

탄종별 열분해 생성물의 조성 계산방법

박호영^{*,†}, 서상일^{*}
*한전 전력연구원

The Calculation Method of Coal Pyrolysis Products Depending on the Coal Rank

HOYOUNG PARK^{*,†}, SANGIL SEO^{*}

*Korea Electric Power Research Institute 103-16 Munjidong Yusunggu, Daejeon, 305-380, Korea

ABSTRACT

This paper describes the calculation method to obtain the product composition of coal pyrolysis at high pressure and high temperature. The products of coal pyrolysis should be determined for the coal gasifier simulation, and this is the first step of the coal gasifier simulation. The pyrolysis product distribution greatly affects the coal gasifier efficiency such as carbon conversion, cold gas efficiency and the syngas composition at the outlet of the gasifier. The present calculation method is based on the coal ultimate/proximate analysis and several correlations among gasifier pressure, coal properties and pyrolysis products. The calculated products for 5 coals have been compared with those from the commercial pyrolysis model.

KEY WORDS : IGCC(석탄가스화복합발전), Gasifier(가스화기), Pyrolysis(열분해), Tar(타르), Volatile(휘발분), Char(좌)

Nomenclature

[CO] : CO mass fraction in pyrolysis products
 m_{fo} : O mass fraction in ultimate analysis
 V_p : volatile at pressure P (wt. %)
 $V_{p=1}$: volatile at 1 atm (wt. %)
 P_t : pyrolysis pressure (atm)

1. 서 론

가스화기내의 석탄가스화(coal gasification) 과정은 Fig. 1과 같이 개략적으로 나타낼 수 있으며 이중 열분해(Pyrolysis) 과정은 일반적으로 Fig. 2와 같이 설명되어진다¹⁾. Stage I : 석탄 입자의 온도가 증가하면 입자 내부의 화학적 결합이 파괴되고 석탄 입자가 물러지게되는(softening) metaplast의 상태가 된다. Stage II : 이후 입자 온도가 더 증가되면서 입자내부의 결합이 더욱 파괴되어 1차 열분해의 생성물로서 고분자의 탄화수소계열의 tar와 CO, CO₂, CH₄, H₂O, HCN등의 light 가스등이 방출되고 회와 잔류탄소로 이루어진 좌가 생성된다.

[†]Corresponding author : hypark@kepri.re.kr

[접수일 : 2010.8.9 수정일 : 2010.9.17 게재확정일 : 2010.10.20]

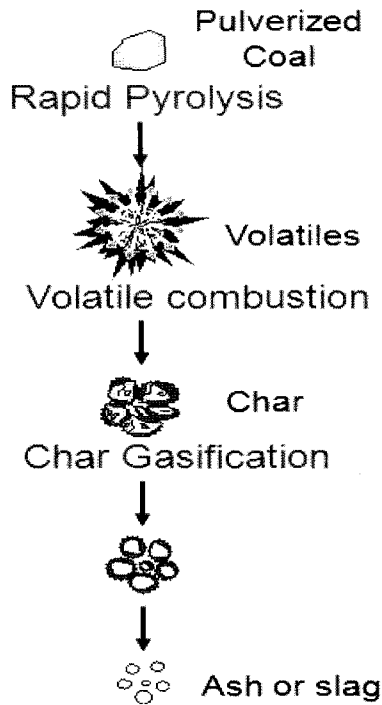


Fig. 1 Coal gasification.

Stage III : 1차 열분해 생성물인 타르는 다시 2차 열분해과정을 통하여 다시 CO, H₂등의 가스와 잔류물인 soot를 생성하게 된다. 열분해의 결과로 화(탄소+회)가 잔류물로 남게 된다. Fig. 2에서도 나타내었듯이 엄밀히 말하면 가스상의 1차 휘발분도 2차 반응으로 soot를 생성하며 화에서도 다시 가스상의 휘발분이 발생하기도 한다.

석탄가스화기(coal gasifier)내 열분해시 발생하는 가스의 종류와 그 양, 잔류물인 화의 양, 연료-N, 연료-S의 분포 등은 열분해 이후의 휘발분 연소, 화의 가스화, 가스화기의 최종 가스조성을 예측하는데 있어 필수적인 데이터이다. 이러한 분석은 TGA (thermo-gravimetric analyzer), DTF(drop tube furnace) 실험시 휘발분 가스의 측정으로 구할 수 있으나 분석항목이 매우 많으며 매우 정밀한 시험을 수행하여야 하는 매우 힘든 과정이다²⁾.

1960년대 중반부터 1990년대 초까지 석탄의 열분해 과정에 대한 많은 연구와 보고가 있어 왔으며 석탄

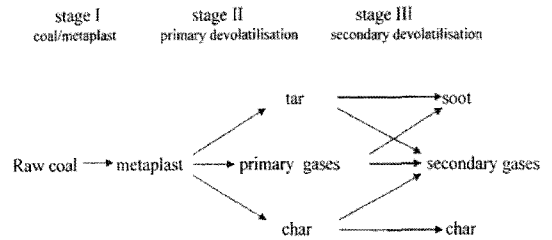


Fig. 2 Schematic diagram of coal pyrolysis.

