

유증 건조법에 의한 고수분 저품위탄 건조 실험

문승현[†] · 김용우 · 유인수 · 이승재

한국에너지기술연구원 폐기물에너지연구센터

(2009년 8월 10일 접수, 2009년 11월 27일 수정, 2009년 11월 27일 채택)

An Experimental Study on the Fry Drying of Low-rank Coal with a High Moisture Content

Seung-Hyun Moon[†], Yong-Woo Kim, In-Soo Ryu, Seung-Jae Lee

Waste Energy Research Center, Korea Institute of Energy Research

(Received 10 August 2009, Revised 27 November 2009, Accepted 27 November 2009)

요 약

수분의 함량이 높은 저품위탄을 건조시키기 위하여 유증 건조 방법에 대해 조사하였다. 최적의 건조 조건을 선정하기 위하여 최종온도, 석탄과 등유의 혼합비율, 석탄 또는 등유의 양, 혼합물의 총량, 교반 방법에 따른 석탄의 건조 특성을 관찰하였다. 최종온도가 120°C 이하일 때는 완전한 증발이 이루어지지 않았으며, 130°C 이상인 경우에는 수분의 증발량에 큰 차이가 나타나지 않았다. 석탄과 등유의 혼합비율에서 석탄의 양이 증가할수록 수분의 증발이 잘 이루어짐에 따라, 열에너지의 전달이 수분의 증발에 미치는 영향보다 증발한 수분이 등유 속에서 배출되기 위하여 필요한 에너지가 더 큰 것으로 나타났다. 혼합물의 총량이 많은 경우에는 건조후의 수분 함량이 더 낮아지지만 많은 시간이 소모되는 반면, 적은 경우에는 수분 함량을 일정한 수준 이하로 낮추기 어려운 반면에 짧은 시간에 일정한 함량까지 수분을 증발시킬 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 등유와 석탄 혼합물의 유동성이 확보되는 한도 내에서 등유의 양을 가능한 줄이는 것이 석탄의 건조에 유리한 것으로 판단되었다. 한편, 질소를 이용한 교반과 진공을 개별적으로 적용한 경우에는 증발량이 향상되었다.

주요어 : 석탄, 저품위탄, 수분, 유증증발, 건조

Abstract— The experimental characteristics for fry drying method was investigated using low-rank coal with a high moisture content. Final temperature, mixing ratio between coal and kerosene, content of coal or kerosene, total weight of the mixture and mixing methods were varied to find out the optimum conditions by measuring moisture of coal. Evaporation of the coal moisture was not completed below 120°C of final temperature. The amount of moisture was not significantly different over 130°C. Coal moisture was easily evaporated by increasing coal content, which showed that the moisture evaporation could be significantly enhanced by the remove of evaporated moisture from kerosene rather than by heat transfer to the coal. High total weight of the mixture resulted in lowering moisture content of coal with long evaporation time. On the other hand, low total weight was difficult to reduce the moisture below a certain level, but could reduce evaporation time. Thus, it can concluded that kerosene content should be lowered to the extent maintaining the mobility of the mixture in order to enhance evaporation. It was also observed that evacuation and mixing by using nitrogen could improve drying of coal.

Key words : Coal, Low rank coal, Moisture, Fry, Drying

[†]To whom correspondence should be addressed.

Waste Energy Research Center, Korea Institute of Energy Research, 71-2 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

Tel: 042-860-3221

E-mail: shmoon@kier.re.kr

1. 서론

산업혁명을 거치면서 급격히 늘어난 에너지 수요를 석탄이 담당하여 오다가 2차 세계 대전 이후 수송연료와 화학원료의 수요가 급증하고 석유자원의 이용 편의성으로 인하여 석탄의 사용이 다소 줄어들었다. 이후 1970년대 2차례의 oil shock를 통하여 각 나라에서는 에너지 안보 차원에서 석유의 대체에너지원으로 지역적 편재성이 적은 석탄의 이용에 관심을 가지게 되었다. 하지만 석탄의 이용에 필연적으로 따르는 환경오염의 문제와 국제적으로 강화되는 환경 규제 동향은 석탄의 단순 이용이 아니라 청정 기술이 가미된 활용을 요구하게 되었고, 이에 따라 청정석탄기술(Clean Coal Technology, CCT)의 개발이 활발하게 진행되어 오고 있다. 석탄을 청정하게 이용하기 위하여 필요한 기술로 탈황기술, 탈질기술, 탈회기술, 집진 기술 등이 주목을 받았고, 이와 관련된 많은 연구개발이 이루어지고 있다. 이러한 기술은 이용이 편리하고 발열량이 높은 고품위탄에 적용되는 것을 전제로 하고 있으며 수분이 많아서 발열량이 낮고 수송비가 과다하게 소요되는 저품위탄은 큰 관심을 끌지 못하였다. 그러나 최근 급격하게 도래한 고유가 시대는 에너지 확보의 중요성을 다시 한번 강조하게 되었고 저품위탄에 대해서도 새로운 시각으로 바라보게 되었다. 저품위탄은 수분이 많고 발열량이 낮아서 수송에 따르는 비용이 과다한 석탄으로서 갈탄과 아역청탄이 대표적이라 할 수 있다.

