

주요 운전 변수에 따른 석탄의 가스화 성능 예측

이 승중¹⁾, 정 석우²⁾, 윤 용승⁴⁾

Coal Gasification Performance with Key Operating Variables

Seung Jong Lee, Seok Woo Chung, Yongseung Yun

Key words : Coal(석탄), Gasification(가스화), Syngas(합성가스), Operating Parameter(운전 변수), Cold Gas Efficiency (냉가스 효율)

Abstract : Gasification converts coal and other feedstocks into a very clean and usable gas, called syngas, that can be used to produce a wide variety products such as electricity, chemicals, transports fuels, hydrogen production, etc. This paper was studied the gasification performance effects with the variation of the gasification operating parameters such as the feeding amounts of oxygen, steam and coal. When O₂/coal ratio was below 0.8, H₂ mole % was increased as increasing O₂/coal ratio. CO mole % was increased when O₂/coal ratio was below 1.2 as increasing the O₂/coal ratio. As increasing steam/coal ratio, H₂ mole % was increased and CO mole % was decreased. The O₂/coal and steam/coal ratio was 0.8~0.9 and 0.0~0.4, respectively, to keep the proper gasification condition that the gasifier temperature was 1300°C~1450°C and the cold gas efficiency was over 76%.

subscrip

KPC : kaltim prima coal
MF : moisture free
FC : fixed carbon
VM : volatile matter

1. 서 론

가스화(gasification) 기술은 석탄, 중질잔사유, 폐기물, 바이오매스 등과 같은 저급(low grade)의 고체 또는 액체 시료를 고온/고압 조건에서 CO와 H₂가 주성분인 합성가스(syngas)로 전환하는 기술이다. 가스화 반응으로 생성된 합성 가스는 비산재, H₂S, COS, NH₃ 등 여러 가지 불순물들을 함유하고 있으며, 이러한 물질들을 정제하여 전기 생산, 화학원료 및 수송용 연료 제조, 연료전지 이용, 수소생산 등 다양한 형태로 이용할 수 있다.

현재 국내에서는 IGCC 시스템의 상업화와 국내 기술 확보를 위해 한국형 300 MW급 IGCC 실증 플랜트 설계기술 자립 및 건설을 위한 기술개발 연구와 IGCC 시스템에 대한 요소 기술 및 시스템 종합 기술에 대한 연구가 진행되고 있다. 그러나 현재 국내의 IGCC 기술은 미국·유럽 등 기술 선진

국에 비해 대용량 가스화기 계통에 대한 설계자료와 기술자료가 부족한 형편이다. 따라서 연료별 가스화 특성 자료와 연료별 초기 운전 조건 자료 그리고 가스화기 계통에 대한 기초 검증자료 등에 대해서도 지속적인 확보가 필요하다. 그러나 현실적으로는 이러한 설계자료 및 기술자료들을 실증시험을 통하여 모두 확보한다는 것은 국내 연구 여건상 불가능하므로, 이러한 자료들을 간접적으로 확보할 수 있는 전산해석 기술의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 석탄가스화에 대한 특성을 파악하기 위해 가스화 성능에 영향을 주는 주요 운전변수들인 산소와 증기의 변화에 따른 석탄의 가스화 성능을 예측하는 전산해석 방법을 제시하고 대상연료별 최적의 가스화 조건을 도출하여 해석 결과를 가스화기 시스템의 설계 및 운전을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다. 전산해석에

1) 고등기술연구원

E-mail : sjlee@iae.re.kr

Tel : (031)219-2670 Fax : (031)216-9125

2) 고등기술연구원 Plant Engineering센터

E-mail : swchung@iae.re.kr

Tel : (031)219-1946 Fax : (031)219-2306

3) 고등기술연구원

E-mail : ysyun@iae.re.kr

Tel : (031)219-2677 Fax : (031)216-9125

는 고체 반응물이 있는 시스템 해석에 효과적인 상용 공정해석용 프로그램인 ASPEN(Advanced System for Process ENgineering) 코드를 사용하여 가스화 공정에 대한 공정 구성과 전산해석을 하였다.

