

조선업 용접작업자의 공기 중 총 망간 및 입경별 망간 농도와 혈중 망간농도에 관한 연구

박종수¹ · 김판기² · 정지연^{2*}

¹한국산업안전보건공단, ²용인대학교

A Study on the Total, Particle Size-Selective Mass Concentration of Airborne Manganese, and Blood Manganese Concentration of Welders in a Shipbuilding Yard

Jong Su Park¹ · Pan Gyi Kim² · Jee Yeon Jeong^{2*}

¹KOSHA, ²Yong In University

ABSTRACT

Objectives: Welding is a major task in shipbuilding yards that generates welding fumes. A significant amount of welding in shipbuilding yards is done on steel. Inevitably, manganese is present in the base metals being joined and the filler wire being used and, consequently, in the fumes to which workers are exposed. The objective of this work was to characterize manganese exposure associated with work area, total and particle size-selective mass concentration, and compare the mass concentrations obtained using a three-piece cassette sampler, size-selective impactor sampler and blood manganese concentrations.

Materials: All samples were collected from the main work areas at one shipbuilding yard. We used a three piece cassette sampler and the eight stage cascade impactor sampler for the airborne manganese mass concentration of total and all size fractions, respectively. In addition, we used the results of health examination of workers sampled for airborne manganese.

Results: The order of high concentration of airborne manganese in shipbuilding processes was as follows; block assembly, block erection, outfitting installation, steel cutting, and outfitting preparation. The percentages of samples that exceeded the OES of the ministry of employment and labor by the cassette sampling method was 12.5%, however 59.1% of sampled workers by the impactor sampling method exceeded the TLV of the ACGIH.

Conclusions: Even though the manganese concentrations in blood of workers exposed to higher airborne manganese concentration were higher than among those exposed to lower concentrations, there was no difference in blood manganese concentrations among work duration. The data analyzed here by characterizing size-selective mass concentrations indicates that the inhaled manganese of welders in shipbuilding yards could be mostly manganese-containing respirable particle sizes.

Key words: manganese, shipbuilding yard, welding fume

I. 서 론

망간은 흰색의 금속물질로 지구 표층, 지하, 수자원 등에 광범위하게 분포하며 인체 등 생명체가 생

명을 유지하는데 필수적인 중요한 금속이다. 망간의 인체흡수 경로는 주로 곡물을 통해서 이루어지지만 음용수를 통해서 이루어지기도 한다. 망간이 우리 몸에 흡수되면 약 5% 정도만이 축적되고 대부분 배출

*Corresponding author: Jee Yeon Jeong, TEL: 031-8020-3208, E-mail: jyjung@yongin.ac.kr

Department of Occupational and Environmental Health, College of Environment and Science, Yong In University, 134 Yongindaehak-ro, Cheoin-gu, Yongin-si 449-714

Received: November 16, 2015, Revised: December 2, 2015, Accepted: December 5, 2015

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.

되는데, 몸으로 흡수되는 망간의 양이 과도하게 많아지면 건강 이상을 초래한다. 망간에 대한 과도한 노출은 배터리 제조 작업, 원광을 분쇄하여 망간합금을 만드는 작업, 자동차조립 또는 선박을 건조하기 위한 용접작업, 주강 및 주물 작업 등 대부분 직업적으로 망간을 취급하는 경우에 이루어진다. 고농도의 망간 특히, 흡(fume)형태의 금속 망간 및 망간화합물에 노출되는 경우 감정적으로 잘 흥분하고 조울증을 유발하며, 심하게 땀과 침을 흘리는 등 중추신경에 대한 건강이상 발생했다는 보고가 있고(Chandra et al., 1979), 46세 이전의 젊은 나이에 파킨슨 증후군을 앓게 되는 경우 초기에 망간에 노출되면 증상을 악화시킨다는 연구결과도 있다(Racette et al., 2006). 우리나라에서도 CO₂ 용접을 10년 이상 수행한 근로자가 망간에 중독되었다는 결과가 보고되어 있다(Choi et al., 1998).

국내 산업현장에서 용접봉 사용 양은 2000년대 들어 급격한 증가세를 보이고 있는데, 1990년대 12만 2천 톤에서 2000년대 30만톤 이상으로 10년간 약 2.5배 증가하였다고 한다. 또한 용접작업이 과거 피복아크용접에서 CO₂ 아크용접으로 전환되면서 용접작업에서 발생하는 용접흡의 양이 1.5 ~ 2.2배 높게 발생하는 것으로 알려졌다(Lee et al., 2000).

