Commission. New nanomaterial definition. 2011. available from: URL:<http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/11/1202>
- Han JH, Lee EJ, Lee JH, So KP, Lee YH et al. Monitoring multiwalled carbon nanotube exposure in carbon nanotube research facility. Inhal Toxicol 2008; 20: 741~749
- International Commission on Radiological Protection. Human respiratory tract model for radiological protection. Annals. ICRP 1994;24(1-3). ICRP publication 66
- International Organization for Standardization. ISO TR 27628. Nanotechnologies - workplace atmosphere ultrafine, nanoparticle and nano-structured aerosol-inhalation exposure characterization and assessment, ISO, Geneva, 2007
- Klot SV, Wolke G, Tuch T, Heinrich J, Dockery DW, et al. Increased asthma medication use in association with ambient fine and ultrafine particle. Eur Respir J 2002; 20: 691~702
- Kreying WG, Semmler M, Erbe F, Mayer P, Takenaka S, et al. Translocation of ultrafine insoluble iridium particles from lung epithelium to extrapulmonary organs is size dependent but very low. J Toxicol Environ Health 2002; 65 (20): 1513~1530
- Lee JH, Lee SB, Bae GN, Jeon KS, Yoon JU et al. Exposure assessment of carbon nanotube manufacturing workplaces. Inhal Toxicol 2010; 22:

369~381

- Maynard AD, Zimmer AT. Evaluation of grinding aerosols in terms of alveolar dose: The significance of using mass, surface area and number metrics. *Ann Occup Hyg* 2002; 46(supplement 1): 315~319
- Oberdörster G, Sharp Z, Atudorei V, Elder A, Gelein R, Kreyling W, Cox C. Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhalation Toxicology* 2004; 16: 437~445
- Pekkanen J, Peter A, Hoek G, Tiittanen P, Brunekreef B, et al. Particulate air pollution and risk of ST-segment depression during repeated submaximal exercise tests among subjects with coronary heart disease. The exposure and risk assessment for fine and ultrafine particle in ambient air (ULTRA) study. *Circulation* 2002; 106: 933~938
- Peter TM, Heitbrink WA, Evans DE, Slavin TJ, Maynard AD. The mapping of fine and ultrafine particle concentrations in an engine machining and assembly facility. *Ann Occup Hyg* 2006; 50: 249~257
- Pfefferkorn FE, Bello D, Haddad G, Park JY, Powell M, et al. Characterization of exposures to airborne nanoscale particles during friction stir welding of aluminum. *Ann Occup Hyg* 2010; 54 (5): 486~503
- Ramachandran G, Ostraat M, Evans DE, Methner MM, O'Shaughnessy P, D'Arcy J et al. A strategy for assessing workplace exposure to nanomaterials. *J Occup Environ Hyg* 2011; 8: 673~685
- Stephenson D, Seshadri G, Veranth JM. Workplace exposure to submicron particle mass and number concentrations from manual arc welding of carbon steel. *AIHAJ* 2003; 64: 516~521
- Zimmer AT, Baron PA, Biswas P. The influence of operating parameters on number-weighted aerosol size distribution generated from a gas metal arc welding process. *J Aerosol Sci* 2002; 33: 519~531