터널과 지하공간, 한국암반공학회
Vol. 8, 1998, pp. 194~199

TUNNEL & UNDERGROUND Vol. 8, 1998, pp. 194-199
J. of Korean Society for Rock Mech.

노천광산의 발파분진 비산영역 예측에 관한 연구

김복윤[1] · 이상권[1] · 조영도[2] · 김임호[1]

Study on Simulation of Dust Diffusion at Open Pit Mines

B. Y. Kim, S. K. Lee, Y. D. Jo and I. H. Kim

ABSTRACT This research was aimed to figure out the trend of dust diffusion at open pit limestone mine for assessing the environmental impacts on the high voltage power transmission line. It is rather easy to assess the dust generation and size distribution of limestone dust at the blasting site, but it is very hard to assess the expected area of dust diffusion and amount of dust fall by the distances from the dust source. In this research, a 3-dimensional fluid dynamic simulation software (3D-Flow) was used for analysing the above mentioned matters to assess the impacts to the insulators on the transmission tower by the blasting dust. It was verified that the 3D-Flow is reliable tool for simulating dust movement, and the limestone dust is not much hazardous to the power transmission line.

Key words : CFD, diffusion, dust cloud, size distribution, terminal velocity

초 록 본 연구는 석회석 노천채광장의 발파 분진이 주변을 통과하는 특고압 선로에 어느정도 비산 퇴적할 것인지, 어떤 문제를 일으킬 것인지를 평가하기 위한 연구였다. 발파 현장이 분진 발생량 및 입도분포는 그간의 연구 실적도 있고 계측도 가능하지만 얼마만큼의 분진이 어느 정도 거리까지 비산 퇴적할 것인지를 예측하기란 매우 어려운 일이다. 따라서 본 연구에서는 최근 개발한 바 있는 수치유체역학(CFD)을 이용한 3차원 유체거동 해석 프로그램(3D-Flow)을 이용하여 송전선로에 미치는 영향을 예측하는 시도를 하였다. 지형조건, 기상조건에 따른 시뮬레이션을 통하여 석회석 분진은 송전선로에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단 되었다.

핵심어 : 수치유체역학, 비산, 분진운, 입도분포, 최종속도

1. 서 론

본 연구는 석회석 노천 채광장 주변을 통과하는 고압 송전탑 애자(insulator)에 석회석광산 발파 분진이 퇴적됨으로 발생될 수 있는 영향을 검토할 목적의 일환으로 수행되었다. 발파분진의 발생량과 분진의 입도 등은 쉽게 분석할 수 있으나 최단거리 70 m에 위치하는 송전탑의 애자에 어느 정도 분진이 비산 퇴적할 것인가를 예측하기는 매우 어려운 일이다. 본 연구에서는 수치유체역학을 이용한 유체거동해석 프로그램인 3D-Flow를 적용하여 분진 비산 가능영역의 예측을 시도하였다. 그 결과 3D-Flow의 적용성이 검증되었으며 석회석 발파 분진이 송전탑 애자에 미치는 영향은 우려할 정도가 아님을 확인 할 수 있었다.

2. 분진의 기본 이론

공기를 매체로 하여 그 중에 입자상 물질이 부유하고 있는 상태를 총체적으로 Aerosol(煙霧)이라 하며, 그 종류는 생성과정에 의해 결정되는 경우가 많으나 일반적인 분류 방법은 입자의 형태나 거동에 의해 dust, fume, smoke, fog 등으로 분류한다.