망간의 공기 중 농도와 생체 내(혈중 또는 뇨중) 농도와의 상관성에는 상반된 연구결과들이 있다. 혈중망간이 작업환경 중의 망간농도를 반영하지 못한다고 연구결과도 있고(Roels et al., 1987), 반대로 유의한 상관성을 가진다고 보고한 연구결과도 있다(Smyth et al., 1973). 신경학적 검사결과에 대해서도 혈중망간과 신경검사 간에 유의한 상관관계가 있다고 주장한 연구결과도 있고(Sadek et al., 2003), 두 지표 간에 아무런 상관관계가 없었다는 결과도 있다(Smyth et al., 1973). 국내 연구경우 신경학적 검사 중 인지능력과는 관련성이 적지만 운동능력과는 관련성이 있다고 발표하였다(Kim et al., 1999). 그 밖에 혈중 망간과 관련한 몇 가지 연구사례들을 보면, Kim et al.(1999)은 망간의 짧은 반감기(4 ~ 40일)와 인체의 높은 제거율 때문에 혈중 및 뇨중 망간은 근로자 건강이상을 찾아내는 민감한 지표로 활용하는데 한계가 있고, 오히려 생체 내 농도수준보다 개인의 누적 노출력을 파악하는 것이 보다 믿을만한 지

표가 될 수 있다고 주장하고 있다.

Klaassen(1974)은 혈액에 존재하는 망간 중 대부분은 간에서 신속하게 처리하여 담즙으로, 나머지는 소변으로 제거되는데 이러한 인체의 빠른 제거율은 생물학적 노출지표로서의 혈중망간의 유용성을 제한한다고 주장 하였으며, Hong et al.(1998)은 반감기가 특히 짧은 망간의 경우 혈중 망간 보다는 작업관련 특성인 용접 경력과 용접 작업시간이 신경행동기능의 변화를 설명하는 타당한 변수가 될 수 있다고 주장하고 있다. Kim et al.(1994)은 일부 망간 취급 근로자에 대한 망간노출과 건강장해와의 관련성 연구에서 망간작업 연수와 혈중 및 뇨중 망간과의 관련성은 상관관계가 없었으며 공기 중의 망간농도와 혈중 및 뇨중 망간과의 관련성은 매우 유의한 관계를 보였다고 하였다.

그동안 국내에서 실시된 공기 중 망간농도와 생체 내 농도와의 상관성 조사는 대부분 공기 중 망간의 총 농도만을 가지고 생체 내 농도와 비교를 실시한 것이었다. 그러나 입자크기에 따른 인체 내 흡입정도가 다르기 때문에 입경구분 없이 총 농도만으로 비교하는 것보다는 망간입경에 따른 생체 내 농도와의 상관성을 살펴보는 것과 공기 중 망간농도 변화에 따른 혈중 망간농도의 변화량은 어느 정도 되는지 살펴보는 것도 의미 있는 작업이라 판단된다. 따라서 본 연구에서는 국내 조산업 용접작업자를 대상으로 용접 흡 중의 망간노출을 총 분진속의 망간농도뿐만 아니라 먼지 입경에 따라 흡입성, 흥광성, 그리고 호흡성농도로 구분해 보고, 그에 따른 생체 내 혈중 망간농도와의 상관성 등을 평가해 보고자 한다.

II. 연구대상 및 방법

1. 연구대상

망간 노출작업의 특성을 가장 잘 대변될 수 있는 업종 및 작업으로 구성되어 있는 국내 조산업체인 A 조선소를 대상으로, 절단(steel cutting), 블록조립(block assembly), 블록 탑재(block erection), 의장제작(outfitting preparation), 그리고 의장설치(outfitting installation) 공정의 용접 작업자 88명을 대상으로 작업 중 용접흡에 대한 시료채취를 2009년 겨울철에 실시하였으며, 이들 작업자에 대한 혈중 망간농도 역

시 2009년 산업안전보건법에 의거한 망간에 대한 정기건강진단 결과를 활용하여 분석하였다.

2. 연구방법

1) 시료채취 및 분석

선박은 선박의 외형과 내부배관 및 편의시설 등을 제작하는 과정을 통해 건조(建造)된다. 외형을 제조하는 과정은 배를 주문한 선주의 요구에 맞게 배 모양을 설계하는 단계, 설계도에 따라 선박의 주요 소재인 철판(연강)에 절단 선 등을 그리는(drawing) 단계, 절단 선을 따라 철판을 자르는 단계(절단공정), 절단된 선체 등의 각 부분을 용접 및 연마 작업 등을 통해 작은 블록(block)을 제조하는 단계(블록조립 공정) 및 작은 블록들을 용접등의 방법으로 대형 블록을 제조하여 선체 외형을 완성하는 단계(블록탑재 공정)로 구성되어 있다. 그리고 선체 내부에 설치되는 편의시설(utility) 및 편의시설에 온수 등을 공급하기 위한 배관 등을 제작하고(의장제작 공정), 선체 내부에 장착하는 과정(의장설치 공정)을 거치게 된다. 이번 현장조사에도 조선건조의 주요공정에 따라 용접작업을 실시하는 작업자를 대상으로 공기 중 용접흡을 채취하였다.

