

중급 규모 가스화 복합발전 플랜트의 NO_x 저감 방식이 성능 및 환경특성에 미치는 영향에 관한 평가 연구

이 찬 · 서제영

수원대학교 기계공학과, 환경정정기술연구센터

Evaluation Study on the Effects of NO_x Reduction Techniques on the Performance and the Emission Characteristics of Medium Size Gasification Combined Cycle Plant

Chan Lee and Je Young Seo

Department of Mechanical Engineering, University of Suwon
Center for Environmental and Clean Technology

요 약

중급 규모의 가스화 복합발전 플랜트의 공정설계와 성능 평가를 수행하였다. 설계된 플랜트 공정을 바탕으로, 가스터빈 연소기에 비포화 또는 포화된 질소를 분사시키거나 가스연료를 포화시키는 여러 가지 NO_x 저감 기술들을 시도하여, NO_x 저감 기법이 NO_x 배출량에 미치는 영향과 플랜트의 출력, 효율 및 안정성에 미치는 영향을 동시에 검토하였다. 가스 연료의 포화보다는 질소의 분사를 통한 NO_x 저감효과가 더욱 현저하며, 질소분사 시 포화된 질소를 사용하는 경우 NO_x 저감 효과는 더욱 향상되었다. 또한 NO_x 저감 기법의 적용은 NO_x 배출량의 감소와 더불어 플랜트의 출력 및 효율 향상도 수반하나, 가스터빈의 불안정한 운전을 초래할 수도 있었다.

Abstract — Process design and performance evaluation were made for medium-size gasification combined/cogeneration plant. Based on the designed plant process configuration, the effects of NO_x reduction techniques on the NO_x emission, the power output, the efficiency and the stability of plant are investigated by applying various NO_x reduction methods such as unsaturated/saturated nitrogen injection and fuel saturation of gas turbine combustor. The NO_x reduction by nitrogen injection is more remarkable than that by fuel saturation, and its effect can be more enhanced by using saturated nitrogen. In addition, the applications of NO_x reduction techniques accompany the improvement of plant power output and efficiency with the decrease of NO_x emission, while it can cause unstable gas turbine operation.

1. 서 론

고체연료의 가스화 기술은 화학공학 분야에서는 매우 오랜 역사를 가지고 발전되어 왔으며, 최근 들어서는 이러한 가스화 기술을 에너지 시스템에 응용하고자 하는 연구개발 노력들이 시도되고 있다. 그 한 예로 석탄 가스화 복합발전 플랜트(IGCC : Integrated Gasification Combined Cycle)를 들 수 있으며, Fig. 1에서 보여지듯이, 석탄가스화 복합발전은 석탄이라는 고체연료를 가스화하여 만들어진 가스연료를 정제하여, 가스터빈 연소기

의 연료로 사용하여 복합사이클을 구동하는 방식을 채택하고 있다. 이러한 발전방식은 기존의 석탄을 직접연소하여 동력을 생산하는 보일러 방식에 비해 더 많은 출력과 높은 효율을 가지며, 환경배출 성능도 비교적 우수한 것으로 알려지고 있다^{[1][2]}. 이러한 이유로, 미국, 유럽 및 일본과 같은 기술 선진국들은 석탄가스화 복합발전 플랜트의 개발에 많은 투자와 노력을 기울였으며, 머지 않은 장래에 석탄가스화 복합발전 플랜트의 실용화가 이루어질 것으로 기대된다.