이러한 Aerosol을 넓은 의미에서 총체적으로 분진이라 말하기도 하지만 좁은 의미의 분진은 dust를 말하는 것이며 이 분진이란 어떤 물질이 기계적으로 잘게 분쇄되어 공기나 어떤 가스상 매체에 상당한 시간 부유하는 미립자를 말한다. 일반적으로 광산에서 말하는 분진은

1) 한국자원연구소 책임연구원
2) 한국자원연구소 선임연구원

이 dust를 말하는 것이다. 분진 입도 범위는 0.001~1000 μm 이지만 100 μm 이상의 분진은 발생 즉시 침강하므로 일반적으로 총 분진이라 함은 100 μm 이하의 분진을 말한다. 그 중에서도 인체에 흡입할 때 폐포에 까지 도달 침착하여 진폐증 등의 질병을 야기하는 입도 범위는 0.5~7 μm 이며, 이러한 입도 범위의 분진을 호흡성 분진(respirable dust)이라 하여 관심과 연구의 대상으로 하고 있다. 분진 작업장의 최대허용 분진 농도는 입도와 분진 중의 유리 규산분을 기준으로 나라마다 그 기준이 다르지만 대체로 2~4 mg/m^3 범위이다.

각 분진 개체의 모양은 불규칙한 여러 가지 모양으로 되어 있기 때문에 직경 표시 방법이 통일될 필요가 있다. 현재 입자의 직경 표시법으로는 다음과 같은 방법들이 있다.

- 기하학적 직경(geometric area diameter : d_p), 불규칙한 입자와 같은 투사면적을 갖는 구의 직경으로 표시.
- 스토크 직경[Stoke's (equivalent) diameter] 스토크 직경이란 불규칙한 입자와 같은 밀도 및 같은 침강속도를 갖는 구의 직경으로 표시.
- 공기역학적 직경(aerodynamic diameter) 공기역학적 직경이란 불규칙한 입자와 같은 침강속도를 갖는 단위밀도 (1 g/cm^3)의 구의 직경으로 표시.

공기와 같은 유체안에서 자유 낙하하는 입자는 곧 일정한 속도, 즉 최종 침강속도(terminal settling velocity-Stoke's Law)에 도달한다. 그리고 유체의 저항이 있다면 그 힘은 입자의 중력과 동일할 것이다.

하부로 작용하는 중력의 힘(G)은

$$G = \frac{1}{6}\pi d^3(w_s - w_a)g \quad (1)$$

단, d ; 입자의 기하학적 직경(m)
w_s ; 입자의 밀도(kg/m^3)
w_a ; 공기의 밀도(kg/m^3)
g ; 중력가속도(m/s^2)

낙하를 방해하는 공기의 저항(F)은

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

단, v ; 입자의 속도(m/s)
η ; 유체의 점도(kg/m.s)

따라서 낙하하려는 입자의 중력의 힘과 유체의 저항이 같다면 입자의 낙하속도는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$3\pi\, d\eta v = \frac{1}{6}\pi d^3(w_s - w_a)g \quad (3)$$

$$v = \frac{\pi d^3(w_s - w_a)g}{6 \times 3\pi\, d\eta} \cdot \frac{m^3.kg.m.m.s}{m^3.s^2.m.kg}$$

$$= \frac{d^3 g}{18\eta}(w_s - w_a)\ m/s \quad (4)$$

위와같은 법칙을 Stoke의 법칙이라 한다.

이 법칙은 어떤 입자크기 이하에서는 그 속도가 난류를 일으키고 그 크기 이상에서는 유체 분자의 평균 자유속도와 같이 움직이는 그러한 크기의 입자에 적용된다. 유체속에 떠 있는 입자들은 계속하여 유체의 분자들과 충돌을 한다. 이때 입자들이 아주 작으면 작을수록 불규칙하게 떠다니게 된다. 이러한 현상을 브라운 운동(Brown motion)이라 한다.

분진 농도는 단위 공기 체적당 분진의 중량으로 표시하는 질량농도(mg/m^3)와 분진입자수로 표시하는 개수농도(particles/cm^3) 등 두 가지 방법이 있으나 진폐 이환이 분진의 질량과 비례관계가 있음으로 질량농도가 많이 사용되고 있다.

한편 본 연구의 대상인 고압 송전탑 애자의 경우는 애자 표면의 최대 허용 분진 퇴적량이 100 mg/cm^2 이라는 시험결과[35]가 제시된 상태임으로 광산의 발파 분진이 여러 가지 자연조건에서 이 허용 농도 이상 퇴적될 수 있을 것인가를 평가할 필요가 있었다.