세계의 석탄 매장량은 전체 7.14조 톤으로서 역청탄과 무연탄이 3조 2,675억 톤, 아역청탄과 갈탄이 3조 8,724억 톤이며 가체매장량은 전체 9,845억 톤에서 저품위탄이 차지하는 비중은 약 47.3%인 4,654억 톤이다^[1]. 현재 석탄은 미국을 포함한 북미지역에 가장 많이 매장되어 있으며 특히 중국과 인도는 자국의 석탄자원을 충분히 활용하기를 원하고 있는 실정이라서 풍력이나 태양광등 재생 가능 에너지가 20~30년 이내에 상용화되거나 아주 저렴한 재생가능 에너지가 나오기 전까지는 석탄을 에너지원으로 사용할 수밖에 없는 상황이다^[2]. 우리나라는 이러한 석탄을 외국에서 고가에 수입을 해야 하는 실정이므로 저품위탄을 효율적으로 사용하는 기술의 개발은 에너지의 안정적 확보라는 측면에서 매우 절실하고 시급히 확보해야 할 필요가 있다. 저품위탄의 효율성은 건조를 통하여 높일 수 있지만 건조한 후 수송할 때 대기 중의 수분이 다시 흡수되는 경향이 있다. 석탄 수송 시 수분이 재흡수 되면 석탄의 단위 무게당 발열량이 낮아지고, 더 많은 양의 석탄을 운반할 수 없게 되어 수송비가 증가하며, 혼합, 분쇄, 분리 등 석탄의 이용에 수반되는 여러 가지 공정에 있어서 많은 문제

점을 야기한다^[3]. 수분의 재흡수를 방지하는 방안으로 표면에 기름을 코팅하는 유중건조 방식이 유망하다. 유중건조 방식(Fry Drying)은 식품의 건조를 비롯하여 하수슬러지, 음식물쓰레기 처리 등에 활발하게 이용되고 있다^[4]. Hickey등^[5]이 감자칩의 유중건조에서 NMR(Nuclear Magnetic Resonance)로 수분을 측정된 결과 수분의 재흡수는 일반적인 기체 흡착과 마찬가지로 표면에 단일층을 형성한 후 다층 흡착이 진행되고 결국은 미세 기공내의 응축이 일어난다고 보고하였다. 따라서 수분의 재흡수를 방지하기 위해서는 초기의 단일층 흡착을 억제할 필요가 있고 표면을 기름 성분으로 코팅하는 것이 매우 유용할 것으로 기대된다. 일본의 고베제강에서는 1980년대부터 추진하던 갈탄액화 기술의 전처리 공정으로 수분의 재흡수 방지를 위하여 석탄 기공 표면에 기름 성분을 코팅하는 기술이 시도하였다^[6]. 중질 성분인 아스팔트를 석탄의 표면에 코팅하기 위하여 경질성분인 등유에 아스팔트를 녹이게 되었고 이러한 혼합 용매에 석탄을 담그고 가열하여 끓이는 과정에서 석탄의 기공 내에 존재하는 수분까지 증발되는 현상을 발견하여 인도네시아 석탄을 대상으로 3 톤/일 규모의 파일럿 플랜트 실험을 거쳐 2010년까지 상업화를 목표로 600 톤/일 규모의 공정을 건설 중에 있다^[6].

유중 건조 기술을 통하여 제거해야 하는 수분은 피 건조물의 종류에 따라 형태가 다르므로 적용 대상에 맞는 최적 운전조건을 선정하는 것이 매우 중요하다. 본 고에서는 중질성분으로 아스팔트 대신 비닐과 같은 고분자 수지를 사용하여 compact하고 경제적인 국산화 공정의 개발에 필요한 기초 연구로서 유중건조법을 검토하였다. 금번의 연구에서는 석탄과 등유 혼합물의 온도, 총량, 비율 등에 대한 최적조건을 도출하기 위한 실험을 수행하였으며, 중질성분으로는 모든 경우에 폴리에틸렌(Poly ethylene)을 0.5 wt.% 첨가하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2-1. 사용시료

본 연구에서 사용한 시료는 인도네시아 석탄으로써, 수분의 함유량이 30%이상인 칼리만탄 지역의 갈탄을 분쇄하여 사용하였으며 상세한 분석 자료는 Table 1에 정리하였다. 도입된 괴탄은 햄머밀로 1차 파쇄한 후 일반분쇄기(GN-DH 621 : 단상 220V 3.75KW, 모터 -5.0HP)로 2차 분쇄하고 체반(Sieve tray)으로 분급하여 1 ~ 3 mm에 해당하는 크기의 석탄을 사용하였다. 필요한 크기로 분급된 석탄은 대기 중에서 건조되는 것을 막기 위하여 비닐 팩에 밀봉 후 글로브 박스에 보관하였

Table 1. Proximate and elemental analysis of Indonesian lignitea.