가스화 기술을 이용한 에너지 시스템의 또 다른 예는

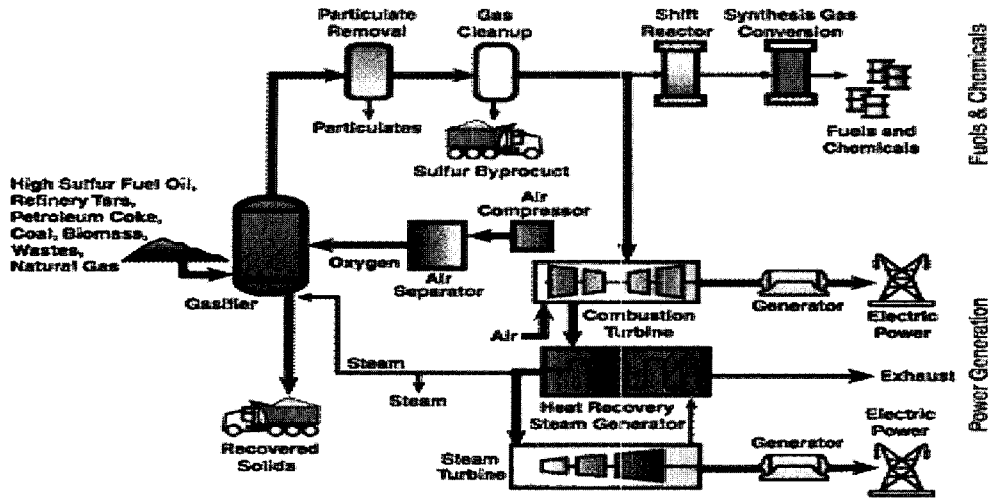


Fig. 1. Process flow of coal integrated gasification combined cycle.

정유공장에서 발생하는 중잔사유(heavy residue oil)를 가스화하여, 정유공장에서 필요한 수소를 추출하고 동시에 전력과 증기를 생산하는 열병합/복합사이클을 구동하는 경우를 들 수 있다. 이러한 중잔사유 가스화 열병합/복합발전 플랜트는 정유공장의 중잔사유를 활용하는 대체 에너지 시스템으로서 선진 정유사들에 의해 크게 각광을 받고 있으며, 이러한 기술을 이용한 단위 정유공장 당 전력 생산량이 수백 MW 규모에 이를 정도로 매우 활용가치가 높다 하겠다^{[5][6]}.

또한 최근 들어서는 단위 산업체 나 지역에서 발생하는 고체상태의 산업 폐기물 및 부산물, biomass, oil sand, black liquor 등의 가연성 물질을 가스화하여 중소형 열병합 설비의 가스 연료로 사용하고자 하는 시도도 이루어지고 있다^{[5][6]}. 이러한 중소형 가스화 에너지 시스템들은 주로 전기 및 열 에너지를 단위 사업장이나 지역사회에 공급하는데 주된 목적이 있으며, 최근 들어 전세계적으로 부각되고 있는 분산형 에너지 정책과 더불어 그 중요성이 더욱 집중하고 있다.

앞서 언급한 바와 같이, 고체연료의 가스화 기술을 이용한 에너지 시스템은 대부분이 가스터빈과 증기사이클이 결합된 복합발전/열병합 계통의 구성이 주로 고려된다(Fig. 2 참조). 그리고 최근의 연구 동향은 가스화 에너지시스템의 성능 향상과 더불어 가스터빈에서 가스 연료를 태우며 발생하는 NO_x의 저감에 많은 노력이 기울여지고 있다. 이를 위해 많은 연구 프로그램들이 여러 가지 NO_x 제어 방식들을 가스화 플랜트에 적용하고 있으며, 궁극적으로는 수십 ppm 수준의 NO_x 발생량을 유지시키는 것을 연구 목표로 잡고 있다.

본 연구에서는 가스화 열병합 및 복합시스템의 공정

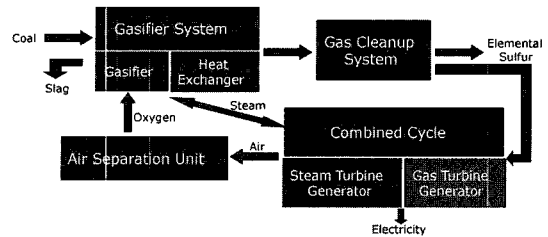


Fig. 2. Typical configuration of gasification based plant.

설계 및 성능 평가에 공통적으로 적용 가능한 공정 모사기술을 개발하고, 개발된 모사기술을 석탄가스화복합발전 플랜트의 상용화 전 단계로 고려될 수 있는 10 MW 중급 규모의 PDU(Process Development Unit) 플랜트에 적용하였다. 가스화 플랜트의 NO_x 저감 방식으로는, 우선적으로 가스터빈과 공기분리장치(ASU : Air Separation Unit)간의 연계 설계를 적용하였고, 공기분리장치에서 분리되는 질소를 가스터빈 연소기에 분사하는 방식을 고려하였다. 또한 석탄가스 연료 와 분사되는 질소를 포화시켜 NO_x 저감을 시도하는 방법도 고려하였다. 이러한 다양한 NO_x 저감 방식을 가지는 플랜트들의 성능 및 NO_x 배출 특성을 평가, 비교함으로써, 가스화 플랜트의 적절한 NO_x 저감 방식 선정에 필요한 기술적 평가 자료 및 기초를 제공하고자 한다.