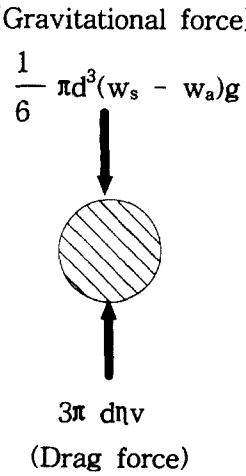

Fig. 1. Aerodynamic drag and gravitational force acting on a free falling sphere in air.

3. 노천광산의 분진비산

광산 작업 특히 석회석광산과 같은 노천 채광을 하는 광산에서는 분진 비산이 중요한 환경오염원이 되고 있다. 주요 분진 발생원은 발파작업이며 그 외에도 분진 발생 작업으로는 적재작업(loading), 트럭운반(trucking), 천공작업(drilling), 적환작업(transfer), 사별작업(screening), 파쇄작업(crushing) 등이 있으나 발파작업에 비하면 미소하다.

발파작업은 광산 작업 중 가장 많은 분진을 발생시킨다. 특히 견고한 암반일수록 분진 발생량이 많아지는 경향이 있다. 발파 분진의 발생량은 발파설계, 화약의 종류와 양, 충진재의 종류 등에 의해 달라진다.

국내 광산에서 실측한 결과에 의하면 발파 직후 최악의 경우 410 mg/m^3 (호흡성분진 123 mg/m^3)의 농도를 나타 내고 있음이 확인된 바가 있다.[2] 그러나 발파후 일정시간 후 구름 모양의 분진운이 형성되는데 이 분진운의 분진농도는 그 이하가 될 것이며, 이 분진운은 기류를 타고 이동하면서 입자 크기에 따라 중력에 의한 낙진이 일어나게 된다.

본 연구에서의 분진농도는 밀폐된 갱내 발파작업장에서 측정된 값인 230 mg/m^{3}을 이용하였다.[2] 입도분포 분석 결과 입경의 범위는 중위 입도 25.65 μm, 부유분진 영역인 100 μm 이하는 42.9%, 10 μm 이하는 2.6%에 불과하였다.[9]

이 분진의 대부분은 가까운 거리에서 모두 낙진되며 극히 일부 미세 입자만이 풍속에 따라 100 m 이상까지 비산되는 경우가 있다. 그리고 0.5 μm 이하의 입자들은 중력의 영향에서 벗어나 브라운 운동을 하면서 계속 공기 중에 확산된다. 따라서 발파 분진은 그 총량이 중요한 것이 아니라 미세 입자의 양이 얼마나 포함되는가가 중요하다.

4. 분진 비산 경향성 연구

광산 현장의 분진 비산현상을 정확히 파악하고 예측하기란 매우 어려운 일이다. 그 이유는 분진의 발생에서부터 비산, 낙진에 이르기까지 영향 요소가 너무나 다양하기 때문이다. 단시간의 현장 측정만으로는 계절적 기상상태의 변화에 따른 요소를 모두 수용할 수 없으며, 실험실적 시험 역시 다양한 현장 환경 요소를 다 감안할 수 없기 때문이다.

따라서 현장 시험을 수치유체역학(Computational Fluid Dynamics : CFD)을 이용한 해석기법을 이용하여 simulation 하는 방법을 시도하였다. 현재 비교적 많이 사용되어 좋은 성과를 보고있는 2 방정식 모델은 유속의 散亂 성분에 기인하는 레이놀즈 응력을 2개의 변동 특성량에 대하여 미분 방정식을 풀어 구하는 것으로 Launder와 Spalding에 의해 제안된 것이다. 산란에너지 k와 그 산란율 ε을 이용하여 레이놀즈 응력을 평가하는 소위 k-ε 모델이 가장 많이 이용되고 있다. 본 연구에서도 k-ε 모델을 이용하여 개발한 CFD 프로그램인 3D-Flow[7]를 사용하였다.

