

기류건조기를 이용한 고수분 석탄의 건조 특성

김상도[†] · 이시훈 · 임영준 · 최호경 · 임정환 · 전동혁 · 유지호

한국에너지기술연구원 청정석탄센터
305-343 대전광역시 유성구 가정로 152
(2011년 4월 18일 접수, 2011년 5월 11일 채택)

Drying Characteristic of High Moisture Coal using a Flash Dryer

Sang Do Kim[†], Si Hyun Lee, Young Joon Rhim, Ho Kyung Choi, Jeong Hwan Lim, Dong Hyuk Chun and Ji Ho Yoo

Clean Coal Center, Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea
(Received 18 April 2011; accepted 11 May 2011)

요 약

5 kg/hr 벤치규모 기류건조기를 이용한 고수분 석탄의 건조 특성을 알아보았다. 도착시료 기준으로 원료 석탄의 수분 함량 및 발열량은 각각 29.74 wt%, 4,270 kcal/kg이다. 가스유입온도 및 가스유입속도는 각각 400~600 °C 및 10~20 m/sec이다. 원료 석탄의 입자크기는 100~2,000 μm 로 분쇄 및 분급하였다. 원료석탄의 수분제거율은 가스유입온도는 증가하고 가스유입속도는 감소할수록 급격하게 증가하였다. 건조석탄의 발열량은 5,100~5,900 kcal/kg으로 증가하였다. 기류건조를 통한 고수분 석탄 표면에서의 발생하는 화학적인 변화를 알아보기 위하여 FT-IR 스펙트럼 분석을 실시하였다. 그 결과 하이드록실, 카르복실 및 카보닐 피크에서 주요한 변화가 일어나는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract – Drying characteristic of high moisture coal using a 5 kg/hr bench scale flash dryer was investigated. Moisture content and heating value of raw coal as received basis were 29.74 wt% and 4,270 kcal/kg, respectively. Gas inlet temperature and gas inlet flow rate were 400~600 °C and 10~20 m/sec, respectively. The raw coal was ground and classified to the particle size range of 100~2,000 μm . The moisture removal rate of raw coal was dramatically increased with increasing gas inlet temperature and decreasing gas inlet flow rate. The heating value of dried coal was increased to 5,100~5,900 kcal/kg. To examine the chemical change on the surface of high moisture coal during flash drying process, FT-IR spectral analysis was carried out. As a result, major changes in hydroxyl, carboxyl and carbonyl peak was confirmed.

Key words: High Moisture Coal, Drying, Flash Dryer, Moisture Removal, Heating Value

1. 서 론

저등급석탄으로 분류되는 갈탄 및 아역청탄은 전세계 석탄 매장량의 50% 이상을 차지할 정도로 매장량이 풍부하며 가격도 고등급 석탄인 역청탄에 비해 1/4 정도로 낮다. 그러나 저등급석탄은 수분 함량이 높아 발전소에 직접 적용할 경우 수분을 증발시키는데 많은 열량이 소모되기 때문에 발전효율 저하를 가져오며, 기공이 발달하고 산소를 함유한 카르복실기 함량이 높아 자연발화 가능성이 높기 때문에 장기간 저장 및 수송에 한계점을 갖고 있다.

이러한 문제의 해결 방안으로 석탄의 건조를 통해 저등급석탄을 고품위화하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있다. 기류건조 방식을 이용한 호주 BCB(Binderless Coal Briquetting)[1,2], 유중건조 방식을 이용한 일본 UBC(Upgrading Brown Coal)[3-5], 스팀 유동층을 이용한 독일 WTA(fluidized-bed drying with internal water heat utilization)[6], 유동층을 이용한 미국 DryFineTM 공정[7]이 개발되

었다.

이중 BCB(Binderless Coal Briquetting) 기술은 기류건조(flash drying) 또는 급속건조를 이용해 석탄을 건조하는 기술이다. 이 기술은 고온 가스가 고수분 석탄과 직접 접촉하여 건조되는 것으로 체류시간은 1초 이하로 매우 짧은 접촉 시간 동안 건조가 이루어진다. 기류건조기는 건조시간이 짧고, 별도의 수송장치가 필요 없으며, 장치가 간단하고 운전과 제어가 비교적 용이하며, 운전 유지보수 비용이 적고, 건설비가 적게 소요된다는 장점을 가지고 있다[8,9]. 단점으로는 건조시간이 짧기 때문에 비교적 건조속도가 빠른 물질이 어야만 하며, 입자크기는 작을수록 좋은데 적당한 것은 1,000~2,000 μm 정도로 물질에 따라 응집이 일어날 수 있기 때문에 이에 대한 적절한 대책이 필요하다.

