

## 채석단지 인근 농촌지역 도로 비산먼지 발생 특성 분석

서효재 · 서일환\* · 정남수\*\* · 박주석\*\*\*

전북대학교 지역건설공학과 박사과정 · \*전북대학교 지역건설공학과 부교수 ·  
\*\*공주대학교 지역건설공학과 교수 · \*\*\*공주대학교 지역건설공학과 박사

## Analysis of Roadside Fugitive Dust Generation Characteristics in Rural Areas Adjacent to Quarry Sites

Seo, Hyo-Jae · Seo, Il-Hwan<sup>\*</sup> · Jung, Nam-Su<sup>\*\*</sup> · Park, Joo-Seok<sup>\*\*\*</sup>

*Ph.D. Student, Department of Rural Construction Engineering, Jeonbuk National University*

*\*Associate Professor, Department of Rural Construction Engineering, Jeonbuk National University*

*\*\*Professor, Department of Regional Construction Engineering, Kongju National University*

*\*\*\*Ph.D, Department of Regional Construction Engineering, Kongju National University*

**ABSTRACT** : This study focused on quantifying fugitive dust levels around rural village adjacent near a stone quarry, specifically examining the influence of quarry operations and gravel transport vehicles on road dust dispersion. For this purpose, fugitive dust concentration monitoring was conducted to understand the impact of gravel transport vehicles operating through the quarry area on the generation of road dust. Gravimetric analysis indicated substantial increases in Total Suspended Particulate (TSP) concentration (5.8 times), PM-10 (3.6 times), and PM-2.5 (2.0 times) during quarry operations on the quarry transport road. Real-time monitoring during dump truck operation revealed average dust concentrations of TSP 566.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM-10 174.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , and PM-2.5 55.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . This indicates a significant increase compared to non-operation periods, with TSP concentration rising by 5.8 times, PM-10 concentration by 3.6 times, and PM-2.5 concentration by 2.0 times. Significantly elevated dust levels were observed at the village entrance road and quarry transport road during quarry operations, with PM-10 exceeding regulatory limits by 2.2 times and PM-2.5 exceeding limits by 1.9 times on the quarry transport road. Especially, particles with a diameter greater than 10  $\mu\text{m}$  exhibited a meaningful increase during dump truck transportation. Considering these findings, the study recommends implementing dust mitigation measures, including the introduction of dust barriers, screens, and wheel washing facilities for quarry-bound dump trucks.

**Key words** : Dust reduction, Field monitoring, Particulate matter, Rural air quality

### I. 서론

채석은 광물자원을 추출하는 건설 및 인프라 개발에 필수적인 산업활동 중 하나이다. 채석단지 개발은 자원관리 문제와 비산먼지 발생에 의한 대기환경문제를 야기할 수 있다(Lee and Park, 2018; Sairanen et al., 2018). 채석광산

에서 비산먼지는 건설공사나 광산운영과 관련된 부지준비, 시추, 발파, 채석 등의 작업 중에 생성될 수 있으며, 광석처리 및 취급 공정 뿐만 아니라 광산사업장 인근 비포장 도로를 운행하는 트럭 등 운송장비로 인해 발생하고 있다 (Organiscak et al., 2004; Yoon et al., 2021).

채석단지의 경우 일반적으로 농촌·산림지역에 인접해 있으며, 농촌지역은 도시지역과는 다른 특수한 환경적 조건으로 주거지역과 농경지가 인접하게 위치하고 있다. 고령화된 인구 비율이 상대적으로 높은 농업인들이 비산먼지에 노출

Corresponding author : Seo, Il-Hwan

Tel : \*\*\* - \*\*\*\* - \*\*\*\*

E-mail : ilhwan.seo1228@gmail.com

되면, 호흡기, 심혈관, 알레르기 반응 및 피부질환 등 건강상의 영향을 받을 수 있다(WHO, 1999; Petavratzi et al., 2005). 비산먼지의 노출은 기존의 건강 상태와 상호작용하여 더 심각한 영향을 미칠 수 있어 적절한 보호장비를 착용하고 노출을 저감할 수 있는 조치가 중요하며, 건강 관리에 특별한 주의가 필요하다(Gomez et al., 2004; Mathias, 1988; Seo et al., 2022).

채석장 인근 도로에서 발생하는 비산먼지는 지역주민들과 작물에 직접적인 영향을 미칠 수 있으며, 이는 작업자의 건강과 더불어 생태계와 식물 성장에도 영향을 줄 수 있다(Petavratzi et al., 2005, Seo et al., 2013). 비산먼지는 농작물의 기공을 막아 광합성을 억제하고 물질대사 및 가스교환에 이상을 초래할 수 있으며, 시설 하우스 표면에 부착하여 태양빛의 투과량을 감소시킴으로써 작물의 생육 장애를 유발할 수 있다(RDA, 2018). 공기 중 질병의 전파뿐만 아니라 지역 인근의 지하수와 하천의 부영양화, 오존층 파괴와 같은 다양한 환경 오염을 야기할 수 있다(Wathes et al., 1997).

