



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

광주·전남지역의 일부 n-헥산 노출  
작업자의 소변 중 2,5-헥산디온  
농도에 관한 연구



HANSUNG  
UNIVERSITY

2025년

한 성 대 학 교 대 학 원

기 계 시 스 템 공 학 과

산 업 위 생 공 학 전 공

백 송 희



석사학위논문  
지도교수 박두용

광주·전남지역의 일부 n-헥산 노출  
작업자의 소변 중 2,5-헥산디온  
농도에 관한 연구

A Study on Urinary 2,5-Hexanedione Levels Based on Special  
Health Examination Data from 2018 to 2023 in the Gwangju  
and Jeonnam Regions

2025년 6월 일

한 성 대 학 교 대 학 원

기 계 시 스템 공 학 과

산 업 위 생 공 학 전 공

백 송 희

석사학위논문  
지도교수 박두용

광주·전남지역의 일부 n-헥산 노출  
작업자의 소변 중 2,5-헥산디온  
농도에 관한 연구

A Study on Urinary 2,5-Hexanedione Levels Based on Special  
Health Examination Data from 2018 to 2023 in the Gwangju  
and Jeonnam Regions

위 논문을 공학 석사학위 논문으로 제출함

2025년 6월 일

한 성 대 학 교 대 학 원

기 계 시 스템 공 학 과

산 업 위 생 공 학 전 공

백 송 희

백송희의 공학 석사학위 논문을 인준함

2025년 6월 일



심사위원장 윤 주 일 (인)

심 사 위 원 강 태 선 (인)

심 사 위 원 박 두 용 (인)

# 국 문 초 록

## 광주·전남지역의 일부 n-헥산 노출 작업자의 소변 중 2,5-헥산디온 농도에 관한 연구

한 성 대 학 교 대 학 원  
기 계 시 스 템 공 학 과  
산 업 위 생 공 학 전 공  
백 송 회

본 연구는 광주광역시·전남지역 일부 사업장을 대상으로 2018년부터 2023년까지 수행된 특수건강진단 결과 중 근로자의 소변 중 2,5-헥산디온 농도와 작업환경측정결과 중 공기 중 n-헥산 노출 농도 자료를 분석하였다. 총 321개소의 사업장에서 n-헥산 노출이 의심되어 특수건강진단을 실시한 5,765건 중에서 소변 중 2,5-헥산디온이 검출된 건은 1,380건으로 24%에 불과했다. n-헥산의 공기 중 노출농도를 측정한 작업환경측정결과를 분석한 결과, 총 측정건수 1,137건 중에서 n-헥산이 검출된 건은 98건(8.3%)에 불과했고, 1,039건(91.7%)에서는 n-헥산이 검출되지 않은 것으로 나타났다.

소변 중 2,5-헥산디온이 검출된 자료만 가지고 기하평균(GM)을 산출한 결과, 연도별로 0.26 mg/L에서 1.08 mg/L로 큰 차이를 보였고, 기하표준편차(GSD)도 1.53에서 3.79로 매우 큰 것으로 나타났다. 이것은 연도별로 소변

중 2,5-헥산디온의 농도 차이보다는 분석시 검출한계값을 다르게 설정했기 때문인 것으로 추정되었다. 특히 우리나라에서 소변 중 2,5-헥산디온 분석방법은 사용하는 가수분해방법은 n-헥산 비노출군에서도 소변 중 2,5-헥산디온이 검출되므로 정량한계를 고려하지 않고 자료를 분석하면 오류가 발생할 수 있음을 확인하였다. 따라서 소변 중 2,5-헥산디온의 기준치인 5 mg/L의 1/20인 0.25 mg/L 또는 1/10인 0.5 mg/L 이하를 제외한 나머지 데이터를 가지고 위험도를 분석하는 것이 더 타당할 것으로 보였다.

전반적으로 2,5-헥산디온이 검출된 사업은 50인 미만의 소규모 사업장이 전체의 약 56%를 차지하였고, 이들 사업장에서 상대적으로 더 높은 노출 농도 및 변동성이 관찰되었다. 그러나 2023년도의 자료에서는 300인 이상 사업장에서도 검출률이 36.0%에 달하였고, 평균 농도도 1.07 mg/L로 높게 나타나, 반드시 소규모 사업장에서만 높게 나타나는 것은 아니다.

소변 중 2,5 헥산디온 검출업종은 제조업이 대부분을 차지하였으며, 공정별로는 접착공정(1.2 mg/L), 도장공정(1.12 mg/L), 사출공정(0.98 mg/L)에서 높게 나타났다. 대부분의 측정치는 기준치인 5 mg/L를 초과하지 않았으나 일부 공정에서는 통계적으로 추정할 경우 노출기준을 초과할 수 있는 가능성이 있었다.

**【주요어】** 2,5-헥산디온, n-헥산, 헥산의 생물학적 노출, 특수건강진단

# 목 차

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 제 1 장 서 론 .....                    | 1  |
| 제 1 절 연구배경 및 목적 .....              | 1  |
| 제 2 장 연구 방법 .....                  | 2  |
| 제 1 절 연구 대상 .....                  | 2  |
| 1 ) 연구자료 .....                     | 2  |
| 2 ) 특수건강진단 .....                   | 2  |
| 3 ) 작업환경측정 .....                   | 3  |
| 제 2 절 연구 방법 .....                  | 4  |
| 1 ) 자료수집 및 분석방법 .....              | 4  |
| 제 3 장 연구 결과 .....                  | 5  |
| 제 1 절 소변 중 2,5-헥산디온 농도 .....       | 5  |
| 1 ) n-헥산의 생물학적 지표 .....            | 5  |
| 2 ) 소변 중 2,5-헥산디온 .....            | 6  |
| 제 2 절 소변 중 2,5-헥산디온 농도 특성 분석 ..... | 14 |
| 1 ) 규모 별 소변 중 2,5-헥산디온 농도 .....    | 14 |
| 2 ) 업종별 소변 중 2,5-헥산디온 농도 .....     | 18 |
| 3 ) 소변 중 2,5-헥산디온 노출구간 별 분포 .....  | 23 |
| 제 3 절 n-헥산 노출 작업자의 작업환경측정 결과 ..... | 25 |

|                 |    |
|-----------------|----|
| 제 4 장 결 론 ..... | 32 |
| 참 고 문 헌 .....   | 34 |
| ABSTRACT .....  | 36 |



## 표 목 차

|                                                |    |
|------------------------------------------------|----|
| <표 1> 2,5-헥산디온 가스크로마토그래피의 분석조건 .....           | 3  |
| <표 2> 헥산 가스크로마토그래피의 분석조건 .....                 | 3  |
| <표 3> n-헥산의 공기 중 노출기준 및 생물학적노출지표(BEI) 기준 ...   | 6  |
| <표 4> 특수건강진단 사업장 및 검진자 수 .....                 | 6  |
| <표 5> 특수건강진단 검출 및 불검출 건수 .....                 | 7  |
| <표 6> n-헥산 생물학적 지표 연도별 현황 .....                | 8  |
| <표 7> 규모별 특수건강진단 현황 .....                      | 14 |
| <표 8> 10인 미만 사업장의 소변 중 2,5-헥산디온 농도 .....       | 15 |
| <표 9> 10~49인 미만 사업장의 소변 중 2,5-헥산디온 농도 .....    | 16 |
| <표 10> 50~99인 미만 사업장의 소변 중 2,5-헥산디온 농도 .....   | 16 |
| <표 11> 100~299인 미만 사업장의 소변 중 2,5-헥산디온 농도 ..... | 17 |
| <표 12> 300인 이상 사업장의 소변 중 2,5-헥산디온 농도 .....     | 17 |
| <표 13> 업종별 소변 중 2,5-헥산디온 특수건강진단 실시 현황 .....    | 18 |
| <표 14> 업종별 소변 중 2,5-헥산디온 농도 .....              | 18 |
| <표 15> 자동차 부품 제조업의 소변 중 2,5-헥산디온 농도 .....      | 19 |
| <표 16> 화학물질, 화학제품 제조업의 소변 중 2,5-헥산디온 농도 ....   | 20 |
| <표 17> 금형 및 금속제품 제조업의 소변 중 2,5-헥산디온 농도 .....   | 20 |
| <표 18> 기계 및 전자제품 제조업의 소변 중 2,5-헥산디온 농도 .....   | 21 |
| <표 19> 그 외 제조업의 소변 중 2,5-헥산디온 농도 .....         | 22 |
| <표 20> 공정별 소변 중 2,5-헥산디온 노출농도 .....            | 22 |
| <표 21> 소변 중 2,5-헥산디온 노출구간 .....                | 23 |
| <표 22> 소변 중 2,5-헥산디온 업종 별 25~100% 초과 구간 .....  | 24 |
| <표 23> 작업환경측정 사업장 개소 .....                     | 25 |

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| <표 24> 작업환경측정 검출 및 불검출 건수 .....            | 26 |
| <표 25> 작업환경측정 현황 .....                     | 27 |
| <표 26> 규모별 n-헥산 작업환경측정 현황 .....            | 27 |
| <표 27> 10인 미만 사업장의 공기 중 n-헥산 노출 현황 .....   | 28 |
| <표 28> 10~49인 사업장의 공기 중 n-헥산 노출 현황 .....   | 28 |
| <표 29> 50~99인 사업장의 공기 중 n-헥산 노출 현황 .....   | 29 |
| <표 30> 100~299인 사업장의 공기 중 n-헥산 노출 현황 ..... | 30 |
| <표 31> 300인 이상 사업장의 공기 중 n-헥산 노출 현황 .....  | 30 |
| <표 32> 업종별 n-헥산 작업환경측정 개소 현황 .....         | 31 |
| <표 33> 업종별 n-헥산 작업환경측정 현황 .....            | 31 |



## 그 립 목 차

|                                               |    |
|-----------------------------------------------|----|
| [그림 1] 2018년 소변 중 2,5-헥산디온 농도(mg/L) 분포. ....  | 8  |
| [그림 2] 2019년 소변 중 2,5-헥산디온 농도(mg/L) 분포. ....  | 9  |
| [그림 3] 2020년 소변 중 2,5-헥산디온 농도(mg/L) 분포. ....  | 9  |
| [그림 4] 2021년 소변 중 2,5-헥산디온 농도(mg/L) 분포. ....  | 10 |
| [그림 5] 2022년 소변 중 2,5-헥산디온 농도(mg/L) 분포. ....  | 10 |
| [그림 6] 2023년 소변 중 2,5-헥산디온 농도(mg/L) 분포. ....  | 11 |
| [그림 7] 연도별 소변 중 2,5-헥산디온 농도(mg/L) 분포 취합. .... | 11 |



# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구배경 및 목적

n-헥산(n-hexane)은 전자부품 제조, 섬유가공, 접착제 및 세척제 등 다양한 산업 공정에서 유기용제로 사용되고 있는 화학물질이다. 그러나 n-헥산은 체내 흡수 후 간에서 대사되어 2,5-헥산디온(2,5-hexanedione

)과 같은 독성 대사산물을 생성하며, 이는 말초신경병증을 유발할 수 있는 주요 원인물질로 알려져 있다. 이러한 특성으로 인해 n-헥산은 작업자 건강에 중대한 영향을 미칠 수 있는 직업성 유해물질로 분류되며, 이에 대한 적절한 노출 관리는 산업위생 분야의 주요 과제로 인식되고 있다.

