

코크스 시험로에서 석탄 건류시 석탄 팽창압 거동 특성

이운재[†] · 김제영

포항산업과학연구원 화성연구팀
(1998년 2월 20일 접수, 1998년 6월 3일 채택)

Coking Pressure Behaviour during Coal Carbonization in a Movable-Wall Test Coke Oven

Woon-Jae Lee[†] and Je-Young Kim

Coal and Chemical Process Research Team, RIST, Pohang 791-330, Korea
(Received 20 February 1998; accepted 3 June 1998)

요 약

코크스 오븐에 장입된 석탄의 건류과정에서 발생하는 석탄 팽창압의 특성을 파악하기 위해 이동벽이 있는 코크스 시험로(0.2 W×0.4 H×0.45 L)에서 여러 종류의 석탄에 대한 건류 실험을 행하였다. 또한 단일탄 및 배합탄의 유동도 특성과 이들로부터 제조된 코크스의 품질을 평가하였다. 단일탄의 유동도는 휘발분 함량에 따라 증가하였으나, 배합탄의 유동도는 휘발분 함량보다는 단일탄의 유동도 특성 경향을 나타내었다. 석탄 등급이 증가함에 따라 단일탄의 CO₂ 반응성은 감소하였으나, 반응후강도(CSR)는 증가하였다. 점결성이 강한 석탄의 양이 증가함에 따라 배합탄의 반응후강도는 증가하나 CO₂ 반응성은 감소하였다. 석탄의 건류과정에서 발생하는 팽창압 측정에서 유동도가 높은 석탄(PH, DP)들이 높은 팽창압을 나타내었으나, 상대적으로 낮은 유동도를 갖는 NP 탄의 경우 가장 높은 팽창압을 나타내었다. 8-9 wt%의 수분을 갖는 석탄을 5-6 wt%의 수분을 갖도록 건조하였을 경우 장입밀도는 13-20 % 증가하며, 건조된 점결탄의 팽창압은 습탄에 비해 2배 이상 증가하였으며, 석탄내 가스압은 습탄에 비해 높은 값을 나타내었다.

Abstract—Coal carbonization for various kinds of coals has been carried out in a movable-wall test coke oven(0.2 W×0.4 H×0.45 L) to investigate the variation of coking pressure when dried coal is charged in the coke oven. Also fluidity properties of single coals and coal blends have been determined in a Gieseler plastometer. Fluidity of single coal increases with increasing volatile matter content. Fluidity of coal blends is largely depended on that of single coal rather than volatile matter content of coal blends. CO₂ reactivity and coke strength index after reaction with CO₂(CSR) of coke produced from single and coal blends also have been evaluated. With increasing the amount of strong-coking coal, CSR of the coal blend increased but CO₂ reactivity of the coal blend decreased. Effects of coal rank and moisture content on coking pressure in a 30 kg of test coke oven were determined. Coals(PH, DP) with high fluidity exhibit high coking pressure but despite of low fluidity a coal(NP) represents the largest coking pressure among the coals tested. Bulk density of the dried coal(5-6 wt%) is 13-20 % higher than that of the wet coal(7-9 wt%). Coking pressure of the dried strong-coking coal is approximately two times as high as that of the wet coal and internal gas pressure in the dried coal charge center is also much higher than that in the wet coal charge center.

Key words : Carbonization, Coking Pressure, Coke Oven, Coke Strength

1. 서 론

최근의 경제 상황은 제철산업에서의 코크스(coke) 생산효율의 증가와 단위비용 저감에 대한 요구가 증대되고 있다. 단위비용 저감을 위한 방법으로는 오븐 크기 및 건류속도의 증가와 장입탄의 전 처리 기술 등 여러 가지가 있다. 장입탄 전 처리의 기본은 석탄의 미분쇄

에 의한 균일화이지만 최근에는 적극적인 전처리에 의해 코크스 품질개선을 시도하고 있다. 또한 원료 비용저감의 관점에서 장입탄의 장입밀도를 증가시키는 방법들이 고려되고 있다. 구체적인 예로는 중유 등을 소량 첨가하는 oiling법, 석탄 케이크를 장입하는 stamping 법, 분탄보다 큰 밀도의 괴탄형태로 가압 성형한 성형탄을 일부(약 30 %) 혼합하는 성형탄 배합법, 수분을 제거하여 장입밀도 상승에 의해 에너지 저감 효과가 있는 건조탄 및 예열탄(-250 °C) 장입법 등이다. 한편, 코크스 오븐의 설비집약에 동반된 고가동률 조업으로

[†]E-mail : wjlee@risnet.rist.re.kr

코크스 오븐 온도가 상승하고 있다. 이와 같은 개발의 결과는 석탄 건류과정에서 과잉의 석탄 팽창압 증가를 가져오며, 석탄 팽창압의 증가는 코크스 배출시 배출압 증가와 오븐 부착을 동반하게 된다.

코크스 오븐에서 석탄 건류 사이클 동안 오븐 벽에 작용하는 최대 팽창압은 상업적인 코크스 생산산업에서 석탄 배합을 선정할 때 고려해야만 하는 중요한 요소이다. 건류 사이클에서 오븐에 석탄을 장입한 후 대략 11-13 시간에 두 개의 연화층이 오븐 중심에서 합칠 때 최대 팽창압이 발생한다[1, 2]. 이 압력은 코크스 덩어리를 통해 코크스 오븐 벽으로 전달되며, 과잉의 팽창압이 작용하면 오븐 벽에 영구적인 손상을 주게 된다. 일반적으로 석탄 팽창압은 오븐 벽의 영구적인 변형과 손상을 막기 위해 4m 높이의 코크스 오븐에 대해 14 kPa (2 psi), 6m 높이의 코크스 오븐에 대해서는 7 kPa (1 psi) 이하로 관리해야 한다[3, 4]. 그러나 코크스 오븐이 조업되는 동안 석탄 팽창압을 직접 측정할 수 있는 방법은 없기 때문에 오븐손상은 조업자들이 모르게 일어날 수 있다. 오븐 벽 손상은 나중에 내화물 손상으로 연속적인 hard-to-push 오븐으로 나타나게 된다. 코크스 제조에 사용되는 원료 석탄 및 배합탄이 건류과정에서 과잉의 팽창압을 나타내는지 확인하는 것은 매우 중요하며, 팽창압에 대한 데이터를 토대로 코크스 품질저하 및 오븐손상 없이 코크스를 생산할 수 있도록 석탄 배합에 주의를 기울여야 한다. 석탄 팽창압은 코크스 오븐에서 배합탄의 안정성, 오븐 조업 및 노체관리 면에서 매우 중요한 요소이므로 선진 각국에서는 과잉의 규모의 시험로에서 팽창압 특성에 대한 석탄 및 조업조건 변화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-14].

따라서 본 연구에서는 석탄 팽창압을 고찰하기 위해 원료탄과 이들로 구성된 배합탄에 대한 석탄의 유동특성과 코크스 품질을 조사하였다. 또한 30 kg 용량의 이동벽이 있는 시험로를 제작하여 원료탄에 대한 석탄 팽창압과 석탄 중심의 가스압을 측정하였으며, 석탄 전처리 영향을 고찰하기 위해 건조된 석탄에 대한 팽창압 특성을 조사하였다.

2. 석탄 팽창압 발생 메커니즘

일반적으로 접하는 석탄 팽창압과 가스압은 다음과 같이 정의된다; 석탄 팽창압(coking pressure): 석탄 건류로 인해 오븐 벽에 작용하는 압력. 가스압(gas pressure): 석탄/코크스 층에 삼입된 프리브로 측정된 압력[5, 12].

