

## 실험계획법 및 공정모사를 이용한 석탄가스화기 냉가스효율 최적화 연구

주지선\*, 서혜경, 이중원, 김기태  
한국전력공사 전력연구원  
(jsju@kepri.re.kr\*)

### A Optimization Study on the Cold Gas Efficiency of Coal gasifier by Design of Experiments and Process Modeling

Jisun Ju\*, Haikyung Seo, Joungwon Lee, Kitae Kim  
Korean Electric Power Research Institute  
(jsju@kepri.re.kr\*)

#### 서론

전 세계적으로 화석에너지의 고갈에 따른 석탄의 활용 필요성, 지구환경보호, CO<sub>2</sub> 저감, 수소발생원의 필요, 신재생에너지원의 확보의 차원에서 차세대 청정석탄 이용기술의 개발이 요구되고 있다. 석탄가스화복합발전(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)은 석탄을 고온, 고압의 조건에서 가스화시켜 일산화탄소(CO), 수소(H<sub>2</sub>)가 주성분인 합성가스를 제조하여 가스터빈 및 증기터빈을 구동하는 친환경 차세대 발전기술이다. IGCC플랜트는 가스화설비, 가스터빈, 스팀터빈, 산소플랜트로 구성되는데 이 중에서 가스화설비에서의 가스화 효율은 석탄을 얼마나 가스터빈에서 사용 가능한 유용한 합성가스로 전환하는가를 나타내는 것으로서 IGCC 발전효율에 가장 큰 영향을 미치는 중요한 요소이다<sup>[1]</sup>. 본 연구는 공정모사 및 실험계획법을 이용하여 석탄가스화 복합발전(IGCC)플랜트의 한 종류인 건식 분류층 가스화기를 대상으로 가스화효율을 나타내는 지표의 하나인 냉가스효율을 최대화 시킬 수 있는 방법론을 개발하여 IGCC플랜트 Engineering 역량 강화 및 실제 플랜트 건설/운전시 효율 향상에 기여하고자 하는 목적으로 수행하였다.

#### 이론

IGCC 발전은 석탄사용량은 줄이고 발전효율은 향상시킬 수 있는 가스화기의 운전조건 도출이 요구된다. 이러한 가스화기의 효율을 향상시키기 위해서는 열량을 가진 가스성분인 H<sub>2</sub>, CO 가 많이 생성되는 조건으로 운전하는 것이 필요하다. 따라서 일반적으로 이러한 특성을 대표하는 냉가스효율(Cold gas efficiency, CGE)을 이용하여 가스화기효율의 나타낼 수 있다([그림 1] 및 (식 1) 참조).



그림 1. 가스화기의 유입물 및 생성물

$$\text{냉가스효율} = \frac{\text{합성가스 (H}_2\text{+CO+CH}_4\text{)에 포함된 열량}}{\text{투입된 석탄의 발열량}} \quad (\text{식1})$$

## 실험

### 1. 가상플랜트 구성

연구대상 공정은 Shell사의 분류층 석탄공정을 대상으로 하였다. 현재 국내에는 Shell사의 IGCC플랜트를 연구하는 단계이고 설치된 상용화 석탄가스화기가 없으므로 모델링을 통하여 가상플랜트를 구성하여 연구를 진행하였다. 가상플랜트는 하니웰에서 개발한 화학공정모사기인 Unisim Design R390의 Coal gasification 모델을 이용하여 구성하였다. 모델링을 통한 계산값은 외국의 Shell 가스화기 실험결과와 비교하여 계산의 신뢰성을 확인하였다.