2. 공정설계

본 연구에서 고려한 중급 규모의 가스화 복합발전 플랜트는 전력 발생량이 약 10 MW 규모이며, 이를 위해

Table 1. Clean coal gas condition for gas turbine fuel.

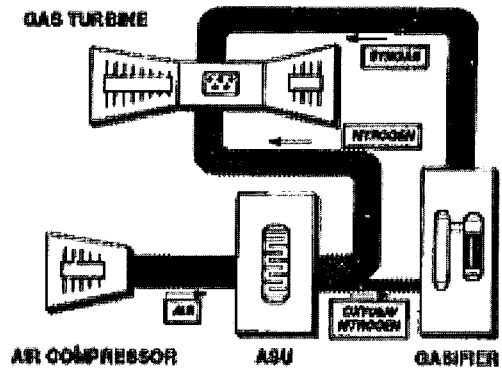
Comp. (%)	Unsaturated	Saturated
CO	64.53	58.95
H ₂	30.23	27.62
CO ₂	0.19	0.17
H ₂ O	0.42	9.03
CH ₄	0.23	0.21
N ₂	3.77	3.44
Ar	0.63	0.58
Flow (kg/s)	1.985	2.153
Pressure (bar)	22.3	20.7
Temp. (°C)	372.7	372.7
LHV (kJ/kg)	13264.0	12697.0

서 석탄의 경우 일일 소모량이 100 ton인 것으로 가정 하였다. 또한 가스화 플랜트의 구성을 위해서, 그에 상응하는 가스화/가스정제 공정 및 가스터빈을 선정하였고, 증기사이클 공정을 설계하였다.

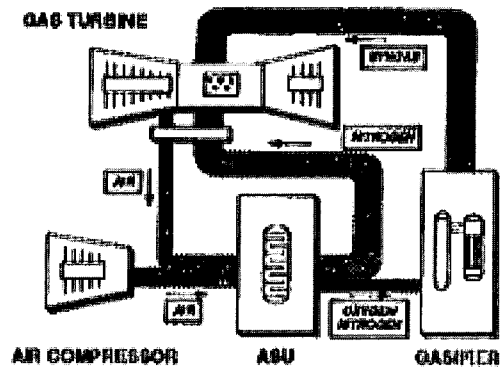
가스화 공정으로는 건식 Shell 가스화기를, 가스정제 공정으로는 산성가스 제거 및 황성분 분리를 위해 MDEA/Claus/SCOT 결합공정을 채택하였다. 이러한 가스화 및 가스정제 공정을 거친 가스 연료에 대한 조성, 온도, 압력 등의 모사결과가 Table 1에 나타나 있으며, 가스연료를 포화시킨 경우와 그렇지 않은 경우의 조건들이 Table 1에 표시되어 있다. 가스화/가스정제 공정의 모사방법은 ASPEN/Plus 코드를 이용하였다^[7].

다음 단계로, 약 10 MW 급 규모의 가스화 플랜트에 적합한 용량과 고효율을 가지는 가스터빈 모델을 선정 하였다. 가스터빈 제작사별 기술 자료들을 참조하여 검토한 결과 최종적으로 Solar Turbine 사의 Taurus 70 모델이 선정되었고, 이 모델은 압축비가 16이고 높은 터빈입구온도(1097.8°C)를 보여준다^[8]. 가스터빈의 성능해석을 위해서는 GateCycle 코드의 기본 요소 모델들을 사용하였다^[9]. 그러나, 본 연구는 이외에도 압축기 및 터빈의 탈설계점 효과를 고려할 수 있는 압축기 성능 곡선 및 터빈 질식 조건에 대한 모델들을 추가하였고^[10], 연소기 모델링시에는 NO_x 예측을 위한 모델^[11]과 연소기 비화(blow-out) 현상에 대한 예측모델^[12]도 첨가하였다.