일반적으로 석탄 팽창압은 석탄이 연화상태에 있을 때 발생하며, 연화상태에 있는 석탄으로부터의 가스 발생속도와 가스발생시 저항으로 작용하는 연화층에서의 석탄 투과도의 함수이다. 석탄 팽창압 발생에 대해서는 다음과 같은 이론이 제시되고 있다. 상업적인 코크스 오븐에서 석탄 건류공정은 Fig. 1(A)에 나타난 것처럼 크게 4 단계로 나눌 수 있다.

- 단계 1: 오븐에 석탄 장입으로 초기 연화층 생성
- 단계 2: 오븐 벽에서 오븐 중심으로 연화층의 진행
- 단계 3: 오븐 중심에서 연화층 합체
- 단계 4: 연화층의 소실과 장입 중심이 고온의 코크스로 변이

코크스 오븐에서 석탄 건류과정의 복잡성을 살펴보기 위해 단계 2에서 일어나는 현상을 자세히 보면 다음과 같다. (a) 건류과정에서 발생된 가스는 연화층에서 코크스와 석탄층 속으로 또는 연화층 위쪽으로 배출된다. (b) 연화층의 낮은 투과도와 오븐 벽에 의한 부피제한은 기체흐름을 제한하고 연화층내에 압력형성을 야기한다. (c) 연화층내에 형성된 압력은 연화층이 한 쪽에서는 코크스를 다른 쪽에서는 석탄층을 밀도록 한다. (d) 연화층의 한 쪽에 있는 석탄은 석탄내의

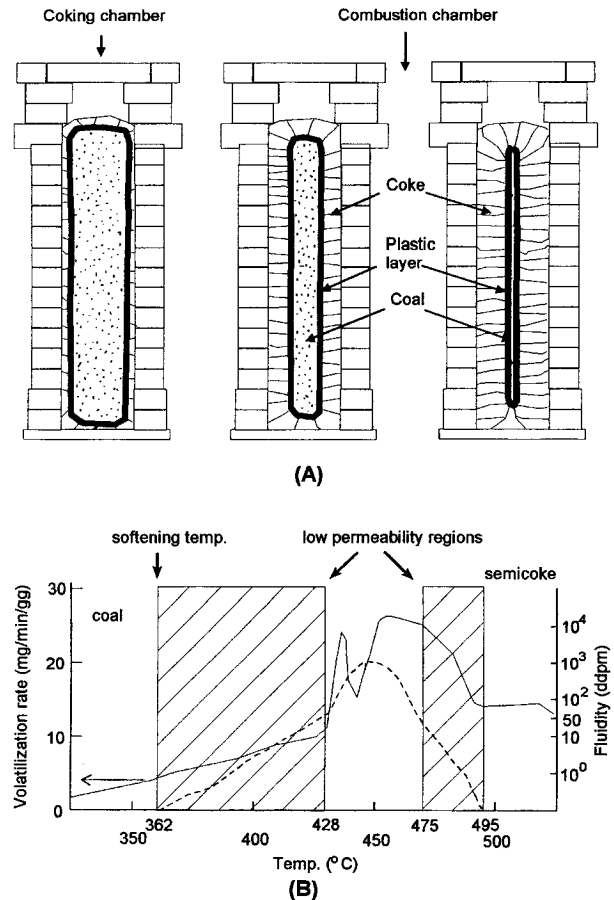


Fig. 1. Carbonization process in a commercial coke oven.

(A) Various stages during coking in coke oven

(B) Fluidity-volatilization relationship

기체압력에 따라 압축될 수도 안될 수도 있으며, 다른 쪽에 있는 코크스는 계속적으로 오븐 벽을 밀게 된다. (e) 석탄층 쪽으로 가는 가스는 응축되거나 석탄층을 통해 위로 흐른다. (f) 코크스층 쪽으로 가는 가스는 열분해되거나 고온의 코크스를 통해 오븐 벽을 따라 위쪽으로 흐른다. 단계 2에 있는 연화층은 유동도 곡선을 토대로 Fig. 1(B)에 나타난 것처럼 세 지역으로 나눌 수 있다. 유동도가 50 ddpm 이하인 지역은 투과도가 낮거나 가스흐름에 대한 높은 저항을 나타낸다. 석탄층 쪽에는 66 °C 간격의 낮은 유동도가 있고 코크스층 쪽에는 20 °C 간격의 낮은 유동도가 있다. 이것은 연화층의 석탄층 쪽에 가스흐름에 대한 더 큰 저항이 있다는 것을 의미하는 것이며, 대부분의 방출된 기체는 코크스 쪽으로 흐른다는 것을 나타낸다. 약 90%의 기체가 코크스층을 통해서 오븐 벽을 따라 위로 흐르며 단지 10%만이 석탄층을 통하여 흐른다고 추정된다. 양쪽의 최대 가스발생 지역에서 낮은 투과도를 나타내는 쪽이 연화층내에서 가스압 형성에 기여하게 된다. 연화층이 오븐 중심에서 만날 때 연화층내에서 발생된 모든 기체는 오븐 중심에 있는 낮은 투과도 지역 때문에 연화층에서 코크스층을 통해 흐른다. 더 넓은 연화층 지역, 더 큰 부피의 가스발생과 더 낮은 투과성 물질 때문에 더 높은 가스압의 경향은 이때 존재한다. 따라서 최대 석탄 팽창압은 이때 나타나게 된다.

3. 실험

3-1. 유동도(Fluidity) 특성

Gieseler plastometer에서 35 mesh 이하로 파쇄된 석탄 시료 4.5 g을 300 °C에서 550 °C까지 3 °C/min으로 가열하면서 석탄의 유동도를 측정하였다. 배합비 변화에 따른 배합탄의 유동도 특성은 등급별로 석탄을 선정하여 [미국탄(PH), 강점결탄(PD), 중점결탄(GP), 약점결탄(DP), 일반탄(XL)], 코크스 제조시 사용되는 일반적인 배합비로 혼합하여 측정하였다; [미국탄(10 wt%), 강점결탄(40 wt%), 중점결탄(30 wt%), 약점결탄(5 wt%), 일반탄(15 wt%)].

3-2. 코크스의 CO₂ 반응성 및 반응후강도(Coke Strength after Reaction)

코크스의 CO₂ 반응성 및 반응후강도(CSR)를 측정하기 위해 단일탄과 이들로 구성된 배합탄을 1,100 °C로 가열된 시험로에서 8 hr 이상 건류하여 코크스를 제조하였다. CO₂ 반응성 측정을 위해 제조된 코크스를 파쇄하여 입경 20±1 mm의 시료를 제조한다. 코크스 시료 200 g(W₀)을 1,100 °C로 가열된 반응기에서 CO₂ 가스로 2 hr 반응시킨 후 반응기에서 빼내 N₂로 냉각(quenching)시킨다. 반응이 종료된 코크스는 무게(W)를 측정하여 CO₂ 반응성[(W₀ - W)/W₀]을 계산하였다. 반응후강도(CSR)는 CO₂ 반응성이 끝난 코크스의 무게(W)를 측정한 후 I-type drum tester에서 20 rpm으로 30분 회전시킨 후, 10 mesh로 분급하여 10 mesh 이상의 코크스 무게(W₁)를 측정하여 파쇄율(CSR)(W₁/W)을 계산하였다[15].

