가스터빈 연소기의 성능평가

안국영*· 김한석*· 안진혁*· 배형수**
(1999년 10월 18일 접수)

The Performance Evaluation of a Gas Turbine Combustor

Kook-Young Ahn, Han-Seok Kim, Jin-Hyuk Ahn and Hyoung-Su Pae

Key Words: Combustor(연소기), Primary Zone(주연소영역), Secondary Zone(2차 연소영역), Dilution Zone(희석영역), Combustor Inlet Air Temperature(연소기 입구 공기온도), Fuel Schedule(연료 스케줄), CO(일산화탄소), NOx(질소산화물), Pattern Factor(출구온도분포균일도), Residence Time(체류시간)

Abstract

The combustion characteristics have been investigated to develop the 50 kW-class gas turbine combustor. The combustor design program was developed and applied to design this combustor. The combustion air which has the temperature of 45, 200, 300℃ were supplied to combustor for elucidating the effect of inlet air temperature on CO, NOx emissions and flame temperature. The exit temperature and NO were increased and CO was decreased with increasing inlet air temperature. Also, the effect of equivalence ratio was considered to verify the combustor performance. The emissions of CO and NO with inlet air temperature can be analyzed qualitatively by measuring the temperature inside the combustor. The combustion performance with fuel schedule was evaluated to get the informations of the starting and part loading process of gas turbine. The combustion was stable above the equivalence ratio of 0.18. The pattern factor which is the important parameter of combustor performance was satisfied with the design criterion. Consequently the combustor was proved to meet the performance goal required for the target gas turbine system.

1. 서 론

가스터빈 연소기는 외형상 비교적 간단한 구조를 가지고 있으나, 그 내면에는 오랜 경험과 성능실험 등에 의한 기술이 축적되어 있다. 초기에는 경험부족 등으로 연소기의 외형이 크고 라이너에 설치된 공기공의 배열이나 크기 등이 성능실험에 의존하여 반복·수정되어 일관성없이 분규칙하게 설치되었다. 그러나 설계 경험이 축적됨에 따라 연소기의 크기는 가능한 축소되어지고 라이너의 공기공 등도 일정한 배열을 갖는 간단한 구조로 발전되었다. 이와같이 연소기 설계는 다년간의 경험과 실험에 의하여 구축된 데이터를 토대로 이루어지고 있으며,[1~3] 미국의 Pratt & Whitney 와 General Electric 사 및 영국의 Rolls- Royce 사 등의 가스터빈 제작회사들은 자체적으로 구축한 방법들에 의하여 설계를 수행하고 있다. 따라서, 같은 사양의 연소기도 각 가스터빈 제작사들에 따라 크기 및 형태 등이 상이한 경우가 많으며, 각 제작사는 연소기 관련기술의 이전을 기피하고 있어 구축된 설계기술을 확보하는 것은 매우 어렵다.

본 연구는 현재 한국기계연구원에서 개발하고 있는 50kW급 가스터빈 중 연소기의 설계 및 성능평가에 관한 것으로, 한국기계연구원에서 보유하고 있는 자체기술에 의하여 연소기를 설계하고 성능실험을 수행하였다. 현재 연소기는 성능실험 결과 성능이 양호한 것으로 판단되어 전체 가스터빈 엔진 제작 프로그램에 따라 제작 중에 있으며, 본 연구에서는 연소기 설계 및 성능평가를

* 회원, 한국기계연구원
E-mail : kyahn@mailgw.kimm.re.kr
TEL : (042)868-7324 FAX : (042)868-7284
** 현대건설

위한 성능실험 결과의 일부를 정리하여 보고하고자 한다.