2. 시스템구성 및 전산해석

본 연구에서는 전산해석시 가압분류층 건식 석탄가스화기 시스템을 대상으로 공정구성 및 해석을 하였다. 대상탄은 인도네시아 KPC(Kaltim Prima Coal)이고, 산소(95% 순도)를 산화제로 사용하였으며, 가스화기의 운전 압력은 28기압으로 설정하였다. Table 1에 KPC탄의 분석 자료를 나타내었다.

Table 1 Analysis of KPC Sub-bituminous Coal

| | | |
|--|----------|-------|
| Proximate analysis (dry basis, wt%) | Moisture | 5.19 |
| | FC | 47.95 |
| | VM | 42.11 |
| | Ash | 4.76 |
| Ultimate analysis (MF basis, wt%) | C | 75.31 |
| | H | 5.64 |
| | N | 0.90 |
| | S | 0.79 |
| | O | 12.34 |
| | Ash | 5.02 |

전산 해석시 사용한 가스화기 모델은 열분해 반응 영역, 가스화 반응 영역과 슬래크 및 비산재 생성영역으로 구성하였다. 석탄을 가스화할 경우에는 석탄내 함유된 회분의 함유량이 탄종에 따라 다르지만 일반적으로 5-10% 정도로 많으므로, 이들 회분을 처리하기 위해서 회용점 온도보다 높은 온도(1300~1450℃)에서 가스화기를 운전하거나 flux를 첨가시켜 회용점 온도를 낮추어 운전하고 있다. 본 연구에서는 가스화기의 운전온도를 1420℃로 하여 석탄가스화기에 대한 전산해석 모델 구성 및 성능해석을 진행하였다. 전산해석시 반영한 가스화기 계통의 간략한 block diagram을 Fig. 1에 나타내었다.

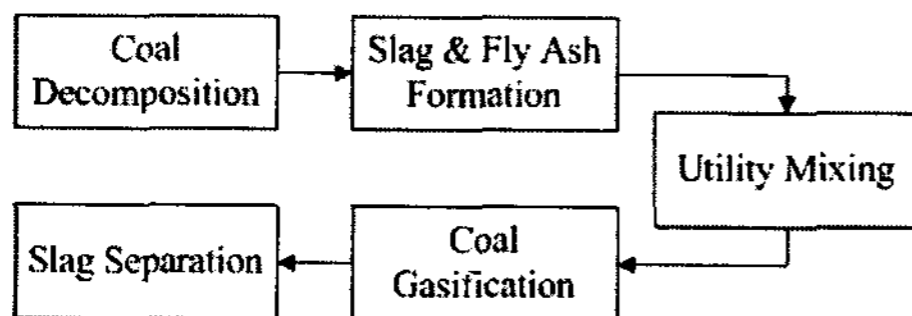


Fig. 1 Block diagrams of gasification in the ASPEN simulation

가스화기 운전시 성능에 영향을 주는 운전 인자들로는 가스화기 공정 및 규모를 결정하는 인자로는 대상연료, 석탄주입방식, 석탄/산소/증기/질소 주입량 등 가스화기에 주입되거나 주입 형태를 결정하는 변수들이 있다. 이와 같이 가스화기에 주입되거나 주입 형태를 결정하는 인자들을 운전변수(operating parameter)로 정하였다. 이들 운전변수들 중 가스화 성능에 주는 영향이 상대적으로 작고 건식 주입방식에서만 고려되는

변수인 질소 주입량을 운전변수에서 제외하였다. 또한 대상연료의 경우 적용 탄종이 결정되면 고정적인 값으로 결정되는 고유인자이므로 운전변수에서 제외하였다. 석탄주입방식의 경우 적용 가스화공정에 따라 결정되는 고유인자이므로 역시 고정적인 변수로 간주하여 운전변수에서 제외하였다. 또한 본 연구에서는 특정한 규모의 가스화기를 대상으로 하지 않고, 여러 규모의 가스화기를 연구대상으로 하기 위하여 운전변수들인 석탄, 산소 및 증기의 주입량을 산소/석탄질량비(이하, 산소/석탄비) 및 증기/석탄질량비(이하, 증기/석탄비)로 바꾸어 나타내었다.