국내에서도 n-헥산 취급 사업장을 대상으로 한 작업환경측정 및 특수건강 진단을 실시하고 있으며, 이를 통해 근로자의 건강영향을 조기에 파악하고 노출 저감 조치를 유도하는 등 예방적 관리가 이루어지고 있다. 그러나 국내 특정 지역, 사업장 규모, 업종별 특성 등에 따라 소변 중 2,5-헥산디온 농도의 노출 양상이 어떻게 변하는지에 대한 체계적 분석은 비교적 부족한 상황이다. 특히, 지역 기반의 노출 특성 분석은 향후 맞춤형 노출 저감 및 건강보호 대책 수립을 위한 기초자료로서의 활용 가능성이 높음에도 불구하고 이에 대한 학술적 접근은 제한이 따른다.

본 연구는 광주광역시 및 전라남도 지역 일부 n-헥산 노출 사업장을 대상으로 최근 6개년의 특수건강진단 자료를 수집·분석함으로써 근로자의 소변 중 2,5-헥산디온 농도 분포와 변화 추이를 파악하고 사업장의 규모, 연도별, 업종에 따른 노출 특성의 차이를 분석하며, 일부 사업장의 경우 공기 중 n-헥산 농도와의 상관관계도 비교·검토하고자 한다.

이를 통해 지역 기반의 n-헥산 노출 특성과 관리 수준을 평가하고, 향후 효과적인 노출 저감 대책 및 근로자 건강보호 전략 수립에 필요한 근거자료를 제시하고자 한다.

## 제 2 장 연구 방법

### 제 1 절 연구 대상

#### 1 ) 연구자료

본 연구는 2018년부터 2023년까지 광주광역시 및 전남지역의 제조업, 서비스업 등 n-헥산을 사용하는 일부 사업장에서 직접적으로 노출되는 작업자를 대상으로 시행된 2,5-헥산디온의 특수건강검진 데이터를 수집하여 대상을 선정하였다.

#### 2 ) 특수건강진단

특수건강진단은 산업안전보건법에 따라 특정 유해인자에 노출되는 근로자에 대해 주기적으로 실시되는 건강검진으로, 지정된 검진기관에서 연 1회 이상 정기적으로 실시되며, n-헥산을 취급하는 근로자에 대한 특수건강진단은 6개월에 1회 이상(연 2회) 실시하도록 되어있다.

검체는 작업종료 직후를 기준으로 수집되었으며, 생물학적 노출지표로서의 유효성을 확보하기 위해 산 가수분해 전처리를 통한 총 2,5-헥산디온 농도가 측정되었다.

분석 방법은 가스크로마토그래피(GC)를 사용하였으며, 분석조건은 <표 1>과 같다.

**<표 1> 2,5-헥산디온 가스크로마토그래피의 분석조건**

|        |                                   |
|--------|-----------------------------------|
| 컬럼     | 30 m × 0.25 mm × 0.25 μm (비극성 컬럼) |
| 주입구 온도 | 250℃                              |
| 검출기 온도 | 300℃                              |
| 오븐 온도  | 80℃에서 시작하여 승온 (최대 220℃)           |
| 시료 전처리 | 산 가수분해 후 에틸아세테이트 추출               |
| 가스     | 헬륨(He)                            |

### 3 ) 작업환경측정

본 연구에서는 특수건강진단 결과와 함께, 일부 사업장에서 수행된 작업환경측정 결과 중 n-헥산 항목의 공기 중 농도 데이터를 보조적으로 활용하였다. 작업환경측정은 산업안전보건법에 근거하여 n-헥산을 취급하는 공정에 대해 6개월마다 1회 이상(연 2회 이상) 실시되며, 정기적으로 해당 유해물질의 공기 중 농도를 파악하여 근로자의 노출 수준을 평가한다.

측정은 근로자의 호흡 영역에서 시료를 채취하는 개인시료 채취법으로 수행되었으며, 분석은 가스크로마토그래피를 이용하였다.

측정 결과는 8시간 시간가중평균농도(Time-Weighted Average, TWA)로 산출되며, 대한민국 산업안전보건공단에서 고시한 노출기준 50 ppm을 기준으로 초과 여부를 판정하였다.

**<표 2> 헥산 가스크로마토그래피의 분석조건**

|        |                                        |
|--------|----------------------------------------|
| 컬럼     | 30 m × 0.32 mm × 1.0 μm (비극성 컬럼)       |
| 주입구 온도 | 250℃                                   |
| 검출기 온도 | 300℃                                   |
| 오븐 온도  | 60℃에서 시작하여 승온 (최대 200℃)                |
| 시료 전처리 | 활성탄 튜브 시료를 이황화탄소(CS <sub>2</sub> )로 용출 |
| 가스     | 헬륨(He) 또는 질소(N <sub>2</sub> )          |

## 제 2 절 연구 방법

### 1 ) 자료수집 및 분석방법

본 연구는 광주광역시 및 전남지역의 n-헥산을 취급하는 일부 사업장을 대상으로, 2018년부터 2023년까지 6년간 모 기관에서 수행된 특수건강진단 결과 및 작업환경측정 결과를 수집·분석하였다. 자료는 산업안전보건법에 따라 실시된 특수건강진단 및 작업환경측정 결과로서, 각 사업장의 업종, 규모, 연도별 정보를 포함하고 있다.

자료 분석은 Microsoft Excel과 통계 프로그램을 활용하였으며, 연도별, 업종별, 사업장 규모별 등으로 요중 2,5-헥산디온 농도의 분포 및 검출률을 산출하였다. 통계처리 시에는 산술평균(Arithmetic Mean, AM), 표준편차(Standard Deviation, SD), 기하평균(Geometric Mean, GM), 기하표준편차(Geometric Standard Deviation, GSD)를 산출하여 노출 수준의 중심경향성과 변동성을 파악하였다. 필요시 0값 제외, 로그 변환 등을 병행하여 정규성 확보 및 정량적 비교 가능성을 높이고자 하였다.

## 제 3 장 연구 결과

### 제 1 절 소변 중 2,5-헥산디온 농도

본 연구는 광주광역시 및 전남지역 일부 작업장에서 n-헥산에 노출되는 작업자를 대상으로 특수건강검진 결과를 분석하여, 소변 중 2,5-헥산디온 농도의 특성을 파악하였다.

연도 별 소변 중 2,5-헥산디온 농도의 분포를 분석한 결과, 일부 작업자에서 초과는 아니나 상대적으로 높은 수준을 보였으며, 이는 특정 고 노출 작업 환경이나 개인적 요인에 기인한 것으로 보인다.

#### 1 ) n-헥산의 생물학적 지표

<표 3>에서 각국의 n-헥산 노출기준과 생물학적 노출지표(BEI/BEL)를 비교한 결과, 대한민국과 미국은 동일하게 공기 중 n-헥산에 대해 8시간 시간가중평균(TWA) 기준으로 50 ppm을 적용하고 있으며, 일본은 상대적으로 낮은 40 ppm을 기준으로 설정하고 있다.

생물학적 노출기준의 경우, 대한민국은 산가수분해 후 요중 2,5-헥산디온 농도 기준으로 5.0 mg/L를 적용하고 있는 반면, 미국(ACGIH)은 비가수분해된 상태에서 0.5 mg/L를 기준으로 하며, 일본(JSOH)은 비가수분해 조건에서 0.4 mg/g creatinine을 기준으로 제시하고 있다.

<표 3> n-헥산의 공기 중 노출기준 및 생물학적노출지표(BEI) 기준

| 국가          | 공기 중<br>농도(ppm) | 요중 2,5-헥산디온       |
|-------------|-----------------|-------------------|
| 대한민국(KOSHA) | 50              | 5mg/L(산가수분해)      |
| 미국(ACGIH)   | 50              | 0.5mg/L(비가수분해)    |
| 일본(JSOH)    | 40              | 0.4mg/g Cr(비가수분해) |

2 ) 소변 중 2,5-헥산디온

2018부터 2023년도의 n-헥산 사업장의 특수건강검진 개소는 총 321개소이며, 검진자 수는 5,765명이였다.

연도 별 사업장 개소 및 검진자 수는 2020년 코로나로 인해 약간의 감소세를 보였으나, 2021년부터 2023년까지 꾸준한 증가율을 보이고 있다.