4.1 3D-Flow의 적용성 검증

석회석 분진에 대한 입도별, 풍속에 따른 비산특성

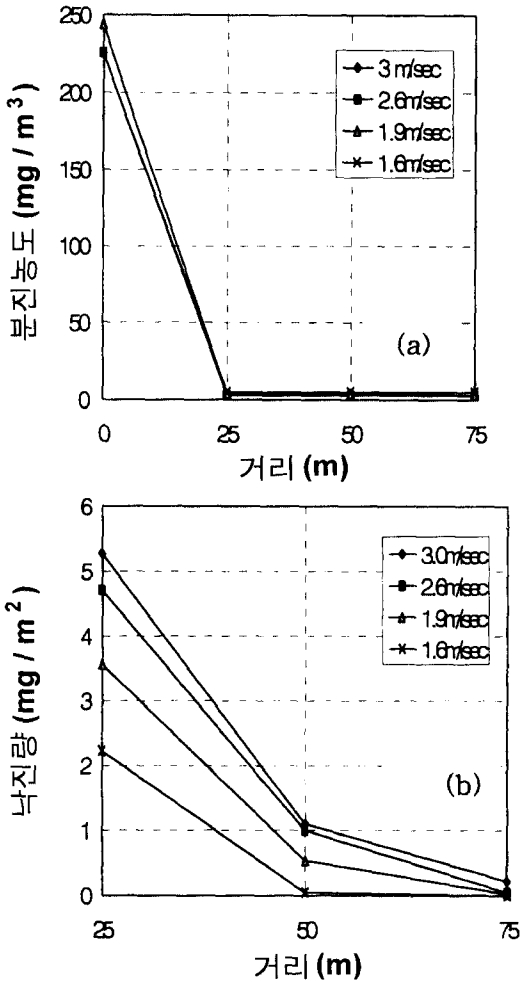

Fig. 2. Test result of dust diffusion in a wind tunnel.

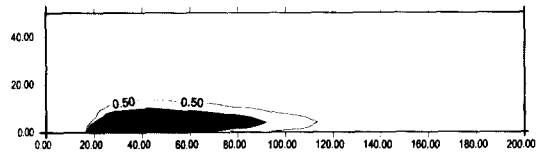

Fig. 3. Simulation result of dust diffusion in a wind tunnel by 3D-Flow.

경향을 확인하기 위하여 가로 1.8 m, 높이 2.0 m, 길이 100 m의 가설 풍동을 만들어 그 속에서 현장에서 채취한 석회석분진을 직접 비산시키면서 거리별 낙진량을 수집 분석하는 연구를 시행한 결과('98, 김복윤)를 기준으로 3D-Flow 프로그램에 의한 simulation을 실시한 바 풍동에서 실제로 실시한 비산 실험결과(Fig. 2)와 일치함을 확인할 수 있었다(Fig. 3 참조). 즉, 25 m 이내에서 약 97% 정도의 분진이 낙진되며 70~80 m 거리에서의 분진 농도는 발생 당시의 분진 농도에 비하여 0.5% 이하로 희석됨을 확인할 수 있었다. 시험분진의 입도는 앞에 언급된 바와 같이 중위 입도 25.65 μm, 부유분진 영역인 100 μm 이하는 42.9%, 10 μm 이하는 2.6% 인 분진이 사용되었다.

Fig. 2의 (b)는 25 m 이후의 풍속별 낙진량이 구별될 수 있도록 확대한 그림이다.

4.2 계산 모델 및 simulation 결과

3D-Flow를 실제 응용하기 위하여 현장 지형도와 송전탑 위치를 감안하여 송전탑과 가장 접근된 채광장을 가정하여 풍속과, 송전탑과의 거리를 다음과 같이 변화시키면서 발파분진의 확산 경향을 Simulation 하였다.