IGCC용 가스터빈의 주요한 특징중의 하나는, Fig. 3에서 보여지는 바와 같이, NO_x 저감을 위해 공기분리장치와의 연계된다는 점이다. 즉, 공기분리장치에 가스터빈 압축기로부터 공기가 공급되어 산소와 질소로 분리된 후, 산소는 가스화기 산화제로 질소는 가스터빈 연소기에 분사되어 NO_x 저감을 위한 회색제로 사용된다. 이때 공기분리장치에 필요한 공기의 양은 가스화 과정의 산소 요구량에 따라 결정되며, 공기분리장치에 필요한 공



(a) Nitrogen integration



(b) Air/nitrogen integration

Fig. 3. ASU integration with gas turbine.

기는 가스터빈 압축기와 별도의 공기 압축기에 의해 공급된다^[2]. 그러므로, 본 연구는 공기분리장치 연계설계조건이 NO_x 저감에 어떤 영향을 미치는지를 알아보기 위해, 가스터빈에서 추출되는 공기 와 공기분리장치에서 가스터빈으로 재 유입되는 질소를 고려할 수 있도록 가스터빈 해석 모델을 구성하였고, 동시에 공기분리장치와의 연계설계조건도 변화시켜 보았다.

가스터빈의 배기가스 폐열을 이용하는 증기 사이클로는 7기압의 증기를 생산하는 단일 압력(single pressure) 사이클을 고려하였다.

폐열회수장치의 배열은 배기가스의 흐름 방향에 따라 과열기-증발기-절탄기의 순으로 열교환기를 구성하였다. 발생된 증기는 증기터빈-복수기-탈기-펌프를 거치며 재순환되게 된다. Fig. 4는 본 연구에서 고려하고 있는 가스화 복합발전 계통의 공정흐름을 보여주고 있다.

3. 모사결과 및 비교

앞서 언급한 가스화 플랜트의 공정을 근간으로, Table

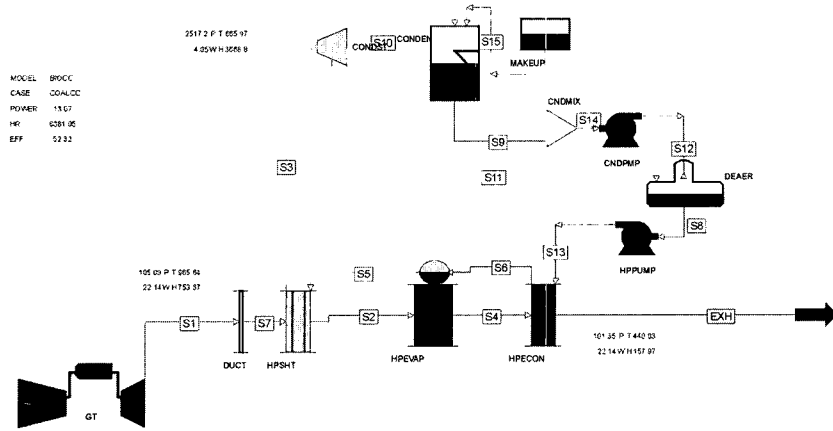


Fig. 4. Simulation model of gasification combined cycle.

2와 같이 다양한 NO_x 제어방식들을 시도하였다. 가스 연료는 포화 또는 불포화 상태를 고려하였고, 공기연계(air integration)조건은 공기분리장치의 필요 공기량 중 가스 터빈으로부터 추출, 공급받는 양의 비율로 정의되는 공기 추출비를 0에서 100%까지 변화시켜 보았다. 공기 추출비(air extraction ratio)가 20%라 함은 공기분리장치에서 필요한 공기의 20%를 가스터빈 압축기로부터, 나머지 80%는 별도의 공기압축기로부터 공급받음을 의미한다. 또한 질소연계(nitrogen integration)는 공기분리장치에서 분리된 질소를 가스터빈 연소기에 분사해 주는 것을 의미한다.

Table 2에서 볼 수 있듯이, 연료/질소의 포화, 공기 및 질소 연계 방식의 조합에 따라 총 10개의 설계 경우들을 고려할 수 있었고, 이에 대한 공정 모사를 각각 수행하였다.