본 연구에서는 벤치 규모의 기류건조기를 이용한 운전온도, 입자크기 및 유입속도 변수에 따른 수분제거율 및 발열량 변화 특성을 고찰하였다. 또한 기류건조시 고수분 석탄 표면에서의 화학적인 변화를 알아보기 위하여 FT-IR 스펙트럼 분석을 사용하였다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: sdkim@kier.re.kr

2. 실험 방법

본 실험에 사용한 석탄은 내몽고에서 채굴한 Meng Tai 석탄을 사용하였다. 실험용 석탄의 공업분석, 원소분석 및 발열량 분석결과를 Table 1에 나타내었다. 수분함량은 29.74 wt%, 회분은 10.51 wt%이며, 산소함량은 21.42 wt%이다. 발열량은 도차시료기준으로 4,270 kcal/kg이고, 건조탄 기준으로 5,730 kcal/kg이다.

고수분 석탄을 건조하기 위한 실험장치로 Fig. 1과 bench 규모의 기류건조기를 설치하였다. 실험장치는 고온가스 공급을 위한 LPG 버너, 원료 석탄 공급 피더, 고수분 석탄의 건조가 이루어지는 수직관, 기체와 고체를 분리하기 위한 사이클론, 여과집진장치 등으로 구성되어 있다. 수직관의 직경은 40 mm, 높이는 5,000 mm, 처리량은 5 kg/hr 규모이다.

실험은 LPG 버너를 이용해 고온가스를 생성시키며, 조절된 온도에 도달하면 고수분의 석탄을 공급 한다. 고수분 석탄은 수직관을 통해 이동되면서 건조가 이루어지며, 싸이클론에서 포집되어 하부

의 포집탱크에 저장이 된다.

가스 유입온도는 원료 석탄이 공급되는 피더 전단의 측정값을 이용하였고, 온도 범위는 400~600 °C로 하였다. 수직관을 통과하는 가스 유입유속은 10~20 m/sec가 되도록 유량을 조절하였다.

원료 석탄은 분쇄/분급을 통해 일정범위의 입자크기를 갖도록 준비되었다. 실험조건에 따라 입자크기 범위는 100~300 μm , 300~500 μm , 500~1,000 μm , 1,000~2,000 μm , 100~2,000 μm 범위 등으로 실험을 수행하였다. 100~2,000 μm 로 실험한 경우 건조탄을 4단계로 분급하여 각 입자크기별로 수분함량 및 발열량 등을 측정하였다. 수분함량 및 발열량은 실험 후 바로 측정을 실시하였다.

수분함량 측정은 Karl Fischer 적정법을 이용한 841 KF Titrando (Metrohm사, 스위스), 발열량 측정은 Bomb Calorimeter(Parr Model 6400EF, 미국), 공업분석은 TGA 701 Thermogravimeter(LECO Co., 미국), 원소분석은 TruPsec Elemental Analyzer(LECO Co., 미국), 황 분석은 SC-432DR Sulfur Analyzer(LECO Co., 미국)를 사용하였다.

3. 결과 및 검토

Table 2는 건조된 석탄의 수분함량 결과를 나타낸 것이다. 입자크기는 100~2,000 μm 범위로 하였는데, 실험 종료 후 건조 석탄을 4단계로 분급하여 수분함량을 측정하였다. 전체 입자크기 범위에 대한 수분함량은 유입온도에 따라 6.99~6.22 wt%로 큰 차이가 없었다. 그러나 4단계로 분급한 입자크기별 수분함량 측정 결과 유입온도 및 입자크기에 따라 수분함량이 최소 4.92 wt%에서 최고 9.44 wt%로 차이를 나타내었다.

Table 3은 건조탄의 공업분석, 원소분석, 발열량 분석 결과를 나타낸 것이다. 건조탄의 수분함량은 7 wt% 이하로 감소하였으며, 휘발분, 회분 및 고정탄소는 상대적으로 원료 석탄에 비교하여 증가하였다. 원소분석결과를 보면 산소함량이 약간 감소하는 것으로 나타났다. 이는 석탄의 수분을 형성하고 있는 하이드록실기, 카르복실기 및 카보닐기 등이 감소하기 때문인 것으로 판단되는데, 후에 설명할 FT-IR 분석 결과를 통해서 확인할 수 있었다.

