

# 역청탄과 아역청탄의 석탄가스화 및 IGCC 성능검토

안달홍 나중희\* 송규소 김남호 김종진 지평삼

한국전력공사 기술연구원 전력연구실 석탄응용연구팀

\* 한국전력기술주식회사 복합화력사업부

## - ABSTRACT -

The Integrated Gasification Combined Cycle(IGCC) power plant is one of Clean Coal Technology to meet the demand for clean and efficient electric power for the 21st century. This study is to investigate the impacts of changes in coal quality to the performances of gasification processes and IGCC plants. The selection of the most economic coal is an important attribute for the IGCC power generation technology. The performances of gasification processes was predicted, and compared with the results of Shell coal gasification demonstrations. The IGCC performances with bituminous and sub-bituminous coal were predicted as well. It is obtained that the bituminous coal is superior to the sub-bituminous coal for IGCC power generation.

## 1. 서론

석탄가스화복합발전(IGCC)의 효율 및 운전특성에 미치는 석탄의 중요한 물성에는 (1)회용점온도/용융스래그의 점도 (2) 회분함량 (3)석탄의 반응성 (4) 수분함량 (5)석탄의 발열량 등이 있다. 그밖에도 석탄의 점결성, 유황분, 염소 함량 및 분쇄지수(HGI) 등이 고온고압에서 운전되는 석탄가스화로 및 IGCC의 운전특성에 영향을 미치는 중요한 석탄의 물성이다.

본 연구에서는 국내에 수입되고 있는 석탄중 석탄가스화에 적합한 석탄으로 일반적으로 알려진 역청탄 및 아역청탄의 성상이 석탄가스화 및 IGCC에 미치는 영향을 분석하여 전력회사 입장에서 2000년대 도입할 IGCC용 석탄으로 어떠한 탄이 적합한지 검토 하였다.

여기에서 사용된 방법은 문헌조사를 통하여 역청탄 및 아역청탄의 성상을 비교 검토하였고 반응성과 수분함량 및 발열량이 서로 상이한 역청탄과 아역청탄의 가스화 특성과 그영향을 분석하였다. 또한 화학평형모델을 이용한 석

탄가스화 모델링 프로그램을 이용하여 대표적인 역청탄 및 아역청탄에 대한 가스화기의 냉가스효율, 총효율 및 IGCC에서의 효율 분석을 통하여 역청탄과 아역청탄 사용시의 장단점을 분석하였다. 모델링 프로그램에 의한 결과를 검증하기 위하여 Shell사가 16종류의 다양한 석탄의 시험을 위하여 미국 휴스턴에 설치운용한 200T/D Plant의 실증시험 결과(EPRI GS-6318)를 비교하였다.

## 2. 석탄의 성상에 따른 가스화 특성

### 석탄회 용융온도의 영향

분류층 석탄가스화기에서는 석탄회를 슬래깅으로 처리하므로 가스화로 내의 온도를 회용점 온도 이상의 높은 온도를 유지해야 한다. 현대의 상용 분류층 석탄가스화기의 운전온도가 1,300 - 1,500 °C 범위임을 감안할 때 회용점온도가 높은 석탄은 IGCC에서의 이용이 불리하다.

국내에 발전용으로 수입되는 석탄은 미분탄 발전소의 특성상 회용점 온도가 높다. 이들 석탄중 특히 호주탄중 Ulan, Coalex, Collinsville, Coal & Allied, M.P.C.C., Nova, 캐나다의 CNR, Fording, Wester탄, 러시아의 Palmco, 남아공의 Amcoal탄 등은 슬래깅 처리가능 온도( $T_{250}$ )가 1,700°C 이상으로 높아 석탄가스화에 불리하다. 여기에서 슬래깅 처리가능 온도란 석탄회의 용융시 점도가 250 poise 이하가 되는 석탄가스화로내의 온도를 말한다. 국내에 수입되는 아역청탄 및 역청탄 중에서 슬래깅 처리 가능 온도가 비교적 낮은 석탄은 호주의 Drayton과 중국의 Datong(동진), 인도네시아의 KIDECO탄, 미국의 Alaska 탄 등이 있다. 이들 아역청탄 및 역청탄 중 어떤 석탄이 IGCC에 적합한지 검토가 필요하다.

