

인도네시아 저등급석탄의 무결합제 성형 특성

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

한국에너지기술연구원 청정연료연구실
305-343 대전광역시 유성구 가정로 152
(2014년 7월 14일 접수, 2014년 10월 15일 수정본 접수, 2014년 10월 18일 채택)

Characteristics of Binderless Briquettes for Indonesian Low-Rank Coals

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

Clean Fuel Laboratory, Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea
(Received 14 July 2014; Received in revised form 15 October 2014; accepted 18 October 2014)

요 약

저등급석탄을 건조하고 무결합제로 성형하는 경우에 대한 조건별 특성 연구를 수행하였다. 인도네시아 산 두 종류의 저등급석탄을 전기오븐에서 건조시킨 후 성형에 사용하였으며, 석탄의 수분별, 입도별, 성형압력별, 보관일수별로 압축 강도를 측정하여 성형특성을 비교하였다. 석탄의 수분별로는 10~15 wt%에서 가장 높은 강도를 나타내었으며, 석탄의 종류에 따라 가장 높은 강도를 갖는 수분 함량의 차이가 있었다. 석탄의 입도는 적을수록 높은 강도를 나타내며 입도가 증가할수록 수렴하는 경향을 나타내었다. 성형압력이 높아질수록 성형 강도가 높게 나타났으나, 약 300 kN 이상에서는 크게 차이를 보이지 않았다. 보관일수별로는 약 일주일 동안 강도가 급격히 감소한 후 수렴하는 경향을 보였다. 이상의 결과는 저등급석탄의 산지에서 고품위화시킨 석탄을 국내 반입하는 경우에 대한 성형석탄 제조 및 관리의 지침으로 활용될 수 있다.

Abstract – The characteristics of binderless briquettes for dried low-rank coal was studied in this work. Two kinds of Indonesian coals were used to briquette after drying them in electric oven. The characteristics of briquettes have been examined by moisture contents, particle size, hydraulic force, and storing period. The optimum moisture contents of briquettes were observed at between 10 wt% and 15 wt%. The strength of coal briquette was stronger as particle size became smaller. The strength of coal briquette was proportional to the hydraulic force under 300 kN, whereas there was little difference among the briquettes made at more than 300 kN of hydraulic force. The strength of briquettes sharply decreased for a week after produced, and then showed the tendency of converging. The results from this work can be a useful guideline of manufacturing and managing upgraded coal briquettes.

Key words: Low-rank Coal, Binderless, Coal Briquette, Compressive Strength

1. 서 론

인도네시아는 세계 5위의 석탄 생산국[1]이며, 국내 수입되는 석탄 중 30% 이상이 인도네시아산[2]으로 석탄 산업의 주요 국가 중 하나이다. 인도네시아의 석탄 자원 중 약 85%는 아역청탄 및 갈탄을 포함[3]하는 저등급 석탄인데, 타 지역의 저등급석탄에 비해 회분 함량[4]이 낮아 수분 건조를 통한 고품위 석탄의 제조가 용이하다는 점에서 주목받고 있다. 저등급석탄의 고품위화를 석탄 산지에서 수행할 경우 에너지 밀도가 높아져 수송 비용의 감소 뿐 아니라 수송

연료로부터 배출되는 온실가스 배출을 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 일반적으로 석탄의 고품위화 시 건조 속도를 높이기 위해 분쇄하여 사용하는데, 분쇄된 석탄을 직접 이송할 경우 비산문제, 자연발화의 위험[5-7] 등에 노출된다. 특히 인도네시아에서 국내까지 석탄을 들여오는데 1달에서 3달 정도의 시간이 소요되므로 자연발화의 위험성은 매우 높다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 고품위화 석탄을 제조하는 성형 공정이 반드시 필요하다. 성형된 석탄은 수송이 용이하며 더미로 야적하는 경우에도 공극에 의한 통풍로가 생겨 축열을 방지할 수 있으므로 자연발화를 방지할 수 있다.

