

IGCC 발전용 가스화기에서 증기 주입량이 합성가스 생산량에 미치는 영향

금경남*†, 유호선**

*† 한국서부발전(주), ** 숭실대학교 기계공학과

Effect of the Steam Flow Rate on Syngas Productivity in IGCC Gasifier for a Power Generation

Kyung-Nam Keum*†, Ho-Seon Yoo**

*† Korea Western Power Co., Ltd., Taeon 32140, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

ABSTRACT : In the study, the effect of steam injection on syngas productivity was investigated under the constant operating conditions of gasifier oxygen load while the coal feed was fixed and the steam injection flow rate is changed in Taeon IGCC plant. The maximum syngas average productivity was found to be at 80 % and 90 % of gasifier oxygen loads with the steam injection flow rate of 0.14 kg/s and 0.15 kg/s per coal burner. Through this study, the syngas productivity was changed by adjusting the steam injection amount and as the steam injection flow rate increased, the syngas productivity increased and then decreased again. The syngas productivity can be increased only by steam injection without supplying additional coal and it is considered that the syngas productivity has different characteristics depending on coal type. Thus it is recommended to operate the gasifier using Carbo-One coal with the steam injection flow rate of about 0.14 kg/s per coal burner when the gasifier oxygen load is 80 % ~ 90 %.

초록 : 본 연구에서는 정격 합성가스 생산량이 54,33 kg/s인 태안 IGCC 발전소 가스화기를 대상으로 가스화기 산소부하가 일정한 운전조건에서 석탄 공급량을 고정하고 증기 주입량을 변화시킬 때 증기 주입량이 합성가스 생산량에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 증기 주입량은 가스화기 운전지침서의 증기 주입량 0.28 kg/s 및 0.32 kg/s 까지 변동하며 운전하였고, 최대 합성가스 평균 생산량은 가스화기 산소부하 80 % 및 90 %에서 증기 주입량 0.14 kg/s 및 0.15 kg/s 일 때 측정되었다. 이 연구를 통해 증기 주입량 조정만으로 합성가스 생산량이 변화 하고, 증기 주입량 증가시 합성가스 생산량은 증가하다가 다시 감소하는 특성을 확인 할 수 있었다. 추가 석탄 공급 없이 증기 주입만으로 합성가스 생산량을 증가시킬 수 있고, 석탄의 성분 및 조성에 따라 가스화기의 합성가스 생산량이 다른 특성을 가지고 있는 것으로 사료되는 바, 시험에서 사용된 카보원 석탄을 사용하는 가스화기는 산소부하 80% ~ 90%에서 운전시 석탄 버너 당 증기 주입량을 약 0.14 kg/s 에서 운전하는 것이 추천된다.

Key words : IGCC(석탄가스화복합발전설비), Gasifier(가스화기), Syngas(합성가스), Gasifier Oxygen load(가스화기 산소부하), Steam injection flow(증기 주입량)

† Corresponding Author
hsy@ssu.ac.kr

- 기호설명 -

ΔH : 가스화반응열 (MJ/kmol)
 T : 가스화기 운전시간 (min)

\bar{S} : 합성가스 평균 생산량 (kg/s)
 F : 가스화기 증기 주입량 (kg/s)

1. 서론

석탄은 타 화석연료에 비해 공급이 안정적이고 매장량이 풍부하며, 지역적으로 편재되지 않고 가격변동이 크지 않아 우리나라 발전용 연료로 30% 이상을 담당하고 있다. 그러나 석탄을 연소할 때 황산화물과 질소산화물이 발생되고 온실가스의 원인물질로 주목받고 있는 이산화탄소의 배출이 타 발전원 보다 상대적으로 많이 배출되는 문제점을 가지고 있다.

IGCC 발전소는 기존 미분탄 화력발전소에 비해 발전효율이 높고 환경오염 물질인 황산화물과 질소산화물의 제거효율이 우수한 특성을 가지고 있고 가스화기에서 생산된 합성가스를 가스터빈의 연료로 사용하는 복합발전시스템이다. 이 기술은 지금까지 선진국을 중심으로 공정개발이 진행되어 왔으며 투자비의 저감과 설비신뢰도 향상을 위한 기술개발이 활발히 추진되고 있다.

