

[論 文]

석회석 노천채광장의 분진 비산특성

Dust Fall Property of Open Cut Limestone Mine

이상권 · 김복윤 · 조영도 · 김임호*

Lee, Snag Kwon, Kim, Bok Youn, Cho, Young Do and Kim, Im Ho

Abstract : To find out the characteristics and trend of dust fall in open cut limestone mine in-situ measurement and wind tunnel tests were carried out. In-siti measurement was done by two dust fall samplers at the Halls mine for 60 days. The laboratory test was done in the 100m long temporary wind tunnel installed at the yard of the institute. The most of dust fell within 25m form the dust source and only less than 0.5% defused up to over 100 meters. It was known that the dust fall at 100m away from souces were negligible.

Key Word ; dust fall sampler, wind tunnel, dust concentration, air velocity

요 약 : 본 연구에서는 Dust Fall Sample을 설치하여 한라시멘트 옥계 채광현장의 천공, 발파작업시 발생하는 분진을 측정하고, 실험적인 방법으로 100m길이의 가설 풍동을 만들어 풍속별 비산거리 및 분진입도 분포 등을 파악하여 주변작업 환경영향을 평가하였다. 그 결과 낙진량은 기본적으로 분진원으로부터 거리가 멀어질 수록 현저하게 감소하며, 같은 조건일 때는 풍속이 빠를 수록 낙진량도 증가하였다. 또한 석회석 노천채광시 발파작업장으로부터 100m 내외의 주변 지표상의 낙진량은 아주 작은량임을 알 수 있었다.

주 요 어 : 낙진량 : 낙진량 측정기, 풍동, 분진농도, 풍속

서 론

석회석 광산과 같은 노천채광을 하는 광산에서는 분진비산이 중요한 환경 오염원이 되고 있다. 주요 분진 발생원은 발파작업으로 광산 작업중 가장 많은 분진을 발생시킨다.

특히 견고한 암반일수록 분진 발생량이 많아지는 경향이 있다. 발파분진의 발생량은 발파 설계, 화약의 종류와 양, 충전재 등에 의해 달라진다.

국내광산에서 실측한 결과에 의하면 굴진작업장에서 발파작업시 최고 410mg/m'(호흡성 분진 123 mg/m')의 농도를 나타내고 있다. 그러나 발파후 일정시간후 구름 모양의 분진

* 한국자원연구소 자원연구부

운이 형성되는데 이 분진의 분진농도는 그 이하가 될 것이며, 이 분진운은 기류를 타고 이동하며 입자크기에 따라 중력에 의한 낙진이 일어나게 된다.

이 분진의 대부분은 가까운 거리에서 모두 낙진되며, 극히 일부 미세 입자만이 풍속에 따라 100m 이상까지 비산되는 경우가 있다. 그리고 0.5 μm 이하의 입자들은 중력의 영향에서 벗어나 브라운 운동을 하면서 계속 공기 중에 확산한다. 따라서 발파분진은 그 총량이 중요한 것이 아니라 미세입자의 함량정도가 중요하다. 그밖에 분진이 발생되는 원인은 천공, 파쇄, 적재, 트럭운송 등이다.

본 연구에서는 노천채광으로 발생하는 석회석분진이 비산하여 낙진하는데 있다. 한라시멘트 옥계 채광현장의 천공, 발파작업시 발생하는 분진량을 Dust Fall Sampler를 현장에 설치하여 측정하고, 실험적인 방법으로 100m 길이의 가설 풍동을 만들어 거리에 따른 입도별, 풍속에 따른 비산특성 경향을 검토하였다.