<표 4> 특수건강진단 사업장 및 검진자 수

| 연도   | 사업장 수   |        |
|------|---------|--------|
|      | 사업장(개소) | 검진자(명) |
| 2018 | 55      | 660    |
| 2019 | 55      | 1,213  |
| 2020 | 13      | 470    |
| 2021 | 65      | 1,060  |
| 2022 | 64      | 1,110  |
| 2023 | 69      | 1,252  |
| 합계   | 321     | 5,765  |

<표 5> 특수건강진단 검출 및 불검출 건수

| 년도   | 검출(%)     | 불검출(%)    | 합계    |
|------|-----------|-----------|-------|
| 2018 | 126(19)   | 534(81)   | 660   |
| 2019 | 197(16)   | 1,016(84) | 1,213 |
| 2020 | 143(30)   | 327(70)   | 470   |
| 2021 | 276(26)   | 784(74)   | 1,060 |
| 2022 | 294(26)   | 816(74)   | 1,110 |
| 2023 | 344(27)   | 908(73)   | 1,252 |
| 합계   | 1,380(24) | 4,385(76) | 5765  |

2018년부터 2023년까지 광주광역시 및 전남지역 일부 작업장에서 n-헥산에 노출되는 작업자를 대상으로 실시한 특수건강진단 결과의 소변 중 2,5-헥산디온 농도자료, 5,765건을 분석한 결과, <표 5>에서 보는 바와 같이 전체의 약 24%에서 소변 중 2,5-헥산디온이 검출되었다.

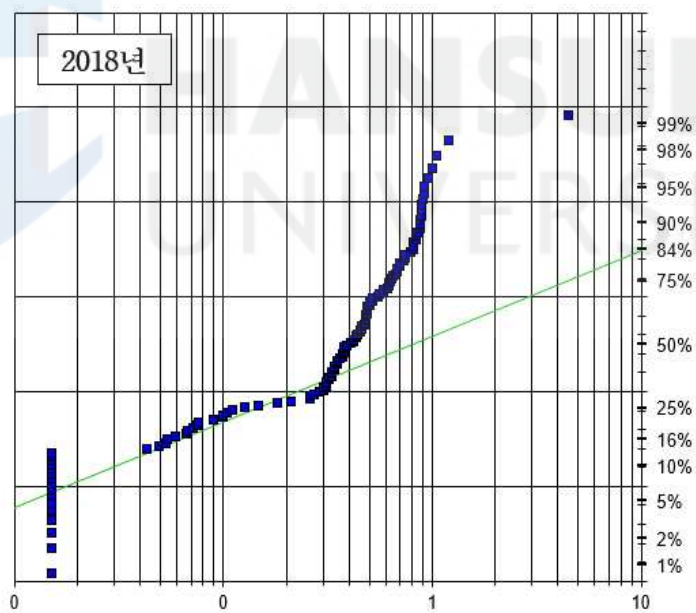
연도별로 특수건강진단 대상 사업장이 다르므로 검출 갯수 및 검출율은 다르게 나타났지만, 최근 3년간의 자료를 보면 약 26% 정도에서 소변 중 2,5-헥산디온이 검출된 것으로 나타났다. 이것은 특수건강진단 대상자의 약 25%만이 n-헥산에 노출되고 있는 것으로 추정할 수 있다.

<표 6>을 살펴보면, 연도별 산술평균 농도는 0.41~1.22 mg/L 범위로 나타났다. 2019년에 1.22 mg/L, 2023년에 1.05 mg/L로 상대적으로 높은 값을 보였다. 기하평균(GM) 또한 2019년 1.08 mg/L, 2023년 0.95mg/L로 높게 나타나 해당 연도에 고농도 노출자가 포함되어 있을 가능성을 보여준다.

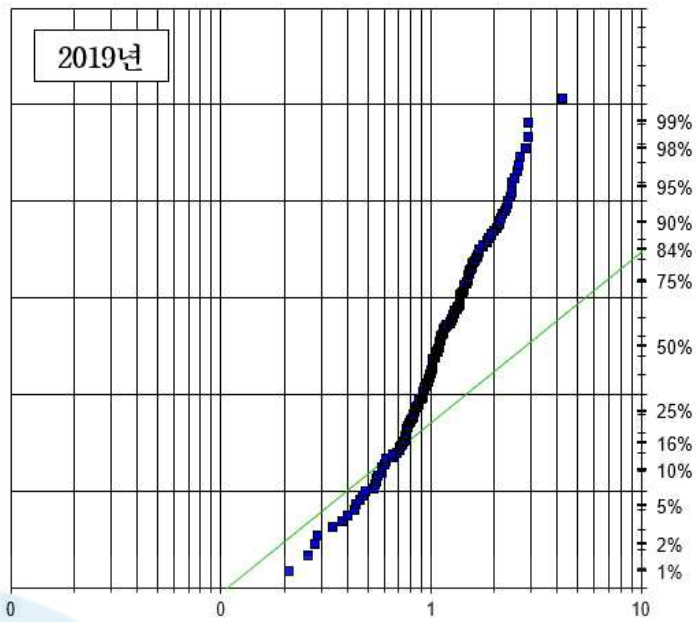
기하표준편차(GSD)는 2018년에 3.79로 가장 높았으며, 이는 검출값 간의 변동이 크고 일부 고농도 노출자가 존재함을 의미한다. 2020년 역시 GSD가 2.9로 비교적 높은 수준을 보였다. 반면, 2019년과 2023년은 평균 농도는 높은 편이었으나, 각각 1.73과 1.53으로 낮은 GSD를 보여 일정 수준 이상의 고농도 노출이 비교적 균일하게 분포되어 있었던 것으로 보여진다.

<표 6> n-헥산 생물학적 지표 연도별 현황(불검출 제외)

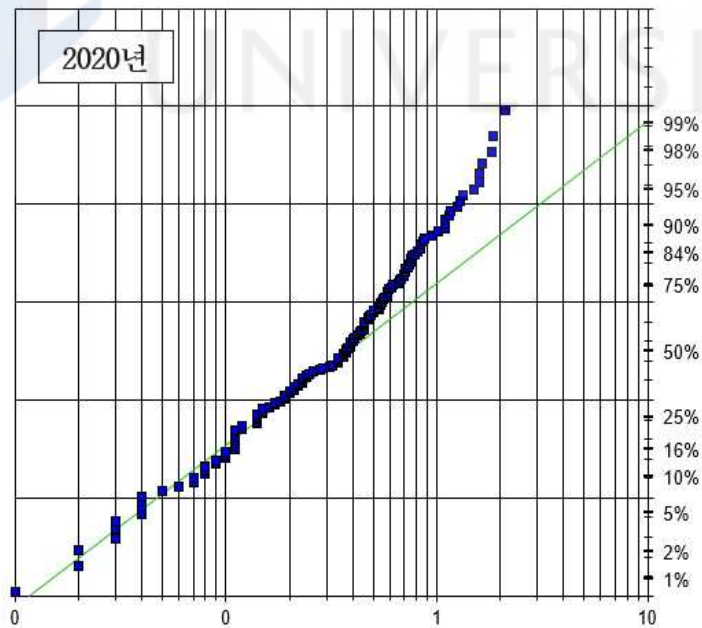
| 년도   | N    | AM<br>(mg/L) | SD<br>(mg/L) | GM<br>(mg/L) | GSD<br>(mg/L) |
|------|------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 2018 | 126  | 0.45         | 0.47         | 0.26         | 3.79          |
| 2019 | 197  | 1.22         | 0.6          | 1.08         | 1.73          |
| 2020 | 143  | 0.46         | 0.42         | 0.29         | 2.9           |
| 2021 | 276  | 0.42         | 0.29         | 0.35         | 1.83          |
| 2022 | 294  | 0.41         | 0.3          | 0.3          | 2.3           |
| 2023 | 344  | 1.05         | 0.49         | 0.95         | 1.53          |
| 합계   | 1380 | —            | —            | —            | —             |



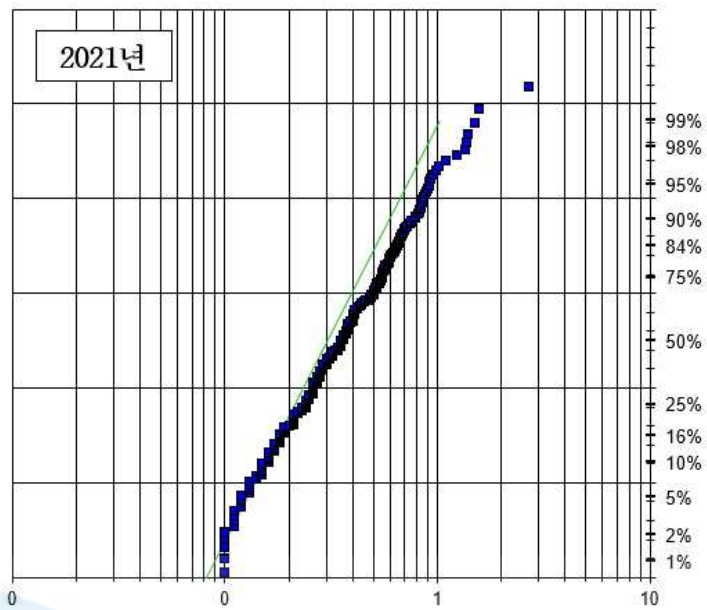
[그림 1] 2018년 소변 중 2,5-헥산디온 농도(mg/L) 분포.



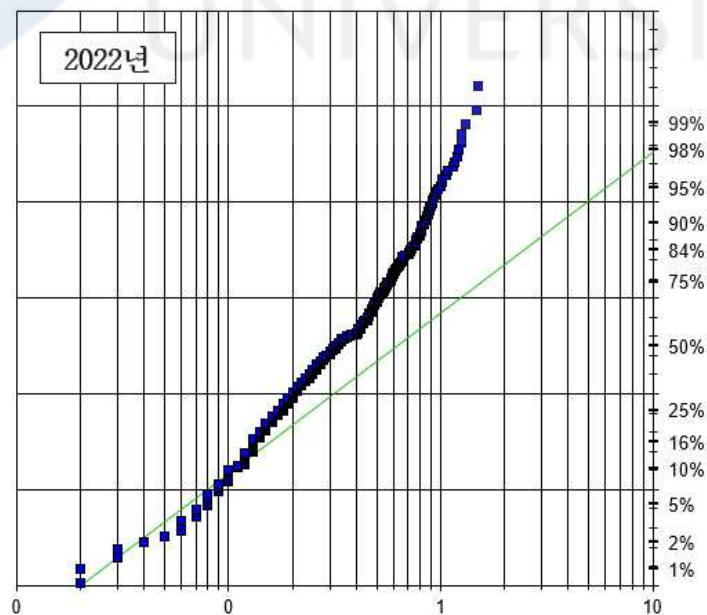
[그림 2] 2019년 소변 중 2,5-헥산디온 농도(mg/L) 분포.