셀룰로오스 에스테르 막여과지가 장착된 3단 카세트를 타이콘 튜브를 이용하여 펌프(Sensidyne, Gilian BDX-II, FL, USA)에 연결한 후 2.0 L/min 유량으로 작업자의 호흡영역에서 시료채취를 실시하였다. 동시에 동일 작업자를 대상으로 입경별 시료채취가 가능한 8단 캐스케이드 임팩터(Cascade impactor) 시료채취기(MSP Corporation, Marple Series 290, MN, USA)를 또 다른 펌프(Sensidyne, Gilian BDX-II, FL, USA)를 이용하여 2.0 L/min 유량으로 시료를 채취하였다. 캐스케이드 임팩터의 제1단부터 8단까지에 장착한 여과지는 마일러 여과지(mylar substrate)였으며, 마지막 단(backup stage)에는 PVC 여과지를 장착하였다. 캐스케이드 임팩터는 각 단마다 채취되는 물질의 입경분포를 달리하여 시료를 채취할 수 있는 시료채취기이다. 따라서 동 채취기를 활용하면 채취된 입자상 물질을 흡입성물질, 흉곽성물질, 그리고 호흡성물질로 구분하여 채취된 시료를 평가할 수 있는 장점이 있다.

모든 시료채취용 펌프는 시료채취 전후에 비누거

품 유량보정기를 활용하여 유량보정을 실시하였다.

채취된 시료는 실험실로 운반하여 미국 산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)의 분석방법 7302를 사용하여 유도결합플라즈마분광도계(Perkin Elmer, Optima 4300DV, USA)로 시료 중 망간 농도를 분석하였다.

2) 자료분석

8단 캐스케이드 임팩터 시료채취기를 사용하여 측정된 흡입성(Inhalable), 흉곽성(Thoracic), 그리고 호흡성(Respirable) 망간농도는 ACGIH/ISO의 먼지입자 크기 기준 및 Simpson's rule에 따라 계산된 농도이다(Hinds, 1986; Lippman, 1999). 측정된 자료의 통계 처리는 SPSS version 18.0(IBM Corporation, Armonk, NY, USA)를 이용하여 실시하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 공기 중 망간 농도

1) 카세트 및 임팩터로 측정된 농도

3단 카세트로 측정된 공기 중 망간 농도는 전체 평균이 0.106 mg/m³이었다. 이는 조선업 용접 흡의 농도를 조사한 Byeon et al.(1995)의 1.64 mg/m³, Choi et al.(1998)의 0.18 mg/m³ 및 Kim et al.(2002) 0.15 mg/m³ 보다는 낮았다. 연구결과들을 보면 최근에 들어올수록 농도가 낮아지는 경향을 보이는데 이는 여러 기술적인 요인들이 작업환경 개선에 기여한 결과일 것으로 판단된다.

공정별로는 조립공정(block assembly)이 0.17 mg/m³로 가장 높았고 의장제작공정(outfitting preparation)이 0.025 mg/m³으로 가장 낮았으며, 두 공정 간의 평균 망간 농도에는 통계적으로 유의한 차이가 있었다(p<0.05). 조립공정의 망간 농도가 높은 이유는 극히 일부 사상 작업을 실시하는 것을 제외하면 대부분 CO₂ 용접작업으로 구성되어 있고, 근로자들이 환기가 불충분한 실내(통상 shop으로 칭함)에서 작업을 수행하며, 더욱이 탑재공정(block erection)으로 가전 단계로 선박의 외형을 구성하는 작은 단위의 구조물인 블록을 만드는 공정이어서 작업 공간이 탑재부서에 비해 매우 좁은 특성이 있기 때문으로 추정된다.

탑재공정 또한 조립공정과 마찬가지로 대부분 CO₂ 용접작업으로 구성되는데 작업은 외부 및 해상에서 이루어져 바람 등에 의한 환기와 발생하는 용접 흡이 정체가 되지 않는 것이 조립공정 보다 근로자들의 망간 노출 농도가 낮은 원인으로 추정된다. 각 공정별 측정농도들의 산포성을 나타내는 기하표준편차 값을 보면 가장 낮게 평가된 의장제작공정이 3.4였고 가장 높게 평가된 공정은 탑재공정으로 5.9였다. 기하표준편차 값이 3.0이상인 경우 측정치간 차이가 크다고 볼 수 있는데, 이는 배를 건조하는 조선업 경우 다른 업종에 비해 노출농도의 변이가 큰 옥외작업이 많기 때문인 것으로 보이며, 또한 작업공정에 따라 옥내작업이라고 할지라도 환기장치 설치여부, 작업방법에 따라 노출수준의 차이가 매우 크기 때문인 것으로 판단된다.

상대적으로 공기 중 망간 농도가 매우 낮은 수준을 나타낸 의장제작공정은 조립공정과 마찬가지로 실외 보다는 환기가 불충분한 실내에서 작업이 수행되지만 작업 구성상 20% 정도는 알루미늄 및 스테인레스 소재인 선박용 배관을 제작하기 위한 티그(TIG) 또는 알곤 용접으로 구성되어 있기 때문으로 판단된다. 티그 또는 알곤 용접의 경우 가스 및 온수 등을 공급하기 위해 사용되는 배관 같은 내부 편의 시설을 설치하기 위해 사용하는 용접으로 이때 사용되는 배관의 재질은 주로 알루미늄이거나 스테인레스 재질이기에 때문에 모재 자체에 거의 망간이 포함되어 있지 않다고 본다. Lee et al.(2,000)에 따르면 CO₂ 용접의 경우 모재인 연강과 용접봉에 망간 함량이 0.8 ~ 2.5% 함유되어 있지만, 티그 용접 소재인 스테인

레스와 알곤 용접의 주 소재인 알루미늄에는 망간이 함유되어 있지 않다고 보고하고 있다. 따라서, 망간이 함유된 모재를 용접하는데 사용되는 CO₂ 용접비율이 높은 공정일수록 용접 흡 중의 망간농도는 높게 나타날 가능성이 높다.