가스화기 운전으로 도출되는 인자들로는 가스화기 운전압력/운전온도, 생성가스 조성/유량, 생성가스의 고위발열량 및 냉가스효율(cold gas efficiency) 등이 있다. 이밖에, 탄소전환율(carbon conversion ratio) 및 가스화기 열손실(heat loss) 등이 있다. 본 연구에서는 이들 인자들을 성능변수로 정하였으며, 이들 변수들 중 가스화기 운전압력의 경우, 압력 변화에 따라 가스화 성능, 특히, CH₄가 영향을 많이 받는 것으로 보고[1]되고 있지만, 가스화기 운전압력은 실질적으로 적용 대상공정과 가스화 목적(또는 용도)에 따라 결정되므로, 고정적인 값(27 kg/cm²)으로 설정하였다. 또한 가스화기 열손실율도 대상공정 특성이나 가스화기 용량(또는 규모)에 영향을 받는 인자이므로, 가스화기 열손실율을 1.5%로 설정하고 성능변수에서 제외하였다.

가스화 반응의 결과로 나오는 합성가스에는 수소(H₂), 일산화탄소(CO), 메탄(CH₄), 이산화탄소(CO₂), 산소(O₂), 질소(N₂), 수분(H₂O), 황화수소(H₂S), 황화카르보닐(COS) 및 암모니아(NH₃) 등 여러 가지 성분들이 있다. 또한, 고체 성분으로는 탄소(carbon), 슬래크 또는 숯(soot) 및 비산재(fly ash) 등이 있다[2,3]. 고체 성분들은 가스화 특성보다는 대상 석탄이나 가스화기 형상에 영향을 받는 인자들이므로, 이들 인자들을 제외하였다. 또한 산소의 경우 실질적으로 가스화 조건에서는 생성되지 않으므로 성능변수에서 제외하였다. 질소의 경우에는 가스화 반응과는 관계없이 가스화기에 주입되는 양과 비례하여 생성되므로 고유한 값으로 가정하여 역시 성능변수에서 제외하였다. H₂S, COS 및 NH₃의 경우, 가스화 반응으로 생성되는 양이 작고, 가스화 성능을 예측하는 인자들보다는 환경성능과 더 밀접한 인자들이므로 역시 성능변수에서 제외하였다.

3. 해석결과 및 고찰

본 연구에서는 석탄의 가스화 성능 특성을 파악하기 위하여 산소 및 증기의 유량 변화에 따른 생성가스(수소 및 일산화탄소)의 조성 및 가스화기 운전온도, 냉가스 효율 그리고 생성가스 고위발열량에 미치는 영향을 분석하였다.

운전변수인 산소/석탄비는 0.5~2.0, 증기/석탄비는 0.0~1.0으로 동시에 변화시켰으며, 성능변수 중 수소 및 일산화탄소의 조성 및 유량, 가스화기 운전온도, 냉가스 효율 및 생성가스 고위발열량 변화에 미치는 영향을 분석하였다.

산소 및 증기가 H₂ 및 CO 생성에 주는 영향을 Fig. 2와 Fig.3에 나타내었다. 산소/석탄비가 증

가할수록 H₂의 조성은 증가한 후 산소/석탄비 0.8에서 최대치를 나타낸 후 서서히 감소하는 것으로 나타났으며, 증기량이 증가할수록 H₂ 조성은 수성가스전환반응(water gas shift reaction)의 영향으로 서서히 증가하는 것으로 나타났다.

