총설

국내 석회석 광산의 지속적 개발을 위한 적정 통기기술 제안

이창우^{1*}¹동아대학교 에너지·자원공학과 교수

Proposing Appropriate Mine Ventilation Methods for Sustainable Limestone Mine Development in Korea

Changwoo Lee*

¹Professor, Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Dong-A University

*Corresponding Author. Changwoo Lee, cwlee@dau.ac.kr, Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Dong-A University, Busan, Korea

Received

4 April 2021

Final version Received

23 April 2021

Accepted

27 April 2021

Abstract

Recently, most open-pit limestone mines went underground due to the depletion of easily accessible reserves, and strict environmental regulations. Moreover as the mines moved to deeper levels and heavy diesel equipments were deployed, the working site environment seriously deteriorated. Furthermore, heavy diesel equipment intensively deployed underground has increased fire risk. Existing studies indicate excessively high NO_x and DPM concentrations at some sites and axial fans commonly used for coal and metal mines are widely used for auxiliary ventilation in the working area despite their low efficiency in large-opening mines. These problems of the local limestone industry necessitate the development of ventilation methods appropriate to the industry for sustainable development. This paper aimed to propose appropriate ventilation techniques with low-cost and high-efficiency ventilation equipment such as propeller fan. It shows the auxiliary ventilation system consisting of a blowing propeller fan and an exhaust ventilation raise can be applied efficiently for auxiliary ventilation in the long blind entries.

Key words : Limestone mine, Auxiliary ventilation, Propeller fan, Appropriate ventilation technique

요약

최근 국내 노천 석회석 광산은 천부자원의 고갈과 엄격해진 환경규제로 인하여 갱내개발로 전환하고 있다. 광산개발의 심부화 그리고 많은 대형 디젤장비의 사용으로 인하여 갱내 작업환경은 심각한 수준에 도달하였으며 디젤장비의 집중사용으로 인하여 화재 리스크 또한 급격히 증가하였다. 기존의 연구에 따르면 독성이 강한 NO_x와 디젤 매연(DPM)이 일부 허용농도를 초과하거나 높은 농도를 보이기도 한다. 한편, 석탄 및 금속광산 등에서 주로 사용되는 국부통기팬이 대단면 갱도에서 낮은 통기효율을 보임에도 불구하고 석회석 광산 통기용으로 광범위하게 사용되고 있다. 이들 제반 문제들로 인하여 국내 석회석 광산의 지속적 개발을 위하여 적합한 적정 통기기술의 개발이 시급하게 필요하다. 본 논문에서는 프로펠러 팬과 같은 대단면 갱도 통기용 저비용 고효율 통기설비를 이용한 적정 통기방법을 제안하였다. 분석결과 1대의 급기식 프로펠러 팬과 배기용 통기승으로 구성된 통기시스템은 비교적 긴 맹갱도 형태의 작업공간의 국부통기방식으로 적절하게 적용될 수 있음을 보였다.

주요어 : 석회석 광산, 국부통기, 프로펠러 팬, 적정 통기기술

서론

현재 국내에는 2019년 기준 약 320개의 가행광산이 있으며 이중 활발한 가행광산의 대부분은 비금속, 특히 석회석 광산이다(KIGAM, 2019). 연간 1억 톤 정도를 생산하는 국내 석회석 광산은 최근 천부 고품위 석회석 자원의 고갈뿐만 아니라 환경규제에 따라 급속히 지하 개발로 전환 중이다. 또한 석회석 광체의 경사가 심하여 대단면 갱도 굴진에 따른 갱도의 안전성에 관한 우려가 많이 제기되고는 있으나 기존 폭 10 m, 높이 6 m 이상 크기의 사각형 갱도의 유지 관리에 심각한 문제가 발생한 사례가 거의 없었다. 이와 같은 상황에 따라 타 광물에 비교하여 상대적으로 저가의 석회석 자원의 생산량 증가가 곧 광산개발의 경제성 확보이므로 심부화 속도가 빠르게 진행되어 왔다. 국내 석회석 광산 중 가장 심부화된 J광산의 경우에는 현재 갱구로부터 257 m 하부 14편 굴진이 진행되고 있으며 연간 40 m 이상의 심부화 속도를 보이는 대형 광산도 어렵지 않게 찾아볼 수 있다. 이와 같이 빠르게 심부화되고 있는 국내 석회석 광산의 지속적 개발을 위하여서는 열악해 지고 있는 작업환경 및 재해발생 리스크의 관리가 반드시 필요하다.