분진의 정의

공기를 매체로하여 입자상 물질이 부유하고 있는 상태를 총체적으로 Aerosol이라하며, 그 종류는 생성과정에 의해 결정되는 경우가 많으나 일반적인 분류방법은 입자상 물질의 형태나 거동에 의해 분류하는 경우도 있다. Aerosol은 넓은 의미에서 총체적으로 분진이라 하지만 분진이란 어떤 물질이 기계적으로 작게 분쇄되어 공기나 어떤 가스상 매체에 상당한 시간 부유하는 미립자를 말한다. 넓은 의미에서의 분진의 입도범위는 0.001~1000 μm 이지만 100 μm 이상의 분진은 발생 즉시 침강하게 되며, 인체에 흡입할때 폐포에 까지 도달 침착하여 진폐증 등의 질병을 야기하는 입력범위는 0.5~7 μm 이며 이러한 범위의 분진을 호흡성분진(Respirable dust)이라하여 관심과 연구의 대상으로 하고 있다.

일반적으로 입도가 50 μm 이상은 눈에 보이고 빠른 속도로 침강하기 때문에 건강과는

밀접한 관계가 없으며 그 이하는 육안 식별하기 곤란하다. 석회석 분진은 암석의 물리적 성질상 미세분진이 적은 경향이 있으며 일반적으로 10 μm 이상의 분진입도를 보이고 있다. 반면 인공적으로 연마한 시멘트의 경우는 1 μm 까지의 미분을 나타내고 있다.

공기와 같은 유체안에서 자유낙하하는 입자는 곧 일정한 속도, 즉 최종속도에 도달한다. 그리고 유체의 저항이 있다면 그 힘은 중력과 동일한 것이다.

하부로 작용하는 힘(G)는

$$G = 1/6 \pi d^3 (W_s - W_a) g \quad (1)$$

단, d: 입자의 직경(m)

W_s : 입자의 밀도(kg/m³)

W_a : 공기의 밀도(kg/m³)

g: 중력가속도(m/s²)

낙하를 방해하는 공기의 저항(F)은

$$F = 3 \pi d \eta V \quad (2)$$

단, V: 침강속도(m/s)

η : 유체의 점도(kg/m.s)

따라서 낙하하려는 입자의 중력의 힘 식(1)과 유체의 저항식(2)가 같다면 입자의 낙하속도를 계산하는 Stocke's 법칙은 식(3)과 같다.

$$V = \frac{d^2 g}{18 \eta} (W_s - W_a) \quad (3)$$

이 법칙은 분진의 낙진과 관련된 이론식으로 석영입자의 평균직경이 0.32 μm , 건구온도 10°C와 기압이 625mmHg 일 때의 계산식 예를 보면 침강속도가 10⁻³m/s가 된다. 예를 들면 직경 10 μm 의 입자가 1.6m 높이의 정지된 공기중에서 낙하한다면 3.3분의 걸릴 것이라

는 사실을 알 수 있다. 이렇게 적은 입자는 브라운 운동이 원인이 되는 공기분자와의 충돌 때문에 침강이 늦어지는 것이다.

Dust fall sampler(낙진량 측정기)

낙진량 측정에 Deposit cage를 사용하는 방법은 강하배진 채취법으로서 영국에서 처음으로 사용되었으며, 그 이후 국제적인 표준방법이 되었다. Dust fall sampler(낙진량 측정기)는 옥외에 설치하여 빗물, 눈, 암석, 분진 등이 동시에 수집되었기 때문에 용기에 수집된 내용물을 수거하여 빗물을 증발시킨 후 잔류 분진량을 평량하였다. 측정장치는 공장 및 일반 도시에서의 공해측정시 사용되는 장치와 같은 규격으로 漏斗口徑은 $300 \pm 5\text{mm}$ 로 되어 있으며, 漏斗口 상부를 보호하기 위한 금망이 설치되어 있다.

레이저 분진계(LD-1, Laser dust monitor)

원리는 암실중의 부유분진에 빛을 조사할 때 분진의 물리적 성질이 동일조건이면 분진에 의한 광산란양은 질량 농도에 비례하는 원리를 이용한 계측기이다. Digital 분진계와 다른점은 광원에서 반도체 레이저(Laser diode)를 사용하고 있는 것이다.

광산란 방식에 의한 상대농도계는 여과포집법에 비해 단시간에 수많은 data가 얻어지는 등 이점이 있다. 한편 얻어진 상대농도는 특성상 여과포집법에 보정할 필요가 있다.