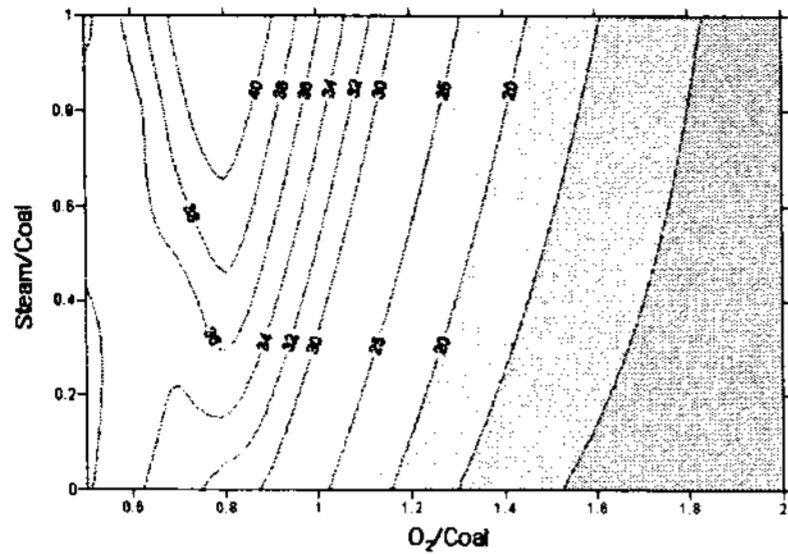


Fig. 2 Changes of H₂ mole % with O₂/coal & steam/coal mass ratio

CO 조성의 경우 증기량에 따라 다르지만, 산소/석탄비 1.2까지 증가한 후 서서히 감소하는 것으로 나타났다. 증기량이 증가할수록 CO 조성은 수성가스전환반응의 영향으로 서서히 감소하는 것으로 나타났다.

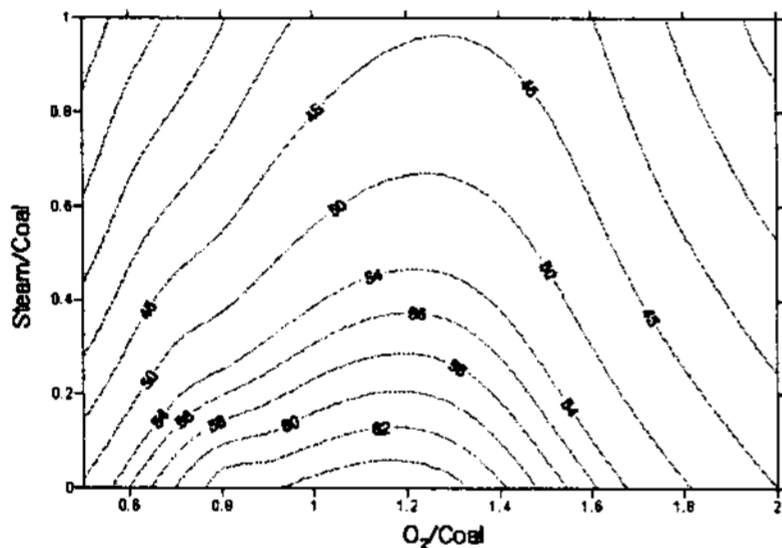


Fig. 3 Changes of CO mole % with O₂/coal & steam/coal mass ratio

산소 및 증기량 변화에 따른 가스화기 온도에 주는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. 산소/석탄비가 증가할수록 온도는 증가하는 것으로 나타났으며, 증기/석탄비가 증가할수록 서서히 감소하는 것으로 나타났다.