본 연구에서는 태안 IGCC 발전소 가스화기를 대상으로 합성가스 생산량이 일정한 가스화기 운전조건에서 증기 주입량을 조정하면서 합성가스 생산량 변화를 측정하고, 증기 주입량이 합성가스 생산량 변화에 미치는 영향을 알아보고자 하였다.

2. 발전용 가스화기

2.1 기능 및 구조

본 연구는 태안 IGCC 발전소 가스화기를 대상으로 실험하였으며, 가스화공정은 분류층 가스화반응으로 노내 온도가 1,500 °C 이상으로 높고 순산소를 산화제로 사용하여 탄소 전환률이 매우 높다. 낮은 이산화탄소의 함량과 가연성 물질인 일산화탄소 및 수소의 함량이 높아 양질의 합성가스를 생성하며, 석탄 사용의 제한이 적고 대용량화가 가능하여 현재 발전용으로 많이 사용되고 있다.

Fig. 2-1은 태안 IGCC 발전소 가스화기의 가스화반응 공정계통 개략도를 나타내고 있다. 원탄 저장조에서 공급된 석탄은 석탄 분쇄기에서 입자크기 90 μ m 이하, 수분 함유량 2.0 wt% 이하로 분쇄 및 건조되어 미분탄 저장조로 이송된다. 미분탄 저장조의 미분탄은 고압질소를 사용하여 미분탄 공급압력을 가스화기 운전압력보다 0.5 MPa ~ 1.0 MPa 높여 석탄버너로 공급하게 된다. 석탄버너는 총 4개로 각 버너 반경방향으로 4° 각도를 주어 배치되어 와류를 형성하며, 산소 공급계통, 석탄 공급계통 그리고 증기계통과 연계되어 가스화기 산소부하에 따라서 결정된