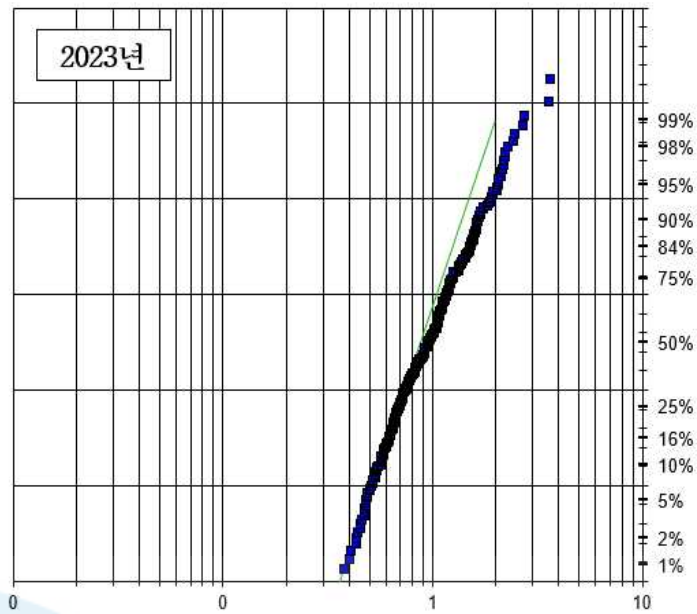
[그림 3] 2020년 소변 중 2,5-헥산디온 농도(mg/L) 분포.



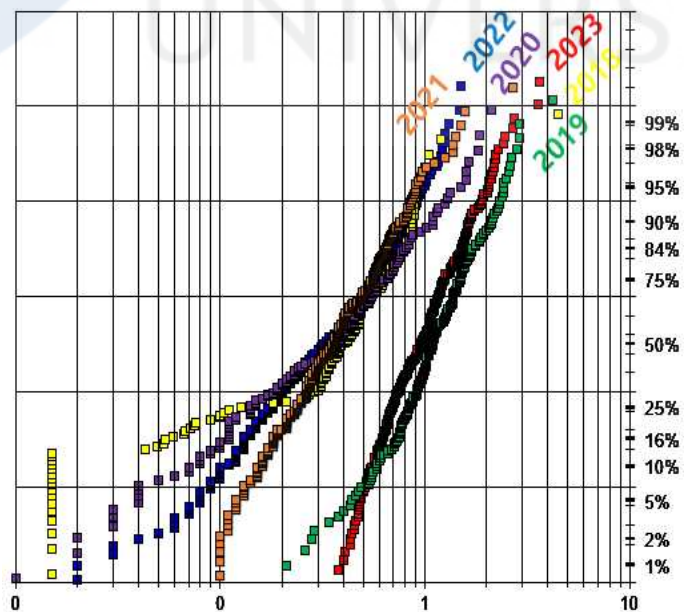
[그림 4] 2021년 소변 중 2,5-헥산디온 농도(mg/L) 분포.



[그림 5] 2022년 소변 중 2,5-헥산디온 농도(mg/L) 분포.



[그림 6] 2023년 소변 중 2,5-헥산디온 농도(mg/L) 분포.



[그림 7] 연도별 소변 중 2,5-헥산디온 농도(mg/L) 분포 취합.

[그림 7]에서 보는 바와 같이 연도별로 기하평균(50%에 해당하는 값)과 기하분포가 매우 다르게 나타난 것을 볼 수 있다. 이것은 [그림 1]에서 [그림 6]까지에서 볼 수 있듯이 0.2 mg/L 이하의 낮은 농도값에서 큰 차이가 있기 때문인 것을 알 수 있다. 즉 매년 검출한계 또는 정량한계값을 어떻게 설정하고 측정결과를 산출하였는가에 따라 전체 평균과 분포가 크게 달라졌음을 의미한다.

따라서 소변 중 2,5-헥산디온이 검출된 원자료를 가지고 기하평균(geometric mean, GM)을 산출한 결과, 연도별로 0.26 mg/L에서 1.08 mg/L로 큰 차이를 보인다. 또한 기하표준편차(geometric standard deviation, GSD)도 1.53에서 3.79로 매우 큰 것으로 나타났다. 이것은 앞에서 언급한 바와 같이, 연도별로 소변 중 2,5-헥산디온의 농도가 다르기 때문이라기보다는 분석시 검출한계값을 다르게 설정해서 보고했기 때문인 것으로 추정된다. 즉, 연도별 농도분포는 0.2 mg/L 이하의 값을 리포트한 숫자에 따라서 큰 차이를 보인다. 0.2 mg/L 이하의 값을 포함하면 할수록 평균값은 낮아지고 표준편차는 커지게 된다.

우리나라에서는 2,5-헥산디온의 분석시 가수분해 방법을 사용하고 있고 이 경우 생물학적 노출기준은 5 mg/L로 하고 있다. 그러나 가수분해방법은 노출되지 않은 자에게서도 2,5-헥산디온이 검출되는 경우가 많은 것으로 나타났다. 따라서 미국 정부산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygiene; ACGIH)에서는 비가수분해법으로 분석하도록 하고 있고, 이러한 분석방법에 의할 경우, 기준은 0.5 mg/L으로 설정하고 있다, 한편 일본산업위생학회(Japan Society of Occupational Health, JSOH)는 분석방법은 비가수분해방법을 사용하며 기준은 소변 중 크레아티닌(creatinine)을 기준으로 0.4 mg/Cr을 제시하고 있다.

우리나라에서 사용하고 있는 가수분해방법은 n-헥산에 노출되지 않은 경우에도 미량의 2,5-헥산디온이 검출될 가능성이 높다. 따라서 기준치의 1/10 또는 1/20 이하의 자료는 버리고, 실제로 노출 가능성이 높은 대상군만을 대상으로 노출그룹으로 정의하고, 이들 집단의 데이터로부터 위험도를 분석하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

본 연구에서는 실제로 검출기준이나 정량기준을 의미로 설정하기 어렵고,  
자료가 부족하여 문제점만 파악하였다.



## 제 2 절 소변 중 2,5-헥산디온 농도 특성 분석

### 1 ) 규모 별 소변 중 2,5-헥산디온 농도

<표 7>은 2018년부터 2023년까지 실시된 특수건강진단 결과를 바탕으로, 사업장 규모에 따라 분류한 n-헥산의 생물학적 노출 지표인 요 중 2,5-헥산디온 검출 현황을 제시한 것이다. 사업장 종사자 수를 기준으로 10인 미만, 10~49인, 50~99인, 100~299인, 300인 이상으로 구분하여 전체 건수, 검출 건수, 검출률을 비교하였으며, 총 320개소 중 50인 미만 사업장이 가장 높은 비율을 차지하고 있다.

<표 7> 규모별 특수건강진단 현황

| 년도   | 규모                |                    |                     |                      |                    | 합계  |
|------|-------------------|--------------------|---------------------|----------------------|--------------------|-----|
|      | 10명<br>미만<br>(개소) | 10~49<br>명<br>(개소) | 50명<br>~99명<br>(개소) | 100<br>~299명<br>(개소) | 300인<br>이상<br>(개소) |     |
| 2018 | 8                 | 23                 | 8                   | 12                   | 4                  | 55  |
| 2019 | 2                 | 27                 | 15                  | 9                    | 2                  | 55  |
| 2020 | 1                 | 4                  | 2                   | 4                    | 2                  | 13  |
| 2021 | 7                 | 29                 | 14                  | 12                   | 4                  | 65  |
| 2022 | 2                 | 34                 | 14                  | 10                   | 3                  | 63  |
| 2023 | 5                 | 36                 | 12                  | 12                   | 4                  | 69  |
| 합계   | 25                | 153                | 65                  | 59                   | 19                 | 320 |

<표 8>부터 <표 12>의 사업장 규모별 특수건강진단 결과 중 검출된 요중 2,5-헥산디온 농도를 보면, 10인 미만 사업장에서는 총 11건의 검출 사례가 확인되었으며, 전반적으로 매우 낮은 노출 수준을 보였다. 그러나 2023년의 평균 농도는 1.11 mg/L로 나타났다.

10~49인 규모 사업장에서는 총 145건이 검출되었고, 2019년 1.48 mg/L, 2023년 1.07 mg/L로 상대적으로 높은 평균 농도로 기록되었다.

50~99인 규모의 사업장에서도 2020년 평균 농도는 1.16 mg/L로 가장 높았으며, 다른 연도는 대부분 1 mg/L 이하로 나타났다.

100~299인 규모의 사업장에서는 2019년 평균 농도 1.38 mg/L로 가장 높은 수치로 나타났으며, 2018년의 GSD는 3.87로 전체 규모 중 가장 높은 값을 기록하였다. 이는 일부 사업장에서 고농도 노출이 발생했음을 의미한다.

300인 이상 대규모 사업장의 경우, 총 854건이 검출되었으며, 2019년 1.15mg/L, 2023년 1.07mg/L로 비교적 높은 평균 농도가 나타났다. 특히 2020년에 평균 농도 0.4 mg/L, GSD 2.8과 2022년에 GSD 2.3으로 평균 농도는 낮았으나 GSD가 높게 나타나, 결과값 간 편차가 크고 국소적인 고 노출군이 발생할 가능성을 시사한다.