비산먼지는 육안으로 식별하기 어려우며, 인체에 직접적으로 영향을 미칠 수 있어, 발파, 이송, 적재 등 상황별 지속적인 모니터링을 통한 대응방안 마련이 중요하다. Organiscak et al. (2004)은 채석광산에서 발생하는 비산먼지의 주요 원인과 그 영향을 분석하였으며, 특히 시추, 발파, 채석 등 작업 과정에서 발생하는 비산먼지의 양과 특성을 조사하였다. Abu-Allaban et al.(2006)은 석회석 채석장 인근에서 PM-10 고농도 지점의 주요 발생원을 조사하였으며, 도로에 침적된 분진이 주요 발생원 중 하나로 확인되었다. 이를 통해 채석장에서 발생한 분진이 바람에 의해 도로로 이동하고, 트럭의 이동에 의해 재현탁되어 대기 중 미세먼지 농도가 상승한다는 것이 밝혀졌다. Yoon et al. (2021)은 비산먼지가 농촌 및 산림 지역에 미치는 영향을 중점적으로 연구하였으며, 비산먼지의 확산 경로와 그로 인한 환경 및 건강 영향을 평가하였다.

비산먼지의 모니터링에 대한 연구도 활발히 진행되었다. Petavratzi et al. (2005)은 광산지역에서의 비산먼지 발생원과 모니터링 방법을 다루었으며, 특히 실시간 부유분진 측정기를 활용한 모니터링 기술의 발전을 강조하였다. Seo et al. (2013)은 비산먼지가 농작물에 미치는 영향을 연구하며, 다양한 모니터링 방법을 통해 비산먼지의 농도와 분포를 분석하였다. WHO (1999)는 비산먼지 노출이 호흡기 및 피부질환에 미치는 영향을 다루었으며, Gomez et al. (2004)는 고령화된 농촌 인구가 비산먼지에 노출될 때의 건강 위험성을 강조하였다. Mathias (1988)는 비산먼지가 기존의 건강 상태와 상호작용하여 더욱 심각한 영향을 미칠 수 있음을

언급하며, 적절한 보호 조치의 필요하다고 판단된다.

그러나 기존 연구들은 주로 채석장 내부의 비산먼지 발생 및 그 영향에 중점을 두었으며, 채석단지 인근 농촌마을과 관련된 비산먼지 모니터링 연구는 상대적으로 부족한 실정이다(Yang et al., 2019; Lee, 2020). 특히, 채석운반 차량에 의한 도로에서의 비산먼지 발생과 그 영향을 구체적으로 다룬 연구는 매우 제한적이다. 채석단지에서 발생하는 소음, 진동, 수질오염 등 문제는 법적 관리와 대책이 마련되고 있으나, 대기환경과 관련된 대책은 채석장 사업자가 자체적으로 운영 및 관리하고 있다. 채석단지 작업장과 인근에서는 광산안전법 광산안전기술에 따라 소음 및 비산먼지 확산 방지 조치가 이루어지고 있으나, 마을 외부로 운반되는 차량에 대한 비산먼지 저감 조치는 부족한 실정이다(Kim, 2019). 특히, 채석운반 차량에 의한 도로 비산먼지를 저감할 수 있는 대안방안 마련이 필요하며(Yang et al., 2019), 비산먼지가 농촌마을 인근에 미치는 영향에 대한 연구는 매우 부족하다(Lee, 2020; Yoon et al., 2021; ME, 2019).

본 연구에서는 채석단지 인근의 골재 운송차량이 도로 비산먼지 발생에 대한 영향을 파악하기 위하여 비산먼지 농도 모니터링을 수행하였다. 중량법을 활용하여 채석단지 인근과 농촌마을 간의 비산먼지 농도 분포를 분석하고, 실시간 부유분진 측정기를 사용하여 골재 운반용 차량 이동에 의한 비산먼지 발생 농도와 특성을 분석하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 연구대상지역

골재, 암석 운반용 덤프트럭을 통해 발생하는 도로 노면의 비산먼지를 모니터링하기 위하여 충청남도 예산군 일

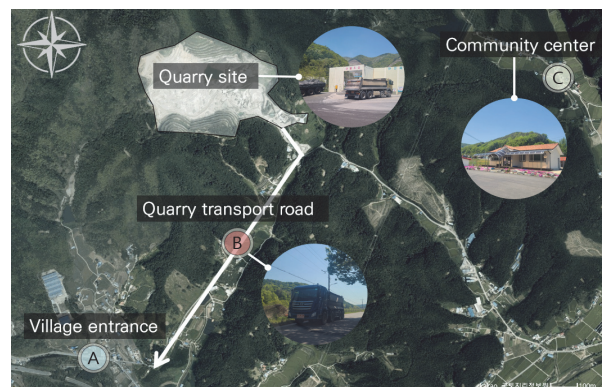


Figure 1. Measurement points for airborne dust on roads in rural areas near the quarry site