2. 연소기 설계

연소기의 설계는 일반적으로 전압손실계수의 결정으로부터 연소기의 단면적을 구한 후 연소기의 지름, 길이 등 주요크기를 결정하는 것으로부터 시작된다. 첫단계인 전압손실계수의 결정도 설계자의 경험 및 개발용도 등에 따라 설계자가 결정하여야 한다. 이 경우 기존에 개발된 연소기에 대한 많은 데이터가 축적되어 있으면 설계자는 별 어려움없이 전압손실계수를 결정할 수 있으나, 그렇지 못한 경우에는 설계자가 많은 시행착오를 겪은 후에야 전압손실계수를 결정할 수 있을 것이다. 이와 같이 연소기는 사용목적 및 용도를 비롯하여 설계자의 경험과 의도 등 여러 변수에 의하여 설계되고 있다. 본 연구에서는 한국기계연구원에서 개발한 설계용 프로그램에 의하여 연소기를 설계하였으며, 구체적인 설계결과는 안 등[4,5]의 결과를 참고하기 바란다. 연소기 설계사양은 Table 1과 같으며, P_3 및 P_4는 각각 연소기 입출구부에서의 압력을, T_3 및 T_4는 연소기 입출구부에서의 온도를 나타내며, m_f 및 m_a는 각각 연료 및 공기의 질량을 나타낸다. 참고로, 설계점에서의 공기유속은 12 m/s이며, 체류시간은 145 msec이다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 연소기

본 연구에서 설계·제작하여 실험에 사용한 연소기는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 라이너 내경 98.6mm, 케이싱 내경 110mm, 길이 385mm인 역류 통형 연소기로서, 역류의 공기유입부는 실제 엔진에서와 같은 크기 및 위치에 설치하였다.

Table 1 Design point specification

P_3 [Pa]	397194	m_f [kg/h]	28.693
P_4 [Pa]	373194	m_a [kg/h]	1800
T_3 [K]	463.1	$(A/F)_{st}$	15.69
T_4 [K]	1100	A/F	62.733
Fuel	L.P.G.	Equvialence ratio (ϕ)	0.25

사용된 연료는 상용 LPG이며, 지름 3mm인 8개의 가스공을 가진 가스형 노즐을 통하여 90°의 분사각을 가지고 연소실내로 분사되도록 하였다. 노즐 및 선회기 등의 형상 및 크기는 이전의 연구[6]에서 얻은 결과를 이용하여 결정하였다. 선회기는 내경 24mm, 외경 34mm의 원통형 실린더내부에 연료공급관을 중심으로 같은 축에 위치하고 있으며 선회각은 45°, 날개수는 10개로 하였다. 돔의 경사각은 120°이며, 고온에서 라이너 보호를 위하여 막 냉각 장치를 5곳에 설치하였다. 막 냉각에는 지름 2mm의 공기공을 원주방향으로 45개 설치하여 라이너 표면의 온도가 1000K를 넘지 않도록 하였다.

3.2 실험장치 및 방법

실험에 사용된 실험장치는 Fig. 2에서 보는 바와같이 연료 공급장치, 연소용 공기 공급장치, 연소기 및 계측장치 등으로 구성되어있다. 연료는 상용 LPG로 프로판(C_3H_8) 90%, n-부탄(C_4H_{10}) 10%로 구성되어 있다. 연소용 공기의 공급은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 2000mmAq, 풍량 55Nm^3/min의 용량을 가지는 송풍기를 통하여 공급하였으며(상압실험), 연소용 공기는 열교환기를 지나며, 필요한 온도까지 가열시킨 후 연소기 내부로 공급하였다. 열교환기로 공급되는 연소용 공기는 별도의 송풍기를 설치하여 공급하였으며, 연소기내 초기점화를 위한 토치 점화기로 공급되는 공기는 공기압축기를 사용하여 공급하였다. 연료가스 및 공기의 유량측정은 오리피스 유량계를 사용하여 측정하였으며, 표준 유량계를 사

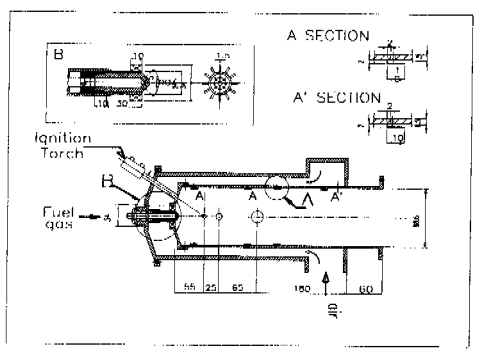


Fig. 1 Combustor desined by KACOM

용하여 보정하였다. 연료가스와 공기의 온도는 T-type 열전대를, 연소기 출구면 중심부에서의 온도는 K-type 열전대를 사용하였으며, 연소기 내부의 화염온도 측정은 R-type 열전대를 사용하였다. 열전대로부터 측정된 고온 가스의 온도값에 대한 복사 열손실 및 전도에 의한 오차 등은 보정하지 않았다.