**<표 8> 10인 미만 사업장의 소변 중 2,5-헥산디온 농도(불검출 제외)**

| 년도   | N  | AM<br>(mg/L) | SD<br>(mg/L) | GM<br>(mg/L) | GSD<br>(mg/L) |
|------|----|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 2018 | 3  | 0.04         | 0.05         | 0.03         | 2.97          |
| 2019 | 2  | 0.76         | 0.01         | 0.76         | 1.01          |
| 2020 | 1  | 0.05         | —            | 0.05         | —             |
| 2021 | 2  | 0.28         | 0.17         | 0.25         | 1.91          |
| 2022 | 0  | —            | —            | —            | —             |
| 2023 | 3  | 1.11         | 0.24         | 1.09         | 1.26          |
| 합계   | 11 | —            | —            | —            | —             |

<표 9> 10~49인 미만 사업장의 소변 중 2,5-헥산디온 농도(불검출 제외)

| 년도   | N   | AM<br>(mg/L) | SD<br>(mg/L) | GM<br>(mg/L) | GSD<br>(mg/L) |
|------|-----|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 2018 | 19  | 0.84         | 0.9          | 0.03         | 2.97          |
| 2019 | 22  | 1.48         | 0.6          | 1.36         | 1.56          |
| 2020 | 1   | 0.39         | —            | 0.39         | —             |
| 2021 | 28  | 0.49         | 0.34         | 0.39         | 1.95          |
| 2022 | 39  | 0.7          | 0.36         | 0.59         | 1.9           |
| 2023 | 21  | 1.07         | 0.39         | 1.01         | 1.41          |
| 합계   | 145 | —            | —            | —            | —             |

<표 10> 50~99인 미만 사업장의 소변 중 2,5-헥산디온 농도(불검출 제외)

| 년도   | N   | AM<br>(mg/L) | SD<br>(mg/L) | GM<br>(mg/L) | GSD<br>(mg/L) |
|------|-----|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 2018 | 19  | 0.49         | 0.26         | 0.4          | 2.43          |
| 2019 | 24  | 0.98         | 0.34         | 0.9          | 1.55          |
| 2020 | 12  | 1.16         | 0.42         | 1.09         | 1.45          |
| 2021 | 16  | 0.35         | 0.16         | 0.31         | 1.69          |
| 2022 | 22  | 0.45         | 0.31         | 0.34         | 2.27          |
| 2023 | 19  | 0.89         | 0.38         | 0.83         | 1.47          |
| 합계   | 112 | —            | —            | —            | —             |

<표 11> 100~299인 미만 사업장의 소변 중 2,5-헥산디온 농도(불검출 제외)

| 년도   | N   | AM<br>(mg/L) | SD<br>(mg/L) | GM<br>(mg/L) | GSD<br>(mg/L) |
|------|-----|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 2018 | 77  | 0.37         | 0.3          | 0.2          | 3.87          |
| 2019 | 50  | 1.38         | 0.78         | 1.18         | 1.8           |
| 2020 | 3   | 0.3          | 0.18         | 0.24         | 2.37          |
| 2021 | 42  | 0.45         | 0.49         | 0.32         | 2.16          |
| 2022 | 55  | 0.44         | 0.28         | 0.35         | 2.01          |
| 2023 | 36  | 0.94         | 0.45         | 0.84         | 1.62          |
| 합계   | 263 | —            | —            | —            | —             |

<표 12> 300인 이상 사업장의 소변 중 2,5-헥산디온 농도(불검출 제외)

| 년도   | N   | AM<br>(mg/L) | SD<br>(mg/L) | GM<br>(mg/L) | GSD<br>(mg/L) |
|------|-----|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 2018 | 6   | 0.51         | 0.25         | 0.46         | 1.67          |
| 2019 | 99  | 1.15         | 0.5          | 1.03         | 1.75          |
| 2020 | 126 | 0.4          | 0.37         | 0.26         | 2.8           |
| 2021 | 188 | 0.41         | 0.23         | 0.36         | 1.75          |
| 2022 | 170 | 0.34         | 0.24         | 0.26         | 2.3           |
| 2023 | 265 | 1.07         | 0.51         | 0.97         | 1.53          |
| 합계   | 854 | —            | —            | —            | —             |

## 2) 업종별 소변 중 2,5-헥산디온 농도

업종별로 분류하였을 때, 제조업은 모든 년도에서 특건강진단이 가장 많이 이루어진 업종으로, 특히 2018년부터 2023년까지 제조업 사업장 수는 평균적으로 25개소 이상으로 유지되며 일관된 비중을 차지하였다.

## <표 13> 업종별 소변 중 2,5-헥산디온 특수건강진단 실시 현황

| 년도   | 업종          |              |                 |            | 합계  |
|------|-------------|--------------|-----------------|------------|-----|
|      | 제조업<br>(개소) | 서비스업<br>(개소) | 연구 및 분석<br>(개소) | 기타<br>(개소) |     |
| 2018 | 29          | 5            | 7               | 14         | 55  |
| 2019 | 31          | 4            | 8               | 12         | 55  |
| 2020 | 4           | 3            | 3               | 3          | 13  |
| 2021 | 28          | 6            | 13              | 18         | 65  |
| 2022 | 24          | 8            | 15              | 16         | 63  |
| 2023 | 29          | 12           | 12              | 16         | 69  |
| 합계   | 145         | 38           | 58              | 79         | 320 |

<표 14> 업종별 소변 중 2,5-헥산디온 농도

| 년도   | 제조업 |      |      | 서비스업 |      |      | 연구 및 분석 |      |      | 기타  |      |      |
|------|-----|------|------|------|------|------|---------|------|------|-----|------|------|
|      | N   | AM   | SD   | N    | AM   | SD   | N       | AM   | SD   | N   | AM   | SD   |
| 2018 | 271 | 0.06 | 0.32 | 81   | 0.14 | 0.25 | 102     | 0.05 | 0.19 | 206 | 0.12 | 0.23 |
| 2019 | 742 | 0.20 | 0.13 | 81   | 0.13 | 0.40 | 113     | 0.14 | 0.42 | 277 | 0.24 | 0.59 |
| 2020 | 394 | 0.13 | 0.28 | 39   | 0.09 | 0.32 | 27      | 0.40 | 0.61 | 5   | 0.01 | 0.02 |
| 2021 | 757 | 0.12 | 0.23 | 93   | 0.07 | 0.21 | 113     | 0.09 | 0.19 | 97  | 0.11 | 0.34 |
| 2022 | 774 | 0.09 | 0.20 | 125  | 0.19 | 0.34 | 120     | 0.09 | 0.25 | 91  | 0.18 | 0.31 |
| 2023 | 904 | 0.34 | 0.57 | 125  | 0.13 | 0.34 | 89      | 0.15 | 0.37 | 134 | 0.15 | 0.39 |

<표 14>를 보면, 2023년에는 제조업에서 평균 농도가 0.34 mg/L로 전체 업종 중 가장 높게 나타났다. 서비스업과 기타 업종은 대체로 0.1~0.2 mg/L 수준의 비교적 낮은 노출 농도를 유지하였지만, 2019년 기타 업종에서는 평균 농도 0.24 mg/L, 2022년 서비스업에서는 0.19 mg/L로 일부 년도에서는 상대적으로 높은 농도로 나타났다.

이러한 결과는 제조업뿐만 아니라 비 제조업에서도 특정 조건하에서는 n-

헥산이 노출될 가능성을 보여주며, 모든 업종에 걸쳐 주기적인 생물학적 노출 감시가 필요하다.

**<표 15> 자동차 부품 제조업의 소변 중 2,5-헥산디온 농도(불검출 제외)**

| 년도   | 자동차 부품 제조업 |              |              |              |               |
|------|------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
|      | N          | AM<br>(mg/L) | SD<br>(mg/L) | GM<br>(mg/L) | GSD<br>(mg/L) |
| 2018 | 6          | 1.11         | 1.67         | 0.6          | 2.9           |
| 2019 | 102        | 1.17         | 0.52         | 1.04         | 1.76          |
| 2020 | 117        | 0.38         | 0.3          | 0.27         | 2.48          |
| 2021 | 147        | 0.42         | 0.21         | 0.37         | 1.74          |
| 2022 | 171        | 0.34         | 0.24         | 0.26         | 2.28          |
| 2023 | 254        | 1.08         | 0.51         | 0.98         | 1.54          |
| 합계   | 797        | —            | —            | —            | —             |

<표 15>에서는 가장 많은 비율을 차지하고 있는 자동차 부품 제조업의 연도별 검출 값을 비교해 보았다. 2020년은 평균농도 0.38 mg/L, 기하평균 0.27 mg/L로 전체 조사기간 중 가장 낮은 수치를 기록하였다. 이는 COVID-19 유행으로 인한 작업 축소, 생산량 감소, 건강진단 건수 감소 등의 외부 요인이 노출 수준에 영향을 미쳤을 가능성을 내포한다.

2023년에는 평균농도(AM) 1.08 mg/L, 기하평균(GM)은 0.98 mg/L로 급격히 증가하였으며, 이는 전체 기간 중 가장 높은 수치였다.

**<표 16> 화학물질, 화학제품 제조업의 소변 중 2,5-헥산디온 농도(불검출 제외)**

| 년도   | 화학물질, 화학제품 제조업 |              |              |              |               |
|------|----------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
|      | N              | AM<br>(mg/L) | SD<br>(mg/L) | GM<br>(mg/L) | GSD<br>(mg/L) |
| 2018 | —              | —            | —            | —            | —             |
| 2019 | —              | —            | —            | —            | —             |
| 2020 | —              | —            | —            | —            | —             |
| 2021 | 5              | 0.65         | 0.67         | 0.37         | 3.37          |
| 2022 | 4              | 0.22         | 0.13         | 0.19         | 1.89          |
| 2023 | 12             | 0.84         | 0.28         | 0.79         | 1.4           |
| 합계   | 21             | —            | —            | —            | —             |

<표 16>의 화학물질, 화학제품 제조업에서는 2018년도부터 2020년은 특수건강진단 검출된 결과가 없으며, 2021년과 2022년 역시 각각 평균 0.65 mg/L, 0.22 mg/L로 나타나 전반적으로 낮은 노출 수준을 유지하고 있는 것으로 보여진다.