Table 2. Design cases with different NO_x reduction schemes.

Case	Fuel type (sat/unsat)	Air integ. (extraction ratio)	N ₂ integ. (sat/unsat)
Base	NG	No	No
PDU#1	CG (unsat)	No	No
PDU#2	CG (unsat)	Yes (100%)	No
PDU#3	CG (unsat)	No	Yes (unsat)
PDU#4	CG (unsat)	Yes (20%)	Yes (unsat)
PDU#5	CG (unsat)	Yes (40%)	Yes (unsat)
PDU#6	CG (unsat)	Yes (60%)	Yes (unsat)
PDU#7	CG (unsat)	Yes (80%)	Yes (unsat)
PDU#8	CG (unsat)	Yes (100%)	Yes (unsat)
PDU#9	CG (sat)	Yes (100%)	Yes (unsat)
PDU#10	CG (sat)	Yes (100%)	Yes (sat)

Note) 1. CG: coal gas, NG: natural gas.
2. sat: saturated, unsat: unsaturated.

Table 2에서 보여지듯이, PDU#1과 PDU#2는 가스화 복합플랜트에 질소 분사나 연료 포화 같은 NO_x 저감방법을 전혀 채택하지 않은 상태에서 공기 연계만에 의한 NO_x 저감효과를 비교하기 위한 경우들이다. PDU#3는 공기연계는 되어있지 않지만 공기분리장치에서 발생하는 질소를 이용하여 NO_x 저감을 시도하는 경우이다. 그리고, PDU#4에서 PDU#8까지는 포화시키지 않은 석탄 가스를 사용하며, 서로 다른 공기연계조건하에서 질소를 분사하는 경우들을 보여준다. 마지막으로 PDU#9와 PDU#10은 100% 공기연계 조건에서, 연료와 질소를 포화시켜 추가적으로 NO_x 저감효과를 얼마나 얻을 수 있는지를 보기 위한 경우들이다. 참고로, 석탄을 이용하는 가스화 플랜트의 성능 및 NO_x 배출 특성들을 비교하기 위해, base case로 천연가스를 사용하고 동일한 공정 구성을 가지는 복합발전사이클을 고려하였다.

Fig. 5는 각 경우들에 대한 가스터빈, 증기터빈 출력, 공기분리장치 소요 동력 및 전체 플랜트 출력을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 전반적으로 가스화 플랜트의 가스터빈 출력은 천연가스의 경우(base case)에 비해 증가됨을 알 수 있었고, 공기 추출비의 감소와 질소 회석 및 연료 포화로 인해 출력이 더욱 증가됨을 볼 수 있다¹¹⁰⁾¹¹³⁾. 또한 증기터빈 출력은 가스터빈 출력의 약 1/3 수준으로 유지되고 있으며, 공기분리장치 소요동력은 공기 추출비의 증가에 따라 감소됨을 알 수 있다. 그리고, 전체 사이클 출력은 공기 또는 질소 연계가 적용된 경우에는 거의 대부분 10~11 MW 정도를 유지하며, 연료포화가 출력에 미치는 영향도 약 1 MW 정도인 것으로 판단된다.

Fig. 6는 각 경우들에 대한 가스터빈 및 전체 플랜트 효율을 보여주고 있다. 가스터빈 효율은 공기 추출비의 증가에 따라 저하되는 경향을 보인다. 이러한 현상은 가스터빈 내부를 통과하는 공기유량의 감소에 기인한다¹¹⁴⁾.

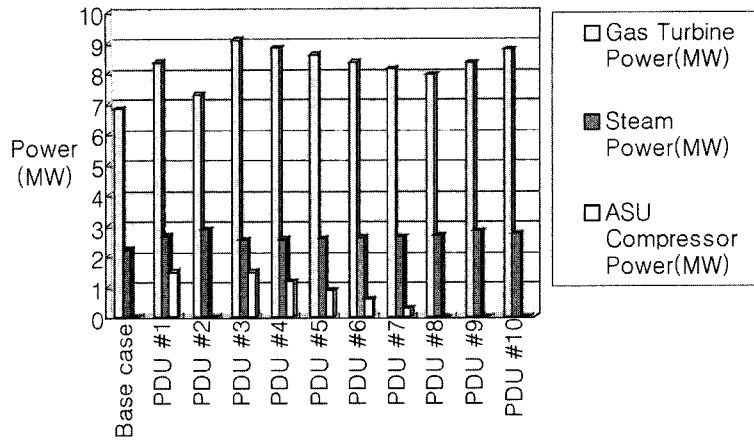


Fig. 5. Comparisons of gas turbine, steam turbine and ASU powers.

