

생물학적 노출평가를 통한 타겟 제조업 근로자의 공정별 인듐 노출위험성 조사

원용림 · 최윤정 · 최성렬 · 김은아*

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

Investigating the potential exposure risk to indium compounds of target manufacturing workers through an analysis of biological specimens

Yong Lim Won · Yoon jung Choi · Sungyeul Choi · Eun-A Kim*

Occupational Safety and Health Research Institute, Korea Occupational Safety and Health Agency

ABSTRACT

Objectives: Along with the several cases of pulmonary disorders caused by exposure to indium that have been reported in Japan, China, and the United States, cases of Korean workers involved in processes that require handling of indium compounds with potential risk of exposure to indium compounds have also been reported. We performed biological monitoring for workers in various target manufacturing processes of indium, indium oxide, and indium tin oxide(ITO)/indium zinc oxide(IZO) in domestic factories.

Materials: As biological exposure indices, we measured serum concentrations of indium using inductively coupled plasma mass spectrometry, and Krebs von den Lungen 6(KL-6) and surfactant protein D(SP-D) using enzyme-linked immunosorbent assays. We classified the ITO/IZO target manufacturing process into powdering, mixing, molding, sintering, polishing, bonding, and finishing.

Results: The powdering process workers showed the highest serum indium level. The mixing and polishing process workers also showed high serum indium levels. In the powdering process, the mean indium serum concentration in the workers exceeded 3 µg/L, the reference value in Japan. Of the powdering, mixing, and polishing process workers, 83.3%, 50.0%, and 24.5%, respectively, had values exceeding the reference value in Japan. We suppose that the reason of the higher prevalence of high indium concentrations in powder processing workers was that most of the particles in the powdering process were respirable dust smaller than 10 µm. The mean KL-6 and SP-D concentrations were high in the powdering, mixing, and polishing process workers. Therefore, the workers in these processes who were at greater risk of exposure to indium powder were those who had higher serum levels of indium, as well as KL-6 and SP-D. We observed significant differences in serum indium, KL-6, and SP-D levels between the process groups.

Conclusions: Five among the seven reported cases of “indium lung” in Japan involved polishing process workers. Polishing process workers in Korea also had high serum levels of indium, KL-6, and SP-D. The outcomes of this study can be used as essential bases for establishing biological monitoring measures for workers handling indium compounds, and for developing health-care guidelines and special medical surveillance in Korea.

Key words : indium, indium tin oxide, indium zinc oxide, target

I. 서 론

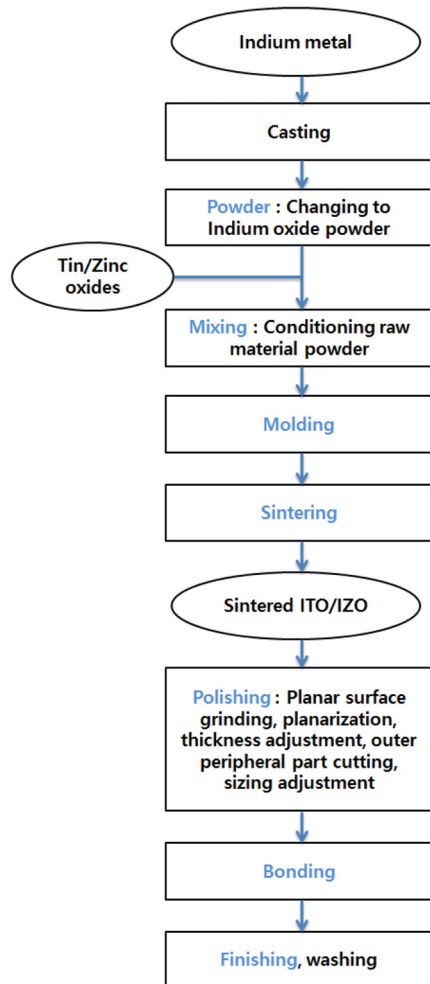
우리나라 디스플레이 산업은 세계 최고 수준의 기술력을 바탕으로 꾸준한 성장을 이루었으며 2012년 세계

시장점유율 1위(48.4%), 국내 GDP의 3.4%(44조원)를 이루는 등 우리나라 경제를 견인하고 있는 주요 산업 중 하나이다(MOTIE, 2013). 대부분의 디스플레이패널은 인듐을 핵심원료로 인듐-주석산화물(Indium tin

*Corresponding author: Eun-A Kim, Tel: 052-703-0870, E-mail: toxneuro@kosha.or.kr
Occupational Health Research Department, Occupational Safety and Health Research Institute, 400 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 681-230
Received: June 24, 2014, Revised: August 28, 2014, Accepted: August 29, 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.

oxide, ITO) 또는 인듐-아연산화물(Indium zinc oxide, IZO)타겟(Target)을 제조하고 스퍼터(Sputter)공정을 통해 필름 또는 유리표면에 투명한 전도성 물질을 코팅시키는 과정을 거쳐 생산되는데 타겟은 디스플레이패널 제조를 위한 1차 가공품으로 분말(Powder), 혼합(Mixing), 성형(Molding), 소결(Sintering), 연마(Polishing), 접합(Bonding), 마무리(Finishing)공정을 거쳐 만들어진 다(Figure 1). 국내 디스플레이패널 제조업체는 패널제작에 필요한 타겟의 상당부분을 일본으로부터의 수입에 의존해 왔으나 국내 타겟 제조업체의 기술개발과 생산설비 확충으로 현재는 70%이상을 국내에서 공급받는 것으로 조사되었다(Yi et al., 2012).