석탄은 원산지에서 국내로 들여와 사용되기까지 스크류, 컨베이어 등을 통해 수많은 이송과정을 거치게 되고, 수천 톤의 더미로 쌓아 보관되어야 한다. 이러한 과정에서 성형된 석탄이 파손될 수 있으며, 파손된 분말 석탄은 다시 비산 문제와 자연발화 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 충분한 성형강도를 갖는 석탄을 제조하는 것

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: lsh3452@kier.re.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이 매우 중요하다. 때로는 충분한 성형강도를 유지하기 위하여 결합제가 쓰이기도 한다. 하지만 원료석탄과 고품위화 석탄 간의 가격 편차가 크지 않으므로 고품위화 석탄의 제조비를 상승시키는 요인이 되는 추가 재료를 사용하는 것은 바람직하지 않다. Mills[8]에 의하면 좋은 석탄의 결합제로 쓰이기 위한 조건은 다음과 같다: 첫째, 가격이 충분히 싸야 함; 둘째, 충분히 단단하면서 깨지기 쉬운 상태가 되면 안 됨; 셋째, 화재의 위험이 없어야 함; 넷째, 방수성이 있어야 함; 다섯째, 연소 시 매연 등을 발생시키지 않아야 함; 여섯째, 회분의 함량을 증가시키지 않아야 함; 마지막으로 석탄의 열량을 감소시키지 않아야 함. 경제성을 고려하면서 위의 모든 조건을 충족시키는 결합제를 찾는 것은 매우 어려운 일이며, 이러한 측면에서 볼 때 석탄의 특성을 변화시키지 않는 무결합제 성형 방법이 가장 바람직하다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 무결합제 저등급석탄 성형의 가능성을 확인하기 위해 다양한 성형 조건 하에서 제조된 석탄의 특성을 살펴보았다.

2. 실험방법

2-1. 사용 시료

인도네시아 산 저등급석탄인 KIDECO 석탄과 KCH 석탄을 사용하였으며, 이들의 공업분석, 원소분석, 회 성분 분석 결과를 각각 Table 1, 2, 3에 나타내었다. 공업분석은 TGA-701 Thermogravimeter (LECO Co., USA)를 사용하였으며, 원소 분석은 TruSpec Elemental Analyzer (LECO Co., USA)와 SC-432DR Sulfur Analyzer (LECO Co., USA)를 사용하였다. 회 성분 분석은 ICP-OES (Perkin-Elmer Co., USA)를 이용한 화학 분석법으로 측정하였다. KIDECO 석탄에 비해 KCH 석탄이 수분 및 회분 함량이 높고 탄소의 함량이 낮은 것으로 보아 탄화도가 더 낮은 석탄으로 예상된다. KCH 석탄의 경우 KIDECO 석탄에 비해 회 성분 중 SiO_2 의 비율이 매우 높은 특징을 보이고 있다. 도착기준 발열량은 Parr 6400 Calorimeter (PARR Co., USA)로 측정하였으며, KIDECO 석탄이 4,552 kcal/kg, KCH 석탄이 3,543 kcal/kg으로 나타났다.

성형에 사용된 석탄은 핀밀을 이용하여 미분쇄하였으며, 분쇄된 석탄의 입도 분포는 Fig. 1과 같다. 단, 입도 별 성형 특성을 알아보기 위하여 별도의 크기 별 시료(0.075 mm 이하, 0.075~0.3 mm, 0.3~1 mm,