의 화학적 구조로부터 열분해시 원소분석과 석탄의 화학적 구조 측정(예로 NMR 데이터)으로부터 열분해 생성물 및 속도상수를 구할 수 있는 해석 모델이 개발되어져 왔다. 그 대표적인 것으로 미국 Solomon 그룹의 FG-DVC(functional group-depolymerization vaporization cross-linking) 모델³⁾, 미국 Fletcher 그룹의 CPD(chemical percolation devolatilization) 모델⁴⁾, 미국 Niksa 그룹의 FLASHCHAIN 모델⁵⁾이다. 이 모델들은 모두 석탄의 화학구조에 기반을 두고 있으며 열분해시의 각종 현상, 즉, 중합, 응축, 재결합 과정 등을 모델화하여 열분해 과정을 분석하는 모델이다. Merrick(1983)⁶⁾은 몇가지 석탄에 대하여 TGA 열분해 실험을 수행하여 열분해 생성물과 석탄의 원소분석치와의 상관관계를 구하였으며 이 상관관계와 석탄의 원소분석, 화의 량으로부터 10개의 연립방정식을 세우고 이로부터 10개의 열분해 생성물(char, CH₄, C₂H₆, CO, CO₂, tar, H₂, H₂O, NH₃, H₂S) 각각의 조성을 얻은 바 있다.

한편, NIKSA 그룹의 FLASHCHAIN 모델 영구 사용 라이선스는 수천원만원이며 FG-DVC 모델은 연간 라이선스가 약 100만원 정도이고 CPD 모델의 경우는 Brigham Young 대학에서 무료로 제공하고 있으나 계산된 생성물중에는 성분이 알려지지 않은 미지의 가스를 포함하고 있다. FG-DVC 모델의 경우 조성 가스중 C₆H₁₂와 C₆H₁₀을 포함하고 있다. 더욱이 이들 3개 모델들은 2차 열분해 과정을 포함하고 있지 않으며 타르까지만 분석하고 있다.

본 논문에서는 석탄가스화기내 열분해 과정을 모사할 수 있도록 석탄 성상과 가스화기 운전압력에 따라 탄종별 고온고압 열분해시의 생성물을 정량적

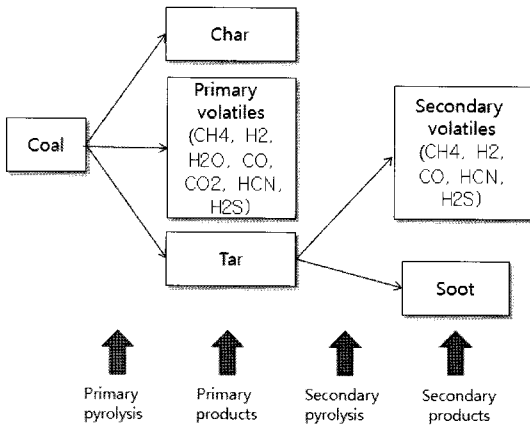


Fig. 3 Coal pyrolysis in this study.

으로 계산하는 방법을 제시하였다. 석탄의 탄종별 열분해 생성물은 석탄가스화기 시뮬레이션의 필수 데이터이며 이러한 탄종별 생성물 예측은 가스화기의 성능, 즉 가스화기 출구 가스조성, 탄소전환율, 냉가스효율 등을 예측하는데 있어 가장 기본적이고 중요한 절차이다. 본 계산 방법은 Merrick(1983)의 방법을 기반으로 석탄의 성상(공업/원소분석치), 가스화기 운전압력과 몇가지 상관관계식으로부터 고온고압하 열분해 생성물을 계산하는 방법이며 이를 프로그래밍하여 가스화기 시뮬레이터용 모듈로 구성할 수 있도록 하였다. 또한, 국내 수입 5개 탄종에 대하여 열분해 생성물의 조성을 구하였으며 이를 상용 열분해모델의 결과와 서로 비교하였다.

2. 열분해 생성물 계산 방법 열분해 생성물 계산 방법

2.1 열분해 과정의 간략화

본 연구에서는 석탄의 열분해 과정을 Fig. 3과 같이 간략화하였다. 석탄의 가스화기내 고온고압 열분해시 1차 생성물로서 찌꺼기(char), 타르(tar), 1차 열분해가스(CH₄, CO, CO₂, H₂O, H₂, HCN, H₂S, COS)가 방출되며 이때 타르는 다시 2차 열분해를 거쳐 2차 생성물인 soot, CH₄, CO, H₂, HCN, H₂S가 생성되는 것으로 가정하였다. 따라서 고체상은 찌꺼기

