석탄회를 이용한 갱내충전모형시험 연구

이상은, 박세준, 김학성, 장항석, 김태혁*

A Study on the Model Test for Mine Filling Using Coal Ash

Sang-Eun Lee, Se-Jun Park, Hak-Sung Kim, Hang-Suk Jang, Tae-Heok Kim*

Abstract Coal ash generated from thermal power plants is planned to use for mine filling in order to prevent subsidence of the ground. In according, the basic physical properties and flow characteristics were grasped using coal ash from generated Yeongdong thermal power plant, and hydraulic filling experiments were performed a total of eight times by manufacturing the model of 1 inclined shaft in Hanbo coal mine. The specific gravity of coal ash is 2.34, and the result of particle size analysis belongs to silty sand (SM). Coal ash of weight ratio of 60% was used in the filling experiments of the model, since liquefaction have shown in coal ash less than weight ratio of 70% from the result of slump and flow test. The outlet should be located at the bottom of the inclined and vertical shaft, this was favorable way in improving the filling efficiency from the experiment results regardless of groundwater exists.

Key words Coal ash, Mine filling, Hydraulic filling, Outlet, Filling efficiency

초 록 화력발전소에서 발생하는 석탄회를 지반침하의 방지를 위하여 갱내충전용으로 사용하고자 한다. 따라서 영동화력발전소에서 발생하는 석탄회를 이용하여 기본적인 물리적 특성 및 유동 특성을 파악하였으며, 한보탄광의 제1사갱을 대상으로 모형갱도를 제작하여 총 8회의 수압식 충전실험을 수행하였다. 석탄회의 비중은 2.34이고 입도분석결과 실트질 모래인 SM에 해당한다. Slump 시험 및 Flow 유동시험 결과 석탄회 70 wt.% 이하에서 액상 형태로 나타나므로 모형충전실험에서는 석탄회 60 wt.%를 적용하였다. 모형충전실험결과 갱내수 유, 무에 상관없이 토출구를 사갱이나 수갱 바닥에 위치시키는 것이 충전효율을 향상시키는데 유리한 방법을 확인하였다.

핵심어 석탄회, 갱내충전, 수압식 충전, 토출구, 충전효율

1. 서 론

지하자원의 개발에 따라 필연적으로 채굴공동이 발생하게 되는데, 가행광산의 경우 채굴공동이 붕락하게 되면 채광작업이 곤란해지고 광체 회수율의 저하를 초래하게 되므로 채굴공동의 안정화가 필요하다. 이미 폐광된 광산의 경우는 채굴공동의 붕락은 지반침하를 초래

하여 도로, 철도, 농지 및 일반 주거지 등에 막대한 손상을 입히게 되며, 산림훼손의 원인이 되기도 한다. 가행광산 및 폐광산의 채굴공동을 안정화시키는 방법으로 갱내충전법이 있는데, 갱내충전을 위하여 폐석 및 모래를 이용하거나 폐석과 함께 시멘트, 플라이애쉬 등 첨가제를 혼합하여 다양한 고/액 비율로 충전하는 방법 등이 이용되고 있다. 최근에는 광산 폐기물인 광미나 화력발전소의 폐기물인 석탄회 등을 이용한 충전법을 적용하는 연구가 활발히 진행 중에 있다.

국내 채굴공동 충전사례로서 일찍이 1965년 상동광산에서 채광실수를 향상, 지표함몰 방지 및 갱내지압의 조정 및 광미장 오염제거 목적으로 광미와 모래 슬라임을 3사갱 입구에서 자연유송방식으로 충전한 바 있다(정창근, 1965). 1976년 11월부터 부평광산에서 충전방법과 탈수방법 및 유출방지 댐 구축 등을 개선하여 광

Received: Dec. 12, 2012

Revised: Dec. 21, 2012

Accepted: Dec. 21, 2012

*Corresponding Author: Tae-Heok Kim

Tel) +82419017921, Fax) +82419017970

E-Mail) shykth@mireco.or.kr

Institute of Mine Reclamation Technology, MIRECO,
Yeonamyulgeum-ro, Seonghwan-eup, Seobuk-gu, Cheonan-si,
Chungcheongnam-do, 331-803, Korea

미 슬러리를 갱내채굴공동에 충전하여 성공을 거둔 바 있다(최금성, 1986). 또한 2001년 한성탄광 수갱 충전 방안으로 암석과 모르타르를 사용한 복합 충전법을 제시한 바 있다(장윤호 등, 2001). 정영욱(2008)의 광산채굴공동 충전법 및 적용사례 연구에서 광산 폐기물 충전법으로 폐석 충전, 수력(슬러지) 충전 및 Paste 충전에 대한 특징들이 잘 나타나 있다. 또한 일본의 Komaki 동광산, Yoshino 철광산, Yanahara 황철 및 동광산, Taishu 광산에서 광산배수 중화처리 과정에서 나온 슬러지를 충전재로 사용한 사례와 미국에서 충전재로 석탄회를 이용하여 AMD 방출량을 대폭 감소한 사례 등을 기술하였다. 또한 송원경 등(2007)은 상동광산 광미 적치장의 항구적 처리방안 연구에서 적재되어 있는 광미 슬러리를 이용하여 상동광산의 수갱에서 충전하는 방안을 모형실험으로써 입증한 바 있다. 실험결과 고/액비는 3:7 정도로서 갱내는 건조상태이며, 수갱하부 수평갱에서 충전하는 방안을 추천하고 있다.