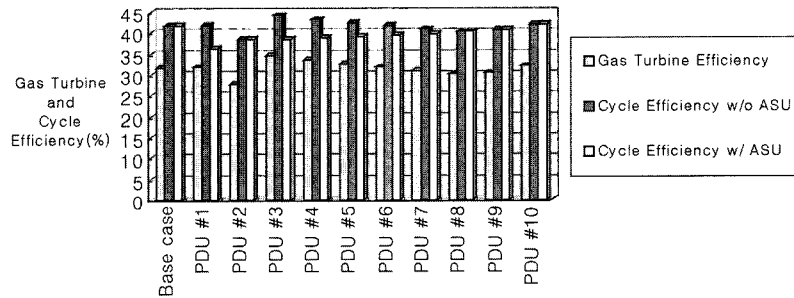


Fig. 6. Comparisons of combined cycle and gas turbine efficiencies.

그러나 전체 플랜트 효율은 공기분리장치 동력 소모(별도의 공기압축기 및 보조 부하)로 인해 일반적으로 천연가스의 경우에 비해 비슷하거나 오히려 낮은 경향을 보여주고 있다. NO_x 저감을 위한 질소분사는 가스터빈 및 전체 플랜트 효율을 향상시키는 데도 매우 큰 역할을 하며, 질소 및 연료의 포화도 플랜트 효율을 향상시키는 데 다소 기여하고 있다.

다양한 NO_x 저감 방식이 적용된 각 경우들의 NO_x 발생량 변화가 Fig. 7에 나타나 있다. 이때 천연가스 연소 시 NO_x 발생량은 180 ppm(@15% O₂)이며, 이를 기준으로 석탄가스화 플랜트에 NO_x 저감 방식이 적용된 경우들을 무차원화하여 비교하였다. 그림의 base case와 PDU#1에서 보여지듯이, 석탄가스 연료는 천연가스에 비해 발열량이 낮은 관계로 동일한 연료 입열량(thermal input)조건에 대해 상대적으로 낮은 화염온도를 수반하게 되며^[13], 이로 인해 NO_x 발생량도 천연가스에 비해 약 60% 가량의 수치를 보여준다. 또한 Fig. 7의 PDU#1 과 PDU#2의 비교를 통해, 공기 연계만으로도 NO_x 저감이 가능함을 알 수 있다. 즉 공기연계가 이루어진 가스터빈은 공기연계가 없는 경우에 비해 연소압력이 낮아져^[14],

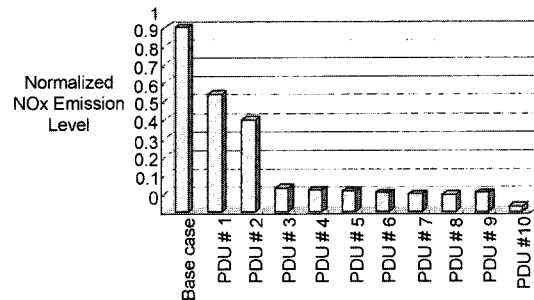


Fig. 7. Normalized NO_x emission level comparisons.

이로 인해 NO_x 발생량도 저감되는 것이다.

