

비활성 가스 제네레이터의 후방연소기 개발에 관한 연구

김호근* · 안국영** · 김한석** · 임인권***

A Study on the Development of After Burner in Inert Gas Generator

H.K. Kim, K.Y. Ahn, H.S. Kim, I.G. Lim

Key Words :IGG(Inert Gas Generator), SMD(분무평균직경), Stabilizer(화염안정판), After-Burner(후방연소기), Vortex(와류), Quenching(소염)

Abstract

After burner which is main part of inert gas generator(IGG) is studied for the development of IGG. The results of many experimental equations are applied to estimate characteristics of the spray nozzle and evaporation of spray, and selected the optimum design point of after burner. The selected design point of after burner are validated experimentally through the pilot plant of after burner. The flame stability is favorable at design point(150mm), that distance from stabilizer to nozzle. The emission of NO_x and CO is lower than gas turbine combustor which was used in primary combustor.

1. 서론

화재로 인한 사고로 인하여 재산 및 인명 피해가 해마다 발생하는 것으로 집계되고 있다. 국가적으로 막대한 피해를 초래하는 화재 진압 및 방지를 위하여 행정자치부내에도 소방국이 설치되어 화재 예방 및 진화를 위한 기술 개발에 관한 연구가 이루어지고 있다. 97년 행정자치부가 발표한 화재 통계 연보에 따르면 한해에 발생한 화재의 경우 군 계통의 화재 발생을 제외한 민간 분야에서 총 29,472건으로 2,915명이 사망하고 1,217억원의 재산 손실이 발생한 것으로 집계되고 있다.

화재의 진압은 크게 물과 가스를 사용하는 두 경우로 구분할 수 있다. 화재 진압 시 가스의 사용은 일반적으로 유류 화재의 경우에 해당한다. 가스(이산화탄소, 질소, Halon)를 사용하는 경우 물에 비하여 제조원가가 비싸며 물의 경우는 화재 진화 시 시설과 장비가 파손된다는 것이며 유류화재 시 물을 사용할 수 없다는 단점이 있다. 이에 비하여 비활성 가스를 사용하는 경우 화재 진압에 요구되는 시간이 감축되고 화재 진화 시 시설과 장비의 파손이 적다는 특징이 있다.⁽¹⁾

소방용으로 많이 이용되는 비활성 가스 제네레이터는 대기 중의 산소성분을 감소시킴으로서 연소가 불가능한 비활성 기체를 만들어내는 장치이며 가스터빈을 이용한 비활성 가스 제네레이터는 Fig.1과 같이 크게 가스터빈과 후방연소기로 구성되어 있다.

* 명지대학교 대학원

** 한국기계연구원 열유체환경연구그룹

*** 명지대학교 기계공학부

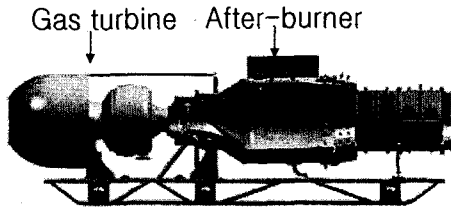


Fig. 1 IGG Combustor

본 연구에 있어서는 가스터빈을 이용한 비활성 가스 제너레이터(IGG)의 주요 구성품 중의 하나인 후방연소기의 개발을 위하여 기존의 제품을 모델로 후방연소기를 개발하는데 목적을 두고 있다. 이를 위하여 기존의 비활성 가스 제너레이터(IGG)의 각 구성 요소를 분석하였으며 후방 연소기를 역설계하고 성능실험을 효율적으로 수행하기 위하여 실험장치를 구성하였다. Table. 1 은 후방연소기에 대한 사양이다.

