

# IGCC 용 가스터빈 사이클 공정개발을 위한 해석체계

이찬\*, 유영돈, 이한구, 이인영  
고동기술연구원 전력에너지연구실

## Analysis System for Developing the Process of Gas Turbine Cycle Used in IGCC

Chan Lee, Young Don Yoo, Han Goo Lee and In Young Lee  
Electric Power System Laboratory, Institute for Advanced Engineering

### 요약

고동기술연구원에서 수행하고 있는 IGCC 연구프로그램의 일부로 이루어지고 있는 석탄가스연소 가스터빈 시스템의 공정개발을 위한 해석체계를 소개하였고, 지금까지 이루어진 해석결과들을 제시하였다. 본 해석체계는 가스터빈 시스템해석을 위한 사이클해석, 구성요소인 압축기, 연소기, 터빈에 대한 해석모듈들로 구성하였으며, 각 해석모듈은 구성요소에 대한 전문적인 열유동장 해석방법을 채택한다. 각 해석모듈간의 상호작용 및 해석결과들의 중합을 통하여 IGCC용 가스터빈 공정개발을 위한 기초적인 자료제공이 가능하다.

### 1. 서론

최근들어 차세대 화력발전수단으로 주목되어 지는 가압유동층(PFBC: Pressurized Fluidized Bed Combustion) 복합발전이나 석탄가스화 복합발전(IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle)시스템들의 연구/개발 노력은 기존의 복합발전설비와 구별되는 공정의 개발에 초점이 맞추어지고 있다. 즉 기존의 가스터빈 연료로 사용되던 고발열량 천연가스 나 경유에 비해 약 1/10의 발열량밖에 갖지 못하는 석탄가스연료를 가스터빈 연소기에서 태우고, 연소생성가스를 터빈으로 유입, 팽창시켜 동력을 얻어내는 과정과 가스터빈 상류의 압축기와 공기분리장치(ASU: Air Separation Unit)간의 결합에 의한 성능변화 및 연소기로 공급되는 공기의 성질들을 규명하여 그에 적합한 가스터빈 공정을 개발하는 것이 주 관심사이다[1,2].

고동기술연구원에서는 1994년 부터 IGCC 연구 프로그램의 일부로서 앞서 언급한 가스터빈 사이클의 공정개발을 위해 사용되어질 수 있는 해석체계를 개발하고 있다. 본 해석체계는 가스터빈 사이클의 압축비, 효율 및 작동조건등을 결정하는 열역학적 해석모듈과 가스터빈 주 구성요소들의 국부적인 성능 및 열/유동 현상을 규명하는 2,3차원 해석모듈들로 구분되며, 각 모듈들은 서로 유기적으로 연계되어 IGCC 용 가스터빈 공정개발을 위한 해석시스템으로 사용될 수 있다. 그러므로, 본 논문에서는 본 해석체계의 구성원리 및 각 모듈의 해석방법을 소개하고, 지금까지 수행되어진 해석체계의 개발결과에 대해 소개하고자 한다.

### 2. 해석체계

Fig.1 에서 볼수 있듯이, 본 해석체계의 각 해석모듈들은 긴밀하게 상호 연계되어 있으며, 이러한 반복적인 상호작용을 통하여 최적의 IGCC용 가스터빈 사이클의 선택 및 공정개발이 가능하다. 고동기술연구원에서 개발하고 있는 각 해석모듈들에 대한 구체적인 내용은 다음과 같다.

## 2-1. 사이클 해석

가스터빈 사이클에 대한 열역학적 해석은 사이클 구성요소에 대한 에너지 및 물질균형을 고려하여 이루어진다. Fig.2 에서 보여지듯이, 본 사이클 해석방법은 주요 구성요소인 압축기, 연소기 및 터빈에 대한 모델들이 포함되어있고, 터빈 냉각을 위해 압축기 중간단에서 추출되어지는 공기량과 터빈냉각이 터빈효율에 미치는 영향을 평가할 수 있는 모델들도 삽입되어있다. 본 해석방법을 이용하여 가스터빈시스템 설계조건들(압축비, 터빈입구온도, 추출공기량 및 공기/연료비)이 추출되고, 더 나아가 각 구성요소들에 대한 기본설계사양으로 사용된다[3].