연소기 출구에서의 배기가스는 연속 측정이 가능한 가스분석기(Greenline MK2)를 이용하여 CO와 NO를 측정하였으며, 배기가스의 포집은 연소배기가스가 고온임을 감안하여 물로 냉각할 수 있도록 이중관의 구조를 갖는 프로브를 별도로 제작하여 측정하였다.

실험은 연소기의 성능평가에 중점을 두고 실험을 수행하였다. 먼저 연소용 공기의 온도에 따른 연소특성을 파악하기 위하여 연소용 공기의 온도를 45℃, 200℃, 300℃로 변화시켜 가면서 실험하였다. 각각의 온도에서의 공기량은 일반적으로 공기부하 또는 입구마하수로 결정하나 본 연구에서는 연소기내에서 동일한 속도를 가지도록 연소용 공기의 체적유량이 같도록 하였으며, 이때 당량비는 설계점에서의 당량비인 0.25를 유지하도록 연료량과 공기량을 조절하여 실험하였다. 연소기 성능의 대표적인 변수인 연소기 출구면에서는 온도분포의 균일성을 알아보기 위하여 연소기 출구면상에서 온도를 측정하였으며, 연소기 내부의 온도를 측정하여 연소상태를 파악하였다. 연소기 출구부의 배기가스 성분은 설계점에서 뿐만 아니라 각각의 부하에 따라 측정함으로써 연소특성을 평가하였다.

한편, 가스터빈이 초기에 작동할 경우 연소기는 연료 스케줄에 따라 시동점에서부터 설계점까지 서서히 부하를 증가시켜가므로 이에 따른 연소기 출구 온도, CO 및 NO 배출량을 측정하여 실제 운전시의 조건을 만족하는지를 평가하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 입구공기온도에 따른 연소특성

연소기내에서의 공기의 체류시간과 당량비를 동일하게 유지하여 준 상태에서 연소기 입구 공기온도를 변화시켜 주었을때의 연소기 출구의 온도 및 배기가스를 측정하였다. 동일한 당량비와 체류시간을 유지하여 주기 위해서 연료량은 45℃, 200℃, 300℃일때, 11.4kg/h, 7.8kg/h 7.0kg/h를 각각 공급하였다. Fig. 3 및 Fig. 4는 각각의 경우에 대하여 연소기 출구에서의 온도, CO 및 NO값을 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 입구 공기 온도가 증가할수록 연소기 출구온도는 증가하고 있다. CO 및 NO는 입구 공기 온도가 증가함에 따라 CO는 감소하고 NO는 증가하는 전형적인 배기가스 특성을 보여 주고 있다.