### 석탄 반응성의 영향

석탄은 약 100Å ~ 수천Å 크기의 기공을 가진 다공성 물질(porous media)로서 석탄이 고품위화 되어감에 따라 석탄의 기공은 감소하게된다. 또한 석탄의 표면적은 10 - 200 m<sup>2</sup>/g 범위에 걸쳐 있으며 탄소함량의 증가에 따라 감소하는 경향이 있다 1). 석탄의 반응성은 석탄의 기공과 표면적이 커짐에 따

라 증가하므로 석탄의 기공과 표면적은 석탄가스화에 관한 매우 중요한 석탄의 물성이다. 따라서 석탄가스화반응속도는 상대적으로 저품위탄 (low rank coal)인 아역청탄이 매우 빠르다. 그림 3은 역청탄 및 아역청탄의 반응속도를 측정해 본 것으로 아역청탄인 Alaska탄의 반응속도가 900℃의 온도 분위기에서 역청탄에 비하여 매우 빠름을 보여주고 있다. 2)

석탄의 반응성은 소규모 Entrained flow reactor등을 이용하여 직접실험에 의하여 측정해야 하나 시료를 구할 수 없는 상황에서는 석탄의 원소분석 및 공업분석등에 나타난 석탄의 성분분석을 통하여 간접적으로 석탄의 반응속도를 유추할 수 있다. 석탄의 산소함량은 공업분석시 나타나는 휘발분 함량과 함께 석탄의 연령과 석탄의 등급을 나타내는 지수로서 일반적을 사용된다. 3) 아역청탄은 일반적으로 산소함량이 높으며(10-20%) 석탄내에 기공이 많고 표면적이 커 char의 반응속도가 빠르다. 따라서 석탄입자의 가스화로내 체류시간이 짧고 Shell 가스화기와 같은 건식 미분탄 공급방식에서도 증기주입 없이 높은 탄소 전환율을 얻을 수 있다. 반응성이 상대적으로 낮은 역청탄은 증기주입에 의하여 탄소전환율을 향상하는 것이 필요하다. 증기/산소의 비율은 0-15% 범위로 주입하며 탄소전환율과 냉가스효율이 극대화 되도록 조절하는 것이 필요하다. 4)

석탄의 반응성이 석탄가스화에 미치는 영향을 고려해 볼때 아역청탄은 석탄가스화로내의 반응온도가 상대적으로 낮게 유지되는 유동층 석탄가스화로나 습식 2단 분류층 가스화로에서 효과적인 것으로 판단되며 석탄가스화로 운전온도가 1,300~1,500℃의 고온으로 유지되는 분류층 석탄가스화로에서는 역청탄과 아역청탄의 반응성 차이에 따른 영향이 비교적 경미하다.

## 수분함량의 영향

석탄슬러리 제조시에는 포화수분의 함량이 석탄슬러리의 농도를 제한하게 되므로 포화수분 함량이 높은 아역청탄의 슬러리 농도는 50 - 55%로 한정된다. 5) 수분함량이 비교적 작은 역청탄의 경우에도 슬러리 농도는 59 - 63%로 제한되며 일반적으로 약 60%의 슬러리 농도가 한계로 되어있다. 슬러리농도의 제한은 습식 가스화기에서의 냉가스 효율 및 가스화기 net 효율저하로 나타나며 슬러리 농도제한이 큰 아역청탄의 효율저하가 더욱 심하게