## 채석단지 인근 농촌지역 도로 비산먼지 발생 특성 분석



Figure 2. View of dump trucks passing through the entrance of a quarry and the dedicated transport road for quarrying

Table 1. Information on roadside dust measurement points in rural areas near quarries

Mark	Monitoring points	Characteristic of monitoring points
A	Village entrance	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High-traffic area for inbound and outbound external vehicles at the town entrance</li> <li>• The location where some dump trucks are traversing through quarry truck main road</li> </ul>
B	Quarry transport road	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Haulage Road for Transportation of Rocks and Aggregates in the Quarry Site</li> </ul>
C	Community center	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low Vehicle Movement in the Vicinity of the Monitoring Points</li> <li>• Monitoring point for Comparative Analysis of Monitoring Results</li> </ul>

대에 위치한 채석단지 인근 지역을 연구대상지역으로 선정하였다. 실험대상지점은 채석단지로부터 떨어진 거리와 채석 운반용 덤프트럭 이동경로를 고려하여 풍하측 방향으로 선정하였다. 채석단지에서 가장 인접하고 덤프트럭 이동량이 많은 채석운반도로(Quarry transport road)지점과, 운반용 덤프트럭이 마을 출입구를 거쳐 통행하는 마을입구(Village entrance road)지점에 대해 비산먼지 모니터링을 수행하였다(Figure 1). 또한, 대조군으로 채석단지로부터 거리가 멀고 덤프트럭 이동량이 적은 마을회관(Community center)에서의 대기 중 미세먼지 농도를 측정하였다. 채석 운반도로는 채석장에서 채굴된 골재, 암석을 적재한 덤프트럭이 주로 이용하는 도로이다(Figure 2). 마을입구는 채석운반도로를 지나 마을외부로 반출되는 채석운반 덤프트럭 이동이 많은 지점이다. 마을회관은 채석단지 인근의 비산먼지에 대한 영향을 최소화하기 위하여 채석단지로부터 가장 거리가 멀고, 인구이동과 차량이동이 가장 적은 지점이다(Table 1).

### 2. 비산먼지 모니터링 장비 및 방법

채석단지 인근 도로비산먼지 농도는 중량법(Gravimetric method)을 통해 측정하였다. 비산먼지는 총부유분진(Total

suspended particles, TSP), 미세먼지(Particulate matter under 10 $\mu$ m, PM-10), 초미세먼지(Particulate matter under 2.5 $\mu$ m, PM-2.5)로 구분하여 측정하였다. TSP는 소형 공기시료 포집기(AirChek TOUCH, SKC. Inc., USA)에 Tygon tube를 결합하여 3단 카세트에 PTFE(Polytetrafluoroethylen) 여과지 필터(SKC Inc., USA, 2.0  $\mu$ m, 37 mm)를 고정하여 2L/min의 유량으로 공기를 포집하였다. PM-10과 PM-2.5는 각각 10  $\mu$ m, 2.5  $\mu$ m 이하의 에어로졸을 포집할 수 있는 PEM 임팩터(Personal environmental monitor, SKC. Inc., USA)에 PTFE 여과지를 연결하고 Tygon tube를 소형 공기포집기를 연결하여 4L/min의 유량으로 공기를 포집하였다(Figure 3).

공기 중 비산먼지를 포집하기 위해 사용된 여과지는 샘플링 전후로 48시간 이상 안정된 온도와 습도가 유지되는 항온항습기(KA33-73, Korea Ace Science Inc., Korea)를 통해 건조하였다. 건조된 여과지는 0.001 mg의 민감도를 갖는 미세중량저울(BM-22, AND weighing Inc., Japan)을 사용하여 각각 3회씩 측정하여 평균값을 미세먼지의 무게로 결정하였다. 공기 샘플링에 사용되지 않은 공시료 여과지도 결과를 보정하기 위해 공시료 여과지의 무게를 고려하여 방정식 (1)을 사용하여 여과지의 측정 전후의 무게 차이 및 샘플 수집, 운송, 및 전처리 단계에서 발생한 여과지 무게의 오차를 고려하여 에어로졸 농도를 계산하였다.

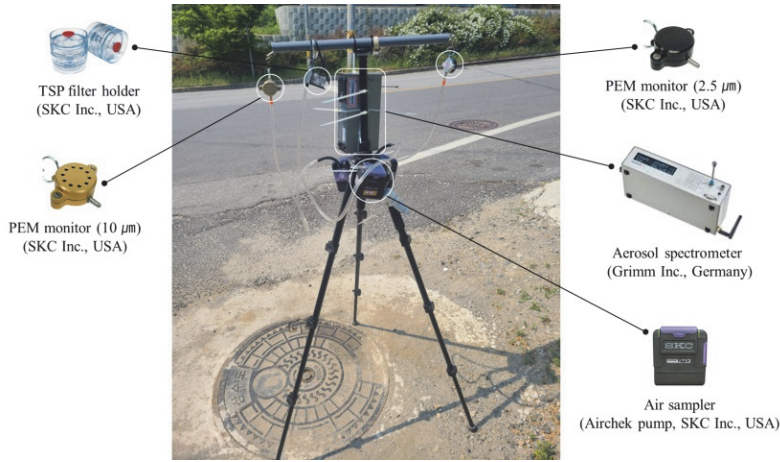


Figure 3. Airborne dust monitoring equipment installed on roads near the quarry site



