

Pilot-scale의 코크스 오븐에서 석탄 건류시 팽창압 특성

이운재 · 최재훈 · 이용국

포항산업과학연구원, 에너지/화성연구팀

Characteristics of Coking Pressure during Coal Carbonization in Pilot-scale Coke Oven

Woon-Jae Lee, Jae-Hoon Choi and Yong-Kuk Lee

Energy/Coal and Chemical Process Research Team, RIST

요 약

코크스 오븐에서 석탄 건류과정 중에 발생하는 석탄 중심의 가스압 특성에 대한 장입탄 수분, 가열속도 및 일반탄 배합비의 영향을 조사하기 위해 이동벽이 있는 pilot 규모의 코크스 오븐(0.45 mW×0.1 mH×1.2 mL)에서 석탄 건류 실험을 수행하였다. 석탄 중심에서의 가열속도가 상업용 코크스 오븐과 비슷한 건류조건에서 장입탄 수분을 감소시켰을 때, 수분 증발 이후 가열속도는 비슷하였으며, 건류 초기 수증기압은 크게 증가하였고, 석탄 중심에서의 가스압은 습탄에 비해 대략 2.5배 증가하였다. 석탄 중심에서의 가열속도가 상업용 코크스 오븐보다 훨씬 빠른 건류조건에서 장입탄 수분을 감소시켰을 때, 수분 증발 이후 가열속도는 크게 감소하였고, 건류 초기 수증기압은 크게 증가하였으며, 석탄 중심에서의 가스압은 습탄에 비해 대략 2배 이상 증가하였다. 석탄 가열속도가 상업용 오븐보다 빠른 건류조건에서 장입탄에 일 반탄을 첨가하여 일반탄 배합비를 증가시켰을 때 배합탄 중심에서의 가스압은 현저히 감소하였다.

Abstract— Coal carbonization for charging coal used in cokemaking has been carried out in pilot-scale coke oven (0.45 mW×1.0 mH×1.2 mL) to investigate the effect of moisture content, heating rate, and blending ratio of non-coking coal on the internal gas pressure behavior. Decreasing moisture content of charging coal at similar heating rate to the industrial coke oven, heating rate at coal charge center after evaporating moisture was similar, steam pressure at the initial coking stage greatly increased, and internal gas pressure of dried charging coal was approximately 2.5 times as high as that of wet charging coal. Decreasing moisture content of charging coal at far faster heating rate than that in the industrial coke oven, heating rate at coal charge center after evaporating moisture largely decreased, steam pressure at the initial coking stage greatly increased, and internal gas pressure of dried charging coal was approximately two times as high as that of wet charging coal. Increasing blending ratio of non-coking coal in charging coal at far faster heating rate than that in the industrial coke oven, internal gas pressure greatly decreased.

1. 서 론

상업용 코크스 오븐에서 석탄 건류과정 중에 대하는 가장 중요한 문제의 하나는 높은 석탄 팽창압의 발달이다. 코크스 오븐에 장입된 석탄이 건류중 오븐 벽에 작용하는 힘은 내화물 구조의 저항 한계를 넘어서는 안 된다. 코크스 오븐에서 팽창압의 예측과 제어는 특히 노화 된 코크스 오븐에서는 매우 중요하다. 일반적으로 석탄 팽창압은 연화상태에 있는 석탄에서 발생된 휘발분에 의

해 야기되며^[1], 휘발분 방출속도와 연화층에서의 가스 투과도에 의존한다^[2]. 석탄이 slot-type 오븐에서 건류될 때 두 개의 연화층이 오븐 벽에 평행하게 형성되며, 건류가 진행됨에 따라 연화층은 점차적으로 중심으로 이동하여 결국 오븐 중심에서 만나게 된다. 보통 휘발분 함량이 17~25%(daf) 되는 석탄에 대해 오븐 중심에서 두 연화층이 합체될 때 연화층 내에서 최대 가스압의 발생을 동반한다^[3,4]. 이 압력은 코크스를 통해 오븐 벽으로 전달되며, 충분히 크면 오븐 벽의 손상을 야기한다. 화학분

석과 팽윤물성 조건에서 비슷한 특성의 석탄들에서도 팽창압 발생에 대해 아주 다른 거동을 나타낸다. 어떤 석탄들은 위험한 반면 다른 석탄은 안전하게 건류 된다. 최근 석탄 전처리 기술의 도입과 대형 오븐의 개발에 의해 팽창압은 더욱 중요한 문제가 되고 있다. 전처리 기술에 의해 코크스 품질개선이 시도하고 있으며, 원료 비용저감 측면에서 장입탄의 장입밀도를 증가시키는 방법들(oiling법, 성형탄 배합법, 건조탄 및 예열탄 장입법)이 개발되고 있다. 한편, 코크스 오븐의 설비집약에 동반된 고가동률 조업에 의해 코크스 오븐 온도가 상승하고 있다. 이와 같은 기술의 발달은 석탄의 장입밀도를 증가시키며, 이는 팽창압을 증가시키게 되어 연외손상 및 압출막힘 현상의 발생으로 결국 오븐 수명을 단축시키게 된다. 많은 방법들이 석탄의 팽창압 특성을 측정하기 위해 개발되었다^[5-8]. 많은 비용과 측정시간이 길다는 문제는 있지만 석탄 건류시 오븐 벽에 영향을 주는 압력을 직접 측정하는 확실한 방법은 이동력이 있는 pilot 규모의 시험로를 이용하는 것이다^{[9][13]}. 또한 프로브를 이용하여 상업용 오븐이나 시험로에서 석탄 내의 가스압을 측정하

고 이를 토대로 석탄 내의 가스압과 팽창압과의 관계를 계산하기 위한 연구가 많이 진행되고있다^{[14][22]}.

본 연구에서는 pilot 규모의 코크스 오븐에서 야금용 코크스 제조에 사용되는 배합탄에 대해, 석탄 건류시 석탄 수분, 가열속도 및 일반탄 배합비 변화에 따른 석탄 내 가스압 특성을 조사하였다.