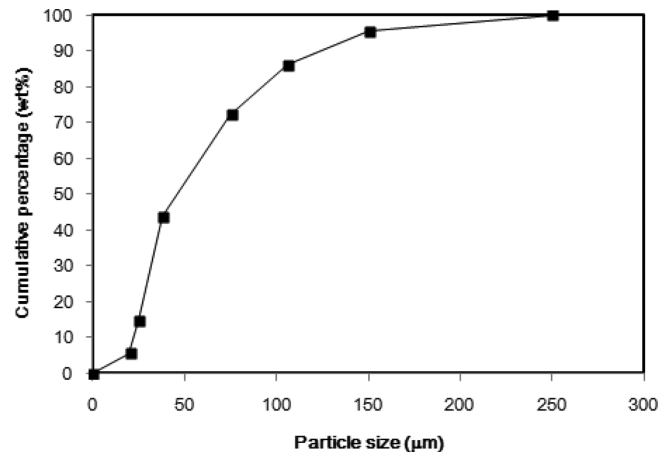


Fig. 1. Particle size distribution.

1~2 mm, 2~3 mm, 3~4 mm)를 준비하였다. 석탄의 수분 건조를 위하여 107 °C의 전기 오븐에서 일정 시간 동안 유지하면서 감소한 질량을 확인하여 원하는 수분(0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%)으로 건조시켰다. 수분의 영향 검토를 제외한 실험에서는 석탄의 수분이 10%가 되도록 건조시켰다.

2-2. 고품위화 석탄의 성형과 분석

석탄의 성형에 사용되는 방법은 이중 롤러 성형 방식[9], 압출 성형 방식[10], 고압 압축 방식[11] 등이 있으며, 본 연구에서는 고압 압축 방식을 사용하였다. 직경 18 mm의 금형에 5 g의 고품위화 석탄을 채워 넣고 고압의 실린더로 압축하였다. 성형에 사용된 압축기는 Fig. 2와 같다. 실린더는 최대 50 톤의 힘을 가할 수 있으며, 유압 펌프를 이용해 실린더를 조작하였다. 성형압력 별 특성 비교를 위해 70~420 kN의 힘으로 압축하였으며, 그 외 실험에서는 420 kN의 힘으로 압축하였다. 압축된 석탄은 1 분간 가압 상태를 유지시킨 후 성형탄 제조를 완료하였다. 제조된 석탄은 Fig. 3과 같이 높이 약 11 mm의 원통형으로 제조되었으며, 밀도는 약 1.8 g/cm³이다.

성형탄의 강도를 비교하기 위해 Fig. 4의 압축 강도 측정 장치를 이용하였다. 실린더와 고정틀 사이에 성형탄을 놓고 상하로 힘을 가하면서 실린더 상단에 설치된 하중 센서를 통해 석탄에 가해지는 힘을

Table 1. Proximate analysis of raw coals (wt%)

		Moisture	Volatile matter	Ash	Fixed carbon
KIDECO	As received	26.12	36.74	5.22	31.92
	Dry basis	-	49.73	7.07	43.21
KCH	As received	33.08	33.68	7.55	25.69
	Dry basis	-	50.33	11.28	38.39

Table 2. Ultimate analysis of raw coals (wt%)

	Carbon	Hydrogen	Nitrogen	Oxygen	Sulfur
KIDECO	69.85	4.53	0.79	17.76	0.003
KCH	61.65	4.71	1.39	20.05	0.92

Table 3. Ash component analysis of raw coals (wt%)

	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO
KIDECO	15.81	6.22	1.88	26.45	42.17	6.56	0.91
KCH	65.14	11.03	0.57	5.03	14.41	1.28	2.54

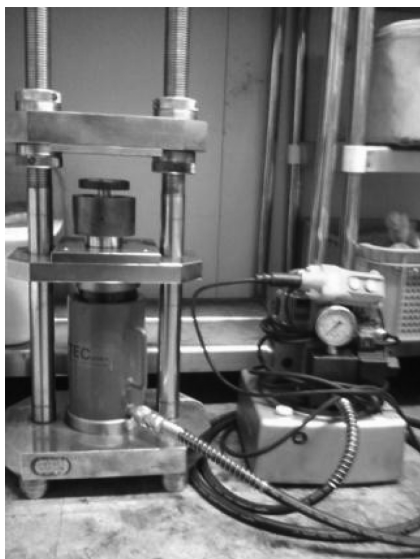


Fig. 2. Compressive pellet manufacturing apparatus.