3-3. Movable-wall Test Coke Oven

이동벽을 갖는 석탄 건류장치의 개략도는 Fig. 2에 나타내었다. 석탄 건류장치는 크게 네 부분으로 구성된다; 오븐 본체, 코크스 배출장치, 발생가스 처리장치, 측정장치.

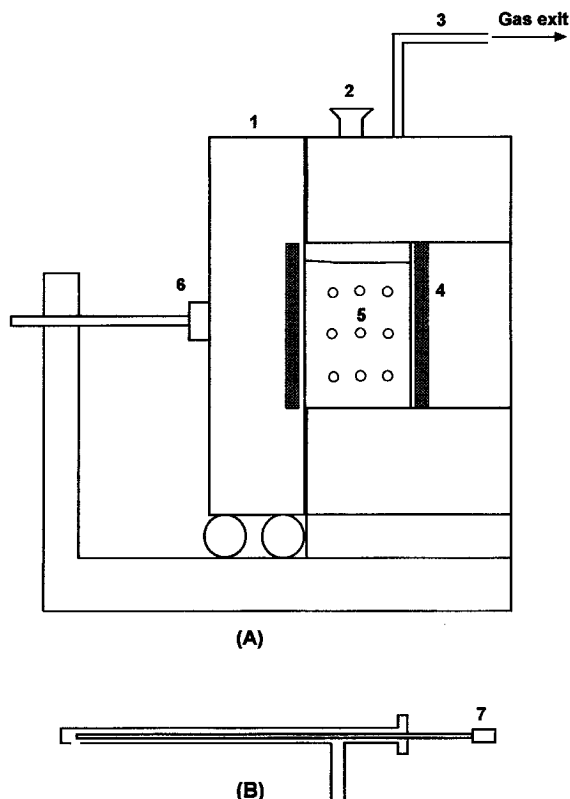


Fig. 2. Schematic diagram of movable-wall test coke oven.

(A) Test coke oven; 1. movable-wall, 2. coal charging port, 3. evolved gas exit pipe, 4. electric heater, 5. gas probe, 6. load cell, 7. thermocouple. (B) Details of gas probe

오븐 본체는 내부 용적(0.2 W×0.45 L×0.4 H)이 30 kg/charge 용량이 되도록 내화물 CA16(1,600 °C)로 캐스터블 형태로 제작되었다. 산업용 코크스 오븐에서 석탄 건류와 같은 방식으로 열전달이 일어나도록, 석탄 가열을 위해 시험로 양쪽벽(0.40 H×0.45 L) 내에 각각 9 kW의 열선(kanthal)을 설치하였다. 석탄 건류시 발생하는 카본과 열선이 반응하는 것을 방지하기 위하여 캐스터블내에 알루미늄 튜브를 넣고 열선을 알루미늄 튜브내에 설치하였다. 오븐 상부에는 석탄의 주입을 위해 장입구(0.1 W×0.2 L)를 설치하였으며, 석탄 건류시 발생하는 가스의 배출을 위해 50A 파이프를 설치하였다. 석탄 건류시 연화층에서 발생하는 가스압과 온도 측정을 위해 양쪽 벽(0.2 W×0.4 H)에 가스압 및 온도를 동시에 측정할 수 있는 프르브를 높이방향과 가로방향으로 9개를 설치하였다. 프르브가 석탄 가열패턴에 영향을 주는 것을 방지하기 위해 가열벽과 평행하게 설치하였다. 프르브로부터의 압력은 압력 측정기(pressure transmitter)를 이용하여 측정하였으며, 측정된 압력과 온도데이터는 PC에 저장된다. 오븐 벽으로부터 방출되는 열 손실을 줄이기 위해 단열재로 세라믹을 이용하여 0.35 m 두께로 단열하였다.

석탄 건류과정에서 석탄 팽창이 오븐 벽에 미치는 힘을 측정하기 위해 한쪽 벽을 움직일 수 있도록 하단부분에 레일과 구동 바퀴를 설치하였으며, 레일과 바퀴사이에 최소한의 저항이 걸리도록 하였다. 석탄 팽창압을 측정하기 위해 압축형 로드셀(500 kg)을 이동벽의 지지대에 설치하였으며, 고정틀에 설치된 스크류 철봉으로 로드셀을 고정 및 이동벽을 움직일 수 있도록 하였다.

건류 종료시 생성 코크스의 배출을 위해 코크스 배출통(0.6 W×0.1 H×1 L)을 제작하였다. 코크스 배출시 이동벽을 완전히 뒤로 이동시킨 다음 코크스 배출통을 오븐하단에 놓고 적열 코크스를 긴 쇠봉을 이용하여 오븐으로부터 배출시킨다. 배출된 적열 코크스는 물을 사용하여 소화하였다.

오븐으로부터 방출된 가스는 오븐 상부의 파이프를 거쳐 1차 tar 분리기(Dia. 0.6×1 H)에서 물을 통과하면서 타르가 분리되고, 미포집 타르는 순환 펌프를 사용하여 노즐을 통해 물을 분무시키는 2차 타르 분리기에서 제거된다. 1차와 2차 타르 분리기를 통과한 발생가스는 blower를 통해 대기 중으로 배출된다. 발생 가스의 원활한 배출을 위해 오븐 상부의 가스 배출관에 압력탭을 설치하여 blower로 발생가스를 배출시 오븐내의 압력이 약간의 음압(-5 mmH₂O)이 걸리도록 하였다. Load cell, pressure transmitter와 열전대에서 나오는 데이터는 on-line으로 data acquisition을 거쳐 PC에 저장된다. Table 1은 본 연구에 사용된 석탄의 공업분석 및 원소 분석치를 나타낸 것이다. 미국탄은 특성상 따로 분류되며, 점결탄들은 원료탄의 휘발분 함량에 따라 강점결탄(22 wt% 이하), 중점결탄(22-30 wt%), 약점결탄(31 wt% 이상)으로 분류된다.

히터를 10 °C/min로 가열하여 양쪽 가열벽의 온도가 800 °C가 되도록 한다. 가열벽의 온도가 800 °C에 도달하면 열 안정성을 유지하기 위해 800 °C에서 1.5-2 hr 동안 일정하게 유지한다. 2차 타르 분리기의 순환펌프를 작동시켜 노즐을 통해 물을 분무시키고 blower를 작동시켜 오븐내의 압력이 -3 mmH₂O가 되도록 한다. 원하는 석탄 시료를 평량 저울위의 호퍼에 일정한 부피로 채운다음 무게(20 kg)를 측정하고 수분 측정기에서 시료의 수분을 측정한다. 오븐의 양쪽 벽에 9개씩 있는 가스 probe를 상부 3개는 오븐벽에서 0.145 m, 중간 3개는 오븐 중심(0.225 m), 하부 3개는 오븐벽에서 0.07 m의 거리가 되도록 삽입한다. 석탄 시료를 오븐내로 장입하고, 장입높이가 일정하도록 leveling을 한다. 석탄 장입 직후 data acquisition을 통해 데이터 저장을 시작하며, 양쪽 가열벽의 온도를 1,000 °C로 가열한다. 가열벽의 온도가 1,000 °C에 도달하면 실험이 종료될 때까지 일정하게 유지한 다음 석탄내의 중심온도가 850 °C에 이르면 실험을