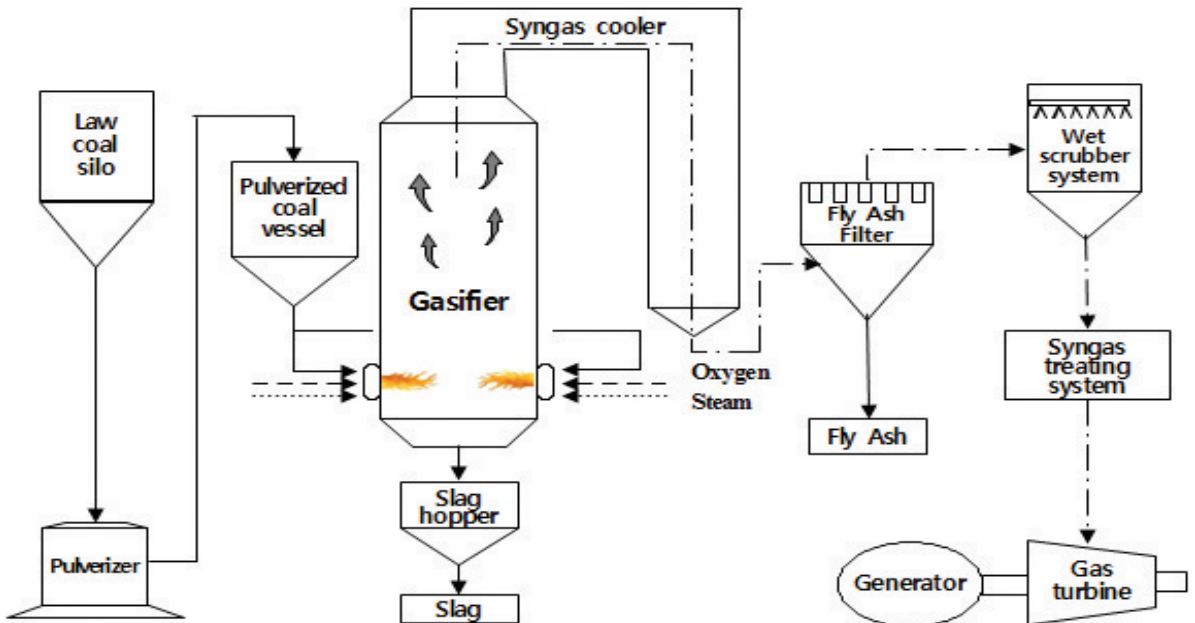


Fig. 2-1 Schematic diagram of gasification process in Taean IGCC Plant

석탄, 산소 및 증기 공급량이 버너를 통해 가스화기로 공급된다. 가스화기는 내경 3.2 m, 외경 5 m, 높이 33.1 m의 1단 가스화 원통형 구조이며, 가스화기에 공급된 미분탄은 온도 약 1500 °C, 압력 4.2 MPa 조건에서 산소와 부분 연소하여 약 1,500 °C의 합성가스를 생산한다. 고온의 합성가스는 합성가스 열손실을 방지하기 위하여 가스화기 외벽에 설치된 수냉벽(Water cooled membrane wall)에 급수가 흐르면서 열교환을 통해 증기를 생산한다. 그리고 석탄에 함유되어 있는 대부분의 회분은 고온의 가스화 온도 조건에서 용융슬래그 형태로 가스화기 하단부의 슬래그 호퍼를 통해 외부로 배출 된다. 합성가스 냉각기는 수관식 열교환기로 비산회(Fly ash)가 포함된 고온의 합성가스를 부착물(Fouling) 없이 냉각하며, 가스화기 출구에서 냉각된 약 900°C의 합성가스는 합성가스 냉각기 하향류 방향으로 흐르면서 합성가스의 현열에 의하여 5.2 MPa의 증압 포화증기와 14.1 MPa 고압 포화증기를 생산하고 출구에서 약 250°C의 온도조건에 도달하게 된다. 비산회를 포함하는 약 250°C 합성가스는 건식 미립자 제거설비로 이송되고 세라믹재질의 1,152개 고온고압필터에 의해 합성가스 중의 비산회가 제거된 후 미립자 농도가 1 mg/Nm³ ~ 2 mg/Nm³ 수준이 되며, 제거된 비산회는 비산회 처리계통으로 이송된다. 비산회가 제거된 합성가스는 습식세정계통 하부로 공급되고 상부 노즐에서 분사되는 물과 직접 접촉 하면서 잔존하는 기타 입자 및 불순물들이 제거된다. 가스정제계통으로 이송된 합성가스는 합성가스 주요 성분인 일산화탄소와 수소를 제외한 메탄, 황화수소, 황화카르보닐, 암모니아 가스가 제거되고 가스터빈으로 공급된다.

2.2 석탄 가스화 반응

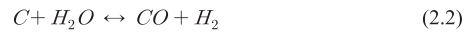
태안 IGCC 발전소 가스화기는 석탄과 순산소가 부분 연소하여 합성가스를 생성하는 가스화 반응 공정으로 운전된다. 합성가스 주요 성분은 일산화탄소와 수소이며 조성비율은 합성가스의 사용 목적에 따라서 다르다. 태안 IGCC 발전소 합성가스 조성은 일산화탄소 63.08 %, 수소 25.58 %, 이산화탄소 0.75 %, 수분 0.29 %, 아르곤 0.88 %⁽¹⁾이며 가스정제계통에서 메탄, 황화수소, 황화카르보닐, 암모니아 가스가 제거된다.

석탄의 가스화반응 과정은 일반적으로 열분해, 가스상 반응(Gas phase reaction) 그리고 숯-가스 반응(Char-

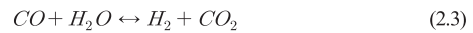
gas reaction)으로 나타낼 수 있다. 1차 가스를 발생하고 숯이 가열되면서 가스화반응을 일으켜 수소와 일산화탄소로 구성되는 2차 가스가 생성되며, 고온의 운전 상태에서는 모든 단계가 동시에 일어나게 된다.⁽²⁾ 이 과정은 식(2.1) 탄소와 산소의 가스화 반응, 식(2.2) 탄소와 수분의 수성가스 반응, 그리고 식(2.3) 일산화탄소와 수분의 수성 가스 전환반응식으로 나타낼 수 있다.⁽³⁾⁽⁴⁾