국외의 채굴공동 충전사례로서 일찍이 미광무국의 Carlson(1975)은 광산 채굴공동 충진을 위한 수력 모델 연구에서 평균 입도 0.14 mm의 가는 모래를 이용하여 슬러리 충전재로 18회의 실험을 수행한 바 있다. 이때 슬러리 주입의 위치는 충수된 공동의 경사진 바닥과 편평한 바닥, 건조상태의 공동의 편평한 바닥, 채굴공동의 진출입이 가능하거나 불가능하지 않은 조건, 천반이 봉락된 통로나 채굴공동(room)의 조건이다.

Sakamoto 등(2005)은 일본 Tokai 지역에 있는 폐광된 갈탄 광산에서 지하공동과 채굴장의 충전을 위한 충전재와 충전기술이 개발되었다. 충전재는 산업의 부산물로 생성되는 석탄회, filter press cake, 종이 찌꺼기 재, 오수 찌꺼기 재, 용융된 슬래그 등을 이용하였으며, 고화를 위하여 시멘트, 생석회, 회반죽이 사용된 바 있다. Luca 등(2010)은 이탈리아 북쪽의 Santa Brigida 마을에 있는 3편까지 충수된 Carale 광산에서 흙과 시멘트 혼합액의 충전재에 대한 물리·역학적 특성 시험을 양생 기간에 따라 수행하였으며, 그 결과를 토대로 6,000 m³의 충전을 위해 충전방법을 제안한 바 있다.

한편, Mehta 등(1993), Neville(1995), Collepardi(2006)은 충전재로서 보통의 모르타르나 콘크리트, Umoto 등(1999)과 Okamura 등(1999)은 충전재로서 고밀도 콘크리트를 사용하여 높은 강도 효과를 발휘할 수 있으나 고비용이 되는 단점으로 보다 저렴하고 낮은 강도의 작은 양의 시멘트가 첨가되는 충전재, 즉 폐석, 모래, 흙, 석탄회, 광미, 슬러지 등과 소량의 시멘트를 혼합한 충전재를 개발한 바 있다(ACI 1994, 2005).

이상에서 갱내 충전을 위하여 다양한 충전재를 개발

하고 적용한 국내외 사례를 살펴보았다. 국내에서 충전재에 대한 연구는 아직까지 미흡한 실정이며, 일부 광미나 석분토 등을 이용하여 충전재로서의 활용 가능성을 평가한 사례가 있지만, 금번 연구와 같이 석탄회를 이용하여 충전재로서 그 가능성을 평가한 사례는 아직 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 영동화력발전소에서 대량 폐기물로 처분되는 석탄회를 이용하여 충전재로서의 활용 가능성을 파악하고자 석탄회에 대한 기본물성 및 유동성 특성시험을 실시하고 기 폐광된 한보탄광을 대상으로 모형갱도를 제작하여 석탄회 슬러리의 충전특성을 살펴보는 데 그 목적이 있다.

2. 석탄회의 물성

석탄회의 물성을 파악하기 위하여 비중시험(KS F 2308) 및 입도시험(KS F 2302)을 실시하였다.

2.1 비중

석탄회 시료를 온도 105°C 건조기에 24시간 건조시켜 수분을 제거한 후 이 시료를 400메쉬 이하가 되도록 분쇄하고 비중병을 이용하여 비중을 측정하였다. 3가지 시료에서의 비중은 2.29, 2.35 및 2.37로서 평균 2.34를 보이고 있다.

2.2 입도분석

석탄회 시료가 수분 등의 흡수에 의하여 덩어리진 것이 많이 포함되어 있으므로 #4체인 4.75 mm 이하로 먼저 통과시킨 후 입도분석을 실시하였다. 입도분석 결과는 Fig. 1 및 Table 1과 같으며, 균등계수(C_u) 및 곡률계수(C_g)는 식 (1)과 같다.

Table 1. Physical properties of coal ash

Specific gravity		2.34
Coefficient of uniformity (C_u)		16.34
Coefficient of curvature (C_g)		0.34
Grain size at 50% of cumulative passing rate (D_{50} , mm)		0.08
Grain size distribution (%)	> 4.75 mm	0.0
	4.75~2.0 mm	11.9
	2.0~0.425 mm	22.2
	0.425~0.075 mm	17.0
	0.075~0.002 mm	46.9
< 0.002 mm		2.0

Fig. 1. Grain size distribution curve of coal ash

Table 2. Results of slump test

Test results
Solid contents (wt, %)	65.0	67.5	70.0	72.5	75.0
Slump value (cm)	27.7	21.3 cm	16.7 cm	5.8 cm	0 cm

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}, C_g = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (1)$$

석탄회의 평균 균등계수 및 곡률계수가 각각 16.43 및 0.34로 나타나 통일분류법에 의한 판정결과 석탄회 입도는 불량하게 나타났다. 입도분석결과 0.075~4.75 mm 범위의 함유량이 51.1%이고, 0.075~0.002 mm는 46.9%이며, 0.002 mm 이하는 2%이다. 통일분류법에 의한 흙의 분류로 나타내면 실트질 모래 SM에 해당된다. 석탄회의 누적 통과율이 50%(D50)일 때 입자들의 평균 입경은 0.08 mm이다.