광산 개발은 다양한 단위작업(일반적으로 천공, 발파, 적재, 운반과 같은 굴진작업)이 단계적으로 진행되나 작업개소가 복수인 경우에는 광산 여러 지점에서 각종 작업이 동시에 진행된다. 따라서 발생하는 가스 및 입자상 유해물질의 발생원은 점 또는 선 오염원(point or line source)의 형태를 가지며 광산 종류에 따라 큰 차이를 보인다. 석탄광산의 경우에는 메탄가스와 같은 가연성 가스가 층가스(strata gas) 형태로 발생하며 동시에 대부분의 갱도 전체가 가연성 물질인 석탄으로 구성되어 있어 굴진 및 채탄지점에서 점 오염원으로 발생하는 유해물질과 광산 갱도 전체에서 발생 가능한 선 오염원을 대상으로 하여 유해물질 및 작업환경 제어를 위한 통기를 하게 된다. 이에 따라 갱내 유해물질 농

도 규제 또한 작업자의 노출농도 뿐만 아니라 층가스의 배출로 인한 광산 갱내 전체공간의 화재 및 폭발 리스크를 고려하여 모든 입기 및 배기갱도내의 가연성 가스 농도를 대상으로 하고 있다. 그러나 비금속광산 특히 석회석 광산의 경우에는 유해 층가스의 발생이 없으므로 굴진작업이 진행되는 제한된 작업공간내에서 장비의 가동 및 발파 등에 의하여 발생하는 유해물질의 제어가 작업환경 관리를 위한 통기의 목적이 된다. 일부에서는 운반갱도내를 빈번하게 운행하는 디젤장비에 의한 선 오염원을 통기 대상으로 고려하기도 하지만 실제로는 장비 운전자와 같은 극히 제한된 작업자를 제외하고는 노출 리스크가 우려할 만한 수준에 도달하지 않는다.

유해 층가스가 발생하고 동시에 선 오염원의 영향이 상당할 경우에는 석탄광산에서와 같이 광산 전체 갱도를 통기하는 광산 전체통기시스템(total mine ventilation system)이 반드시 필요하다. 그러나 국내 석회석 광산에서와 같이 대형 화재/폭발과 같은 재해 발생리스크가 거의 없고 작업자의 노출 리스크가 굴진현장 부근 제한적 공간에만 존재하는 경우에는 광산 전체통기시스템의 적용은 지나치게 고비용 통기시스템이 될 수밖에 없다. 국내 통계자료는 전무하나 외국의 대형 광산에서는 통기시스템 운전 전력비용이 광산전체 전력비용의 25~50%에 달한다(Costa and Silva, 2020). 이에 따라 최근 많은 광산회사는 저비용 스마트 통기기술의 개발에 노력을 경주하고 있다.

본 논문에서는 국내 석회석 광산의 특성을 분석하여 저비용 고효율 적정 통기기술을 제안함을 목적으로 한다.

국내 석회석 광산 갱내 통기와 작업환경

갱내 국부통기 현황 및 문제점

Fig. 1은 국내 석회석 광산의 전형적인 형태를 보여주는 D광산의 통기망(ventilation network)이다. 짧게는 수백 m

Fig. 1. Typical ventilation network at D limestone mine.

Fig. 2. Blind entry development site at K limestone mine.

(a) Blowing ventilation

(b) Exhaust ventilation

Fig. 3. Short circuiting observed in the auxiliary ventilation with fan and tubings.

또는 길게는 수 km 길이의 각 편(level)은 광체의 두께에 따라 1개 또는 2개 이상의 병렬 갱도로 주방(room and pillar) 식으로 굴진된다. 통기용 수갱이 굴착된 D광산은 수갱에 설치된 배기팬(exhaust fan)을 이용하여 수갱 상부에 위치한 갱도의 통기가 이루어지나 대부분의 채굴 작업장이 맹갱도(blind entry) 형태이므로 맹갱도 길이의 증가에 따라 통기팬과 풍관에 의한 급기통기(blowing ventilation)에 의한 작업환경 제어가 어려워지고 있다(Nguyen and Lee, 2019).