$$\Delta H : -111 \text{ MJ/kmol}$$



$$\Delta H : 131 \text{ MJ/kmol}$$



$$\Delta H : -41 \text{ MJ/kmol}$$

2.3 정격운전 조건

태안 IGCC 발전소 가스화기의 정격운전은 가스화기 운전 온도 1500 °C, 운전압력 4.2 MPa에서 설계탄 발열량 6,080 kcal/kg 기준으로 석탄 31.56 kg/s 및 산소 23.46 kg/s을 가스화기에 공급한다. 석탄과 산소의 가스화 반응으로 온도 250 °C, 압력 4.0 MPa의 합성가스를 가스화기에서 생산하고 가스정제계통을 거쳐 온도 47 °C, 압력 3.6 MPa, 그리고 유량 54.33 kg/s의 합성가스를 가스터빈 연료로 공급하게 된다.⁽¹⁾ 석탄과 산소의 공급량은 석탄의 성분 및 조성에 따라서 다르며 석탄의 공업 및 원소 분석결과를 반영한 탄종별 가스화기 운전지침서를 가스화기 공정사가 제공하고 있다. 본 시험에서 사용된 카보원(Carbo-One) 석탄의 최대 합성가스 생산량은 가스화기 산소부하 93 %에서 54.33 kg/s이며, 이때 석탄 공급량은 26.80 kg/s이고 산소 공급량은 21.90 kg/s이다.⁽⁵⁾

3. 합성가스 생산량에 영향을 주는 인자

3.1 석탄 공급량

합성가스 생산량에 영향을 미치는 주요한 운전 인자는 가스화기에 투입되는 석탄 공급량이다. 가스화기 운전 중 합성가스 생산량을 변경하는 일반적인 방법은 가스화기의

제어가 용이한 석탄 공급량을 조절하는 것이다. 가스화기 공정사가 제공한 탄종별 가스화기 운전지침서에는 가스화기 산소부하별 석탄 공급량, 산소 공급량 및 합성가스 생산량이 제시되어 있으며, 석탄 공급량 변경에 따른 합성가스 생산량을 예측할 수 있다. 산소 공급량은 석탄 공급량에 따라서 일정한 비율로 변경되므로 합성가스 생산량 변경에 독립변수로 작용하지 않는다. 태안 IGCC 발전소에서 사용하는 석탄은 해외에서 수입하여 저탄장에 저장 후 사용하며 가스화기 운전 중에는 석탄 종류 변경이 불가능하다. 석탄이 모두 소진될 때까지 석탄 종류를 변경하여 공급할 수 없고 합성가스 생산량 조절은 단지 석탄 공급량 조절로만 가능하다.

석탄은 종류에 따라서 열량, 성분, 조성 그리고 수분 함유량 등이 다르기 때문에 탄종을 변경한 경우, 동일한 수준의 합성가스를 생산하는데 필요한 석탄 공급량은 다르게 된다. 예를 들어 태안 IGCC 발전소 가스화기의 설계탄 발열량은 6,080 kcal/kg이며 가스화기 산소부하 100% 및 석탄 공급량 31.56 kg/s일 때 정격 합성가스 생산량 54.33 kg/s를 생산하며, 본 시험에서 사용한 카보원 석탄의 정격 합성가스 생산 조건은 고위발열량 6,347 kcal/kg에서 가스화기 산소부하 93% 및 석탄 공급량 26.80 kg/s 이다.

3.2 증기 주입량

가스화기의 증기 주입은 가스화 반응의 매개체로 작용하여 탄소 전환률 및 수소 생산을 향상시키며, (6) 가스화기의 노내 온도가 높은 조건에서는 증기 주입에 의한 가스화 반응이 더욱 좋아진다. (4) 증기 주입에 의한 가스화 반응은 식(2.2) 수성가스 반응 및 식(2.3) 수성가스 전화반응으로 산소와 반응하지 않은 탄소 성분과 반응하여 일산화탄소 및 수소 생산량을 증가시키며, 합성가스 생산량은 증기 주입량에 따라서 변화하게 된다. 증기에 의한 수성가스 반응은 흡열 반응으로 증기 주입량이 계속 증가하면 노내 온도는 점점 감소하면서 가스화반응 열평형에 도달 하게 되고 증기에 의한 가스화반응 속도는 점점 느려지게 되며, (7) 합성가스 생산량은 증가 하지 않고 감소하게 된다.