또한 분진의 농도를 중량농도로 환산하기 위한 호흡성 분진을 측정하는 질량농도계, 분진을 측정하는 질량농도계, 분진을 발생하는 분진공급기, 풍속을 측정하는 풍속계, Fan, 압축기 그리고 분진의 중량을 측정하는 Balance가 있다.

낙진량측정은 한라시멘트 옥계 채광현장에서 실시되었으며, 측정위치는 Fig. 1에 표시된 바와 같이 No. 1 낙진량 측정기는 송전선 하부 G-2 단 옆이고, No. 2 측정기는 작업장 상

부 E-10단에 설치하였다. 그림에서 E,F,G,의 기호는 광산작업의 Bench를 표시한 것이다. 현장에 설치된 Dust fall sampler는 Fig. 2와 같으며 그림에서 wire mesh guard 는 철망으로 된 가대이고 funnel은 누두구경이 $300 \pm 5\text{mm}$ 로 되어 있고, recovered funnel은 누두구내에 받은 빗물이나 분진을 glass funnel은 누두구내에 받은 빗물이나 분진을 glass bottle에 바르게 들어갈수 있도록 한 장치이다.

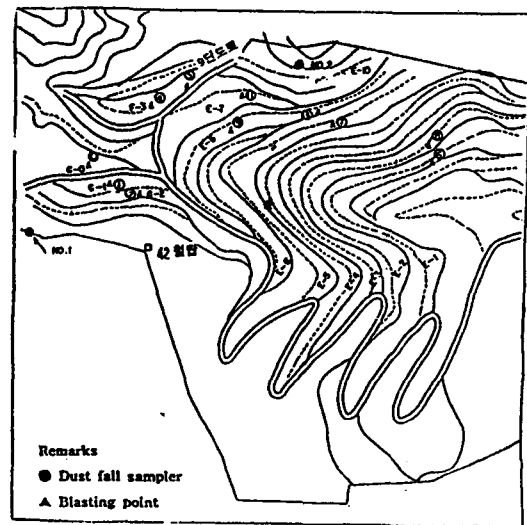


Fig.1. Measuring point of dust fall and blasting point



Fig. 2. Dust fall sampler

천공 및 발파작업장이 수시로 이동되기 때문에 일정한 거리를 유지할 수는 없었다.

발파작업장과 No. 1 측정개소와의 직선거리는 170m~790m 범위였고, No.2 측정개소와의 거리는 100~440m 였다. 낙진량 측정기는 한 장소에 고정 설치하였으므로, 발파작업 장소, 풍속, 풍향, 기온 및 습도 등 여러 가지 요인이 분진침강에 영향을 주었을 것이다.

측정기간은 1997년 11월 4월부터 1998년 1월 6일까지 60일간 측정하였다. 참고로 측정기간중 인접 문곡지점까지 60일간 측정하였다. 참고로 측정기간중 인접 문곡지점의 자동관측 기상자료를 분석해 보면(기상청, 자동관측기상월보) 기온은 영하 섭씨 13도내지 영상 18도의 기온 분포를 보였으며, 풍속은 2.4m/sec 내지 15.7m/sec의 변화폭을 나타냈다. 특히 퇴적분진을 채비산 시킬 수 있는 풍속인 5m/sec 이상인 경우가 60일의 절반인 37일 이었으며, 10m/sec 이상인 경우도 8일로 나타났다. 즉 분진이 한곳에 퇴적되기 매우 어려운 상황이었다고 판단된다.

그러나 한정된 조건하에서 60일 이라는 단기

간의 측정결과임으로 본 측정결과가 절대적인 자료로 활용되기는 어려울지 모르지만 어느정도 현장 낙진량의 규모를 예측하는 데에는 큰 의미가 있다고 판단된다.