Figure 4. Installation of monitoring equipment for airborne dust at each measurement point

$$PM = \frac{[(WS_p - WS_i) - (WB_p - WB_i)]}{Flowrate \times Sampling\ time} \quad (1)$$

여기서, PM은 미세먼지 농도 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $WS_p$ 는 샘플링 후 여과지의 무게( $\mu\text{g}$ ),  $WS_i$ 는 샘플링 전 여과지의 무게( $\mu\text{g}$ ),  $WB_p$ 는 샘플링 후 공기로 여과지의 무게( $\mu\text{g}$ ),  $WB_i$ 는 샘플링 전 공기로 여과지의 무게( $\mu\text{g}$ )이다.

채석단지에서 골재를 적재한 덤프트럭은 도로 노면의 먼지를 비산시킬 수 있다. 도로 비산먼지 농도는 실시간 부유분진 측정장비 Aerosol spectrometer(11-D, Grimm Inc., Germany)를 이용하여 측정하였다. 본 장비는 6초 간격으로 0.253~35.15  $\mu\text{m}$  입자 크기 범위를 갖는 부유분진에 대해 31개의 입경별 비산먼지 농도 측정이 가능하다.

마을입구, 채석운반도로, 마을회관비산먼지 측정을 위해

총 5개의 측정 장비를 사용하였다. 각 측정 장비는 채석장 인근 도로를 기준으로 일정한 간격으로 배치하였다. 구체적으로, 마을입구(A 지점), 채석운반도로(B 지점), 마을회관(C지점)까지 비산먼지 모니터링 장비를 수평 배치하였으며, 도로와 평행하게 설치하였다. 이러한 배치는 비산먼지가 도로를 따라 확산되는 비산먼지 농도를 모니터링하기 위함이다. 비산먼지 농도는 채석장 가동유무와 농촌마을 위치 및 이동경로를 고려하여 채석운반도로, 마을입구, 마을회관으로 3지점에서 측정하였다(Figure 4). 비산먼지 측정 높이는 인체 건강에 대한 영향을 평가하기 위하여 바닥에서 1.5m로 선정하였다. 비산먼지 포집시간은 산업안전보건법에 고시된 시간가중평균 노출기준(time weighted average, TWA)을 고려하였으며, 채석단지가 가동되는 오전 10시부터 오후 4시까지 실시간 측정되었다. 비산먼지

## 채석단지 인근 농촌지역 도로 비산먼지 발생 특성 분석

측정장비는 미세먼지 농도값의 오차를 최소화하기 위해 바람의 영향과 비산먼지의 포집방향을 고려하여 고정지지대를 통해 측정높이를 조절하였다.

채석장 인근 마을의 비산먼지 농도를 평가하기 위하여 환경부 대기환경기준과 비교하여 농촌마을 위치와 채석단지 가동유무에 따른 비산먼지 농도 수준을 평가하였다. 현재, 대기환경기준 일일 평균 미세먼지 농도 기준은 미세먼지(PM-10)의 경우  $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 초미세먼지(PM-2.5)는  $50\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하로 제시되어 있다(Ministry of Environment, 2015).

채석 운반용 덤프트럭으로 인한 비산먼지 측정을 위해 실시간 부유분진 측정기를 활용하여 덤프트럭이 통과하는 지점에서 발생하는 비산먼지의 실시간 농도를 측정하였다. 비산먼지 농도 측정결과를 분석하기 위해 모니터링 지점에 현장 조사원을 배치하여 덤프트럭 이동 현황을 조사하였다. 모니터링 지점에서 덤프트럭 이동 전·후에 대한 모니터링 결과를 바탕으로 채석단지 인근 비산먼지의 발생 요인과 주요 발생 입경을 파악하였다. 또한, 입경별 비산먼지 농도 결과를 바탕으로 덤프트럭의 이동에 따른 비산먼지의 발생 영향을 파악하기 위해 SPSS Ver. 22.0프로그램을 이용하여 독립표본 T검정을 수행하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 채석단지 인근 비산먼지 농도 분포

채석단지 인근 농촌마을에서 덤프트럭 이동에 따른 비산먼지 농도를 분석하기 위해 채석 운반 도로, 마을입구, 마을회관에 대하여 교통 이동량을 현장조사를 수행하였다. 채석단지 가동 시, 측정지점별 교통량은 채석 운반도로에서 24대, 마을입구에서 14대, 마을회관에서 37대로 측정되었다. 이는 채석단지 가동 시 교통량이 채석 운반도로에