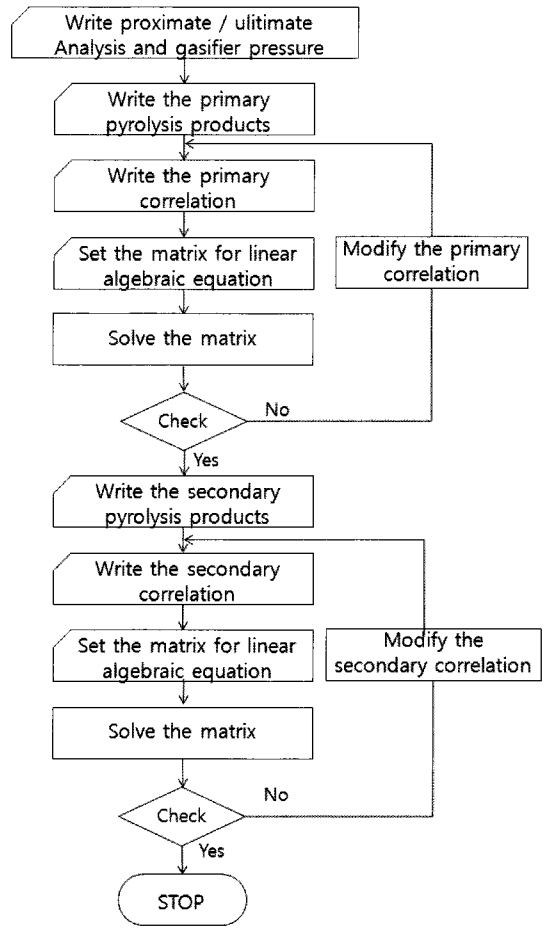


Fig. 4 Flow chart for the present calculation.

soot, 가스상 생성물은 CH₄, CO, CO₂, H₂O, H₂, HCN, H₂S, COS이다⁷⁾.

2.2 프로그래밍

Fig. 4는 열분해 생성물을 계산하는 과정을 순서대로 나타낸 것으로, 석탄성상(원소/공업분석)과 운전압력, 그리고 몇가지 상관관계식으로부터 연립방정식을 세우고 이를 행렬로 나타내고 다시 gauss-jordan 방법으로 역행렬을 계산하여 1차 생성물을 구한다. 생성물의 양이 (-)값을 가지는 경우 찌꺼기의 생성량 혹은 타르의 성분을 조정하여 상관관계(correlation)를 변경하고 수정된 행렬로부터 다시 생성물의 조

탄종별 열분해 생성물의 조성 계산방법

[A]										*	[X]	=	[Y]
1	0.75	0.4286	0.2727	0.8637	0	0	0.4444	0	0.2		Char		0.8637
0	0.25	0	0	0.0514	0.1111	1	0.0370	0.0588	0		CH4		0.0514
0	0	0.5714	0.7273	0.0719	0.8889	0	0	0	0.2667		CO		0.0719
0	0	0	0	0.0117	0	0	0.5186	0	0		CO2		0.0117
0	0	0	0	0.0117	0	0	0	0.9412	0.5333		Tar		0.0013
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		H2O		0.6339
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		H2		0.0209
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0		HCN		0.2141
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		H2S		0.0237
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		COS		0.00012

Fig. 5 Matrix form of 10 linear equation for primary pyrolysis.

성을 구하는 절차를 나타내었다. 2차 생성물의 경우 타르의 성장과 다른 상관관계로부터 동일한 방법으로 2차 생성물을 구한다. 본 과정을 Fortran 77을 사용하여 코딩하였으며, 그 순서도는 다음 Fig. 2와 같다.

2.3 계산 예제

본 계산방법을 사용하여 신화탄에 대하여 열분해 생성물의 계산 실례를 살펴보기로 한다. 본 예제에서 사용한 상관관계식은 아래와 같이 Xu and Tomita (1987)⁸⁾와 Khan(1989)⁹⁾, 그리고 Ko et al.(1989)¹⁰⁾에 의하여 전 등급의 석탄에 적용할 수 있는 식들을 사용하였다.

식 (1)과 (2)는 갈탄에서부터 무연탄까지의 총 17종의 석탄을 사용하여 flash pyrolyzer에서 휘발분

의 조성을 측정하여 휘발분중 CO와 H₂O의 양을 원탄의 산소량과 비교한 Xu and Tomita(1987)의 결과이다. 이들 관계식은 Niksa et al.(1996)의 범용 열분해 모델인 "FLASHCHAIN"의 해석 결과도 두 상관식과 부합하는 결과를 얻은 바 있다. 열분해 생성물중 가장 많은 부분을 차지하고 있는 tar의 양에 관하여는 좀 더 자세한 상관관계식이 제시된 바 있다. 석탄의 열분해시 황성분의 분포에 대한 광범위한 실험은 Khan(1989)에 의하여 수행되어졌다. 고정층 반응기를 사용하여 32종의 석탄에 대하여 열분해 가스중의 황성분(주로 H₂S와 COS), tar에 함유되어있는 황성분, 그리고 char에 남아있는 황성분에 대한 비율을 원탄의 함함량(S_{coal}, wt. %)의 함수로 구한 것이다. Ko et al.(1989)은 갈탄에서부터 무연탄까지의 37종의 석탄에 대하여 heated grid를

Table 1 Proximate/Ulimate analysis of sinwha coal

	Proximate analysis (wt. %)			Ultimate analysis (wt. %)		
	As-received	Dry basis	Daf basis		Dry basis	Daf basis
Fixed carbon	54.64	58.16	63.39	C	79.23	86.37
Volatile	31.55	33.58	36.61	H	4.72	5.14
Ash	7.76	8.26		O	6.60	7.19
Moisture	6.05			N	1.08	1.17
				S	0.12	0.13
				Ash	8.26	

사용하고 진공에서부터 90 atm까지의 압력에서 휘발화시 타르의 량에 대한 식 (4)와 같은 상관식을 구하였다. X_{tar} 를 구할 때 필요한 세가지 항목은 석탄의 원소분석 결과로부터 석탄의 화학 및 결합구조에 관련된 식을 구한 것으로 자세한 내용은 원문에 나타나 있다.