Fig. 2에서 보는 바와 같이 심부화에 따른 하부편을 굴진

하는 경우, 램프웨이 하부공간 전체가 맹갱도 형태이므로 상부편과 통기승(ventilation raise)등으로 연결이 되지 않는 경우에는 급기식 통기방식의 국부통기를 하더라도 Fig. 3에서 보는 바와 같이 통기설비용량 부족이나 국부통기시스템의 위치 결정상의 문제로 인하여 발생하는 기류의 재순환(recycling)때문에 하부편 통기가 거의 불가능해지는 경우가 빈번히 발생한다. 일반적으로 Fig. 2의 하부편과 같은 맹갱도 형태의 작업공간 국부통기는 램프웨이 진입부에 팬을 설치하고 풍관을 연결하여 공간내로 급기하나 공간크기가 증가할 경우 급기된 기류가 작업장까지 도달하지 못하고 중간에서 역류한 후 재순환되는 단락현상(short circuiting)(Fig. 3)이 발생되어 통기효율이 극히 낮아지는 문제가 발생한다.

갱내 작업환경

1979년 조사자료(Thimons *et al.*, 1979)에 의하면 미국의 석회석 광산 배기갱도내 메탄가스 농도가 평균 87 ppm으로 보고된 적도 있으나 메탄가스의 배출원인에 관한 언급이 없으며 그 이외의 자료에서는 갱내 메탄가스 관찰 예를 찾아보기 어렵다. 전 세계적으로 석탄광산에서 석회석 암분을 갱도내 살포하여 탄진 폭발(coal dust explosion)을 예방하고 있으므로 석회석 광산 갱내 가연성 가스 또는 분진에 의한 폭발 가능성은 거의 없다고 판단된다. 따라서 층가스의 배출이 거의 없는 석회석 광산 작업공간내 유해물질은 부유 먼지, 디젤장비 배출 매연과 같은 입자상물질과 CO, NO, NO₂와 같은 가스상 물질로 구성되어 진다.

전술한 바와 같이 유해물질(인체유해 및 가연성 물질)이 갱내 전체에서 발생할 리스크가 높은 석탄광산과 금속광산이 광산전체 통기방식을 적용하고 있는 반면, 이들 물질의 발생지점이 제한적인 석회석광산의 경우 맹갱도 형태의 작업장 통기는 국부팬과 풍관을 이용한 급기식 국부통기(blowing auxiliary ventilation) 방법을 일반적으로 적용하고 있다. 그러나 1일 1회 회파에 의한 굴진이 진행될 경우, 1주일 간의 작업을 통한 굴진장 연장이 약 20 m에 달하게 되어 풍관의 신속한 연장이 현실적으로 어려우며 갱도 길이

연장에 따라서 작업공간을 빠져나간 유해물질의 재순환이 심각하여지므로 작업환경 제어가 효율적으로 이루어지지 않는다.

국내 광산안전기술기준(MOTIE, 2019)에서는 작업공간 내 가스 및 입자상 물질의 농도는 “작업시간 8시간 동안의 평균농도를 기준”으로 하고 있으나 평균농도가 작업자의 노출농도를 기준으로 하는지 작업공간내 고정점 측정에 의한 농도인지를 구체적으로 명시하고 있지 않다. 작업자의 노출농도로 규정할 경우에는 유해물질의 측정은 작업자 호흡기 부근에 설치된 계측기를 통하여 이루어져야 하므로 먼지와 같은 입자상 물질의 경우, 전세계적으로 일반적으로 사용되고 있는 먼지측정기(personal dust sampler)를 이용하여 측정하나 가스상 물질의 경우에는 아직까지 이와 같은 측정기가 사용되고 있는 사례가 거의 없으므로 고정점 측정을 통한 “8시간 동안의 평균농도”를 간접 추정하는 방법을 적용하고 있다.