3. 석탄회 유동특성

석탄회 및 물과의 혼합 비율에 따른 유동성 평가 등을 확인하기 위하여 Slump 시험(KS F 2402), Flow 시험(KS L 5111), 침강 및 모형 수평갱 유동을 측정하였다.

3.1 Slump 시험 및 결과

석탄회와 물의 배합 비율을 중량비로 각 비율별로 300

mm 콘을 이용하여 Slump 시험을 수행하였다. Slump 시험 결과는 Table 2와 같으며, 석탄회 70 wt.% 이하에서 Slump 값이 증가하여 그 유동성도 증가하였다. 석탄회 70 wt.% 이하에서는 액상 형태로 나타나며 석탄회 75 wt.%에서는 Slump 값이 0 cm이었다.

3.2 Flow 시험

Fig. 2는 Flow 시험 전경을 나타낸 것이며, 그 결과는 Table 3 및 Fig. 3과 같다. 여기서 Flow 값은 (D-25.4)/25.4×100으로 정의된다. Flow 시험은 시험기가 상하 운동을 함으로서 시료가 흘러 퍼지는데 따른 저항을 측정한다. 석탄회가 70 wt.% 이상에서의 Flow 값은 191.5~221.5%로 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이것은 석탄회가 점성이 거의 없기 때문에 물의 양이 작을 때는 상하 진동에 의해서 쉽게 흐트러지는 현상에 기인한 것으로 여겨진다. 반면 석탄회 70 wt.% 이하에서의 Flow 값은 191.5%에서 226.0%와 254.0%로 크게 증가함을 알 수 있는데, 이것은 석탄회 70wt.% 이하에서 액상화에 의한 흐름이 일어나는 것으로 판단할 수 있다. 이 결과는 Slump 시험의 석탄회 70 wt.% 이하에서의 액상화 경향과 동일하게 물의 첨가량이 증가하면서 Flow 값이 증가하였다.

Fig. 2. View of flow test

Table 3. Results of flow test

Solid contents (wt.%)	60	65	70	75	80	85	90
Flow value (%)	254.0	226.0	191.5	203.7	213.7	216.2	221.5

Fig. 3. Relationship between solid contents and flow value

Fig. 4. Sedimentation height according to elapsed time

3.3 침강특성

석탄회 시료 250 gf를 800 ml의 물이 채워진 메스실린더에 투여하고 시간 경과에 따라 침전 양상을 관찰하였다. 석탄회를 초기에 투여하였을 때 탁수였으나 10분 이전에 대부분의 석탄회는 침강이 완료되었다. 이와 같이 침강이 빠르게 완료되는 것은 입도분석 결과에서 보는 바와 같이 모래 및 실트 입자가 주를 이루기 때문이다. 각각의 시간에 따른 석탄회 입자의 침강된 높이는 Fig. 4와 같으며, 4분 이내에 거의 침강이 이루어지는 것을 알 수 있다.

3.4 수평갱 유동

갱도에서 석탄회가 주입될 때 석탄회가 어떤 형태 및 각도로 퇴적되는 가를 알기 위해서 수평갱 모형 시험을 수행하였다. 아크릴 사각 모형(L×W×H : 200×30×30 cm)

Fig. 5. Moving distance of coal ash slurry according to moving velocity

에 석탄회 60 wt.%, 55 wt.%, 50 wt.%를 깔데기(구멍 직경 35 mm)를 통해서 주입하면서 충전시험을 수행하였다. 대상광산인 한보탄광은 현재 인접하고 있는 경동

탄광의 가행으로 갱내수를 펌핑하고 있기 때문에 건조 상태 조건에서 충전시험을 수행하였다. 이때 1초에 1200 번까지 촬영이 가능한 Casio EX-F1 고성능 카메라를 부착하여 석탄회 슬러리의 이동속도를 관찰하였으며, 그 결과는 Fig. 5와 같다. 수평갱 모형 갱도에서 석탄회 60 wt.%에서의 거리에 따른 이동속도는 15.24~ 9.78 cm/sec이다. 석탄회 55 wt.%에서는 20.84~12.88 cm/sec이며, 석탄회 50 wt.%에서는 61.86~49.98 cm/sec로서 물의 함량이 많을수록 석탄회 슬러리의 이동속도는 빠르게 나타나는 것을 관찰할 수 있다.

건조상태로 석탄회 60 wt.%를 충전했을 때 1.87°의 경사로 충전되었으며, 충전 시작 후 5분 정도 지난 다음 고/액 분리현상이 석탄회 선두에서 관찰되었다. 석탄회 55 wt.%를 충전하였을 때는 1.14°의 경사로 충전되었으며, 석탄회 50 wt.%의 경우는 0.18°의 경사로 충전되었다. 이 결과들로부터 석탄회 슬러리에서 물의 함량이 많을수록 이동속도가 빠르기 때문에 침전되는 석탄회의 경사는 작게 나타나고 있다.