(adopted from MHLW, 2010)

Figure 1. Target manufacturing process

2003년 일본에서 인듐에 의한 최초의 직업병사례가 발표된 후 일본, 미국, 중국 등에서 총 10건의 인듐폐질환사례가 보고되었는데 이중 타겟 제조업에서 8건이 발생하였고 재생업과 디스플레이 제조업에서 각각 1건씩 발생하였다(Cummings et al., 2012). 일본의 경우 인듐취급 근로자 건강보호와 작업환경개선을 위한 가이드라인을 준비하여 근로환경 개선을 위한 조치를 취하고 있으나, 우리나라의 경우 인듐의 노출기준이 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 규정되어있지만 작업환경측정대상과 특수건강진단 대상물질이 아니므로 거의 관리가 되지 않고 있을 뿐 만 아니라 대기업을 중심으로 일부 건강관리가 시도되고 있는 실정이다(MOEL, 2013).

작업환경측정의 한계를 보완하고 근로자 개개인의 건강영향 상태를 파악하기 위해서는 생물학적 노출평가가 요구된다. 인듐의 생물학적 노출평가를 위한 시료로서 전혈, 소변, 혈장, 혈청 등을 선택한 사례가 있었는데, 혈장 중 인듐은 장기간의 노출을 안정적으로 반영할 수 있으나 시료채취 과정이 번거롭고, 소변 중 인듐은 시료채취는 용이하나 최근의 노출에 영향을 받을 수 있으며 소변 중 농도가 낮아 분석이 쉽지 않음이 보고되기도 하였다(Miyaki et al., 2003; Hoet et al., 2012). 따라서 현재 일본에서는 시료의 전처리, 검출한계 등을 고려하여 혈청을 가장 적절한 시료로 제안하고 있으며 폐손상 지표인 Krebs von den lungen-6(KL-6)와 혈청 인듐의 농도 관계를 토대로 혈청 인듐 농도는 $3 \mu\text{g}/\text{L}$ 미만을 유지할 것을 권고하였다. 또한 폐손상 지표로서 KL-6 $500 \text{ U}/\text{mL}$ 미만, surfactant protein-D(SP-D) $110 \mu\text{g}/\text{L}$ 미만을 참고치로 제안하고 있으나 일본 이외의 국가에서는 아직 인듐의 생물학적 노출지표 및 기준이 설정되어있지 않다(MHLW, 2010).

산업안전보건연구원에서는 2012~2013년 국내 일부 인듐취급사업을 대상으로 근로자의 건강영향을 평가하였으며 인듐에 의한 간질성변화의 사례와 생물학적 지표로서 KL-6의 유용성 등에 대해 보고하였다(Choi et al. 2013; Won et al. 2013). 그러나 공정 특성에 따른 분석결과는 제공하지 못하여 작업환경개선 및 근로자 보호 대책 수립을 위한 기초 자료로서 부족한 점이 있었다. 따라서 조사 참여자의 과거 근무력과 현공정 작업분석 등의 보완을 통해 타겟 제조업의 공정별 특성 및 차이를 분석하여 제공하고자 하였다. 또한 우리나라

라에서 타겟을 생산하는 일본계 업체와의 비교를 통해 제도적 관리의 시급성을 확인해보고자 하였다.

II. 연구방법

1. 연구대상

국내에서 디스플레이패널제작용 ITO/IZO타겟을 생산하는 업체 중 일본계 회사 2곳을 포함하여 연구 참여에 동의한 5개 사업장을 대상으로 하였다. 연구는 산업안전보건연구원 생명윤리심의위원회의 심의를 거친 후 진행되었으며 자발적으로 서면 동의한 사람들만 연구에 참여하였다. 타겟 생산 공정에 근무하거나 정기적인 현장출입이 있는 남성근로자 153명을 노출군으로 하였으며 현재 타겟 제조업체에서 사무, 영업, 물류 등을 담당하며 과거 직업적인 인듐 노출이 없었던 남성근로자 38명을 대조군으로 설정하였다. 현재 근무하는 회사 직전에 동일업종의 같은 공정에 근무하였던 경력은 현 공정 근무기간에 포함하였으며, 같은 업종의 다른 공정에 근무하였던 경력이 있거나 인듐이외에 호흡기에 영향을 줄 수 있는 물질에 직업적 노출이 있었던 사람은 분석에서 제외하였다. 또한 인듐노출이 아닌 다른 폐질환에 의한 KL-6, SP-D 등의 폐손상 지표의 상승이 분석에 미치는 영향을 배제하기 위해 호흡기질환 병력자는 대상에서 제외하였다.

2. 시료채취 및 분석

인듐, KL-6, SP-D의 분석을 위해 정맥혈을, 코티닌과 크레아티닌 분석을 위해 소변을 채취하였다. 정맥혈은 응고촉진제가 포함된 8.5 mL 진공채혈관을 이용하여 채혈한 후 30분간 응고시키고 1000 × g에서 10분간 원심분리하여 혈청을 분리하였다. 분리된 혈청과 소변은 분석목적에 맞게 소분하여 냉장보관 상태로 실험실로 운반하였으며 분석 전까지 -80℃에 보관하였다.

혈청 중 인듐 분석은 유도결합플라즈마-질량분석기(810-MS, Bruker, Australia)로 분석하였다. 표준시료는 시판되고 있는 인듐표준용액(Inorganic Ventures, USA) 1,000 µg/mL를 사용하여 0.1 ~ 1.6 µg/L 범위로 조제하였으며 희석액은 0.1% Triton-X 100과 0.1% 질산을 사용하였다. 샘플은 희석액으로 20배 희석하여 주입하였

으며 검출한계는 0.0072 µg/L이었다.