- 분진 발생원과 송전탑과의 거리 ; 75 m, 100 m, 150 m 등 세가지 경우
- 분진 발생원과 송전탑이 설치된 위치의 높이 차 ; 25 m, 50 m, 75 m
- 분진 발생원의 면적 ; 가로 20 m×세로 10 m
- 풍속 ; 1, 3, 5, 10 m/sec 등 네가지 경우
- 온도 ; 섭시 20°

계산은 x 방향 40 쎌, y 방향 10 쎌, z 방향 20 쎌로 설정하고 위에 언급된 조건을 입력한 후 각종 parameter를 입력하여 6,000 step의 반복계산을 거쳐 결과를 얻었다. Fig. 4는 simulation 결과 중 송전탑이 설치된 산 정상으로부터 75 m 떨어진 곳에서 발파 할 때의 분진 비산영역 해석 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 분진은 대부분 분진 발생원 부근에서 모두 침강하며 극히 일부가 풍속에 따라 상당한 거리까지 이동됨을 알 수 있다.

산 정상 부근에서 분진확산 높이는 20 여 m 이하에 불과하고 농도는 분진 원에서의 농도에 비해 0.5% 이하까지 희석됨을 알 수 있다. 이러한 농도를 실제 발생원의 분진 농도 230 mg/m^{3}를 기준으로 환산하면 1.15 mg/m^3 (0.000115 mg/cm^2) 이하가 된다. 따라서, 송전탑에서 가장 가까운 채광장을 발파할 때에도 실제로 송

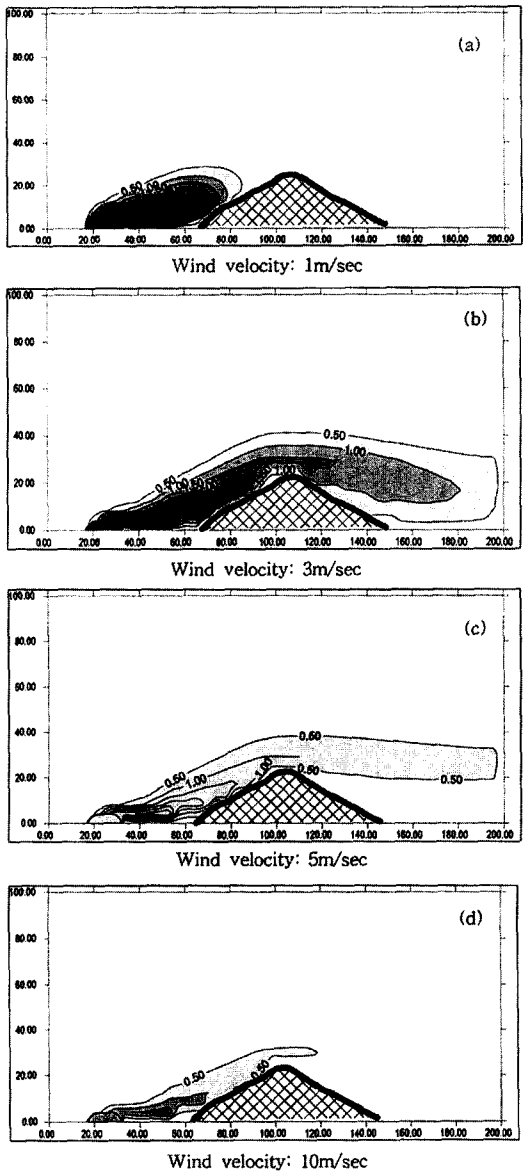

Fig. 4. Simulation of dust diffusion on blasting site (75 m from tower).

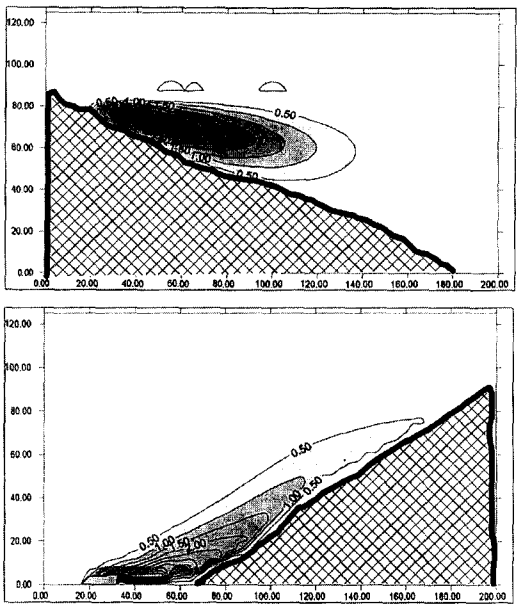

Fig. 5. Dust diffusion pattern according to slope angle (wind velocity ; 3 m/sec).