Fig. 4와 5는 D광산 굴진 작업공간내 천공 및 적재작업시 고정점 측정한 CO 및 NOx 농도분포이다. 천공시의 CO, NO, NO₂ 평균농도는 각각 24.5, 3.9, 2.3 ppm이며 작업공간내 장비가 상대적으로 많이 사용되는 적재시의 평균농도는 40.7, 8.6, 5.1 ppm이다. 이 수치는 작업이 진행되는 2~3

시간 동안의 측정결과이므로 8시간 평균 노출농도는 측정값보다 상당히 낮을 것으로 판단되나 이들 가스의 국내기준이 각각 30, 25, 3 ppm임을 감안할 때 NO₂의 측정농도값이 허용기준을 초과함을 알 수 있다. NO₂는 갱내가스 중 독성이 가장 강한 가스로 알려져 있어 이와 같은 측정결과에 비추어 갱내통기의 필요성이 더욱 강조된다(Kim *et al.*, 2012a, 2012b).

일부 천공장비가 전기장비로 대체된 경우도 있으나 현재 갱내에서 사용되는 대부분의 장비는 디젤장비이다. 발파 후가스를 제외하고 갱내에서 측정되는 유해가스는 모두 디젤장비 배출가스이며 디젤장비 배출물질 중 매연(DPM)은 이미 1999년에 미국 EPA에서 발암물질로 규정할 정도로 심각한 유해물질이다. 이에 따라 미국, 캐나다, 호주 등과 같은 국가에서는 DPM 허용농도를 규정하고 있다. 2006년 1월 발효된 미국 MSHA 기준에서는 DPM을 TC(total carbon)로 정의하였으며 TC는 EC(Elemental carbon, 기본탄소)와 OC(Organic carbon, 유기탄소, 탄화수소 종류)를 포함하나 무기질 ash나 황화물은 제외한다. 규제농도는 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며 샘플링 및 분석은 NIOSH 5040 방법을 따르고 있다. 국내 석회석 광산 갱내 DPM을 NIOSH 5040 방법에 따라 측정·분석한 유일한 자료(Lee, 2015)는 Fig. 6과 같다.

(a) During drilling

(b) During loading

Fig. 4. CO concentration profiles by operation.

(a) During drilling

(b) During loading

Fig. 5. NOx concentration profiles by operation.

Fig. 6. DPM concentration in a limestone mine.

천공과 적재작업이 동시에 이루어지는 작업공간내에서 측정한 DPM농도는 $197\sim567\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위로 미국 MSHA 기준을 상회하고 있음을 알 수 있다.

앞서 기술한 바와 같이 국내 대부분의 석회석광산은 광산설계시 작업장 통기를 체계적으로 고려하지 않은 상태에서 개발되었다. 이에 따라 모든 광산현장의 땀샘도 형태 작업공간은 국부판과 풍관에 의한 통기에만 의존하고 있어 작업현장의 환경문제에 대한 해결방안의 시급한 제시 없이는 향후 지속적 개발에 심각한 부정적 요인이 될 전망이다.

갱내 화재 리스크

갱내작업장의 급속한 심부화와 이에 따른 장비의 대형화, 투입량의 증대 등으로 인하여 장비, 특히 디젤장비의 화재발생 리스크가 증가하고 있다. 국내의 경우 이에 대한 제도적 및 시설측면의 방재대책이 전혀 수립되지 않은 상황에서 화재발생시 막대한 인적 및 물질 피해가 예상된다. 대규모 갱내화재는 광산의 장기적 휴·폐광 상황까지 유발할 수 있는 대형 재해이다. 화재원에서 발생한 화재연은 제어가 안될 경우 유독가스를 포함한 고온의 열기류의 확산과 작업원의 가시거리를 급격히 저하시켜 화재초기의 대피를 어렵게 하여 대형 인명손실로 이어질 가능성이 높으며 특히 심부 광산에서는 작업현장이 대부분 최하부면에 위치하여 상부 면에서 발생한 화재는 하부면내 작업자를 고립시키므로 대형재해 발생 가능성이 높다.