측정은 Dust Fall Sampler를 작업장 상부와 송전선 하부 곳에 설치하여 낙하물질을 받게하고, 한편 수거물을 채취하여 평량하기 먼저 빈 filter를 평량했다. 다음 낙진량 수거가 끝나면 용기내에 수거된 분진과 물의 혼합물을 채취하여 filter로 걸러 분진만 걸러낸다.

이렇게 걸러진 분진은 100 °C 항량으로 될 때까지 건조시켜 평량한 후 잔류물을 받기전 filter의 무게를 뺀후의 무게를 계산하였다.

실험적인 방법으로 Fig.3과 같이 Ø25mm 농원파이프로 밑변 1.8m, 높이 2.04m, 길이 100m의 크기로 가설 풍동을 설치하고 fan과 분진공급장치(Dust feeder), 압축기 등을 설치하여 일정량의 분진을 비산시키고 거리별로 낙진량을 수집평량하고 입도분포를 분석하였다. 분진시료는 건조로에서 건조시킨 후 150 mesh의 체로 150 mesh의 분진을 Dust Feeder에 넣고 전원을 연결하여 분진을 공급시킨다. 분진시료의 입도분



Fig. 3. Wind tunnel for dust fall test.

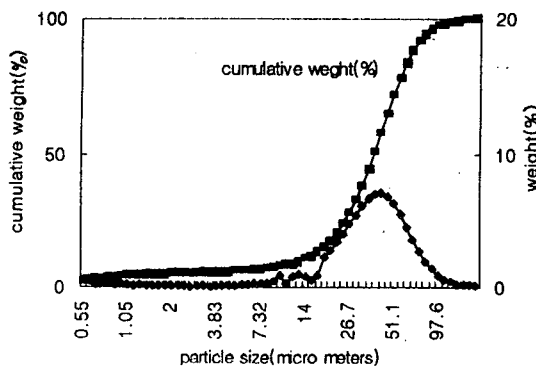


Fig. 4. Particle size distribution of dusts.

Table 1. Measurement results of dust fall at blasting site

Measured point	Distance from blasting point		Frequency of high speed wind		Weight of dust fall	
	Horizontal	Vertical	over 5m/sec	over 10m/sec	Measurement	per ton (mg/cu/ton)
No. 1	170 ~ 800	100	37/60 days	8/60 days	0.26247	6.171×10^{-1}
No. 2	100 ~ 400	150			0.10844	2.548×10^{-1}

또는 Fig. 4와 같으며 평균입도 약 $40\mu\text{m}$ 이었다. DF-5 dust feeder는 분진 공급능력이 목적에 비하여 다소 부족하였으므로 공급능력을 크게 보온하여 사용하였다. 분진발생량은 갱도굴진 작업장에서 측정된 실적을 참고하였다. 분진발생량은 갱도굴진 작업장에서 측정된 실적을 참고하여 200 mg/m^3 내외가 되도록 조정하였다. 갱내 굴진작업장에서 측정된 호흡성 분진농도는 평균 60 mg/m^3 였으며, 총분진중 호흡성 분진의 양은 25%~30%였음을 총분진 농도를 환산하면 200 mg/m^3 내외가 된다. 노천 채광장의 발파 분진농도도 동일하게 추정 200 mg/m^3 내외가 된다. 노천 채광장 발파 분진농도도 동일하게 추정 200 mg/m^3 내외의 분진농도를 조성하여 선풍기로 비산시키면서 25m, 50m, 75m 등 3개 측정점에서 풍속, 농도, 낙진량을 측정하였다.

풍속의 분포가 다양한 갱도내의 평균풍속을 구하기 위하여 갱도의 단면을 9개로 나누고 각 소단면상의 풍속을 측정해서 전체 소단면상의 속도평균을 계산하여 갱도의 평균풍속으로 하였다.

測定結果 및 檢討

현장측정

1997년 11월 4일부터 1998년 1월 6일 까지 2개월간 낙진량 측정기를 2곳에 설치하여 낙진량을 측정하였다. 측정기간중 총 발파횟수는 33회 총 생산량은 602,000톤이었다. 측정결과를 다음과 같다.