4. 모형갱도 충전실험

4.1 대상광산

모형 갱도의 충전실험을 위하여 한보탄광 보안도를 참조하였으며, 모형갱도 제작을 위해 충전대상지를 표시하면 Fig. 6과 같다. 한보 탄광은 총 5개의 사갱과 1

개의 수갱으로 구성되어 있다. 한보제1사갱은 제6편까지 도달되어 그 길이가 995 m이고 경사는 18° 내외이며, 한보북부사갱은 7편까지 도달되어 1206 m의 길이에 경사는 18°이다. 한보북부2사갱은 6편에서 9편까지로 그 길이는 614 m이고 경사는 18°이다. 한보콘베이어운반갱 남부사갱은 6편까지 도달되어 그 길이는 1283 m이고 경사는 15~20°이다. 한보콘베이어운반갱 남부2사갱은 6편에서 11편까지로 그 길이는 961 m이고 경사는 18°로 이루어져 있다. 1개의 수갱은 한보통기수갱으로 그 길이는 196 m로서 한보제1사갱 3편까지 이어져 있다. 그리고 상, 하 수평갱을 이어주는 승갱이 다수 존재하며 그 경사는 31° 내외로 이루어져 있다.

4.2 모형갱도 제작

한보탄광의 충전을 위해 5개의 사갱과 1개의 수갱을 검토한 결과 지하 심부까지 도달되어 있는 사갱에서 충전하는 것이 효율적인 것으로 판단되었다. 본 연구에서는 이중 6편까지 도달되어 있는 한보제1사갱을 참조하여 두께 5 mm의 아크릴판을 이용하여 모형갱도를 제작하였다.

Fig. 6의 영역과 같이 한보제1사갱을 대상으로 Fig. 7과 같은 모형갱도를 제작하였다. 수갱은 3편까지 내려가 있지 않으나 실험의 편의를 위하여 5편까지 제작하였다. 사갱은 18°로 하였으며 1편 수평갱과 2편 수평갱 사이의 승갱은 25°로 하였고 환기 통로를 가정하여 1편

Fig. 6. Hanbo mine drawings as the subject for making the model

Fig. 7. Designation and dimension of the model

Fig. 8. View of the Hanbo mine model

과 2편에 수직 갱도를 설치하였다. 충전실험을 위한 토출구는 사갱과 1편 및 5편의 교차지점과 수갱과 5편의 교차지점에 위치토록 하였다.

모형갱도의 1편 길이는 3000 mm, 2편 2456 mm, 3편 1907 mm, 4편 1577 mm, 5편의 길이는 1027 mm이다. 수갱 및 사갱의 내경은 100 mm이며 수평갱, 승갱 및 통기갱은 80 mm이고, 그 전경은 Fig. 8과 같다.

갱내모형충전장치는 석탄회 혼합기, 슬러지 이송펌프 및 모형갱도의 3부분으로 구성된다. 석탄회 혼합기는 효성(주) HSX0304211 모델의 모터로 작동되며, 속도를 조절할 수 있는 콘트롤러가 장착되어 있다. 이 모터의 정격 출력은 0.4 KW이고 분당 회전수(rpm)는 1,685

회이며 효율은 65%이다. 혼합기의 드럼통 용량은 120 리터이며, 모형갱도의 충전실험에서는 원활한 교반이 이루어지도록 속도조절콘트롤러를 최대로 하여 실험이 수행되었다. 슬러지 이송펌프는 3부분, 즉 MAX Geared 모터, 감속기 및 펌프로 구성되어 있다. MAX Geared 모터는 삼양 사의 제품으로 분당 회전수는 1,720회이고 정격출력은 0.75 KW이며, 효율은 82.5%이다. 감속기는 MG-135 모델로 정격출력은 0.75 KW이며 감속배율은 1/5이다. 즉 $1,720/5=344$ 의 분당 회전수를 공급한다. 펌프는 DAI BORING MONO PUMP로서 DS T 20-1 모델이며, 분당 회전수는 220회이고 1HP의 0.75 KW 정격출력으로 토출압력은 2 kgf/cm^2 이며 펌프용량은 $0.36 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이다.

4.3 충전실험 결과

모형갱도를 이용한 충전실험은 총 8회 실시하였다. 다양한 현장여건을 감안한 각각의 실험조건은 Table 4와 같다. 여기서 펌프 출력은 교반기에서 물과 석탄회가 섞이는 고액비 및 충전시간의 경과에 따라 변화가 있었으므로 각 실험별로 최대 출력으로 정의하였다. 석탄회 슬러리의 고액비는 석탄회 60 wt.%로 실험이 이루어졌는데, 그것은 이동속도는 상대적으로 느리지만 3.4절에서 충전된 경사각이 1.87° 로서 좋은 석탄회 슬러리 확산을 보이고 있기 때문이다. 석탄회 55 wt.%와 50 wt.%의 경우 물이 석탄회 침전에 비하여 많이 남으므로 충전효과가 미비할 것으로 판단되어 충전시험에서 제외하였다.