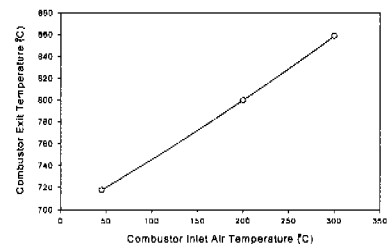


Fig. 3 Combustor exit temperature for various inlet air temperature

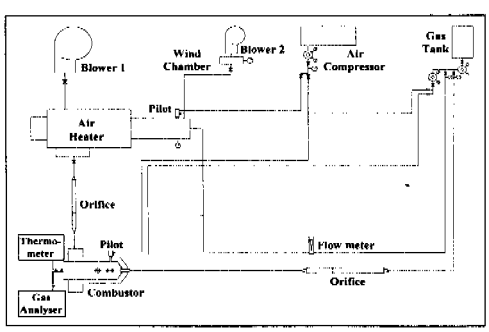


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

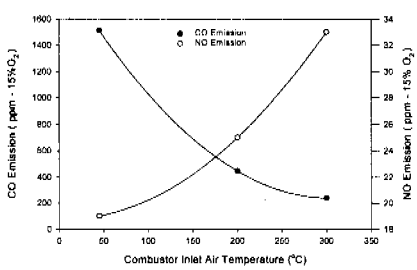


Fig. 4 Emission profile for various inlet air temperature

Fig. 5는 입구 공기 온도에 따른 연소기내 중심부의 온도를 측정한 것이다. 일반적으로 가스터빈 연소기는 주연소영역, 2차 연소영역, 희석영역으로 구성되어 있으며 주연소영역과 2차 연소영역을 지나며 연소가 이루어지며, 희석영역을 지나면서 배기가스의 온도를 연소기 출구온도까지 저하시키게 된다. 주연소영역과 2차 연소영역의 당량비는 0.8 이하로 설계되어야하며, 본 연소기의 경우는 0.7로 설계되었다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 연소기 내부의 온도는 주연소영역에서 반응이 일어나 온도가 급격히 증가하다가 2차 연소영역에서 반응이 종료된 후, 희석공기에 의하여 냉각되어 온도가 낮아지고 있다. 입구 공기 온도가 높은 경우 반응속도가 증가하여 연소기내 최고온도에 이르는 시간이 감소하게 되며, 또한 최고온도에서 머무르는 시간이 증가하는 것으로 미루어 보아 고온의 공기를 공급하여 주면, CO가 감소하고 NO가 증가하는 것을 예측할 수 있다. 한편, 입구 공기 온도가 높을수록 연소기에 공급되는 열량이 많으므로 연소기내의 온도도 다소 높은 것을 알 수 있다.

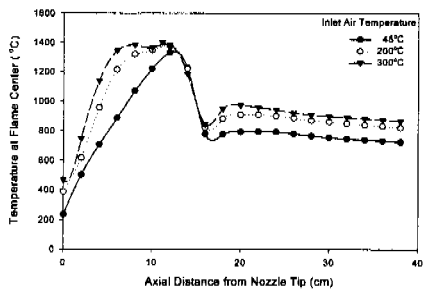


Fig. 5 Temperature of axial direction inside the combustor

4.2 시동 및 부하조건 변화에 따른 연소특성

가스터빈 연소기의 경우 시동 또는 부하 조정시 연료스케줄에 따른 일정한 공기량에 따라 연료량이 어느 정도 변화하여도 양호한 연소특성을 가지고 있어야 한다. 일반적으로 시동은 무부하 상태의 조건을 따라가다가 압축기 맵상에서 설계점이 있는 곡선에 도달하면 부하조건으로 전환된다. 따라서 시동초기에는 당량비가 매우 낮은 상태로 운전되어야 하므로 연소특성이 저하되거나 화염이 실화될 위험이 있다. 이를 극복하기 위하여 가스터빈 압축기에서 연소기로 공급되는 공기의 일부를 외부로 방출하거나 바이패스 시키고 있으나, 연소기 설계자는 연료스케줄 결정시, 연소기의 특성을 고려하여 이를 반영하여야 한다.

Fig. 6 및 Fig. 7은 연소기 부하에 따른 연소특성을 알아 보기 위하여 각 입구 연소용 공기온도에 대한 설계점에서의 공기량에서 연료량을 변화시켜가며 연소기 출구부의 중심온도 및 배기가스를 측정한 것이다. 이때 입구 공기 유량은 입구 공기온도가 45, 200, 300℃에서 각각 715, 485, 434kg/h로 고정시켰다. 그림에서 보는 바와 같이 이 경우에도 입구 공기온도가 높아질수록 CO는

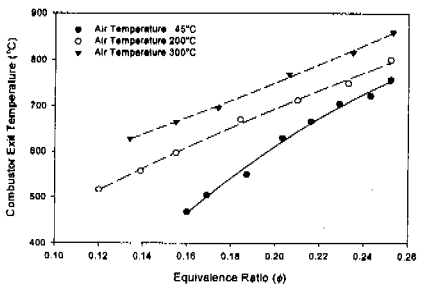
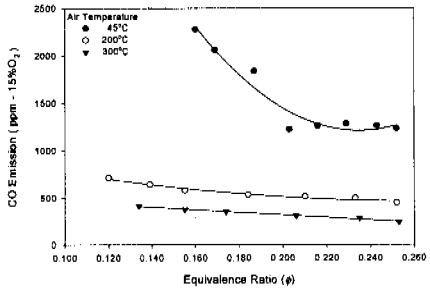


