

가용성 니켈과 불용성 니켈 화합물의 동시 측정 분석 방법의 적용

한정희* · 이해진

안전보건공단 산업안전보건연구원 산업화학연구실

Application of a Simultaneous Determination Method for Soluble and Insoluble Nickel Compounds

Jeong-Hee Han* · Hye Jin Lee

*Chemical Research Bureau, Occupational Safety and Health Research Institute,
Korea Occupational Safety and Health Agency*

ABSTRACT

Objectives: Nickel is a known carcinogenic substance. Occupational exposure limits (OELs) for nickel compounds vary depending on their solubility, exposure type, and associated health hazards. This can cause significant confusion during workplace environment monitoring and make it difficult to accurately assess the actual exposure environment of workers. Nickel compounds are measured using the same sampling medium regardless of their solubility. However, if workers are simultaneously exposed to nickel compounds with different solubilities, soluble and insoluble nickel compounds should be evaluated separately during the analytical phase. Therefore, it is necessary to select an appropriate analytical method based on the solubility of nickel compounds and to validate these methods experimentally in order to establish effective sampling and analysis guidelines.

Methods: We investigated various types of soluble and insoluble nickel compounds and examined extraction methods based on their solubility. Mixtures containing both soluble and insoluble nickel compounds were analyzed, and a pretreatment method involving stirring in deionized water at 37°C for 60 minutes was selected to extract soluble nickel. This method was subsequently applied to samples collected from actual workplaces.


Results: In metal product plating workspaces, soluble nickel was predominantly detected, while insoluble nickel was detected only in trace amounts below the detection limit. Conversely, in stainless steel foundries and welding operations, insoluble nickel was primarily detected and soluble nickel was detected only in trace amounts below the detection limit. Although the field samples collected in this study were not ideal for simultaneous measurement in workplaces that primarily use one type of nickel, it was confirmed that even trace amounts of both soluble and insoluble nickel can be detected simultaneously, which may influence the application of OELs.


Conclusions: This study demonstrates the validity of analytical methods for determining exposure levels of soluble and insoluble nickel compounds, and can be used to develop practical guidelines. Furthermore, by recommending appropriate analytical methods, this approach can reduce confusion among measurement organizations and enable more accurate identification of the exposure environment of workers.

Key words: ICP-OES (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy), insoluble nickel, nickel compound, OELs(occupational exposure limits), soluble nickel

*Corresponding author: Jeong-Hee Han, Tel: 042-863-0352, E-mail: hanjh@kosha.or.kr
30, 339beon-gil, Expo-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34122

Received: August 28, 2025 Revised: April 30, 2026, Accepted: June 19, 2026

 Jeong-Hee Han <https://orcid.org/0000-0002-2105-4994>

 Hye Jin Lee <https://orcid.org/0000-0002-1028-0611>

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.

I. 서론

니켈은 스테인리스강, 배터리, 합금, 도금, 촉매제 등 다양한 산업 분야에서 널리 사용된다. 작업장에서 니켈의 노출은 제련 및 정련 공정, 도금 공정에서 분진 및 미스트 형태로 발생하거나 주조 작업 중 용해, 주탕, 사상, 트리밍, 절단 공정에서 금속 흡 및 분진으로 발생할 수 있다. 또한 니켈은 합금 금속의 용접이나 니켈 용접 시 노출될 수 있으며 스테인리스강 및 니켈 합금 등의 금속을 연마하는 과정에서 금속 분진에 포함되어 있는 니켈에 노출될 수 있다. 최근에는 친환경 자동차의 보급 증가로 이차전지 제조를 위한 양극재 생산과 폐전지 재생 과정에서 노출 위험이 증가하고 있다. 이외에도 촉매제 및 폐촉매 재생, 니켈 화합물 분말, 도자기 및 유리의 채색에 사용되는 안료 등을 통해서도 노출이 발생할 수 있다(KOSHA, 2019).

니켈은 작업 공정의 특성과 니켈 화합물의 종류에 따라 가용성 및 불용성의 형태로 존재할 수 있으며 동시에 발생하거나 부산물로 생성되기도 한다. 불용성 니켈은 주로 채광, 분쇄, 제련, 정련 등 니켈 생산 산업에서 가장 많이 노출되는 반면 가용성 니켈은 합금, 도금, 용접, 연삭, 절단 등 니켈 사용 산업에서 가장 많이 노출된다(IARC, 2012).

산업안전보건법(이하 산안법)상 니켈의 법적 규제 현황을 살펴보면, 별도로 관리되는 니켈카르보닐과 허가 대상물질인 황화니켈류를 제외하고 니켈 및 그 무기화합물만이 작업환경측정 및 특수건강검진 대상 물질이자 관리대상물질로 분류되며 불용성 무기 니켈 화합물만 특별관리물질로 지정되어 관리되고 있다(Table 1). 이에 비해 가용성 니켈 화합물은 노출기준이 더 낮고 충분한 발암성을 가지고 있음에도 불구하고 불용성 니켈 화합물의 수준으로 관리되고 있지 않다. 또한 니켈카르보닐을 제외한 유기니켈에 대한 법적 규제는 이루어지지 않고 있다(MoEL, 2025).

니켈의 다양한 화학적 형태는 각각 물리화학적 특성과 생물학적 영향이 다르다. 니켈 입자는 발생 형태에 따라 흡, 미스트, 분진으로 분류하기도 하고 용해도에 따라 가용성 및 불용성으로 구분된다. 또한, 유기 및 무기 화합물 여부와 유해성에 따라 노출기준이 다르게 설정되어 있다. 니켈의 노출기준을 설정할 때는 주로 발암성 유무에 가장 큰 비중을 두지만, 노출경로에 따라 인체 내 흡수 정도가 달라진다는 점도 중요하게 고려된다. 일반적으로 금속화합물의 경우 가용성 화합물의 노출기준이 불용성 화합물보다 더 엄격하게 설정되어 있는데, 이는 가용성 화합물이 체내에 더 쉽게 유입되어 독성을 유발할 가능성이 높기 때문이다(Park et al., 2020b). 가용성 니켈 화합물은 폐와 위에서 빠른 속도로 흡수되고 1~2일 사이에 뇨로 배출되는 반면, 불용성 니켈 화합물은 기도와 폐에 축적되어 이후 혈액으로 유출된다. 이로 인하여 불용성 니켈 화합물은 침착된 부위에서 더 높은 발암성을 나타낼 수 있다(Park and Lee, 2003).