혈청 중 KL-6의 분석은 EIDIA사의 enzyme-linked immunosorbent assay(ELISA) kit(EIDIA Co., Ltd., Japan)을 사용하였다. 시료는 1차 101배 희석하여 분석하였으며 검량선을 벗어나는 시료에 대해 51 ~ 201배까지 희석배수를 달리하여 재분석하였다. 분석절차 및 반응시간은 시약 제조사에서 제안하는 방법에 따라 진행하였으며 microplate reader(Infinite M200, Tecan, Austria)를 이용하여 405 nm에서 흡광도를 읽고 492 nm의 흡광도로 보정하였다. 모든 시료는 2회 분석 후 평균값을 사용하였다.

혈청 중 SP-D의 분석에는 Human surfactant protein D ELISA kit(BioVendor, Czech)를 사용하였다. 모든 시료를 11배 희석하여 시약 제조사에서 제안하는 방법에 따라 분석을 진행하였으며 microplate reader를 이용하여 450 nm에서 흡광도를 읽고 630 nm의 흡광도로 보정하였으며 2회 분석 후 평균값을 사용하였다.

흡연보정을 위한 소변 중 코티닌의 분석은 HPLC(1290, Agilent, USA)를 이용하였다. 코티닌 표준 용액(1000 mg/L)을 30% 메탄올 용액으로 희석하여 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 mg/L 표준용액을 제조하여 검량선 작성에 사용하였고 내부 표준용액으로 2-페닐-2-이미다졸린 10 mg/L 30% 메탄올 용액을 사용하였다. 소변 3 mL에 내부 표준용액 0.2 mL를 가하고 0.1 mL의 10 N 수산화칼륨 용액을 가한 후 3 mL의 디클로로메탄/n-부탄올 용액(9:1)을 가하여 10분간 교반하였다. 아래의 유기용액 층을 2 mL 취하여 증발건조시키고 잔사에 0.25 mL의 30% 메탄올 용액을 가하여 녹인 용액을 0.2 µm 여과막에서 여과한 후 HPLC에 주입하였다. 검출 파장은 자외부 260 nm이었다. 분석용 컬럼은 C18 컬럼(2.1 × 5 cm, 1.8 µm)을, 이동상은 100 mM 초산, 10 mM 초산나트륨, 10 mM 옥탄설폰산나트륨 수용액의 30% 메탄올 용액을 사용하였다. 코티닌의 검출한계는 0.22 mg/L이었으며 크레아티닌으로 보정하여 최종 농도를 계산하였다. 소변 중 크레아티닌은 Roche사의 자동생화학분석기(COBAS Integra 400, Roche diagnostics Ltd, Switzerland)를 이용하여 분석하였다.

3. 자료분석

통계분석은 version 18.0 SPSS Statistics 프로그램을 이용하였으며 혈청 인듐과 소변 중 코티닌의 농도가

검출한계 미만으로 분석된 결과는 자료처리를 위해 각각 검출한계의 1/2인 0.0036과 0.11로 치환하여 분석하였다. Shapiro-Wilk test를 통해 자료의 정규성 검정을 실시하였으며 정규성을 보이지 않는 자료의 그룹간 평균비교는 Mann-Whitney test와 Kruskal Wallis test를 이용하였다. 통계적 유의수준은 $p < 0.05$ 로 하였다.

III. 결 과

1. 연구대상자의 일반적 특성

대조군과 노출군의 연령은 대조군이 노출군에 비하여 더 높았으며, 통계적으로 유의한 차이가 있었다. 흡연율은 의미 있는 차이를 보이지 않았으나 흡연자의 흡연량은 대조군이 더 높았다. 현 부서 또는 공정 평균 근무기간은 대조군의 평균 근무기간이 길었으나 통계적 차이는 보이지 않았다(Table 1).

2. 생체시료 분석

대조군에서 혈청 인슐린 농도 기하평균은 $0.01 \mu\text{g/L}$ 로 검출한계 미만에서 최고 $0.80 \mu\text{g/L}$ 의 분포를 보였으며 KL-6는 기하평균 237.5 U/mL 에 101.0 U/mL 에서 최고 504.3 U/mL 의 분포를 보였다. SP-D는 기하평균 $68.7 \mu\text{g/L}$ 로 $10.0 \mu\text{g/L}$ 에서 최고 $206.9 \mu\text{g/L}$ 의 분포를 보였다. 일본의 혈청 인슐린, KL-6, SP-D 참고치 $3 \mu\text{g/L}$, 500 U/mL , $110 \mu\text{g/L}$ 를 초과한 사람은 각각 0%, 2.6%, 24.0%이었다.

노출군 전체에서 혈청 인슐린의 기하평균은 $0.13 \mu\text{g/L}$ 로 검출한계 미만에서 최고 $49.81 \mu\text{g/L}$ 의 분포를 보였다. KL-6는 기하평균 331.4 U/mL 에 $118.5 \sim$

$1,769.4 \text{ U/mL}$ 범위, SP-D는 기하평균 $118.4 \mu\text{g/L}$ 에 $25.2 \sim 651.9 \mu\text{g/L}$ 범위로 분석되어 모두 대조군과 의미 있는 차이를 보였다. 타겟 제조업 근로자에서 일본의 참고치 초과율은 혈청 인슐린, KL-6, SP-D 각각에 대해 24.8%, 22.9%, 52.9%로 대조군과 큰 차이를 보임을 확인할 수 있었다.