2. 실험

2-1. 사용된 석탄

상업용 코크스 오븐에서는 야금용 코크스 제조를 위해 여러 종류의 단일탄을 배합하여 사용한다. 본 연구에서는 POSCO의 코크스 오븐에서 코크스 제조를 위해 사용되는 장입탄을 사용하였다. 장입탄은 10여 종류의 단일탄으로 배합되며, 장입탄 입도는 3 mm이하가 83%이다. 장입탄에 배합된 단일탄의 공업분석 및 원소분석, 장입탄의 배합비 및 장입탄의 공업분석 및 원소분석은 각각 Table 1, Table 2 및 Table 3에 나타내었다. 석탄 수분은 110°C의 강제 순환식 건조오븐에서 일정시간 동안

Table 1. Analyses of various coals used in coal blending.

Analysis Coal	Proximate analysis ^{ab}			Ultimate analysis						LMF	TD	RI	FSI
	V.M	F.C	Ash	C	H	N	S	O*					
US coal	CW	32.25	60.35	7.40	87.90	5.24	1.59	0.83	4.44	4.11	217	0.95	8.0
	ER	33.64	60.18	6.18	87.33	5.24	1.61	0.83	4.99	4.15	226	0.93	8.0
	PH	35.12	57.49	7.39	86.91	5.32	1.77	0.92	5.08	4.13	161	0.90	7.5
Strong-coking	BM	20.50	69.98	9.52	91.29	4.67	1.29	0.33	2.42	1.20	29	1.23	6.5
	LC	22.67	67.78	9.55	91.28	4.65	1.17	0.28	2.62	2.49	66	1.15	6.7
	PD	20.78	69.50	9.72	89.62	4.76	1.85	0.57	3.20	2.60	112	1.26	8.0
	FR	23.47	67.07	9.46	89.69	4.7	1.34	0.44	3.76	1.96	62	1.11	7.0
	GC	19.37	71.52	9.11	90.45	4.62	2.08	0.73	2.12	2.29	82	1.37	7.7
	SJ	19.11	71.16	9.73	90.88	4.68	1.87	0.61	1.96	2.41	108	1.38	8.0
	YK	18.80	71.50	9.70	92.68	4.51	0.81	0.20	1.80	1.71	69	1.45	8.5
Medium-coking	GG	34.69	58.25	7.06	85.41	5.56	2.16	0.58	6.29	3.43	158	0.83	8.0
	GY	24.40	66.51	9.09	89.48	4.98	1.83	0.52	3.19	3.11	139	1.05	8.0
	OC	27.36	63.35	9.29	88.21	5.20	2.20	0.65	3.74	3.81	314	1.02	8.1
	GP	27.65	63.95	8.40	88.33	5.00	1.58	0.64	4.45	2.59	96	0.98	7.8
	PG	28.54	61.43	10.03	88.23	4.85	1.64	0.46	4.82	3.11	49	0.91	4.3
Weak-coking	DP	32.90	58.50	8.60	85.38	5.24	1.77	0.33	7.28	3.40	68	0.71	4.3
Non-coking	MW	35.16	55.54	9.30	83.23	5.41	1.79	0.47	9.10	1.88	33	0.70	5.0
	GD	35.90	55.12	8.98	82.42	5.88	2.31	0.53	8.86	1.97	32	0.68	3.9
	XL	34.17	56.83	9.00	81.65	5.23	1.82	0.48	10.82	1.56	8	0.67	4.0
	MX	34.18	56.87	8.95	82.60	5.42	1.74	0.41	9.83	1.54	21	0.71	4.0
	TH	35.20	56.69	8.11	84.65	5.19	1.55	0.81	7.80	3.15	46	0.72	5.0
	PC	11.70	87.60	0.70	90.55	3.65	2.87	2.2	0.73				

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

V.M : Volatile Matter, F.C: Fixed Carbon, C: Carbon, H: Hydrogen, N: Nitrogen S: Sulfur, O: Oxygen, LMF: Logarithmic Maximum Fluidity, TD: Total Dilatation, RI: Reflectance Index, FSI: Free Swelling Index.

Table 2. Blending ratio of industrial charging coal used in carbonization.

Charging coal	Blending ratio (wt%)
CC-I	PH: 9, SJ: 16, LC: 10, YK: 7, OC: 8, GY: 17, PG: 8, GD: 15, XL: 7, PC: 3
CC-II	ER 10, GC: 8, PD: 15, FR: 14, GG: 14, GP: 10, DP: 6, PC: 2, MX: 9, GD: 12
CC-III	CW: 16, GC: 24, BM: 11, YK: 5, GG: 13, GY: 10, OC: 6, MW: 12, PC: 3
CC-IV	CW: 16, GC: 23, BM: 10, YK: 5, GG: 7, GY: 9, OC: 5, MW: 9, PC: 3, TH: 13

Table 3. Analyses of coal blends composed of single coals.

Analysis Coal blends	Proximate analysis ^{ab}			Ultimate analysis					LMF	TD	RI	FSI
	V.M	F.C	Ash	C	H	N	S	O*				
CC-I	26.55	64.51	8.94	88.10	5.02	1.81	0.58	4.49	2.61	101	1.00	6.4
CC-II	28.53	63.10	8.37	87.02	5.13	1.85	0.60	5.40	2.58	96.2	0.95	6.6
CC-III	26.17	65.41	8.42	88.50	4.98	1.83	0.64	4.05	2.64	118	1.05	7.2
CC-IV	26.69	64.91	8.40	88.28	4.96	1.78	0.68	4.30	2.68	108	1.02	6.9
CC-III + XL (Non-coking coal 45%)	28.99	62.38	8.63	86.08	5.07	1.83	0.59	6.43	2.26	79	0.9	6.0
CC-IV + XL (Non-coking coal 45%)	28.69	62.75	8.56	86.52	5.03	1.79	0.62	6.04	2.38	81.4	0.93	6.1

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

건조하여 조절하였다.