2. 후방연소기 설계

Table. 1 IGG after-burner specification

	Parameters	Value	Unit
Combustor	Mass	1.7351	kg/sec
	T inlet	846	K
	T outlet	1859.0	K
	P inlet(abs)	122.53	kPa
	Fuel flow rate	0.05320	kg/sec
	Efficiency	99	%
Atomizer	Mass	0.43795	kg/sec
	Pressure(abs)	313.98	kPa
	T	846	K

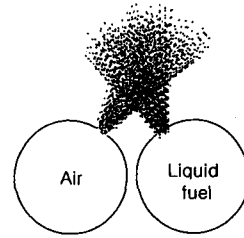


Fig. 2 Schematic of Plain-jet airblast

2.1 노즐 설계

가스터빈을 이용한 비활성 가스 제너레이터(IGG)의 후방연소기에 연료의 미립화용으로는 Plain-jet airblast 노즐이 사용된다. Plain-jet airblast 노즐은 액체가 오리피스등을 통하여 얇은 막 형태 등으로 외부에 분사되고 이것이 고속

Table. 2 Drop-Size Equations for Plain-Jet Airblast Atomizers⁽²⁾

$SMD = 0.585 \left(\frac{\sigma}{\rho_L U_R^2} \right)^{0.5} + 5.3 \left(\frac{\mu_L^2}{\sigma \rho_L} \right)^{0.235} \left(\frac{Q_L}{Q_A} \right)^{1.5}$ <p>[Nukiyama and Tanasawa]</p>
$SMD = 0.95 \frac{(\sigma \dot{m}_L)^{0.33}}{\rho_L^{0.37} \rho_A^{0.30} U_R} \left(1 + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_A} \right)^{1.70} + 0.13 \left(\frac{\mu_L^2 d_0}{\sigma \rho_L} \right)^{0.5} \left(1 + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_A} \right)^{1.70}$ <p>[Lorenzetto and Lefebvre]</p>
$SMD = 0.19 \left(\frac{\sigma}{\rho_L \rho_A} \right)^{0.35} \frac{1}{U_A} \left(1 + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_A} \right)^{0.25} + 0.127 \left(\frac{\mu_L^2 d_0}{\sigma \rho_L} \right)^{0.5} \left(1 + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_A} \right)$ <p>[Jasuja]</p>
$SMD = 0.022 \left(\frac{\sigma}{\rho_A U_A^2} \right)^{0.45} \left(1 + \frac{1}{ALR} \right)^{0.5} + 0.00143 \left(\frac{\mu_L^2}{\sigma \rho_L} \right)^{0.4} \left(1 + \frac{1}{ALR} \right)^{0.8}$ <p>[Jasuja]</p>
$SMD = 0.48 d_0 \left(\frac{\sigma}{\rho_A U_R^2 d_0} \right)^{0.4} \left(1 + \frac{1}{ALR} \right)^{0.4} + 0.15 d_0 \left(\frac{\mu_L^2}{\sigma \rho_L d_0} \right)^{0.5} \left(1 + \frac{1}{ALR} \right)$ <p>[Rizk and Lefebvre]</p>

의 미립화매체에 의하여 다음 Fig.2와 같이 충돌되어 미립화 되는 특징을 갖고 있다. 압력식 노즐에 비하여 비교적 저압의 연료 및 기체의 공급 조건에서 미립화 특성이 좋은 Plain-jet Airblast 노즐은 저압으로 많은 양의 가스를 발생시키는 후방 연소기의 연료노즐로 적합할 것으로 판단된다.

노즐의 미립화 특성은 이론적으로 입자크기를 정확히 예상하기 어렵기 때문에 기존의 연구들은 각 노즐의 형상에 대하여 실험을 통하여 Table. 2⁽²⁾과 같이 실험식을 도출하였다. 본 연구에서는 기존의 후방연소기에 이용된 Plain-jet Airblast 노즐 미립화 특성을 예상하기 위하여 Table. 2의 실험식들을 적용하여 최적의 식을 도출하는 방법을 모색하였다. 이를 위하여 실험이 수월한 연료 대신 물과 공기를 이용하여 각 조건에 대한 결과를 기존에 발표된 예상식들과 비교하여 최적의 예상식을 결정하고 등유 공급 시 후방연소기 노즐의 분무 입경을 예상하였다.

후방연소기 연료노즐의 분무특성 평가를 위하여 광산란법을 이용한 Malvern System을 이용하여 분무 평균직경을 구하였다. Fig. 3은 Malvern 시스템의 개략도를 나타낸다. 이 장치는 2mW He-Ne ($\lambda=633\text{nm}$) 레이저 및 광 확대부로 구성된 발광부와 31개의 반원형 센서로 구성된 수광부로 이루어져 있다.