나타난다. 건식 미분탄 공급 가스화시에는 약 5%로 건조된 미분탄을 질소 가스에 의하여 가스화기에 운반하며 따라서 석탄건조시에 열량을 소비하게 된다. 따라서 상대적으로 많은 수분을 함유하고 있는 아역청탄의 건조시에 더욱 많은 열량을 소비하는 불리함을 가지고 있다. 특히 아역청탄은 건조시 역청탄에 비하여 높은 열부하가 필요하므로 Mill의 용적을 크게 설계해야 할 필요가 있으며 따라서 역청탄 전용으로 설계된 Mill은 아역청탄에 직접 사용할 수 없고 개조가 필요하게 된다. 4 )

### 석탄발열량의 영향

역청탄의 대략적인 발열량범위는 5,900~7,800 kcal/kg이며 아역청탄의 발열량은 4,600~6,400 kcal/kg 범위에 있다. 아역청탄의 발열량이 역청탄 발열량의 80%에 불과하여 동일한 석탄가스화로에 동일한 출력을 얻기 위해서는 아역청탄 가스화시에는 역청탄 처리량의 120%의 석탄을 처리해야 한다. 그림 4 와 그림 5 는 동일한 열량의 석탄가스를 발생하기 위하여 석탄 처리용량을 증가시켜야 함을 보여주고있다. 따라서 아역청탄의 가스화시에는 석탄 공급설비등 부대설비의 용량을 역청탄의 경우 보다 20% 정도 증대 시켜야 한다. 특히 건식 미분탄 공급 석탄가스화로에서 아역청탄을 사용 할 때에는 수분함량 증가분과 석탄처리량 증가분을 고려해서 설계해야 한다.

## 3. IGCC 열성능 비교

### 비교 대상탄의 성상

역청탄과 아역청탄의 성상차이에 따른 석탄가스화로 및 IGCC의 성능을 비교 평가하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 입력으로 사용한 대상석탄은 Shell사의 실증시험 결과가 있는 아역청탄 Buckskin과 역청탄 Drayton으로 시뮬레이션을 한 후 실증시험치와 비교하였다. 또한 이들 결과의 건전성을 바탕으로 국내 수입되어 발전용으로 사용중에 있는 인도네시아산 아역청탄인 KIDECO 탄과 중국산 역청탄인 대동탄(일명:동진탄)에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 인도네시아로 부터 수입되어 발전용으로 사용중에 있

는 KIDECO탄은 유황함량과 회분함량이 상대적으로 매우 낮은 것을 제외하고는 Buckskin과 매우 유사한 아역청탄임을 알 수 있다. 호주산 Drayton탄과 중국산 대동탄은 원소분석상 비교적 성상이 유사한 역청탄으로 이들 두 종류의 탄은 국내 미분탄화력 발전용으로 수입되어 사용중에 있는 대표적인 석탄이다.

표 1. 검토 대상탄의 공업분석치 (Wt.%) (As Received Basis)

	아역청탄		역청탄	
	Buckskin	KIDECO	Drayton	대동탄
고 정 탄 소	36.22	40.46	47.92	53.80
휘 발 분	36.47	39.52	32.87	25.93
수 분	20.00	18.00	8.73	11.44
회 분	7.31	1.86	10.49	8.82

원소분석 (MAF, WT%)

	아역청탄		역청탄	
	(Buckskin)	KIDECO	(Drayton)	대동탄
C	74.10	74.5	82.52	80.6
H	5.26	5.9	5.48	4.34
O	17.93	18.4	9.00	13.74
N	1.36	1.0	1.74	0.98
S	1.36	0.2	1.25	1.38

### 석탄가스화로 성능분석

컴퓨터 시뮬레이션의 신뢰도를 검증하기 위하여 건식석탄공급 석탄가스화 시뮬레이션 결과치를 Shell사가 미국 휴스턴에서 200TPD 실증시험 프렌트에서 수행한 시험 결과치와 비교해 보았다. 석탄가스화로 열성능분석에 있어서 Drayton탄의 시뮬레이션 예측치가 95.63%로 실증시험 결과치인 95.8 %와 잘 일치하고 있어 석탄가스화로 시뮬레이션 알고리즘이 건전함을 보여주고 있다. 습식가스화기의 경우에는 건식에 비하여 냉가스효율이 최저 약 64%로 낮게 나왔으며 증기에 의한 현열 회수열량이 건식에 비하여 상대적으로 높게 나왔다. 아역청탄을 적용한 습식 가스화기 총효율은 84.7%로 역청탄의

88.98% 보다 낮게 나왔다. 이상을 종합해 볼때 석탄가스화기의 열효율면에서는 역청탄이 아역청탄 보다 더 유리한 것으로 판단된다.