2-2. Pilot-scale coke oven

본 연구에 사용된 이동벽을 갖는 pilot 규모의 시험로

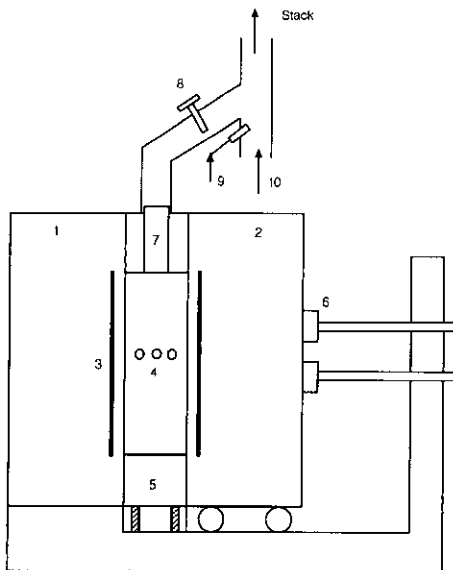


Fig. 1. Schematic diagram of pilot-scale coke oven with a movable-wall. 1. Fixed wall, 2. Movable wall, 3. Electric heater, 4. Probe, 5. Coking car, 6. Load cell, 7. Charging hole, 8. Gate valve, 9. LPG, 10. Air.

의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. Pilot-scale 시험로는 크게 오븐 본체, 코크스 압출 및 소화장치, 발생가스 연소장치 및 측정장치의 네 부분으로 구성된다.

오븐 본체(0.45 mW×1.0 mH×1.2 mL)는 이동벽, 탄화차 및 고정벽으로 구성되며, 가열벽인 이동벽과 고정벽은 셀리카 플레이트로 제작되었고, 탄화차는 부정형 내화물을 이용하여 제작되었다. 장입된 석탄 가열을 위해 이동벽과 고정벽에 각각 같은 용량의 히터(SiC)를 수평으로 설치하였다. 이동벽에는 석탄 건류과정에서 오븐 벽이 받는 힘을 측정할 수 있도록 세 개의 로드셀(10톤)을 설치하였으며, 하부에 레일과 바퀴를 설치하여 탄화차와 이동벽을 고정벽으로 밀착시킬 수 있도록 하였다. 탄화차는 석탄 건류 종료시 오븐 밖으로 이동시켜 적열 코크스를 배출할 수 있도록 하부에 레일과 바퀴가 설치되어 있다. 탄화차의 한쪽 벽(0.45 mW×1.0 mH)에는 석탄 내의 가스압과 온도를 측정할 수 있도록 세 개의 프로브를 오븐 쪽 방향으로 설치하였다. 탄화차의 다른 쪽 벽에는 오븐 바닥으로부터 0.75 m 높이에 장입된 석탄의 평탄화 작업(levelling)을 위한 도어가 설치되어 있다. 오븐 상부에는 석탄 장입을 위해 중앙에 장입구(0.3 m dia.)를 설치하였으며, 발생하는 가스(Coke Oven Gas) 배출을 위해 배출관(250A)을 설치하였다. 발생가스 배출관에는 오븐 내의 압력을 조절할 수 있도록 gate 밸브를 설치하였으며, 오븐 내 압력조절을 위해 배출관 하부에 압력계를 설치하여 약간의 양압(0~1 mmH₂O)이 걸

리도록 하였다.

적열 코크스를 배출시키기 위해 탄화차가 이동하는 레일 끝에 압출기(pusher)와 소화장치를 설치하였다. 압출기(pusher)는 유압으로 작동되며, 철판(steel plate(1.1 mL × 0.7mH))를 밀어 적열 코크스를 오븐 쪽 방향으로 배출시키도록 하였다. 적열 코크스는 형태를 유지하며 소화장치로 압출되며, 소화장치(steel box)로 이송된 적열 코크스는 밀폐시킨 후 질소(15 l/min)를 이용하여 소화하였다.

건류시 발생하는 가스(COG)를 연소시키기 위해 가스 배출관의 gate 밸브 후단에 LPG 버너와 공기 공급장치를 설치하였다. 발생된 가스는 LPG와 함께 연소되며, 연소된 배가스는 연도 통풍력에 의해 외부로 배출된다. 연도 통풍력 조절을 위해 연도 상부에 damper를 설치하였다.

석탄 내의 연화층에서 발생하는 가스압과 상응하는 온도는 내부에 K-type 열전대가 있는 프로브(1.2 mL × 3/8" dia., SUS tube)를 이용하여 측정하였다. 프로브를 통한 열전달에 의해 석탄의 가열패턴이 변하는 것을 방지하기 위해 프로브는 가열벽과 평행하게 설치하였다. 프로브의 한쪽 끝에 가스압을 측정할 수 있도록 직사각형의 구멍(2 mmW × 10 mmL)을 설치하였으며, 압력은 압력 전달장치(pressure transmitter, 2500 mmH₂O)를 이용하여 측정하였다. 이동벽에 설치된 로드셀, 석탄 내 가스압 및 온도 데이터는 PC에 저장되도록 하였다.

탄화차를 오븐 내(이동벽과 고정벽 사이)에 장착한 다음, 이동벽에 있는 스크류를 이용하여 이동벽과 탄화차를 고정벽에 밀착시킨다. 이동벽과 고정벽에 설치된 히터를 이용하여 양쪽 오븐 벽의 온도를 830°C로 가열한다. 오븐이 830°C에서 열적 안정을 유지하면, 탄화차와 고정벽 및 이동벽사이의 틈을 mortar를 이용하여 완전히 밀봉하고, 배출관 후단의 건류가스 연소장치인 LPG 버너를 연소시킨다. 석탄 시료를 평량 저울 위의 호퍼에 일정한 부피로 채운다음 무게를 측정하고 수분 측정기에서 시료의 수분을 측정한다. 천장 크레인을 이용하여 장입구를 통해 석탄을 오븐 내로 장입하고 장입이 끝나면 탄화차의 levelling door를 열어 leveller를 작동시켜 장입된 석탄의 높이를 일정하게 한다. 장입이 완료되면 세 개의 프로브를 탄화차의 오븐 벽에서 0.6 m (오븐중심)지점까지 삽입하여 석탄 내의 가스압과 온도를 측정한다. 오븐 내의 압력이 약간의 양압이 되도록 배출관의 gate 밸브와 연도 상부의 damper를 조절한다. 또한 오븐 벽 온도는 830°C에서 장입하여 Fig. 2에 나타난 가열패턴에 따라 단계적으로 가열하였다. 건류가 종료되면 오븐 밀봉(sealing)을 위해 사용된 몰타르를 제거한 다음, 이동벽의 스크류를 이용하여 탄화차와 이동벽을 고정벽으로부터 분리한다. 탄화차 하부의 모터를 이