Proximate analysis based on a raw sample (wt%)				Elemental Analysis based on a dried sample (wt%)				
Moisture	Volatile matter	Ash	Fixed carbon	Carbon	Hydrogen	Nitrogen	Oxygen	sulfur
34.27	33.64	2.01	29.99	70.50	5.14	0.99	21.33	0.03

^aAnalysis method: KS E 3705, 3706, 3707, 3712 coal test method
 Analysis instruments : Tru Spec Elemental Analyzer (LECO Co., USA)
 SC-432DR Sulfur Analyzer (LECO Co., USA)
 TEA-701 Thermogravimeter (LECO Co., USA)

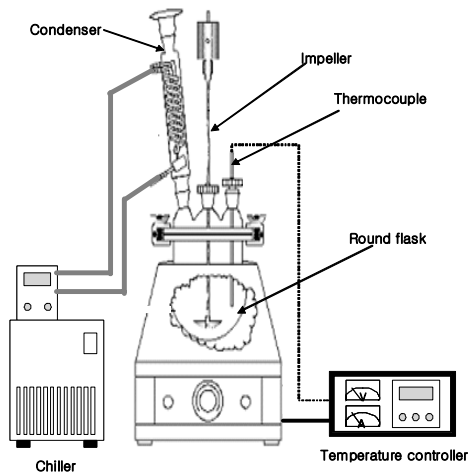


Fig. 1. An experimental apparatus for fry drying of coal.

다. 또한 유증 건조에 사용된 경질유는 현재 시판되는 백등유를 사용하였다.

2-2. 석탄 건조 실험

석탄의 수분 건조 실험은 Fig. 1과 같은 둥근 플라스크에 석탄과 경질성분 및 중질성분을 혼합하여 넣은 후 일정 온도까지 승온시키면서 증발되는 기체를 1분 단위로 응축, 회수한 후 등유성분과 물을 분리하고 각각의 양을 측정하는 방식으로 수행되었다. 실험 장치는 온도를 올리기 위한 전기히터기 및 제어기, 교반을 위한 임펠러, 증발되는 기체의 응축을 위한 응축기 그리고 온도를 측정하기 위한 열전대(k-type)로 구성되어 있다.

둥근 3구 플라스크에 일정량의 석탄과 등유 및 비닐을 혼합한 후 덮개를 덮고 교반 시 움직이지 않도록 클램프로 고정시킨 다음 둥근 플라스크를 전기히터에 넣고 한쪽에는 수분증발과 증류를 위한 콘덴서를 연결하고 또 한쪽에는 교반을 위한 임펠러를 연결 시켰으며 다른 한쪽에는 온도 측정을 위한 열전대(k-type)를 설치하

여 승온시켰다.

유증 건조 실험 후 모든 시료는 30분 간 필터링을 거치고 대기 중에서 24시간 동안 자연건조 하였다. 수분의 함유량 비교는 유증 건조 전 원료 석탄, 유증 건조 후 필터링을 거친 석탄, 24시간 동안 자연건조를 거친 석탄에 대하여 순차적으로 이루어졌으며, 수분 측정기 (Cal-fisher, Metrohm 841 KF Titrando)를 이용하여 석탄에 남아있는 수분의 양을 측정하였다. 이때 측정은 온도가 180℃로 고정되어 있는 기기에 석탄 약 0.03 g을 용기에 담아 5분 동안 수분을 측정 하였다. 수분 측정기에서의 수분 분석은 한 시료 당 각각 2번 씩 실행 하였다.

2-2-1. 최종온도와 석탄/등유 혼합비에 의한 영향

최종 온도가 수분 증발 속도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 120 ~ 145℃의 범위에서 5℃ 단위로 실험을 수행하였다. 이때 석탄과 혼합유는 각각 200 g으로 유지하였고 승온 시간은 30분으로 고정하였다. 석탄과 등유의 최적 혼합비를 선정하기 위하여 총량은 399 g으로 고정하고, 석탄과 등유의 비율을 235 g : 164 g, 205 g : 194 g, 164 g : 235 g 으로 변화시키면서 실험을 수행 하였다. 이때 석탄과 등유의 혼합물은 135℃까지 가열된 후 일정한 온도로 유지되었으며 135℃까지 올리는데 걸리는 시간은 30분으로 고정시켰다.