표 2. 석탄가스화로 성능분석 비교표

가스화기		탄 종	아역청탄		역청탄	
			Buckskin	KIDECO	Drayton	Datong
건식 산소	냉가스효율		82.47 (78.00)	83.05	81.71 (79.3)	81.43
	증기 회수	Syngas Cooler	11.70	11.67	10.69	11.08
		Jacket Steam	1.63	1.56	3.96	3.56
		소 계	13.33	13.23	14.65	14.64
	효율	석탄건조열량	2.89	2.60	0.72	1.65
		Net 증기발생효율	10.44 (15.10)	10.63	13.90 (16.5)	12.99
가스화기 효율		92.90 (93.10)	93.67	95.63 (95.80)	94.42	
습식 산소	냉가스효율		64.39	65.64	72.98	70.62
	증기회수 효율		20.3	20.03	16.0	17.54
	가스화기 효율		84.69	85.67	88.98	88.16

- 주) 1. ( ) : Shell사 실증시험 결과  
 2. 아역청탄 슬러리 농도 53%, 역청탄 슬러리 농도 60%

### IGCC 효율분석

IGCC 종합효율은 석탄가스화로에서 생성되는 가스와 현열회수량에 의한 총발전량(Gross)을 산출하고 산소생산을 위하여 필요한 Air Separation Unit (ASU)와 Coal Handling시의 동력소비와 그밖의 BOP에 의한 소비동력을 총체적으로 고려해야 한다. 가스터빈 복합발전은 서인천화력에서 현재 운용중인 터빈입구온도 1,260℃의 GE 7F의 가스터빈을 적용한 신형 복합발전에 의한 IGCC 총효율을 계산하였다. IGCC의 송전단효율을 계산한 결과 건식 미분탄공급 가스화공정에 역청탄을 연료로 적용한 IGCC의 송전단효율이 40.06%로 가장 높은 효율을 보였고 슬러리 농도 53%의 아역청탄을 적용한

IGCC의 송전단 효율이 35.27%로 가장 낮은 효율을 보였다. 따라서 전체적으로 분류층 석탄가스화로를 채용한 IGCC에서는 역청탄이 아역청탄 보다 열효율면에서 유리한 것으로 판단된다. 최종적인 판단에는 열효율에 의한 평가와 발전소 투자비 및 운전유지 용이성등을 포함하여 평가가 이루어 져야 한다. 상대적으로 저급탄인 아역청탄을 다량으로 처리시에는 투자비와 운전유지비 면에서 역청탄보다 불리할 것으로 판단된다.

표3. IGCC 효율 비교표

IGCC	석탄	아역청탄		역청탄	
		Buckskin	KIDECO	Drayton	Datong
건식석탄가스화 IGCC	가스화로 효율	92.90	93.67	95.63	94.42
	IGCC 효율	39.01	39.34	40.06	39.95
습식석탄가스화 IGCC	가스화로 효율	84.69	85.67	88.98	88.16
	IGCC 효율	35.27	35.69	37.20	36.82

#### 4. 결 론

1. 국내에 수입되는 발전용 석탄중 호주의 Drayton, 중국의 Datong(이상 역청탄), 인도네시아의 KIDECO 및 미국의 Alaska탄 (이상 아역청탄) 등 슬래깅 처리 온도가 비교적 낮은 석탄이 IGCC에 적합하다.