$$\frac{16}{28} [CO]_f = 0.1657m_{fo} \quad (1)$$

$$\frac{16}{18} [H_2O]_f = 0.2933m_{fo} \quad (2)$$

$$\frac{32}{60} [COS]_f = 0.050m_{fs} \quad (3)$$

$$Taryield(wt.%) = \alpha(p) + \beta(p)X_{tar} \quad (4)$$

여기서

$$X_{tar} = (No. of labile bridges) \times (Amount of abstractable hydrogen) / (No. of crosslinked bridge)$$

$X_{tar} < 15$	$a = 2$	$\beta = 0$
$15 \leq X_{tar} \leq 31$	$a = -22.375$	$\beta = 1.625$
$X_{tar} > 31$	$a = 28$	$\beta = 0$

압력에 따른 휘발분의 량(V_p)은 Wen and Chaung (1979)¹¹⁾의 상관식을 사용하였다. V_p 는 압력 P 에서의 휘발분의 량, $V_p = 1$ 은 1기압에서의 휘발분의 량을 나타내며 P_i 는 열분해시 압력(기압)을 나타낸다.

$$\frac{V_p}{V_{p=1}} = 1 - 0.066 \ln P_i \quad (5)$$

신화탄의 공업/원소분석치는 Table 1과 같으며 1차 열분해 생성물을 계산하기 위한 매트릭스 형태는 Fig. 5와 같다. 1차 열분해 생성물은 촉, 타르, CH₄, CO, CO₂, H₂O, HCN, H₂, H₂S, COS 이므로 10

개의 미지수에 대하여 원소분석치(C, H, O, N, S)와 촉의 량(1- V_p), 그리고 위의 CO, H₂O, tar, COS에 대한 4개의 관계식을 사용하여 10개 생성물의 량을 구할 수 있다. 이는 10개의 연립선형방정식으로 나타낼 수 있으며 다시 행렬식 $[A]*[B] = [X]$ 의 형태로 나타낼 수 있다(Fig. 5). 여기서 촉와 soot의 성분은 C 성분으로만 구성되어 있고 타르는 원탄의 성분과 동일한 것으로 가정하였다. 이 가정은 열분해시 타르의 원소분석치는 원탄의 원소분석치와 유사하며 다만 H 성분의 경우 원탄보다 약간 높게 나타난다는 연구결과를 인용한 것이다¹²⁾. Freihaut et al.(1989)¹³⁾에 의하면 타르내의 수소성분은 원탄의 등급, 즉 C wt.%(daf basis)의 함량이 높을수록 타르의 수소 함량은 원탄의 그것과 비슷해지고 있다는 것을 보여주고 있다. Table 2는 계산된 1차 열분해생성물을 나타내며 Fig. 6은 타르의 2차 열분해에 대한 6차 연립방정식을 다시 매트릭스 형태로 나타낸 것이다. 2차 열분해시의 상관관계는 타르의 원소분석치와 H₂와 CH₄의 생성비율은 1차 열분해시의 비율과 동일한 것으로 가정하였다. Table 3은 타르의 2차 열분해시 각 성분을 나타내며 Table 4는 1, 2차 열분해 생성물을 모두 고려한 최종 생성물의 조성을 나타낸다.

[A]						*	[X] =	[Y]
1	0.75	0.4286	0	0.4444	0	Soot	0.8637	
0	0.25	0	1	0.0370	0.0588	CH4	0.0514	
0	0	0.5714	0	0	0	CO	0.0719	
0	0	0	0	0.5186	0	H2	0.0117	
0	0	0	0	0	0.9412	HCN	0.0013	
0	0	0	1	0	0	H2S	0.0417	

Fig. 6 Matrix form of 6 linear equation for secondary pyrolysis.

Table 2 Products of primary devolatilization (wt.%)

Dry basis (wt.%)	Char	CH ₄	CO	CO ₂	tar	H ₂ O	H ₂	HCN	H ₂ S	COS
Primary products	63.39	2.56	2.08	3.23	21.41	2.37	3.06	1.77	0.10	0.01

Table 3 Composition of tar pyrolysis (wt. %)

Dry basis (wt.%)	Soot	CH ₄	CO	H ₂	HCN	H ₂ S
Secondary Products	77.35	3.50	12.58	4.17	2.26	0.14

Table 4 Composition of pyrolyzed products of sinwha coal (wt. %, dry)

Dry basis (wt.%)	Char	CH ₄	CO	CO ₂	soot (tar)	H ₂ O	H ₂	HCN	H ₂ S	COS
Primary products	63.39	2.56	2.08	3.23	21.41	2.37	3.06	1.77	0.10	0.01
Secondary products		0.75	2.69		16.56		0.89	0.48	0.03	
Total product	63.39	3.31	4.77	3.23	37.97	2.37	3.95	2.25	0.13	0.01

3. 계산결과 검증

3.1 탄종 선정

국내 A화력발전소에서 사용한 47종의 수입 유연탄종에서 석탄의 등급별로 5개 탄종, peabody, elk-valley, indominco, mip, flame탄을 선정하여 본 계산 방법으로 열분해 생성물을 구하였다(Table 5). 석탄의 원소분석(ultimate analysis)에 근거하여 석탄을 의화화식(CaHbOcNdSe)으로 나타낼 수 있다. 이로부터 O/C, H/C을 x, y 좌표축으로 사용한 Van Krevelen 선도(Fig. 7)에서와 같이 47개 탄종을 나타낼 수 있으며 선정된 5개 탄종을 별도로 표시하였다^{14,15)}.