2-2-2. 석탄/등유 혼합물 무게와 등유량이 저품위탄 건조속도에 미치는 영향

석탄과 등유의 혼합비율을 1 : 1로 고정한 다음, 석탄과 등유 혼합물 무게의 영향을 알아보기 위해 총량을 300 ~ 500 g 까지 100 g씩 양을 증가 시키면서 실험을 수행하였으며, 위 실험과 동일하게 석탄과 등유를 혼합한 후에 승온하였다. 온도와 승온 시간은 위 실험과 동일하게 고정시켰다. 한편, 석탄무게를 200 g으로 일정하게 유지한 상태에서 등유의 혼합량을 100 ~ 400 g으로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 이때 역시 석탄과 등

유의 혼합물은 혼합 후 승온 하였으며, 승온 시간은 위 실험과 동일하게 30분으로 하였다.

2-2-3. 수분 증발속도 향상 실험

석탄으로부터 배출되는 수분의 증발속도를 향상시키기 위한 방안으로써, 질소 분사증발, 진공 증발, 질소와 진공 동시 증발 등에 대해 실험을 수행하였다. 질소 분사 및 질소와 진공 동시 증발에서의 증발은 보통 105℃ 부터 수분 증발이 시작되기 때문에 그 시점에서 N₂를 0.5 L/min로 흘려보냈다. 이때 석탄과 등유는 105 g : 194 g의 비율로 혼합한 후 승온 하였고 온도와 승온 시간은 위 실험과 동일하게 하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 최종 온도의 영향

석탄의 수분은 석탄표면과 상호작용하는 부착수분(Surface moisture), 석탄의 기공 내에 강력한 표면 장력을 가지는 세공수분(Capillary moisture), 그리고 화학결합수분(Hydrated moisture)의 형태로 존재한다. 수분을 석탄으로부터 분리하는데 필요한 에너지는 수분의 존재 형태에 따라 다양하므로 건조를 위하여 설정한 최종온도에 따라 수분을 제거할 수 있는 정도가 달라질 수 있다. Fig. 2에는 최종 온도에 따른 석탄의 수분증발량 변화를 비교하여 나타내었다. 석탄과 등유를 각각 200 g 씩 플라스크에 혼합한 다음 정해진 최종온도까지 30분에 걸쳐 승온하였다. 승온 과정에서 수분이 증발되기 시작하는 온도는 약 100 ~ 105℃로서 Fig. 2의 가로축(x축)은 시간으로 증발된 수분이 최초로 채집되는 시점을 출발시간으로 정하였다. 그림에서 보면 수분이 최초로

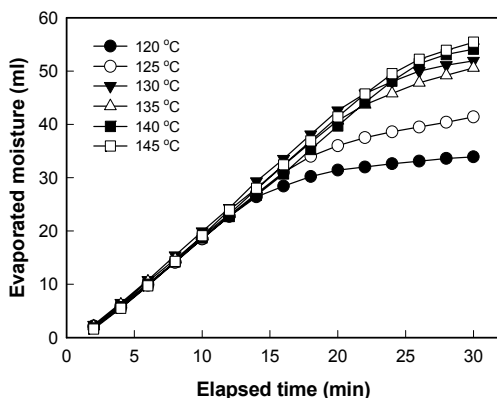


Fig. 2. Effect of final temperature on the evaporation of coal moisture.

채집된 순간부터 14분까지는 6 가지 경우 모두 수분의 증발량이 크게 차이가 없으며 일정한 속도로 배출되는 것을 볼 수 있다. 이 연구에서 얻어진 석탄의 건조는 일정 속도와 감속단계로 구분되어 진행된다는 결과로 Li등^[7]의 연구결과와 일치한다. 한편 Peregrine등^[8]과 Farkas등^[9]은 하수슬러지의 유증건조에서 각각 실험과 이론으로 4 단계의 건조 과정으로 이루어진 메카니즘을 제시하였는데 초기가열단계와 표면수분 증발단계를 일정속도 단계로 통합하고 기름의 기공침투와 미세기공 내부 수분의 증발을 속도감소 단계로 보면 동일한 해석이 가능하다. 이를 보다 상세히 검토해보면 일정한 속도로 수분이 증발하는 것은 주로 부착수분에 의한 것으로서 석탄의 입자 외부를 둘러싸고 있는 수분이 외부의 기름으로부터 열을 공급받아서 기화되기 때문이다. 외부에 노출된 석탄의 표면은 일정하므로 증발속도도 일정하게 이루어지는 것으로 판단된다. 이 때 석탄 외부의 수분이 증발하게 되면 석탄의 내부에 존재하는 수분 중에서 석탄의 표면과 결합력이 약한 수분(부착수분)은 석탄의 외부 표면으로 쉽게 확산이 될 수 있으므로 석탄의 외부를 둘러싼 수분은 항상 일정한 면적을 가지게 되고 외부에 노출된 수분의 면적이 일정한 시간 동안은 증발 속도가 일정하게 유지되는 것으로 판단할 수 있다. 최종 응축이 시작된 후 14분이 지나게 되면 최종온도에 따라 증발속도가 달라지는 경향을 나타내고 있는데 최종온도가 120℃와 125℃의 경우는 최종온도 130℃ 인 경우와는 많은 차이를 보이고 있으나 최종온도 130℃ 이상인 경우에는 수분의 증발량에 큰 차이가 나타나지 않는다. 따라서 석탄 안에 있는 수분을 충분히 증발시키기 위해서는 최종온도가 최소한 130℃ 이상일 필요가 있다.