산안법상 노출기준에 따르면, 금속 니켈은 접촉성 피부염이나 호흡기 질환 예방을 목적으로 1 mg/m³, 가용성 니켈 화합물은 폐 손상, 피부염 및 발암성을 예방을 위해 0.1 mg/m³, 불용성 무기 니켈 화합물은 비강암 및 폐암 예방을 위해 0.2 mg/m³로 각각 구분하여 관리하고 있다. 흡입성 아황화니켈은 불용성이지만 발암성과 생식세포변이원성의 가능성이 있어 0.1 mg/m³로 별도로 기준이 설정되어 있다. 니켈카르보닐은 발암성 및 생식독성의 위험으로 인하여 0.001 ppm의 매우 엄격한 기준이 적용된다. 같은 니켈 화합물이더라도 금속 니켈만 발암성 증거가 모호하여 발암성 구분 2로 분류되며, 그 외 대부분의 니켈 화합물은 발암성 구분 1A에 해당한다. 또한, 아황화니켈 및 황화니켈은 생식세포변이원성 구분 2, 니켈카르보닐은 생식독성 구분 1B로 분류되는 등 종류에 따라 유해성의 차이가 존재한다(MoEL, 2020)(Table 2).

Table 1. Regulatory nickel and nickel compounds in the Occupational Safety and Health Act

Substances	CAS No.	Working environment measurement	Special health examination	Requirement management	Special management
Nickel and its inorganic compounds	7440-02-0	○	○	○	×
Nickel and its inorganic compounds (insoluble only)	7440-02-0	○	○	○	○
Nickel carbonyl	13463-39-3	○	○	○	○

Table 2. Occupational exposure limits (OELs) and hazard classification of nickel and nickel compounds in the Occupational Safety and Health Act

Substance	CAS No.	OELs	Hazard classification		
			Carcinogenic	Mutagenic	Reproductive
Nickel (soluble compounds)	7440-02-0	0.1 mg/m ³	1A	-	-
Nickel (insoluble inorganic compounds)	7440-02-0	0.2 mg/m ³	1A	-	-
Nickel (metal)	7440-02-0	1 mg/m ³	2	-	-
Nickel subsulfide (inhalable)	12035-72-2	0.1 mg/m ³	1A	2	-
Nickel sulfide (fume and dust)	16812-54-7	1 mg/m ³	1A	2	-
Nickel carbonyl	13463-39-3	0.001 ppm	1A	-	1B

우리나라의 니켈 노출기준은 미국산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)의 노출기준을 준용하여 가용성 니켈과 불용성 니켈을 구분하고 있지만 적용 방식과 세부 기준에서 차이가 있다. 그리고 ACGIH는 모든 니켈 및 니켈 화합물의 노출기준을 흡입성 분진을 기준으로 설정한 반면 우리 나라는 아황화니켈만 흡입성 분진 기준을 적용하고 있다(MoEL, 2020). 미국산업안전보건청(Occupational Safety & Health Administration, OSHA) 및 국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)의 경우 니켈의 용해도에 따라 별도로 노출기준을 구분하지 않으며, 니켈카르보닐을 제외한 모든 니켈 및 니켈 화합물에 동일한 노출기준을 적용하고 있다(Table 3) (ACGIH, 2024).

그러나 실제로 노출기준의 차이가 현장에서는 크게 의미를 갖지 못하고 있다. 이는 니켈의 작업환경측정시 KOSHA Guide나 NIOSH 측정방법을 적용하여 동일한 매체와 동일한 조건으로 포집하여 종류별로 구분

하지 않고 총 니켈 농도로 분석하기 때문이다. 니켈의 종류를 구분하여 분석을 의뢰하는 경우에도 주로 사용하는 원료와 작업환경을 기준으로 추정하여 측정대상과 노출기준을 적용하고 있는 실정이다.

이와 관련하여 다음과 같은 몇 가지 문제가 발생할 수 있다. 첫째, 가용성 니켈과 불용성 니켈의 노출기준이 다르다는 점이다. 만약 니켈의 종류를 구별하지 않고 측정할 경우 불용성 니켈을 가용성 니켈의 노출기준을 적용하여 노출기준 미만이라도 초과하는 결과를 얻을 수 있다. 반대로 가용성 니켈을 불용성 니켈의 노출기준을 적용하여 노출기준을 초과하더라도 미만으로 평가할 수 있다. 둘째, 가용성 니켈과 불용성 니켈이 혼합되어 있는 경우, 낮은 노출기준을 적용할지 각각의 노출기준을 따로 적용할지 판단이 어렵다는 점이다. 현실적으로 가용성 니켈과 불용성 니켈을 별도로 측정하지 않고 항상 총 니켈 농도로만 분석하기 때문에 노출기준에 따른 정확한 작업환경평가가 어렵다. 셋째, 불용성인 금속 니켈, 불용성 무기 니켈 화합물, 아황화니켈의 노출기준이 모두 다르다는 점이다. 실제 작업환경

Table 3. Occupational exposure limits (OELs) for nickel and nickel compounds from other institutions

Substance	CAS No.	Units	Organization*			
			MoL	ACGIH	NIOSH	OSHA
Nickel (soluble compounds)	7440-02-0	mg/m ³	0.1	0.1(I)**	0.015	1
Nickel (insoluble inorganic compounds)	7440-02-0	mg/m ³	0.2	0.2(I)	0.015	1
Nickel (Metal)	7440-02-0	mg/m ³	1	1.5(I)	0.015	1
Nickel subsulfide	12035-72-2	mg/m ³	0.1(I)	0.1(I)	0.015	1
Nickel sulfide (fume and dust)	16812-54-7	mg/m ³	1	-	-	-
Nickel carbonyl	13463-39-3	ppm	0.001	0.05(C) [†]	0.001	0.001