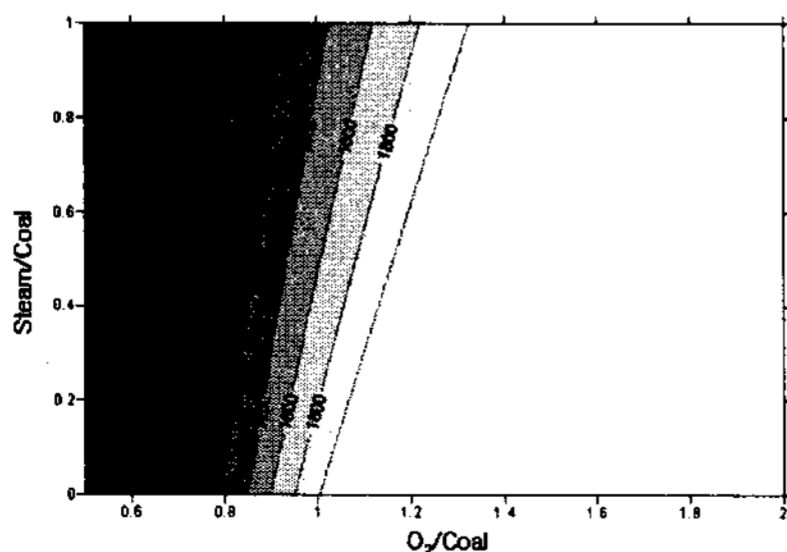


Fig. 4 Changes of gasifier temperature with O₂/coal & steam/coal mass ratio

산소 및 증기량 변화에 따른 냉가스 효율에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다. 냉가스 효율의 경우, 산소량이 증가할수록 증가하여 산소/석탄비 0.8 부근에서 최대치를 나타낸 후 감소하였으며, 증기량이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 특히 증기량이 증가할수록 냉가스 효율은 계속 증가하는 것으로 나타났는데, 냉가스 효율이 높은 영역인 산소/석탄비 0.8이하 및 증기/석탄비 0.4 이상의 영역에서는 Fig. 4에서와 같이 가스화기 운전온도가 1000°C이하인 영역으로 낮은 운전조건에서 체류 시간을 오래 유지할 경우 냉가스 효율이 높은 것으로 나타났다. 그러나 실질적으로 가스화기 운전시 1000°C이하의 낮은 운전 조건에서는 안정적이고 연속적인 가스화 반응을 진행하기 어려우므로 이들 영역에서의 가스화 해석결과는 실질적으로 가스화기 운전에 적용하기에는 적합하지 않은 운전조건이다.