<표 17> 금형 및 금속제품 제조업의 소변 중 2,5-헥산디온 농도(불검출 제외)

| 년도   | 금형 및 금속제품 제조업 |              |              |              |               |
|------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
|      | N             | AM<br>(mg/L) | SD<br>(mg/L) | GM<br>(mg/L) | GSD<br>(mg/L) |
| 2018 | —             | —            | —            | —            | —             |
| 2019 | 2             | 0.76         | 0.01         | 0.76         | 1.01          |
| 2020 | —             | —            | —            | —            | —             |
| 2021 | —             | —            | —            | —            | —             |
| 2022 | —             | —            | —            | —            | —             |
| 2023 | 2             | 1            | 0.21         | 0.98         | 1.23          |
| 합계   | 4             | —            | —            | —            | —             |

<표 17>의 금형 및 금속제품 제조업에서는 전체적으로 검출된 값이 가

장 적었다. 2019년과 2023년 각각 2건씩의 결과가 검출되었으며, 2023년에는 평균 1.00 mg/L, 기하평균 0.98 mg/L로 2019년 대비 높은 수준의 노출이 나타났다.

<표 18> 기계 및 전자제품 제조업의 소변 중 2,5-헥산디온 농도(불검출 제외)

| 년도   | 기계 및 전자제품 제조업 |              |              |              |               |
|------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
|      | N             | AM<br>(mg/L) | SD<br>(mg/L) | GM<br>(mg/L) | GSD<br>(mg/L) |
| 2018 | 6             | 0.1          | 0.16         | 0.04         | 4.15          |
| 2019 | 1             | 0.82         | —            | 0.82         | —             |
| 2020 | 2             | 0.4          | 0.04         | 0.4          | 1.11          |
| 2021 | 37            | 0.42         | 0.35         | 0.32         | 2             |
| 2022 | 2             | 0.68         | 0.23         | 0.66         | 1.4           |
| 2023 | 1             | 1.54         | —            | 1.54         | —             |
| 합계   | 49            | —            | —            | —            | —             |

<표 18>의 기계 및 전자제품 제조업에서는 2018년부터 2022년까지 평균 농도는 대부분 0.10~0.82 mg/L 수준으로 낮고 안정적인 노출 경향을 보였으나, 2023년에는 단 1건이지만 1.54 mg/L의 높은 농도가 나타나 고농도 단일 사례 가능성을 제기한다.

<표 19> 그 외 제조업의 소변 중 2,5-헥산디온 농도(불검출 제외)

| 년도   | 그 외 제조업 |              |              |              |               |
|------|---------|--------------|--------------|--------------|---------------|
|      | N       | AM<br>(mg/L) | SD<br>(mg/L) | GM<br>(mg/L) | GSD<br>(mg/L) |
| 2018 | 10      | 0.76         | 0.32         | 0.67         | 1.81          |
| 2019 | 19      | 1.44         | 0.64         | 1.28         | 1.73          |
| 2020 | 9       | 0.75         | 0.81         | 0.21         | 8.32          |
| 2021 | 25      | 0.31         | 0.14         | 0.28         | 1.62          |
| 2022 | 24      | 0.32         | 0.32         | 0.23         | 2.15          |
| 2023 | 22      | 0.9          | 0.53         | 0.78         | 1.71          |
| 합계   | 109     | —            | —            | —            | —             |

<표 19>의 그 외 제조업에서는 전체적으로 평균농도는 약 0.16~0.90 mg/L 수준을 유지하며 비교적 일정한 노출 경향을 보였다.

자동차 부품 제조업은 가장 큰 규모와 함께 고농도 노출 위험이 확인되었으며, 금형·전자 등 일부 업종은 표본 수가 적거나 노출 수준이 낮아 상대적으로 안정적인 것으로 보이나, 소규모 고노출 사례에 대한 개별 대응이 필요하다.

<표 20> 공정별 소변 중 2,5-헥산디온 노출농도 (불검출 제외)

| 공정     | 소변 중 2,5-헥산디온 노출농도 |              |              |              |               |
|--------|--------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
|        | N                  | AM<br>(mg/L) | SD<br>(mg/L) | GM<br>(mg/L) | GSD<br>(mg/L) |
| 접착     | 10                 | 1.2          | 1.29         | 0.77         | 2.72          |
| 세척, 닦음 | 775                | 0.67         | 0.53         | 0.5          | 2.46          |
| 실험, 연구 | 54                 | 0.41         | 0.37         | 0.31         | 2.09          |
| 도장     | 10                 | 1.12         | 0.74         | 0.91         | 2.06          |
| 품질검사   | 38                 | 0.67         | 0.49         | 0.43         | 3.41          |
| 사출     | 13                 | 0.98         | 0.76         | 0.63         | 3.07          |
| 기타     | 80                 | 0.75         | 0.58         | 0.49         | 3.14          |
| 합계     | 980                | —            | —            | —            | —             |

<표 20>의 분석 결과, 전체 검출 사례(980건) 중 가장 많은 비중을 차지한 공정은 세척·닦음 공정(775건, 약 79%)으로, 평균농도 0.67 mg/L, 기하평균 0.5 mg/L로 나타났다. n-헥산은 휘발성이 높고 빠른 건조 특성을 가지기 때문에, 금속 또는 플라스틱 부품의 세척 및 탈지 작업에 널리 사용되며, 국소 배기 미비, 닦는 동작 중 휘발된 증기 흡입 등으로 인해 노출되었을 가능성이 있다.

평균 농도 기준으로 가장 높은 수치는 접착 공정(1.2 mg/L)과 도장 공정(1.12 mg/L)에서 나타났다. 이는 두 공정 모두에서 n-헥산이 주성분으로 포함된 접착제 또는 희석제, 도료가 사용되기 때문으로, 특히 밀폐된 공간에서의 작업 또는 휘발성 물질의 대면 사용 시 단시간 고농도 노출이 쉽게 발생할 수 있다.

### 3) 소변 중 2,5-헥사디온 노출구간 별 분포

<표 21> 소변 중 2,5-헥사디온 노출구간(2018-2023년도)

| 노출구간                          | N    | AM<br>(mg/L) | SD<br>(mg/L) | GM<br>(mg/L) | GSD<br>(mg/L) |
|-------------------------------|------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 0~5% 초과<br>(0~0.25mg/L)       | 3770 | 0.01         | 0.04         | —            | —             |
| 5~10%초과<br>(0.25~0.50mg/L)    | 321  | 0.38         | 0.08         | 0.37         | 1.23          |
| 10~25%초과<br>(0.50~1.25mg/L)   | 586  | 0.82         | 0.21         | 0.8          | 1.29          |
| 25~50%초과<br>(1.25~2.50mg/L)   | 167  | 1.65         | 0.32         | 1.62         | 1.2           |
| 50~100% 초과<br>(2.50~5.00mg/L) | 13   | 3.11         | 0.65         | 3.06         | 1.21          |
| 합계                            | 4857 | —            | —            | —            | —             |

<표 21>에서는 고농도에 노출되고 있는 작업자를 분류해 보았다. 특수건강 진단을 실시한 총 작업자 중 0~5% 초과구간에서 77.6%(3,770건)로 대부분의 근로자가 n-헥산의 생물학적 노출기준인 5 mg/L 대비 낮은 농도로 노출되고 있음을 보여준다.

<표 22> 소변 중 2,5-헥산디온 업종 별 25~100% 초과 구간(18~23년도)

| 업종      | N   | AM<br>(mg/L) | SD<br>(mg/L) | GM<br>(mg/L) | GSD<br>(mg/L) |
|---------|-----|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 제조      | 142 | 1.81         | 0.55         | 1.75         | 1.29          |
| 연구 및 분석 | 22  | 1.58         | 0.33         | 1.55         | 1.21          |
| 자동차 정비  | 7   | 1.41         | 0.11         | 1.41         | 1.08          |
| 기타      | 9   | 1.64         | 0.41         | 1.61         | 1.23          |
| 합계      | 180 | —            | —            | —            | —             |

<표 22>에서 25~100% 노출 그룹의 업종을 분석해 본 결과 제조업이 가장 많았으며 제조업 중에서도 자동차부품 제조업이 가장 많았다. 제조업 고노출군의 평균농도는 1.81 mg/L, 기하평균은 1.75 mg/L로 분석되었다. 이어서 연구 및 분석 업종(22건), 자동차 정비업(7건), 기타 업종(9건) 순으로 분포하였다. 이들 업종 역시 평균농도 1.4~1.6 mg/L 수준으로 고노출군에 포함되었다.

### 제 3 절 n-헥산 노출 작업자의 작업환경측정 결과

n-헥산은 8시간 TWA 기준 50 ppm의 노출기준이 적용되는 유기용제로, 본 절에서는 2018~2023년 광주·전남지역 424개소(<표 23>)의 작업환경측정 결과를 기반으로 노출 특성을 분석하였다.

이 중 상반기 측정이 225건(53.0%), 하반기 측정이 199건(47.0%)으로 나타났다. 연도별로는 2019년에 78건(18.4%)으로 가장 많은 측정이 이루어졌으며, 2021년은 65건(15.3%)으로 가장 적은 측정 건수를 보였다.

<표 23> 작업환경측정 사업장 개소

| 년도   | 사업장 수   |         |     |
|------|---------|---------|-----|
|      | 상반기(개소) | 하반기(개소) | 합계  |
| 2018 | 37      | 35      | 72  |
| 2019 | 44      | 34      | 78  |
| 2020 | 35      | 36      | 71  |
| 2021 | 34      | 31      | 65  |
| 2022 | 36      | 31      | 67  |
| 2023 | 39      | 32      | 71  |
| 계    | 225     | 199     | 424 |

\* 상반기, 하반기 중복 사업장 포함

아래 <표 24>를 보면, 광주·전남지역 일부 사업장에서 2018년부터 2023년까지 수행된 n-헥산 작업환경측정 결과 총 1,137건의 자료가 수집되었으며, 이 중 98건(8.3%)에서 n-헥산이 검출되었고, 1,039건(91.7%)은 불검출로 나타났다. 연도별 검출률은 2018년 13%로 가장 높았으며, 이후 점차 감소하여 2021년에는 4%로 가장 낮은 수준을 보였다. 이후 2023년에는 전체 측정 건수의 증가로 인해 검출 건수는 29건으로 수치상 가장 많았으나, 검출률은 9%로 2018년보다 낮았다.