4.3.1 갱내수가 없는 조건

Table 4에서 실험조건 1~5는 갱내수가 존재하지 않는 경우에 해당한다. 충전실험조건 1의 경우, 즉 모형갱도 내에 물이 없고 1편 위 사갱에서 석탄회 슬러리의 토출구가 있을 때 Fig. 9와 같이 하부(5편)부터 석탄회가 수평으로 골고루 퍼지면서 상승하고 이후 4편, 3편으로 충전이 진행되었으며, 충전시까지 총 14분 30초 정도 소요되었다. 이 모형갱도의 충전 체적은 86300 cm^3 이므로 충전되는 평균속도는 $99.2 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 정도가 된다. 이송펌프의 용량이 $0.36 \text{ m}^3/\text{hr}$ 임을 감안할 때 14분 30초까지 충전되는 체적은 87000 cm^3 이므로, 이 모형갱도의 충전 체적 86300 cm^3 과 비교할 때 0.8% 정도의

작은 오차를 보인다.

충전시험 종료 후 침전이 된 다음 충전상태는 Fig. 10과 같고, Fig. 11은 그 스케치를 나타낸 것이다. 5편의 경우는 완전 충전되었으며, 수평갱만 있는 4편은 충전율이 92.3%, 수평갱도와 승갱 및 통기갱이 연결된 3편은 95.5%, 2편은 98.0%이고 1편은 66.5%의 충전율을 보이고 있다. 모형갱도의 전체를 보면 석탄회 충전율은 88.1%이다. 이 결과로부터 4편은 승갱이나 통기갱이 없이 수평갱도로만 충전되므로 3편이나 2편에 비하여 낮은 충전율을 보이고 있으며, 3편과 2편은 승갱과 통기갱이 연결되어 있어 수평갱만 있는 4편에 비하여 높은 충전율을 보이고 있다. 그러나 1편의 경우는 시간 경과

Fig. 9. View of the filling process at experimental condition 1 and 2

에 따라 부유하고 있던 석탄회가 아래로 이동하면서 상대적으로 다른 갱도에 비하여 낮은 충전율을 보인다.

충전실험조건 2의 경우, 즉 모형 갱도 내에 물이 없고

5편과 사갱이 연결되는 부분에서 석탄회 슬러리의 토출구가 있을 때 Fig. 9와 같이 하부(5편)부터 석탄회가 수평으로 골고루 퍼지면서 상승하고 이후 4편, 3편으로

Table 4. Experimental condition of Hanbo mine model for slurry filling

Experimental condition	Groundwater condition	Outlet point	Remarks
1	Non-existence	Inclined shaft and #1 drift	
2		Inclined shaft and #5 drift	
3		Inclined shaft and #1 drift	Clogging of #1~#5 of drift at shaft side
4		Inclined shaft and #5 drift	Clogging of #1~#5 of drift at shaft side
5		Shaft and #5 drift	
6	Existence (#3~#5)	Inclined shaft and #1 drift	
7		Inclined shaft and #5 drift	
8		Shaft and #5 drift	Clogging of #2 and #4 drift at inclined shaft side

Fig. 10. View of filling up after slurry sedimentation

충전이 진행되었으며, 충전시까지 총 14분 50초 정도 소요되었다. 이 모형갱도의 충전 체적은 86300 cm^3 이므로 충전되는 평균속도는 $97.0 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 정도로 충전실험조건 1과 거의 동일하였다.

충전시험 종료 후 침전이 된 다음 Fig. 10 및 Fig. 11과 같이 5편의 경우는 완전 충전되었으며, 수평갱만 있는 4편은 사갱과의 각각 일부만 제외하고는 완전 충전되어 충전율이 96.5%, 수평갱도와 승갱 및 통기갱이 연결된 3편은 승갱과 수평갱의 각각 일부 소량만 제외하고는 완전하게 충전되어 충전율은 99.4%를 보이고 있으며, 2편은 완전하게 충전되었다. 1편은 통기갱 일부를 제외하고는 완전 충전되어 94.2%의 충전율을 보이고 있다. 모형갱도의 전체를 보면 석탄회 충전율은 97.0%이다. 이 결과 역시 충전실험조건 1의 경우와 마찬가지로 4편은 승갱이나 통기갱이 없이 수평갱도로만 충전되므로 3편이나 2편에 비하여 낮은 충전율을 보이고 있으며, 3편과 2편은 승갱과 통기갱이 연결되어 있어 수평갱만 있는 4편에 비하여 높은

충전율을 보이고 있다. 그러나 1편의 경우는 시간 경과에 따라 부유하고 있던 석탄회가 아래로 이동하면서 상대적으로 다른 갱도에 비하여 낮은 충전율을 보이는 것으로 관찰된다.

충전실험조건 1과 비교할 때 8.9% 정도 높은 충전율을 보이고 있는데, 이것은 중력식으로 사갱에서 낙하시키는 것 보다는 사갱 하부에서 토출 압력에 의해 상부로 충전시키는 방식이 보다 충전효율이 향상되는 것을 의미한다. 또한 사갱과 수갱의 충전높이는 5.5 cm 정도의 차이를 보이며, 이것은 충전실험조건 1과 비교할 때 19 cm의 충전효과 차이가 발생한다. 이 결과로부터 충전실험조건 2의 경우가 1의 경우보다 갱도내에서 석탄회 확산이 보다 향상된 것으로 이해된다.