Table 4는 수분이 없는 조건에서 공업분석 결과를 나타낸 것이다. 원탄의 휘발분 함량이 52.39 wt%인데, 건조후에는 휘발분 함량이 43 wt%로 약 10 wt% 정도 감소한 것으로 나타났다. 이는 고수분 석탄에 포함되어 있는 휘발분이 고온가스와 접촉하면서 일부 열분해가 되어 감소하는 것으로 판단된다.

Fig. 2는 석탄입자크기별 건조된 석탄의 수분제거율 및 발열량을 보여주고 있다. 초기 원료 석탄은 석탄 입자를 크기별로 4단계로 분급하여 실험을 실시한 것이다. 가스 유입온도는 400 °C, 가스 유입유속은 20 m/sec로 수행하였다. 공급되는 석탄 입자크기별로 따라 수분제거율은 크게 변화했는데, 100~300 μm 일 경우에는 91.4%로

Table 1. Analyses of coal sample

| Coal Name | Meng Tai |
|----------------------------------|----------|
| Proximate analysis (wt%) | |
| Moisture | 29.74 |
| Volatile matter | 27.83 |
| Ash | 10.51 |
| Flixed carbon | 31.92 |
| Ultimate analysis (wt%) | |
| Carbon | 62.73 |
| Hydrogen | 4.11 |
| Nitrogen | 0.95 |
| Sulfur | 0.28 |
| Oxygen | 21.42 |
| Heating value analysis (kcal/kg) | |
| As received base | 4,270 |
| Dry base | 5,730 |

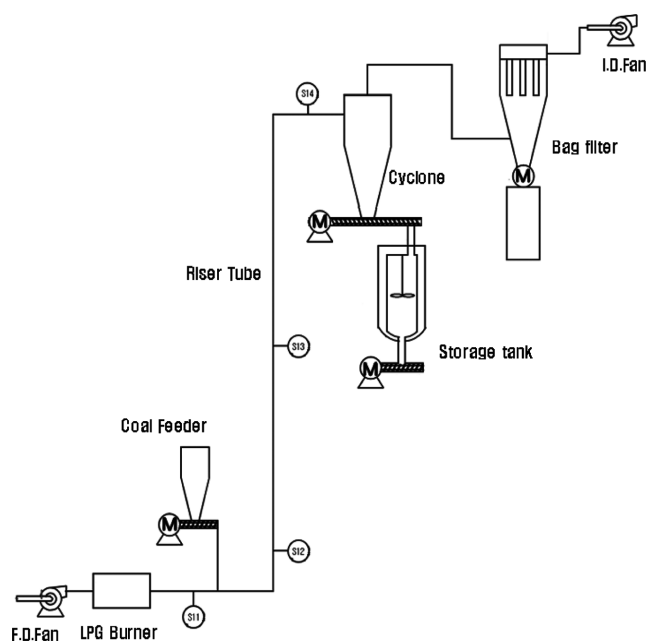


Fig. 1. Experiment equipment.

Table 2. Moisture content of dried coal

| Gas inlet temperature (°C) | | 400 | 500 | 600 |
|---------------------------------|-----------|------|------|------|
| Particle size (μm) | 100~2000 | 6.99 | 6.64 | 6.22 |
| | 100~300 | 6.57 | 5.74 | 4.92 |
| | 300~500 | 7.02 | 6.19 | 5.24 |
| | 500~1000 | 8.21 | 6.77 | 5.61 |
| | 1000 over | 9.44 | 8.11 | 7.53 |

Table 3. Analysis of dried coal

| Sample | Item | Ultimate analysis(wt%) | | | | Proximate analysis(wt%) | | | | | Heating Value (kcal/kg) |
|----------------------------|------|------------------------|-----------------|-------|--------------|-------------------------|----------|----------|--------|--------|-------------------------|
| | | Moisture | Volatile matter | Ash | Fixed Carbon | Carbon | Hydrogen | Nitrogen | Oxygen | Sulfur | |
| Raw coal | | 29.74 | 27.83 | 10.51 | 31.92 | 62.73 | 4.11 | 0.95 | 21.42 | 0.28 | 4,269 |
| Inlet gas temperature (°C) | 400 | 6.61 | 38.1 | 14.16 | 41.13 | 61.05 | 4.05 | 1.08 | 19.56 | 0.10 | 5,537 |
| | 500 | 6.54 | 38.19 | 15.17 | 40.1 | 60.05 | 4.03 | 1.08 | 19.56 | 0.11 | 5,586 |
| | 600 | 6.1 | 38.74 | 14.64 | 40.52 | 61.45 | 4.22 | 1.10 | 18.5 | 0.09 | 5,636 |