불검출 값을 제외한 98건의 검출 자료를 대상으로 농도 분포를 분석한 결과는 <표 25>와 같다. 2021년의 평균 농도는 4.31ppm으로 가장 높았으며,

표준편차 또한 8.00ppm으로 가장 큰 값을 나타냈다. 이는 해당 연도의 검출 건수가 6건으로 가장 적었음에도 불구하고, 일부 측정값에서 고농도 수치가 확인되어 전체 통계값에 큰 영향을 미친 것으로 보인다.

기하평균은 모든 연도에서 2.5ppm 미만으로 비교적 낮은 수준이었지만, 기하표준편차(GSD)는 전 연도에서 2ppm 이상으로 나타나 측정값의 분포가 비대칭적이며, 일부 고노출 사례가 포함된 분포 특성을 보였다. 특히 2023년은 전체 검출 건수의 약 30%를 차지하는 29건이 측정되었고, 기하표준편차(GSD)는 3.83ppm으로 가장 높게 나타났다.

전체적으로 n-헥산의 공기 중 농도가 낮은 수준을 유지하고 있으나, 특정 사업장 또는 공정에서 고농도 노출이 발생할 가능성이 있음을 보여준다.

<표 24> 작업환경측정 검출 및 불검출 건수

| 년도   | 검출(%)  | 불검출(%)  | 합계    |
|------|--------|---------|-------|
| 2018 | 21(13) | 138(87) | 159   |
| 2019 | 13(7)  | 164(93) | 177   |
| 2020 | 16(9)  | 155(91) | 171   |
| 2021 | 6(4)   | 136(96) | 142   |
| 2022 | 13(9)  | 139(91) | 152   |
| 2023 | 29(9)  | 307(91) | 336   |
| 합계   | 98     | 1,039   | 1,137 |

<표 25> 작업환경측정 현황(불검출 제외)

| 년도   | N  | AM<br>(ppm) | SD<br>(ppm) | GM<br>(ppm) | GSD<br>(ppm) |
|------|----|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 2018 | 21 | 3.54        | 4.73        | 2.25        | 2.39         |
| 2019 | 13 | 2.67        | 2.63        | 1.78        | 2.64         |
| 2020 | 16 | 2.99        | 3.29        | 1.78        | 2.83         |
| 2021 | 6  | 4.31        | 8           | 1.69        | 3.47         |
| 2022 | 13 | 2.49        | 3.8         | 1.12        | 3.38         |
| 2023 | 29 | 3.55        | 4.57        | 1.54        | 3.83         |
| 합계   | 98 | —           | —           | —           | —            |

아래 <표 26> 사업장 규모별 현황을 살펴보면, 총 263개소 중에서 10~49인 사업장이 124건(47.1%)으로 가장 많았으며, 300인 이상 대규모 사업장은 33건(12.5%)으로 가장 적었다.

<표 26> 규모별 n-hexan 작업환경측정 현황

| 년도   | 규모        |        |             |              |            | 합계  |
|------|-----------|--------|-------------|--------------|------------|-----|
|      | 10명<br>미만 | 10~49명 | 50명~<br>99명 | 100~<br>299명 | 300인<br>이상 |     |
|      | (개소)      | (개소)   | (개소)        | (개소)         | (개소)       |     |
| 2018 | 8         | 17     | 7           | 6            | 4          | 42  |
| 2019 | 7         | 25     | 8           | 8            | 6          | 54  |
| 2020 | 1         | 14     | 6           | 6            | 4          | 31  |
| 2021 | 6         | 23     | 6           | 5            | 5          | 45  |
| 2022 | 4         | 23     | 7           | 5            | 5          | 44  |
| 2023 | 5         | 22     | 6           | 5            | 9          | 47  |
| 합계   | 31        | 124    | 40          | 35           | 33         | 263 |

<표 27> 10인 미만 사업장의 공기 중 n-헥산 노출 현황(불검출 제외)

| 년도   | N | AM<br>(ppm) | SD<br>(ppm) | GM<br>(ppm) | GSD<br>(ppm) |
|------|---|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 2018 | — | —           | —           | —           | —            |
| 2019 | — | —           | —           | —           | —            |
| 2020 | 3 | 3.21        | 4.25        | 1.59        | 4.36         |
| 2021 | — | —           | —           | —           | —            |
| 2022 | — | —           | —           | —           | —            |
| 2023 | 1 | 2.18        | —           | 2.18        | —            |
| 합계   | 4 | —           | —           | —           | —            |

<표 27>에 따르면, 10명 미만 사업장에서는 전체 6년간 총 89건의 측정이 이루어졌으며, 이 중 검출은 4건(4.5%)에 불과하였다. 가장 높은 노출은 2020년에 3.21ppm, 2023년에 2.18ppm으로 전반적으로 낮은 검출률을 보였다.

<표 28> 10~49인 사업장의 공기 중 n-헥산 노출 현황(불검출 제외)

| 년도   | N  | AM<br>(ppm) | SD<br>(ppm) | GM<br>(ppm) | GSD<br>(ppm) |
|------|----|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 2018 | 14 | 3.96        | 5.67        | 2.32        | 2.56         |
| 2019 | 9  | 2.47        | 1.42        | 2.02        | 2.07         |
| 2020 | 6  | 1.45        | 1.13        | 1.13        | 2.17         |
| 2021 | 5  | 5           | 8.74        | 1.92        | 3.83         |
| 2022 | 9  | 3.29        | 4.38        | 1.53        | 3.63         |
| 2023 | 16 | 4.04        | 3.69        | 1.75        | 4.1          |
| 합계   | 59 | —           | —           | —           | —            |

<표 28>의 10~49명의 구간에서는 총 434건 중 검출은 59건(13.6%)

이며, 10명 미만보다 상대적으로 높은 검출률을 보였다. 특히 2021년에는 5.00ppm, 2023년에는 4.04ppm으로 비교적 높은 수준의 노출이 확인되었다.

<표 29> 50~99인 사업장의 공기 중 n-헥산 노출 현황(불검출 제외)

| 년도   | N | AM<br>(ppm) | SD<br>(ppm) | GM<br>(ppm) | GSD<br>(ppm) |
|------|---|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 2018 | 2 | 1.9         | 1.69        | 1.48        | 2.84         |
| 2019 | 2 | 0.45        | 0.1         | 0.45        | 1.24         |
| 2020 | 2 | 4.19        | 1.77        | 4           | 1.55         |
| 2021 | 0 | —           | —           | —           | —            |
| 2022 | 0 | —           | —           | —           | —            |
| 2023 | 0 | —           | —           | —           | —            |
| 합계   | 6 | —           | —           | —           | —            |

<표 29>의 50~99명 규모 사업장에서는 전체 147건 중 검출은 6건 (4.1%)으로 낮게 나타났다. 2020년에 평균 4.19ppm으로 높은 값을 기록하였으나, 2021년부터 2023년까지는 모든 측정 결과가 불검출로 나타났다.

<표 30> 100~299인 사업장의 공기 중 n-헥산 노출 현황(불검출 제외)

| 년도   | N | AM<br>(ppm) | SD<br>(ppm) | GM<br>(ppm) | GSD<br>(ppm) |
|------|---|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 2018 | 2 | 1.18        | 0           | 1.18        | 1            |
| 2019 | 0 | —           | —           | —           | —            |
| 2020 | 2 | 0.98        | 0.04        | 0.98        | 1.04         |
| 2021 | 1 | 0.88        | —           | 0.88        | —            |
| 2022 | 0 | —           | —           | —           | —            |
| 2023 | 0 | —           | —           | —           | —            |
| 합계   | 5 | —           | —           | —           | —            |

<표 30>의 100~299명 규모의 사업장에서는 총 5건(2.5%)의 검출로 나타났고, 2020년과 2021년에 2건, 1건으로 소량 검출되었으며, 2022, 2023년 모두 불검출로 나타났다. <표 31>의 300명 이상 사업장에서는 2018년부터 꾸준한 검출율을 보였으며, 특히 2020년에는 평균 6.37ppm으로 가장 높은 수치로 나타났다.

<표 31> 300인 이상 사업장의 공기 중 n-헥산 노출 현황(불검출 제외)

| 년도   | N  | AM<br>(ppm) | SD<br>(ppm) | GM<br>(ppm) | GSD<br>(ppm) |
|------|----|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 2018 | 3  | 4.2         | 1.64        | 3.98        | 1.51         |
| 2019 | 2  | 5.83        | 6.06        | 3.95        | 3.78         |
| 2020 | 3  | 6.37        | 5.32        | 4.3         | 3.46         |
| 2021 | 0  | —           | —           | —           | —            |
| 2022 | 4  | 0.68        | 0.48        | 0.56        | 2.08         |
| 2023 | 11 | 2.93        | 3.69        | 1.32        | 4.03         |
| 합계   | 23 | —           | —           | —           | —            |

<표 32>를 보면 업종별로는 제조업이 110개소(40.4%)로 가장 큰 비중을 차지하였다.

제조업은 공통적으로 세척, 접착, 도장 등 n-헥산 사용 가능성이 높은 공정을 포함하고 있었으며, 평균 농도는 2018년 1.02ppm으로 가장 높았고, 타 업종에 비해 상대적으로 높은 수준을 유지하였다.

반면, 서비스업에서는 전반적으로 불검출 또는 매우 낮은 수준의 평균 농도를 보였으며, 연구 및 분석, 기타 업종에서도 최대 0.65ppm으로 낮은 수준의 농도로 나타났다.