소변 중 코티닌 농도는 대조군과 타겟 제조업 근로자 사이에서 의미 있는 차이를 보이지 않았다.

노출기간에 따른 생물학적 지표 농도 수준의 변화를 확인하기 위해 나이, 흡연을 통제하고 회귀분석을 통해 현 공정 근무기간의 영향을 확인하였으나 혈청 인슐린, KL-6, SP-D 모두 영향을 받지 않는 것으로 분석되었다.

타겟 제조 업무 흐름에 따라 분말, 혼합, 성형, 소결, 연마, 접합, 마무리 각 공정별 생체시료 분석결과를 확인하였는데, 혈청 인슐린, KL-6, SP-D는 유의수준 5%하에서 통계적으로 차이가 있는 것으로 분석되었다. 혈청 인슐린 농도의 기하평균은 분말공정 근로자가 $5.24 \mu\text{g/L}$ 로 가장 높았으며 그 다음이 혼합, 성형공정 순으로 높았다. 공정 별 최고 농도는 혼합공정 근로자가 $49.81 \mu\text{g/L}$ 로 가장 높았으며 분말, 연마공정 순으로 최고농도를 보였다. 일본의 참고치 $3 \mu\text{g/L}$ 이상의 농도를 보이는 비율은 분말공정 근로자가 83.3%로 가장 높았으며 혼합공정 50.0%, 연마공정 24.5%순이었다. 전 공정에서 $3 \mu\text{g/L}$ 이상의 혈청 인슐린 농도를 보이는 근로자가 확인되었다(Table 2).

KL-6 농도의 기하평균은 분말공정 583.5 U/mL , 혼합공정 435.6 U/mL , 연마공정 368.2 U/mL 순서로 높았으며 일본의 참고치 500 U/mL 이상을 보이는 근로자비율은 분말공정 50.0%, 혼합공정 37.5%, 소결공정 33.3% 순서로 높았다.

SP-D 농도의 기하평균은 분말공정 $178.0 \mu\text{g/L}$, 연마공정 $136.6 \mu\text{g/L}$, 혼합공정 $123.0 \mu\text{g/L}$ 순으로 높았으며 일본의 참고치 $110 \mu\text{g/L}$ 이상인 근로자 비율은 분말 83.3%, 연마 59.2%, 접합 51.9%순서로 높았다. 각 공정별 KL-6와 SP-D의 농도는 혈청 인슐린 농도와 유사한 형태로 분포함이 확인되었다(Figure 2).

Table 2에서 기타로 분류된 사람들은 특정 공정에 근무하고 있지는 않으나 업무상 현장출입이 잦은 관리자, 엔지니어 등으로 시료분석결과 혈청 인슐린의 기하평균은 $0.0097 \mu\text{g/L}$ 로 타 공정에 비해 농도는 낮았

Table 1. General characteristics of subjects

	Control group [‡]	Exposed group [§]
N	38	153
Age(years)	38.4±7.7	34.5±7.1 [†]
Smokers(%)	57.9	56.9
Pack year	15.9±8.5	11.1±5.9 [*]
Working duration (months)	58.7±52.1	51.9±33.3

Mann-Whitney test, ^{*} $p < 0.05$, [†] $p < 0.01$

[‡]Control group: office worker, sales person and carrying worker

[§]Exposed group: target manufacturer

Table 2. Levels of biological indices according to the working process

	Control group	Exposed group									p-value [‡]
		Total	Powder	Mixing	Molding	Sintering	Polishing	Bonding	Finishing	etc.	
N	38	153	12	8	12	6	49	27	32	7	
Serum indium (μg/L)											
Mean±SD	0.07±0.19	2.76±5.84 [†]	8.82±7.22 [†]	9.90±16.76 [†]	1.26±1.37 [†]	1.42±2.44 [†]	2.98±5.28 [†]	1.59±1.93 [†]	0.65±1.26 [†]	0.52±1.38	< 0.001
GM±GSD	0.01±5.03	0.13±28.10	5.24±3.75	0.50±64.39	0.20±20.69	0.17±22.88	0.15±25.76	0.18±23.27	0.02±17.60	0.01±13.68	
Range	ND~0.80	ND~49.81	0.27~23.68	ND~49.81	ND~3.87	ND~6.32	ND~20.39	ND~6.50	ND~5.02	ND~3.65	
Prevalence [§] (rate, %)	0%	24.8%	83.3%	50.0%	16.7%	16.7%	24.5%	22.2%	6.3%	14.3%	
KL-6 (U/mL)											
Mean±SD	251.4±86.6	433.7±377.5 [*]	750.2±508.4 [*]	654.2±639.2	319.7±226.0	355.4±255.9	494.7±431.9 [*]	405.2±223.8 [*]	263.9±161.0	361.6±420.3	< 0.001
GM±GSD	237.5±1.4	331.4±2.0	583.5±2.2	435.6±2.6	272.0±1.7	293.2±1.9	368.2±2.1	358.5±1.6	234.6±1.6	245.8±2.3	
Range	101.0~504.3	118.5~1769.4	167.0~1570.9	118.5~1769.4	151.5~939.1	160.4~791.2	126.0~1665.6	139.3~1173.2	120.75~905.5	137.1~1273.6	
Prevalence [§] (rate, %)	2.6%	22.9%	50.0%	37.5%	16.7%	33.3%	26.5%	18.5%	9.4%	14.3%	
SP-D (μg/L)											
Mean±SD	84.2±51.5	146.2±103.2 [*]	241.1±165.2 [*]	155.6±125.2	108.7±39.3	128.5±85.7	173.3±116.6 [*]	130.1±67.5 [*]	114.4±69.9 [*]	100.0±91.4	< 0.005
GM±GSD	68.7±2.0	118.4±1.9	178.0±2.1	123.0±2.0	101.7±1.5	107.2±1.9	136.6±2.1	115.7±1.6	99.2±1.7	71.9±2.3	
Range	10.0~206.9	25.2~651.9	45.8~651.9	59.8~426.0	50.6~167.8	58.3~259.0	25.2~445.2	34.9~326.6	26.9~401.4	27.6~257.9	
Prevalence [§] (rate, %)	24.0%	52.9%	83.3%	50.0%	50.0%	50.0%	59.2%	51.9%	40.6%	28.6%	
Urinary cotinine (mg/g creatinine)											
Mean±SD	0.73±0.74	0.54±0.66	0.56±0.86	0.97±1.35	0.76±0.68	0.18±0.22	0.58±0.64	0.55±0.48	0.46±0.55	0.17±0.22	0.206
GM±GSD	0.39±3.64	0.28±3.25	0.25±3.34	0.36±4.64	0.48±3.04	0.10±3.39	0.32±3.10	0.32±3.20	0.26±2.89	0.11±2.99	
Range	ND~1.99	ND~3.30	ND~2.97	ND~3.30	ND~2.26	ND~0.57	ND~2.38	ND~1.45	ND~2.51	ND~0.67	