석회석 광산의 전형적인 운반장비인 25톤 디젤 트럭에서 화재가 발생할 경우 발열량규모는 최대 화재성장시에 30~50 MW까지 증가하며 화원 부근에서의 온도는 화재발생 3~4분 후에 약 $1,000^\circ\text{C}$ 까지 증가하여 많은 양의 화재연(smoke)을 생성하고 이로 인한 가시거리(visibility)를 급격히 저하시킨다. 또한 많은 양의 CO가스가 방출되어 대피 인력의 안전한 피난을 어렵게 만들 우려가 있어 이에 대한 면밀한 검토가 필요하다(Gilleies and Wu, 2008). Fig. 7은 2008~2012년 사이에 호주 광산갱내에서 발생한 화재발생 건수를 화재원인별로 도시한 그림이다. 화재원인을 정리

Fig. 7. Distribution of the mine fires by the fire location (Hansen, 2018).

Fig. 8. CFD model for two-level working site.

하면 총 화재건수 128건 중 76%가 차량화재이다. 차량화재의 4대 주요 원인은 빈도수를 기준으로 차량유지관리의 문제, 운행년수의 과다, 화재리스크 평가방법의 부재, 소화시스템 부재 순으로 나타났다(Hansen, 2018).

주방식으로 개발되어 각 편을 램프웨이를 연결한 형태의 국내 석회석 광산을 Fig. 8에서와 같이 모델링하여 30 MW 규모의 차량화재를 시뮬레이션한 결과를 Fig. 9에 도시하였다. Fig. 8은 10 m(W) × 7 m(H) 갱도 2개로 병렬 굴진한 상하부면이 램프웨이를 연결된 작업현장을 대상으로 CFD 분석을 위한 모델링 결과이다. 본 연구의 모든 CFD분석은 ANSYS-FLUENT를 이용하여 k-ε 난류모델 기반의 3차원 동적 해석방법을 적용하여 수행하였다.

경사도 12%의 램프웨이 중간부분에서 25 ton 트럭의 화재를 가정하여 분석하고 화재발생 후 600초 경과시를 기준으로 안전대피가 불가능한 60° 이상의 열기류층과 CO농도 50 ppm 이상의 가스층의 확산범위를 Fig. 9에 도시하였다. 화재발생 위치가 램프웨이 중간지점 또는 하부지점에 관계없이 열기류 및 화재연층의 확산은 대부분 상부방향으로만 이루어지며 하부면으로의 확산은 극히 제한적이다. 그러나 CO가스층의 경우는 하부면 및 하부 갱내로 0.3~0.4 m/s의 속도로 확산되어 하부면의 상당한 범위에 걸쳐 확산된다. 열기류 및 화재연층은 램프웨이 및 갱도 단면 거의 전부에 걸쳐 확산되므로 화재 초기에 하부면에서 대피하지 못

한 작업자는 램프웨이를 통한 대피보다 하부편에서 구호팀을 기다리는 방안이 바람직하다(Lee *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2016).

광산 갱내화재의 제어 및 대피방안의 강구를 위하여 이

와 같은 화재확산 특성에 관한 이해가 요구되며 이를 기초로 한 소방 및 대피방안의 마련이 국내에서도 시급히 필요하다고 판단된다.

Fig. 9. Distribution profiles of the hot airstream and high CO layers.

국내 석회석 광산 적정 통기기술

대단면 갱도 통기용 프로펠러팬 개요

급속하게 진행되는 갱내화, 심부화에 따라 점진적으로 악화되는 국내 석회석 광산작업환경 개선노력에 광산의 영세성과 작업환경에 대한 인식 부족이 큰 걸림돌이 되고 있다. 일반적으로 광산개발계획에 통기계획이 체계적으로 고려되지 않고 있어 통기문제의 심각성이 가속되고 있으며 지속적 광산개발 가능성에도 문제가 제기되고 있다. 특히, 석회석 광산 대단면 갱도 통기에 대한 이해 부족으로 석회석광산을 포함한 비금속광산의 통기시스템(갱도 굴진방식, 통기설비, 통기방식 모두 포함)을 기존 석탄광산 또는 금속광산의 통기시스템과 동일한 개념으로 이해하는 문제도 많은 문제를 초래하고 있다.