3-2. 석탄과 등유 혼합비율의 영향

석탄으로부터 수분이 증발하는데 필요한 열에너지를 전달하는 물질은 함께 혼합한 등유이다. 또한 Peregrina 등^[10]이 ASPEN 상용 수치모사 프로그램(Aspen Tech사)을 이용하여 모사한 결과 유증 건조의 운전비를 결정하는 가장 큰 요인이 기름의 사용량이라고 지적하였듯이 등유의 사용량은 건조조건 뿐 만 아니라 공정의 경제성에도 매우 중요한 변수이다. 유증 건조 방식에서 혼합된 시료를 가열하면 석탄이나 물보다 비열이 작은 등유의 온도가 먼저 상승하게 되고, 주변에 있는 석탄이나 수분에 에너지를 전달하여 물분자가 수분의 끓는 점 이상의 온도로 상승하고 표면과의 결합력을 이길 수 있을 만큼 운동에너지를 가지게 될 때 기화가 일어나게 된다. 본 고에서는 열에너지를 전달하는 등유와 열에너지를 전달받는 석탄의 혼합비율을 변화시키면서 석탄의 수분

증발량 변화를 관찰하여 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 보면 석탄의 양이 증가할수록 수분의 증발이 원활히 이루어지고 있다는 것을 알 수 있는데 열에너지를 공급하는 등유의 양이 상대적으로 적어지는(석탄의 양이 많아지는) 상황에서 수분의 증발율이 증가한다는 것은 열에너지의 전달이 수분의 증발에 미치는 영향보다 증발한 수분이 등유 속에서 배출되기 위하여 필요한 에너지가 더 크다는 것을 의미한다. 이러한 현상은 수분과 함께 배출된 등유의 양에서 확인을 하였는데 플라스크에 등유만 넣고 135℃까지 가열하였을 때 등유의 배출이 전혀 없었지만 물과 등유를 혼합하였을 때는 등유와 수분이 함께 배출되는 것을 확인하였다. 또한 배출된 수분의 양이 많을수록 배출된 등유의 양도 많아서 수분이 증발하면서 등유도 함께 배출되는 것으로 판단된다. 따라서 유증 건조 메카니즘이 작용하는 범위 내에서 가능하면 적은 등유를 사용하는 것이 유리할 것으로 판단된다. 물론 건조 뿐 만 아니라 건조 후 등유의 회수, 성형을 위하여 이송이 필요한 데 이 때 가능한 낮은 점도 상태를 주어야 하므로 등유의 사용량을 무한정 낮추기는 어려운 것으로 사료된다.

3-3. 석탄과 등유 혼합물 무게의 영향

석탄과 등유 혼합물의 무게에 대한 영향은 유증건조 공정에서 일정한 규모의 시설로 단위시간당 처리할 수 있는 양을 측정하기 위하여 수행되었다. 석탄과 등유의 혼합비를 1 : 1로 고정하고 혼합물의 전체 무게를 300 g, 400 g, 500 g으로 변화시키면서 수분의 증발량을 측정하여 Fig. 4에 도시하였다. 최종온도는 135℃로 설정하였고 30분에 걸쳐 서서히 승온하였다. 실험 결과에서

보면 수분이 증발되기 시작한 후 일정한 시간 동안에는 혼합물의 무게가 적을수록 수분의 증발율이 높지만 약 18분이 지난 후부터는 이러한 경향은 반대로 바뀌게 된다. 증발 시간이 25분을 지나게 되면 혼합물의 양이 많을수록 수분 증발율이 높아지게 되어 많은 양의 혼합물을 처리할 경우에 더 높은 증발율을 얻을 수 있다. 하지만 여기에 필요한 시간은 더 많이 소요된다는 것을 알 수 있다. 초기 증발에서 혼합물의 무게가 작을수록 수분의 증발율이 더 높은 것은 피 가열물인 혼합물의 양이 적어서 더 빠른 속도로 온도가 상승될 수 있기 때문인 것으로 보이며 시간이 길어지면 혼합물의 양이 많을수록 수분의 증발율이 높은 것은 가열된 혼합물의 양이 많을수록 열용량이 증가하므로 수분이 포함된 석탄의 주변 온도가 균일하게 높은 온도를 유지하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 짧은 시간에 일정한 함량까지 수분을 증발시키기 위해서는 처리량을 줄이는 것이 필요하고, 반대로 시간이 많이 소요되더라도 수분의 함량을 최대한 낮추기 위해서는 처리량을 늘리는 방향으로 공정을 운전하여야 한다.