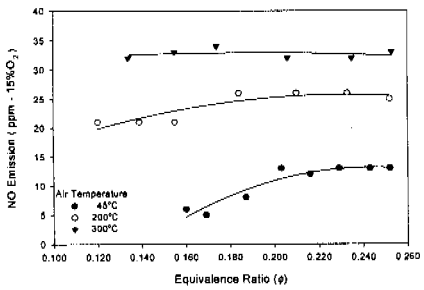
Fig. 6 Combustor exit temp. for various inlet air temperature and equivalence ratio

감소하고 NO는 증가하고있다. 한편, 당량비가 증가함에 따라서도 연료량이 증가하여 주연소영역의 온도가 높아져 CO는 감소하고 NO는 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나, 입구공기온도가 200℃, 300℃인 경우에는 공기량이 일정하여 체류시간이 거의 동일하므로 그 변화량은 크지 않았다. 한편, 입구 공기온도가 낮은 경우(45℃) 당량비가 0.19이하가 되면 연소가 불안정하여져 CO가 현저히 증가하고 있다. 이와 같은 결과로부터 입구공기온도가 높고 당량비가 설계점 근방에서는 안정된 연소를 얻을 수 있으며, 설계점 근처인 200℃에서는 당량비를 0.12까지 감소하여도 안정된 연소상태를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10은 연소기 입구공기온도는 45℃로 일정하게 유지하고, 연료 스케줄에 따른 연료량 및 공기량 변화에 대한 연소특성을 나타내고 있다. Fig. 8은 연료량을 일정하게 하고,



(a) CO emission



(b) NO emission

Fig. 7 Emission profiles for various inlet air temperature and equivalence ratio

당량비를 변화시켜가며 안정적 연소상태를 얻을 수 있는 당량비 구간을 나타낸 것으로 당량비가 커지거나 작아지면 소음이 심하게 발생하고 연소상태가 매우 불안정하게된다. 그림에서 실선으로 표시되지 않은 부분은 부하조건에서 운전되는 구간으로 연소특성이 비교적 양호하였다. 실험결과 당량비 0.18까지는 비교적 양호한 연소상태를 유지할 수 있었으며, Fig. 9에서 보는 바와 같이 당량비가 0.18 이하로 되면 연소가 불안정하게 되어 CO가 현저히 증가하였다. 이때 연료량이 적은 경우 CO가 적게 발생하는 이유는 같은 당량비에서 상대적으로 공기량이 적으므로 체류시간이 증가한 것으로 사료된다. NO의 경우 동일한 연료량에서 당량비가 증가할수록 화염의 온도는 상승하고 이로 인하여 발생량이 증가하였다. Fig.10은 Fig.8을 실제 가스터빈 엔진 작동시 측정

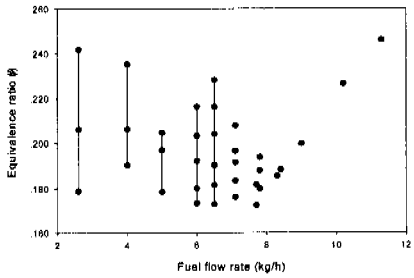
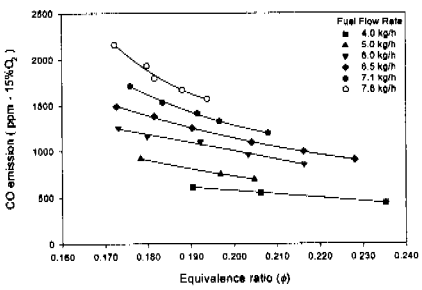
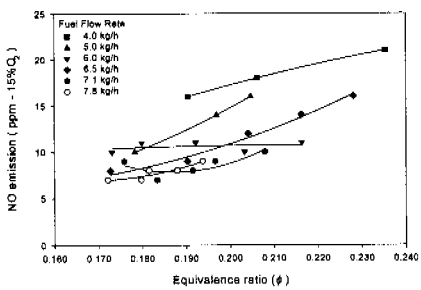


Fig. 8 Flame stability with fuel flowrate and equivalence ratio



(a) CO emission



(b) NO emission

Fig. 9 Emission profiles with equivalence ratio

이 용이한 온도값에 대한 화염 안정성을 나타낸 것으로, 연료량에 관계없이 당량비에 따라 출구 중심온도는 일정함을 알 수 있으며 출구온도가 약 550℃이하가 되면 연소상태가 불량하게 된다.