*Measuring basis: As received

Table 4. Ultimate analyses at water free basis

| | Volatile matter(wt%) | Ash(wt%) | Fixed Carbon(wt%) |
|----------|----------------------|----------|-------------------|
| Raw coal | 52.39 | 8.41 | 39.2 |
| 400 °C | 43.82 | 13.41 | 42.77 |
| 500 °C | 42.83 | 14.36 | 42.81 |
| 600 °C | 42.93 | 14.41 | 42.66 |

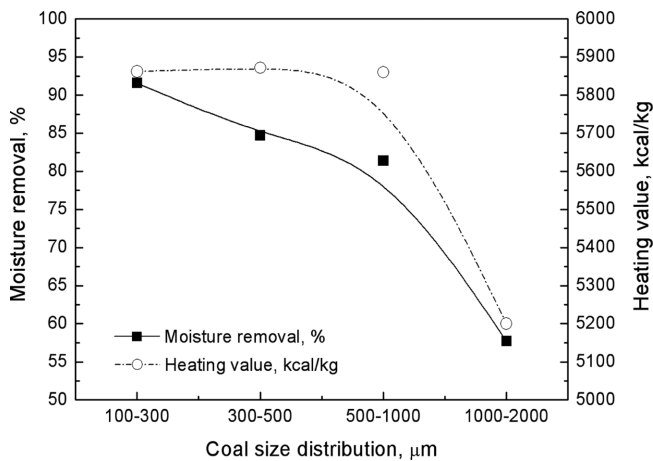


Fig. 2. Moisture removal and heating value at different particle sizes.

높은 수분제거율을 나타내었다. 입자크기가 커질수록 수분제거율은 감소하였는데, 1,000 μm 이하에서는 수분제거율이 81% 이상을 유지하였지만, 입자크기가 1,000~2,000 μm 으로 커지게 되면 수분제거율이 57.7%로 감소하였다. 이는 석탄 입자크기가 작을수록 표면적이 더욱 커지게 되고, 큰 입자들에 비해 단위 중량당 건조가 더

잘 이루어지기 때문에 수분제거율이 높게 나타났다.

발열량은 1,000 μm 이하의 입자크기 범위에서는 5,860~5,872 kcal/kg로 유사하게 나타났지만, 1,000 μm 이상의 입자크기 범위에서는 5,130 kcal/kg로 급감하였다. 석탄의 발열량은 입자크기보다는 수분함량에 따라 결정되며, 입자크기가 커질수록 수분제거율이 작아지기 때문에 발열량은 감소하는 것으로 판단된다.

Fig. 3은 유입온도와 입자크기분포에 따른 수분제거율 및 발열량 결과를 보여주고 있다. 원료 석탄 입자크기는 100~2,000 μm 이며 건조 후 4단계로 분급하여 수분함량 및 발열량을 측정한 결과이다. 유입가스온도가 증가할수록 수분제거율은 서서히 증가하고 있는데, 유입온도가 400 °C 일 경우 건조탄 입자크기가 1,000 μm 이상부터 100~300 μm 로 감소함에 따라 수분 제거율은 68.3%에서 77.9%로 증가하였고, 유입온도가 500 °C일 경우 건조탄 입자크기가 1,000 μm 이상부터 100~300 μm 로 감소함에 따라 수분제거율은 72.7%에서 80.7%로 증가하였다. 유입온도가 600 °C일 경우 건조탄 입자크기가 1,000 μm 이상부터 100~300 μm 로 감소함에 따라 수분제거율은 74.7%에서 83.4%로 증가하였다. 유입온도가 증가하고 입자크기가 감소함에 따라 발열량은 증가하는 경향을 나타내었고, 5,600 kcal/kg 이상의 발열량을 갖는 것으로 나타났다. 입자크기가 1,000 μm 이하의 입자크기에서는 발열량의 유입온도에 따라 크게 차이가 나지 않는 것으로 나타났다. 그러나 1,000 μm 이상의 입자크기에서는 유입온도가 증가함에 따라 발열량이 비교적 큰 차이를 나타내었다.