국내 석회석 광산의 갱내굴진은 거의 모든 경우에 10 m(W) × 6 m(H) 이상으로 이루어지고 있다. Fig. 10은 갱도 크기별 소요 통기량과 동력사이 관계를 보여준다. 갱도 규격이 각각 3 m(H) × 4 m(W), 4 m × 5 m, 8 m × 10 m, 10 m × 12 m인 길이 1,000 m 갱도(벽면마찰계수 K = 0.025 가정) 내 소요통기량과 국부팬 소요동력간의 관계를 정리하면 다음과 같다.

1) 소요 통기량이 동일한 경우에 갱도규격이 작아질수록

국부팬의 소요동력은 급격히 증가하여 대단면(10 m × 12 m)에 비교하여 단면이 8 m × 10 m, 4 m × 5 m, 3 m × 4 m으로 감소할수록 각각 3, 59, 318배 증가한다.

2) 그러나 소요통기량의 공급은 국부팬에 의존하므로 실제 국부통기의 소요동력은 사용하는 팬의 운전효율에 좌우된다. Fig. 11은 중소단면과 대단면 갱도에 적용된 기존의 축류형 국부팬과 프로펠러 팬(Fig. 12)의 운전점을 보여주고 있다(CDC, 2002). 기존 축류팬을 이용할 경우 중소 단면과 대단면 갱도에서의 실제 운전점은 각각 A, B이며 대단면 갱도에서의 운전점 B는 풍량은 비교적 크나 풍압은 극히 작으며 동시에 운전효율이 매우 낮은 범위에 속하게 되어 통기효율이 극히 낮아진다. 따라서 이러한 상황에서의 팬 가동은 거의 불가능하여진다. 반면에 대단면 갱도에 저풍압 프로펠러 팬을 사용할 경우에는 운전점이 C이므로 기존 팬의 운전 B와 비교하여 풍량과 풍압 모두 증가되는 효과를 기대할 수 있게되므로 프로펠러 팬이 상대적인 장점을 가진다.

따라서 축류형 국부팬을 일반적으로 사용하고 있는 국내 석회석 광산 국부통기시스템은 효율성 및 경제성에 많은 문제를 야기하고 있음을 알 수 있다. 미국 NIOSH에서도 이와 같은 문제점을 2002년도 보고서(CDC, 2002)에서 이미 지적하고 있다.

Fig. 10. Relationship between ventilation rate and power according to the airway cross-sectional area.

Fig. 11. Operation points of auxiliary ventilation axial and propeller fans.

(a) axial-flow fan

(b) propeller fan

Fig. 12. Axial-flow fan and propeller fan used for the auxiliary mine ventilation.

프로펠러 팬 기반의 국부통기기술

앞에서 기술한 바와 같이 국내 석회석 광산에서는 가스 및 입자상 인체 유해물질이 발생하는 지점이 굴진현장 부

근 공간에 국한된다. 또한 안정된 생산량 확보를 위하여 실제 작업이 이루어지는 개소수는 광산 규모에 따라 다르나 일반적으로 2~3에 불과하다. 따라서 가장 효과적인 작업환경 개선 통기방안은 작업공간에서 발생하는 유해물질을 작업자의 노출리스크를 최소화 할 수 있도록 신속하게 배출하는 방안으로 판단되며 이를 위한 통기방식 개념도를 Fig. 13에 도시하였다. 하부편의 굴진개소에서 발생하는 유해물질을 급기팬(풍관 연결하지 않음) 가동을 통하여 신속하게 확산시킨 후, 상부 편으로 연결된 통기승(Fig. 14)을 통하여 배기팬을 이용하여 배기하는 방식이며 배기된 유해물질은 작업자 노출리스크가 없는 이용하지 않거나 폐기된 갱도내로 확산된다.