Fig. 4는 IGG의 기본 운전 조건인 연료의 공급압력인 계기압력 2기압으로 일정하게 물의 압력을 설정하는 경우 Plain-jet Airblast 노즐의 각 공기압력에 대한 분무구조를 보여주고 있다.

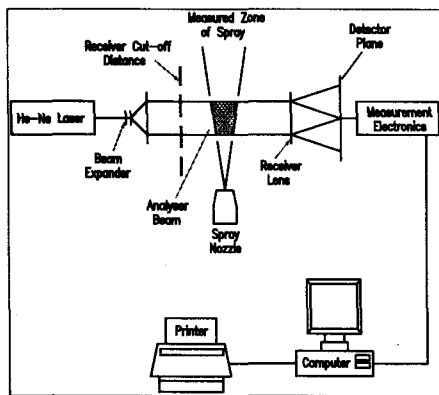


Fig 3. Schematic diagram of Malvern System

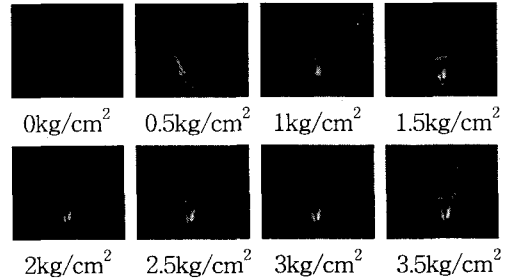


Fig. 4 Spray patterns for air pressure at fuel 2 atm

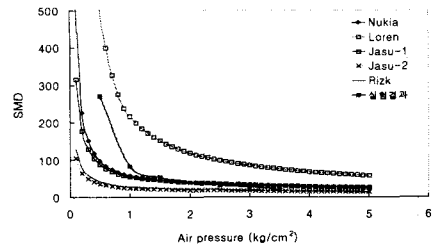


Fig. 5 Comparative of SMD for various experiment equation

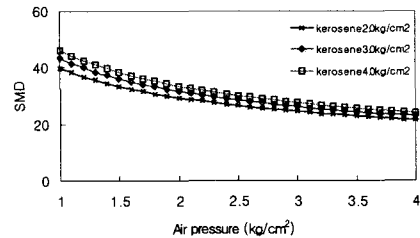


Fig. 6 SMD profiles for air pressure at each fuel pressure

Fig. 5는 Fig. 4에 각 조건에 대하여 측정된 미립화 공기 공급압에 대한 입경변화를 실험과 Table 2 예상식의 결과를 이용하여 비교하였다. 이 결과에서 보면 미립화 공기압이 증가할수록 분무 입경의 크기가 감소됨을 알 수 있는데 이것은 이류체 노즐의 일반적인 특성이다. 그리고 제시된 예상식들 중에는 Jasu-1의 예상식이 가장 실험결과와 일치함을 알 수 있었다. 따라서 후방연소기에 이용되는 Plain-jet Airblast 노즐의 평가로 Jasu-1을 적용하는 것이 타당할 것으로 생각된다.

Fig. 6는 Jasu-1의 예상식을 이용하여 Table. 1의 조건에 따라 등유의 공급량과 미립화 공기압력에 대하여 분무 입자의 평균직경을 예상하였

다. 물의 경우와 마찬가지로 등유는 미립화 공기의 공급량이 증가될수록 미립화가 잘 이루어지며 물에 비하여 미립화가 잘 이루어짐을 알 수 있는데 이것은 점도와 표면장력등의 차이에 의한 것으로 생각된다. 이 결과로 보면 기존의 후방 연소기의 운전 조건에서는 분무평균직경은 29 μ m 정도임을 예상할 수 있었다.

2.2 연료의 증발

후방연소기 노즐에서 분무된 연료는 주연소기에서 배출된 고온의 가스에 의하여 증발되어 배출가스 속에 포함된 산소와 반응하게 되는데 노즐 후류에 설치된 화염안정판에 의하여 화염이 안정화되는 구조를 취하고 있다. 연료 노즐과 화염안정판의 거리가 너무 크면 화염안정판 이전에 화염이 존재할 가능성이 있어 안전에 문제가 있으며 반대로 연료 노즐과 화염안정판의 거리가 너무 가깝게 되면 화염이 불안정해질 수 있기 때문에 연료의 증발 특성은 노즐 선단과 화염안정판의 거리를 결정하여 주는 중요한 설계인자가 된다. 따라서 연료 노즐과 화염안정판의 적정 간격을 설정하기 위해서는 액적의 증발에 대한 해석이 필요하다.