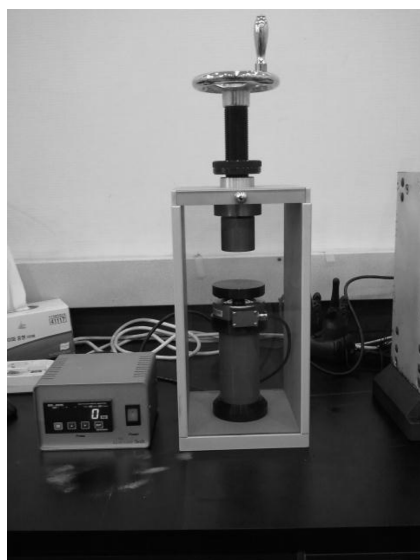
Fig. 3. Coal pellet ($\Phi 18 \times H11$ mm).

Fig. 4. Compressive strength measuring apparatus.

측정하였다. 압축 강도는 성형탄이 파괴되는 시점의 최대 힘을 측정하여 나타내었다. 강도 분석을 위해 성형탄은 시료 별로 각 5개씩 제조하여 측정된 강도의 평균으로 나타내었다. 석탄의 작용기 별 성형

특성을 검토하기 위해 Nicolet 6700 FT-IR Spectrometer (Thermofisher Inc., USA)를 이용하여 푸리에 변환 적외선 분석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

석탄의 성형 특성을 검토하기 위해 석탄 수분 별, 입도 별, 성형압력 별, 보관일수 별 압축강도를 측정하였다. 먼저 석탄의 수분 별 강도를 Fig. 5에 나타내었다. KCH 석탄에 비해 KIDECO 석탄의 강도가 전체적으로 높게 나타났으며, KIDECO 석탄의 경우 수분 10 wt%에서 강도가 가장 높았으나 KCH 석탄의 경우 이보다 약간 높은 수분 10~15 wt% 사이에서 가장 높은 강도를 나타내고 있다. 이를 통해 석탄의 종류 별로 수분에 대한 영향이 달라진다는 것을 알 수 있다. 수분 함량에 따라 석탄의 강도 차이가 크게 나타나며 최대 강도에서 대칭적인 형태를 보였다. 수분이 적당량 있을 경우는 좋은 결합제로써의 역할을 하지만 수분이 필요 이상으로 존재할 경우는 성형탄 자체를 무르게 하여 오히려 강도를 떨어뜨리는 것이 확인되었다. 이하 분석 결과는 성형이 잘 되는 조건인 수분 10 wt%로 건조한 경우의 측정값이다.

석탄의 입도 별 압축강도는 Fig. 6에 나타난 것처럼 입도가 작을수록 강도가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 초기 급형에 석탄 시료를 넣을 때 입도가 작을수록 공극률이 감소하여 보다 치밀한 구조