Table 1. Analyses of various coals used in coal blending

Coal	PH	PD	BM	FR	NP	GP	PG	DP	XL
Analysis									
Proximate analysis ^{ab}									
V.M	34.43	19.98	19.93	23.56	17.75	25.62	25.14	33.85	33.77
F.C	57.68	70.37	70.68	67.92	71.56	65.99	65.17	57.19	57.66
Ash	7.89	9.65	9.39	8.42	9.69	8.39	9.69	8.96	8.57
Ultimate analysis									
C	85.14	80.80	81.68	80.77	87.76	80.47	79.01	75.74	75.00
H	5.55	4.46	4.43	4.57	4.78	4.67	4.43	4.84	4.86
N	1.85	2.02	1.34	1.45	2.08	1.59	1.36	1.56	1.53
S	0.92	0.62	0.40	0.51	0.62	0.71	0.45	0.41	0.50
O*	6.54	12.10	12.15	12.70	2.66	12.56	14.75	17.45	18.11
FSI	7.5	8.5	8.0	7.6	8.1	7.6	4.0	4.1	4.5
RI	0.85	1.24	1.22	1.11	1.48	0.98	0.97	0.7	0.65
SI	3.26	5.18	4.86	4.25	6.67	3.80	3.71	2.38	2.33
Calorific value(cal/g)	7757	7782	7789	7718	7727	7775	7545	7527	7332

* : difference[100 - (C+H+N+S)]

PH : Pittston high volatile

PD : Peak Down

BM : Balmer

FR : Fording River

GP : Greenhills(Poscan)

PG : Pingdingshan

DP : Dong Pang

XL : X.L. Zhuang

NP : Norwich Park

중결하였다. 석탄내의 중심온도가 850 °C에 도달하면 양쪽벽에 있는 가스 probe를 오븐으로부터 빼내고, 스크류를 이용하여 이동벽을 뒤로 이동시킨다. 코크스 배출은 오븐 하부에 코크스 배출통을 놓고 오븐 양쪽에서 쇠봉을 이용하여 코크스를 아래로 떨어뜨리며, 배출된 적열 코크스는 외부에서 물을 사용하여 소화한다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 석탄의 유동도(fluidity) 특성

Fig. 3은 본 연구에 사용된 단일탄들의 최고유동도를 휘발분 함량에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이, 원료탄의 유동도는 휘발분이 증가할수록 즉 석탄 등급이 감소할수록 대체적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 휘발분 함량이 증가함에 따라 석탄이 연화될 때 발생하는 연화 용융물의 양이 증가하였기 때문으로 사료된다. 일반적으로 석탄의 연화물성은 휘발분함량이 13-15 % 이상일

때 나타나게 되며, 휘발분이 증가함에 따라 증가하며 25-30 %에서 최대를 보이고 휘발분이 35-40 % 이상이면 연화물성이 나타나지 않는다. Gieseler plastometer에서 측정된 유동도는 휘발분이 대략 28-30 %에서 최대를 보인다고 알려져 있다[16]. 코크스 오븐에서 석탄 건류시 높은 팽창압(coking pressure)은 대개 휘발분이 26%(dry, ash-free basis) 이하의 석탄으로 이들 탄의 사용에는 주의가 요구된다[1, 12].

Fig. 4는 배합비 변화에 따른 배합탄의 유동도 특성을 나타낸 것이다. (A)는 미국탄(PH)을 5-20 wt%로 변화시켰을 때 배합탄의 유동도 변화를 나타낸 것이다. PH 탄의 배합비가 증가할수록 배합탄의 휘발분은 약간 증가한다. PH 탄이 증가함에 따라 연화개시온도, 고화온도 및 최고유동도온도는 거의 일정하지만 배합탄의 유동도는 증가하는 경향을 나타낸다. (B)는 강점결탄(PD)을 30-45 wt%로 변화시켰을 때 배합탄의 유동도를 나타낸 것이다. PD 탄의 양이 증가함에 따라 연화개시온도, 고화온도, 최고유동도온도 및 유동도가 증가하는 것을 알 수 있다. PD 탄의 배합비가 증가할수록 배합탄의 휘발분은 약간 감소하지만, 배합탄의 유동도는 PD 탄의 유동도에 영향을 크게 받는 것으로 사료된다. (C)는 중점결탄(GP)을 20-35 wt%로 변화시켰을 때 배합탄의 유동도를 나타낸 것이다. GP 탄의 양이 증가할수록 연화개시온도, 고화온도, 최고유동도온도 및 유동도가 거의 일정한 값을 유지하는 것을 알 수 있다. GP 탄의 배합비 증가에 따라 배합탄의 휘발분은 거의 일정하며, GP 탄은 배합탄의 유동도 특성에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. (D)는 DP 탄을 0-15 wt%로 변화시켰을 때 배합탄의 유동도를 나타낸 것이다. DP 탄의 양이 증가할수록 배합탄의 휘발분은 약간 증가하며, 연화개시온도는 감소하고 고화온도, 최고유동도온도 및 유동도는 증가하는 경향을 보인다. (E)는 일반탄(XL)을 10-25 wt%로 변화시켰을 때 배합탄의 유동도를 나타낸 것이다. XL 탄의 양이 증가함에 따라 연화개시온도, 고화온도, 최고유동도온도 및 유동도가 감소하였다. XL 탄의 증가에 따라 배합탄의 휘발분은 증가하지만, XL 탄의 유동도 특성은 다른 탄에 비해 가장 낮은 유동도, 최고유동도온도 및 고화온도를 나타내기 때문에 배합탄의 유동도 특성에 영향을 미친 것으로 사료된다. 석탄의 유동도 특성과 석탄 팽창압과의 관계는 석탄이 최고 유동도를 나타내는 온도에서 최대 팽창압을 나타내는 것으로 보고된 바 있다[7].

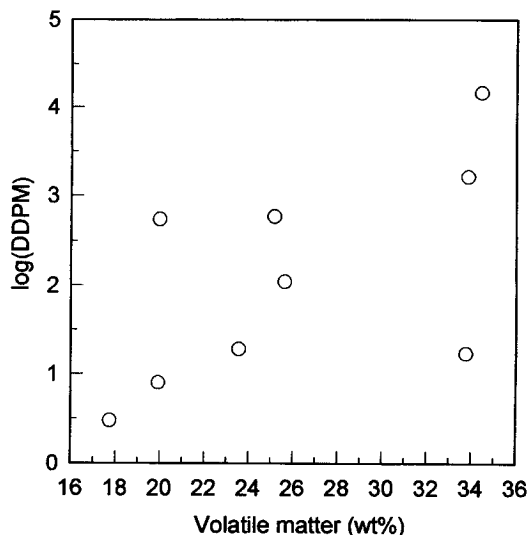


Fig. 3. Fluidity properties of single coals with volatile matter.