<표 32> 업종별 n-헥산 작업환경측정 개소 현황

| 년도   | 업종          |              |                 |            | 합계  |
|------|-------------|--------------|-----------------|------------|-----|
|      | 제조업<br>(개소) | 서비스업<br>(개소) | 연구 및 분석<br>(개소) | 기타<br>(개소) |     |
| 2018 | 19          | 1            | 13              | 3          | 36  |
| 2019 | 22          | 3            | 15              | 14         | 54  |
| 2020 | 17          | 3            | 11              | 15         | 46  |
| 2021 | 16          | 5            | 11              | 13         | 45  |
| 2022 | 16          | 5            | 14              | 9          | 44  |
| 2023 | 20          | 3            | 13              | 11         | 47  |
| 합계   | 110         | 20           | 77              | 65         | 272 |

<표 33> 업종별 n-헥산 작업환경측정 현황

| 년도   | 제조업 |      |      | 서비스업 |      |      | 연구 및 분석 |      |      | 기타 |      |      |
|------|-----|------|------|------|------|------|---------|------|------|----|------|------|
|      | N   | AM   | SD   | N    | AM   | SD   | N       | AM   | SD   | N  | AM   | SD   |
| 2018 | 60  | 1.02 | 3.26 | 4    | 0.49 | 0.56 | 75      | 0.13 | 0.44 | 6  | 0    | 0    |
| 2019 | 68  | 0.50 | 1.54 | 12   | 0.05 | 0.16 | 54      | 0    | 0    | 43 | 0    | 0    |
| 2020 | 67  | 0.65 | 2.03 | 12   | 0.03 | 0.12 | 40      | 0.03 | 0.19 | 52 | 0.05 | 0.22 |
| 2021 | 52  | 0.02 | 0.11 | 20   | 0    | 0    | 35      | 0.07 | 0.29 | 35 | 0.65 | 3.49 |
| 2022 | 54  | 0.47 | 2.08 | 24   | 0    | 0    | 52      | 0.04 | 0.18 | 23 | 0.23 | 0.67 |
| 2023 | 233 | 0.31 | 1.78 | 18   | 0    | 0    | 52      | 0.33 | 1.53 | 33 | 0.34 | 1.13 |

## 제 4 장 결 론

본 연구는 광주광역시·전남지역 일부 사업장을 대상으로 2018년부터 2023년까지 수행된 특수건강진단 결과 중 근로자의 소변 중 2,5-헥산디온 농도와 작업환경측정결과 중 공기 중 n-헥산 노출 농도 자료를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 총 321개소의 사업장에서 n-헥산 노출이 의심되어 특수건강진단을 실시한 5,765건 중에서 소변 중 2,5-헥산디온이 검출된 건은 1,380건으로 24%에 불과했다. n-헥산의 공기 중 노출농도를 측정한 작업환경측정결과를 분석한 결과, 총 측정건수 1,137건 중에서 n-헥산이 검출된 건은 98건(8.3%)에 불과했고, 1,039건(91.7%)에서는 n-헥산이 검출되지 않은 것으로 나타났다.

2. 소변 중 2,5-헥산디온이 검출된 자료만 가지고 기하평균(geometric mean, GM)을 산출한 결과, 연도별로 0.26 mg/L에서 1.08 mg/L로 큰 차이를 보였다. 또한 기하표준편차(geometric standard deviation, GSD)도 1.53에서 3.79로 매우 큰 것으로 나타났다. 이것은 연도별로 소변 중 2,5-헥산디온의 농도가 다르기 때문이 아니라 분석시 검출한계 설정이 달랐기 때문인 것으로 보인다. 연도별 농도분포를 확인해 보니 0.2 mg/L 이하에서 크게 차이를 보였다. 0.2 mg/L 이하의 값을 포함하면 할수록 평균값은 낮아지고 표준편차는 커지게 된다.

n-헥산의 실질적인 노출군은 우리나라 특수건강진단의 소변 중 2,5-헥산디온의 기준치인 5 mg/L의 1/20인 0.25 mg/L 또는 1/10인 0.5 mg/L 이하를 제외한 나머지 데이터를 가지고 위험도를 분석하는 것이 더 타당할 것으로 보였다.

특히 우리나라에서의 소변 중 2,5-헥산디온 분석방법으로 사용하고 있는 가수분해방법은 n-헥산에 노출되지 않은 비노출군에서도 소변 중 2,5-헥산디온이 검출되는 것과 같이 가양성 오류가 많은 것으로 알려져 있다. 이에 대부분 선진국에서 비가수분해법으로 분석하고 있다. 우리나라도 비가수분해법으로 분석방법을 변해야 할 것이다.

3. 전반적으로 2,5-헥산디온이 검출된 사업은 50인 미만의 소규모 사업장이 전체의 약 56%를 차지하였고, 이들 사업장에서 상대적으로 더 높은 노출농도 및 변동성이 관찰되었다. 그러나 2023년도의 자료에서는 300인 이상 사업장에서도 검출률이 36.0%에 달하였고, 평균 농도도 1.07 mg/L로 높게 나타나, 반드시 소규모 사업장에서만 높게 나타나는 것은 아니다.

4. 업종별로는 제조업이 전체의 대부분을 차지하였으며, 2023년 제조업의 평균 노출농도는 0.34mg/L로 가장 높게 나타났다. 비제조업 중에서는 서비스업과 연구·분석 업종도 일부 연도에서 상대적으로 높은 수치를 보여 다양한 업종에서의 노출 관리 필요성을 시사하였다.

5. 공정별 분석 결과, 집착 공정(1.2 mg/L), 도장 공정(1.12 mg/L), 사출 공정 (0.98 mg/L)에서 평균 농도가 높게 나타났으며, 특히 세척·닦음 공정은 전체 검출의 약 79%(775건)를 차지하였다. 이는 n-헥산의 용제 특성과 관련된 반복적인 노출 가능성을 의미한다.

6. n-헥산을 취급하지 않는 일부 사업장에서 근로자의 요중 2,5-헥산디온이 검출되기도 하였다. 이는 메틸에틸케톤 등 대사경로 유사 유기용제에 공동 노출 또는 간접적인 대사 경로에 의해서 생성될 수 있음을 나타낸다. 따라서 2,5-헥산디온을 생물학적 노출지표(BEI)로 활용할 경우, n-헥산에 대한 노출 여부 만으로 해석하는 것은 한계가 있으며, 유기용제의 혼합노출 가능성을 고려한 종합적인 평가가 필요하다.

7. 노출구간 분석 결과, 전체의 77.6%가 0.25 mg/L 이하의 저농도 구간에 해당하였으나, 1.25 mg/L를 초과하는 25-100% 구간에 해당하는 고노출자는 180명이고, 이중 78.9%가 제조업 근로자였다. 특히 자동차 부품 제조업은 전체 평균 및 기하평균 농도가 다른 업종에 비해 가장 높게 나타났으며 2023년 평균 농도는 1.08 mg/L로 최고치를 기록하였다.

# 참 고 문 헌

## 1. 국내문헌

한국산업안전보건공단. (2021). 노말핵산의 생물학적노출지표물질 분석에 관한 기술지침. (KOSHA GUIDE H-139-2021).

전정원. (2007). 노말핵산 취급 근로자의 생물학적 노출지수 및 관련요인. 인제대학교 대학원 보건학과.

조성용,장용석,최은경,김진석,유재영,우극현,최태성. (2007). 2,5-핵산디온에 노출된 근로자에게서 발생한 말초 신경병증. 순천향대학교 구미병원 산업의학과. 대한산업의학회지 제 19 권 제 1 호 2007:19(1):65-72.

전영준,최호춘. (2012). 요중 2,5-핵산디온의 분석방법-가스크로마토그래프법. 대한산업보건협회 산업보건환경연구원.

전희경,김은아. (2012). 노말핵산과 직업병. 산업안전보건연구원 직업병연구센터.

고용노동부. (2025). 산업안전보건법.

## 2. 국외문헌

Maria Jose Prieto, Dolores Marhuenda, J Roel, ANtonio Cardona. (2003).

Free and total 2,5-hexandione in biologicla monitoring of workers exposed to n-hexane in the shoe industry. Miguel Hernandez University of Elche.

Maestri, L. Ghittori, S. Imbriani, M. Capodaglio, E. (1994).

Determination of 2,5-hexandione by high-performance liquid chromatography after derivatization with dansylhydrazine.

ELSEVIER SCIENCE B.V. Biomedical applications Vol.657 No.1 [1994]:111.

Fedtke N, Bolt HM. (1986). Detection of 2,5-hexanedione in the urine of persons not exposed to n-hexane. Int Arch Occup Environ Health. 1986;57(2):143-8. doi: 10.1007/BF00381382. PMID: 3949398.

# ABSTRACT

## A Study on Urinary 2,5-Hexanedione Levels Based on Special Health Examination Data from 2018 to 2023 in the Gwangju and Jeonnam Regions

Baek, Song Hee

Major in Industrial Hygiene Engineering

Dept. of Mechanical Systems Engineering

The Graduate School

Hansung University

This study analyzed special health examination data from 2018 to 2023 at selected workplaces in Gwangju Metropolitan City and the Jeonnam region, focusing on urinary 2,5-hexanedione levels in workers and airborne n-hexane exposure measured through work environment monitoring. Among 5,765 cases from 321 workplaces where n-hexane exposure was suspected, urinary 2,5-hexanedione was detected in only 1,380 cases (24%). Of 1,137 work environment monitoring samples, n-hexane was detected in just 98 cases (8.3%), while 1,039 cases (91.7%) showed no detectable levels.

The geometric mean (GM) of urinary 2,5-hexanedione in positive cases varied from 0.26 mg/L to 1.08 mg/L by year, with geometric standard deviations (GSDs) ranging from 1.53 to 3.79. These fluctuations likely resulted from differences in analytical detection limits rather than true exposure changes. Notably, the hydrolysis method used in Korea can yield detectable levels even in unexposed individuals, indicating that failing to consider quantification limits may cause analytical errors. Excluding data below 1/20 (0.25 mg/L) or 1/10 (0.5 mg/L) of the biological exposure index (5 mg/L) appears more appropriate for risk analysis.

Overall, 56% of workplaces with detected 2,5-hexanedione were small enterprises with fewer than 50 employees, where relatively higher exposure levels and variability were observed. However, in 2023, large enterprises with over 300 employees showed a 36.0% detection rate and an average concentration of 1.07 mg/L, suggesting that high exposure is not limited to small workplaces.

Most detected cases were in the manufacturing sector, with elevated concentrations in adhesive (1.199 mg/L), painting (1.124 mg/L), and injection molding (0.983 mg/L) processes. Although most samples did not exceed the 5 mg/L biological exposure index, certain processes may exceed this limit when considering statistical estimations.

**【Keywords】** 2,5-Hexanedione, n-Hexane, Biological Monitoring of Hexane, Special Health Examination