No. 1 측정점의 2개월간 수집된 낙진량은 총 0.26247g 이었다. 낙진량 측정기 입구의 직경이 30cm 이므로 g/m^3 , 및 mg/cm^3 단위의 낙진량으로 환산하면 3.715 g/m^3 및 0.3715 mg/cm^3 이 된다. 측정기간중 발파횟수는 총 33회, 총생산량 602,000 ton 이었으므로 생산 톤당 낙진량을 계산하면 $6.171 \times 10^{-7}\text{ mg/cm}^3$ 단위의 낙진량으로 환산하면 3.715 g/m^3 및 0.3715 mg/cm^3 이 된다. 측정기간중 발파횟수는 총 33회, 총생산량 602,000 ton 이었으므로 생산톤당 낙진량을 계산하면 $6.171 \times 10^{-6}/$

m^3/ton 및 $6.171 \times 10^{-7}\text{ mg/cm}^3/\text{ton}$ 이 된다.

No.2 측정점의 낙진량의 평량값은 총 0.10844 이었다. No. 1 측정점과 같은 방법으로 환산하면 1.534 g/m^3 및 0.1534 mg/cm^3 로 환산되며, 석회석 생산톤당으로는 $2.548 \times 10^{-6}\text{ g/m}^3/\text{ton}$ 및 $2.548 \times 10^{-7}\text{ g/cm}^3/\text{ton}$ 내지 $6.171 \times 10^{-7}\text{ g/cm}^3/\text{ton}$ 로 예상할 수 있다. 이상의 측정결과 및 환산값을 요약하면 Table 1과 같다.

따라서 연간 5,500,000톤 규모로 석회석을 채광한다면 천공, 발파로 인한 주변 지표면의 연간 낙진 가능량은 측정기가 놓였던 지표면의 위치에서 재비산 없이 모든 분진이 누적하여 퇴적되더라도 약 $1.4\sim 3.4\text{ mg/cm}^3$ 에 불과할 것이라는 예측이 가능하다.

일본의 측정예를 보면 일반적으로 공장 등의 시설이 그다지 없는 적은 도시에서는 $10\text{ ton/km}^2 \cdot \text{month}$ 이하, 대도시에서는 $10\text{ ton/km}^2 \cdot \text{month} \sim 15\text{ ton/km}^2 \cdot \text{month}$ 그리고 공업도시, 특히 제련소나 광석등의 소성공장, 요업등이 많은 도시 및 그 주변에는 $20\text{ ton/km}^2 \cdot \text{month} \sim 25\text{ ton/km}^2 \cdot \text{month}$ 이다.

위의 자료중 공업도시의 낙진량을 $\text{g/m}^3 \cdot \text{month}$ 단위로 환산해 보면 $20\text{ g/m}^3 \cdot \text{month}$ 에서 $25\text{ g/m}^3 \cdot \text{month}$ 이다. 한라시멘트 현장에서 측정된 값을 위와같은 단위로 환산하면 $0.14\text{ g/m}^3 \cdot \text{month}$ 내지 $0.34\text{ g/m}^3 \cdot \text{month}$ 에 불과하여 일본의 공업도시 주변의 측정값에 비하여도 약 1/70 수준에 불과하다는 사실을 알 수 있다.

단, 본 측정 시험에서는 낙진량이 극미량이었으므로 퇴적분진에 대한 입도분포 분석이 불가능하였다.

인공풍동의 낙진 특성실험

거리별 낙진분진의 입도분포를 규명하기 위하여 인공풍동을 설치하여 별도의 낙진 특성 실험 결과를 Fig. 5~8에 표시하였다.