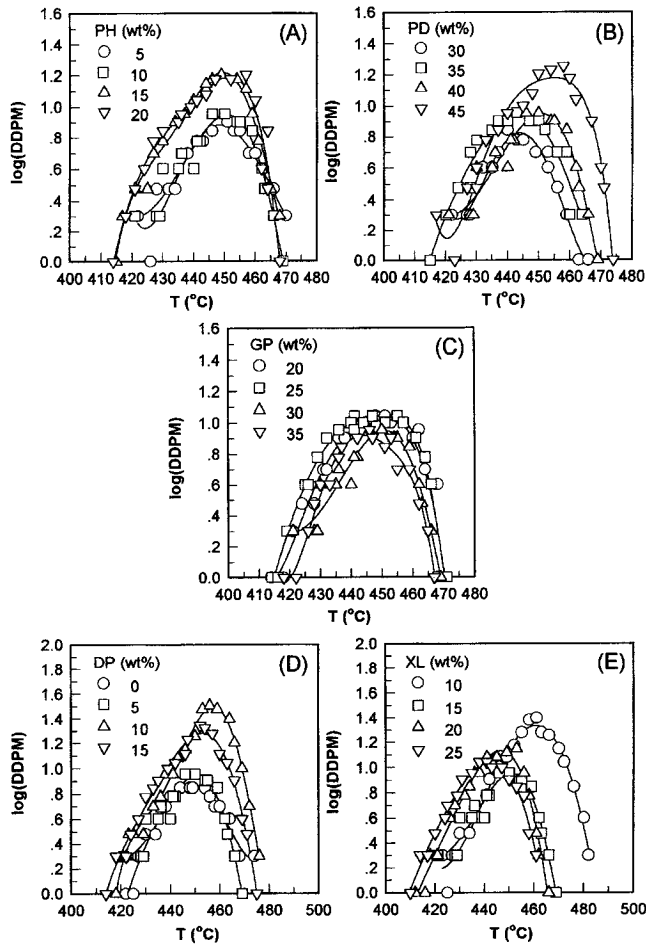


Fig. 4. Fluidity properties of coal blend with mixing ratio of single coals.

4.2. 단일탄 및 배합탄의 CO₂ 반응성과 반응후강도(CSR)

Fig. 5는 단일탄의 CO₂ 반응성과 반응후강도(CSR)에 대한 석탄 등급(평균 반사율)의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 석탄 등급이 증가함에 따라 반응성은 감소하고 CSR은 증가하는 것을 알 수 있다. 석탄의 점결력은 석탄 등급이 증가함에 따라 증가하기 때문에 점결력이 강한 석탄으로 제조된 코크스의 강도는 높게 나타나고 CO₂ 반응성은 낮게 된다. 일반적으로 점결성이 강한 석탄일수록 코크스 강도는 좋으나 가격이 비싸고, 전류시 높은 팽창압을 갖기 때문에 적절한 조건에서 사용하는 것이 바람직하다.

Fig. 6은 배합탄으로부터 제조된 코크스의 CO₂ 반응성과 반응후강도(CSR)에 대한 배합비의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 계산된 값은 배합탄에 배합된 각 단일탄의 배합비로부터 계산된 배합탄의 CSR과 반응성을 나타낸다. (A)는 PH 탄을 5-20wt%로 변화시켰을 때 CO₂ 반응성과 CSR의 변화를 나타낸 것이다. 배합탄의 CSR은 PH 탄의 CSR 보다 훨씬 크며, PH 탄이 10wt%까지 증가함에 따라 배합탄의 CSR이 증가하다가 10wt% 이상에서는 거의 일정한 값을 나타내었다. 그러나 각 단일탄의 배합비로 계산된 배합탄의 CSR은 약간 감소하는 것으로 나타났다. 일반적으로 코크스 강도는 석탄의 강도지수(SI)가 클수록 증가하는 것으로 나타나므로, PH 탄이 배합탄의 CSR을 증가시키는 것은 PH 탄의 양이 증가할수록 배합탄의 강도지수(SI)가 증가하기 때문으로 사료된다. 또한 배합탄의 반응성은 PH 탄보다 훨씬 적으며 PH 탄의 변화에 따라 거의 일정한 값을 나타내었다. (B)는 CO₂ 반응성과 CSR에 대한 강점결탄(PD)(30-45

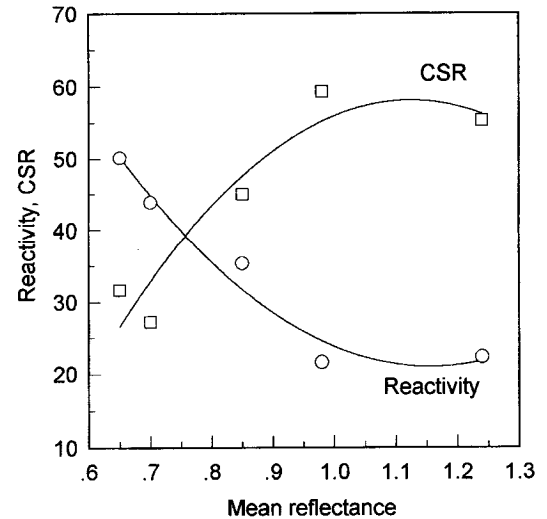


Fig. 5. Reactivity and CSR of single coals with coal coalification.

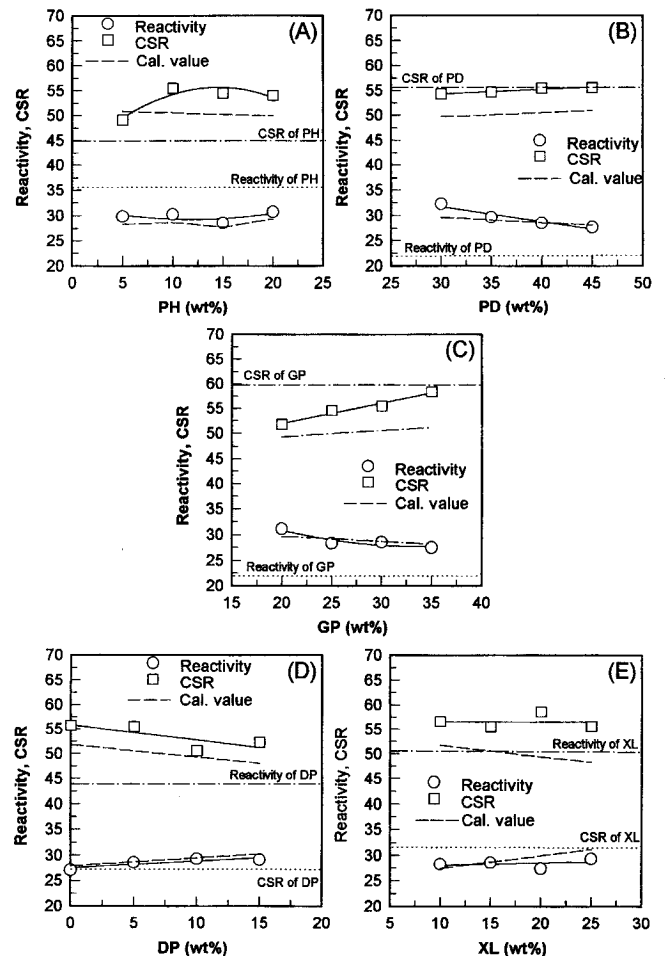


Fig. 6. Reactivity and CSR of coal blend with mixing ratio of single coals.

wt%)의 영향을 나타낸 것이다. 배합탄의 CSR은 PD 탄의 CSR 보다 약간 작고, 각 단일탄의 배합비로부터 계산된 값보다 훨씬 크며 PD 탄의 양이 증가함에 따라 증가한다. 배합탄의 반응성은 PD 탄의 반응성보다 훨씬 큰 값을 나타내지만 PD 탄의 양에 따라 감소하며, 계