고용노동부(MoEL, 2010)의 망간의 노출기준인 1.0 mg/m³을 초과한 근로자는 조립공정에서 6명, 탑재공정에서 4명, 의장 공정에서 1명 등 총 11명으로 전체 조사 대상 근로자의 12.5%를 차지했다. 이는 Choi et al.(1998)이 조선업 용접작업을 대상으로 조사한 결과인 초과율 19.2% 보다는 약간 낮은데, 이들의 조사시점이 본 조사 보다 약 10년 전에 이루어진 결과로서 현재는 그 당시 보다 환기상태 등이 많이 개선된 것 등에 따른 것으로 판단된다. 미국 정부산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH, 2011)의 망간에 대한 권고기준(Threshold Limit Value, TLV; 0.2 mg/m³)에 대한 초과율은 52.3%(46명)로 고용노동부 노출기준을 근거로 평가한 초과율의 4배 이상인 것으로 평가되었다.

임팩터에 의한 조선업 공기 중 망간 농도는 전체 기하평균이 0.1932 mg/m³로 카세트에 의한 측정결과보다 그 농도가 약 2배 정도 높았다. 공정별 공기 중 망간 농도 또한 카세트 측정법에 의한 농도보다 전체적으로 모두 높게 측정되었지만 가장 차이가 많은 공정이 조립 공정이고 가장 적은 공정이 의장제작 공정이었다. 그러나 전체적인 농도 순서는 카세트 법에 의한 측정결과와 같았고, 조립공정과 의장제작공정의 평균 망간 농도 또한 카세트 법에 의한 측정결과와 같이 통계적으로 유의한 차이를 보였다(p<0.05).

Table 1. Airborne manganese(Mn) concentration by Sampling methods both three piece cassette and cascade impactor

Process	N	Mn concentration by cassette (mg/m ³)				Mn concentration by impactor (mg/m ³)			
		GM*	GSD†	>OES‡	>TLV§	GM	GSD	>OES	>TLV
Steel cutting	10	0.0605	4.0		4	0.1095	3.4		5
Outfitting preparation	7	0.0250	3.4		1	0.0558	3.7		2
Outfitting installation	16	0.0994	4.9	1	8	0.1860	3.9	1	9
Block assembly	33	0.1715	5.2	6	22	0.2791	4.3	10	24
Block erection	22	0.1138	5.9	4	11	0.2198	5.0	5	12
Total	88	0.1068	5.6	11	46	0.1932	4.3	16	52

*: Geometric mean; †: Geometric standard deviation; ‡: The numbers of samples exceeding occupational exposure standard(1.0 mg/m³) by MoEL in Korea; §: The numbers of samples exceeding TLV(0.2 mg/m³) by ACGIH.

Table 2. Airborne manganese concentrations of three different particle sizes by processes in a shipbuilding yard

Process	N	IPM [*] (mg/m ³)			TPM [†] (mg/m ³)			RPM [‡] (mg/m ³)		
		GM [§] (GSD)	>OES [¶]	>TLV [‡]	GM(GSD)	>OES	>TLV	GM(GSD)	>OES	>TLV
Steel cutting	10	0.0886 (3.3)		5	0.0622 (3.3)		5	0.0433 (3.4)		4
Outfitting preparation	7	0.0526 (3.8)		2	0.0494 (3.8)		2	0.046 (3.8)		2
Outfitting installation	16	0.1785 (3.9)	2	9	0.1720 (3.9)	2	9	0.1635 (3.9)	2	9
Block assembly	33	0.2657 (4.3)	10	24	0.2532 (0.5)	9	24	0.2402 (4.5)	9	24
Block erection	22	0.2100 (5.0)	5	12	0.2011 (5.2)	5	12	0.1909 (5.5)	5	12
Total	88	0.1808 (4.4)	17	52	0.1668 (4.8)	16	52	0.1526 (4.9)	16	51

^{*}: Inhalable particulate matter; [†]: Thoracic particulate matter; [‡]: Respirable particulate matter; [§]: Geometric mean; ^{||}: Geometric standard deviation; [¶]: The numbers of samples exceeding occupational exposure standard(1.0 mg/m³) by MoEL in Korea; [‡]: The numbers of samples exceeding TLV(0.2 mg/m³) by ACGIH.

2) 흡입성, 흉곽성 호흡성 망간 농도

임팩터로 채취된 시료를 분석하여 입경특성에 따라 흡입성, 흉곽성, 그리고 호흡성 입경의 망간농도가 어떻게 되었는지를 계산한 결과가 Table 2이다.