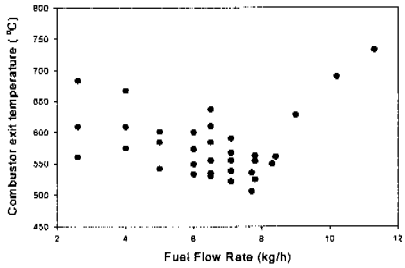
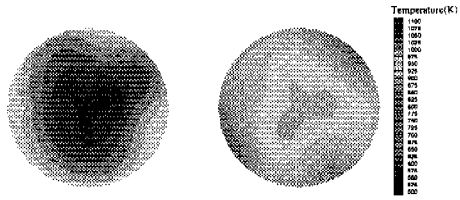


Fig. 10 Temperature with fuel flowrate and equivalence ratio



(a) Air temp.:200℃ PF=0.11 (b) Air temp.:45℃ PF=0.11

Fig. 11 Temperature contours and pattern factor at combustor exit

4.3 연소기 출구면 온도분포

연소기 출구면의 온도분포 균일도(pattern factor, PF)는 터빈익의 수명과 밀접한 관계가 있는 주요 변수로서, 터빈 입구온도 균일도라 생각할 수 있다. 연소기 후단에 스크롤이 설치되어 있는 경우에는 스크롤 출구면의 온도 분포를 측정하여야 하나, 연소기 개발단계에서 연소기 출구온도 분포를 다음과 같이 측정하였다.

$$PF = \frac{T_{max} - T_4}{T_4 - T_3}$$

여기서, T_{max}는 연소기 출구면의 최고를 나타내며, 출구면 온도는 30도 간격으로 중심으로부터 반경 20, 40, 60, 80, 98의 5지점, 총 62지점을 측정하였다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 균일도는 0.11로 양호하며, 회석공기공은 유출되는 공기와 라이너를 흐르는 공기와의 혼합상태를 고려하여 공기공의 개수는 3개이다.

5. 결 론

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 연소기 입구 연소용 공기온도를 증가시키면 출구온도가 증가하며, CO는 감소하고 NO는 증가하는 전형적인 배기가스특성을 얻을 수 있다.

(2) 연소기의 시동 또는 부하에 따른 연소특성을 고찰하기 위하여 입구 연소용 공기 온도 및 당량비에 따른 출구 온도 및 CO, NO값을 측정한 결과, 당량비가 증가하면 출구 온도는 증가하였으며, CO는 감소하고 NO는 증가하였다.

(3) 연소기 내부의 온도는 주연소영역에서 증가하다가 2차 연소영역에서 반응이 종료되며 희석영역에서 냉각되어 감소하였다. 이때 입구 공기온도가 증가함에 따라 반응속도가 빨라져 최대온도에 도달하는 시간이 빨라지며 최대온도에서 머무는 시간도 길어져 CO는 감소하고 NO는 증가함을 알 수 있었다.

(4) 연료 스케쥴을 결정하기 위하여 각 연료량에 따른 당량비에서의 연소특성을 고찰하였다. 당량비 0.18이하 또는 출구 온도가 550℃가 되면 연소가 불안정하여짐을 알 수 있었다.

(5) 연소기 출구부의 온도균일도는 11%로 양호한 특성을 가짐을 알 수 있었다.

참고문헌

(1) 1980, "The Design and Development of Gas Turbine Combustors," *NREC*, Woburn, Massachusetts, U.S.A.

(2) Lefebvre A. H., 1983, *Gas Turbine Combustion*, McGraw-Hill.

(3) Mellor A. M., 1990, *Design of Modern Turbine Combustor*, Academic Press.

(4) 오군섭, 안국영 외, 1997, "터보기계 설계기술 개발에 관한 연구," 한국기계연구원 연구보고서, UCN 304-521.M.

(5) 오군섭, 안국영 외 25, 1997, "터보제너레이터 및 관련 유체기계의 공력설계 및 해석기술(Ⅰ)," 한국기계연구원 연구보고서.

(6) 안국영, 김한석, 배진호, 조은성, 1998, "가스터빈 연소기 기본형상 결정을 위한 성능실험," 대한기계학회논문집 B권 제22권 제6호, pp.840~848.