3-4. 등유량이 저품위탄 건조속도에 미치는 영향

석탄의 양은 105 g으로 고정시키고 등유의 양만 변화시켰을 때 수분증발량을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 나타나듯이 등유량이 증가할수록 수분의 증발 속도와 최종 증발량이 낮아짐을 알 수 있다. 석탄에서 수분이 증발하는 것은 등유로부터 석탄으로 전달되어진 열이 석탄 내부의 수분을 기화시키고, 여기서 발생된 수증기가 등유층을 통과하여 외부로 방출되기 때문이다. 일정한 무게의 석탄을 처리하면서 등유의 양을 증가시킨

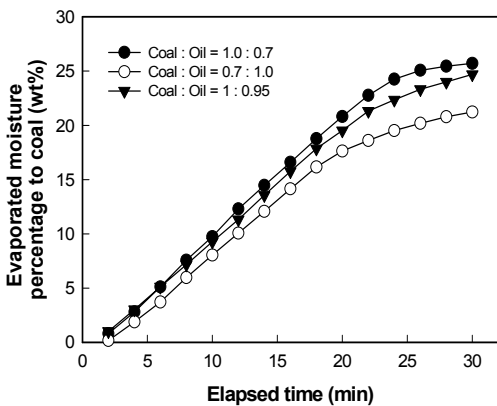


Fig. 3. Effect of mixing ratio of coal and oil on the evaporation of coal moisture.

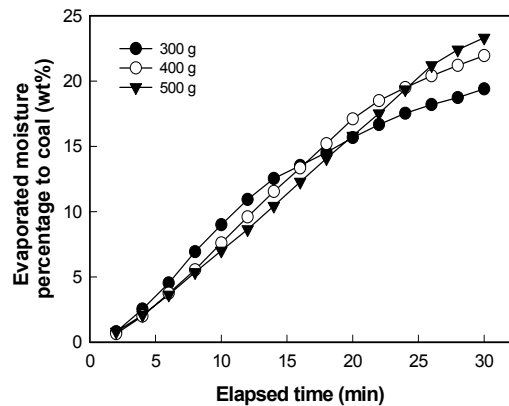


Fig. 4. Effect of total weight on the evaporation of coal moisture.

다는 것은 석탄으로 전달하는 열을 더 늘릴 수 있다는 장점이 되는 반면에 기화된 수증기가 외부로 방출되기 위하여 통과해야하는 액체층이 증가하는 단점이 되기도 한다. 실험 결과에서 등유의 양이 증가할수록 수분의 증발속도와 양이 감소한다는 점을 감안한다면 열전달 측면보다는 수증기의 방출에 장애로 작용하는 점이 더 큰 것으로 볼 수 있다. 따라서 등유의 양을 가능한 줄이는 것이 증발에 유리하고 가열에 필요한 에너지의 소모량도 줄이는 효과가 있을 것으로 판단된다. 하지만 공정을 연속적으로 유지하기 위해서는 등유와 석탄 혼합물의 이송이 필요하므로 등유에 필요한 에너지를 함께 고려한 최적 혼합비를 선택하여야 할 것이다.

Fig. 6에는 등유량을 194 g으로 고정시키고 석탄량을 변화 시켰을 때 수분증발속도 및 증발량을 관찰하여 나타내었다. 그림에서 세로축(y축)은 석탄에서 증발될 수 있는 수분의 양에 대하여 현재까지 증발된 수분의 양을 비율로 나타낸 것이다. Fig. 6에서 보듯이 석탄의 양이 줄어들수록 수분의 증발속도는 현저히 증가하여 53 g의 석탄을 사용한 경우에는 10분 이내에 모든 수분이 증발하는 것으로 나타나고 있지만 205 g의 석탄을 사용한 경우에는 30분 이상의 시간이 지나야 완전한 증발이 이루어지는 것을 볼 수 있다. 등유의 양을 일정하게 유지시킨 상태에서 기화된 수증기가 외부로 방출될 때 받는 저항은 석탄의 사용량에 관계없이 일정하지만 단위 석탄량 당 등유로부터 전달 받는 열에너지는 석탄의 사용량이 적을수록 증가(열전달 속도가 증가)하므로 증발속도가 빨라지는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 앞에서 관찰한 등유량 변화의 영향과도 일치하는데 증발속도를 향상시키기 위해서는 동일한 양의 등유에서 석탄의 혼합량을 줄이는 것이 필요하고 동일한 양의 석탄에

서는 등유의 혼합량을 줄이는 것이 유리한 것으로 판단된다. 한편 동일한 등유량과 석탄량일지라도 증발기의 단면적을 넓게 하고 높이를 줄이는 것이 기화된 수증기의 방출저항을 줄이는 데 유리할 것으로 사료된다.