* MoL; Ministry of Employment and Labor, ACGIH; American Conference of Governmental Industrial Hygienists, NIOSH; National Institute for Occupational Safety and Health, OSHA; Occupational Safety and Health Administration, ** (I), Inhalable fraction, [†] (C), Ceiling

Table 4. Preparation method for extracting of soluble nickel compounds

Method*	Preparation procedure
HSE MDHS 42/2	Place at room temperature for 60 min after diluting to 0.1M ammonium citrate
ISO 15202-2	Agitate in a water bath at 37±2°C for 60 min after diluting with deionized water
OSHA ID-121	Sonicate for 10 min after diluting with deionized water
Luk et al. (2000)	Centrifuge for 10 min after diluting with deionized water for 30 min

*HSE, HSE (UK Health and Safety Executive) MDHS (Methods for the Determination of Hazardous Substances) 42/2 method; ISO, ISO (International Organization for Standardization) 15202-2 method; OSHA, OSHA (Occupational Safety and Health Administration) ID-121 method; Luk, Luk et al. 2010 method

에 따라 이들을 구분하여 분석할 필요가 있으나, 현재 KOSHA, NIOSH 등의 분석방법에서는 모두 산으로 전처리한 후 유도결합플라즈마분광분석법(Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry, ICP-OES) 또는 원자흡광분광광도법(Atomic absorption spectrophotometry, AAS)을 사용한 분석 방법을 적용하고 있다(KOSHA, 2019 and NIOSH, 2016). 니켈은 용해도와 관계없이 동일한 채취매체로 측정되기 때문에 용해도가 다른 니켈이 동시에 작업자에게 노출될 경우에는 분석 단계에서 가용성과 불용성을 분리하여 평가하는 것이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 가용성 니켈과 불용성 니켈을 동시에 측정·분석할 수 있는 방법의 유효성을 확인하고 그 적용 방안을 제안하고자 한다.

II. 연구방법

1. 니켈 화합물의 분류 및 대상 물질 선정

니켈 화합물의 종류를 문헌 및 데이터베이스를 통해 조사하고 용해도에 따라 가용성과 불용성을 분류하였다. 그리고 국내외에서 사용량 및 사용 빈도가 많은 물질을 선정하고 물리화학적 특성을 조사하였다.

2. 니켈 화합물의 분석 방법 선정

니켈 화합물을 용해도에 따라 분리 및 추출하는 절차와 분석하는 방법에 대한 자료를 조사하였다. 이를 통해 시료 채취 매체, 전처리 용액, 전처리 방법, 분석 장비 등을 파악하였다. 또한, 조사된 측정·분석 방법별 전처리 조건에 따라 용해도에 미치는 영향을 검토하였으며 니켈 화합물을 종류별로 추출하기 위한 용매의 종류, 양, 온도, 처리 방법 등을 정리하였다. 그리고 니켈을 순차적으로 추출하는 방법 중 가용성 및 불용성 니

켈 화합물을 측정·분석하기 위해 널리 활용되고 있는 대표적인 방법들을 선정하였다.

3. 가용성·불용성 니켈 화합물의 측정·분석

1) 니켈 화합물 및 혼합 표준 시료 제작

각 니켈 화합물 10 mg을 탈이온수 10 ml에 각각 용해 및 분산시킨 후 MCE (Membrane Cellulose Ester) 여과지에 떨어뜨리고 24시간 건조하였다. 또한 같은 방법으로 가용성 니켈 화합물인 염화니켈과 불용성 니켈 화합물인 산화니켈을 동량 혼합하여 표준 시료를 제작하였다.

2) 니켈 화합물 측정·분석 및 비교

시료의 성분을 정성·정량 분석하여 니켈의 함유 여부와 함량을 확인하기 위해 ICP-OES(iCAP 7400, Thermo scientific, USA)를 이용하여 분석하였다. 우선 가용성 니켈을 추출하기 위해 4가지 전처리 조건을 적용하였다 (Table 4). 첫째, HSE(Health and Safety Executive) 방법은 0.1M의 구연산암모늄으로 희석 후 60분 동안 실온에 두었다, 둘째, ISO (International Organization for Standardization) 방법은 탈이온수로 희석 후 37±2°C의 항온수조에서 60분 동안 교반하였다. 셋째, OSHA 방법은 탈이온수로 희석 후 10분 동안 초음파 분산하였다. 넷째, Luk 방법은 탈이온수로 희석하여 30분 동안 둔 후 다시 10분 동안 원심분리하였다.

그런 다음 시린지 필터(polycarbonate, 공극 0.22 µm, 직경 25 mm, Millipore, USA)를 이용하여 시료를 여과하였다. 여과된 여과액은 가용성 니켈 분석용 시료로 사용하였으며, 필터는 불용성 니켈 분석용 시료로 활용하였다. 가용성 니켈 화합물을 추출한 후 남은 필터와 여과액을 여과한 후 남은 필터를 취합하여 진한 질산(70%, Merk) 1 ml를 첨가한 후 마이크로웨이브회화장치(Mars 6, CEM, USA)에서 170°C, 20분간 회화시켰

Table 5. Physical and chemical property of target nickel compounds

Substances	Formula	CAS No.	Molecular weight	Purity (%)	Water solubility (@20°C)	Nickel content (%)
Nickel chloride	NiCl ₂ ·6H ₂ O	7791-20-0	237.71	99.999	642	24.20
Nickel acetate	Ni(CH ₃ CO) ₂ ·4H ₂ O	6018-89-9	248.84	99.999	177	22.70
Nickel nitrate	Ni(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	13478-00-7	290.80	99.999	2385	19.80
Nickel sulfate	NiSO ₄ ·7H ₂ O	10101-98-1	280.86	99.999	625	20.70
Nickel oxide	NiO	1313-99-1	74.71	99.995	0.0011	-
Nickel hydroxide	Ni(OH) ₂	12054-48-7	92.7	98.0	0.0015	62.00
Nickel subsulfide	Ni ₃ S ₂	12035-72-2	240.19	99.9	0.0036	68.83
Nickel carbonate	NiCO ₃	3333-67-3	118.72	99.9	0.033	48.60

다. 이후 탈이온수를 넣어 10 ml가 되게 희석하였다. 정량분석을 위한 표준물질은 Inorganic Ventures(USA)에서 구입한 니켈 인증 표준용액(1,000 µm/ml)을 희석하여 사용하였으며 231.6 nm 및 221.6 nm의 파장에서 radial 모드로 관측하였다. ICP-OES는 0에서 100 ppm까지 5개 농도의 표준용액으로 보정하였으며 니켈 함량은 µg/mg으로 산출하였다.