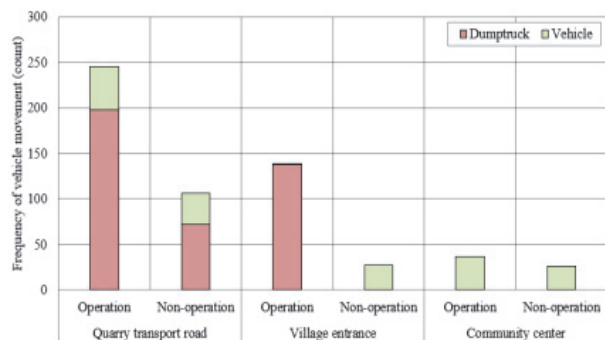


Figure 5. Traffic volume at measurement points according to the operational status of the quarry site

서는 3.4배, 마을입구에서는 2.9배 증가했음을 의미한다. 반면, 채석단지를 가동하지 않는 경우, 각 지점에서의 교통량은 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서, 채석단지 가동 여부에 따라 지점별 교통량에 유의한 차이가 발생함을 확인할 수 있었다(Figure 5).

채석단지가 가동하는 동안 하는 동안 지점별 비산먼지 농도는 차량 이동량과 비례하여 채석운반도로, 마을입구, 마을회관 순으로 높게 나타났다. 대조군(마을회관)의 미세먼지 농도를 대조군으로 비교할 때, 채석운반도로에서 TSP 농도 5.5배, PM-10 농도 7.4배, PM-2.5 농도 3.9배 높게 나타났다으며, 마을입구의 경우 TSP 농도 1.8배, PM-10 농도 1.7배, PM-2.5 1.4배 높은 것으로 나타났다(Figure 6). PM-2.5 농도의 증가 폭은 상대적으로 낮게 나타났는데, 이는 주로 초미세먼지의 발생원인은 일반적으로 대기화학반응에 의한 영향이 더 크기 때문인 것으로 판단된다(Seinfeld and Pandis, 2016). 반면, TSP, PM-10은 차량 이동량이 높은 지역에서 농도가 증가하였으며, 골재와 토사를 운반하는 덤프트럭이 도로 위를 이동할 때 도로의 분진이 재비산하여 분진 농도가 증가한 것으로 사료된다. 채석단지의 운영 여부에 따라 채석운반도로와 마을입구에서의 비산먼지 농도가 증가하였다. 채석단지 가동 시에는 채석운반도로에서 TSP 농도 3.9배, PM-10 농도 1.7배 증가하며, 마을입구에서는 TSP 농도 4.1배, PM-10 농도 1.3배 증가하였다. 채석단지를 가동하지 않은 경우에는 측정지점별 비산먼지 농도에 큰 차이가 나타나지 않았다.

채석단지 인근 농촌지역별 비산먼지 농도를 평가하기 위해 국내 대기환경기준과 비교를 통해 분석하였다. 채석 운반도로에서 PM-10 농도 기준치를 2.2배 초과하였으며, PM-2.5 농도 기준치는 1.9배 초과하였다. 마을입구와 마을회관은 기준치를 초과하지 않는 것으로 나타났다. 채석단지 미가동 시 모든 측정지점에서 PM-10 농도 기준치를 초과하지 않았으며, PM-2.5 농도는 기준치를 초과하고 있

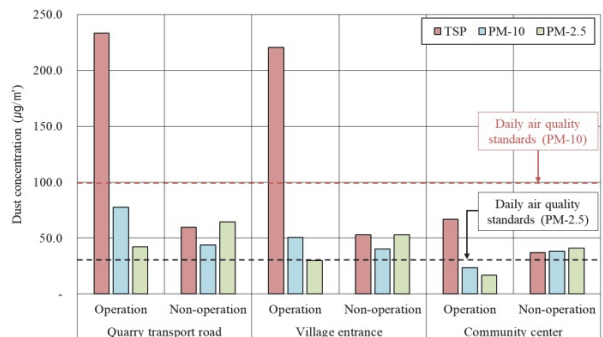


Figure 6. Fine dust concentrations in rural areas according to the operation status of the quarry site

나, 해당 실험기간 동안의 대기 중 초미세먼지 농도에 의한 영향으로 판단된다. 이를 통해 채석단지 가동 시 채석운반을 위한 덤프트럭의 이동은 농촌지역 인근의 비산먼지 농도를 증가시키는 주요 원인으로 채석운반 덤프트럭으로 인해 발생하는 비산먼지에 대한 저감대책 마련이 요구된다.