한편, 맹갱도 형태의 굴진갱도가 길어 질수록 급기팬 가동에 따라 확산된 유해물질의 배기효율이 감소하는 동시에 상당부분이 재순환되어 작업공간내 유해물질 농도 감소율은 급격히 떨어지게 된다. 따라서 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 Fig. 13(b)에서와 같이 1개의 배기팬(풍관 연결하지 않음)을 추가 설치하여 통기승까지 기류를 유도시킨다. 굴진개소에서부터 약 90 m 지점에 설치한 저풍압 고풍량 프로펠러 팬과 통기승에 설치한 축류팬으로 유해물질을 확산시킨 후 통기승을 통하여 배기시키는 통기방식의 효율 분석결과를 Fig. 15에 정리하였다. CFD분석을 위하여 굴진현장에서 2대의 25톤 트럭이 0.2 kg/s의 CO가스를 속도 0 m/s로 배출하는 점 오염원을 가정하였으며 적용한 프로펠러 팬의 용량은 현재 일부 광산에서 사용하고 있는 프로펠러 팬의 사양과 동일한 풍량 2,000 m³/min, 압력 295 Pa의 22 kW로 가정하였다. Fig. 15에서 보는 바와 같이 급기식 프로펠러 팬 가동에 따라 확산시킨 후 통기승으로 배기하는 방식의 국부통기방법의 적용은 작업공간내 CO농도

Fig. 13. Basic concept for the appropriate limestone mine ventilation method.

Fig. 14. Auxiliary ventilation method with a ventilation raise.

CO profiles in the working space

CO concentration at the working face

(a) Blowing propeller fan without raise

(b) Blowing propeller fan with raise

Fig. 15. CFD results based on the auxiliary ventilation method with blowing propeller fan and ventilation raise.

를 안정적으로 30 ppm이하로 유지할 수 있음을 보였다. 매 연의 경우에 입자크기가 $0.8 \mu\text{m}$ 이므로 프로펠러 팬 가동에 따라 증가된 난류강도로 인하여 작업공간내에서는 가스상 물질과 거의 동일한 유동형태를 보일 것으로 판단된다.

결 론

본 논문은 갱내화, 심부화가 급속히 진행되고 있는 국내 석회석 광산의 지속적 개발을 위하여 필요한 저비용, 고효율 적정 국부통기 기술의 제안이 목적이다. 국부통기는 작업환경 개선뿐만 아니라 갱내 화재리스크에 대한 대응 방안으로서의 역할을 수행할 수 있어야 한다. 주요 논문 내용을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 국내 석회석광산 작업환경 측정 결과, 가스상 물질 중 독성이 강한 $\text{NO}_x(\text{NO}, \text{NO}_2)$ 의 농도가 상대적으로 높고, 디젤장비 배출 매연(DPM)의 농도는 국내 기준이 없으나 외국 기준을 상회하고 있어 작업환경 개선을 위한 효율적 통기방안의 적용이 시급히 필요하다.
- (2) 심부화에 따라 장비의 대형화와 투입량의 증대가 이루어지므로 장비, 특히 운반차량의 화재리스크가 점진적으로 증가하고 있다. 그러나 대형 재해로 이어질 수 있는 갱내 화재에 대하여 현재 국내에서는 대응방안이 전혀 수립되어 있지 않다. 화재로 인한 열기류 및 독성 가스층의 확산 특성에 대한 이해 없이는 화재리스크에 대한 대응전략의 수립이 불가능하므로 화재확산 연구, 기술적 및 제도적 갱내화재 대응방안의 수립이 시급히 필요하다.
- (3) 석회석 광산은 석탄 및 금속광산보다 큰 대단면 갱도로 굴진되고 있으나 국부통기팬은 이들 광산에 최적화된 팬 및 팬을 이용한 국부통기방식을 그대로 적용하고 있다. 대단면 갱도내 통기는 프로펠러 팬과 같은 저풍압 고품량 팬이 기존의 축류형 통기팬에 비하여 통기효율이 높으며 이미 일부 국가에서 이를 적극 권장하고 있다. 따라서 국내 대단면 석회석 광산에서의 적용을 적극 고려할 필요가 있다.
- (4) 가연성/폭발성 층가스의 배출이 없는 국내 석회석 광산의 오염물질 발생원은 작업현장에 위치한 점 오염원이다. 따라서 모든 갱도를 대상으로 하는 광산전체 통기방법의 선택은 설비 및 운전비용의 과다로 적용이 불가능하다. 맹갱도 형태의 굴진개소 작업환경 제어를 위한 국부 통기방안으로 저비용의 저풍압/고풍량 팬과 통기승을 이용하여 발생 유해물질을 신속하게 배기시키는 통기방안의 적용을 검토할 필요가 있다. 프로펠러 팬과 같은 저풍압 팬을 급기식으로 가