4. 합성가스 생산량 측정

4.1 실험 조건

본 실험에서는 가스화기 산소부하 80 % 및 90 %에서 석탄 공급량과 산소 공급량을 고정하고 합성가스 생산량이 일정한 운전조건에서 증기 주입량을 4단계로 조정하면서 합성가스 생산량 변화를 측정하였으며, 카보원 석탄의 가스화기 운전지침서의 가스화기 산소부하별 합성가스 생산량과 증기 주입량을 사용 하였다. (5) 카보원 석탄의 성상은 고위발열량 6,347 kcal/kg, 휘발분 34.54 %, 고정탄소 54.91 %, 회분 10.55 % 이며, 미분탄 입자크기는 90 μm 이하, 수분 함유량은 설계기준 2 wt% 이하를 유지하였다. 측정결과 자료는 운전원 제어실의 운전감시 시스템에서 취득한 값으로 사용하였으며, 측정용 계측기는 가스정제계통 후단에 합성가스 측정용 플로우 노즐(Flow nozzle) 유량계를 설치하고 50분간 측정한 1분마다 순시 값을 활용하였다.

4.2 증기 주입량 조정 방법

가스화기 증기 주입량은 카보원 석탄의 가스화기 운전지침서의 증기 주입량을 기준으로 4단계로 조정하였다. 증기 조건은 온도 300 $^{\circ}\text{C}$, 압력 5.5 MPa 이며 가스화기에서 생산된 중압 증기를 인출하여 공급하였다. 증기 주입량 조정은 운전원 제어실의 운전감시 시스템에서 변경하였으며, 증기 주입량은 석탄버너 입구측에 설치된 차압식 오리피스를 이용한 자동측정기로 측정된 자료를 이용하였다. 가스화기 산소부하 80 %에서 석탄버너 당 증기 주입량 조정은 0 kg/s, 0.14 kg/s, 0.21 kg/s 그리고 0.28 kg/s로 진행 하였고, 가스화기 산소부하 90 %에서 석탄버너 당 증기 주입량은 0 kg/s, 0.15 kg/s, 0.21 kg/s 및 0.32 kg/s로 변경하였다. 합성가스 생산량 자료취득의 정확성을 확보하기 위해서 합성가스 생산량이 일정한 상태에 도달한 후 증기 주입량을 변경하였고, 약 30분간의 안정 기간을 거친 후 50분 동안 가스화기를 운전하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 증기 주입량에 따른 합성가스 생산량 변화

5.1.1 가스화기 산소부하가 80%인 경우

Fig. 5-1는 실험조건에서 가스화기를 산소부하 80 %에서 운전하는 동안 석탄버너 당 증기 주입량을 0 kg/s, 0.14 kg/s, 0.21 kg/s 그리고 0.28 kg/s로 변경하였을 때,

IGCC 발전용 가스화기에서 증기 주입량이 합성가스 생산량에 미치는 영향

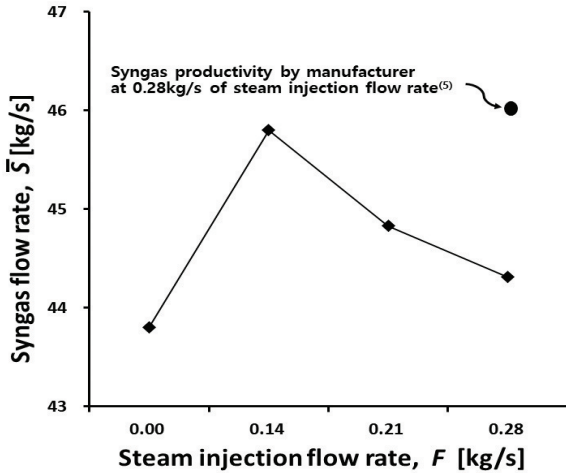


Fig. 5-1 Change of syngas flow rate with the steam injection flow rate at 80% of gasifier oxygen load

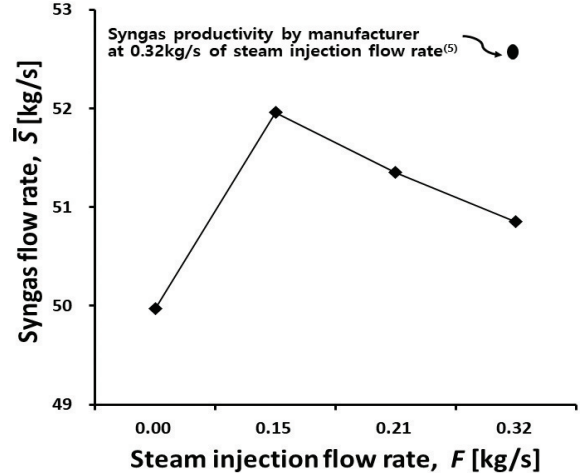


Fig. 5-2 Change of syngas flow rate with the steam injection flow rate at 90% of gasifier oxygen load