## 2. 실시간 비산먼지 발생 농도 및 특성

채석운반도로에서 덤프트럭 이동에 따른 비산먼지 농도를 실시간 측정하였다. 실험기간 동안 현장조사 요원을 통해 덤프트럭의 실시간 이동현황을 파악하여 채석운반 차량 통과하는 순간에 비산먼지 농도를 분석하였다. 덤프트럭은 채석단지 가동시기 동안 지속적으로 운행되었으며, 덤프트럭 이동 시 비산먼지는 평균적으로 TSP 농도 566.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM-10 농도 174.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM-2.5 농도 55.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 덤프트럭이 이동하지 않는 시기의 농도는 TSP 농도는 97.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM-10 농도 48.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM-2.5 농

도 27.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 덤프트럭 이동 시 비산먼지 농도는 이동하지 않는 시기 대비 TSP 농도 5.8배, PM-10 농도 3.6배, PM-2.5 농도 2.0배 증가하였다(Figure 7). 채석운반도로에서 TSP, PM-10 농도의 증가는 덤프트럭 이동 시 주로 도로 바닥에서부터 기계적으로 발생하는 10  $\mu\text{m}$  전·후 입경의 비산먼지 농도가 증가한 것으로 판단된다. Abu-Allaban et al.(2006)에 따르면, 석회석 채석장 인근에서의 미세먼지(PM10) 고농도 지점의 발생원을 조사한 결과, 도로에 침적된 분진이 주요 발생원 중 하나로 확인되었으며, 이 분진은 채석장에서 발생하여 바람에 의해 도로까지 이송되고, 트럭 이동에 의해 재현탁되어 대기 중 분진 농도가 상승한다고 보고하였다.

채석운반도로에서 덤프트럭의 이동시기와 미이동시기의 비산먼지 농도를 비교하면, TSP, PM-10, PM-2.5 입경별 비산먼지 농도에는 유의한 차이가 있으며, 덤프트럭 이동 시 비산먼지 농도가 통계적으로 유의하게 높게 나타났다( $p < 0.001$ )(Figure 8).

채석운반도로에서 덤프트럭 이동에 따른 비산먼지 농도를 실시간 측정하여 영상 자료를 기반으로 덤프트럭의 이동 유무에 따른 비산먼지 발생 농도를 비교하였다. 채석운

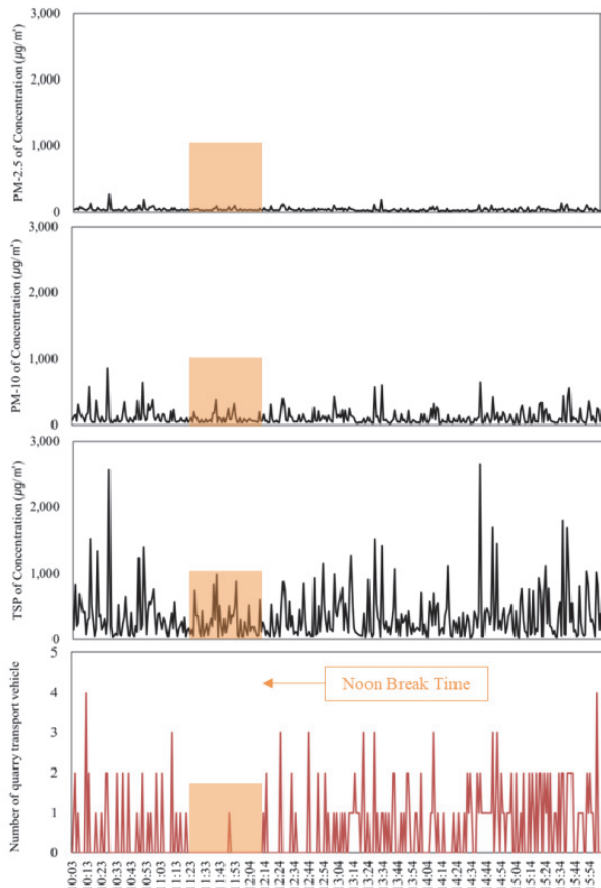


Figure 7. Real-time measurement results of airborne dust concentrations due to truck movement

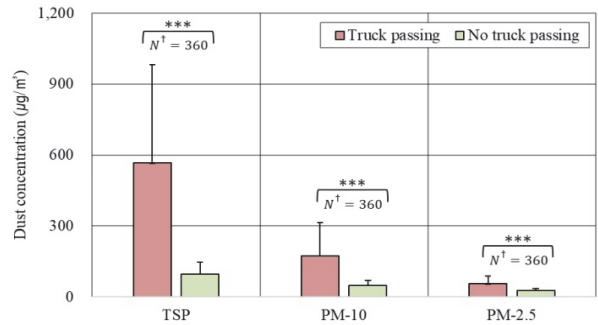


Figure 8. Real-time particulate matter concentrations by particle size due to movement of quarry transport truck

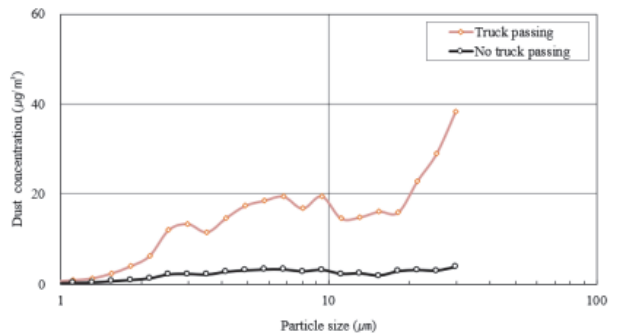


Figure 9. Status of increased particulate matter concentrations by particle size due to movement of dump trucks