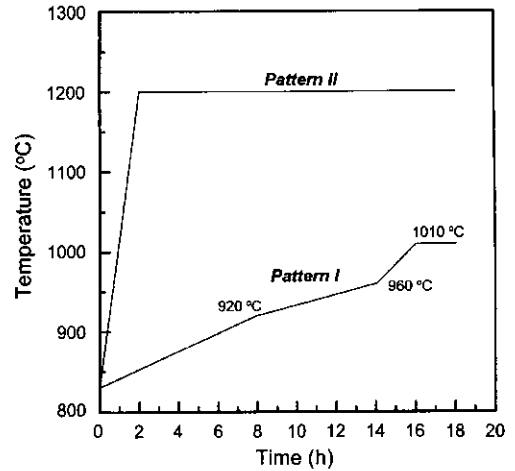


Fig. 2. Typical heating pattern of pilot-scale coke oven with coking time.

용하여 탄화차를 오븐 밖의 압출기(pusher)로 이동시킨다. 압출기를 이용하여 탄화차 내의 적열 코크스를 소화장치로 이송시킨 다음, 소화장치를 밀폐시킨 후 질소를 소화장치 내로 주입하여 소화시킨다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 장입탄 수분의 영향

Fig. 3은 수분 9.0wt%의 장입탄 CC-I을 Fig. 2의 패턴 I에 따라 건류하였을 때, 건류시간에 따른 석탄 중심의 가스압 및 상응하는 온도변화를 나타낸 것이다. Fig. 2에서 패턴 I은 상업용 코크스 오븐의 석탄 중심에서 가열속도인 3~4°C/min(300~500°C)과 비슷한 가열속도를 얻기 위한 것이다. 장입밀도는 대략 810 kg/m³이다. 그럼에서 보듯이, 석탄 장입 1시간 직후 석탄 중심온도는 급격하게 100°C에 도달하며, 석탄 내의 모든 수분이 증발

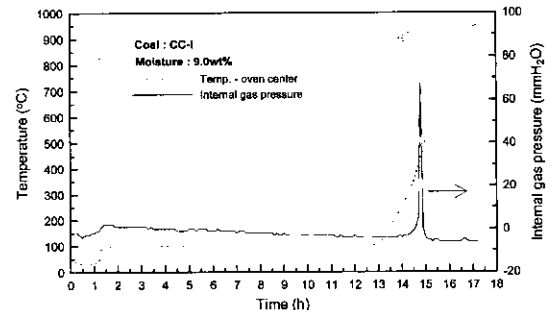


Fig. 3. Variation of internal gas pressure and corresponding temperature with coking time for CC-I coal.

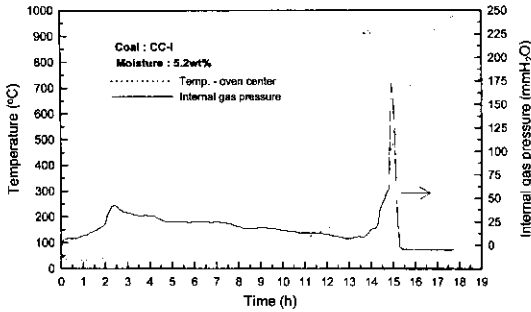


Fig. 4. Variation of internal gas pressure and corresponding temperature with coking time for dried CC-I coal.

하는 13시간까지 100°C를 유지하였다. 수분 증발 후 석탄 중심온도는 400°C까지 2.8°C/min으로 증가하며, 석탄 고화 후에는 대략 5.9°C/min으로 급격하게 증가하였다. 석탄 중심에서의 가스압은 건류 초기 수분 증발에 의한 수증기압이 거의 나타나지 않았으며, 양쪽 벽에서 형성된 연화층이 오븐 중심에서 만나는 440°C에서 68 mmH₂O (0.098 psi)의 최대 값을 나타내었다. 이와 같은 가스압은 연화상태에 있는 석탄에서 발생된 휘발분에 의해 야기되며¹¹, 석탄이 slot-type 오븐에서 건류될 때 오븐 벽에 평행하게 형성된 두 개의 연화층이 오븐 중심에서 합체될 때 연화층 내에서 최대 가스압이 발생하게 된다. 일반적으로 상업용 코크스 오븐에서 팽창압은 edge effect를 무시할 수 있기 때문에 석탄 중심에서의 가스압과 거의 같다고 볼 수 있다¹². 따라서 장입탄 CC-I은 상업용 코크스 오븐에서 팽창압에 대한 안전 제한 값인 1 psi(6 m 오븐)와 2 psi(4 m 오븐) 보다 훨씬 적어 오븐 벽에 미미한 정도의 팽창압을 줄 것으로 판단된다.

Fig. 4는 수분 5.2 wt%로 건조된 장입탄 CC-I에 대해, Fig. 2의 패턴 I에 따라 건류하였을 때 건류시간에 따른 석탄 중심의 가스압 및 상응하는 온도변화를 나타낸 것이다. 장입밀도는 817 kg/m³이며, 수분 감소에 의해 습탄에 비해 0.86% 증가하였다. 그림에서 보듯이, 석탄 장입 2시간 직후 석탄 중심온도는 100°C에 도달하며 석탄 내의 모든 수분이 증발하는 11시간까지 100°C를 유지하였다. 장입된 석탄의 수분 감소로 인해 습탄보다 수분 증발시간이 짧게 나타났다. 수분 증발이후 석탄 중심온도는 400°C까지 2.8°C/min으로 증가하며, 석탄 고화 후에는 4.8°C/min으로 증가하였다. 수분 증발 후 평균 가열속도는 장입밀도 증가에 의해 습탄보다 감소하였다. 석탄 중심에서의 가스압은 건류 초기 중심온도 100°C에서 수분 증발에 의해 42 mmH₂O로 나타났으며, 중심온도 465°C에서 173 mmH₂O(0.246 psi)의 최대 값을 나타내었다. 이와 같이 장입되는 석탄의 수분 감소에 의해 가스