## 2-2. 압축기 해석

IGCC용 가스터빈 공기압축기가 기존의 복합발전 사이클의 것과 다른 점은 ASU 와 연계된다는 점 이다. 즉 압축기 입구 또는 중간단에서 유입공기중의 상당부분을 뽑아 ASU 로 보내고, ASU 에서 산소와 분리된 질소는 압축기 출구 또는 중간단에서 다시 공기와 섞여 연소기로 공급된다. 그러므로 ASU 와의 연계로 인해 생기는 이러한 공기추출 및 재합류가 압축기성능에 미치는 영향을 정량적으로 규명하는 것이 IGCC 공정개발에 매우 주요하며, 이를 위해서는 압축기 성능해석을 위한 신뢰성 있는 프로그램의 개발이 필요하다.

본 연구에서 고려한 압축기 성능해석방법은 압축기 내부유로를 거치는 유선들에 유체의 반경방향 운동량방정식, Euler 일 관계식 및 질량보존 관계식들을 적용하고 압축기내부의 압력손실은 실험적 상관관계식들을 도입하여 평가하는 유선폭률방법이다[4]. Figs.3 와 4 는 유량변화에 따른 압축기의 효율 및 압축비 변화에 대한 본 방법에 의한 예측결과를 보여주고 있으며, 본 방법에 의한 예측결과가 실험결과와 5% 미만의 오차범위내에서 잘 일치하고 있으며, NASA 에서 개발된 STGSTK(Stage Stacking)방법에 비해서도 우수한 예측성능을 보여주고 있다.

## 2-3. 연소기 해석

연소기 해석모들은 IGCC 가스터빈 사이클의 공정개발을 위해 가장 중요한 부분이며, 본 연구에서는 다음과 같이 크게 3가지 부분으로 구성하였다: 1) 1차원 연소기 성능해석, 2) 3차원 연소기 반응유동장 해석, 3) 원통형 연소기 기초실험.

1) 1차원 연소기 성능해석: 이 해석단계는 사이클해석을 통해 얻어진 연소기 운전입력 및 공기/연료비 자료를 토대로 연소기의 대략적인 제원과 부하조건 및 연소강도를 결정하고, 공기 및 연료배분 조건과 그에 따른 연소/환경배출 특성을 살펴보는 데 초점을 맞춘다. Fig.5 는 본 해석목적에 위해 개발된 연소기 반응기모델을 보여주고 있다. 연소기를 구간별로 나누어 그에 상응하는 반응기 모델(예: plug-flow 또는 well-stirred 반응기)로서 근사하였고, 각 반응기모델에는 연료의 연소반응, NOx 생성반응 및 예혼합연소인 경우의 가연한계에 대한 간략한 예측방식들이 포함된다[5]. Fig.6 는 본 방법에 의해 예측된 연료배분에 따른 NOx 발생특성을 보여주고 있다.

2) 2,3차원 연소기 반응유동장 해석: 1차원 성능해석을 통해 얻어진 연소기의 기하학적 형상과 설계조건등을 바탕으로 연소기 내부의 국부적인 반응유동장에 대한 상세한 정보를 얻는 것이 본 해석단계의 목적이며, 이를 위해서는 3차원 열유동장 해석을 위한 수치해석 프로그램에 석탄가스 연소시 수반되는 화학반응, thermal/fuel/prompt NOx 생성반응, soot 생성 및 난류현상에 대한 모델들이 결합되어야 한다. 그러므로, 본 연구에서는 3차원 유동현상의 지배방정식인 Navier Stokes 방정식의 해법으로서 유한체적방법을 고려하고 있으며[6], 연소나 NOx 생성반응에 대한 모델은 기존의 실험결과나 본 연구의 연소기 기초실험을 통해 작성할 예정이고 난류모델은 기존의 연구자들에 의해 제안된 여러가지 모델중(예: k-ε 모델, RNG 모델 등)에서 본 연구목적에 가

장 잘 부합하는 것으로 선택할 예정이다.

3) 원동형 연소기 기초실험: 본 기초실험은 2,3차원 연소기 모델링을 위한, 화학반응체계에 대한 자료와 점화 및 화염안정성 자료를 제공하는 데 그 주요목적이 있다. Fig.7 은 본 연구 프로그램에서 고려하고 있는 연소기 시험설비의 개략도이다. 연료는 고등기술연구원에서 보유하고 있는 석탄가스화 설비로 부터 유입할수도 있으며 또는 유사한 조성을 가지는 합성가스를 사용할수도 있다. 특히 암모니아를 연소기내로 유입하는 이유는 석탄가스연소시 발생하는 fuel NOx 에 대한 화학반응체계를 검토하기 위해서 이다.