반도로에서 덤프트럭이 이동할 때 비산먼지의 입자 크기 분포는 덤프트럭 이동 시 10  $\mu\text{m}$  이상의 입경 분포에서 85.5%, 2.5  $\mu\text{m}$ 에서 10  $\mu\text{m}$  사이의 입경 농도가 82.7%, 2.5  $\mu\text{m}$  이하의 입경 농도에서 51.9% 증가하였다(Figure 9). 덤프트럭 이동에 따른 비산먼지 농도 분석 결과, 입경 10 $\mu\text{m}$  이상의 큰 입자는 덤프트럭의 기계적 움직임으로 인해 발생하며, 주로 발생 지점 근처에서 높은 농도를 보여 근처 작업자와 주변 환경에 직접적인 영향을 미친다(Abu-Allaban et al., 2006). 입경 2.5 $\mu\text{m}$ 에서 10 $\mu\text{m}$  사이의 중간 크기 입자는 상대적으로 더 멀리 이동할 수 있어 주변 환경과 주민들에게 영향을 미치며, 호흡기 깊숙이 침투하여 건강에 더 큰 영향을 줄 수 있다(Petavratzi et al., 2005). 입경 2.5 $\mu\text{m}$  이하의 작은 입자는 공기 중에서 오랫동안 떠다니며 넓은 범위로 확산될 가능성이 크고, 이는 장기적인 환경 오염과 폐 깊숙이 침투하여 만성 호흡기 질환 등 심각한 건강 문제를 야기할 수 있다(WHO, 1999).

앞선, 채석단지 인근 지점별 비산먼지 농도 중 채석운반 도로의 비산먼지 농도 분포와 채석단지 가동에 따른 비산먼지 농도 분포와 유사한 경향을 보이고 있다. 채석단지 인근 농촌지역의 비산먼지는 채석운반용 덤프트럭 이동에 의한 도로노면과 덤프트럭으로부터 비산되는 먼지를 저감하는 것이 중요하다. 덤프트럭 이동 시 발생하는 비산먼지 저감을 위해 큰 입자는 도로 표면에 물을 뿌리거나 도로를 청소하는 등의 기계적 방법을 통해 줄일 수 있다. 중간 크기 입자는 덤프트럭의 속도를 제한하고 덮개를 사용하며 도로 포장 상태를 개선하는 등의 방법으로 발생을 줄이는 것이 바람직하다. 또한, 주변에 방풍벽을 설치하여 입자의 확산을 막아 농촌지역으로 유입되는 것을 방지하는 등의 저감대책이 요구된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 채석단지 인근 농촌지역의 비산먼지 농도를 모니터링하고 입경별 농도 분포를 분석하였다. 채석운반도로에서 덤프트럭 이동 시 비산먼지 농도가 유의하게 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 10 $\mu\text{m}$  이상의 입경의 비산먼지가 85.5%으로 크게 증가하였으며, 이는 덤프트럭 이동 시 도로노면에서 발생하는 비산먼지가 큰 영향을 미치고 있다는 것을 의미한다. 채석단지 가동 시기에는 덤프트럭의 이동량이 채석운반도로에서 3.4배, 마을입구에서 2.9배 증가하며, 이에 따라 채석운반도로에서 비산먼지 농도가 TSP 농도 3.9배, PM-10 농도가 1.7배 증가하였다. 마을입구에서는 TSP 농도 4.1배, PM-10가 농도 1.3배 증가

하였다. 채석 운반 도로에서는 농촌마을 입구와 마을회관 지점에 비해 상대적으로 높은 비산먼지 농도가 관측되었다. 이러한 결과는 덤프트럭의 이동이 농촌지역의 대기질을 악화시키는 주요 요인임을 알 수 있다. 채석단지 인근 농촌지역에서 발생하는 비산먼지와 덤프트럭 이동에 의한 소음은 농촌지역의 고령인구의 보건관리와 농촌지역 환경에 미칠 것으로 예상된다. 특히, 10 $\mu\text{m}$  이상의 입경 분포에서 덤프트럭 이동에 따른 증가가 유의미하게 나타났으며, 이러한 비산먼지 발생 특성을 고려하여 채석단지에서 출하되는 덤프트럭에는 방진벽 및 방진망, 세륜시설 등의 도입이 필요하며, 채석 운반 도로에서의 비산먼지 저감을 위해 도로노면의 적기 살수 및 비산먼지 발생량을 줄일 수 있는 적재함 덮개 설치 등의 환경적 대책이 필요하다. 비산먼지 발생특성을 고려한 저감대책 수립 및 시행을 통해 채석단지 인근 농촌지역의 대기 질을 개선하고 주민들의 건강을 보호할 수 있을 것으로 기대한다.