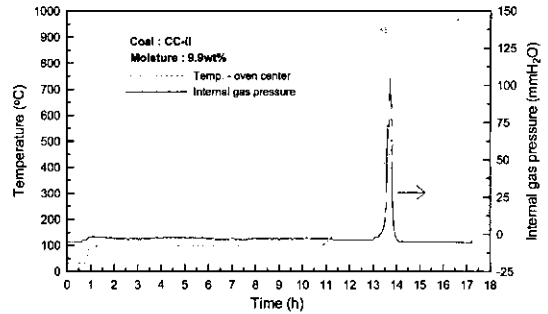


Fig. 5. Variation of internal gas pressure and corresponding temperature with coking time for CC-II coal.

압이 증가하는 것은 장입밀도 증가에 의해 연화층에서 발생하는 가스량의 증가와 용융물량의 증가로 인한 연화층에서 발생된 가스가 연화층 통과시 저항이 증가하기 때문이다^{12,15}. 건조탄의 가스압은 습탄에 비해 대략 2.5 배 증가하였다. 이것은 소형 시험로에서 단일탄에 대해 석탄 수분 저감시 석탄 중심의 가스압이 대략 2배 이상 증가한 결과와 일치한다¹².

Fig. 5는 수분 9.9 wt%의 장입탄 CC-II를 Fig. 2의 패턴 I에 따라 건류하였을 때, 건류시간에 따른 석탄 중심의 가스압 및 상응하는 온도변화를 나타낸 것이다. 오븐 내 장입밀도는 대략 796 kg/m³이다. 그림에서 보듯이, 석탄 장입 후 1시간 이내에 석탄 중심온도는 100°C에 도달하며, 석탄 내의 모든 수분이 증발하는 11시간까지 100°C를 유지하였다. 수분 증발 후 석탄 중심온도는 450°C까지 2.1°C/min으로 증가하며, 석탄 고화 후에는 9.0°C/min로 매우 급격하게 증가하였다. 석탄 중심에서의 가스압은 중심온도 453°C에서 105 mmH₂O(0.15 psi)의 최대 값을 나타내었다.

Fig. 6은 수분 3.5 wt%로 건조된 장입탄 CC-II를 Fig. 2의 패턴 I에 따라 건류하였을 때 건류시간에 따른 석

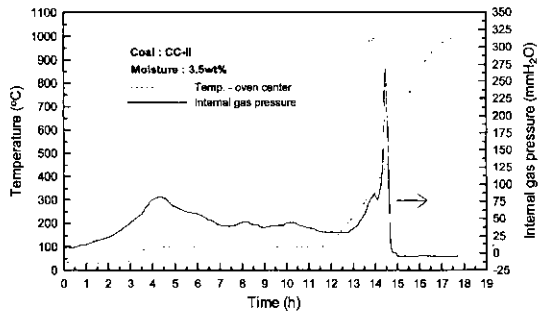


Fig. 6. Variation of internal gas pressure and corresponding temperature with coking time for dried CC-II coal.

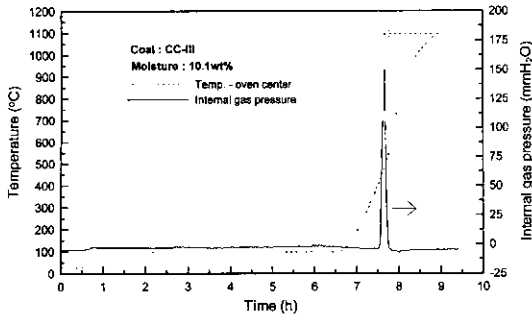


Fig. 7. Variation of internal gas pressure and corresponding temperature with coking time for CC-III coal.

탄 중심의 가스압 및 상응하는 온도변화를 나타낸 것이다. 장입밀도는 석탄 수분 감소에 의해 837 kg/m³으로 나타났다으며, 습탄에 비해 5.2% 증가하였다. 그림에서 보듯이, 석탄 중심온도는 장입밀도의 증가로 습탄보다 훨씬 느린 장입 3시간 후에 100°C에 도달하며, 석탄 내의 모든 수분이 증발하는 11.5시간까지 100°C를 유지하였다. 수분 증발이후 석탄 중심온도는 450°C까지 2.3°C/min으로 증가하며, 석탄 고화 후에는 5.0°C/min으로 급격하게 증가하였다. 석탄 중심에서의 가스압은 건류 초기에 중심온도가 100°C에서 수분 증발에 의해 81 mmH₂O로 나타났으며, 석탄 중심온도 438°C에서 269 mmH₂O(0.38 psi)의 최대 값을 나타내었다. 건조탄의 가스압은 장입 밀도 증가로 인해 습탄의 가스압보다 2.56배 증가하였다. 일반적으로 코크스 오븐에 장입되는 석탄을 건조하기 위한 전처리 설비인 석탄 조습설비에서의 수분(6~7 wt%) 보다 훨씬 낮은 수분임에도 불구하고 낮은 가스압을 나타내었다.

Fig. 7은 수분 10.1 wt%의 장입탄 CC-III을 Fig. 2의 패턴 II에 따라 건류하였을 때, 건류시간에 따른 석탄 중심의 가스압 및 상응하는 온도변화를 나타낸 것이다. 가열패턴 II는 830°C에서 석탄을 장입한 후 오븐 벽 온도를 3°C/min으로 1200°C까지 가열한 다음 건류 종료 시까지 유지하였다. 일반적으로 상업용 코크스 오븐은 생성 코크스 배출을 위해 코크스가 배출되는 쪽의 오븐 폭이 약간 넓기 때문에 연소실 온도도 오븐 폭에 따라 증가시켜 관리하고 있으며, 대략적인 연소실 평균온도는 1200°C 이상이 된다. 그림에서 보듯이, 석탄 중심온도는 석탄 내의 모든 수분이 증발하는 6.6시간까지 100°C를 유지하며, 수분 증발 후 중심온도는 450°C까지 7.5°C/min으로 증가하며, 석탄 고화 후에는 17.0°C/min로 급격하게 증가하였다. 석탄 중심에서의 가스압은 중심온도 489°C에서 150 mmH₂O(0.21 psi)의 최대 값을 나타내었다.