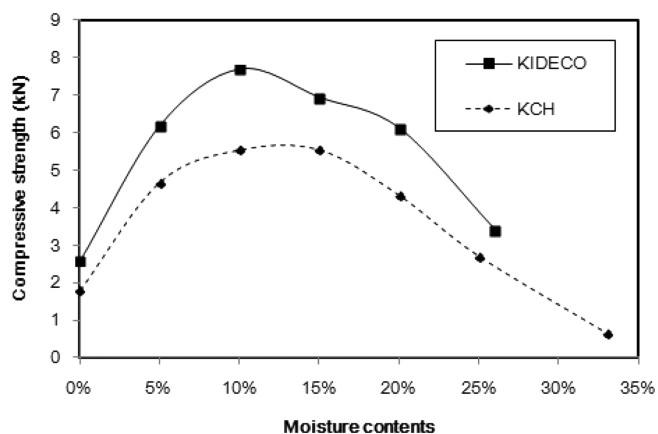
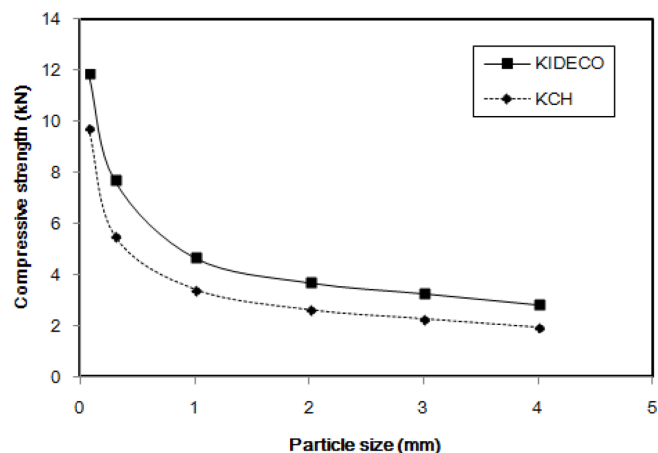
Fig. 5. Effect of moisture contents on compressive strength for coal briquettes (Particle size : ~ 0.3 mm, Hydraulic force : 420 kN).

Fig. 6. Effect of particle size on compressive strength for coal briquettes (Moisture contents : 10 wt%, Hydraulic force : 420 kN).

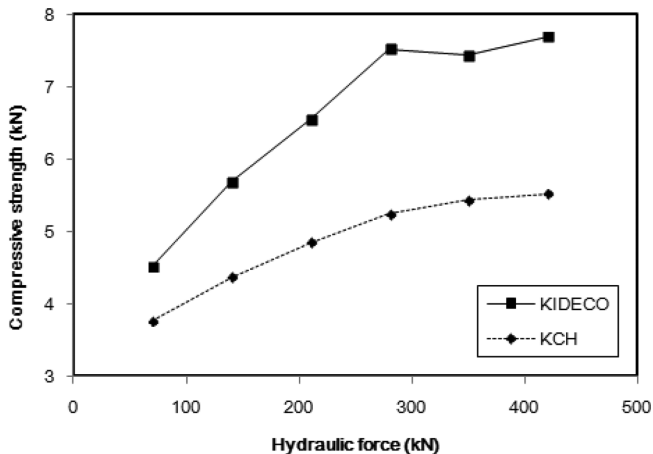


Fig. 7. Effect of hydraulic force on compressive strength for coal briquettes (Particle size : ~0.3 mm, Moisture contents : 10 wt%).

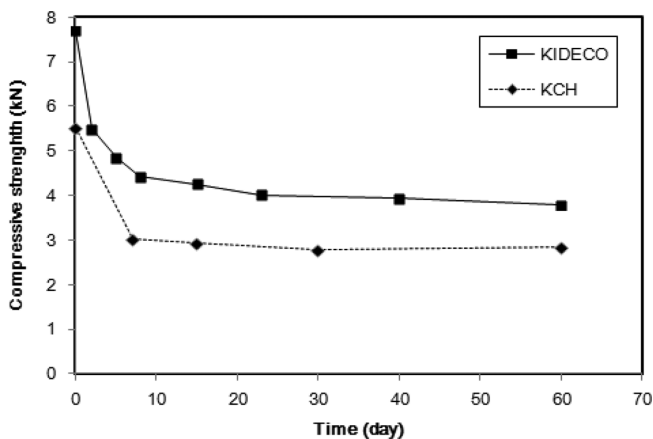


Fig. 8. Effect of storing period on compressive strength for coal briquettes.

를 갖게 되며, 이를 강한 힘으로 압축시킬 경우 보다 강한 결합력을 갖게 되는 것으로 보인다. 입도가 1 mm 이상인 석탄들에 대해서는 압축강도의 차이가 크게 나타나지 않았다.