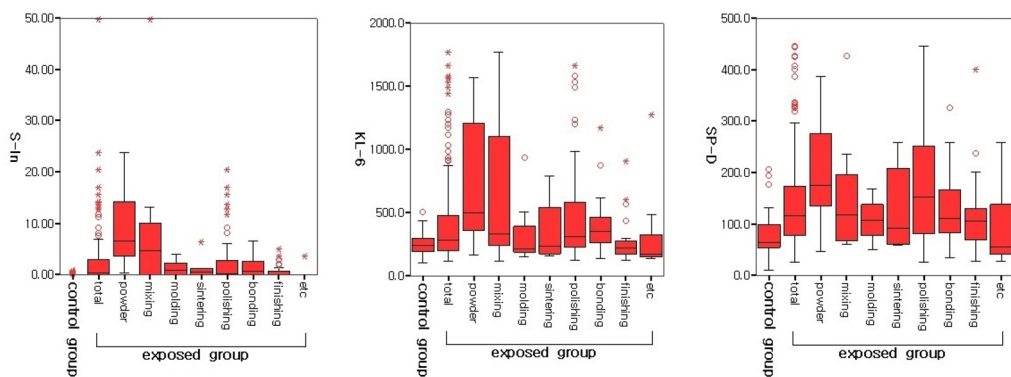
Mann-Whitney test, between control and exposed group(total) or each work group, *p<0.05, [†]p<0.001

[‡] Kruskal Wallis Test, among work groups

[§] Reference value regulated in Japan, serum indium < 3 μg/L; KL-6 < 500 U/mL; SP-D < 110 μg/L

^{||} process engineer, site manager etc.

KL-6, Krebs von den lungen-6; SP-D, surfactant protein-D; GM, geometric mean; GSD, geometric standard deviation; ND, not detected



S-In, serum indium; KL-6, Krebs von den lungen-6; SP-D, surfactant protein-D

Figure 2. Distribution of serum indium, KL-6 and SP-D of study subjects

으나 3 μg/L 이상의 혈청 인듐 농도를 보이는 사람도 1명(14.3%)있었다. 기타공정 근로자의 KL-6 농도 기하평균은 245.8 U/mL로 마무리공정 근로자에 비해

높았으며 일본 참고치 이상의 농도를 보이는 사람도 혈청 인듐과 마찬가지로 1명이었다. SP-D의 기하평균과 참고치 초과율은 타 공정보다 낮아서 71.9

Table 3. Differences of biological indices between Korea and Japan polishing process in target manufacturing factories

	Japan	Korea
n	17	32
Serum indium ($\mu\text{g/L}$)		
Mean \pm SD	-	4.57 \pm 5.97*
GM \pm GSD	-	1.06 \pm 8.88
Range	ND	ND~20.4
KL-6 (U/mL)		
Mean \pm SD	223.9 \pm 63.3	638.6 \pm 474.6*
GM \pm GSD	215.2 \pm 1.34	489.7 \pm 2.11
Range	126.0~326.7	131.4~1,665.6
SP-D ($\mu\text{g/L}$)		
Mean \pm SD	99.0 \pm 58.3	212.8 \pm 121.0*
GM \pm GSD	82.9 \pm 1.92	178.0 \pm 1.89
Range	25.2~257.0	54.4~445.2

Mann-Whitney test, * $p < 0.001$

KL-6, Krebs von den lungen-6; SP-D, surfactant protein-D; GM, geometric mean; GSD, geometric standard deviation

 $\mu\text{g/L}$ 와 28.6%이었다.