본 실험설비를 이용하여 관찰하고자 하는 주요 항목들은 상압조건에서의 연소기내 유동의 가시화, 점화 및 화염안정성 측정 및 가압상태(10-12 기압)에서의 연소 및 NOx 배출성능 측정이나 터빈으로 유입되는 생성가스의 반경방향 온도분포에 측정이다. 그리고 더 나아가 동일한 연소기 형상에서 천연가스와 석탄가스를 태웠을 경우의 실험결과를 비교, 검토하는 것도 IGCC용 가스터빈 연소기 dual fuel system 개발을 위한 기초자료가 될 수 있다.

#### 2-4. 터빈해석

터빈은 가스터빈 사이클에서 동력을 발생하는 유체기계로서, 유체의 압력에너지를 터빈축의 회전에너지로 전환하기 위해서는 3차원적으로 복잡한 형상을 가지는 터빈블레이드의 사용이 불가피하며 이로 인해 터빈내부의 강한 2차유동현상이 발생하여 터빈효율을 저하시킨다. 이러한 복잡한 유체역학적 현상을 해석하기 위하여 본 연구에서는 터빈익렬내부의 유동을 블레이드와 블레이드 사이의 유면( $S_1$ ) 과 블레이드 허브와 팁사이의 유면( $S_2$ )으로 나누어 축차적으로 유동장을 계산하는 준3차원 유동장 해석방법을 채택하였고(Fig.8 참조), 여기에 2차유동효과를 고려할수 있는 2차유동이론 모델, 블레이드 날개길이방향 혼합모델 및 압력손실모델들을 첨부하였다[7].

본 터빈해석방법을 사용함에 있어서 연소기출구의 해석결과는 터빈 입구의 경계조건으로 사용되며, 해석결과로 부터 얻어지는 터빈입구 경계층에 의해 야기되는 2차유동이 터빈유동각에 미치는 영향, 터빈의 압력손실, 효율 및 동력발생량의 자료는 IGCC 공정개발을 위한 기초자료가 된다. Fig.9 및 10 은 본 해석방법에 의해 예측된 터빈출구의 유동각 및 속도분포 결과들을 실험치와 비교하고 있다[7].

### 3. 결론

IGCC용 가스터빈 사이클의 개발을 위한 해석체계를 제안하였다. 제안된 해석체계는 가스터빈 구성요소들의 열유체역학적 문제를 취급하는 전문 프로그램들의 유기적 결합을 통해 이루어지며, 부분적으로 이루어진 예측결과들을 통해 해석방법의 타당성이 검토되었다. 향후 이루어질 보완 및 수정작업을 통하여, 본 해석체계의 신뢰성 및 예측정확도를 향상하고자 하며 더 나아가 향상된 해석체계를 IGCC PDU 설계 및 엔지니어링에 적용하고자 한다.

#### 후기

본 연구는 통상산업부 에너지자원기술개발지원센터에서 지원하는 "석탄가스화 복합사이클 발전 시스템 실용화개발(과제번호:92E105-348DG1)" 의 일환으로 수행된 것 이며, 이에 센터관계자들에 게 심심한 사의를 표합니다.

#### 참고문헌

1. Kelsall, G. J., Smith, M. A. and Cannon, M. F., " Low Emissions Combustor Development for an

Industrial Gas Turbine to Utilize LCV Fuel Gas," ASME J. of Eng. for Gas Turbines & Power, vol.116, pp.559-566, 1994

2. Yun, Y., Lee, C., Lee, J., Kim, H. and Chung, K., " Status of IGCC Engineering Package Development in Korea," AIAA 94-4071, 29th Intersociety Energy Conversion Conference, 1994
3. 이찬, " NOx 저감형 가스터빈 시스템 설계를 위한 매개변수 연구," 대한기계학회 '94 추계학술대회 논문집(II), pp. 48-52, 1994
4. 이찬, " 유선곡률방법을 이용한 가스터빈엔진용 축류압축기의 설계점/탈설계점 성능해석," 한국항공우주학회지, vol.22, no.1, pp.28-37, 1994
5. 이찬, 이한구, 강승중, " 단계적 연료공급 가스터빈 연소기의 NOx 발생특성," 에너지공학회 '94 추계학술대회 논문집, pp. 15-21, 1994
6. Srivatsa, S.K., " Computations of Soot and NOx Emissions from Gas Turbine Combustors," NASA CR-167930
7. 이찬, " 축류터빈 성능해석을 위한 관류류 모델링," 한국항공우주학회 '95 추계학술대회 논문집, pp.240-243, 1995