산된 반응성과 거의 같은 경향을 나타낸다. (C)는 중점결탄(GP)을 20-35 wt%로 변화시켰을 때의 영향을 나타낸 것이다. 배합탄의 CSR은 GP탄 보다 작으며, GP 탄이 증가함에 따라 증가한다. 이것으로부터 GP 탄은 배합탄의 강도증가에 크게 기여하는 것으로 생각된다. 배합탄의 반응성은 GP 탄의 반응성보다 훨씬 크며 GP 탄의 양이 증가함에 따라 감소하며, 각 단일탄의 배합비로부터 계산된 값과 거의 일치하였다. (D)는 DP 탄(0-15 wt%)의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이, 배합탄의 CSR은 DP 탄의 CSR 보다 훨씬 크며 DP 탄의 양이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 배합탄의 반응성은 DP 탄의 양이 증가함에 따라 증가하며, 각 단일탄의 배합비로부터 계산된 배합탄의 반응성 값과 거의 일치하였다. (E)는 일반탄(XL) (10-25 wt%)에 대한 영향을 나타낸 것이다. 배합탄의 CSR은 XL 탄 보다 훨씬 크며 XL 탄의 양이 증가함에 따라 거의 일정한 값을 보이지만, 각 단일탄의 배합비로부터 계산된 배합탄의 CSR 값은 XL 탄의 양이 증가함에 따라 감소한다. XL 탄은 낮은 CSR에도 불구하고 배합시 제조된 코크스의 CSR을 감소시키지 않는 것으로 보인다. 배합탄의 반응성은 XL 탄의 증가에 따라 약간 증가하는 경향을 보이며, XL 탄의 반응성보다 훨씬 낮은 값을 나타낸다.

4-3. 시험로에서 석탄 팽창압(coking pressure) 특성

Fig. 7은 수분 7.6 %의 PH 탄에 대해 건류시간에 따른 석탄 팽창압, 장입된 석탄 중심의 가스압 및 온도 변화를 나타낸 것이다. 석탄 장입 후 석탄 중심온도는 석탄내의 모든 수분이 증발할 때까지 100 °C를 유지하며 수분 증발 후 급격하게 증가한다. 석탄 팽창압은 석탄 장입후부터 거의 선형적으로 증가하며 석탄 중심에서 수분 증발에 의한 수증기압은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 석탄 중심온도 860 °C 부근에서 팽창압은 0.75 psi의 최고 값을 나타내었다. 6 m 오븐의 경우 안정 제한값이 1 psi이므로 PH 탄의 팽창압은 높은 값으로 볼 수 있다. 석탄 중심에서의 가스압은 450 °C에서 최대 peak(40 mmH₂O)를 나타내었으며 이것은 PH 탄의 최고유동온도와 비슷한 온도이다.

Fig. 8은 수분 7.9 %의 강점결탄(PD)에 대해 건류시간에 따른 석탄 팽창압, 석탄 중심의 가스압 및 온도 변화를 나타낸 것이다. 석탄 팽창압은 석탄 중심온도가 100 °C 도달 후부터 급격히 증가한 다음 건류가 진행됨에 따라 서서히 증가하다가 석탄 중심온도가 620 °C에서 peak를 보인 후 감소한다. 석탄 중심에서의 가스압은 570 °C에서 최대 peak(167 mmH₂O)를 나타내었다. 570-620 °C 근처에서 석탄 팽창압 peak와 가스압 peak를 나타낸 것으로 보아 시험로의 양쪽 가열

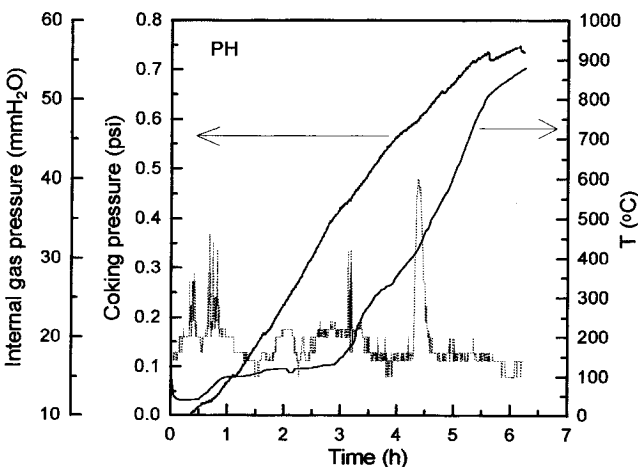


Fig. 7. Variation of coking pressure and internal gas pressure during carbonization with time. PH coal-moisture 7.6 %.

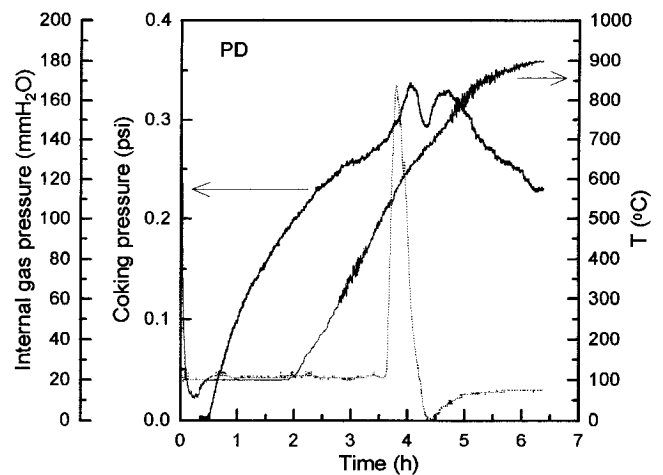


Fig. 8. Variation of coking pressure and internal gas pressure during carbonization with time. PD coal-moisture 7.9 %.

벽에서 형성된 연화층이 건류가 진행됨에 따라 거의 오븐 중심에서 합체된 것으로 생각된다. 강점결탄인 PD 탄은 최대 팽창압이 0.34 psi로 큰 값을 나타내지는 않았다.

Fig. 9는 수분 9.2 %의 강점결탄(NP)에 대해 건류시간에 따른 석탄 팽창압, 석탄 중심의 가스압 및 온도 변화를 나타낸 것이다. 석탄 팽창압은 석탄 장입 2 hr 이후부터 선형적으로 증가하여 석탄 중심온도 500 °C에서 peak를 보인 후 감소하였다. NP 탄의 최대 팽창압은 0.80 psi로 매우 높은 값을 나타내므로 코크스 제조시 오븐손상 방지를 위해 석탄 배합에 주의를 필요로 한다. 석탄 중심에서의 가스압은 팽창압이 최대를 나타내는 온도에서 149 mmH₂O의 peak를 나타내었다.

Fig. 10은 수분 7.6 %의 중점결탄(GP)에 대해 건류시간에 따른 석탄 팽창압, 석탄 중심의 가스압 및 온도 변화를 나타낸 것이다. 석탄 팽창압은 석탄 중심의 가열초기부터 건류가 진행됨에 따라 계속 증가하여 건류 5 hr에 peak를 나타낸 후 감소한다. 석탄 중심의 가열속도는 6.8 °C/min로 나타났다. GP 탄의 최대 팽창압은 0.26 psi로 매우 낮은 값을 나타내었다. 석탄 중심에서의 가스압은 석탄내의 온도가 410 °C 근처에서 peak를 나타내었다. 석탄 팽창압 peak와 가스압 peak가 대략적으로 일치하지 않는 것으로 보아 양쪽 가열벽에서 형성된 연화층이 건류가 진행됨에 따라 중심에서 만나지 않는 것으로 생각

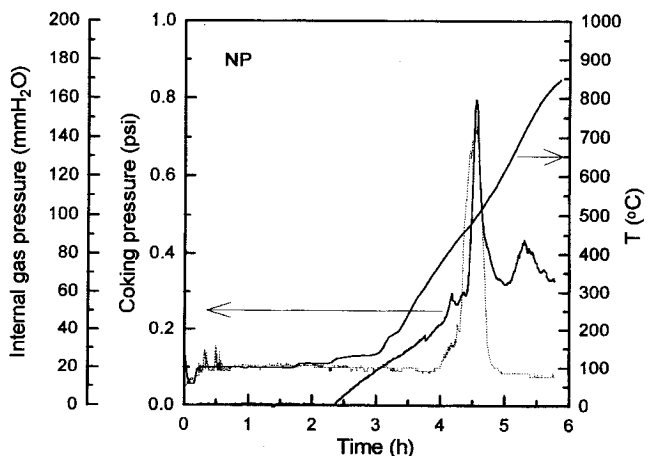


Fig. 9. Variation of coking pressure and internal gas pressure during carbonization with time. NP coal-moisture 9.2 %.