3. 연마공정 농도 비교

현재 우리나라에서 타겟을 생산하고 있는 일본계 업체와 우리나라 업체의 연마공정종사 근로자의 생체시료 분석결과를 비교하였다. 우리나라 기업 근로자의 혈청 인듐 기하평균은 1.06 $\mu\text{g/L}$ 로 검출한계 미만에서 20.4 $\mu\text{g/L}$ 의 농도분포를 보였으나 일본계 기업 종사자는 전원 검출한계 미만으로 분석되었다. 우리나라 기업 근로자의 KL-6 농도 기하평균은 489.7 U/mL에 131.4 ~ 1,665.6 U/mL의 범위를 보였으나 일본계 기업의 모든 근로자는 일본 참고치 500 U/mL를 넘지 않았다. SP-D 농도 역시 차이를 보여 기하평균은 한국계 기업 178.0 $\mu\text{g/L}$, 일본계기업 82.9 $\mu\text{g/L}$ 이었으며 최고농도 역시 445.2 $\mu\text{g/L}$ 와 275.0 $\mu\text{g/L}$ 로 한국계기업의 근로자가 일본계 기업 근로자보다 높음이 확인되었다(Table 3).

IV. 고 찰

일본은 2010년 후생노동성에서 인듐취급근로자를 위한 건강관리 가이드를 제시하였으며 인듐취급 사

업장에서는 가이드에 준하여 작업환경을 개선하고 근로자 건강관리를 실시하고 있으나 우리나라는 인듐취급 근로자를 위한 건강보호체계가 아직 마련되지 못한 상황이다. 따라서 본 연구를 통해 우리나라 타겟 제조업 근로자를 대상으로 현재 실태를 파악하는 한편 이를 통해 타겟 제조업에서 인듐취급근로자의 공정별 특성에 따른 적절한 보호대책 수립 및 공정개선을 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

2012년 산업안전보건연구원에서 수행된 연구결과 보고서를 보면 타겟 제조업체에서 총 분진 중 인듐의 노출수준은 기하평균 25.3 $\mu\text{g/m}^3$ 로 현재 우리나라의 노출기준 100 $\mu\text{g/m}^3$ 보다 낮았으나 전체시료의 18.6%가 노출기준을 초과하였으며 소결공정을 제외한 전 공정에서 노출 초과자가 확인되었다(Yi et al., 2012). 본 논문에서 제시한 생체시료 분석결과도 타겟 제조업 근로자의 24.8%가 일본의 참고치 3 $\mu\text{g/L}$ 를 초과하는 것으로 확인되었으며 최고 49.8 $\mu\text{g/L}$ 까지 분석되었는데 이는 과거 일본에서 인듐 폐질환 발생 직후 Nakano et al.(2009)에 의해 조사된 혈청 인듐 농도의 산술평균농도 8.4 $\mu\text{g/L}$ 및 최고값 116.9 $\mu\text{g/L}$ 보다는 낮은 결과이나 간질성폐손상의 지표로 활용되는 KL-6의 경우 우리나라 타겟 제조업 근로자의 기하평균은 331 U/mL, 일본의 결과는 337 U/mL로 유사한 수준을 보임을 확인할 수 있었다. 혈청 인듐과 함께 분석된 KL-6와 SP-D는 간질성폐손상의 지표로 활용성이 주목받고 있는 생물학적 지표이다(Kohno et al., 1993; Kobayashi et al., 1995). 이들 지표는 나이와 흡연, 기타 폐질환에 의한 영향이 있을 수 있으나 본 연구에서는 노출군의 평균 연령이 대조군보다 낮았으며 흡연율에서 통계적 차이를 보이지 않았고 소변 중 코티닌 분석결과를 통해 확인한 노출군 각 그룹간 흡연의 차이도 없는 것으로 확인되었다. 또한 기타 폐질환에 의한 영향을 배제하기 위해 폐질환 병력자를 대상에서 제외하였으므로 이들 요인에 의한 영향은 없는 것으로 판단된다. KL-6, SP-D 등의 지표는 체내에 흡수된 외인성 물질이나 대사산물이 아닌 자극에 대한 염증반응으로 분비되는 물질이므로 혈청 인듐 농도보다 건강영향을 더 잘 반영할 수 있는 지표로 볼 수 있으며 본 분석결과와 혈청 인듐 농도는 과거일본보다 낮지만 폐손상 발생가능성은 유사할 수 있음을 의미한다.

Yi et al.(2012)은 총 분진 중 인듐으로 평가된 노출수준의 기하평균은 혼합, 마무리, 성형공정 순으로, 호흡성분진 노출평가에서는 혼합, 마무리, 분말 공정 순으로 농도가 높았음을 보고하였는데, 생체시료 분석 결과에서는 혈청 인듐은 분말, 혼합, 성형순서로, KL-6는 분말, 혼합, 연마순서로, SP-D는 분말, 연마, 혼합공정 순서로 높은 농도를 보여 작업환경측정 결과와 차이를 보였다. 이는 작업장에서 입자상태로 포집되는 인듐과 호흡기를 통해 들어오는 입자의 크기 또는 물리적 특성이 다를 수 있음을 의미하는데 각 가공단계에서 비산되는 산화인듐과 산화주석 또는 산화아연의 입자의 크기, 배합 비율, 가공 조건 등에 따라 호흡기로 들어와 폐에 침착되거나 대사되는 비율에 차이가 있기 때문인 것으로 판단된다. 산화인듐분말은 인듐금속을 질산에 용해 후 침전, 건조 등의 과정을 거쳐 분말로 만들어지는데 특히 분말공정에서 생체시료의 농도가 가장 높게 나타난 것은 분말제조 과정에서 비산되는 다량의 호흡성분진에 노출되기 때문인 것으로 판단된다. 산화인듐을 제조하는 분말공정의 분진크기는 대부분 10 μm 이하의 호흡성분진에 해당하는 것으로 분석되기도 하였다(Yi et al., 2012). Vincent et al.(1985)와 Yang et al.(2008)은 흡입되는 입자의 크기와, 밀도, 표면특성에 따라 폐에 침착되는 위치와 건강영향은 달라질 수 있다고 보고하였으며, 일본에서는 ITO 취급, 산화인듐 취급, 재생업 등 노출되는 공정의 차이에 따라서도 체내 인듐 및 KL-6의 감소율이 다름이 보고되기도 하였다(Omae, 2009). 따라서 동일업종 내에서도 공정에 따라 체내 흡수율에 차이가 있을 수 있다고 판단되므로 작업환경측정 뿐만 아니라 생체시료 분석을 통해 근로자 건강영향을 정확히 파악할 필요가 있으며 일본의 작업환경과 우리나라의 환경이 다를 수 있으므로 우리나라 실정에 적합한 노출기준을 설정하고 생물학적 노출지표를 선택하여 적절한 참고치를 제안할 필요가 있다.