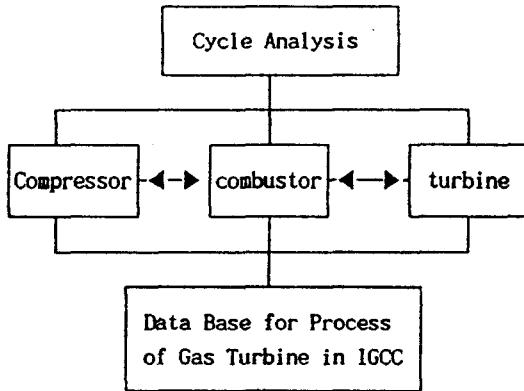


Fig.1 Interactive analysis system

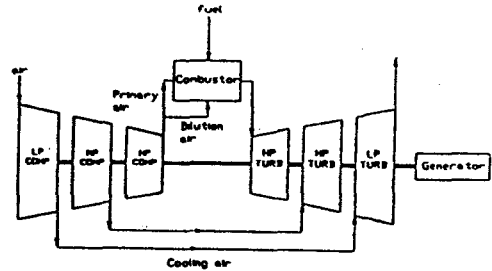


Fig.2 Cycle analysis model of gas turbine

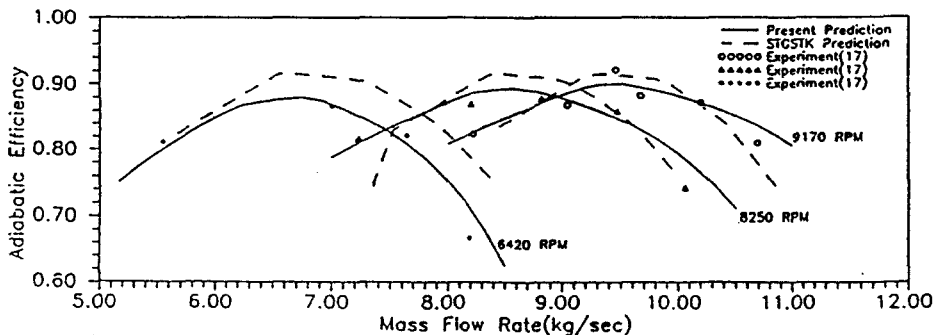


Fig.3 Efficiency curve of compressor

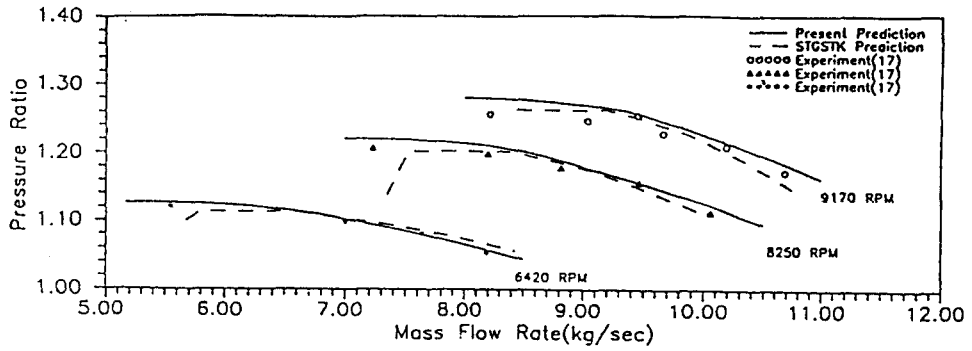


Fig.4 Pressure ratio curve of compressor

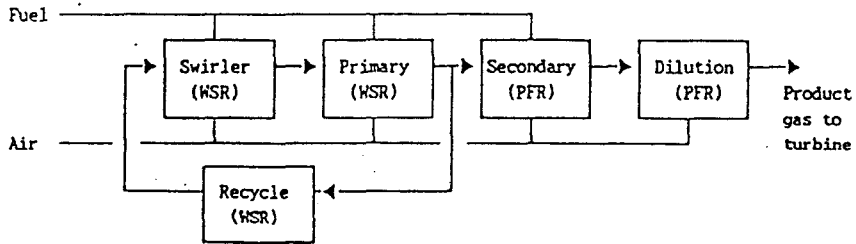


Fig.5 Reactor model for gas turbine combustor