3-5. 여러 가지 방법에 의한 증발량 변화

상기의 실험들은 석탄과 등유를 비이커에 혼합한 다음 임펠러를 사용하여 일정한 속도로 교반하는 상태에서 이루어졌다. 앞의 실험들에서 등유와 석탄의 혼합비 및 혼합량이 수분의 증발에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었으며 기화된 수증기가 방출되기 위하여 등유를 통과할 때 저항을 받는다는 점으로 볼 때 교반속도 또는 진공이 수분의 증발속도를 향상시킬 것으로 기대하였다. 단순 교반과 질소를 이용한 교반, 진공 또는 진공과 질소교반 동시적용과 같이 다양한 혼합방법을 적용한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 질소를 혼합물 내부에 분사하는 방법과 상부에 진공을 사용하여 기화된 수증기의 방출을 원활히 하도록 유도한 경우의 증발량은 모두 단순교반의 경우보다 월등히 향상되었다. 특히 초기 증발량에서 큰 차이를 보였으며 시간에 따른 증발속도도 단순교반의 경우와 비교하여 다소 증가하였다. 수분 증발이 시작되고 12분이 지난 시점에서는 단순교반의 경우 뿐만 아니라 질소를 이용한 교반과 진공의 경우에도 추가의 증발이 거의 나타나지 않아서 최종증발량은 증발이 시작된 초기에 많은 영향을 받는 것을 알 수 있다. 한편 진공과 질소교반을 동시에 적용한 경우에는 두 가지 방법의 상승작용이 나타나지 않고 오히려 한 가지만 적용하였을 때보다 더 낮은 증발량을 보이고 있다. 이는 주입된 질소에 의하여 진공도가 낮아지므로 상호 보완 작용이 아니라 방해 작용을 하는 것으로 생각된다. 질소

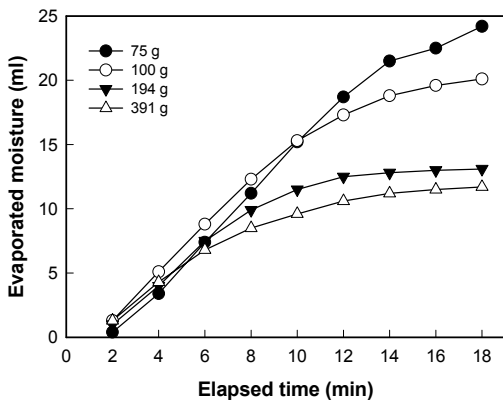


Fig. 5. Evaporation of coal moisture according to oil amount.

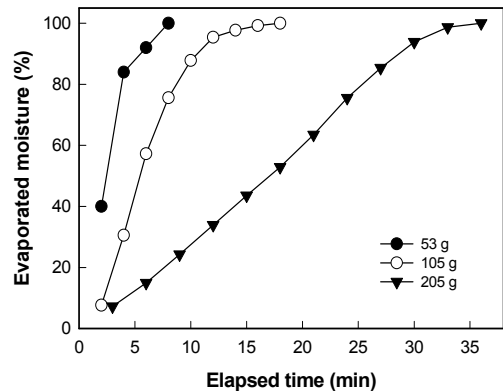


Fig. 6. Evaporation of coal moisture according to coal amount.

를 주입하는 경우가 임펠러에 의한 교반의 경우보다 더 높은 증발량을 나타내는 것은 질소 주입이 임펠러를 사용할 때보다 석탄 입자와 입자 사이를 더 효과적으로 벌어서 하기 때문에 증유와의 접촉 면적이 넓어지게 되어 열전달 면적 및 수증기 방출 면적의 증대가 생기기 때문인 것으로 판단된다. 그러므로 석탄의 건조를 효과적으로 진행하기 위하여 석탄 입자 사이의 간격을 확보할 수 있는 교반 방식을 적용할 필요가 있다.

한편 석탄과 증유가 혼합된 플라스크 내부에 2개의 열전대를 다른 위치에 설치하여 온도를 측정하였다. 하나는 석탄더미의 내부에 설치하고 또 다른 하나는 증유의 중심에 설치하여 온도가 상승하는 동안 연속적으로 측정한 결과는 Table 2와 같다.

표에서 볼 때 증유의 온도는 설정한 상승속도를 정확하게 따라가고 있지만 석탄 내부의 온도는 증유의 온도가 110°C에 이를 때까지 약 5 ~ 6°C 낮은 온도를 나타내고 있다. 이와 같은 온도 차이는 석탄과 석탄 내에 존재하는 수분의 비열이 증유의 비열보다 높아서 온도 변

화가 민감하게 나타나지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 증유의 온도가 110°C를 넘게 되면 석탄과 증유의 온도 차이가 더 커지게 되어 17°C까지 벌어지게 된다. 두 온도의 차이가 급격히 커지게 되는 것은 110°C부근의 온도에서부터 석탄 내에 존재하는 수분의 증발이 시작되어 석탄의 온도는 증발 잠열에 의한 열량 손실 때문에 상승 속도가 둔화되기 때문이다. 이러한 증발 잠열은 석탄의 온도 상승을 방해하게 되어 수분의 증발이 둔화되게 되는데 격렬한 교반을 통하여 증유와 석탄의 온도 차이를 줄이게 되면 증발 잠열 손실에 의하여 수분의 증발 속도가 둔화되는 것을 방지할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

수분의 함량이 높은 저품위탄을 건조시키기 위하여 유증 건조 방법을 사용하였다. 최적의 건조조건을 선정하기 위하여 최종온도, 석탄과 증유의 혼합비율, 석탄 또는 증유의 양, 혼합물의 총량, 교반 방법에 대한 영향을 파악하였다.