타겟 제조공정에서 직접 인듐을 취급하는 근로자 뿐만 아니라 업무상 정기적인 현장출입이 있는 근로자에 대한 관리도 요구된다. Table 2의 공정별 분석 결과에서 기타로 분류된 그룹의 근로자들은 타겟 제조공정에 직접 참여하고 있지 않으나 현장관리, 장비 유지보수 등을 이유로 정기적인 현장출입이 있었던

관리자 또는 엔지니어이다. 이들의 생체시료분석 결과는 대부분의 제조공정 근로자의 결과에 비해 낮은 농도를 보였으나 혈청 인듐과 KL-6가 일본의 참고치를 초과하는 비율이 14.3%에 달하여 마무리공정의 근로자 보다는 높은 초과율을 보였다.

인듐 분진에 노출될 수 있는 생산설비를 격리시키고 비작업 근로자 현장출입의 엄격한 제한도 요구된다. 대조군의 혈청 중 인듐 농도 수준은 검출한계 미만에서 0.80 $\mu\text{g/L}$ 범위로 산술평균과 기하평균은 모두 검출한계보다 낮은 수치였으나 38명 중 5명이 검출한계 0.0072 $\mu\text{g/L}$ 이상의 결과를 보였다. 이들은 인듐을 직접 취급하거나 정기적인 현장 출입이 없는 사무, 영업, 운송 관련 업무를 담당하는 근로자들이었으며 과거 경력 또한 인듐과 무관하였다. 혈청 중 인듐은 직업적인 노출에 대해 특이도가 높은 항목이며 직업적 노출 이외의 노출 가능성은 없다는 점을 감안하면 검출한계 이상으로 분석된 일부 대조군은 작업장에서의 인듐 노출이 있었던 것으로 판단된다. 일부 소규모 업체의 경우 작업 공간이 사무 공간 또는 휴게 공간과 완벽히 분리되지 않고 현장 출입에 아무런 제한이 없었던 것이 인듐 노출을 초래한 것으로 판단된다. 불필요한 인듐 노출을 막기 위해서는 작업관련자 이외의 현장 출입을 제한하는 한편 작업 공간과 사무, 휴게 공간을 최대한 격리시키고 발생원이 되는 장치를 별도의 방으로 구분하여 필요한 때에만 출입이 이루어지도록 하는 등의 조치가 요구된다.

현재 우리나라에서 영업중인 일본계 타겟 제조업체와의 비교를 통해 현재의 관리실태를 보다 객관적으로 비교해 보고자 하였는데 현재 우리나라 타겟 제조사업장의 작업환경은 일본에 비해 상당히 열악한 것으로 확인되었다. 현재 우리나라에서 영업중인 일본계 타겟 제조업체는 일본에서 분말에서 소결까지의 공정을 마친 1차 가공품을 들여와 연마, 접합, 마무리공정만 수행하고 있으므로 전체 공정에 대한 비교는 불가하며, 일본에서 보고된 7건의 인듐폐질환 증례 중 5건이 연마공정에서 발생하였으므로 특히 문제가 되었던 연마공정에 대한 비교만을 수행하였다. 한국계기업 연마공정 근로자의 혈청 인듐 농도의 기하평균이 1.06 $\mu\text{g/L}$ 이고 최고농도가 20.4 $\mu\text{g/L}$ 이었던 반면 일본계기업은 근로자 모두가 검출한계 미만으로 분석되었다. 일본계기업은 KL-6역시 일본

의 참고치 500 U/mL를 초과하는 사람이 한명도 없는 것으로 분석되었는데 일본은 이미 인듐취급근로자의 건강보호를 위한 가이드를 만들었으며 사업주들은 이 가이드에 따라 생산공정과 근로자들을 관리하고 이러한 일본의 예방정책이 실질적인 성과를 보였기 때문으로 판단된다.