전탑의 애자에 분진이 접근할 가능성은 없을 것이라는 예측이 가능하다.

또한 사면의 경사 방향에 따른 분진 비산 경향을 분석한 결과는 Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 하향 경사일 때는 상향 경사일 때와 비교할 때 상대적으로 비산 거리는 다소 짧아지는 경향이 있으나 분진의 농도가 높고 확산범위가 넓어지는 경향이 있음을 알 수 있다.

이러한 해석 결과를 볼 때 분진 비산의 피해 우려가 있는 시설은 분진원보다 고지에 설치하는 것이 분진원보다 저지에 설치하는 것 보다 유리함을 알 수 있으며 지형, 풍속, 풍향, 장애물 등 여러 가지 요소에 의해 비산 상태가 달라짐으로 필요할 때마다 정확한 해석으로 피해여부를 판단하여야 할 것이다.

5. 결 론

1) 3차원 유체거동 해석 프로그램(3D-Flow)은 부유분진의 거동예측에 이용 가능함을 확인할 수 있었다.

2) 풍속, 거리, 지형 등을 감안한 분진비산 simulation을 실시한 결과 분진의 비산 양상은 풍속 뿐 아니라 지형의 조건에 의해 크게 좌우되며, 최장 사거리 140 m 까지 0.5% 농도 곡선이 나타나지만 지표면으로부터의 높이는 20 m를 넘지 않는다. 송전탑 애자의 높이가 지상으로부터 최하 30 m 이상임을 감안 할 때, 애자에 발파 분진이 퇴적될 가능성은 희박한 것으로 판단되었다.

3) 일반적으로 풍속이 느리면 분진농도는 높으면서 이동거리는 짧고, 반대로 풍속이 빠르면 농도는 급속히 희석되는 반면 이동거리는 다소 멀어지며, 시설물이 분진원 보다 높은 위치에 있을 경우가 분진원 보다 낮은 위치에 있는 경우보다 피해 가능성이 낮을 것으로 판단되었다.

4) 분진원에서 약 70 m 되는 지점까지 비산하는 분진은 중량비로 총 분진의 0.5% 이내임으로 송전선으로부터 70 m 떨어진 인접 장소에서 채광 발파를 하여 애자에 분진이 퇴적되더라도 연간 생산량 5,500,000톤인 경우 낙진량은 0.04 mg/cm^{2}에 불과할 것으로 예측되어 애자 제작사(NGK)가 제시한 최대 허용 퇴적량[35] 100 mg/cm^{2}에는 훨씬 못 미칠 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 우재억 외, 1984, 천공시 압력변화에 따른 미세분 발생량에 관한 연구, 대한광산학회지, Vol. 21.
2. 김복윤 외, 1991, 분진방지시설 개발연구, 한국자원연구소 보고서, KR-91-7E-2, p. 9-19.
3. 이상권, 김복윤, 1992, 粉塵抑制를 위한 粉塵粒子와 撒水 水滴徑에 대한 硏究, 資源工學會誌 29-2.
4. 이상권, 1992, 石材産業의 災害 및 公害防止를 위한 基礎調査 硏究, 資源工學會誌 29-2.
5. 이상권, 1993, 분진대책기술, 탄광갱내 작업환경개선 기술 세미나, p. 136-140.
6. 이상권 외, 1997, 상대농도계 활용을 위한 질량농도 변환계수(K) 결정에 관한 연구, 한국자원공학회지, 제 34권 제 1호, P. 55059.
7. 김복윤, 1997, 지하 작업장내 3차원 기류 거동 예측 기술 연구, 한국암반공학회지, Vol. 6, No. 3.
8. 기상청, 1993-1997, 자동관측 기상 월보.
9. 김복윤 외, 1998, 석회석광산 개발이 주변 송전선로에 미치는 영향조사 용역보고서, 한국전력공사 765kV 건설처.
10. Petkof, B. Atchison, T.C. and Duvall, W.I., 1961, Photographic Observation of Quarry Blasting, USBM RI 5849.
11. P. J. Bryant, 1962,"Cohesion of Clean Surfaces and the Effect of Adsorbed Gases", Trans. Ninth National Vacuum Symp. Pergamon press, London, P 311-313.
12. Lundborg, N. *et al*, 1975, Keeping the lid on Flyrock in Open-pit Blasting, E/MJ.
13. Roth, J., 1979, A Model for the Determination of Flyrock range as a Function of Shot Condition, USBM, Open File Report.
14. B. R. Lawn and D. B. Marshall, 1979, "Hardnees,