2. 아역청탄은 역청탄보다 반응속도 측면에서 석탄가스화에 적합하나 석탄가스화로내의 반응온도가 상대적으로 낮게 유지되는 고정층 및 유동층 석탄가스화로에서 보다 효과적이다. 반응온도가 1300~1500 ℃의 고온인 분류층 석탄가스화로에서는 역청탄과 아역청탄의 반응성 차이에 따른 영향이 비교적 적다.

3. 아역청탄의 높은 수분함량은 석탄슬러리 농도를 제한하여 IGCC열효율이 저하되고, 건식 미분탄 공급 가스화로에서는 석탄 건조시 높은 열부하가 필요하여 Mill의 용량이 증대되며, 아역청탄의 발열량이 역청탄의 발열량보다 낮아 석탄 공급량을 약 20% 증가 시켜야 한다. 따라서 상대적으로 저급

탄인 아역청탄을 다량으로 처리시에는 투자비와 운전유지비 면에서 역청탄보다 불리할 것으로 판단된다.

4. IGCC의 송전단효율을 계산한 결과 전체적으로 분류층 석탄가스화로를 채용한 IGCC에서는 역청탄이 아역청탄 보다 열효율면에서 유리하며, 종합적으로 역청탄은 IGCC의 연료탄으로 아역청탄 보다 우수한 것으로 판단된다.

## 5. 참고문헌

1. The chemistry and technology of coal. James G. Speight, Corporate Research Science laboratories Exxon Research and Engineering Company Linden, New Jersey.
2. 복합발전용 석탄가스화장치 및 정제시스템연구, 한전기술연구원, KRC-90G-J07, 1993.
3. Coal flexibility of the Shell Coal Gasification Process: AB Krewinghaus and P. C. Richards, Shell Development Company, Deer Park, Texas.
4. Shell Coal Gasification Project: Gasification of six diverse coals. EPRI GS 7051 Nov. 1990.
5. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization.
6. Chemistry of coal utilization, second supplementary volume, Martin A. Elliots Editor 1981.
7. Texaco Gasification Process, Teaxco Development Corporation.
8. Cool Water Coal Gasification Process ; Final Report : EPRI GS-6806 Dec.1990