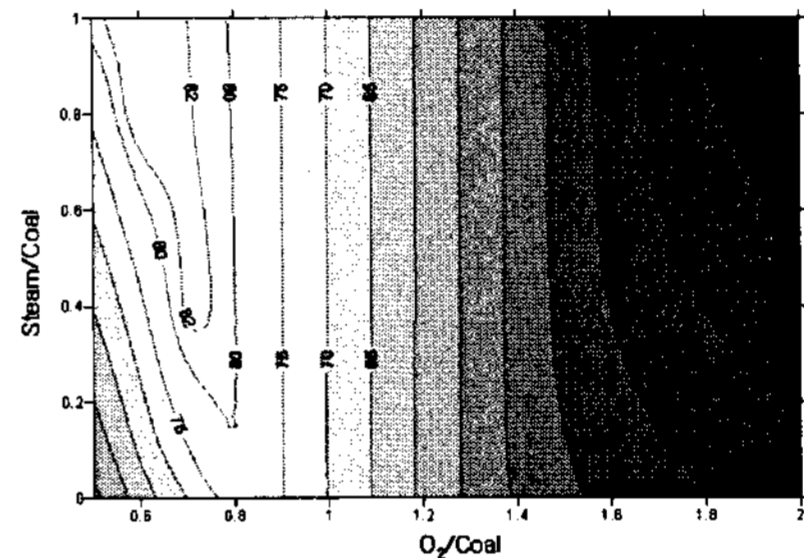


Fig. 5 Changes of cold gas efficiency with O₂/coal & steam/coal mass ratio

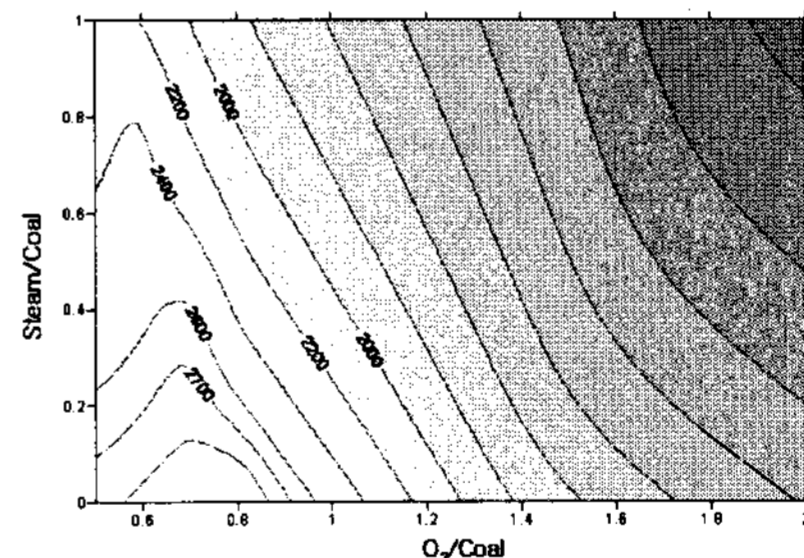


Fig. 6 Changes of higher heating value with O₂/coal & steam/coal mass ratio

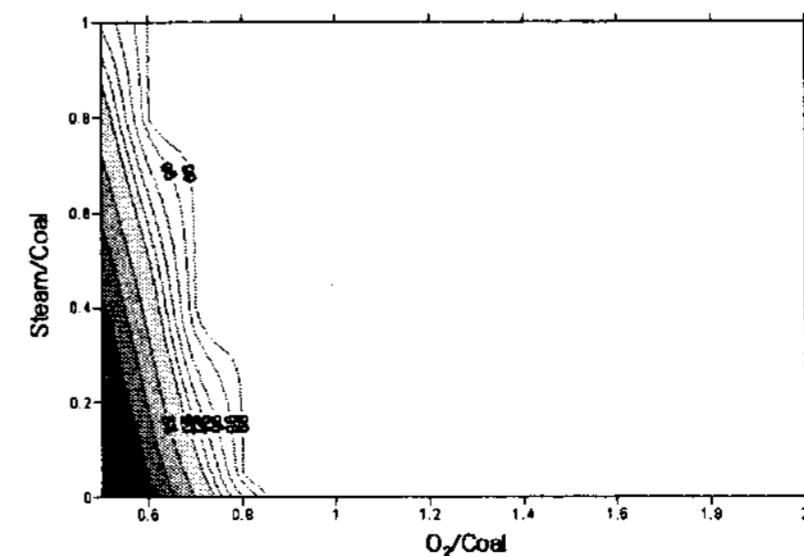


Fig. 7 Changes of carbon conversion ratio with O₂/coal & steam/coal mass ratio

산소 및 증기량 변화에 따른 생성가스 고위발열량과 탄소전환율을 Fig.6과 Fig. 7에 나타내었다. 생성가스 발열량의 경우, 산소/석탄비 0.7에서 최대치를 나타낸 후 감소하였으며, 증기량이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났고, 탄소전환율의 경우 산소량이 증가할수록 증가하여 산소/석탄비 0.85 이상의 영역에서 99% 이상 전환되는 것으로 나타났으며, 증기량이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 8에는 산소 및 증기량 변화시 가스화기 운전온도 및 냉가스 효율에 미치는 영향을 동시에 나타내었다. 가스화기 운전온도와 냉가스 효율의 경우 특정 영역에서 최적 조건을 나타내지 않고, 운전변수들의 변화에 따라 변화하는 경향을 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서는 실 플랜트에 적용 가능한 적정 가스화 조건을 도출하기 위하여, 성능변수들의 적정 조건(또는 범위)을 정하였다. 석탄을 연료로 사용할 경우, 실용 플랜트의 운전온도 범위는 1300~1450℃이므로, 이 영역을 가스화기의 적정 운전온도 범위로 하였다. 또한 냉가스 효율은 76%이상으로 적정 가스화 성능 조건을 정하였다. 적정 가스화 성능조건을 만족시키기 위한 가스화기 운전조건은 산소/석탄비 0.8~0.9, 증기/석탄비 0.0~0.4인 것으로 나타났다.