PDU#3~PDU#8의 결과로부터, 질소분사가 NO_x 저감에 매우 효과적임을 알 수 있으며, 질소의 분사로 인해 NO_x 발생량이 천연가스 경우에 비해 약 1/10 수준으로 저감되었음을 보여준다. 또한 공기 연계 시 공기 추출비의 증가도 NO_x 저감에 다소간 작용을 하나, 질소 분사에 비해서는 상대적으로 NO_x 저감효과가 그리 큰 편이 아니다. 더 나아가, PDU#9와 PDU#10의 결과 비교

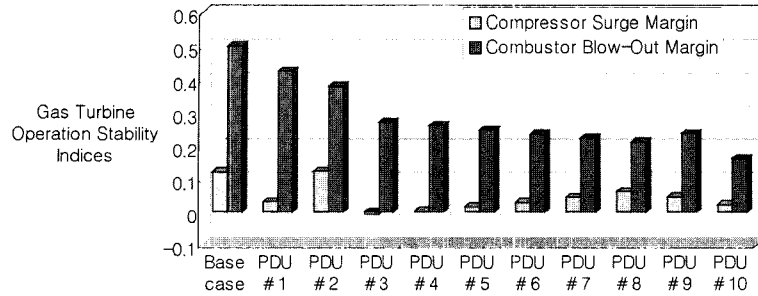


Fig. 8. Gas turbine compressor and combustor stability conditions.

를 통해서, 추가적인 NO_x 저감을 위해서, 연료의 포화 보다는 질소의 포화가 훨씬 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 8은 NO_x 저감기술이 적용된 경우의 가스터빈 압축기 및 연소기의 안정성 여부를 써지마진(surge margin)과 비화마진(blow-out margin)으로 나타낸 결과이다. 일반적으로 가스터빈이 최초의 설계점 조건에서 벗어나 운전되는 경우, 가스터빈 구성 요소들이 탈설계점에서 작동하게 되고 이로 인해 가스터빈 시스템 전체의 운전 불안정성을 야기 시킬 수도 있다^[14]. 이러한 불안정한 현상 중의 대표적인 것이 압축기의 유량과 작동 압력이 시간에 따라 변동되는 써지(surge)현상과 연소기내의 화염이 떨어져 나가는 비화(blow-out)현상으로, 실제 석탄가스화 복합발전 플랜트의 실증 시험 시 종종 관찰되곤 한다^[15].

Fig. 8의 base case 에서 보여지듯이, 본 연구에서 사용한 가스터빈은 약 10%의 써지마진(압력비 기준)과 약 50%의 비화마진(연료/공기비 기준)을 가지고 설계되었다. 즉, 가스터빈 압축기 압력비 및 연소기 연료/공기비의 변동이 약 10%, 50% 가량 발생한다 하더라도, 가스터빈 압축기 및 연소기는 안정한 운전범위 내에서 운전된다.

그러나, PDU#1의 경우, 가스터빈 설계 연료인 천연 가스 대신 석탄가스를 태우는 것으로 인해, 압축기 및 연소기로 유입되는 질량이 설계점에 비해 4~5배 늘어나^[16], 써지 마진과 비화 마진이 급격히 줄어드는 것을 알 수 있으며, 반면 PDU#2는 압축기 공기의 추출로 인해 가스터빈의 압축기 써지 마진은 다소 늘어나나 연소기의 비화 마진은 더 줄어들음을 알 수 있다. PDU#3에서 PDU#8의 결과로부터, 질소연계(또는 질소분사)를 한 상태에서 공기 추출비를 증가시키는 것은 압축기의 써지 마진은 증가시키나 반면에 연소기의 비화마진은 감소시킴을 알 수 있다. 특히, 공기추출 없이 질소분사가 이루어진 PDU#3의 경우는 압축기 써지 마진이 음의 값을 보이며, 이는 압축기가 이미 써지 현상을 나타냄을 의미한다. PDU#9 와 PDU#10의 결과로부터, 연료의 포화 및 질소의 포화는 압축기의 써지 마진을 줄여줌을 알 수 있다. 그러나 연소기의 경우, 연료의 포화는 오히려 가스터빈 안정성을 향상

시켜주나, 질소의 포화는 오히려 비화마진을 줄여줌을 알 수 있다. 앞서의 해석결과들로부터, 가스화플랜트에 적용되는 NO_x 저감기술들은 NO_x 발생량 감소에는 크게 기여할 수 있지만, 어떤 경우에는 플랜트의 불안정한 운전 및 비상상태(emergency state)를 유발할 수 있으므로, 설계단계에서부터 이에 대한 세심한 고려가 필요하다.