3.2 상용모델과의 생성물 조성 비교

본 계산방법을 fortran coding 하였으며 프로그램을 램명을 Coal_Vol 모델이라 명명하였다. 이를 이용

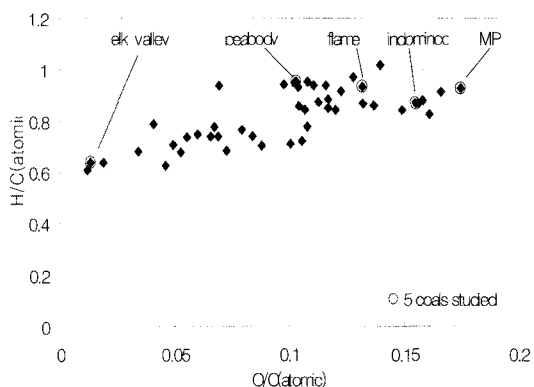


Fig. 7 Van krevelen diagram for 47 coals.

하여 5개 탄종에 대한 열분해 생성물을 계산하고 그 결과를 CPD, FG-DVC 모델 결과와 비교하였다. 먼저 대기압에서의 열분해조성을 계산하여 비교하였으며 상용가스화기 운전 압력인 42기압에서의 열분해 가스 조성도 계산하여 FG-DVC 모델 결과와

Table 5 Properties of five coals used in this study

Coal	Proximate analysis (wt.%, dry)				Ultimate analysis (wt.%, dry)						HHV (kcal/kg. as-received)
	M ¹⁾	FC ²⁾	VM ³⁾	Ash	C	H	O	N	S	Ash	
Elk valley	1.26	63.31	23.79	11.64	80.09	4.26	1.44	1.91	0.51	11.79	6,857
Peabody	9.30	37.01	43.03	10.66	71.3	5.67	9.85	0.98	0.46	11.74	6,026
Flame	9.98	38.31	35.32	16.39	63.36	4.94	11.19	1.07	1.24	18.20	5,557
Indominco	12.61	42.39	40.25	4.75	72.14	5.23	14.97	1.31	0.92	5.4	5,974
MIP	12.74	43.33	38.99	4.94	70.13	5.43	16.39	1.46	0.92	5.66	5,818