3) 현장 조사 및 현장 시료 측정·분석

시료 채취 매체는 MCE 막여과지를 사용하였으며 유량을 1~3 L/min로 설정하고 포집량은 최소 10 L에서 최대 400 L까지 조정하였다. 포집이 완료된 후에는 여과지의 시료 포집 부분이 위를 향하도록 하여 마개를 닫고 밀폐된 상태로 운반하였다. 현장 공시료는 시료 세트당 2개 이상으로 하였다. 채취한 시료는 표준 니켈 화합물 시료와 동일하게 ISO 방법을 사용하여 가용성 니켈을 추출하였다. 여과된 여과액을 가용성 니켈 분석용으로 사용하였으며, 남은 여과 필터와 포집 필터를 합쳐 불용성 니켈 분석용으로 사용하였다. 분석 방법의 유효성 검증을 위하여 직선성, 정밀도 및 검출한계를 포함한 주요 항목별 허용 기준을 설정하였으며, 표준물질을 3가지 농도로 회수시료를 제작하여 현장시료와 동일하게 분석한 후 회수율을 계산하고 보정하여 분석 방법의 정확도 및 적합성을 평가하였다. 장비의 상태를 수시로 점검하기 위해 매 10번의 측정마다 정량범위에 있는 표준용액을 측정하였다. 또한, 시료 분석 중 오염 여부를 확인하기 위해 동일 농도의 시료 측정 후 공시료를 측정하였다. 시료의 분석은 동일한 종류와 농도의 시료로 3회 반복 측정하여 평균을 산출하였다.

III. 결 과

1. 니켈 화합물의 분류 및 대상 선정

시판되는 니켈 화합물 중 순도가 높고 산업 현장에서 많이 사용되는 수용성 니켈 화합물 4종과 불용성 니켈 화합물 4종을 구입하여 대상 물질로 선정하였다. 수용성 니켈 화합물로는 염화니켈, 초산니켈, 질산니켈, 황산니켈을 대상으로 하였으며 불용성 니켈 화합물은 산화니켈, 수산화니켈, 황화니켈, 탄산니켈을 선정하였다. 각 니켈 화합물의 물리화학적 특성은 제공된 분석인증서를 참조하여 Table 5에 나타내었다.

2. 니켈 화합물 측정분석

1) 니켈 화합물의 니켈 농도 분석 결과

니켈 화합물 8종을 동일한 농도로 각각 조제하여 필터 시료를 제작한 후 탈이온수 처리와 질산 회화처리한 후 분석하였다. 염화니켈, 초산니켈, 질산니켈, 황산니켈은 탈이온수에 완전히 용해되었으나 산화니켈, 수산화니켈, 아황화니켈의 경우 탈이온수에 전혀 용해되지 않았으며 탄산니켈은 일부만 용해되었다. 따라서 이러한 일반적인 조건에서는 가용성 니켈을 충분히 추출할 수 없었다(Table 6).

2) 가용성 니켈 추출 조건에 따른 분석 결과

염화니켈과 산화니켈 혼합물을 동일한 농도로 조제하여 제작한 필터 시료를 여러 가지 추출 조건에 따라 전처리한 후 분석하였다. 필터 시료의 총 니켈 농도는 1.641 µg/mg이었으며, 가용성 니켈은 39.9~56.1%를 차지하였으며 불용성 니켈은 43.9~60.1%를 차지하였다. 구연산 암모늄을 사용하는 HSE 방법에서 가장 많은 가용성 니

Table 6. Nickel concentrations in nickel compounds

(Unit : µg/mg)

Nickel compound	Total nickel concentration	Soluble nickel		Insoluble nickel	
		Concentration	Ratio (%)	Concentration	Ratio (%)
Nickel chloride	0.259	0.190	73.4	0.069	26.6
Nickel acetate	0.228	0.082	36.0	0.146	64.0
Nickel nitrate	0.195	0.146	74.9	0.049	25.1
Nickel sulfate	0.202	0.111	54.9	0.091	45.1
Nickel oxide	0.196	0	0	0.196	100
Nickel hydroxide	0.492	0	0	0.492	100
Nickel sulfide	0.362	0	0	0.362	100
Nickel carbonate	0.520	0.012	2.3	0.508	97.7

Table 7. Nickel concentrations by preparation method

(Unit : µg/mg)

Method*	Total nickel concentration	Residual Rate(%)	Soluble nickel		Insoluble nickel	
			Concentration	Ratio(%)	Concentration	Ratio(%)
Filter	1.641	100	-	-	-	-
HSE	1.348	82.1	0.756	56.1	0.592	43.9
ISO	1.482	90.3	0.682	46.1	0.799	53.9
OSHA	1.629	99.3	0.649	39.9	0.980	60.1
Luk	1.422	86.7	0.722	50.8	0.700	49.2

*HSE, HSE (UK Health and Safety Executive) MDHS (Methods for the Determination of Hazardous Substances) 42/2 method; ISO, ISO (International Organization for Standardization) 15202-2 method; OSHA, OSHA (Occupational Safety and Health Administration) ID-121 method; Luk, Luk et al. 2010 method

켈이 추출되었으며 OSHA 방법에서는 가장 적은 양이 추출되었다. 각 전처리 방법에 따른 남아있는 니켈의 비율은 82.1~99.3%이었다(Table 7).