충전실험조건 3의 경우, 즉 수갱쪽 수평갱이 막혀있다고 가정하고 1편과 사갱이 연결되는 부분에서 석탄회 슬러리의 토출구가 있을 때이다. 충전시험 종료 후 Fig. 10 및 Fig. 11과 같이 5편의 경우 충전율은 64.6%, 4편 60.6%, 3편 97.4%, 2편은 90.5%이고 1편은 46.7%의

Fig. 11. Sketch maps after slurry sedimentation according to each experimental conditions

충전율을 보이고 있다. 이 결과 역시 승갱이나 통기갱이 없는 4편과 5편에서 낮은 충전율을 보이고 있으며, 1편의 경우 토출구 주위에 석탄회가 퇴적됨으로서 충전율이 가장 낮게 나타난다. 모형갱도의 전체를 보면 석탄회 충전율은 77.4%로서 실험조건 1, 2에 비하여 낮은 충전율을 보이고 있는데, 이것은 수갱쪽 수평갱의 막힘에 의해 석탄회 슬러리의 확산이 원활하지 않기 때문으로 보인다.

충전실험조건 4의 경우, 즉 수갱쪽 수평갱이 막혀있다고 가정하고 5편과 사갱이 연결되는 부분에서 석탄회 슬러리의 토출구가 있을 때이다. 5편의 경우 충전율은 70.5%, 4편 76.6%, 3편 89.2%, 2편은 88.5%이고 1편은 65.9%의 충전율을 보이고 있다. 이 결과 역시 승갱이나 통기갱이 없는 4편과 5편에서 낮은 충전율을 보이고 있다. 모형갱도의 전체를 보면 석탄회 충전율은 83.0%로서 수갱쪽 수평갱의 막힘에 의해 실험조건 1, 2에 비하여 낮은 충전율을 보이고 있으나, 실험조건 3에 비해 높은 충전율을 보인다. 이것은 중력식으로 사갱에서 낙하시키는 것 보다는 5편 하부에 있는 토출구 압력에 의해 상부로 충전시키기 때문에 충전효율이 향상되는 것을 의미한다.

충전실험조건 5의 경우, 즉 5편과 수갱이 연결되는 부분에서 석탄회 슬러리의 토출구가 있을 때이다. Fig. 10 및 11과 같이 3편, 4편 및 5편은 완전히 충전되었으며, 2편의 충전율은 96.0%이다. 1편은 75.3%의 충전율을 보이고 있으며, 실험조건 2와 유사한 충전형태를 보이고 있다. 모형갱도의 전체를 보면 석탄회 충전율은 90.3%로서 실험조건 1, 3에 비하여 높은 충전율을 보이고 있는데 이것 역시 5편 하부에 있는 토출구 압력에 의해 상부로 충전시키기 때문에 나타난 현상으로 이해된다.

이상의 결과로부터 갱내수가 없는 건조한 상태의 갱내충전의 경우, 갱내에 막힘이 없는 실험조건 1과 2에서는 충전효율이 각각 88.1%와 97.0%로서 사갱과 5편의 교차지점에 토출구를 위치시키는 것이 유리하였다. 수갱쪽 수평갱이 막혀 있는 경우인 실험조건 3과 4의 충전효율은 각각 77.4%와 83.0%로서 이것 역시 사갱과 5편 교차지점에 토출구를 위치시키는 것이 효율면에서 우수하였다. 수갱과 5편의 교차지점에 토출구가 있는 실험조건 5의 경우 석탄회 충전율 90.3%로서 실험조건 1, 3, 4보다 충전효율면에서 우수한 것으로 평가되었으며, 사갱에서 충전하는 실험조건 2에 비하여 충전효율이 저하되는 현상이 관찰되었다. 따라서 갱내수가 없을 때 실험조건 2, 4 및 5와 같이 토출구의 위치가 사갱이나 수갱의 바닥에 있을 때와 토출구를 수갱보다

는 사갱에 위치시키는 것이 충전효율 향상에 유리하다고 결론지을 수 있다.

4.3.2 갱내수가 있는 조건

Table 4에서 실험조건 6~8은 갱내수가 3~5편까지 존재한다고 가정하여 충전실험이 이루어졌다. 충전실험조건 6의 경우, 즉 사갱과 1편 교차지점에서 석탄회 슬러리의 토출구가 있을 때의 충전실험이다. Fig. 12와 같이 석탄회 슬러리 충전과 동시에 탁수가 발생되면서 토출구가 있는 사갱을 중심으로 석탄회가 퇴적되는 현상이 관찰된다. 석탄회의 주입시간이 경과하면서 사갱, 수갱, 승갱, 통기갱으로 탁수의 확산이 수평갱보다 빠르게 나타나는 것이 관찰된다. 탁수가 발생하지만 하부(5편)부터 석탄회가 수평으로 퍼지면서 상승하고 이후 4편, 3편으로 충전이 진행되었다. 충전시까지 총 7분 55초 정도 소요되었다. 이 모형갱도의 충전 체적은 3편까지 물이 차 있어 1, 2편을 고려하는 경우 47097 cm^3 으로 충전되는 평균속도는 $99.1 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 정도로 이전의 충전실험조건과 거의 동일하였다.