Fig. 8은 5 wt%로 건조된 장입탄 CC-III을 패턴 II에

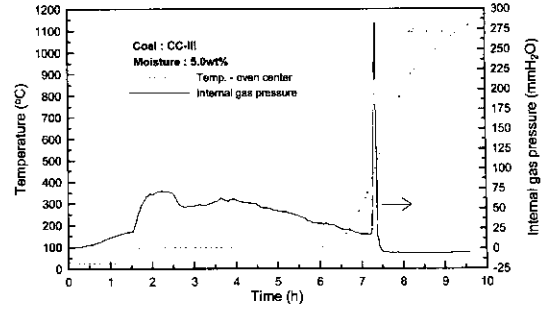


Fig. 8. Variation of internal gas pressure and corresponding temperature with coking time for dried CC-III coal.

따라 건류하였을 때 건류시간에 따른 석탄 중심의 가스압 및 상응하는 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이, 석탄 중심온도는 장입밀도 증가에 의해 장입 1.5 시간 이후에 100°C에 도달하였으며, 석탄 내의 모든 수분이 증발하는 6.4시간까지 100°C를 유지하였다. 수분 증발 후 석탄 중심온도는 450°C까지 5.9°C/min로 증가하며, 석탄 고화 후에는 9.3°C/min로 급격하게 증가하였으며, 장입밀도 증가에 의해 습탄보다 감소하였다. 석탄 중심에서의 가스압은 건류 초기에 중심온도가 100°C 도달 직후 수분 증발로 인한 수증기압이 72 mmH₂O로 나타났으며, 석탄 중심온도 471°C에서 283 mmH₂O(0.40 psi)의 최대 값을 나타내었다. 가열속도가 빠른 조업조건에서 건조탄의 가스압은 장입밀도 증가로 인한 연화층에서 가스발생량 증가와 가스 투과도 감소로 인해 습탄의 가스압보다 1.9배 증가하였다. 또한 느린 가열속도보다 상대적으로 빠른 가열속도 조건에서는 연화층에서 가스발생량 증가에 의해 가스압이 증가하므로 가열속도 증가의 영향이 가스압 증가에 기여했을 것으로 사료된다.

Fig. 9는 수분 9.4 wt%의 장입탄 CC-IV를 Fig. 2의 패턴 II에 따라 건류하였을 때, 건류시간에 따른 석탄 중

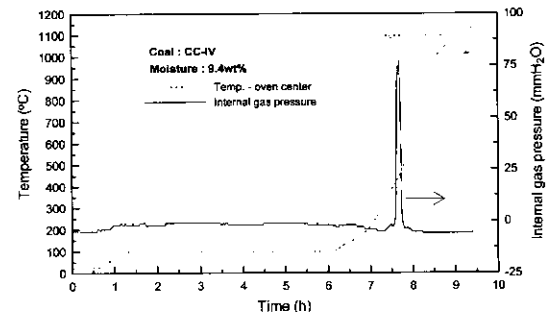


Fig. 9. Variation of internal gas pressure and corresponding temperature with coking time for CC-IV coal.

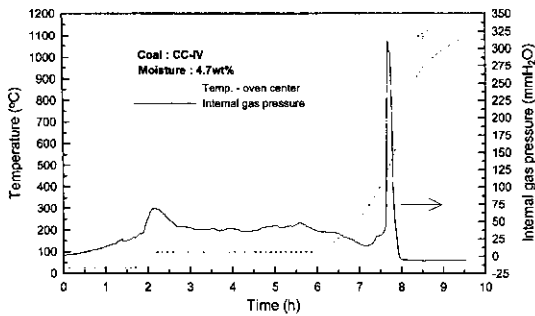


Fig. 10. Variation of internal gas pressure and corresponding temperature with coking time for dried CC-IV coal.

심의 가스압 및 상응하는 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이, 석탄 중심온도는 장입 1시간 이내에 100°C에 도달하며, 석탄 내의 모든 수분이 증발하는 6.2시간까지 100°C를 유지하였다. 수분 증발 후 석탄 중심온도는 500°C까지 6.3°C/min로 증가하며, 석탄 고화 후에는 16.0°C/min로 급격하게 증가하였다. 석탄 중심에서의 가스압은 중심온도 451°C에서 77 mmH₂O(0.11 psi)의 최대값을 나타내었다.

Fig. 10은 4.7 wt%로 건조된 장입탄 CC-IV를 Fig. 2의 패턴 II에 따라 건류하였을 때 건류시간에 따른 석탄 중심의 가스압 및 상응하는 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이, 석탄 중심온도는 장입탄도 증가로 장입 1.5시간 후에 100°C에 도달하였으며, 장입된 수분 감소에 의해 석탄 내의 모든 수분이 증발하는 시간이 습탄보다 약간 짧은 6시간 동안 100°C를 유지하였다. 수분 증발 후 석탄 중심온도는 450°C까지 5.3°C/min로 증가하며, 석탄 고화 후에는 11.2°C/min로 급격하게 증가하였다. 가열속도는 장입탄도의 증가로 습탄보다 감소하였다. 석탄 중심에서의 가스압은 건류 초기 수분 증발

에 의해 68 mmH₂O의 수증기압이 나타났으며, 중심온도 485°C에서 310 mmH₂O(0.44 psi)의 최대 값을 나타내었다. 이것은 습탄(9.4 wt%)의 가스압보다 4배정도 증가한 것이다.