3) 현장조사 및 시료 분석 결과

분석 방법의 유효성을 검증하기 위하여 니켈 표준물질을 사용하여 검량선을 작성한 결과 직선성, 검출한계, 정량한계 등은 모두 양호하였다(Table 8). 평균 회수율은 102.0%, 상대표준편차는 0.35%로 허용 기준 범위 이내에 해당하여 본 분석 방법의 정확도 및 정밀도가 적절함을 확인하였다. 현장 방문을 통하여 시료의 채취, 사용 공정 및 사용 물질을 조사하였으며 현장에서 채취한 시료의 공기 중 니켈 농도를 측정·분석한 결과를 Table 9에 나타내었다. 현장 방문을 통하여 시료의 채

취, 사용 공정 및 사용 물질을 조사하였으며 현장에서 채취한 시료의 공기 중 니켈 농도를 측정·분석한 결과를 Table 9에 나타내었다. A, B, C, D, E 사업장은 니켈 도금 작업을 수행하며 주로 가용성 니켈 화합물인 염화니켈과 황산니켈을 사용하고 있었다. 이 중 B 사업장은 불화니켈도 사용하고 있었으며, C 사업장은 칼륨 시안화니켈, 설파민산니켈, 브롬화니켈 등 다양한 니켈 화합물을 사용하고 있었다. B 사업장은 불용성 니켈도 취급하고 있었지만 채취 당일엔 사용하지 않았으며, C 사업장은 채취 당일엔 도금 작업이 이루어지지 않았다. F, G, H, I 사업장은 금속의 주조 및 용접 공정으로 주로 불용성 니켈을 취급하고 있었다. A, B, C, D 사업장은 지역시료로 포집하였으며 E, F, G, H, I 사업장은 개인시료로 포집하였다.

Table 8. Verification of calibration curve

Coefficient of Determination (R ²)	Slope	Y-intercept	Standard error	Limit of detection	Limit of quantitation
1.0000	15957.46	97.00	65.82	0.0124	0.0412

Table 9. Nickel concentrations in field sample

(Unit : mg/m³)

Workplace	Sample No.	Process	Sampling type	Concentration		
				Soluble nickel	Insoluble nickel	Total nickel
A	S1	Plating	Area	N.D.	N.D.	N.D.
	S2	Plating	Area	N.D.	N.D.	N.D.
	S3	Plating	Area	N.D.	N.D.	N.D.
B	S4	Plating	Area	0.0764	0.0077	0.0841
	S5	Plating	Area	0.0003	0.0043	0.0046
	S6	Plating	Area	0.0001	0.0064	0.0065
C	S7	Plating	Area	N.D.	N.D.	N.D.
	S8	Plating	Area	0.0035	0.0352	0.0387
	S9	Plating	Area	0.0053	0.1247	0.13
	S10	Plating	Area	N.D.	N.D.	N.D.
D	S11	Plating	Area	N.D.	N.D.	N.D.
	S12	Plating	Area	N.D.	N.D.	N.D.
	S13	Plating	Area	N.D.	N.D.	N.D.
E	S14	Plating	Personal	N.D.	N.D.	N.D.
	S15	Plating	Personal	N.D.	N.D.	N.D.
	S16	Melting	Personal	0.0017	0.0032	0.0049
	S17	Melting	Personal	0.0015	0.0039	0.0054
F	S18	Turning	Personal	0.0018	0.0061	0.0079
	S19	Turning	Personal	0.0015	0.0028	0.0043
	S20	Turning	Personal	0.0017	0.0058	0.0075
	S21	Turning	Personal	0.0016	0.0098	0.0114
G	S22	Welding	Personal	N.D.	0.0342	0.0342
	S23	Welding	Personal	N.D.	0.0324	0.0324
H	S24	Welding	Personal	N.D.	0.0167	0.0167
	S25	Welding	Personal	N.D.	0.0053	0.0053
I	S26	Welding	Personal	N.D.	N.D.	N.D.

N.D : Not detected

공정별로 비교하면, 도금 공정의 경우 염화니켈, 황산니켈, 불화니켈을 사용하는 B 사업장에서는 가용성 니켈과 불용성 니켈 모두 미량 검출되었으며 가용성 니켈의 함량이 불용성 니켈보다 높았으나 노출기준 미만이었다. C 사업장에서는 설파민산니켈과 염화니켈 사용 공정 시료에서는 니켈이 검출되지 않았으나, 황산니켈, 니켈칼륨시안화, 브롬화니켈을 사용하는 공정에서는 가용성 니켈과 불용성 니켈이 모두 검출되었으며, 이 중 불용성 니켈의 함량이 높게 검출되었다. 염화니켈과 황산니켈을 사용하는 A, D, E 사업장은 모든 시료에서 니켈이 검출되지 않았다. 금속의 주조 및 선반가공 공정의 경우 F 사업장에서는 가용성 니켈과 불용성 니켈이 모두 검출되었으나, 불용성 니켈의 함량이 더 높았고

모두 노출기준 미만이었다. 용접 공정에서는 G, H 사업장에서는 불용성 니켈만 검출되었으나 역시 노출기준 미만이었으며 I 사업장은 니켈이 검출되지 않았다.

IV. 고 찰

니켈은 피부, 경구, 흡입 등 다양한 경로를 통해 체내로 흡수될 수 있으나, 작업장에서 호흡기 영향과 관련된 주요 노출 경로는 흡입이다. 특히 니켈이 불용성 형태일 경우, 흡입 시 부비강과 폐에 침착 및 축적될 가능성이 더 높다. 동물 실험에 따르면 불용성 니켈에 노출된 경우 가용성 니켈에 비해 폐암 발병 위험이 더 높지만, 두 형태가 모두 존재하는 경우에는 가용성 니켈이

세포 증식을 증가시키는 종양 촉진제로 작용할 수 있다 (Kelvin et al., 2021).

이러한 특성을 반영하여 니켈에 대해서는 생체이용율의 차이를 고려한 다양한 노출기준이 설정되어 있다. NIOSH, OSHA, HSE 등 주요 국외 기관에서는 주로 니켈 금속, 가용성 니켈, 불용성 니켈, 니켈카르보닐 등으로 구분하고 있었다. 이들 기관 모두 가용성 니켈의 노출기준이 불용성 니켈의 노출기준보다 더 낮게 설정되어 있다. 우리나라의 노출기준 역시 대부분 ACGIH TLV를 준용하고 있어 니켈의 분류도 유사하게 구분하고 있으나 ACGIH는 흡입성 입자에만 해당되며 황화니켈에 대한 노출기준을 별도로 분류하고 있지 않다는 점에서 차이가 있다(ACGIH, 2024).