1) M : Moisture, 2) FC : Fixed Carbon, 3) VM : Volatile Matter

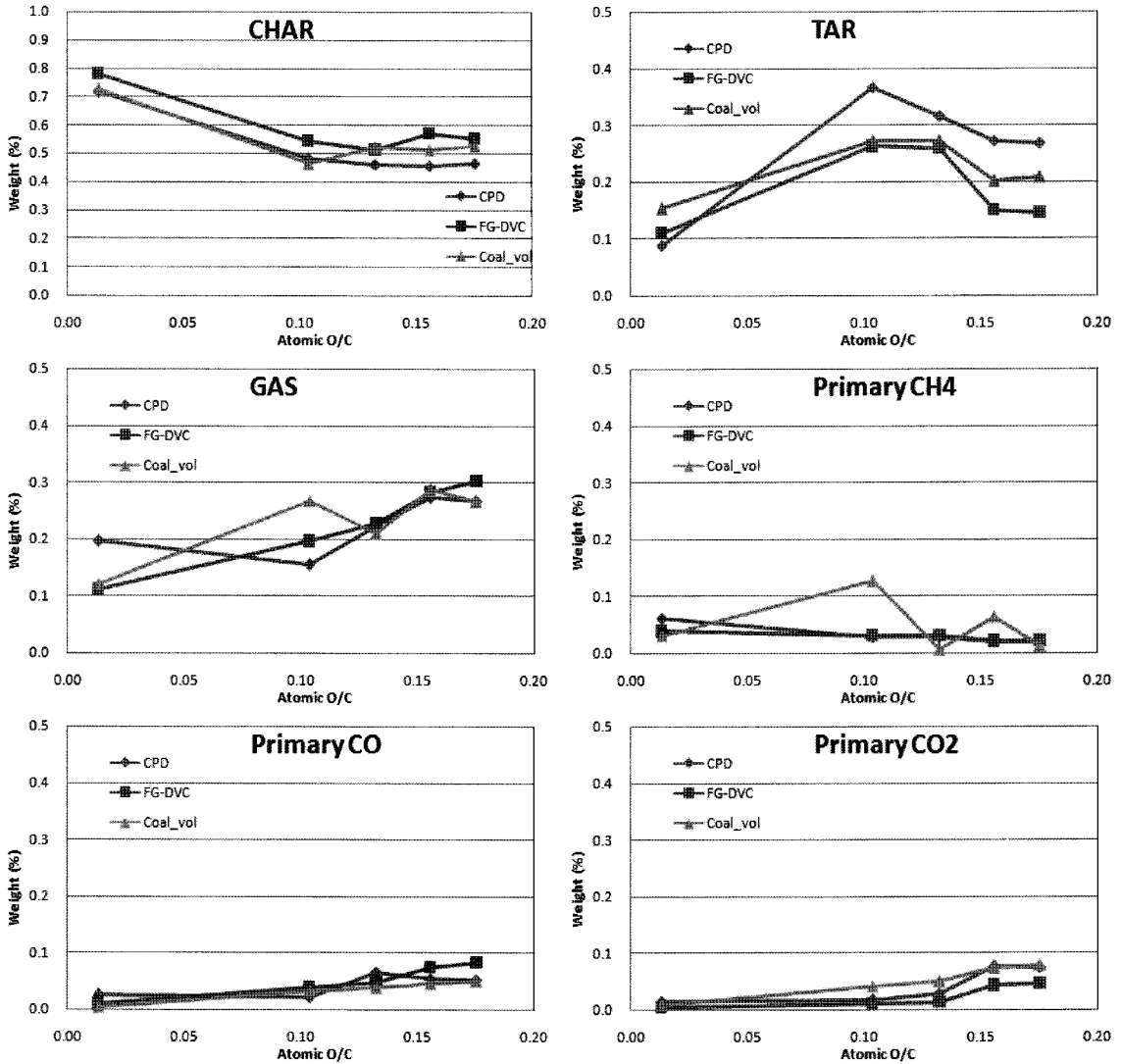


Fig. 8 Comparisons of char, tar, gas, CH₄, CO, CO₂ (1 atm).

서로 비교하였다.

분석에 사용된 5개 탄종은 횡축의 atomic O/C의 비로 구분할 수 있으며 왼쪽부터 elk-valley, peabody, flame, indominco, mip의 순서로 나타나진다. 1차 열분해시의 생성물인 최(char), 타르(tar), 휘발분 가스(volatile gases)를 비교하고 지면상 1차 생성물 중에서 CH₄, CO, CO₂ 성분을 본 논문에서 나타내었다. Fig. 8은 1기압하에서의, Fig. 9는 42기압하에서의 열분해 생성물(6종)을 모델별로 비교한 것이다.

본 모델(Coal_vol)의 1기압하 열분해 생성물인 최, 타르의 양은 상용모델 결과와 비교하여 탄종별 변화 추이가 비슷하며 절대량도 합당한 범위내에 있음을 보여준다. 가스 량의 경우 3개 결과가 약간 상이한 값을 보여주고 있으며 특히 CH₄의 경우가 탄종별 경향성과 절대값이 차이를 보이고 있다. 이는 각 모델마다 탄화수소 계열의 가스상 열분해 생성물을 서로 다르게 가정했기 때문인 것으로 보인다. 본 연구의 Coal_vol 모델은 CH₄만을, FG-DVC 모