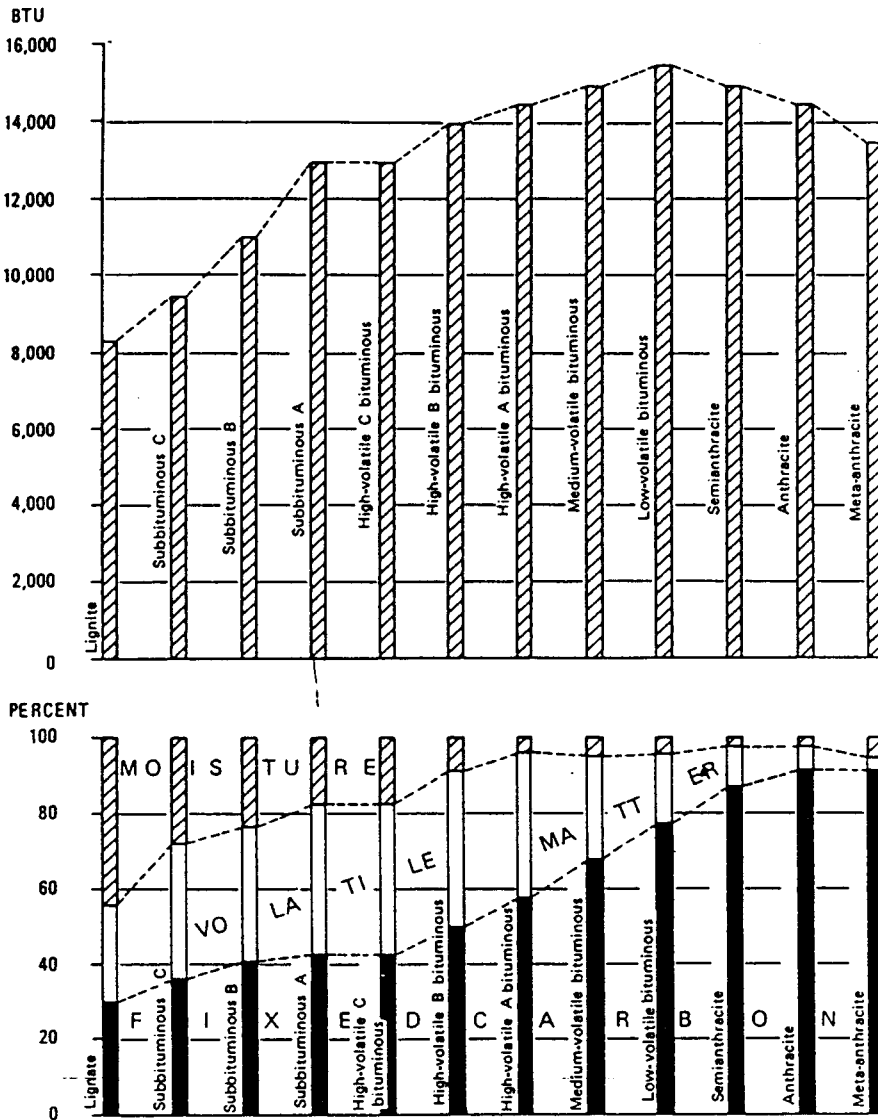


그림 1. Schematic representation of the variation of the calorific value of coal with coal rank. (From Baughman, 1978.)

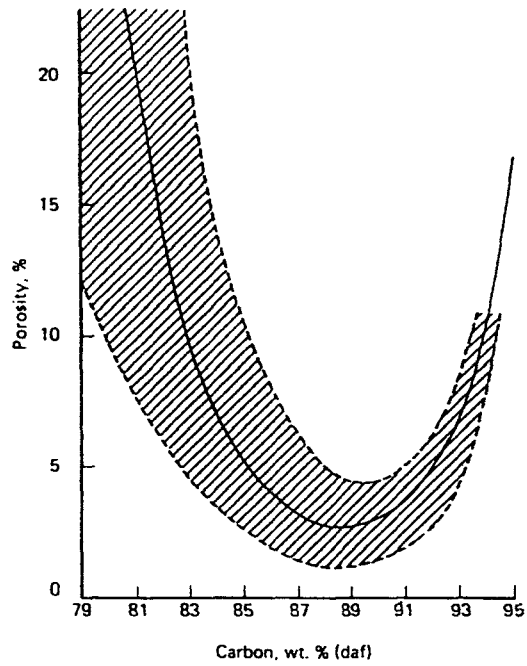


그림 2. Variation of vitrinite density with carbon content.  
 (From An Introduction to Coal Technology,1979.)