흡입성 입경의 기하평균 망간농도는 0.1808 mg/m³, 흉곽성 및 호흡성 입경의 망간 농도도 각각 0.1668 mg/m³과 0.1526 mg/m³로 나타났으며, 입경 종류에 따른 농도차이는 크지 않음을 알 수 있었다. 이는 전체 흡입성 입자상 물질 중 호흡성에 해당하는 입자상 물질이 차지하는 비율이 높은 경우에만 나타나는 것으로, 조선업의 용접작업 경우 용접 흄 등의 입자상 물질은 인체의 폐포까지 침투가 용이한 물질이 대부분 발생하고 있다는 사실을 입증하는 결과이다. 이는

노출기준 초과율을 보아도 같은 경향을 보이는데, 즉 흡입성 먼지로 평가하였을 때 노출기준을 초과한 건수나 흉곽성 또는 호흡성 먼지로 평가하였을 때 노출기준을 초과한 건수가 거의 같음을 알 수 있다.

2. 혈중 망간 농도

1) 공정별 혈중 망간 농도

Table 3은 공정별 용접작업자의 혈중 망간 농도를 정리한 결과이다.

조사대상 전체 근로자의 혈중 망간 농도는 기하평균 18.44 μg/L로 Choi et al.(1998)이 동 업종에 대하여 조사한 결과인 17.0 μg/L와는 비슷하였으나 Moon et al.(1998)의 조사결과 31 μg/L 보다는 절반정도의

Table 3. Blood manganese concentrations of welders by processes in a shipbuilding yard

Industry	N	MnB [*] (μg/ℓ)		≥ BEI [†]
		GM [‡] (GSD) [§]	Range	
Steel cutting	10	18.56(8.75)	7.3 ~ 35.4	
Outfitting preparation	7	14.54(5.46)	11.6 ~ 26.1	
Outfitting installation	16	14.65(5.09)	6.9 ~ 27.9	
Block assembly	33	20.64(11.57)	11.44 ~ 52.24	2
Block erection	22	19.50(6.31)	11.3 ~ 36.0	1
Total	88	18.44(7.96)	6.9 ~ 52.24	3

^{*}: Manganese concentration in blood; [†]: Biological exposure index of blood Mn in Korea(= 36 μg/L); [‡]: Geometric mean; [§]: Geometric standard deviation.

수준이었다. 조사 대상 근로자의 혈중 망간 농도를 공정별로 살펴보면, 평균 혈중 망간 농도가 가장 높은 공정은 조립공정으로 20.64 $\mu\text{g/L}$ 이었으며, 탑재공정이 이와 유사한 19.50 $\mu\text{g/L}$, 그리고 가공부가 18.56 $\mu\text{g/L}$ 로 나타났다. 반면, 상대적으로 낮은 부서는 14.54 $\mu\text{g/L}$ 로 조사된 의장제작부였고 의장설치부(14.65 $\mu\text{g/L}$)의 혈중 망간 수준 또한 낮은 편이었다. 이와 같은 차이는 의장제작부의 작업은 상대적으로 망간 분진의 발생이 적은 티그 및 알곤 용접이 다른 공정에 비해 상대적으로 많았기 때문으로 판단된다. 탑재 및 조립 공정의 높은 혈중 망간 수준은 이들 공정의 작업은 대부분 CO₂ 아크용접으로 구성되어 있고 용접 소재 또한 망간 성분이 높게 함유된 연강 등을 사용하기 때문인 것으로 판단된다.

현재 고용노동부(MoEL, 2013)의 혈중 망간에 대한 생물학적 노출기준인 36 $\mu\text{g/L}$ 초과한 근로자는 조사대상 88명 중 3.4%인 3명이었다. 그러나 Sakong et al.(2000)이 자동차 제조공장 용접공을 대상으로 연구한 결과에 따르면 혈중 망간 농도 10 $\mu\text{g/L}$ 이상인 그룹인 경우 신경행동학적으로 이상을 초래할 가능성이 있다고 보고하고 있는데, 이 기준에 따른다면 이번 조사 경우 조사대상자의 98%가 이 농도 수준으로 초과하는 것으로 나타났다. 또한 Hong et al.(1998)에 따르면 뇌자기 공명 영상에서 고신호 강도를 보이기 시작하는 위험 수준은 혈중 망간이 50 $\mu\text{g/L}$ 이상인 경우인데 이 수준의 혈중망간을 나타내는 근로자도 조립공정에서 1명이 관찰되었다.

2) 작업 경력별 혈중 망간 농도

Table 4는 조사대상 근로자를 용접작업 경력별로

구분하여 살펴본 혈중 망간 농도 결과이다.

용접경력별 혈중 망간 값은 5년 미만 경력자를 제외하면 경력별 혈중 망간 농도에는 큰 차이가 없었고 경력의 증감에 따른 일정한 경향 또한 없었다. 이는 경력별 혈중 망간 농도에 대한 통계처리 결과로도 확인되었는데, 혈중망간 농도가 가장 낮은 경력인 5년 미만 근로자와 혈중 망간 농도가 가장 높은 경력 15 ~ 20년 근로자의 혈중 망간 농도를 t-test한 결과, 두 그룹의 혈중 망간 농도에는 유의한 차이가 없었다(p>0.05).