충전시험 종료 후 Fig. 10 및 11과 같이 5편의 충전율은 61.7%, 4편의 충전율은 38.3%, 3편은 충전율이 72.4%로서 승갱 및 통기갱이 연결된 3편의 충전율이 4, 5편의 충전율보다 높게 나타나는데, 이것은 석탄회가 확산되는 사갱 통로 외에 승갱 및 통기갱이 석탄회 확산이 일어나도록 그 통로가 넓으며, 승갱 및 통기갱에 의해 석탄회를 아래로 이동시키기 때문인 것으로 보인다.

이 실험은 3편까지 물이 차 있다고 가정하고 충전시 1편까지 충전되면 실험을 완료하였기 때문에 갱내수가 없는 실험조건과는 상대적인 비교는 곤란하지만, 3, 4 및 5편의 충전율이 가장 낮게 나타나는데, 이것은 물속에서 석탄회 유동이 이루어지므로 다른 충전실험조건에 비하여 물의 저항에 의해 석탄회가 불균일하게 퇴적되기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 12. View of moving phenomena of turbid water after 7 minutes at experimental condition 6

Fig. 13. Graded particles of coal ash at inclined shaft and #5 drift

한편, 사갱과 수갱의 충전높이는 146.0 cm 정도, 사갱과 통기갱의 충전높이는 69.4 cm 정도의 큰 차이를 보이고 있다. 이것은 토출구가 사갱과 1편이 만나는 지점에 있고 물의 저항에 의해 석탄회의 유동에 저항을 받기 때문이며, Fig. 13과 같이 석탄회 입자의 분급화로 인해 사갱과 수평갱이 만나는 지점에 큰 입자들이 퇴적되어 석탄회 유동을 방해하기 때문으로 보인다.

충전실험조건 7의 경우, 즉 5편과 사갱이 연결되는 부분에서 석탄회 슬러리의 토출구가 있을 때의 충전실험이다. 충전시험 종료 후 침전이 된 다음 충전상태를 살펴보면, Fig. 10 및 Fig. 11과 같이 5편과 4편의 경우는 완전 충전되었으며, 3편은 충전율이 84.7%이다. 충전실험조건 6보다 높은 충전율을 보이는 것은 사갱과 5편이 만나는 지점에서 충전하므로 석탄회의 분급화가 실험조건 3보다 낮게 발생하여 물의 저항을 적게 받으며, 사갱 하부에 있는 토출구의 압력에 의해 석탄회 유동성이 향상되기 때문으로 생각된다.

충전실험조건 8의 경우, 즉 사갱쪽에 있는 수평갱 4편과 2편이 막혀있다고 가정하고 5편과 수갱이 연결되는 부분에서 석탄회 슬러리의 토출구가 있을 때의 충전실험이다. 5편은 완전 충전되었으며, 4편은 충전율이 71.3%이고 3편은 96.3%의 충전율을 보이고 있다. 4편의 경우 충전실험조건 7보다 낮은 충전율을 보이는 것은 사갱쪽에 있는 수평갱의 막힘으로 석탄회 유동이 차단되기 때문으로 여겨진다. 실험조건 6과 비교하면 이 조건 역시 수갱과 5편이 만나는 지점에서 충전하므로 석탄회의 분급화가 실험조건 6보다 낮게 발생하여 물의 저항을 적게 받으며, 수갱 하부에 있는 토출구의 압력에 의해 석탄회 유동성이 향상되기 때문으로 생각된다.

이상의 결과로부터 갱내수가 존재하는 경우, 토출구

의 위치에 따라 충전효율면에서 큰 차이를 보이는 것이 관찰되었다. 즉, 토출구의 위치가 5편과 교차하는 사갱과 수갱의 바닥에 있는 실험조건 7과 8의 충전효율이 우수한 것으로 평가되었다. 또한 사갱쪽 수평갱 막힘이 있는 실험조건 8이 실험조건 6에 비해 우수한 충전효율을 보이고 있다. 갱내수가 있는 조건 역시 갱내수가 없는 조건과 마찬가지로 수압식 충전시 토출구를 사갱 및 수갱과 5편 수평갱의 교차지점에 위치시키는 것이 충전효율을 향상시키는데 유리한 방법임을 확인할 수 있었다.

5. 결론

화력 발전소에서 유해한 황산화물을 제거하기 위하여 석회석을 연소를 위한 석탄과 함께 보일러 내에 투입하여 유동시키면서 연소할 때 발생하는 석탄회를 현재 가행되고 있거나 폐광된 광산의 지반침하방지를 위하여 갱내충전용으로 사용코자 한다. 본 연구에서는 갱내충전용 석탄회의 기본적인 물리적 특성 및 유동 특성을 파악하고, 한보탄광의 제1사갱을 대상으로 모형갱도를 제작하여 총 8회의 충전시험을 실시하였다. 그 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 석탄회의 기본 물성시험결과 비중은 2.34이며, 입도 분석결과 0.075 mm 이상의 입자크기 통과중량백분율은 51.1%이고 0.075 mm 이하는 48.9%로서 통일 분류법상 실트질 모래인 SM에 해당한다.
2. Slump 값은 석탄회 65 wt.%에서 27.7 cm이고 75 wt.%에서는 0 cm로, 물의 함유량이 많아질수록 Slump 값이 증가하면서 유동성이 증가하였으며, 석탄회 70 wt.% 이하에서 액상형태로 나타난다.
3. 석탄회 Flow 시험결과 석탄회 70 wt.% 이하에서 Flow 값은 226%에서 254%로 크게 증가하였으며, 석탄회의 침강은 4분 이내에 완료되는 특성을 보인다.
4. 수평갱 모형갱도 유동시험결과 충전되는 경사각은 1.87° , 1.14° 및 0.18° 로서 물의 함량이 많을수록 이동속도가 빠르다.
5. 석탄회 60 wt.%로 갱내수 유, 무에 따라 총 8회의 모형갱도 충전실험이 이루어졌다. 갱내수 유, 무에 상관없이 토출구를 사갱 및 수갱과 5편 수평갱의 교차지점에 위치시키는 것이 충전효율을 향상시키는데 유리한 방법임을 확인할 수 있었다.