Table 4는 여러 종류의 장입탄에 대해 석탄 수분과 가열패턴 변화에 대한 건류특성을 요약한 것이다. 코크스 오븐에 장입되는 석탄은 오븐 내에서 석탄 건류의 균일화, 에너지 저감, 장입밀도 증가에 의한 코크스 품질 및 생산성 향상을 위해 석탄 건조 설비를 이용하여 대략 6.0~6.5 wt%로 건조하여 장입된다. 또한 코크스 오븐의 생산성 증대를 위해 오븐 가동율을 증가시키는 작업이 수행되고 있으며, 이것은 코크스 오븐 온도의 증가로 연결된다. 이와 같은 오븐 작업 조건의 변화는 석탄의 장입밀도 증가와 오븐 내 가열속도의 증가로 인해 팽창압이 증가하게 되며, 과잉의 팽창압은 오븐 벽 연화를 손상시켜 오븐 수명을 단축시키게 된다. 표에서 보듯이, 각각의 장입탄에 대해 9.0~10.1 wt%의 장입탄을 3.5~5.2 wt%로 건조하여 건류하였을 때, 장입된 석탄의 장입밀도 증가에 의해 가열패턴 I에서 석탄 고화전 가열속도는 비슷하지만, 고화후 가열속도는 크게 낮아졌으며, 가열패턴 II에서 고화전 가열속도는 약간 감소하였으며 고화 후 가열속도는 훨씬 더 낮아졌다. 또한 석탄 중심에서의 가스압은 습탄의 경우에는 건류초기 수증기압이 나타나지 않지만, 건조탄에 대해서는 장입밀도 증가에 의해 초기 수증기압이 나타났으며, 두 개의 연화층이 중심에서 합체될 때의 최대 가스압은 장입밀도 증가에 의한 연화층에서 가스발생량 증가 및 가스 투과도 감소로 인해 가열패턴 I에서는 건조탄이 습탄에 비해 2.5배 이상 증가하였으며, 가열패턴 II에서는 건조탄이 대략 2배 이상 증가하였다. 가열패턴 II는 패턴 I에 비해 총 건류시간은 대략 반으로 줄었으며, 오븐 중심에서의 가열속도는 대략 2배 이상 빠른 것으로 나타났다. 일반적으로 오

Table 4. Summary of carbonization characteristics with operating conditions.

Coal	Moisture (wt%)	Heating pattern	Heating rate (°C/min)		Steam pressure (mmH ₂ O)	Internal gas pressure (mmH ₂ O)
			Before solidification	After solidification		
CC-I	9.0	Pattern-I	2.8	5.9	-	68
	5.2		2.8	4.8	42	173
CC-II	9.9	Pattern-I	2.1	9.0	-	105
	3.5		2.3	5.0	81	269
CC-III	10.1	Pattern-II	7.5	17.0	-	150
	5.0		5.9	9.3	72	283
CC-IV	9.4	Pattern-II	6.3	16.0	-	77
	4.7		5.3	11.2	68	310

본 온도를 증가시키면 장입된 석탄의 가열속도가 증가하게 되고, 가열속도의 증가로 인해 연화층에서 발생하는 가스흐름은 증가하게 되지만, 연화층의 두께와 접도는 감소하게 된다. 연화층에서 발생가스의 증가는 팽창압을 증가시키는 요인으로 작용하지만, 연화층 두께와 접도의 감소는 발생가스의 투과도를 증가시켜 팽창압을 감소시키는 서로 상반되는 작용을 한다. 전체적으로 오븐 온도의 증가는 팽창압을 약간 증가시키는 경향이 있는 것으로 알려져 있다¹³⁾. 장입탄의 배합비와 약간의 수분 차이는 있지만 전체적으로 가열패턴 II에서의 가스압이 패턴 I보다 다소 높게 나타나고 있는 것은 가열속도 증가에 의한 영향이 어느 정도 기여하였을 것으로 판단된다.

3.2. 일반탄 첨가의 영향

일반적으로 위험한 수준으로 높은 팽창압을 나타내는 석탄의 팽창압을 저감시키는 방법은 크게 석탄 배합에 의한 방법과 조업조건 변화에 의한 방법으로 나눌 수 있다. 석탄 배합에 의해 팽창압을 저감시키는 방법은 휘발분이 높거나 inert 성분이 많은 석탄을 첨가하는 것이며, 조업조건 변화에 의해 팽창압을 저감시키는 방법은 석탄 수분 증가 및 입도 감소에 의한 장입밀도를 감소시키는 것과 오븐 온도를 낮추어 건류속도를 감소시키는 방법 등이 있다¹³⁾. 석탄 배합에 의한 팽창압 저감방법으로 휘발분 함량이 높은 일반탄 배합비율을 증가시켰을 때 가스압 특성을 조사하기 위해, 건조된 장입탄에 일반탄 배합비율을 증가시켜 건류특성을 조사하였다.

Fig. 11은 장입탄 CC-III에 일반탄 XL을 첨가하여 일반탄 배합비를 45%로 만든 배합탄을 6.4 wt%로 건조하여 Fig. 2의 패턴 II에 따라 건류하였을 때 건류시간에 따른 석탄 중심의 가스압 및 상응하는 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이, 석탄 중심온도는 석탄 장입 1.6시간 직후 100°C에 도달하며 석탄 내의 모든 수분이 증발하는 6.9시간까지 100°C를 유지하였다. 수분 증

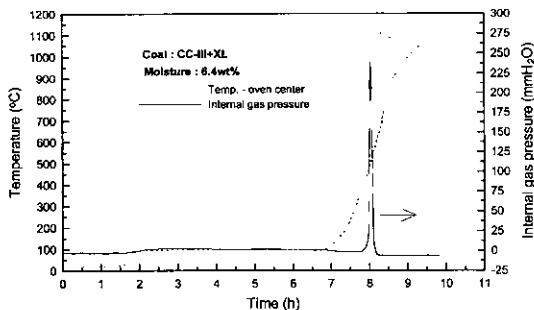


Fig. 11. Variation of internal gas pressure and corresponding temperature with coking time for dried CC-III coal mixed with XL.

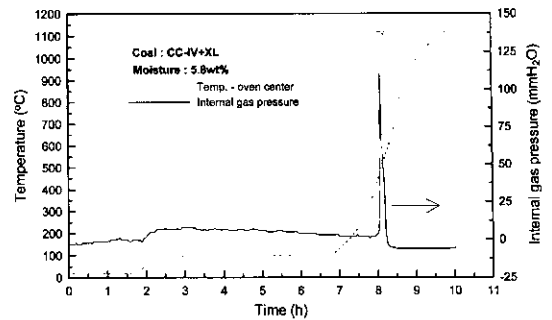


Fig. 12. Variation of internal gas pressure and corresponding temperature with coking time for dried CC-IV coal.