Fig. 2의 결과에서 보았을 때 입자크기별로 분급하여 건조를 하게 되면 운전온도가 400 °C, 입자크기가 1,000 μm 이하인 경우 수분제거율이 80% 이상으로 나타났지만, Fig. 3의 결과는 운전온도가 600 °C 이상, 입자크기가 1,000 μm 이하인 경우 수분제거율이 80% 이상으로 나타났다. 1,000~2,000 μm 입자크기만 분급하여 실험할

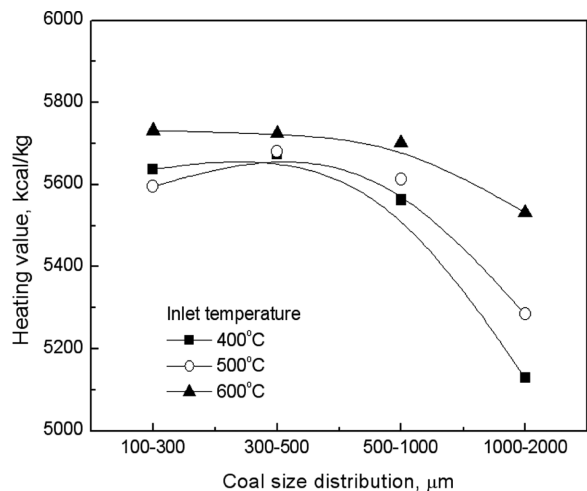
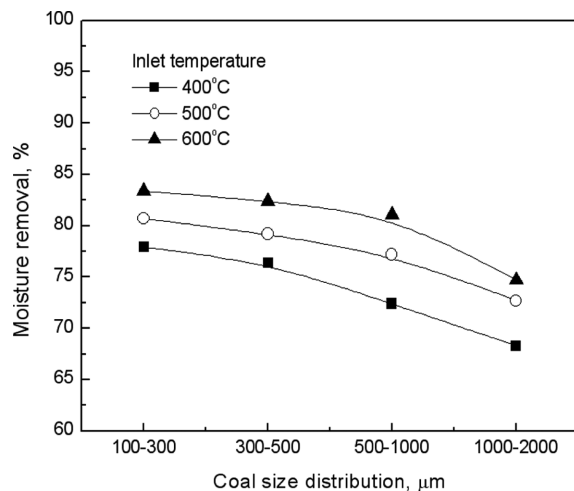


Fig. 3. Moisture removal and heating value to inlet temperature (Gas flow rate : 20 m/sec).

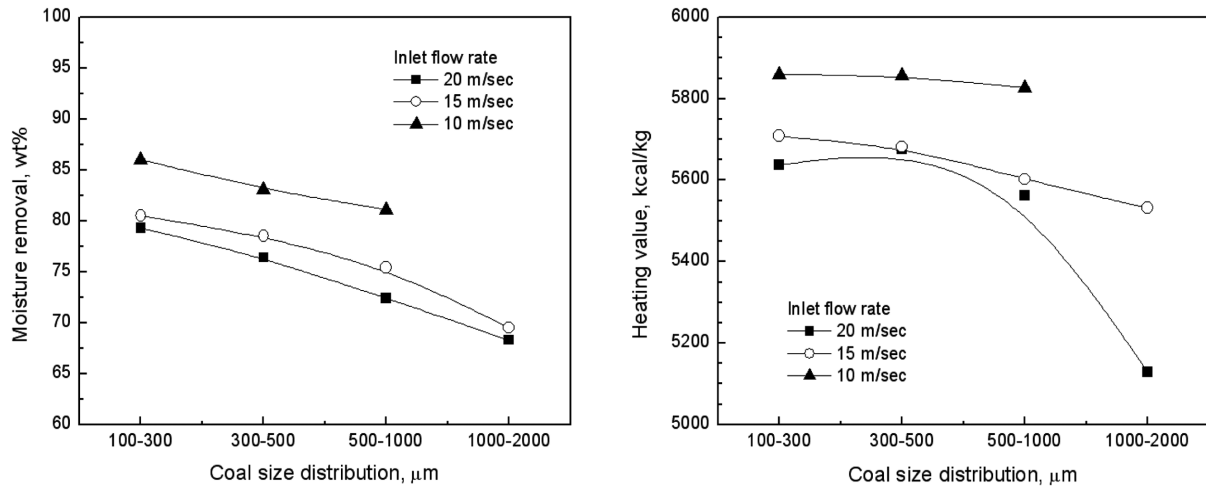


Fig. 4. Moisture removal and heating value to inlet flow rate.