또한 경력과 혈중망간에 대한 분산분석의 결과도 경력별 혈중 망간에는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났으며(p>0.05), 경력별 농도를 다중 비교한 결과에서도 24년 이상 경력자의 혈중망간 농도가 5년 미만 경력자 다음으로 낮았고 경력 10 ~ 11년의 혈중 망간이 5 ~ 10년 보다 낮게 나타나는 등 경력 증가와 혈중 망간 증가에는 상관성을 볼 수 없었다. 이는 망간의 반감기를 일반적으로 알려진 4 ~ 40일이 아닌 Newland et al.(1987)이 주장하는 중추신경계에 축적되었을 경우의 반감기 54 ~ 260일을 적용해도 모두 1년 이내로 짧아 인체에 축적된 망간이 비교적 빨리 체외로 배출되기 때문으로 판단된다.

3. 공기 중 망간입자 크기가 혈중 망간농도에 미치는 영향

임팩터를 이용하여 입경 크기별로 시료를 채취하여 분석한 각 입경 단계별 공기 중 망간 농도와 혈중 망간 농도 간에는 상관성을 확인할 수 있었다. 확인 결과 모든 입경 군이 양의 상관성을 보였다. 입경별 상관계수는 0.23 ~ 0.30의 범위 내에 모두 있었으며,

Table 4. Blood Mn concentration by working duration in a shipbuilding yard

Duration(yrs)	N	MnB* ($\mu\text{g}/\ell$)		≥ BEI†
		GM‡ (GSD)§	Range	
Duration ≤ 5	4	13.34(1.45)	11.97 ~ 15.00	
5 < Duration ≤ 10	15	16.76(7.35)	7.30 ~ 34.89	
10 < Duration ≤ 15	2	20.32(2.70)	17.8 ~ 23.2	
15 < Duration ≤ 20	34	20.38(7.38)	11.3 ~ 40.52	1
20 < Duration	24	18.44(8.67)	6.9 ~ 52.24	2
Total	88	18.44(7.96)	6.9 ~ 52.24	3

*: Manganese concentration in blood; †: Biological exposure index of blood Mn in Korea(= 36 $\mu\text{g/L}$); ‡: Geometric mean; §: Geometric standard deviation.

Table 5. Correlation coefficient of blood and airborne manganese concentration by particle sizes

	MnB*	>21.3	14.8	9.8	6.0	3.5	1.55	0.93	0.52	0.52>
MnB	1									
>21.3	0.3 (0.045) [†]	1								
14.8	0.232 (0.029)	0.959 (0.001)	1							
9.8	0.281 (0.008)	0.97 (0.001)	0.962 (0.001)	1						
6.0	0.291 (0.006)	0.969 (0.001)	0.964 (0.001)	0.982 (0.001)	1					
3.5	0.248 (0.02)	0.965 (0.001)	0.97 (0.001)	0.978 (0.001)	0.977 (0.001)	1				
1.55	0.3 (0.004)	0.975 (0.001)	0.931 (0.001)	0.961 (0.001)	0.965 (0.001)	0.969 (0.001)	1			
0.93	0.247 (0.02)	0.816 (0.001)	0.787 (0.001)	0.865 (0.001)	0.837 (0.001)	0.871 (0.001)	0.893 (0.001)	1		
0.52	0.23 (0.03)	0.813 (0.001)	0.784 (0.001)	0.86 (0.001)	0.831 (0.001)	0.868 (0.001)	0.895 (0.001)	0.972 (0.001)	1	
<0.52	0.258 (0.015)	0.808 (0.001)	0.739 (0.001)	0.815 (0.001)	0.807 (0.001)	0.816 (0.001)	0.883 (0.001)	0.897 (0.001)	0.95 (0.001)	1 (0.001)

*: Manganese concentration in blood; †: p value.

Table 6. Correlation coefficients between blood manganese concentrations and related factors

	MnB*	MnA [†]	AMC [‡]	IPM [§]	TPM	RPM [¶]	Age	Dr [‡]
MnB	1							
MnA	0 (0.018)	1						
AMC	0.274 (0.01)	0.968 (0.0001)	1					
IPM	0.272 (0.01)	0.967 (0.0001)	0.999 (0.0001)	1				
TPM	0.268 (0.012)	0.962 (0.0001)	0.995 (0.0001)	0.998 (0.0001)	1			
RPM	0.263 (0.013)	0.954 (0.0001)	0.988 (0.0001)	0.993 (0.0001)	0.998 (0.0001)	1		
Age	0.184 (0.086)	0.343 (0.001)	0.372 (0.0001)	0.374 (0.0001)	0.377 (0.0001)	0.381 (0.0001)	1	
Dr	0.227 (0.034)	0.423 (0.0001)	0.427 (0.0001)	0.429 (0.0001)	0.431 (0.0001)	0.433 (0.0001)	0.813 (0.0001)	1

*: Manganese concentration in blood; †: Airborne manganese concentration by cassette sampling; ‡: Airborne manganese concentration by impactor sampling; §: Inhalable particulate matter; ||: Thoracic particulate matter; ¶: Respirable particulate matter; ‡: Duration; ||: p value.