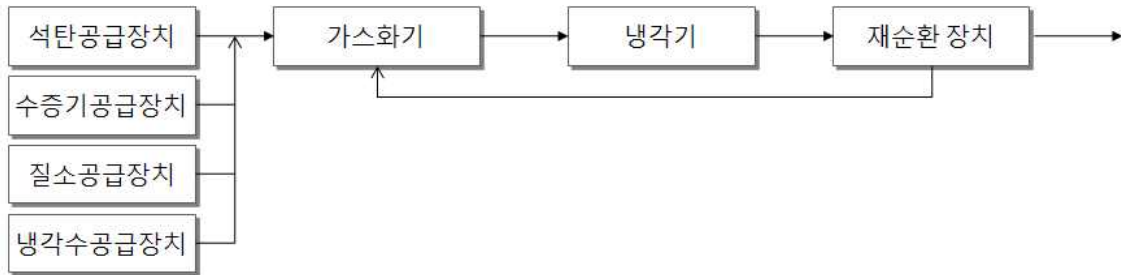


그림 2. 가스화기의 Flow Diagram

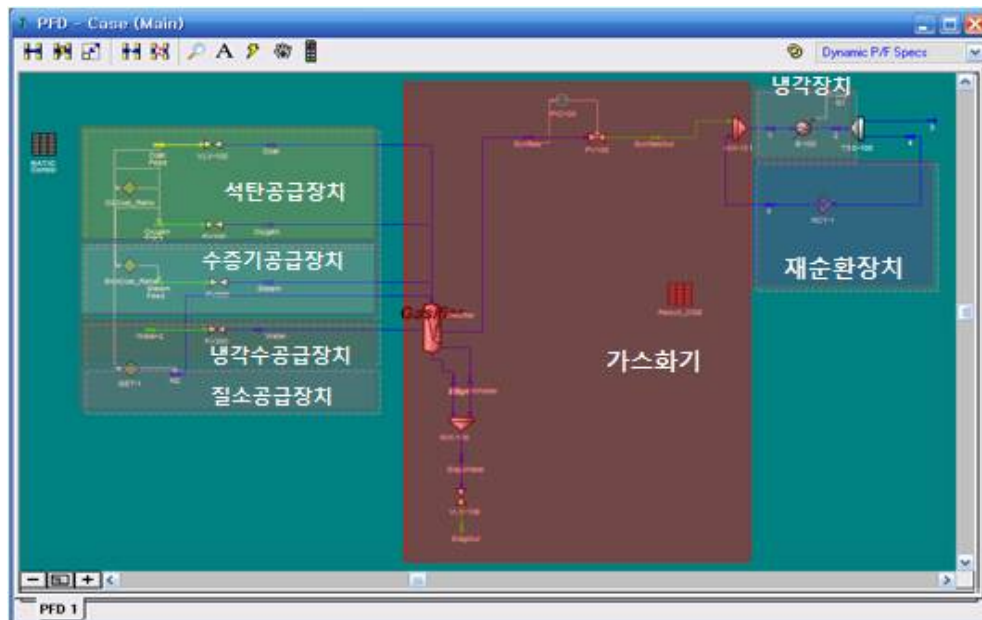


그림 3. 가상플랜트의 구성

### 2. 실험계획법

실제 가스화기의 운전시 조절이 가능한 운전 변수는 합성가스순환율(%), 냉각수량, 산소투입량, 수증기투입량이다. 이러한 운전변수중에서 냉가스효율에 영향을 줄 수 있는 핵심인자를 도출하기 위하여 실험계획을 수립하고 상관관계 분석을 실시하였다. 실험계획은 4개 요인의 부분배치법을 사용하였으며 [표 1]에 인자 및 수준의 값을 나타내었다. [표 1]에서 산소석탄비는 가스화기에서의 산소투입량과 관계된 요인으로 산소투입량(kg)을 석탄투입량(kg)으로 나눈 값이다. 수증기석탄비도 같은 방법으로 정의하였다.

실험계획의 작성 및 분석은 통계분석프로그램의 하나인 미니탭을 이용하였다.

표 1. 핵심인자 선정을 위한 실험계획

실험 수준	실험요인(n=4), 실험수: 2 <sup>4-1</sup> =8(부분배치)			
	합성가스순환율(%)	냉각수량(kg/h)	산소석탄비	수증기석탄비
		투입냉각수 무게	산소투입량(kg) / 석탄투입량(kg)	수증기투입량(kg) / 석탄투입량(kg)
	A	B	C	D
1	50	255	0.6	0.01
-1	70	355	0.9	0.3

토론

1. 핵심인자 선정

요인배치법을 이용한 실험계획을 수립하고 실험을 수행한후 상관관계를 분석한 결과를 [그림 4] 및 [그림 5]에 나타내었다. [그림 4]에서 보면 산소석탄비가 냉가스효율에 크게 영향을 미침을 알 수 있다. 수증기석탄비도 냉가스효율에 어느 정도 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 냉각수량 및 합성가스순환율은 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

정량적으로 살펴보기 위하여 상관관계를 분석한 결과 유의수준 0.05에서 냉가스효율에 영향을 미치는 인자는 산소석탄비, 수증기석탄비로 나타났다. 냉가스효율을 산소석탄비 및 수증기석탄비를 이용하여 관계식을 나타내었을 경우 R-제곱은 99.98%, R-제곱(수정)은 99.97% 로 매우 상관관계가 높음을 알 수 있었다.