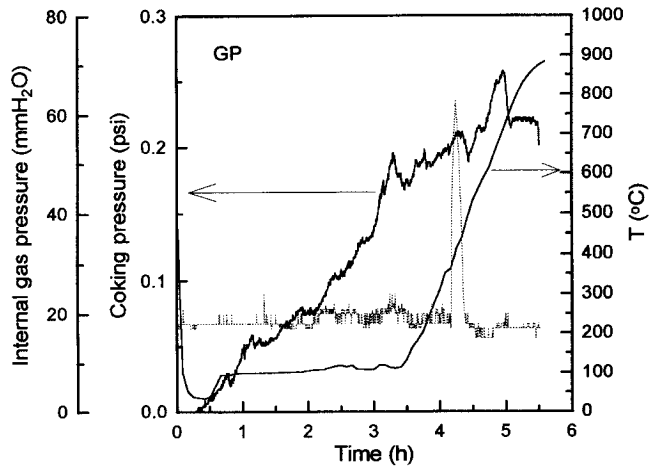


Fig. 10. Variation of coking pressure and internal gas pressure during carbonization with time. GP coal-moisture 7.6 %.

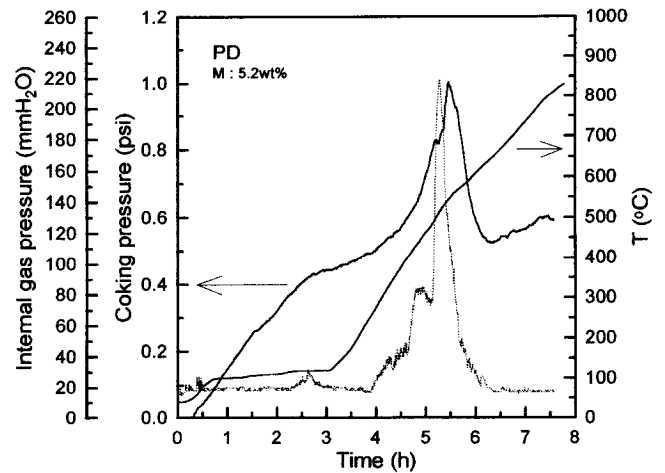


Fig. 12. Variation of coking pressure and internal gas pressure during carbonization with time. Dried PD coal-moisture 5.2 wt%.

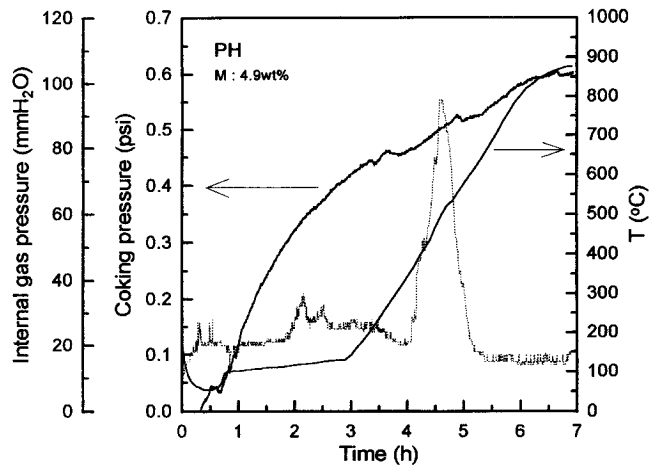


Fig. 11. Variation of coking pressure and internal gas pressure during carbonization with time. Dried PH coal-moisture 4.9 wt%.

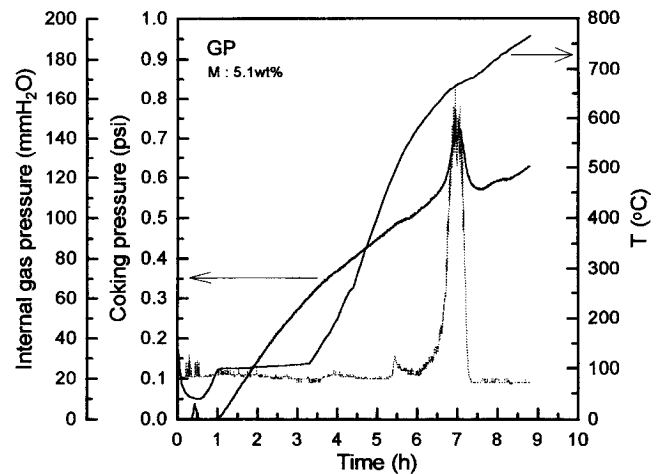


Fig. 13. Variation of coking pressure and internal gas pressure during carbonization with time. Dried GP coal-moisture 5.1 wt%.

된다.

Fig. 11은 수분 7.6%의 PH 탄을 4.9%로 건조하여 시험로에 장입하였을 때 건류시간에 따른 석탄 팽창압, 석탄 중심의 가스압 및 온도 변화를 나타낸 것이다. 건조탄의 장입밀도는 672 kg/m³로 건조 전에 비해 14.55% 증가하였다. 석탄 팽창압은 석탄 중심온도가 100°C 도달 후부터 급격히 증가한 다음 건류가 진행됨에 따라 서서히 증가하여 장입 후 6.5 hr에 최대 peak를 나타내었다. PH 탄의 최대 팽창압은 0.61 psi로 건조 전의 팽창압 0.75 psi 보다 18.7% 낮은 값을 나타내었다. 중심에서의 가스압은 500°C에서 peak를 나타내었으며, 최대 가스압은 95 mmH₂O로 건조 전의 40 mmH₂O 보다 거의 두배 이상 증가하였다.

Fig. 12는 수분 7.9%의 강점결탄(PD)을 5.2%로 건조하여 시험로에 장입하였을 때 건류시간에 따른 석탄 팽창압, 석탄 중심의 가스압 및 온도 변화를 나타낸 것이다. 건조된 석탄의 장입밀도는 건조 전보다 17.8% 증가한 689 kg/m³로 나타났다. 석탄 팽창압은 중심온도 100°C 도달 후부터 급격히 증가하여 약간의 수증기압을 나타낸 후 서서히 증가하여 석탄 중심온도 540°C에서 peak를 보인 후 감소하였다. 최대 팽창압을 보인 온도는 PD 탄의 최고유동도온도(467°C) 보다 높고 건조하기 전 습탄의 최고 팽창압 온도(620°C) 보다 낮게 나타났으며, 같은 조건에서 석탄 중심에서의 가열속도는 장입량 증

가로 인해 습탄(4.6°C/min)에 비해 건조탄(3.1°C/min)이 느리게 나타났다. PD 탄의 최대 팽창압은 1.0 psi로 습탄의 팽창압 0.34 psi 보다 2.9배 높은 값을 나타내었다. 이것은 건조탄의 중심에서 낮은 가열속도에도 불구하고 장입밀도의 증가로 인한 연화층 팽창의 제한과 발생가스의 통과저항 증가가 팽창압 증가에 기인한 것으로 사료된다. 중심에서의 가스압은 석탄내의 온도가 520°C에서 peak를 나타내었으며, 최대 가스압은 220 mmH₂O로 습탄의 167 mmH₂O 보다 크게 증가하였다.