단일 액적의 증발에 대한 수학적인 해석은 층류 유동에 대하여 평형으로 가정한 경우 비교적 잘 이루어져 있지만 난류유동과 액적군들의 증발에 대한 해석은 잘 이루어지지 않고 있다.

액적의 증발에 대하여 유효증발상수 λ_{eff} 는 식 (1) 같이 정의된다.

$$\lambda_{eff} = \frac{D_0^2}{t_e} \quad (1)$$

여기서 D_0 는 초기 액적의 직경을 나타내며 t_e 는 액적의 증발시간을 나타낸다. 후방연소기 연료의 분무 시 증발열에 의한 고온가스의 온도변화를 고려하여야 하지만 액적의 온도상승과 증발잠열에 의한 온도변화는 25K 미만이므로 고온가스의 온도 변화는 무시하였으며 액적은 가스의 유동과 동일하게 된다고 가정하였다. 액적이 증발되는데 걸리는 시간 t_e 를 주연소기의 배가스 온도가 846 K인 경우 *Chin과 Lefebred*⁽²⁾의 유효상수 λ_{eff} 값을 이용하여 분무 입경에 대한 증발시간을 Fig. 7에 나타내었다.

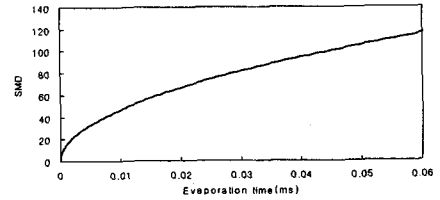


Fig. 7 Evaporation time for SMD at 846K

Fig.7의 결과를 이용하면 고온가스의 유속에 대한 증발 거리를 예상할 수 있으며 예상되는 연료의 입경 29 μ m, 기존 후방 연소기의 노즐과 화염안정판까지 거리가 15cm로 가스 유속(121m/sec)을 참고로 하여 예상하면 증발율이 50%정도가 적정할 것으로 예상되지만 이에 대한 계속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

2.3 화염안정판

후방연소기의 화염안정성을 확보하기 위하여 원추형의 다공 후판과 다공 박판으로 구성되었다. 연료와 산화제가 관통하게 되며 관통속도를 확보하게 해줌으로서 화염의 역화를 방지하며 bluff body역할을 하여 유동에 와류를 형성할 수 있게 해줌으로서 화염을 안정화 시켜준다.

후방연소기의 다공 후판의 hole 면적은 Duct 단면에 1.65배이며 관통시 수직의 유동을 확보하기 위하여 설치된 것으로 예상되는 다공 박판의 hole 면적은 Duct 단면에 2배 정도로 구성하여 압력손실을 최소한으로 하였다. 관통속도는 각각 93m/sec, 58m/sec 정도 됨을 예상할 수 있다.

2.4 실험장치구성 및 실험방법

기존의 IGG 장치를 참고로 설계된 후방 연소기의 특성 실험을 위하여 기존의 IGG 장치의 1/4 scale 로 Fig. 10과 같이 실험장치를 구성하였다. 후방 연소기의 설계는 고온 가스의 유속과 온도를 기준으로 기타 형상은 기존의 IGG를 참고 설계하였다. 주 연소기로 50Kw용량의 연소기를 제작하였는데 연소용 공기는 송풍기를 이용하여 으며 벤츄리 유량계와 니들밸브를 이용하여 유량의 측정과 제어를 하였다. 연료는 보정된 LPG(C₃H₈ 90%, C₄H₁₀ 10%) 오리피스형 유량계를 이용하였다. 후연소기의 원활한 특성 실험을