50분 동안 매 1분마다 측정된 순시 값의 50분 평균값인 합성가스 평균 생산량[kg/s]을 나타낸 것이다. 증기 주입량 0 kg/s, 0.14 kg/s, 0.21 kg/s 그리고 0.28 kg/s에서 합성가스 평균 생산량[kg/s]은 43.78 kg/s, 45.65 kg/s, 44.79 kg/s 및 44.28 kg/s 이며, 최대 합성가스 평균 생산량[kg/s]은 증기 주입량 0.14 kg/s에서 측정되었다. 최대 합성가스 평균 생산량[kg/s]은 증기 주입량 0 kg/s에서 측정된 합성가스 평균 생산량[kg/s]에 비해 4.27 % 증가하였다. 합성가스 생산량 변화는 증기 주입량 0.14 kg/s를 변곡점으로 하여 합성가스 생산량이 다시 감소하기 시작하였으며, 가스화기 운전지침서의 증기 주입량 0.28 kg/s에서 측정된 합성가스 평균 생산량[kg/s]은 44.28 kg/s로 가스화기 공정사가 제시한 합성가스 생산량 46.10 kg/s보다 3.95 % 작았다.

그리고 측정된 최대 합성가스 평균 생산량[kg/s]도 가스화기 공정사가 제시한 합성가스 생산량에 다소 미치지 못하는 것을 알 수 있다. 이때 증기 주입량은 가스화기 공정사가 제시한 0.28 kg/s의 50 % 이하였다.

5.1.2 가스화기 산소부하가 90%인 경우

Fig. 5-2는 실험조건에서 가스화기를 산소부하 90 %에서 운전하는 동안 석탄버너 당 증기 주입량을 0 kg/s, 0.15 kg/s, 0.21 kg/s 그리고 0.32 kg/s로 변경하였을 때, 50분 동안 매 1분마다 측정된 순시 값의 50분 평균값인 합

성가스 평균 생산량[kg/s]를 나타낸 것이다. 증기 주입량 0 kg/s, 0.15 kg/s, 0.21 kg/s 그리고 0.32 kg/s에서 합성가스 평균 생산량[kg/s]은 49.97 kg/s, 51.97 kg/s, 51.26 kg/s 그리고 50.65 kg/s 이며, 최대 합성가스 평균 생산량[kg/s]은 증기 주입량 0.15 kg/s에서 측정되었다. 최대 합성가스 평균 생산량[kg/s]은 증기 주입량 0 kg/s에서 측정된 합성가스 평균 생산량[kg/s]에 비해 4.0 % 증가하였다. 합성가스 생산량 변화는 증기 주입량 0.15 kg/s를 변곡점으로 하여 합성가스 생산량이 다시 감소하기 시작하였으며, 가스화기 운전지침서의 증기 주입량 0.32 kg/s에서 측정된 합성가스 평균 생산량[kg/s]은 50.65 kg/s로 가스화기 공정사가 제시한 합성가스 생산량 52.54 kg/s보다 3.6 % 작았다.

또한 측정된 최대 합성가스 평균 생산량[kg/s]도 가스화기 공정사가 제시한 합성가스 생산량에 다소 미치지 못하는 것을 알 수 있다. 이때 증기 주입량은 가스화기 공정사가 제시한 0.32 kg/s의 50 % 이하였다.

5.2 증기 주입량과 합성가스 생산량에 관한 고찰

본 연구에서 가스화기 산소부하가 일정하고 석탄 공급량을 고정한 상태에서 증기 주입량을 증가시키면 증기에 의한 추가 가스화 반응으로 합성가스 생산량이 증가할 것으로 예상하고 실험을 수행하였다. Fig 5-1 및 5-2와 같이

가스화기 공정사가 제시한 합성가스 생산량은 가스화기 산소부하 80 % 및 90 %에서 증기 주입량이 0.28 kg/s 및 0.32 kg/s 일 때, 46.10 kg/s, 52.54 kg/s 이다. 실험 결과를 바탕으로 최대 합성가스 평균 생산량[kg/s]는 가스화기 산소부하 80 % 및 90 %에서 증기 주입량이 0.14 kg/s 및 0.15 kg/s 일 때 45.65 kg/s, 51.97 kg/s 이며, 공정사가 제시한 합성가스 생산량에는 다소 미치지 못함을 알 수 있다.