Fig. 13은 수분 7.6%의 중점결탄(GP)을 5.1%로 건조하였을 때 건류시간에 따른 석탄 팽창압, 석탄 중심의 가스압 및 온도 변화를 나타낸 것이다. 건조탄의 장입밀도는 664 kg/m³로 습탄에 비해 13.1% 증가한다. 석탄 팽창압은 석탄 중심온도가 100°C 도달 후부터 급격히 증가하여 석탄 중심온도 670°C에서 peak를 보인 후 감소하였다. 최대 팽창압을 보인 온도가 GP 탄의 최고유동도온도(458°C)보다 높게 나타났다. GP 탄의 최대 팽창압은 0.73 psi로 습탄의 팽창압보다 2.8배 높게 증가하였으며, 석탄 중심에서의 가열속도(3.2°C/min)는 수분 감소에 의한 영향보다 장입량의 증가로 습탄의 가열속도(6.8°C/min)에 비해 훨씬 느리게 나타났다. 석탄 중심에서의 가스압은 석탄내의 온도가 670°C에서 peak를 나타내었으며, 최대 가스압은 165

Table 2. Comparison of coking and internal gas pressure between wet and dried coal

Coal	Max. fluidity (ddpm)	Wet coal					Dried coal			
		Moist. (wt%)	Bulk density ^{db} (kg/m ³)	Coking press.(psi)		Gas press. (mmH ₂ O)	Moist. (wt%)	Bulk density ^{db} (kg/m ³)	Coking press. (psi)	Gas press. (mmH ₂ O)
				Exp.	Co.					
PH	14689	7.6	587	0.75		40	4.9	672	0.61	95
PD	544	7.9	585	0.34	<0.5	167	5.2	689	1.0	220
NP	52	9.2	577	0.80	4.5	149				
FR	8	7.1	590	0.25		59				
GP	110	7.6	587	0.26		63	5.1	664	0.73	165
PG	587	9.2	577	0.27						
DP	1635	7.5	587	0.69		32	5.7	704	0.44	128
XL	17	8.3	582	0.24			5.0	691		

mmH₂O로 습탄의 63 mmH₂O 보다 크게 증가하였다.

Table 2는 각각의 단일탄을 시험로에서 건류하였을 때 최대 석탄 팽창압과 석탄 중심에서의 최대 가스압을 나타낸 것이며, 일부 탄에 대해서는 원료공급사의 석탄 팽창압 데이터와 비교하였다. 또한 건조된 석탄을 건류하였을 때의 건류특성을 습탄의 건류특성과 비교하였다. 표에서 보듯이, 유동도[log(ddpm)]와 팽창압 관계를 보면 대체로 유동도가 큰 석탄들이 건류과정에서 높은 팽창압을 나타내었다. 그러나 NP 탄의 경우 낮은 유동도에도 불구하고 가장 큰 석탄 팽창압을 나타낸 것은 건류과정에서 형성된 연화층의 특성(점도, 두께)이 발생가스의 흐름에 큰 저항으로 작용하는 것에 기인한 것으로 사료된다[3, 12]. 석탄을 건조하면 장입밀도는 13-20% 정도 증가하며, 건조된 석탄을 건류하였을 때 팽창압과 가스압이 크게 증가하였다. 일부 점결력이 높은 석탄들은 건조 전에는 낮은 팽창압을 나타내지만, 건조된 석탄의 건류시에는 장입밀도 증가로 인해 매우 높은 팽창압을 나타내었다. 장입밀도 증가의 영향이 나타나지 않은 일부 탄에 대해서는 더 많은 연구가 필요하다.

5. 결 론

(1) 단일탄의 유동도는 휘발분 함량이 증가함에 따라 증가하였으나, 배합탄의 유동도는 휘발분 함량보다는 단일탄의 유동도 특성의 영향을 받는 것으로 나타났다.

(2) 단일탄의 CO₂ 반응성은 석탄 등급이 증가함에 따라 감소하였으나, 반응후강도(CSR)는 증가하였다.

(3) 배합탄의 반응후강도(CSR)는 점결성이 큰 석탄이 증가함에 따라 증가하였으나, 점결성이 약한 석탄의 증가에 대해서는 감소하거나 일정하였다. 배합탄의 CO₂ 반응성은 점결성이 강한 석탄량의 증가에 따라 감소하였으나, 점결성이 약한 석탄량의 증가에 대해 증가하였다.

(4) 유동도가 큰 석탄(PH, DP)들이 높은 팽창압을 나타내었으나, 상대적으로 낮은 유동도를 갖는 NP 탄은 가장 높은 팽창압을 나타내었다.

(5) 습탄(7-9 wt%)을 5-6 wt%의 수분을 갖는 석탄으로 건조하였을 경우 장입밀도는 13-20% 증가하며, 건조탄 중심에서의 건류속도는 습탄에 비해 훨씬 느리게 나타났다. 건조된 점결탄의 팽창압은 습탄에 비해 2배 이상의 높은 값을 나타내었으며, 석탄 중심의 가스압은

습탄에 비해 높은 값을 나타내었다.

감 사

본 연구는 포항제철의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 표합니다.

참고문헌

1. Tucker, J. and Everitt, G.: *Ironmaking Conference Proceedings*, 599 (1989).
2. Benedict, L. G. and Thompson, R. R.: *Ironmaking Proceedings, ISS-AIME*, **35**, 276(1976).
3. Tucker, J. and Everitt, G.: 2nd International Cokemaking Congress, 40(1992).
4. Monson, J. R.: *Cokemaking International*, **4** Special, 3(1992).
5. Latshaw, G. H., McCollum, H. R. and Stanley, R. W.: *ISS Ironmaking Proceedings*, **43**, 373(1984).
6. Lindert, M. T. and van der Velden, B.: *Ironmaking Conference Proceedings*, 115(1994).
7. Nishioka, K. and Yoshida, S.: *J. Fuel Soc. Japan*, **68**(3), 210(1989).
8. Grimley, J. J. and Radley, C. E.: *Ironmaking Conference Proceedings*, 415(1995).
9. Harris, W. F.: *Ironmaking Conference Proceedings*, 587(1994).
10. Gransden, J. F., Price, J. T. and Khan, M. A.: *Ironmaking Conference Proceedings*, 155(1988).
11. Rohde, W., Habermehl, D. and Kolitz, V.: *Ironmaking Conference Proceedings*, 135(1988).
12. Loison, R., Foch, P. and Boyer, A.: "Coke ; Quality and Production", Butterworths, London, 353(1989).
13. Geny, J. F. and Duchene, J. M.: *Cokemaking International*, **4**, 21 (1992).
14. Yoon, K. H., Kim, K. H. and Lee, Y. K.: *HWAHAK KONGHAK*, **35**, 585(1997).
15. Japan Industrial Standard 2151.
16. Lowry, H. H.: "Chemistry of Coal Utilization", John Wiley & Sons, 150(1963).