노출기준에 따라 작업장 노출을 효과적으로 모니터링하기 위해서는 니켈의 종류별 분리 및 분석 방법이 필요하다. 이를 위해 적절한 용매를 사용하여 용해 또는 추출하여야 하는데, 니켈의 용해도는 니켈의 화학적 형태, 추출 용매, 추출 조건에 따라 달라진다. 니켈 화합물이 용해되면 용액에서 불용성 부분을 분리하기 위해 적절한 공극 크기를 가진 필터를 사용하여 여과하며, 이 과정에서 여과된 용액에는 가용성 니켈 이온이 포함되고 필터에는 불용성 니켈만 남아있게 된다.

니켈을 종류별로 분리하는 방법으로 Zatka 등의 순차적 추출 방법이 널리 사용된다. 이 방법에서는 먼저 구연산암모늄으로 가용성 니켈을, 구연산암모늄과 과산화수소의 혼합액으로 황화니켈을 추출한다. 그리고 메탄올과 브롬 혼합액으로 금속 니켈을 추출한 후 마지막으로 질산으로 산화니켈을 추출하는 방법이다(Zatka et al., 1992). 이와 같이 가용성 니켈을 추출할 때 완충 및 킬레이트 특성을 가진 구연산암모늄 용액이 많이 권장된다. 윤충식의 연구에서도 스테인리스강 와이어 용접 흡을 대상으로 탈이온수와 구연산암모늄 용액을 사용하여 전처리한 결과 가용성 니켈은 단순히 탈이온수보다 구연산암모늄을 사용하는 것이 2배 이상 검출된 것으로 보고되었다(Yoon, 2003). 이는 용접흡과 같이 불용성 니켈이 많이 발생하는 작업장 시료에서는 추출능이 뛰어나 검출에 유리하지만 가용성 니켈을 주로 사용하는 작업장은 탈이온수를 사용해도 충분하다고 판단되었다. 본 연구에서도 구연산암모늄과 탈이온수를 사용한 추출 후 가용성 니켈의 농도 측정 결과 충분히 회수되었음을 확인하였다.

추출 용매뿐만 아니라 추출 조건 역시 중요하다.

OSHA ID-121과 같은 일부 분석 방법에서는 초음파를 이용한 전처리를 제시하고 있으나, 초음파의 작용과 이로 인해 발생하는 열로 인해 니켈의 용해량이 크게 달라질 수 있으므로 초음파 사용은 권장되지 않는다(ISO, 2012). 또한, Luk 등의 방법에서 사용하는 원심분리의 경우에도 너무 높은 속도로 장시간 처리할 경우 열이 발생하여 용해량에 영향을 미칠 수 있으므로 원심분리기 회전수와 시간 설정에 주의하여야 한다(Luk et al., 2000).

아울러, 시료의 채취 및 작업현장의 환경을 정확히 파악하는 것 역시 중요하다. 대부분의 시료는 니켈의 발생형태, 니켈 농도, 입자 크기 등에 따라 니켈 추출에 필요한 시간 등에 영향을 미칠 수 있다. Conard 등은 니켈이 초미세 또는 나노 크기 입자로 존재하는 경우 추출 과정에서 적어도 부분적으로 가용성 니켈로 작용할 수 있음을 지적하였다(Conard et al., 2008).

ISO는 체액마다 용해도 특성(예: pH, 염분, 폴리펩타이드 등)이 다르기 때문에 “생체이용률(bioavailability)”에 대한 획일적인 정의는 현실적으로 어렵다고 판단하였다. 이에 따라, 용해성 금속화합물에 대한 절차를 생화학적 기준이 아닌 화학적 기준으로 설명하기로 결정하고 작업환경측정에서 금속 원소에 대한 시료 전처리 방법을 제공하여 가용성 금속화합물에 대한 추출 절차를 표준화하고자 하였다. ISO 15202-2(2012)에서는 가용성 금속 화합물의 추출 시, 기본적으로 순수한 물을 이용하여 인체 온도인 약 37°C에서 60분간 교반하도록 제안하고 있다. 니켈의 경우에는 구연산암모늄 용액을 이용하여 추출하도록 권장하기도 하였다(ISO, 2012).

국내에서도 금속 및 금속화합물의 신뢰성 있는 작업환경평가를 위해 노출기준을 적용 시 물질별 주요 건강영향, 입자 특성, 평가 기준 물질, 용해도 특성 등을 종합적으로 고려하여 평가하여야 한다고 제시하고 있다. 또한, 용해도에 따라 노출기준이 다른 금속화합물의 정량분석을 위해 국외 권고 측정·분석 방법을 고찰하여 가용성 및 불용성 금속 화합물의 동시 측정분석 방법을 제안한 바 있다(Park et al., 2020b).

본 연구에서는 우선 가용성 니켈 화합물과 불용성 니켈 화합물을 조사하여 가용성 니켈인 염화니켈, 초산니켈, 질산니켈, 황산니켈과 불용성 니켈인 산화니켈, 수산화니켈, 아황화니켈, 탄산니켈 등 총 8종을 선정하여 니켈의 함량을 분석하였다. 분석방법은 ISO 방법을 참고하였으며, 이 방법은 탈이온수를 사용하여 체온과 비

슷한 상태의 온도에서 교반함으로써 실제 체내 흡수 시 영향을 고려한 방식이다. 가장 중요한 점은 가용성 니켈을 정확히 추출할 수 있도록 용매의 양, 추출 시간, 온도, 여과 매체, 여과 방법, 여과 시간 등 다양한 조건을 최적화하여 재현 가능성을 확보하는 것이었다. 그 결과 가용성 니켈은 대부분 탈이온수에 용해되었으며, 불용성 니켈은 거의 용해되지 않았다. 또한, 표준 니켈 혼합물 시료를 사용하여 분석 방법의 유효성을 검증하고 분석 조건을 최적화한 결과 가용성 니켈의 추출을 위한 전처리 조건에는 큰 차이가 없음을 확인하였다.