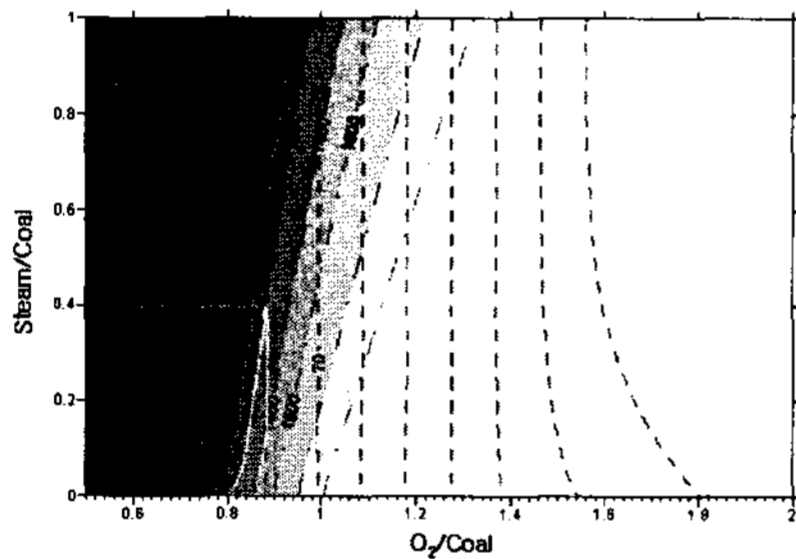


Fig. 8 Changes of gasifier temperature & cold gas efficiency with O_2 /coal & steam/coal mass ratio

4. 결론

산소-증기 변화에 대한 석탄의 가스화 성능을 살펴보았다. 산소/석탄비 0.8에서 H_2 의 조성은 최대치를 나타낸 후 서서히 감소하는 것으로 나타났으며, 증기량이 증가할수록 서서히 증가하는 것으로 나타났다. CO 조성의 경우 산소/석탄비 1.2까지 증가한 후 서서히 감소하고, 증기량이 증가할수록 서서히 감소하는 것으로 나타났다. 가스화기 온도의 경우, 산소/석탄비가 증가할수록 온도는 증가하고 증기/석탄비가 증가할수록 서서히 감소하였으며, 냉가스 효율의 경우, 산소/석탄비 0.8 부근에서 최대치를 나타낸 후 감소하였으며, 증기량이 증가할수록 증가하였다. 가스화기 운전온도가 1300~1450℃이고, 냉가스 효율이 76%이상의 조건을 만족시키기 위한 가스화기 운전조건은 산소/석탄비 0.8~0.9, 증기/석탄비 0.0~0.4인 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 산업자원부 산하 에너지관리공단 신재생에너지센터와 석탄 IGCC 사업단에서 지원하는 “3톤/일급 가스화시스템 구축 운전 및 국내 고유 가스화기 모델 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

References

- [1] J.L.Johnson, “Kinetics of Coal Gasification”, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 1-20, 1979.
- [2] 이승중, 이진욱, 윤용승, “탄종 및 석탄공급 방식 변화에 따른 석탄가스화 복합발전 플랜트의 성능 평가”, 에너지공학, 6(2), pp.176-187, 1997.
- [3] 안달홍, 김종진, 김종영, “국내 수입석탄의 가스화 및 석탄가스화복합발전 연료적합성에 관한 연구”, 에너지공학, 4(2), pp.222-231, 1995.