4. 결 론

중급 규모 가스화 복합발전 플랜트의 공정설계, 성능평가 및 NO_x 배출량 예측을 위한 해석방법을 제안하였다. 다양한 NO_x 저감 기법이 적용된 10가지의 가스화 플랜트들에 대한 해석결과로부터, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 가스터빈에 분사되는 질소는 가스터빈의 출력 향상에 크게 기여하나, 공기 추출비의 증가는 가스터빈의 출력 감소를 수반한다. 또한 증기사이클의 출력은 가스터빈 출력의 약 1/3 정도의 출력을 유지하였으며, 질소연계로 인한 증기사이클 출력의 저감효과를 관찰할 수 있었다. 전체적으로 질소연계는 플랜트 출력 및 효율을 향상시키며, 더 나아가 연료 및 질소 포화는 약 10% 가량의 사이클 출력 및 효율의 향상을 보여주었다.

천연가스에 비해 석탄 가스는 상대적으로 낮은 NO_x 발생량을 보여주었고, 질소 분사로 인해 NO_x 발생량의 대폭적인 저감이 가능하였다. 공기 추출비의 변화는 NO_x 저감에 그리 큰 영향을 미치지 못하는 못하였고, 질소의 포화를 통한 NO_x 저감이 연료를 포화시키는 방식보다 더욱 효과적임을 알 수 있었다. 그러나, NO_x 저감기술의 적용으로 인해 야기될 수 있는 압축기의 써지와 연소기의 비화 같은 불안정성을 피하기 위해서는, 가스터빈이 적절한 안정성 범위를 가지도록 NO_x 저감기술의 적용을 제한할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 고등기술연구원과 수원대학교 환경청정연

구센터의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Todd, D.M.: "Clean Coal Technologies for Gas Turbines", GER-3650C, General Electric (1993).
2. Smith, A.R. *et al.*: "Next Generation Integration Concepts for Air Separation Units and Gas Turbines", ASME J. of Eng. for Gas Turbine & Power, 119, 298 (1997).
3. Liebner, W. and Hauser, N.: "Optimizing/Costing Study for a 500 MW IGCC Power Plant Based on the Shell gasification Process", EPRI Gasification Technologies Conference (1996).
4. Schulman, B.L. and Dickenson, R.L.: "Residue Choices Mutiply on Process Technology and Products Made", Symposium on Residue Upgrading, Division of Petroleum Chemistry, ACS Spring National Meeting, 463 (1993).
5. Ishimura, D.M. *et al.*: "Cycle Analyses of 5 and 20 MWe Biomass Gasifier-Based Eletric Power Stations in Hawaii", ASME J. of Eng. for Gas Turbine & Power, 121, 25 (1999).
6. Larsøn, E.D. *et al.*: "Combined Biomass and Black Liquor Gasifier/Gas Turbine Cogeneration at Pulp and Paper Mills", ASME J. of Gas Turbine & Power, 121, 394 (1999).
7. ASPEN Plus User's Manual, ASPEN Inc. (1998).
8. Taurus 70 Catalogue, Solar Turbines (1999).
9. GateCycle User's Manual, ENTER Software Inc. (1995).
10. 이 찬, 윤용승: "중발열량 석탄 가스를 사용하는 복합발전 사이클의 성능 및 NO_x 배출 특성", 한국에너지공학회지, 9(4), 295 (2000).
11. Rizk, N.K. and Mongia, H.C.: "Semianalytical Correlations for NO_x, CO and UHC Emissions", ASME J. of Eng. for Gas Turbine & Power, 115, 612 (1993).
12. Lefebvre, A.H.: "Fuel Effects on Gas Turbine Combustion - Ignition, Stability and Combustion Efficiency", ASME J. of Eng. for Gas Turbine & Power, 107, 24 (1985).
13. 이찬 외: "ASU 연계 및 연료/질소 포화 조건이 석탄 가스화 복합발전 사이클 성능 및 NO_x 배출특성에 미치는 영향에 관한 연구", 한국에너지공학회 2000년도 춘계학술발표회 논문집, 9 (2000).
14. 이찬 외: "석탄가스화 복합발전용 가스터빈의 성능 평가", 유체기계저널, 2(1), 7 (1999).
15. 김종영 외: 석탄가스화 복합발전 기술개발(I), 전력연구원 (1997).