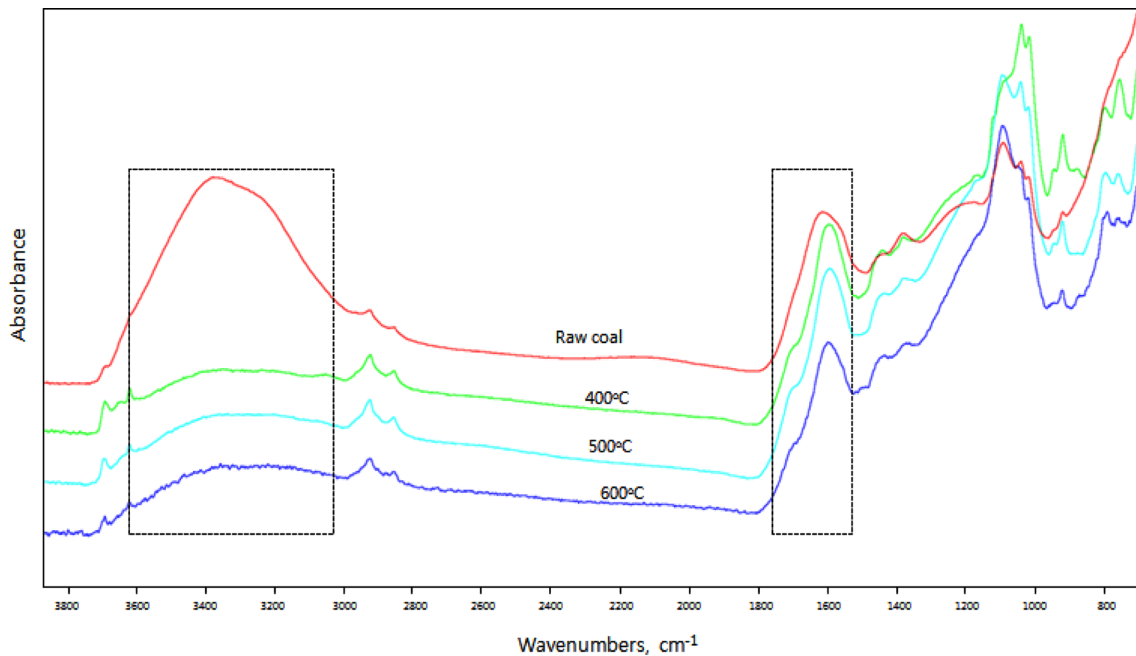


Fig. 5. FT-IR analysis of raw coal and dried coal.

경우 수분제거율은 60% 이하로 감소하였지만, Fig. 3의 결과에서는 1,000 μm 이상에서도 70% 정도의 수분제거율을 나타내었다.

이상의 결과에서 보았을 때 높은 수분 제거율을 얻기 위해서는 입자크기를 1,000 μm 이하로 분급하여 건조하는 것이 우수한 건조 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상되지만, 분쇄비용 증가와 미분 취급의 어려움이 발생할 수 있다. 따라서 안정적인 수분제거율을 얻기 위해서는 입자크기별로 분급을 하는 것보다 2,000 μm 이하로 분쇄하여 건조하는 것이 보다 바람직할 것으로 판단된다.

Fig. 4는 수직관을 통과하는 가스 유입속도 및 입자크기분포에 따른 수분제거율 및 발열량 결과를 나타낸 것이다. 유입속도는 400 $^{\circ}\text{C}$ 로 일정하게 하고, 수직관을 통과하는 가스 유입속도는 20 m/sec에서 10 m/sec로 변화시킬 때 입자크기 변화에 따른 영향을 살펴본 것이다. 가스 유입속도는 감소하고 입자크기가 감소할수록 수분제거율은 급격하게 증가하는 경향을 나타내었다. 가스 유입속도가 15 m/sec 및 20 m/sec에서 수분제거율은 입자크기 범위가 1,000 μm 이

상에서 100~300 μm 로 감소함에 따라 70%에서 80%로 증가하였다. 가스 유입속도가 10 m/sec인 경우 수분제거율은 500~1000 μm 입자크기범위에서 100~300 μm 로 감소함에 따라 83%에서 87%로 증가하였다. 수직관에서의 가스 유입속도가 감소한다는 것은 동일한 관 길이를 통과하는 입자의 체류시간이 증가한다는 것을 의미한다. 따라서 건조하고자 하는 물질들이 보다 긴 시간 동안 유입가스와 접촉이 이루어지기 때문에, 가스 유입도가 감소할수록 수분제거율이 증가하는 경향을 나타낸다.