Graph는 풍속에 따른 "거리와 분진농도와의 관계"를 그린 것이다. 거리가 0m 일때의 분진농도는 분진공급량과 선풍기 풍량을 근거로 계산한 값으로 초기 분진농도이다. 비산거리

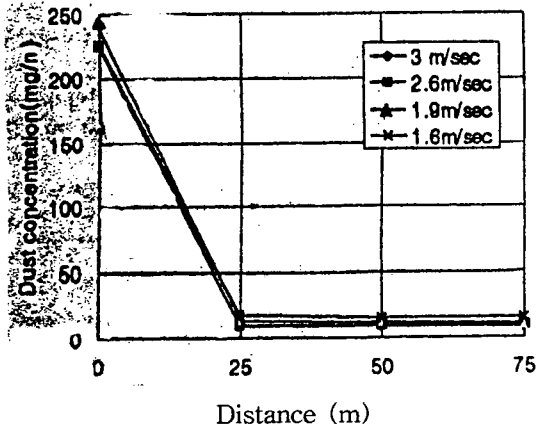


Fig. 5. dust concentration according to distance and air velocity.

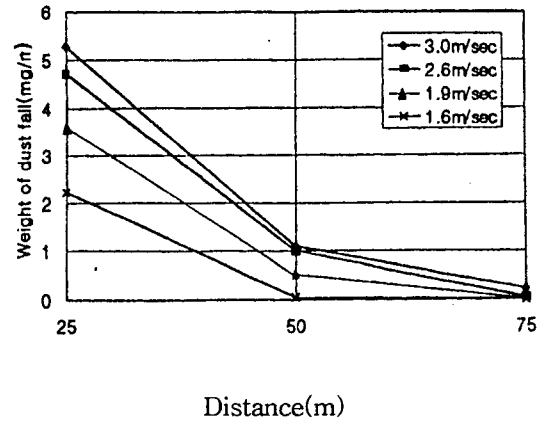


Fig. 8. Weight of dust fall according to distance and air velocity(ranging from 25m to 75m)

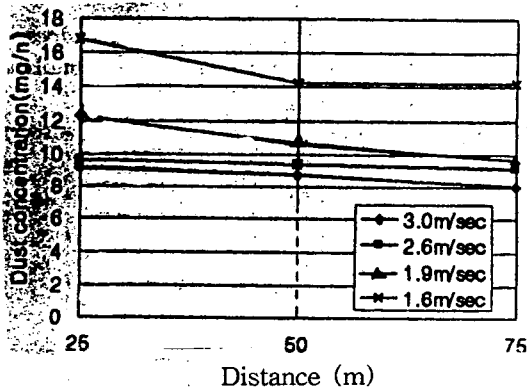


Fig. 6. Dust concentration according to distance and air velocity(ranging from 25m to 75m)

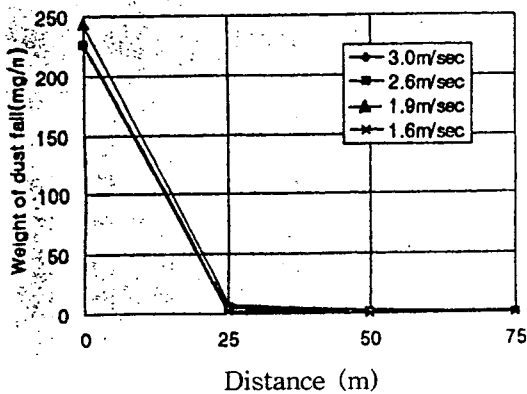


Fig. 7. Weight of dust fall according to distance and air velocity.

25m, 50m, 및 75m에서의 농도는 상대농도계인 LD-1 농도계로 측정된 값임으로 호흡성분진(0.5~7 μm)의 농도이다. 그림에서와 같이 25m 거리에서 석회석 분진농도는 이미 초기 분진농도 226 mg/m^3 의 7%이하에 불과한 9 mg/m^3 내지 16 mg/m^3 에 불과함을 알 수 있다. Fig. 6에서 25m에서 75m의 거리를 상세하게 나타난 것으로 풍속과 분진농도의 관계를 보면 풍속이 증가함에 따라 호흡성분진의 농도는 다소 감소함을 알 수 있다.