동하여 유해물질을 확산시킨 후 통기승에 설치한 배기팬을 이용하여 상부 편으로 유동시키는 형태의 방식이다. 단, 통기승과 굴진 개소간의 거리가 길어질 경우, 배기효율 감소를 방지하기 위하여 축류형 배기팬을 추가 적용할 수 있다. 맹갱도의 길이가 일정 범위를 넘으면 통기승을 추가 굴착한 후 동일한 국부팬의 설치 및 가동으로 통기 전문가가 부족한 석회석 광산에서도 용이하게 적용 가능한 적정 통기기술이라고 판단된다.

- (5) 국내 석회석 자원의 지속 가능한 개발을 위하여서는 점진적으로 악화되고 있는 작업환경의 개선방안의 강구가 반드시 필요하며, 비교적 저가 광물자원 (low-priced mineral)을 개발하고 있는 많은 영세 광산에 저비용, 고효율 그리고 용이한 적용이 가능한 적정 통기기술의 적용에 대한 인식제고가 요구된다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부 한국에너지기술평가원의 “ICT/IoT 기반 광산용 스마트 통기시스템 개발 및 현장실증(과제번호: 20182510102380)”의 연구비 지원을 통하여 수행되었습니다.

References

- CDC 2002. *Using propeller fans to improve ventilation in large-entry stone mines*, Technology News, NIOSH.
- Costa, L. de V. and Silva, sé M. da., 2020. Strategies used to control the costs of underground ventilation in some Brazilian mines. *International Engineering Journal*, 73(4), p.555-560.
- Gilleies, A.D.S. and Wu, H.W., 2008. Challenges in undertaking inertisation of fires in underground mines. *Proceedings of the 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium*, p.539-546.
- Hansen, R., 2018. *Fire statistics from the mining industry in New South Wales, Queensland and Western Australia*. Technical Report, Minerals Industry Safety & Health Centre, The Sustainable Minerals Institute, The University of Queensland, Australia.
- KIGAM(Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources), 2019. 2019 Yearbook of mineral statistics, Daejeon, Korea.
- Kim, D.Y., Lee, S.H., Jung, K.H., and Lee, C.W., 2012a. A case study on the ventilation and heat environment in a underground limestone mine with Rampway. *Journal of the Korean Society for Rock mechanics*, 22(3), p.163-172.
- Kim, D.Y., Lee, S.H., Jung, K.H., and Lee, C.W., 2012b. Size analysis of airborne and settled dust in underground limestone

- mine. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 49(4), p.471-478.
- Lee, C.W. and Nguyen, V.D., 2016. A Study on the fire propagation characteristics in large-opening multi-level limestone mines in Korea. *Geosystem Engineering*, 19(6), p.317-336.
- Lee, C.W., 2015. *Method for improving the working site environment to prevent mine disasters-focused on auxiliary ventilation, Lecture note at Central Mine Safety Office*, Ministry of Trade, Industry and Energy, Sejong-si, Korea
- Lee, C.W., Kim, H.K., and Kim, D.Y., 2014. CFD analysis of the propagation of truck fire in a underground limestone mine. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 5(2), p.248-259.
- MOTIE(Ministry of Trade, Industry and Energy), 2019. Mine Safety Standards, Sejong-si, Korea
- Nguyen, V.D. and Lee, C.W., 2019. Optimization of the Unducted Auxiliary Ventilation for Large-Opening Underground Limestone Mines. *Journal of the Korean Society for Rock mechanics*, 29(6), p.480-507.
- Thimons, E.D., Vinson, R.P., and Kissell, F.N., 1979. *Forecasting methane hazards in metal and nonmetal mines*, US Bureau of Mines RI 8392.

이 창 우

1974년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1983년 펜실베이니아주립대 자원개발환경
공학 공학석사
1986년 펜실베이니아주립대 자원개발환경
공학 및 OR 공학박사

현재 동아대학교 에너지자원공학과 특임교수
(E-mail: cwlee@dau.ac.kr)