Table 7. Multiple linear regression of Log10 Mn in blood by model

Model	Independent variable	Unstandardized regression coefficient		Standardized regression coefficient	t value	p value
		B	standard error	β		
Model 1	Constant	1.325	0.026		51.024	0
	log10 Mn	0.063	0.021	0.303	2.953	0.004
	R square	0.082				
	F value	8.722				

입경별 상관성은 그 차이가 별로 없었다. 이와 같은 결과는 분진의 입경 크기가 혈중 망간에 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 말하는 것으로 이해할 수 있는데, 호흡성 입경에 해당하는 망간일수록 체내흡수가 높아 혈중망간 농도가 높을 것이고, 따라서 입경의 크기가 작을수록 혈중 망간 농도와는 양의 상관성이 높을 것이라는 일반적인 예상과는 다른 결과를 보이고 있다. 따라서 이 부분은 앞으로 추가적인 연구가 필요한 부분으로 판단된다.

혈중 망간에 영향을 미치는 요인으로 판단되는 인자, 즉 공기 중 망간 농도(3단 카세트로 채취된 총 농도, 임팩터로 채취된 흡입성농도, 흉곽성농도, 호흡성농도), 연령, 그리고 작업경력을 독립변수로 하여 상관관계를 분석한 결과에서도, 연령을 제외한 모든 인자들이 상관계수 값이 0.227 ~ 0.274로 크지는 않았지만 유의한 양의 상관성을 보였다(Table 6).

한편, 이번 연구에서 혈중 망간과 연령과의 상관성만이 유의성이 없는 것으로 나타났는데, 측정결과를 살펴보면 30대가 20대나 40대 그리고 50대에 비해 혈중 망간 농도가 낮았다. 혈중 망간 농도는 공기 중 망간 농도, 그리고 이러한 작업에 얼마나 종사했는지가 단순히 연령보다는 혈중 망간 농도에 더 영향을 크게 미칠 수 있다. 따라서 연령과 혈중 망간과의 상관성에 대한 연구는 본 연구와 같이 상관성을 확인하지 못한 결과도 있지만 양의 상관성(Baldwin et al., 1999), 음의 상관성(Montes et al., 2008)을 보인 연구 결과도 있다.

혈중 망간과 공기 중 망간 농도 등 관련 인자들의 관계를 이용하여 혈중 망간 농도를 추정하는 모델을 제시하고자 혈중 망간을 종속변수로 하고 카세트로 측정된 공기 중 총 망간 농도, 임팩터로 측정된 호흡성 망간 농도, 그리고 연령 등 인구학적 변수를 독립

변수로 하여 중 다중회귀분석을 실시하였다. 2가지 이상의 독립 변수를 모두 포함하는 모델 중에는 통계적으로 유의한 모델이 없었고 1개의 독립 변수만을 포함하는 경우에만 다수의 모델들이 통계적으로 유의하였다. 이렇게 통계적으로 의미가 있는 모델 중 경력을 독립변수로 하는 모델은 설명력이 특히 낮아 제외시킨 결과, 공기 중 망간농도 관련 모델들만 남았는데 이들의 설명력 및 유의확률 등은 매우 유사하였다. 즉, 공기 중의 망간 농도를 총분진으로 평가하나, 흡입성, 흉곽성, 그리고 호흡성으로 구분하여 평가하여도 혈중 망간 농도를 설명하는 설명력은 매우 유사하였으며, 이는 용접작업자의 용접 흡의 대부분이 호흡성 먼지 입경에 해당하기 때문인 것으로 판단된다. Table 7은 카세트로 채취한 공기 중 총 망간 농도를 독립 변수로 하는 모델을 선택한 결과인데, 설명력(0.082)이 낮기는 하지만 3단 카세트로 채취된 공기 중 망간 농도가 1 단위 변할 때마다 혈중 망간농도에는 0.063의 영향을 미치는 것으로 나타났고 통계적으로도 유의함을 보여주었다.

IV. 결 론

조선업에서 용접작업은 반드시 필요한 작업이지만 용접 작업시 발생하는 용접흡에 대한 작업자의 노출은 여러 건강상의 문제를 야기하여 이와 관련된 많은 연구들이 진행되어 왔었다. 본 연구는 조선업에서 제조공정에 따라 용접작업시 발생하는 용접 흡의 입경분포에 따른 공기 중 망간 노출수준을 평가해 보고 동시에 작업자의 혈중 망간 농도는 어떠한 영향을 받는지를 알아보기 위함이었다. 조사결과, 공정별 공기 중 망간농도는 조립, 탑재, 의장설치, 절단 그리고 의장제작 공정 순이었으며, 카세트로 채취된 시료

경우 전체 88개의 시료중 11(12.5%)개의 시료가 우리나라 고용노동부 망간 노출기준을 초과하였고, 임팩터로 측정된 시료 경우 미국 ACGIH의 노출 권고 기준은 46(52.3%)개 시료나 초과하는 것으로 평가되었다.