2013년부터 2019년까지 공단의 작업환경측정 데이터베이스에 따르면, 니켈 시료 중 불용성 무기화합물이 가장 큰 비중을 차지하였으며(61.3%), 금속 니켈(29.3%)과 가용성 화합물(9.3%)도 적지 않은 부분을 차지하고 있었다(Park et al., 2020a). 또한, 산업안전보건연구원에 분석을 의뢰한 시료도 용접 공정이나 도금 공정 뿐만 아니라 스테인리스강 등과 같은 금속 제작 공정 등 다양한 공정에서 다양한 노출 형태로 나타나고 있었다.

그러나 실제 분석을 의뢰할 때에는 니켈의 종류를 구분하지 않고 단순히 니켈로 의뢰하거나 공정에 따라 용접 공정의 경우 불용성 니켈 화합물, 도금 공정의 경우 가용성 니켈 화합물로 의뢰하는 경우가 많았다. 또한 니켈 종류를 구분하여 분석을 요청하더라도 현재의 분석방법은 산을 이용한 전처리를 통해 총 니켈 함량만을 측정하므로 일부 니켈 종의 노출 농도가 과대평가될 수 있다. 따라서 작업환경측정 평가 시 추가적인 공정이나 작업장 환경 조사를 통하여 동시 노출의 가능성을 보다 면밀히 확인할 필요가 있으며, 정확한 측정 대상을 선정하고 니켈의 종류를 구분하여 분석하는 것이 중요하다고 판단된다.

본 연구의 분석 결과에서도 몇 가지 제한점이 존재하였다. 우선 가용성 니켈과 불용성 니켈을 동시에 사용하거나 노출되는 작업장을 선정하는 데 한계가 있었다. 실제로 조사 대상 중 한 사업장만이 가용성 니켈과 불용성 니켈을 동시에 취급하고 있었으나 해당 사업장 역시 공정이 분리되어 있었으며 시료 채취 당일에는 불용성 니켈의 취급 작업이 이루어지지 않았다. 공정 특성상 도금 공정에서는 주로 가용성 니켈이 사용되었으며 금속 취급 및 용접 공정에서는 불용성 니켈이 주로 사용되었다. 단, 농도가 낮았으나 가용성 니켈을 사용하는 사업장 시료에서 불용성 니켈이, 불용성 니켈을 사용하

는 사업장 시료에서 가용성 니켈이 각각 검출될 가능성을 확인할 수 있었다. 이와 같은 제한점들은 결과의 해석 및 일반화에 신중을 기해야 함을 의미하며 향후 연구에서는 보다 다양한 공정과 작업 환경을 포괄할 수 있는 표본 선정이 필요하다.

한편, 유럽화학물질청(European Chemicals Agency, ECHA)에서는 위험성평가위원회(Committee for Risk Assessment, RAC)에 니켈 및 니켈 화합물의 직업적 노출 기준에 대한 과학적 근거를 평가하기 위한 조언을 요청하였다. RAC는 니켈 화합물의 호흡기계의 발암성을 근거로 노출 한계를 도출하였으며, 그 결과 니켈 금속과 니켈 화합물 모두에 대해 호흡성 분진의 경우 0.005 mg/m^3 , 흡입성 분진의 경우 0.03 mg/m^3 로 제한하였다. 보고서에 따르면 동물 실험에서 발암성 영향은 불용성 니켈 종에 대해서만 입증되었지만 인간의 경우 가용성 니켈 화합물과 불용성 니켈 화합물에 혼합 노출될 경우 용량의존적으로 발암 가능성(폐암 및 비강암)이 있는 것으로 나타났다. 실제 작업 환경에서 니켈에 노출되는 것은 거의 모든 경우에 다양한 니켈 종의 혼합물에 노출되는 경우가 대부분이므로 니켈 화합물의 종류에 따라 다른 노출기준을 설정하는 것은 실용적이지 않다고 판단하였다. 이에 따라 유럽위원회(European Commission, EC)는 니켈을 발암성 1A 및 과민성 물질로 분류하고, 입자의 크기에 따라 호흡성 분진은 0.01 mg/m^3 , 흡입성 분진은 0.05 mg/m^3 의 노출기준을 적용하기로 하였다. 이 지침의 도입으로 기존의 유기/무기 화합물 여부나 용해성 등에 따라 구분되어 있던 노출기준은 약 90% 감소하였으며, 단기노출기준(Short Term Exposure Limit, STEL)은 삭제되었다(EC, 2020).

따라서 우리나라도 니켈 및 니켈 화합물의 노출기준에 대하여 ECHA, NIOSH와 같이 노출기준을 통합하는 방향으로 개정 방안을 모색하거나, 현행 노출기준에 맞추어 니켈의 종류별 측정·분석 방법을 도입할 것인지 신중히 검토해야 할 것이다. 이를 위해 측정기관은 작업현장에서 발생하는 니켈의 종류와 특성을 정확히 파악하여 분석을 의뢰해야 하며, 분석기관은 각 니켈의 종류에 적합한 분석 방법을 적용하여 신뢰성 있는 결과를 제공하는 것이 필요하다.

V. 결 론

본 연구에서는 노출기준이 상이한 가용성 니켈 화합

물과 불용성 니켈 화합물이 동시에 작업자에게 노출되는 경우, 용해도에 따라 분리하여 평가할 수 있는 분석 방법과 실제 적용 방안을 제안하였다. 니켈 사용 작업 현장에서 채취한 공기 중 시료를 가용성 니켈과 불용성 니켈을 분리하여 분석한 결과, 도금 사업장은 가용성 니켈뿐만 아니라 불용성 니켈도 검출되었으며, 일부 사업장에서는 오히려 불용성 니켈의 함유량이 더 높게 나타났다. 금속의 용해 및 선반가공 사업장 역시 가용성 니켈과 불용성 니켈을 모두 함유하고 있었으며 불용성 니켈을 더 많이 함유하고 있었다. 용접 공정에서는 불용성 니켈만 검출되었다. 본 연구에서 채취한 현장 시료들은 한 가지 종류의 니켈을 주로 사용하는 작업장으로 동시 측정하기에 적합하지 않았으나 미량이라도 가용성 니켈과 불용성 니켈이 동시에 검출될 수 있음을 확인하였고, 이는 노출기준 적용에 영향을 줄 수도 있음을 시사한다.