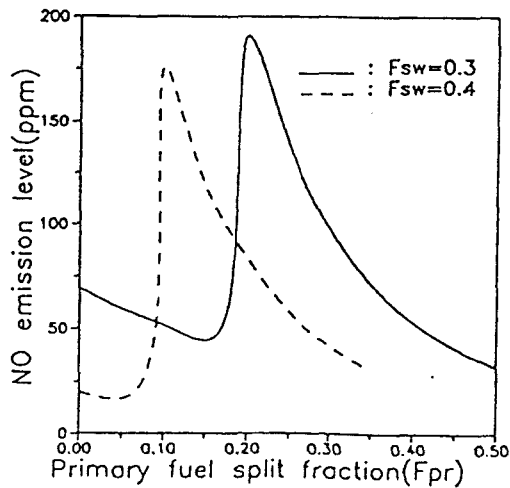


Fig.6 NOx emission vs fuel staging ratio

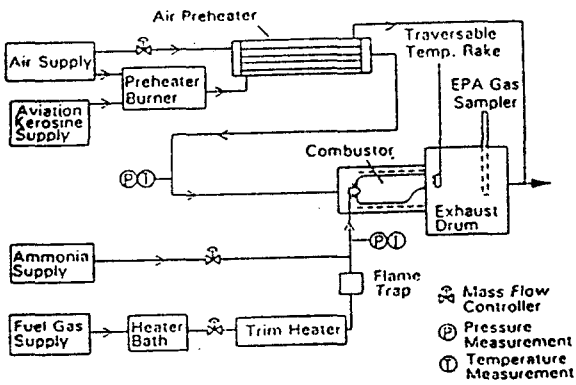


Fig.7 Schematic diagram of combustor test rig

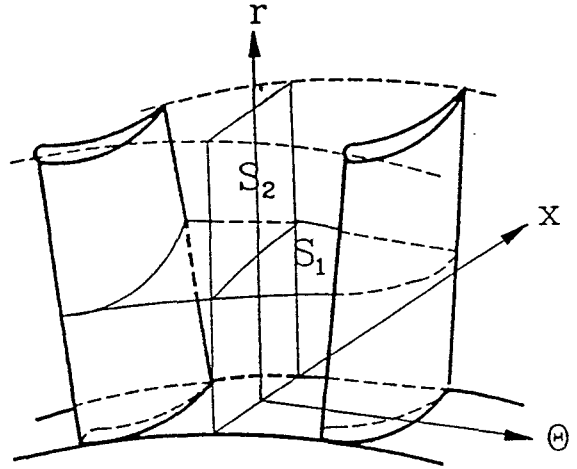


Fig.8  $S_1$  &  $S_2$  surfaces in turbine

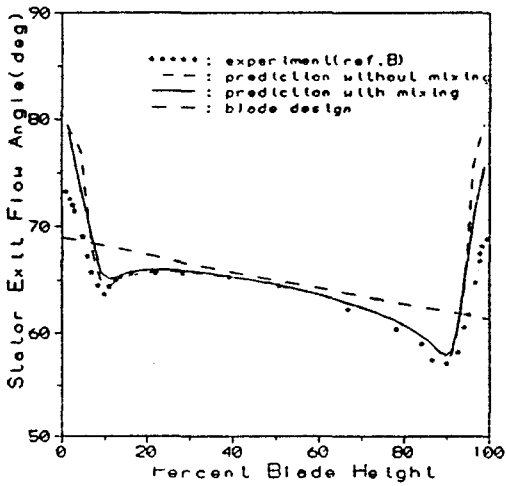


Fig.9 Flow angle at turbine exit

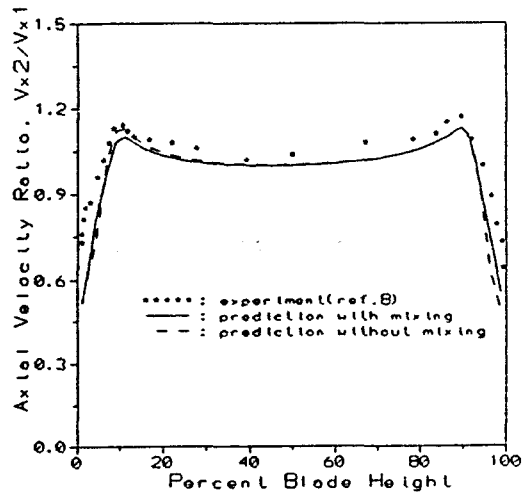


Fig.10 Axial velocity at turbine exit