이상과 같이 석탄회를 이용한 갱내충전에 대한 적용가능성을 한보탄광을 모사한 모형갱도에서 수행한 이 결과는 현장 적용시 수압식 충전에 대한 기초자료로 활

용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 실제 현장에서 적용시는 채굴공동의 형상, 갱도내 석탄회 흐름에 따른 마찰특성, 석탄회의 주입속도 및 물과의 배합비율 등의 여러 가지 영향을 고려하여야 할 것이다.

사 사

본 연구는 한국광해관리공단의 위탁과제인 “석탄회 갱내충전의 전산해석 확산모델 연구”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 송원경 등, 상동광산 광물찌꺼기적치장의 항구적 처리방안 연구, 2007, 광해방지사업단 기술총서 2007-48, 137-215.
2. 장윤희 등, 2001, 도계광업소 출수량 증가 원인과 대책 및 한성탄광 수갱 충전 방안, 석탄산업합리화사업단.
3. 정영욱, 2008, 광산채굴공동 충전법 및 적용 사례, 광해방지기술, 제2권 1호, 20-28.
4. 최금성, 1986, 부평광산 선광장재 갱내충전, 대한광산학회지, 제19권 특집 제1호, 63-69.
5. American Concrete Institute (ACI), 1994, Controlled Low Strength Materials (CLSM), Rep. No. ACI-SP-150, ACI, Detroit.
6. American Concrete Institute (ACI), 2005, Controlled Low Strength Materials (CLSM), Rep. No. ACI-229R-99, ACI, Detroit.
7. Carlson, E. J., 1975, Hydraulic Model Studies for Backfilling Mine Cavities (2nd Series of Tests), U.S. Bureau Mines, Denver, Colorado, Rep. No. REC-ERC-75-3, 1-38.
8. Changkun Chung, 1966, Sand slime filling in Sangdong Mine(I), J. of KSGE. 3.3, 142-146.
9. Collepard, M., 2006, The New Concrete, Grafiche Tintoretto, Castrette di Villorba, Italy.
10. Luca Bertolini, et. al., 2010, Filling of Flooded Gypsum Mine with a Flowable Soil-Cement Mix, J. of Materials in Civil Engineering, 628-636.
11. Mehta, P. K., and Monteiro, P. J. M., 1993, Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, 2nd Ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
12. Neville, A. M., 1995, Properties of Concrete, Longman Scientific & Technical, Wiley, Harlow.
13. Okamura, H. and Ouchi, M., 1999, Self-Compacting Concrete: Development, Present Use and Future, Proc., Int. Conf. Self-Compacting Concrete, RILEM, Stockholm.
14. Sakamoto, A., et. al., 2005, An Intergrated Cavity Filling Technique For Abandoned Underground Room and Pillar Lignite Mines and Underground Quarries, Post-Mining, Nov. 16-17, Nancy, France, 1-10.
15. Umoto, T. and Ozawa, K., 1999, Recommendation for Self-Compacting Concrete, Trans. Japan Soc. Civ. Eng., to be published.

이 상 은

1991년 강원대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1993년 강원대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1999년 강원대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 033-570-6306

E-mail: lee9367@kangwon.ac.kr

현재 강원대학교 삼척캠퍼스 에너지자원공학과 조교수

김 학 성

1993년 강원대학교 공과대학 자원공학과 공학사
2011년 강원대학교 삼척캠퍼스 방재대학원 광해·지질방재전공 공학석사

Tel: 033-530-1421

E-mail: haksung8697@hanmail.net

현재 강원대학교 삼척캠퍼스 방재대학원 광해·지질방재전공 박사과정

김 태 혁

1992년 서울대학교 공과대학 자원공학과 학사
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과 석사
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 박사

Tel: 041-901-7921

E-mail: shykth@mireco.or.kr

현재 한국광해관리공단 광해기술연구소 암반공학연구팀장

박 세 준

2006년 동아대학교 공과대학 자원공학과 공학사

Tel: 063-466-1070

E-mail: kakajjang@hanmail.net

현재 강원대학교 삼척캠퍼스 방재대학원 광해지질방재전공 공학석사과정

장 항 석

2007년 한양대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 공학사
2009년 서울대학교 에너지시스템공학부 공학석사

Tel: 041-901-7924

E-mail: geozzang@mireco.or.kr

현재 한국광해관리공단 광해기술연구소 암반공학연구팀 전임연구원