본 연구는 현재 우리나라에서 타겟을 생산하는 업체를 대상으로 공정별 근로자의 생체시료 분석결과를 확인하여 공정별 특성에 따른 적절한 보호대책 수립 및 공정개선을 위한 기초자료를 제공하는 한편 현재 관리가 진행중인 일본계 업체와의 비교를 통해 제도적 관리의 시급성을 제시하고자 진행되었는데, 본문에서 제시한 결과는 국내의 인듐 취급 근로자에서도 간질성 폐손상에 의한 폐섬유화증이 발생할 수 있으므로 근로자의 폐질환 발생 예방을 위해 관리가 시급함을 의미한다. 폐손상지표 분석결과를 이미 과거 일본에서 인듐폐질환이 발생했을 당시의 수준과 유사한 수준이었으며 인듐을 직접 취급하지 않는 근로자도 업무상 비정기적인 현장출입에 의해 노출될 가능성이 있고 인듐에 의한 폐손상이 우려되므로 인듐에 직·간접적으로 노출될 위험이 있는 모든 근로자에 대한 관리가 필요할 것으로 판단된다. 또한 공정별로 구분하여 인듐분진이 고농도 발생지역으로부터 저농도 지역으로 넘어가지 않도록 격리조치가 요구되며 인듐 노출의 위험성을 적극 홍보할 필요가 있다. 또한 인듐에 의한 폐손상은 비가역적일 가능성이 크나 적절한 관리를 통해 충분히 예방 가능하므로 인듐노출에 특화된 개별 건강검진을 실시하고 검진결과에 따라 근무전환 등의 조치를 취해줄 필요가 있으며 공정에 따른 차이를 고려해 직업병발생 가능성이 높은 개인과 집단에 대해 보다 집중된 관리가 요구된다.

본 연구는 일부 타겟 제조업체만을 대상으로 하여 우리나라 전체 인듐취급업종의 현실을 대변할 수 없고 공기 중 노출농도를 제시하지 못하였으며 현재 생물학적 지표 농도에 영향을 줄 수 있는 과거경력을 객관적 자료가 아닌 설문자료에만 의존하여 분석하였다는 점 등의 한계가 있으나 제시된 자료는 타겟 제조업체의 공정개선을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 보다 효과적인 인듐폐질환의 예방을 위해서는 폐에 침착되어 폐에 자극을 줄 수 있는 인

듐입자의 물리적 특성에 관한 연구, 공정별 입자의 분포와 생물학적 노출지표 농도의 연관성 파악연구 등의 후속연구가 요구된다.

V. 결 론

우리나라 일부 타겟 제조업체에서 인듐을 취급하는 근로자를 대상으로 각 공정별로 혈청 인듐과 KL-6, SP-D 농도 등을 조사한 결과, 동일 업체 내에서도 공정에 따라 생물학적지표의 혈청 중 농도가 차이를 보임을 확인할 수 있었다. 분말, 혼합, 성형, 연마공정에서 특히 높은 결과를 보였으며 공정에 직접 참여하지 않는 근로자들도 노출의 위험이 있으므로 인듐분진 발생가능 공정을 타공정과 분리하는 등 공정에 대한 개선조치가 요구되며 근무자들은 보다 강화된 보호구착용과 교육이 요구된다. 우리나라 노출특성에 적합한 노출기준과 생물학적 노출지표의 참고치를 설정하고 근로자 건강진단 제도 등을 통해 주기적으로 특수건강진단을 받게 할 필요성이 있다.

References

- Choi S, Won YL, Kim DH, Yi GY, Park JS et al. Subclinical interstitial lung damage in workers exposed to indium compounds. *Ann Occup Environ Med* 2013;25:24
- Cummings KJ, Nakano M, Omae K, Takeuchi K, Chonan T et al. Indium lung disease. *Chest* 2012;141(6):1512-1521
- Hoet P, Graef E, Swennen B, Seminck T, Yakoub Y et al. Occupational exposure to indium: what does biomonitoring tell us? *Toxicology letters* 2012;213: 122-128
- Kobayashi J, Kitamura S. KL-6: A serum marker for interstitial pneumonia. *Chest* 1995;108:311 - 315
- Kohno N, Awaya Y, Oyama T, Yamakido M, Akiyama M et al. KL-6, a mucin-like glycoprotein, in bronchoalveolar lavage fluid from patients with interstitial lung disease. *Am Rev Respir Dis* 1993; 148(3):637 - 642
- Miyaki K, Hosoda K, Hirata M, Tanaka A, Nishiwaki Y et al. Biological monitoring of indium by means of graphite furnace atomic absorption spectrophotometry in workers exposed to particles of indium compounds. *J Occup Health* 2003;45:228-230
- Ministry of Employment and Labor (MOEL). Exposure

- limits for chemical substances and physical agents (MOEL Public Notice No. 2013-38).; 2013. p. 44
- Ministry of Health, Labour and Welfare(MHLW) of Japan. The Technical Guideline for Preventing Health Impairment of Workers Engaged in the Indium Tin Oxide Handling Processes. 2010
- Ministry of Trade, Industry and Energy(MOTIE). Display, let's go together to see much in mutual cooperation [Press release] 2013 Oct 1 [cited 2014 Jul 1]; [83 screens No. 15634]. Available from: URL: http://www.motie.go.kr/motie/ne/rt/press/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=78343&bbs_cd_n=16
- Nakano M, Omae K, Tanaka A, Hirata M, Michikawa T et al. Causal relationship between indium compound inhalation and effects on the lungs. *J Occup Health* 2009;51(6):513-521
- Omae K. Information exchange meeting of the health effects of indium, 2009
- Vincent JH, Johnston AM, Jones AD, Bolton RE, Addison J. Kinetics of deposition and clearance of inhaled mineral dusts during chronic exposure. *Br J Ind Med* 1985;42:707-715
- Won YL, Yi GY, Lee MY, Kim EA. Applicability of Serum Krebs von den lungen-6 as a Biological Exposure Index for Workers Exposed to Indium. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2013;23(2):108-113
- Yang W, Peters JI, Williams RO 3rd. Inhaled nanoparticle-A current review. *Int J Pharm* 2008; 356(1-2):239-247
- Yi GY, Lee NR, You KH. Exposure and management of insoluble indium compound II, Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA, 2012. p. 27-39