탄종별 열분해 생성물의 조성 계산방법

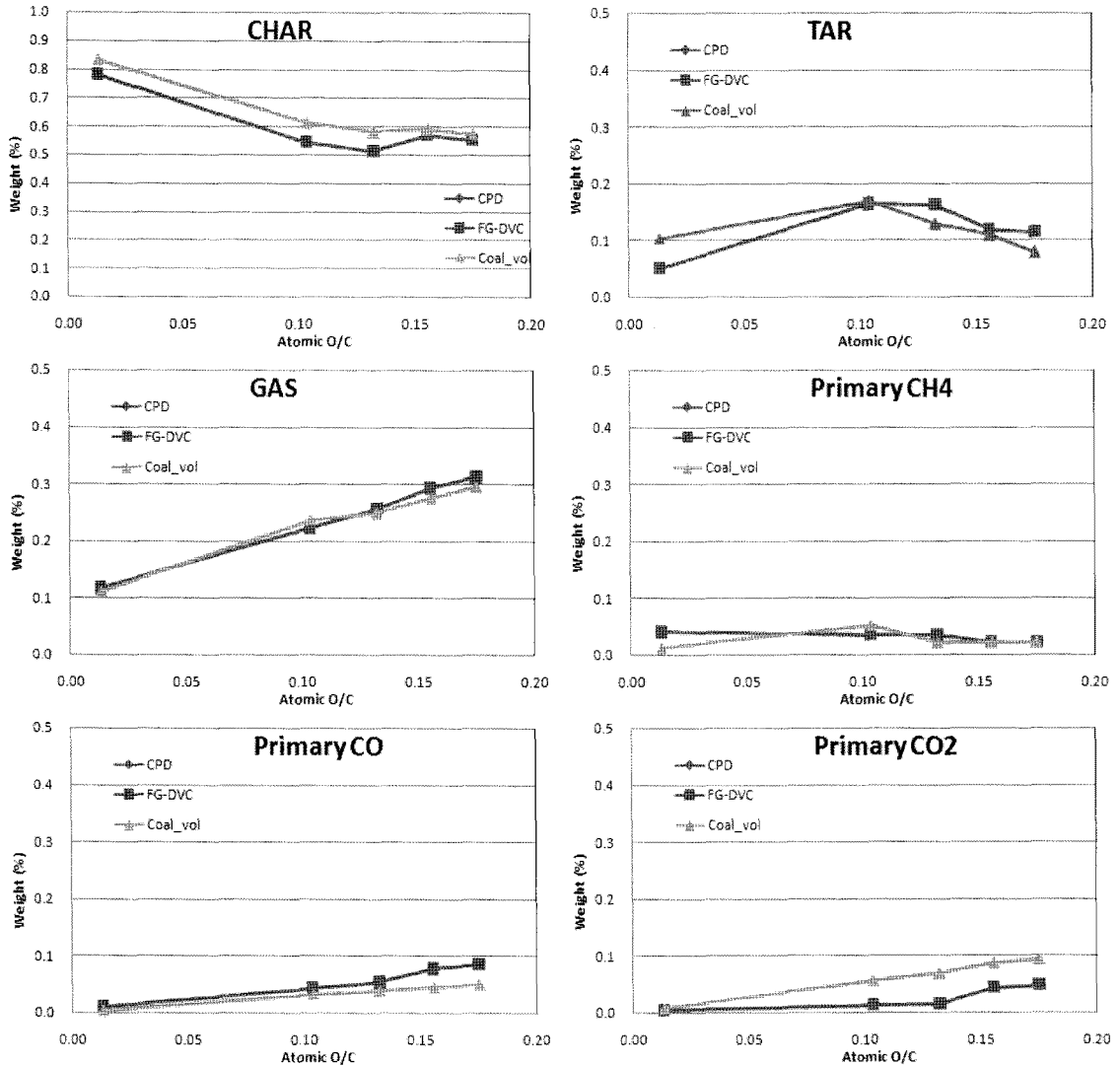


Fig. 9 Comparisons of char, tar, gas, CH₄, CO, CO₂ (42 atm).

델의 경우 CH₄ 이외에도 C₆H₁₂와 C₆H₁₀을 고려하고 있으며 CPD 모델의 경우는 성상을 알 수 없는 미지의 가스를 포함하고 있어 3개의 모델을 직접 비교하는 것은 무리가 있다. 다만, 본 모델의 결과가 탄종에 따라 높고 낮은 값을 보이는데 이는 C와 H 성분사이의 밸런스가 맞지 않기 때문으로 추정되며, 최의 량에 대한 보완식이 필요한 것으로 생각된다. 그 외 CO, CO₂, H₂O, H₂, HCN, H₂S, COS의 경우

는 3개 모델이 서로 비슷한 값을 보여주고 있다. 42 기압의 열분해 생성물을 살펴보면 타르와 가스상의 생성물이 1기압에 비해 작은 것을 볼 수 있으며, 최의 량이 상대적으로 커진 것으로 볼 수 있다. FG-DVC 모델과의 비교에서도 본 모델의 결과는 경향성이나 절대값에 있어 매우 유사한 것을 알 수 있어서, 특히 가스화 조건인 고압하에서의 열분해 생성물을 합당하게 예측함을 보여준다.

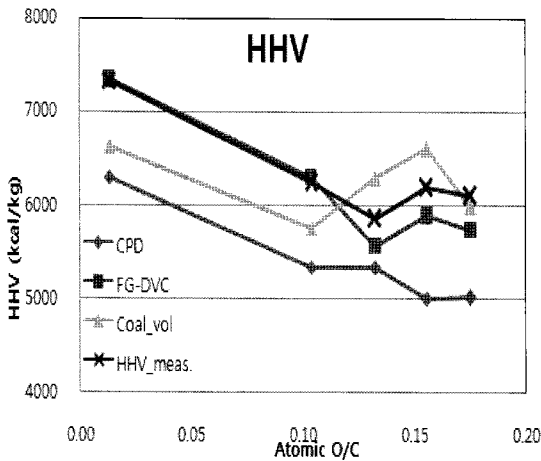


Fig. 10 Comparisons of HHV from three models.

3.3 상용모델과의 발열량 비교

열분해 생성물 각각의 연소열을 기준으로 생성물의 총 발열량을 구하고 이를 연료의 발열량과 비교하는 것도 본 해석방법의 정확성을 판단하는 자료가 될 것이다. 3가지의 모델로부터 얻은 열분해 생성물중에 가연성분인 char, soot, CH₄, CO, H₂, H₂S, COS의 함량에 따른 전체 반응열과 석탄중의 수분의 잠열을 합산한 결과를 연료의 고위발열량과 비교하였다(Fig. 10). 이때 연료의 고위발열량은 항상 기준(air dry basis)이며 1기압하에서의 결과를 나타내었다. 한편, 석탄의 열분해는 흡열반응으로 통상 412kcal/kg으로 알려져 있으며¹⁶⁾ Merrick(1983)¹⁷⁾의 경우 휘발분의 종류에 따른 열분해 반응열(heat pyrolysis)을 제시하기도 하였다. 연료의 측정된 고위발열량은 열분해 반응열을 제외하고 있어 본 연구의 생성물의 총 반응열과 연료의 고위발열량을 직접 비교하는 것이 합당할 것이다.

Fig. 10에서 보는 바와 같이 CPD 모델의 경우 미지의 가스상의 성분을 포함하고 있어 측정 HHV보다 전반적으로 작은 값을 보여주며 FG-DVC 모델이 전반적으로 정량, 정성적으로 일치하고 있으며 고등급탄(O/C > 0.1)의 경우 약간 적은 값을 보여준다. Coal_vol 모델의 경우 전반적인 경향은 일치

하지만 저등급탄에서는 낮게, 고등급탄에서는 더 큰 값을 보여준다. 특히, 타르 성분이 많은 고등급탄에서 차이가 더 큰 것을 알수 있으며 이는 2차 열분해 생성물 조성의 차이에 따른 것으로 보인다.