Fig. 7은 거리에 따른 풍속과 낙진량과의 관계를 나타내고 있다. 일반적으로 풍속이 빨라질수록 낙진량이 증가하는 경향을 알 수 있다. 풍속 3 m/sec 일 때 분진원에서 25m 떨어진 위치에서의 낙진량 측정결과를 보면 5.2 mg/m^3 으로 초기 분진량의 97.7%가 25m 이내에서 낙하라는 사실이 확인되었다. Fig. 8로부터 25m에서 75m 사이의 풍속과 낙진량 관계는 낙진량은 기본적으로 분진원에서 거리가 멀어질수록 현격하게 감소하고 있으며, 같은 조건하에서는 풍속이 증가할수록 낙진량도 증가한다는 사실을 알 수 있다.

거리 50m에서 보면 평균입도가 풍속 증가함에 따라 작아지지만 25m와 75m에서는 거의 영향을 미치지 않고 분진이 비산되는 것으로 나타났으나 이는 실험풍동의 상부가 개방되지 않고, 패쇄되어 있는 관계로 풍동에 붙어 있는 분진이 건조되어 재비산되는 등의 영

향 일것으로 평균풍속 1.6~3.0m/sec 일 때 거리별로 낙진된 분진의 입도분포 분석결과 평균입도는 25m 거리에서 32-40 μ m, 50m 거리에서 32~35 μ m, 75m 거리에서 25~32 μ m으로 나타났다.

결 론

노천 채광으로 발생하는 석회석분진이 비산하여 낙진하는 경향을 파악하기 위하여 석회석 광산 개발에 따른 천공, 발파분진의 현장 측정 및 실험실적 시험에 의한 석회석분진의 비산 특성은 다음과 같다.

- 1) 낙진량은 기본적으로 분진원으로부터 거리가 멀어질수록 현저하게 감소하며, 같은 조건 일때는 풍속이 빠를수록 낙진량도 증가한다.
- 2) 석회석 노천채광시 발파작업장으로부터 100m 내외의 주변 지표상의 낙진량은 2.548×10^{-7} mg/cm²/ton 내지 6.171×10^{-7} mg/cm²/ton 으로, 예상보다 작은량이며 일본의 공업지역 낙진량의 1/70 수준에 불과하다.
- 3) 평균속도 1.6~3.0m/sec 일 때 거리별 낙진 경향을 보면 발생분진의 97.7%가 25% 이내에서 낙진되며, 비산분진의 입도는 거리가 멀어질수록 작아진다는 사실이 확인되었다. 평균 입도는 25m 거리에서 32~40 μ m 50m 거리에서 32~35 μ m, 75m 거리에서 25~32 μ m으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 이상권, 1993, 분진대책기술, 탄광갱내 작업 환경개선 기술세미나, P. 136~140.
2. 김복윤외, 1991, 분진방지설개발연구, 한국 자원연구소 연구보고서, KR-91-7E-2, P.9-19.

3. 이상권, 김복윤, 1992, 분진억제를 위한 분진입자와 살수수직경에 대한 연구, 한국자원 공학회지 Vol. 29, No. 2, P. 65~69.
4. 이상권의, 1997, 상대농도계 활용을 위한 질량농도 변환계수(K) 결정에 관한 연구, 한국자원공학회지, Vol. 34, No. 1, p. 55-59.
5. 김복윤외, 1993, 자원환경 및 보안기술연구 (II), 한국자원연구소 연구보고서, KR-93-7C-2, p.214~223
6. 田仇昭英, 1978, 粉じん對策, 日本工業技術院 公害資源研究所, p.29
7. 田仇昭英, 1971, 排出における石炭石粉塵の測定要領, 日本石炭石協會誌, P. 32~47.
8. 岩崎孝, 1985, 粉塵じんとその對策入門 測定要領會誌, p. 34-35
9. Burrows, J. et al, 1982, Environmental engineering in South Africa mines, The mine ventilation society of South Africa, p.313-323
10. Organiscak, J.A., 1996, Assessment of airborne dust generated from small truck-mounted rock drill, USBM, p. 1-7.

※ 本稿는 韓國資源工學會誌 '99. 36권에서 轉載된 것임.