발 후 석탄 중심온도는 대략 500°C까지 8.4°C/min으로 증가하였다. 건류 초기 수증기압은 나타나지 않았으며, 석탄 중심에서의 가스압은 중심온도 505°C에서 239 mmH₂O (0.34 psi)의 최대 값을 나타내었다. 이것은 건조된 장입탄 CC-III의 건류시 석탄 중심에서의 가스압 (283 mmH₂O) 보다 대략 15% 감소한 것이다. 이와 같은 가스압의 감소는 Table 3에서 알 수 있듯이, XL탄을 첨가함으로써 배합탄의 휘발분과 회분이 증가하고¹⁴⁾, 유동도(LMF), 전팽창(TD) 및 반사율(RI)이 감소하기 때문이다. 가스압을 감소시키기 위해 단지 일반탄의 배합비율을 증가시키면 생성된 코크스 품질이 저하되므로 품질 저하를 초래하지 않는 범위 내에서 배합되어야 한다.

Fig. 12는 장입탄 CC-IV에 일반탄 XL을 첨가하여 일반탄 배합비를 45%로 만든 배합탄을 5.8 wt%로 건조하여 Fig. 2의 패턴 II에 따라 건류하였을 때 건류시간에 따른 석탄 중심의 가스압 및 상응하는 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이, 석탄 중심온도는 석탄 장입 후 2시간에 100°C에 도달하며 석탄 내의 모든 수분이 증발하는 6.7시간까지 100°C를 유지하였다. 석탄 중심온도는 수분 증발 후 300°C까지 완전히 증가한 후 700°C까지 9.3°C/min으로 증가하였다. 석탄 중심에서의 가스압은 중심온도 484°C에서 111 mmH₂O(0.16 psi)의 최대 값을 나타내었으며, 이것은 건조된 장입탄 CC-IV (수분 : 4.7 wt%)의 가스압(310 mmH₂O) 보다 대략 64% 감소한 것이다. 이것은 Table 3에서 보듯이 휘발분과 회분이 많은 XL탄을 첨가시킴으로써 배합탄의 휘발분 및 회분 증가와 유동도(LMF), 전팽창(TD) 및 반사율(RI) 등이 감소되기 때문이다.

4. 결 론

1. 석탄 중심에서의 가열속도가 상업용 코크스 오븐과 비슷한 건류조건에서 장입탄 수분을 감소시켰을 때,

수분 증발 이후 가열속도는 비슷하였으며, 수분 감소에 의한 건류 초기 수증기압은 크게 증가하였고, 석탄 중심에서의 가스압은 습탄에 비해 대략 2.5배 증가하였다.

2. 석탄 중심에서의 가열속도가 상업용 코크스 오븐보다 훨씬 빠른 건류조건에서 장입탄 수분을 감소시켰을 때, 수분 증발 이후 가열속도는 크게 감소하였고, 수분 감소에 의한 건류 초기 수증기압은 크게 증가하였으며, 석탄 중심에서의 가스압은 습탄에 비해 대략 2배 이상 증가하였다.

3. 석탄 가열속도가 상업용 오븐보다 빠른 건류조건에서 장입탄에 일반탄을 첨가하여 일반탄 배합비를 증가시켰을 때 배합탄의 석탄 중심에서의 가스압은 현저히 감소하였다.

감사의 글

본 연구는 포항제철(주)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 표합니다.

참고문헌

- Koch, A., Gruber, R., Cagniant, D., Pajack, J., Krzton, A. and Duchene, J.M.: Fuel Proc. Tech., 45, 135 (1995).
- Tucker, J. and Everitt, G.: 2nd International Cokemaking Congress, 40 (1992).
- Loison, R., Foch, P. and Boyer, A.: "Coke; Quality and Production", Butterworths, London, 353 (1989).
- Latshaw, G.H., McCollum, H.R. and Stanley, R.W.: ISS Ironmaking Proceedings, 43, 373 (1984).
- Nishioka, K. and Yoshida, S.: J. Fuel Soc. Japan, 68(3), 210 (1989).
- Alvarez, R., Miyar, E.A., Canga, C.S. and Pis, J.J.: Fuel, 69, 1511 (1990).
- Marzec, A., Alvarez, R. and Casal, D.M.: Energy & Fuels, 9, 834 (1990).
- Alvarez, R., Pis, J.J., Diez, M.A., Marzec, A. and Czajkowska, S.: Energy & Fuels, 11, 978 (1997).
- Gransden, J.F., Price, J.T. and Khan, M.A.: Ironmaking Conference Proceedings, 155 (1988).
- Tucker, J. and Everitt, G., Ironmaking Conference Proceedings, 599 (1989).
- Benedict, L.G. and Thompson, R.R., Ironmaking Proceedings, ISS-AIME, 35, 276 (1976).
- Lee, W.J. and Kim, J.Y.: HWAHAK KONGHAK, 36, 576 (1998).
- Geny, J.F. and Duchene, J.M.: Cokemaking International, 4, 21 (1992).
- Nomura, S. and Thomas, K.M.: Fuel, 75, 801 (1996).
- Barriocanal, C., Hays, D., Patrick, J.W. and Walker, A.: Fuel, 77, 729 (1998).
- Jordan, P., Patrick, J.W. and Walker, A.: Cokemaking International, 4, 12 (1992).
- Lindert, M.T. and van der Velden, B.: Ironmaking Conference Proceedings, 115 (1994).
- Lindert, M.T. and Schelvis, R.P.A.: Cokemaking International, 4, 19 (1992).
- Steyls, D.: Cokemaking International, 4, 31 (1992).
- Szurman, E., Siebert, W. and Rohde, W.: Cokemaking International, 4, 26 (1992).
- Grimley, J.J. and Radley, C.E.: Ironmaking Conference Proceedings, 415 (1995).
- Radly, C.E.: 2nd International Cokemaking Congress, 117 (1992).