위하여 터어빈의 일을 열교환기로 대신하도록 하였다. 열교환기의 전후에 순환 배관과 밸브를 설치하여 후연소기의 입구온도를 일정하게 유지하도록 하였다. 후연소기의 연소실 내부 온도를 측정하기 위하여 고온용 R-type 열전대를 25cm간격으로 4개를 설치하였으며 출구부에 수냉식 프루브를 설치하여 가스분석기(Greenline MK2)에 연결하여 분석하였다. 실험의 효율성을 높이기 위하여 기존의 후방 연소기의 연료 노즐로 사용되는 Plain-jet Airblast 노즐 대신에 입자 크기를 고려하여 압력식 노즐(Hago, 1.75gallon hollow cone)을 선정하였으며 배관내 연료의 균일한 공급을 위하여 압력식 노즐 5개를 십자형으로 배열하여 구성하였다. 화염안정판은 기존의 비활성 가스 제너레이터를 참고로 하여 90° 원추형으로 설계하였으며 후방연소기의 노즐과 화염안정판의 거리는 13.5cm, 15cm, 20cm로 조절할 수 있도록 하였다. 후방연소기의 연료는 실용화를 대비하여 비교적 저렴한 등유를 이용하였으며 용적식 기어 펌프를 이용하여 노즐에 공급하였다. 실험조건을 요약하면 Table. 3과 같으며 후방연소기의 특성 실험을 위하여 노즐과 화염안정판의 각 거리에 대하여 실험을 수행하였다.

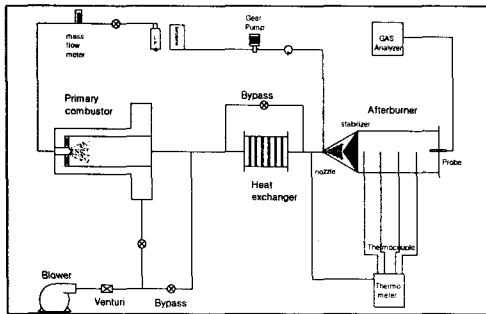


Fig. 8 Schematic diagram of experimental apparatus

Table. 3 Experiment condition

Primary Combustor		O ₂	emission gas
E.R	0.2	16.9 %	CO(15% O ₂)
LPG	10.2 kg/hr	exchanger out temperature	299 ppm
			NO _x (15% O ₂)
Air	800 kg/hr	846K	22 ppm

3. 연소특성실험결과

각 거리에서의 당량비에 따른 화염구조의 가시 화를 Fig. 9에 나타냈다. Fig. 10은 당량비에 따른 온도분포를 나타냈으며, 각 거리에서의 당량비에 따른 배가스 특성을 Fig. 11에 나타냈다.

노즐 선단으로부터 화염안정판의 거리가 13.5cm일 때 당량비 0.35이하에서 소멸 되었고 15cm일 때는 당량비 0.4이하에서 소멸 되었으며 20cm일 때는 당량비 0.45이하에서 소멸 되었다. 거리가 가까워지면서 당량비가 낮은 영역에서 소멸 되는 것은 분사되는 액적 직경이 균일하지 못한 결과로 부분적인 연소가 이루어진 것으로 생각된다. Fig. 9에서 거리가 멀어지면서 화염의 지름이 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 연소공기와 연료의 혼합특성 향상으로 인하여 넓게 연소되는 것으로 보여진다. Fig. 11는 노즐선단부에서 화염안정판까지의 거리에 따른 배가스특성을 나타낸 것인데 15cm 일 때와 20cm일 때의 거리에 대한 배가스의 특성이 뚜렷한 차이를 나타나지 않는 것으로 나타났다. 이에 비하여 13.5cm일 때는 CO, NO_x농도가 높은 결과를 보였다.