#### References

1. Yoon, J. H., Lee, S. H., Seo, E. Y., and Beak, S. H., 2021, A Monitoring strategy on dispersion of particulate matter emitted from domestic limestone open pit mines, *Economic and Environmental Geology*, 54(4): 475-482, DOI: 10.9719/EEG.2021.54.4.475.
2. Organiscak, J. A. and Randolph Reed W.M., 2004, Characteristics of fugitive dust generated from unpaved mine haulage roads. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment* 18(4): 236-252, DOI: 10.1080/1389526042000263333.
3. Sairanen, M., Rine, M. and Selonen, O., 2018, A review of dust emission dispersions in rock aggregate and natural stone quarries. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 32(3): 196-220, DOI: 10.1080/17480930.2016.1271385.
4. WHO(World Health Organization), 1999, Hazard prevention and control in the work environment: Airborne Dust. World Health Organization, WHO/SDE/OEH/99.14, DOI: 10.1093/annhyg/ 44.5.405
5. Petavratzi, E., Kingman, S. and Lowndes, I., 2005, Particulates from mining operations: A review of sources, effects and regulations. *Minerals Engineering*, 18(12): 1183-1199, DOI: 10.1016/j.mineng.2005.06.017.
6. Mathias C.G., 1988, Occupational dermatoses. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 19(6): 1107-1114,

- DOI:10.1016/s0190-9622(98)80005-4.
7. Gomez M.I., Hwang, S.A., Lin, S., Stark, A.D., May, J.J., and Hallman, E.M., 2004, Prevalence and predictors of respiratory symptoms among New York farmers and farm residents. *American Journal of Industrial Medicine*, 46:42-54, DOI: 10.1002/ajim.20018.
  8. RDA(Rural Development Administration), Effects of fine dust on agricultural products. [https://www.nongsaro.go.kr/portal/ps/psz/psza/contentSub.ps?jsessionid=dAk43bwrDhi75hDdga8S8aOG40oJEJq64esIStFasVfOv1h80ZPOPLKYW021P4Ed.nongsaro-web\\_servlet\\_engine1?menuId=PS00078&pageIndex=1&pageSize=10&cntntsNo=208543&sType=sCntntsSj&sText=](https://www.nongsaro.go.kr/portal/ps/psz/psza/contentSub.ps?jsessionid=dAk43bwrDhi75hDdga8S8aOG40oJEJq64esIStFasVfOv1h80ZPOPLKYW021P4Ed.nongsaro-web_servlet_engine1?menuId=PS00078&pageIndex=1&pageSize=10&cntntsNo=208543&sType=sCntntsSj&sText=), Accessed 5 April 2018.
  9. Wathes C.M., Holden, M.R., Sneath, R.W., White, R.P., and Phillips, V.R., 1997, Concentrations and emission rates of aerial ammonia, nitrous oxide, methane, carbon dioxide, dust and endotoxin in UK broiler and layer houses. *Br Poult Sci* 38:14-28. DOI: 10.1080/00071669708417936.
  10. Ministry of Environment, 2015, Enforcement decree of the framework act on environmental policy.
  11. Seinfeld, J.H. and Pandis, S.H., 2016, Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change, third edition, John Wiley & Sons Inc, Hoboken, New Jersey, USA.
  12. Lee, H. C., Park, J.W., 2018, Legal study on the supply & demand status of mountainous aggregates and environmental problems caused by soil and rock extraction. *Environmental Law and Policy*, 20(1): 289-313. DOI: 10.18215/elvp.20..201802.289.
  13. Seo, H.J., Kim, H.C., and Seo, I.H., 2022, Monitoring of working environment exposed to particulate matter in greenhouse for cultivating flower and fruit. *Journal of Bio-Environment Control*, 31(2): 79-89. DOI: 10.12791/KSBEC.2022.31.2.079.
  14. Yang, J.H., Tae, S.H., and Lee, K.S., 2019, Basic study on the measurement of finedust based on light scattering method in construction site. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 39(2):
  15. Kim, T.K., 2019, Fine dust monitoring and removal method in urban construction sites using autonomous mobile vehicle and dry fog system. *Ecology and Resilient Infrastructure*, 6(4): 277-286. DOI: 10.17820/eri.2019.6.4.277.
  16. Lee, S.H., 2020, Review on characteristics and monitoring of particulate matter emitted from mining operation, *Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 57(2): 234-242. DOI: 10.32390/ksmer.2020.57.2.234.
  17. Korea Ministry of Environment(ME), 2019, Air pollution monitoring design and operation guideline, NIER-GP2019-004. Sejong-si, Korea.
  18. Seo, I.L., Lee, I.B., Hwang, H.S., and Bae, Y.J., 2013, Aerosol emission from road by livestock transport vehicle movement. *Journal of Korean Society of Rural Planning*, 19(4): 137-147. DOI: 10.7851/ksrp.2013.19. 4.137.
  19. Abu-Allaban, M., Hamasha, S., and Gertler, A., 2006, Road dust resuspension in the vicinity of limestone quarries in Jordan, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(10): 1440-1444. DOI: 10.1080/10473289.2006.10464546.
- 
- Received 5 March 2024
  - Finally Revised 25 June 2024
  - Accepted 27 June 2024