성형탄의 성형압력 별 압축강도를 Fig. 7에 나타내었다. 성형압력이 증가함에 따라 압축강도도 증가하지만, 약 300 kN 이상에서는 성형압력에 크게 영향을 받지 않고 수렴하는 경향을 보였다. 성형탄의 보관일수 별 압축강도는 Fig. 8에 나타낸 것과 같이 초기에 급격하게 감소하며, 약 7일 경과 후에는 비교적 안정화되는 경향을 보였다. 이는 성형 초기 물리적인 압력에 의해 강하게 응집된 입자들이 시간이 지나면서 결합력이 약해지기 때문인 것으로 판단되며, 성형탄을 오랜 기간 저장해야 하기 때문에 보관일수를 고려하여 충분한 강도를 갖는 성형탄을 제조할 필요가 있다.

KCH 석탄과 KIDECO 석탄의 성형 강도는 전체적으로 KIDECO 석탄이 높게 나타나고 있다. 이에 대한 검토를 위해 FT-IR 분석 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 3,400~3,300 cm^{-1} 에서 수소결합에 의한 O-H, 1,680~1,600 cm^{-1} 에서 C=C 알켄, 1,300~1,000 cm^{-1} 에서 C-O 카르복실기 등이 확인되었다. 석탄 수분 함량에 의해 차이가 나타나는 O-H 피크를 제외하면 KCH 석탄의 카르복실기가 많은 것이 두드러지게 나타나고 있다. Ellison *et al.*[12]에 의하면 석탄의 성형 강도에 영향을 미치는 요인으로 석탄의 유기 구성 물질(마세랄)의 종류와

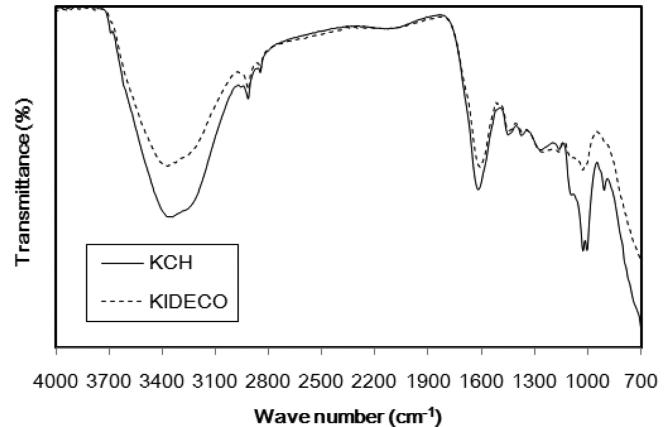


Fig. 9. Fourier transform infra-red spectra of raw coals.