발열량 결과를 보면 가스 유입속도가 15 m/sec 및 20 m/sec에서는 유사한 경향을 나타내었지만, 10 m/sec로 감소하였을 경우에는 5,800 kcal/kg 이상으로 높게 나타났다.

기류건조에 있어서 유입되는 입자의 체류시간이 증가함에 따라 수분제거율에 보다 효과적이며, 기류건조기 후단의 싸이클론 및 설비 추가에 따라 수분제거율을 향상시킬 수 있을 것으로 예측된다.

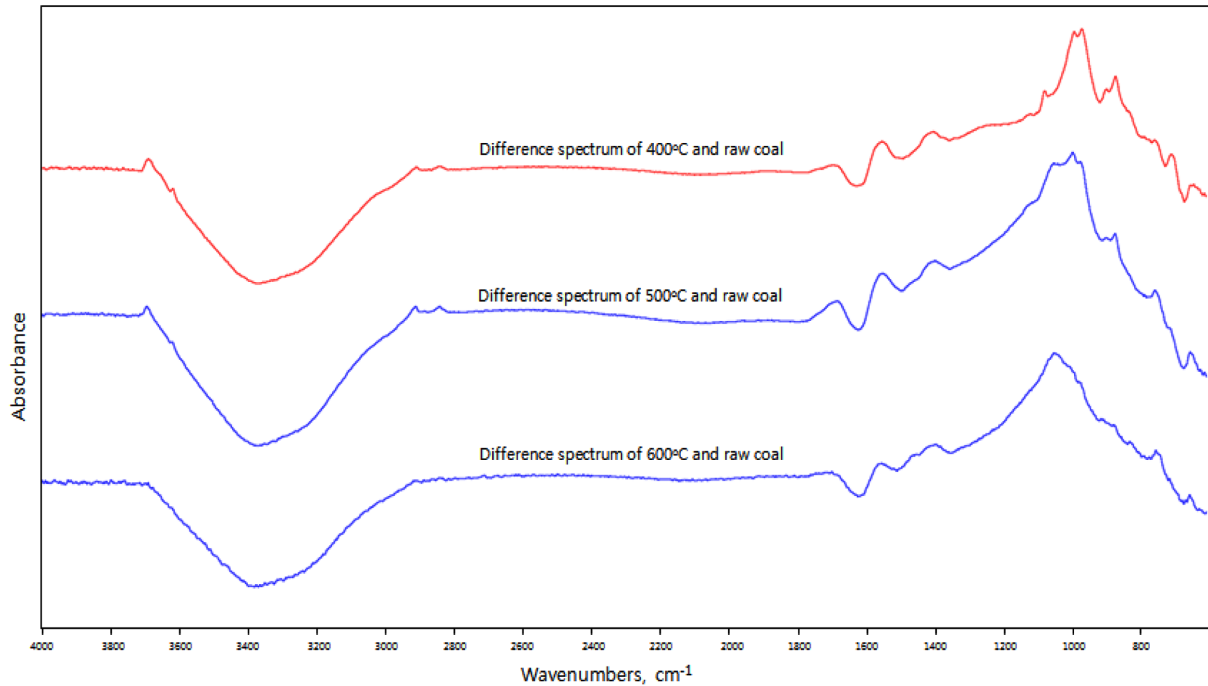


Fig. 6. Difference spectrum of raw coal and dried coal.