본 연구에서 제안한 방법은 작업환경측정 시 추가 작업 없이 시료를 채취하더라도 분석 단계에서 가용성 니켈과 불용성 니켈을 분리하여 평가할 수 있다는 장점이 있다. 따라서, 작업장의 환경에 따라 가용성 니켈과 불용성 니켈이 동시에 노출되는 경우 각각을 구분하여 평가할 수 있다. 또한, 본 연구에서 언급한 니켈의 순차적 추출 방법을 이용하면 노출기준이 다른 금속 니켈 및 황화니켈의 정확한 구분도 가능할 것이다. 결론적으로 본 연구는 가용성 및 불용성 니켈 화합물의 노출수준을 파악할 수 있는 측정분석 방법을 제시하고 그 유효성을 확인함으로써 측정기관의 혼란을 감소시키고 작업자의 노출 환경을 보다 정확히 평가가 가능함을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 2023년 안전보건공단 산업안전보건연구원 에서 수행한 연구과제를 기반으로 작성되었음.

References

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Guide to occupational exposure values. ACGIH.; 2024
 Ashley K. International standard procedure for the extraction of metal compounds having soluble threshold limit values. Appl occup environ hyg

2001;16(9):850-853
 Conard BR, Zelding N, Bradley GT. Speciation/fractionation of nickel in airborne particulate matter: Improvements in the Zatka sequential leaching procedure. Journal of Environmental Monitoring, 2008;10:532-540
 European Chemicals Agency(ECHA), Opinion on scientific evaluation of occupational exposure limits for Nickel and its compounds. ECHA.; 2018
 European Commission. COM(2020) 571-Directive of the European parliament and of the council. amending Directive 2004/37/EC on the protection of workers from the risks related to exposure to carcinogens or mutagens at work. European Commission, EC.; 2020
 European Commission. Recommendation from the Scientific Committee on Occupational Exposure Limits for nickel and inorganic nickel compounds. EC. 2011
 Health and Safety Executive(HSE). Methods for the determination of hazardous substances(MDHS) 42/2: Nickel and inorganic compounds of nickel in air(except nickel carbonyl). HSE Books 1996a ISBN 07176 1094 2
 International Agency for Research on Cancer(IARC). IARC Monograph - Nickel and nickel compounds. IARC.; 2018
 International Organization for Standardization(ISO). ISO 15202-2:2012, Workplace air-Determination of metals and metalloids in airborne particulate matter by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry-Part 2: Sample preparation. ISO.; 2012
 Kelvin M, Verpaele S, Leybourne M, Layton-Matthews D, Vermeer P. Comparison of quantitative mineralogy and sequential leaching for characterization of Ni in workplace dust collected at a stainless steel operation. Journal of Occupational and Environmental hygiene, 2021;18(12):555-569
 Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA). Technical guideline for work environment measurement and analysis of nickel. KOSHA GUIDE A-3-2019. KOSHA.; 2019
 Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA). Technical guideline of Health management for workers exposed to nickel or its compounds. KOSHA GUIDE H-114-2019. KOSHA.; 2019
 Luk K, Grohse P, Gutknecht W. 2000. Development of a method for speciation of nickel. Research Triangle Institute, NC. 27709:49.
 Ministry of Employment and Labor(MoEL). Enforcement Decree of the Occupational Safety and Health

- Act(President Decree No. 35597).; 2025a
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Enforcement Regulations of Occupational Safety and Health Act (MoEL Ordinance No. 443).; 2025b
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Exposure Limit of Chemicals and Physical Agent(MoEL Public Notice No. 2020-48).; 2020
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Local rule on Occupational Safety and Health Standard(Ordinance of the MoEL No. 448).; 2025c
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Occupational Safety And Health Act.(Act No. 20677).; 2025d
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Standard for Classification, Labelling of Chemical Substance and Material Safety. Data Sheet(MoEL Public Notice No. 2023-9).; 2023
- National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH). NIOSH manual of analytical methods. 5th Ed., Chapter SM: Sampling and analysis of soluble metal compounds. NIOSH, 2016b NIOSH.; 2016
- National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH). Sampling and Analysis of Soluble Metal Compounds. NIOSH.; 2016
- Occupational Safety & Health Administration(OSHA). Sampling and analytical methods, ID-121: Metal & metalloid particulates in workplace atmospheres (atomic absorption). OSHA.; 2002
- Park IJ, Lee MY. Research on the development of a analytical method for nickel in urine. Occupational Safety and Health Research Institute(OSHRI).; 2003
- Park JI, Choi SH, Lee AR, Ko JU. Strategies for Revising the Korean Occupational Exposure Limits of Metal Compounds. Occupational Safety and Health Research Institute(OSHRI).; 2020a
- Park SH, Kim GB, Shin JA, Par CY. Reasonable application of occupational exposure limits in exposure monitoring for metals and their compounds. Occupational Safety and Health Research Institute (OSHRI).; 2013
- Park SH, Ro JW, Jang MY. Review of the Determination Methods for Metal Compounds with Different Occupational Exposure Limits Depending on Solubility. J Korean Soc Occup Environ Hyg. 2020b;30(2):87-98(https://doi.org/10.15269/JKS_OEH.2020.30.2.87)
- Yoon CS. New ISO procedure for the evaluation of hazardous metals having soluble occupational exposure limits. J Korean Soc Occup Environ Hyg, 2003;13(3):207-216
- Zatka VJ, Stuart Warner J, Maskery D. Chemical speciation of nickel in airborne dusts: analytical method and results of an interlaboratory test program. Environ. Sci. Technol. 1992;26(1): 138-144

<저자정보>

한정희(연구위원), 이혜진(연구위원)