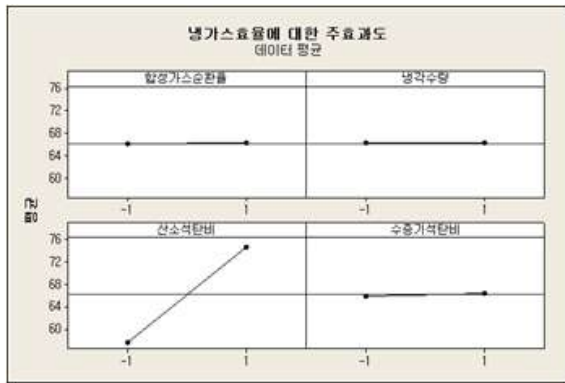


그림 4. 냉가스효율에 대한 주효과도

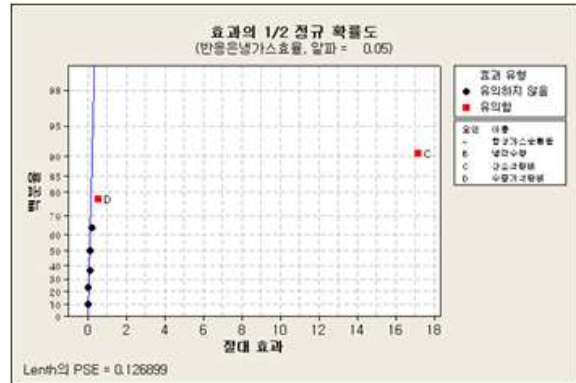


그림 5. 효과의 정규확률도

2. 최적화 실험 및 결과

핵심인자에 따른 냉가스효율의 최적값을 도출하기 위하여 중심합성계획법을 이용한 실험계획을 수립하고 최적화실험을 진행하였다. 최적화를 위한 실험계획 및 결과를 [표 2] 및 [표 3]에 나타내었다.

표 2. 최적화를 위한 실험계획

수준	실험요인		실험수(회)	비고
	산소석탄비	수증기석탄비		
-1	0.6	0.1	총 13 회	$\alpha = 1.414$
1	0.8	0.4		

표 3. 최적화 실험계획표 및 실험결과

표준 순서	A	B	H2	CO	냉가스효율
1	-1	-1	0.046546	0.827914	64.7016
2	1	-1	0.023472	0.838719	75.1354
3	-1	1	0.044375	0.588461	65.1356
4	1	1	0.020709	0.720102	75.1387
5	-1.414	0	0.049117	0.621313	56.5248
6	1.414	0	0.017019	0.735593	70.2597
7	0	-1.414	0.036596	0.942778	78.4412
8	0	1.414	0.035517	0.713445	83.6292
9	0	0	0.038754	0.818148	83.7000
10	0	0	0.038754	0.818156	83.7186
11	0	0	0.038755	0.818164	83.7279
12	0	0	0.038755	0.818173	83.7372
13	0	0	0.038756	0.818181	83.7465

최적화실험 결과를 이용하여 반응표면 분석을 통한 표면도 및 등고선도를 [그림 4] 및 [그림 5]에 나타내었다. 그림에서 보면 산소석탄비의 수준이 0~0.5, 수증기 석탄비의 수준이 -0.25~0.5의 범위에서 냉가스효율이 최대로 되는 점이 존재함을 알 수 있다.

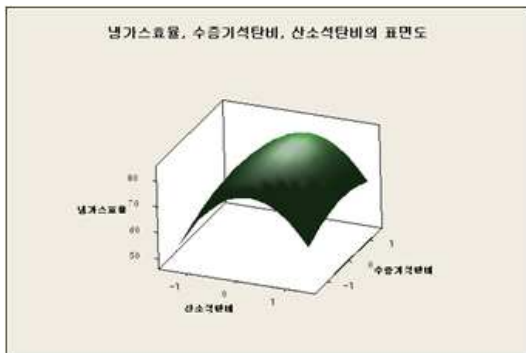


그림 4. 표면도

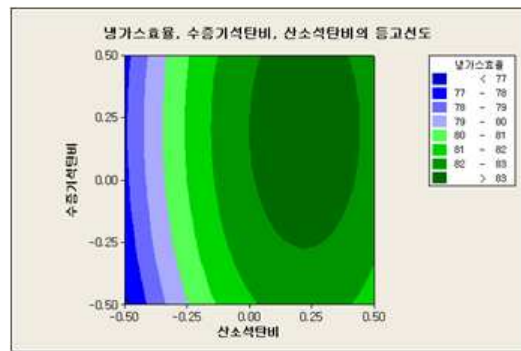


그림 5. 등고선도

이러한 결과를 토대로 반응표면 회귀분석 결과 냉가스효율의 수학적 모형을 다음과 같이 도출할 수 있었다.

$$\text{냉가스효율(\%)} = 83.726 + 4.98265 * \text{산소석탄비} + 0.971764 * \text{수증기석탄비} - 10.7134 * \text{산소석탄비}^2 - 1.89189 * \text{수증기석탄비}^2 \quad (\text{식2})$$

### 결론

회귀분석 결과를 이용한 최적화 결과 본 연구에서 대상으로한 공정의 최대 냉가스효율은 84.43%로 실제 운전치인 81.06%보다 높게 나타날 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 실제적으로는 회분의 용융을 위하여 가스화기내의 온도를 회분의 용융온도 이상으로 유지해야 하기 때문에 냉가스효율을 최대로 하는 조건으로 운전하기에는 어려움이 있을 수 있다. 따라서 가스화 효율향상을 위해서는 가스화기를 여러 단으로 분리하여 냉가스효율을 향상시키는 등의 방법에 대한 연구가 향후 수행될 필요성이 있다고 판단된다.

### 참고문헌

1. 전력연구원, '한국형 300MW급 IGCC 실증플랜트를 위한 가스화공정 Test bed 및 실증 플랜트 개발' 1단계 보고서, 2010