주연소기에서 배출되는 CO, NO_x을 볼 때 후방

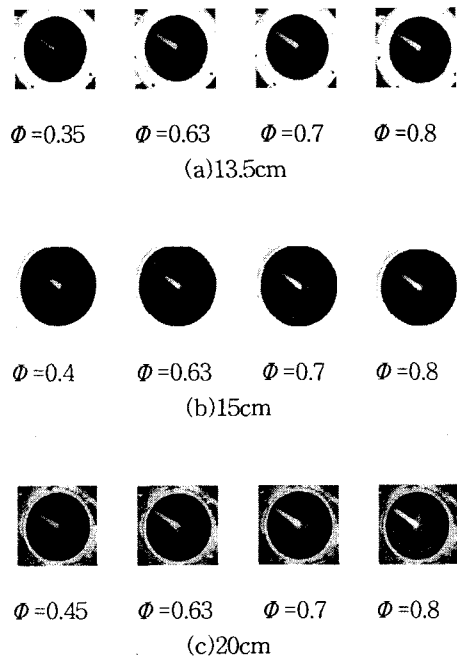
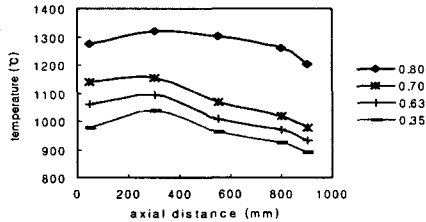


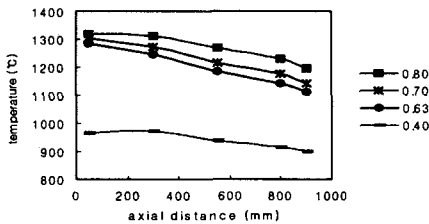
Fig. 9 Flame structures for equivalence ratio at a distance of 13.5cm, 15cm, 20cm

연소기에서 주연소기보다 낮은 농도를 보였다. 이는 후방연소기에서 재연소로 인한 결과라고 생각된다

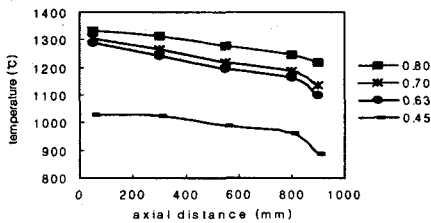
연소특성 실험결과를 토대로 후방연소기의 노즐 선단에서 화염안정판까지 거리는 후방연소기의 크기, 연소특성 및 배가스특성을 고려하여 15cm가 타당하다고 보여진다.



(a)13.5cm

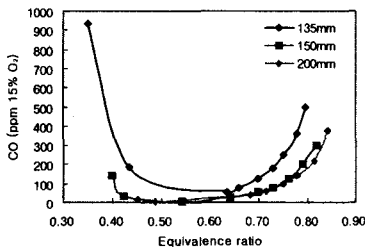


(b)15cm

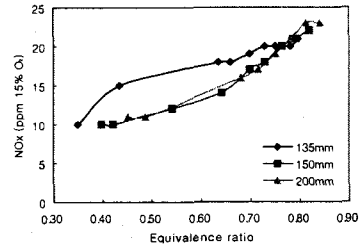


(c)20cm

Fig. 10 Temperature profiles for equivalence ratio at a distance of 13.5cm, 15cm, 20cm



(a) CO



(b)NOx

Fig. 11 CO, NOx Emission profiles for equivalence ratio at a distance of 13.5cm, 15cm, 20cm

4. 결론

IGG의 핵심 부품인 후방연소기를 개발하기 위하여 기존의 후방 연소기를 모델로 하여 각 구성 요소들을 분석하였으며 분석한 자료를 토대로 하여 실험용 후방연소기를 제작하여 성능 실험을 수행하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 비활성 가스 제네레이터의 후방연소기 설계에 있어서 노즐과 화염안정판의 거리 15cm가 타당함을 알 수 있었다.
- (2) 후방연소기의 노즐과 화염안정판까지 거리가 거리 이하로 가까워지면 배가스 특성이 크게 변화함을 알 수 있었다.
- (3) 후방연소기의 노즐과 화염안정판까지 거리가 멀어질수록 화염이 넓어지는 것을 알 수 있었다.
- (4) 후방연소기가 주연소기에서 배출되는 배가스를 저장하는데 효과가 있음을 확인하였다.

참고문헌

- (1) 김수용, 1999, "가스제너레이터 개발을 위한 타당성 조사", 과학기술부 UCN258-687
- (2) A. H. Lefebvre, 1989, "Atomization and Sprays", Hemisphere Publishing.
- (3) MAXON Corporation, "Duct Burner Design Parameter", Reference catalog
- (4) 안국영, 김한석, 안진혁, 배형수, "가스터빈 연소기의 성능평가", 1999, 대한기계학회논문집, B권, 제24권 제10호 p1294-1299.