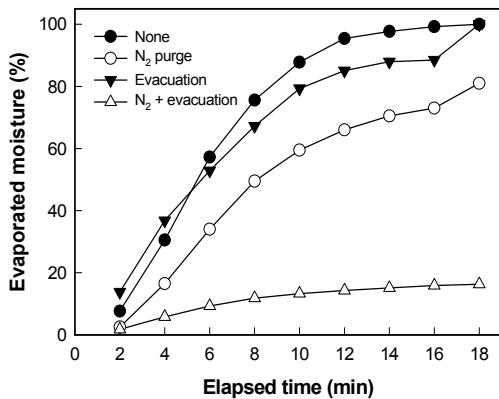


Fig. 7. Comparison of evaporation amount according to various methods.

- 1) 최종온도가 120°C이하일 때는 완전한 증발이 이루어지지 않았으며, 130°C 이상인 경우에는 수분의 증발량에 큰 차이가 나타나지 않는다. 따라서 석탄 안에 있는 수분을 충분히 증발시키기 위해서는 최종온도가 최소한 130°C 이상일 필요가 있다.
- 2) 석탄과 증유의 혼합비율을 달리하였을 때 석탄의 양이 증가할수록 수분의 증발이 원활히 이루어지고 있다. 열에너지의 전달이 수분의 증발에 미치는 영향보다 증발한 수분이 증유 속에서 배출되기 위하여 필요한 에너지가 더 크다는 것을 의미한다.
- 3) 혼합물의 양이 많으면 건조 후 석탄의 수분 함량이 더 낮아지지만 시간이 많이 소요되고 처리량이 적으면 수분 함량을 일정한 수준 이하로 낮추기 어렵

Table 2. Temperature changes in the coal and oil during fry drying

Oil	Coal	Oil	Coal	Oil	Coal
30	30	70	62	110	104
35	32	75	67	115	107
40	35	80	74	120	109
45	39	85	80	125	125
50	42	90	85	130	116
55	45	95	88	135	121
60	51	100	94	140	123
65	57	105	99		

지만 짧은 시간에 일정한 함량까지 수분을 증발시킬 수 있다.

- 4) 등유와 석탄 혼합물의 유동성이 확보되는 한도 내에서 증발속도와 증발량을 향상시키기 위하여 등유의 양을 가능한 줄이는 것이 유리하다.
- 5) 질소를 이용한 교반과 진공을 적용한 경우에는 증발량이 향상되었다.

후 기

본 논문은 산업자원부 전력산업연구개발사업의 지원에 의해 수행하였습니다. 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. 일본 NEDO발표자료, “세계의 석탄 자원”, 2003.
2. 윤용승, 이승중 “석탄발전소 발생 CO₂의 지하저장 기술개발 현황”, 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터, 2009.
3. 문승현, 이인철 “석탄활용에서의 수분제어”, 한국동력자원연구소, 1990.
4. 천병식, Kumar S, 박영숙, 김정용, 신상욱, 신방용, 도종남, 김영일, “유온감압탈수법으로 처리된 연료의 화석연료 대체재료로서의 활용”, Korean Geo-Environmental Conference 2008, Sep. 19, 107.
5. Hickey H.; MacMillan B.; Newling B.; Ramesh M; Eijck P.V.; Balcom B., Magnetic resonance relaxation measurements to determine oil and water content in fried foods, Food Research International, 2006, 39, 612.
6. Sugita S.; Deguchi T.; Shigehisa T. "개질 갈탄(UBC) 제조 프로세스 개발“, 고베제강기보, 2003, 53(2), 41.
7. Li X.; Song H.; Wang Q.; Meesri C.; Wall T.; Yu J. Experimental study on drying and moisture re-adsorption kinetics of an Indonesian low rank coal Journal of Environmental Sciences Supplement, 2009, 127.
8. Peregrina C.; Arlabosse P.; Lecomte D.; Rudolph V., Heat and mass transfer during fry-drying of sewage sludge, Drying Technology, 2006, 24, 797.
9. Farkas B.E.; Singh R.P.; Rumsey T.R., Modeling heat and mass transfer in immersion frying I. Model development, Journal of Food Engineering, 1996, 29, 211.
10. Peregrina C.; Rudolph V.; Lecomte D.; Arlabosse P., Immersion frying for the thermal drying of sewage sludge: An economic assessment, Journal of Environmental Management, 2008, 86, 246.