기류건조에 의한 고수분 석탄의 표면에서 일어나는 변화를 알아보기 위하여 FT-IR 스펙트럼 분석을 하였다. Fig. 5는 원료 석탄과 건조 석탄의 FT-IR 분석결과를 보여주고 있다. 석탄에서 수분 및 산소성분과 관련되는 주요한 피크로 $3,000\sim 3,700\text{ cm}^{-1}$ 의 하이드록실 그룹과 카르복실 그룹 및 $1,650\sim 1,800\text{ cm}^{-1}$ 의 카보닐($\text{C}=\text{O}$) 그룹 등이 있다[10-11]. 수분 제거 공정을 통해 이상의 피크에서 주요한 변화가 일어날 것이라는 예상을 할 수 있다. Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 원료석탄과 기류건조를 실시한 후 $3,000\sim 3,700\text{ cm}^{-1}$ 피크가 크게 감소하여 하이드록실 그룹 및 카르복실 그룹이 크게 감소하였음을 확인할 수 있다. FT-IR 분석에 의한 $1,650\text{ cm}^{-1}$ 피크에서의 카보닐 그룹의 변화를 확인하기 위하여 기류건조의 각 운전온도에 따른 FT-IR 스펙트럼과 원료석탄 FT-IR 스펙트럼의 스펙트럼 차를 Fig. 6에 나타내었다. $1,650\text{ cm}^{-1}$ 피크 부근에서 아래로 볼록한 모양을 나타내는데, 이를 통해 카보닐 그룹이 감소하였음을 확인할 수 있다. $3,000\sim 3,700\text{ cm}^{-1}$ 의 하이드록실 그룹 및 카르복실 그룹 피크도 아래로 볼록한 모양을 나타내었다. 일반적으로 고수분 석탄은 친수성이며, 석탄을 건조한 후에도 수분을 재흡착할 가능성이 높다. FT-IR 분석을 통해서 카르복실 그룹이 감소하는 것으로 나타났는데, 이와 같은 결과를 토대로 기류건조에 의한 탈카르복실화에 의해 소수성인 탄화수소 그룹으로 분해가 일어나기 때문에 수분의 재흡수 및 자연발화도 방지할 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결 론

벤치규모 기류건조에 의한 고수분 석탄의 건조 특성 실험을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 입자크기가 감소하고 유입속도가 감소(체류시간 증가)할수록 수분제거율이 증가하는 것으로 나타나 기류건조기를 이용한 저등급

석탄의 건조에 있어 입자크기 및 체류시간이 중요한 인자임을 알 수 있었다.

(2) 고수분 석탄에서 80 wt% 이상의 높은 수분제거율을 얻기 위해서는 석탄을 분급하여 $1,000\text{ }\mu\text{m}$ 입자크기 이하로 건조하는 것이 바람직하며, 입자크기 범위에 따라 안정적인 수분제거율을 얻기 위해서는 건조하고자 하는 입자크기 범위를 $2,000\text{ }\mu\text{m}$ 이하로 하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

(3) FT-IR 분석으로 기류건조를 통한 고수분 석탄의 표면에서 하이드록실 그룹, 카르복실그룹 및 카보닐 그룹이 감소함을 확인할 수 있었다.

감 사

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

참고문헌

1. Mangena, S. J., Korte, G. J., McCrindle, R. I. and Morgan, D. L., "The Amenability of Some Witbank Bituminous Ultra Fine Coals to Binderless Briquetting," *Fuel Process. Technol.*, **85**, 1647-1662(2004).
2. Keith, C., "Commercial Scale Low Rank Coal Upgrading Using the BCB Process," 2nd Coaltrans Upgrading Coal Forum, Presentation(2010).
3. Sugita, S., Deguchi, T. and Shigehisa, T., "Demonstration of a UBC Process in Indonesia," *神戸製鋼技報*, **56**(2), 23-26(2006).
4. Drtin, F. U., Hiromoto, U. and Bukin, D., "Change of Combustion Characteristics of Indonesian Low Rank Coal Due to Upgraded Brown Coal Process," *Fuel Process. Technol.*, **87**, 1007-1011(2006).

5. Yukio, A., "UBC Process - Upgrading the Future," 2nd Coaltrans Upgrading Coal Forum, Presentation(2010).
6. Klutz, H. J., Moser, C. and Block, D., "WTA Fine Grain Drying - Module for Lignite-Fired Power Plants of the Future," VGB Power Tech Report 11(2006).
7. Sarunac, N., Ness, M. and Bullinger, C., "One Year of Operating Experience with a Prototype Fluidized Bed Coal Dryer at Coal Creek Generating Station," National energy technology laboratory.
8. Park, M. C. and Kweon, Y. S., "Design of Flash Dryer(I)," *Korean Chem. Eng. Res.(HWAHAK KONGHAK)*, **12**(6), 353-360(1974).
9. Park, M. C. and Kweon, Y. S., "Design of Flash Dryer(II)," *Korean Chem. Eng. Res.(HWAHAK KONGHAK)*, **13**(1), 33-44(1975).
10. Solomon, P. R. and Carangelo, R. M., "FT-IR Analysis of Coal," *Fuel*, **67**, 949-959(1988).
11. Li, C.-Z., *Advances in the science of victorian brown coal*, CRC Press, Australia, 11-84(2004).