Toughness, and Brittleness : An Indentation Analysis", *J. Am. Ceram. Soc*, **62**(7-8) P 347-350.
15. Burkle, W.C., 1980, Geology and Its Effects on Blasting, Society of Explosive Engineers, April.
16. J. Burrows, 1982, Environmental Engineering in South African Mines, The Mine Ventilation society of South Africa.
17. Johm A. Breslin, 1982, IMPROVING DUST CONTROL TECHNOLOGY FOR U.S. MINES, USBM.
18. A. Bradwell, 1984, DEVELOPMENT IN GLASS-FIBER BRIDGE AND TUNNEL INSULATORS FOR MINIMUM CLEARANCES ON BRITISH RAILWAYS, IEE Proceedings, Vol. 131.
19. Chieppetta, R.F., 1985, The Use of High Speed Picture Photography in Blast Evaluation and Design, J. Soc. Explo. Eng.
20. Ryu, C.H. & Pariseau, W.G., 1986, Numerical Simulation of Fragmentation During the Throw Stage of Blasting, Proc. 2nd Symp. on Explosives and Blasting Research, Society of Expl. Eng., Atlanta, Georgia.
21. Matsuura, 1986, RESEARCH ON SUPPRESSIVE METHOD FOR COAL DUST EXPLOSION, NIRE, Japan.
22. Bureau of Mines, 1987, DUST CONTROL HANDBOOK FOR MINERALS PROCESSING.
23. I. J. McCOLM, 1990, Ceramic Hardness, Plenum Press, New York, P 189.
24. J.A. Organiscak, 1996, ASSESSMENT OF AIRBORNE DUST GENERATED FROM SMALL TRUCK-MOUNTED ROCK DRILLS, USBM.
25. 田仇昭英, 1971, 排出口における石灰石粉塵の測定要領, 日本 石灰石協會誌.
26. 前田, 1971, 日鐵鑛業津久見鑛山における粉塵防止について.
27. 渡辺, 1975, 破碎選鑛プラントの粉塵防止對策.
28. 中津 외, 1976, クロ-ラドリルの粉塵防止.
29. 田仇昭英, 1977, 作業環境粉塵測定マニュアル, 鑛業勞動災害防止協會.
30. 田仇昭英, 1982, 鑛業における浮游粉塵の測定要領とその評價, 鑛業勞動災害防止協會.
31. 岩崎, 1985, 粉塵とその 對策入門, 日本 石灰石協會誌(1).
32. 岩崎 외, 1986, 發破粉塵における汚染範圍の特定に關する基礎研究, 骨材資料 Vol. 68.
33. 西山, 1987, ミストプロ-穿孔による粉塵抑制について.
34. 横山長之, 1992, 大氣環境 シミュレ-ション, 白亞書房.
35. 日本電力中央研究所, 1966, 500kV送電に관する研究報告(2), 山側500kV 送電.
36. 日本通商産業省, 1986, 鑛山における粉塵濃度測定マニュアル, 鑛業勞動災害防止協會.
37. NGK Insulators, LTD, 1997, SUSPENSION INSULATORS, company brochure.
38. 日本石灰石鑛業協會, 1997, 石灰石の話, 協會案內冊子.