증기 주입량에 따른 합성가스 생산량 변화는 증기 주입량 증가시 합성가스 생산량도 함께 증가하다가 증기 주입량이 0.14 kg/s 및 0.15 kg/s 이상에서는 더 이상 증가하지 않고 감소하고 있다. 합성가스 생산량이 증가하는 증기 주입량 약 0.14 kg/s 까지는 증기 주입에 의한 수성가스 반응으로 일산화탄소와 수소 생산량이 증가하게 되고, 고온의 운전상태 조건에서는 증기 주입에 의한 수성가스 전산화반응도 동시에 일어나게 되어 합성가스 생산량이 증가하게 된다.

합성가스 생산량이 다시 감소하는 가스화기 증기 주입량 약 0.14 kg/s를 초과 하는 경우, 수성가스 반응이 흡열반응으로 천천히 노내 온도를 감소시키면서 적정 이상의 증기 주입에서는 열평형에 의해 수성가스 반응이 느려지게 된다.(3)(6) 이때 탄소와 반응하지 않은 증기는 잠열을 포함한 상태로 합성가스와 함께 가스화기 출구로 이송되며, 합성가스에 포함된 수분은 후단 가스정제설비에서 제거되고 합성가스 생산량은 감소한 것으로 분석된다.

6. 결론

본 연구에서 정격 합성가스 생산량이 54.33 kg/s인 태안 IGCC 발전소 가스화기를 대상으로 가스화기 운영기술 확보의 일환으로 합성가스 생산량이 일정한 가스화기 산소부하 80 % 및 90 % 운전조건에서 석탄 공급량을 고정하고 증기 주입량을 변경하면서 합성가스 생산량 변화를 측정하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 증기 주입량 변경으로 증기에 의한 추가 가스화 반응으로 합성가스 생산량이 증가함을 확인하였다. 가스화기 운전 중 추가 석탄 공급 없이 증기 주입만으로 합성가스 생산량을 증가 시키는 것은 운영비용과 발전소 효율 측면에서 유리하다고 판단된다.

2. 증기 주입량 증가와 함께 합성가스 생산량은 증가하다가 적정 증기 주입량 이상에서는 수성가스 반응 열평형에 의해 다시 감소하였고, 석탄의 성분 및 조성에 따라서 가스화기의 산소부하별 합성가스 생산량이 다른 특성을 가지고 있는 것으로 사료되는 바, 실험에서 사용한 카보원 석탄을 사용하는 가스화기는 산소부하 80% ~ 90 %에서 운전시 석탄 버너 당 증기 주입량을 약 0.14 kg/s 에서 운전하는 것이 추천된다.

참고문헌

- (1) KOWEPO Co., Ltd., 2010, Overall design, manufacture and construction technology development of Korean 300MW Class IGCC demonstration plant, KOWEPO Co., Ltd., pp. 1~8, 35~39, 123~150.
- (2) Chih-Jung Chen, 2012, Numerical investigation on performance of coal gasification under various injection patterns in an entrained flow gasifier, Applied Energy 100, pp. 218~228.
- (3) Christopher Higman, 2008, Gasification, Gulf Professional Publishing, pp. 20~27, 33~43.
- (4) F.Kiso, 2011, A simulation study on the enhancement of the shift reaction by water injection into a gasifier, Energy 36, pp. 4032~4040.
- (5) Shell, 2016, Normal operation target setting table for Carbo-One coal, Shell, pp 1.
- (6) Youngsan Ju, 2017, Evaluation of the energy efficiency of the shell coal gasification process by coal type, Energy Conversion and Management 143, pp. 123~136.
- (7) Gunng Oh, 2018, Gasification of coal water mixture in an entrained flow gasifier: Effect of air and oxygen mixing ratio, Applied Thermal Engineering 129, pp. 657~664. 