분자 간 수소 결합을 언급하고 있으며, 수분이나 카르복실기가 이러한 수소결합 형성에 영향을 미친다고 설명되어 있다. 카르복실기는 전자 주개이면서 받개의 역할을 하기 때문에 상호간 수소결합에 의한 이합체로 존재할 수 있고, 또한 석탄 내 물 분자와 수소결합을 형성할 수 있으므로 이와 같은 결합이 성형 강도를 향상시킬 수 있다는 설명이다. 하지만 수분함량에 따른 성형특성의 결과(Fig. 5)에서도 확인한 바와 같이 카르복실기의 함량이 성형강도와 비례하지는 않는 것으로 볼 수 있다. 이는 수분과 마찬가지로 적정량 이외에는 성형강도에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 석탄 별 성형강도의 차이에 영향을 미칠 수 있는 또 하나의 요인으로는 회 성분에 의한 영향으로 예상할 수 있다. 일반적으로 사용되는 무기물 결합제의 성분은 주로 Ca, Mg 등이 있는데[6], KCH 석탄의 회 성분은 Table 3에서 확인한 바와 같이 Si의 비율이 매우 높으며 Ca의 함량이 상대적으로 매우 낮으므로 KIDECO 석탄에 비해 성형강도를 떨어뜨리는 요인이 될 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 인도네시아 저등급석탄 두 종류를 이용하여 석탄을 무기결합제로 성형하는 경우의 여러 가지 조건에 따른 특성을 비교해 보았다. 입도에 대한 영향은 작을수록 압축강도가 높게 나타났으나, 입도가 매우 작은 경우를 제외하면 그 영향이 크지는 않은 것으로 확인되었다. 성형압력도 높을수록 압축강도가 증가하였으나, 일정 성형압 이상에서는 강도가 크게 변화하지 않는 것으로 나타났다. 수분에 대한 영향은 석탄의 성형 압축강도에 큰 영향을 미치며, 약 10~15 wt%에서 가장 높은 강도를 보이나 석탄 별로 약간 차이가 있을 수 있으므로 성형에 알맞은 최적 수분을 찾을 필요가 있다. 성형탄의 보관일수에 따른 강도는 약 일주일이 지난 후에 안정화되므로 제조된 성형석탄의 지속적인 관리가 필요하다. 이상의 특성들을 통해 인도네시아 등의 저등급석탄 산지에서 고품위화한 석탄을 국내 반입할 경우에 석탄 제조 및 관리를 위한 지침을 제공할 수 있을 것으로 본다.

Acknowledgement

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (20132020000170).

References

1. http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_coal_production.
2. Park, Y., Shin, J., Gwak, J. and Lee, S., *Coal Inside*, Vol. 58, KORES, Seoul(2013).
3. Iancu, I., Clarke, A. W. and Trinnaman, J. A., 2010 Survey of Energy Resources, World Energy Council, London(2010).
4. Kinoshita, S., Yamamoto, S., Deguchi, T. and Shigehisa, T., "Demonstration of Upgraded Brown Coal Process by 600 tonnes/day Plant," Kobelco Technology Review No. 29, December(2010).
5. Jo, W. T., Choi, H. K., Kim, S. D., Yoo, J. H., Chun, D. H., Rhim, Y. J., Lim, J. H. and Lee, S. H., "Surface Characteristics and Spontaneous Combustibility of Coal Treated with Non-polar Solvent under Room Temperature," *Korean Chem. Eng. Res.*, **51**, 609-614(2013).
6. Jo, W., Choi, H., Yoo, J., Chun, D., Rhim, Y., Lim, J. and Lee, S., "A Comparison of Spontaneous Combustion Susceptibility of Coal According to Its Rank," *Korean J. Chem. Eng.*, **30**(5), 1034-1038 (2013).
7. Jo, E. M., Chun, D. H., Park, I. S., Kim, S. D., Rhim, Y. J., Choi, H., Yoo, J., Lim, J. H. and Lee, S., "Characteristics of Coal Upgraded with Heavy Oils," *Korean J. Chem. Eng.*, **31**(6), 981-985(2014).
8. Mills, J. E., "Binders for Coal Briquets," United States Geological Survey, Bulletin 343, Washington Government Printing Office(1908).
9. Han, Y., Tahmasebi, A., Yu, J., Li, X. and Meesri, C., "An Experimental Study on Binderless Briquetting of Low-rank Coals," *Chem. Eng. Technol.*, **36**, 749-756(2013).
10. Kelly, J. T., Miller, G. and Namazian, M., "A Low Cost and High Quality Solid Fuel From Biomass and Coal Fines," Technical Report, DOE No. DE-AC26-99FT40157, Altex Technologies Corporation, Santa Clara, July(2001).
11. Ellison, G. and Stanmore, B. R., "High Strength Binderless Brown Coal Briquettes: Part I. Production and Properties," *Fuel Process. Technol.*, **4**, 277-289(1981).
12. Ellison, G. and Stanmore, B. R., "High Strength Binderless Brown Coal Briquettes: Part II. An Investigation into Bonding," *Fuel Process. Technol.*, **4**, 291-304(1981).