3. 결 론

본 연구에서는 석탄의 고온고압 열분해 생성물의 조성을 결정하는 방법을 제시하였으며 이를 프로그래밍하여 탄종별로 1, 2차 열분해 생성물을 구하였다. 국내 석탄화력 발전소에서 사용한 47개 탄종중에서 5개 탄종을 선정하여 1기압과 42기압에서 열분해 가스의 조성을 계산하고 그 결과를 상용모델인 FG-DVC 모델과 CPD 모델의 결과와 비교하였다. 열분해가스의 정량적인 분석과 탄종별 생성물 분포, 그리고 발열량의 비교에 있어서도 상용모델 결과 및 실측 발열량과 유사한 값을 보여주고있어 본 해석방법이 가스화시 열분해 생성물을 합당하게 예측함을 보여주었다. 본 계산 방법은 석탄가스화기내 가스화 평형반응모델이나 1차원 모델, 3차원 전산해석에도 사용이 가능하며 본 모델은 석탄가스화기 시뮬레이터의 한 모듈로서도 장착이 가능하다. 따라서 국내 수입되고 있는 수많은 탄종에 대한 열분해 가스 생성물을 계산하고 그 결과를 데이터베이스화하여 탄종별 가스화특성 평가시에 활용할 수 있을 것이다. 또한 소규모의 고온고압 석탄가스화 실험결과를 탄종별로 비교, 분석하는 경우에도 유용하게 사용될 수 있을 것이다¹⁸⁾.

참 고 문 헌

- 1) Solomon P.R., Serio M.A., Suuberg E.M. "Coal pyrolysis : Experiments, kinetic rates and mechanism". Progress in energy and combustion science, Vol. 18, 1992, pp. 133-169.
- 2) Smoot, D. Fundamentals of coal combustion, Elsevier, 1993.
- 3) Solomon P.R., Hamblen R.M., Carangelo R.M., Serio M.A., Deshpande G.V., "General model

- of coal devolatilization”, *Energy & Fuels*, Vol. 2, 1988, pp. 405-422.
- 4) Fletcher T.H., Kerstein A.R., Pugmire R.J., Solum M., Grant D.M., “Achemical percolation model for devolatilization : Summary”, www.et.byu.edu/cpd/CPD_summary.pdf.
 - 5) Niksa S., “Flashchain theory for rapid coal devolatilisation kinetics. 7. Predicting the release of oxygen species from various coals”. *Energy and Fuel*, Vol. 10, 1996, pp. 173-190.
 - 6) Merrick D., “Mathematical Models of the Thermal Decomposition of Coal 1. Evolution of volatile matter”, *Fuel*, Vol. 62, 1983, pp. 535-539.
 - 7) Bradley D., Lawes M., Park H.Y., Usta N., “Modelling of laminar pulverized coal flames with speciated devolatilization and comparisons with experiments”, *Combustion and Flame*, Vol. 144, 2006, pp. 190-204.
 - 8) Xu W., Tomita A., “Effects of coal type on the flash pyrolysis of various coals”, *Fuel*, Vol. 66, 1987, pp. 632-640.
 - 9) Khan M.R., “Prediction of sulfur distribution in products during low temperature coal pyrolysis and gasification”. *Fuel*, Vol. 68, 1989, pp. 1439-1445.
 - 10) Ko G.H., Sanchez D.M., Peters W.A., Howard J.B., “Correlations for effects of coal type and pressure on tar yields from rapid devolatilization”, 1988, 22th symposium (International) on combustion, The combustion Institute, Pittsburgh, pp. 411-416.
 - 11) Wen C.Y., Chung T.Z., “Entrained coal gasification modeling”, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, Vol. 18, 1979, pp. 684-695.
 - 12) Gavalas, “Coal Pyrolysis”, Elsevier, New York, 1982.
 - 13) Freihaut J.D., Proscia W.M., Seery D.J., “Chemical characteristics of tars produced in a novel low severity, entrained flow reactor”, *Energy and Fuel*, Vol. 3, 1989, pp. 692-699.
 - 14) 박호영, 김영주, “열분해 및 화-공기 반응시의 활성화에너지 및 빈도계수 분포”, *에너지공학*, Vol. 18, 2009, pp. 9-16.
 - 15) Krevelen, V. *Coal: Typology, chemistry, physics and constitution*, Elsevier, 1981.
 - 16) Smoot L.D., Horton M.D., Williams G.A., “Propagation of laminar pulverised coal-air flames”, Sixteenth symposium (International) on Combustion, The combustion Institute, Pittsburgh, 1977, pp. 1455-1459.
 - 17) Merrick D., “Mathematical Models of the Thermal Decomposition of Coal 2. specific heats and heats of reaction”, *Fuel*, Vol. 62, 1983, pp. 540-546.
 - 18) 서혜경, 정재화, 주지선, “건설 석탄공급형 1ton/day급 가스화시스템 설계조건 및 시운전 결과”, *수소 및 신에너지학회논문집*, Vol. 20, 2009, pp. 352-358.