용접 작업자의 혈중 망간농도는 공기 중 망간농도가 높은 곳에 근무하는 작업자 경우 상대적으로 혈중 망간농도가 높게 나타났으나, 용접 작업경력에 따른 혈중 망간농도 차이는 없는 것으로 나타났다. 이는 망간의 체내 반감기가 짧아 체내에 그 축적성이 낮기 때문인 것으로 판단된다. 공기 중 먼지입경별 망간농도를 보면 전체 흡입성 입경의 망간중 대부분이 호흡성입경에 해당하는 망간이었다. 따라서 공기 중의 망간농도를 총분진으로 평가하나, 흡입성, 흉곽성, 그리고 호흡성으로 구분하여 평가하여도 혈중 망간농도를 설명하는 설명력은 매우 유사하였으며, 이는 용접작업자의 용접 흙의 대부분이 호흡성 먼지입경에 해당하기 때문인 것으로 판단된다.

References

- ACGIH. TLVs and BEIs based on the documentation of the threshold limit values and biological exposure indices. Cincinnati, Ohio: ACGIH; 2011.
- Baldwin M, Mergler D, Larribe F, Belanger S, Tardif R, Bilodeau L, Hudnell K. Bioindicator and exposure data for a population based study of manganese. *Neurotoxicology* 1999;20:343-354
- Byeon SH, Park SH, Kim CI, Park JJ, Yang JS, et al.. A study on the airborne concentration of welding fume for some manufacturing industries. *Korean Ind Hyg Assoc J* 1995;5(2):172-183
- Chandra SV, Shukla GS, Saxena DK. Manganese-induced behavior dysfunction and its neurochemical mechanism in growing mice. *J neurochem* 1979; 33(6):1217-1221
- Choi HC, Kim KY, An SH, Hyun DW. Manganese concentration in blood and urine of manganese exposed welding workers. *Korean J Occup Environ Med* 1998;10(4):534-547
- Hinds WC. Data analysis. In: Lodge JP, Chan TL (eds.). *Cascade impactor sampling and data analysis*. Akron, Ohio: American Industrial Hygiene Association; 1986.
- Hong YS, Lim MA, Lee YH, Cheong HK, Kim JY, et al.. Three cases of high signal intensity by brain magnetic resonance imaging in CO₂ arc welders. *Korean J Occup Environ Med* 1998;10(2):290-298
- Kim DG, Moon DH, Lee CK, Park MH, Ham SA, et al.. A study on exposure level of noise, manganese, and welding fume to welders in small size industry. *Inje Med* 2002;23(5):557-566
- Kim JY, Lim HS, Cheong HK, Paik NW. A study on the manganese exposure and health hazards among manganese manufacturing workers. *The Kor J of Occup Med* 1994;6(1):98-112
- Kim KS, Kim YH, Jin YW, Kim EA, Yang JS, et al.. Factors associated with psychoneurobehavioral outcomes in workers exposed to manganese. *Korean J Occup Environ Med* 1999;11(2):213-228
- Kim YH, Kim KS, Yang JS, Park IJ, Kim E, et al.. Increase in signal intensities on T1-weighted magnetic resonance images in asymptomatic manganese-exposed workers. *Neuro Toxicology* 1999;20:901-908
- Klaassen CD. Biliary excretion of manganese in rats, rabbits, and dogs. *Toxicol Appl Pharmacol* 1974; 29:458-468
- Lee YS, Yoon CG, Park JA, Lee SK, Chae JH, et al.. Evaluation of chromium and manganese exposure in welders and establishment of efficient preventive measures for fume exposure. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2000;10(1):32-44
- Lippman M. Rationale for particle size-selective aerosol sampling. In: Vincent JH (ed.). *Particle size-selective sampling for particulate air contaminants*. Cincinnati, Ohio: ACGIH; 1999.
- Ministry of Employment and Labor (MoEL). Occupational exposure limits for chemicals and physical agents: MoEL notice 2013-38. Sejong: MoEL; 2010.
- Montes S, Riojas-Rodríguez H, Sabido-Pedraza E, Ríos C. Biomarkers of manganese exposure in a population living close to a mine and mineral processing plant in Mexico. *Environ Res*. 2008;106(1):89-95
- Moon DH, Park YM, Lee CW, Park MH, Park SK, et al.. Manganese exposure and its health hazards of welders in shipbuilding manufacturing industry. *Inje Med* 1998;19(2):697-711
- Newland MC, Cox C, Hamada R, Oberdorster G, Weiss B. The clearance of manganese chloride in the primate. *Fundam Appl Toxicol* 1987;9:314-328
- Racette BA, Tabbal SD, Jennings D, Good LM, Perlmutter JS, et al.. A rapid method for mass screening for parkinsonism. *Neurotoxi* 2006;27(3):357-361
- Roels H, Lauwerys R, Buchet JP, Genet P, Sarhan MJ, et al.. Epidemiological survey among workers exposed to

manganese: Effects on lung, central nervous system, and some biological indices. *Am J Ind Med* 1987;11(3):307-327

Sadek AH, Rauch R, Schulz PE. Parkinsonism due to manganism in a welder. *Int J Toxicol* 2003;22: 393-401

Sakong J, Chung JH, Sung NJ, Lee JJ, Park JT, et al..

Assessment of neurobehavioral performance among welders exposed to manganese. *Korean J Occup Environ Med* 2000;12(3):327-337

Smyth LT, Ruhf RC, Whitman NE, Dugan T. Clinical manganism and exposure to manganese in the production and processing of ferromanganese alloy. *J Occup Med* 1973;15(2):101-109