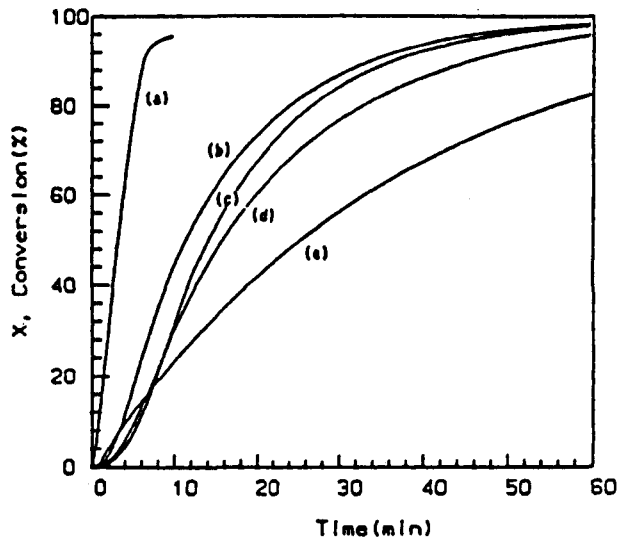


그림 3. 석탄좌의 반응 속도 (900℃ 분위기). 2)  
 (a) Alaska (b) Drayton (c) Ombilin (d) CNR

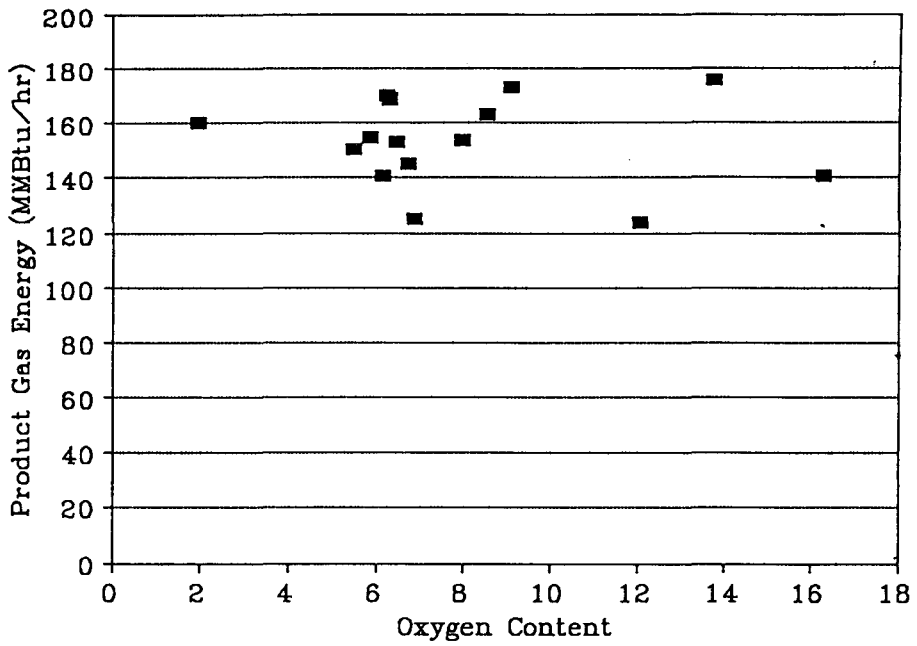


그림 4. Product gas energy vs Oxygen content of coal

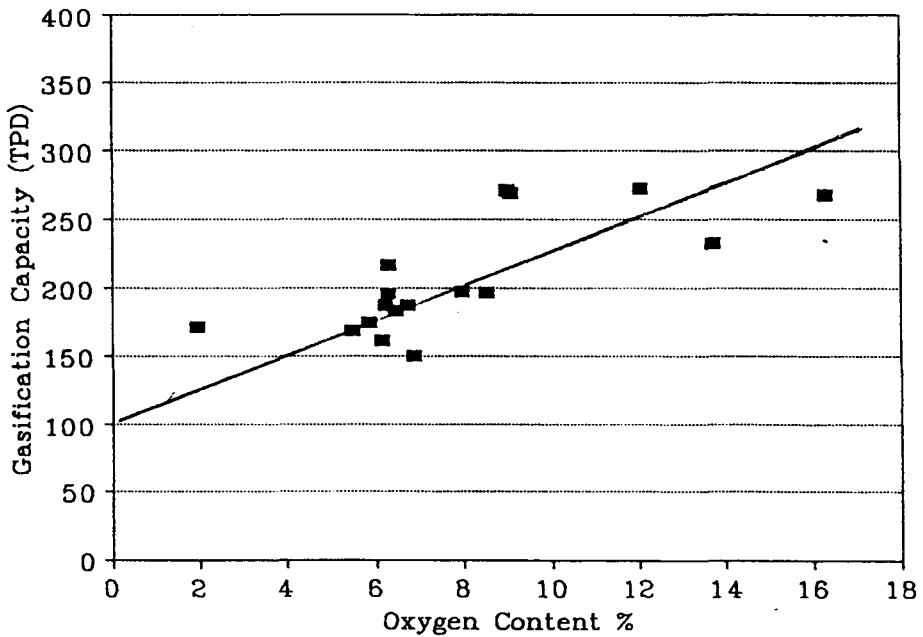


그림 5. Gasification capacity vs Oxygen content of coal