한국추진공학회 2003년도 춘계학술대회 논문집 pp.211~217 KSPE Spring Annual Meeting 2003

액체로켓엔진의 성능특성연구

장행수*, 이성웅, 조용호, 우유철

Experimental Study on Performance Characteristics of Liquid Rocket Engine

Hyundai MOBIS

ABSTRACT

A liquid rocket engine(LRE) using LO_2/LNG(Liquefied Natural Gas) propellants was experimentally evaluated. The purpose of this study was to investigate the performance of the LO_2/LNG rocket combustor that is composed of three sections(igniter spacer, cylinder and nozzle section), especially focused on the influence of regenerative cooling effect in association with the phase of regenerative coolant. Series of tests were conducted under the conditions of water cooling and regenerative cooling with LNG in the cylinder section and independent cooling with water in the igniter spacer and nozzle sections. Parametric studies on the variation of a chamber pressure and mixture ratio were undertaken. In addition, effect of propellant(LNG) composition and its enthalpy on the performance is examined.

초 록

액체산소와 액화천연가스를 이용한 재생냉각 액체로켓엔진의 특성을 실험적인 방법으로 고찰하였다. 추진제의 상에 따른 재생냉각효과를 규명하기 위하여 물냉각, 천연가스냉각 그리고 액화천연가스 냉각방식 각각에 대해 일련의 시험을 수행하였다. 연소실 압력과 혼합비에 따른 연소특성과 연소성능 변화를 고찰하였으며, 연료의 조성변화와 재생냉각에 따른 연료 엔탈피 변화에 따른 액체로켓엔진의 성능변화를 파악하였다. 시험결과 이론혼합비의 70~75% 값을 가지는 혼합비에서 최대 특성속도가 발생하였으며, 연소성능을 나타내는 chamber coefficient는 0.952~0.98의 값을 보였다.

1. 서 론

액체로켓엔진(LRE)의 combustion chamber는 고온 고압의 연소장에 노출되어 있어 적절한 방식의 냉각이 필수적이며, reusable LRE의 경우 냉각을 통한 엔진의 신뢰성 확보는 매우 중요한 요인으로 작용한다[1, 2]. 액체로켓엔진의 전형적인 냉각방식인 재생냉각은 LRE에 사용되는

* 현대 모비스(Hyundai MOBIS)

추진제를 분사하기 전 연소실 벽을 따라 유동시켜 연소실 벽의 온도를 적정 수준으로 낮출 뿐 아니라, 연소실로부터의 열전달을 통해 재생 냉매로 사용된 추진제의 엔탈피를 증가시켜 LRE의 성능을 향상시키는 것을 목적으로 한다. LRE의 경우 일반적으로 연소실 내부의 온도와 압력이 매우 높아 연소실의 냉각 채널을 따라 흐르는 재생 냉매가 초임계 상태에 놓이게 되므로, 재생 냉매의 상(phase)에 따른 연구가 필수적이다. 본 연구는 재생냉매의 상이 재생냉각 엔진의 연소특성과 성능에 미치는 영향을 규명하기 위하여 독립적인 물냉각 시험과 NG와 LNG를 사용한 재생냉각 시험을 차례로 수행하였다. 또한 추진제의 물성 변화와 연소실 벽면으로의 열전달 예측 기술 및 재생냉각 상태에 따른 성능 특성을 연구하였으며, 연소실압력과 혼합비 등 주요 Parameter들에 대한 Parametric Study와 혼합물인 LNG 성분과 엔탈피 등이 액체로켓엔진의 연소성능에 미치는 영향에 대한 연구도 진행하였다.

2. 본 론

2.1 시험 연소기와 시험설비

당사에서는 LNG/LO_2 추진제 액체로켓엔진의 재생냉각 특성 및 성능 특성 연구를 위해 10톤급 시험용 엔진을 개발하였으며, 엔진 사양은 Table 1과 같다[3, 4]. 연소기는 성능 특성 연구 및 유지보수의 용이성을 위해 Fig. 1과 같이 gas passage, 혼합기(mixing head), 실린더(cylinder section), 노즐(nozzle section) 및 점화장치(igniter spacer)로 구성되어 있다. 이 중 냉각이 필요한 부분은 점화장치, 실린더 그리고 노즐인데, 점화장치와 노즐은 물냉각을 통해 냉각되고 실린더는 물, NG 그리고 LNG를 통해 각각 냉각되는 독립 냉각 형태를 갖는다. 재생냉각 시험을 위해 운영하고 있는 시험설비는 추진제 공급시스템, 고압질소 시스템, 제어계측 시스템, 냉각수 공급시스템 그리고 후류 처리장치로 구성된다.

Table 1. 시험용 엔진 사양

인젝터 Type		Shear Co-axial
인젝터 갯수		91
엔진 소재	내벽	동합금
	외벽	SUS
점화방식		Spark plug ignition
연소실 직경[mm]		176
노즐 목 직경[mm]		101.2
노즐 팽창비		9.849

Fig,. 2에서 보는 바와 같이 LNG 재생냉각 연소시험 설비는 이중배관으로 되어 있는 LNG 공급 배관을 액체를 사용하여 사전 냉각하여 액체상태로 LNG를 유지, 공급하는 형태이다. LNG는 고압의 천연가스나 질소가스를 이용해 가압하여 적정 유량을 공급하여 준다. 이때 문제는 LNG보다 온도가 낮은 액체질소를 이용해 냉각하기 때문에 과냉에 의해 액체질소에 LNG가 결빙하는 것을 방지하면서 적정 냉각 온도를 만들어줘 액체상태의 추진제 공급에 차질이 없어야 한다. 또한 추진제는 액체상태로 공급되기 때문에 혼합물인 LNG의 성분에 대한 관리는 매우 중요하다. 따라서 정확한 성분을 얻기 위해 시험 전·후와 시험 중 엔진에 공급된 LNG를 채취하여, gas chromatograph를 이용하여 메탄을 비롯한 탄화 수소물과 무기가스를 정성, 정량화하여 각각의 구성 성분의 성분비를 구하였다.

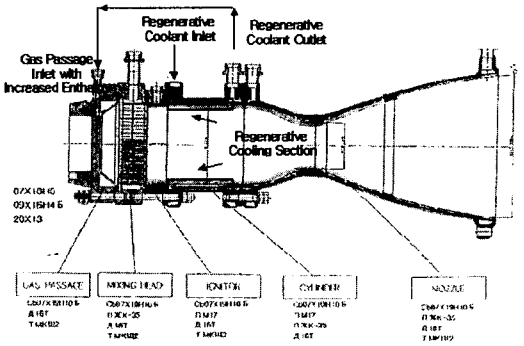

Fig. 1 Configurations of LRE with regenerative cooling system in the cylinder section.

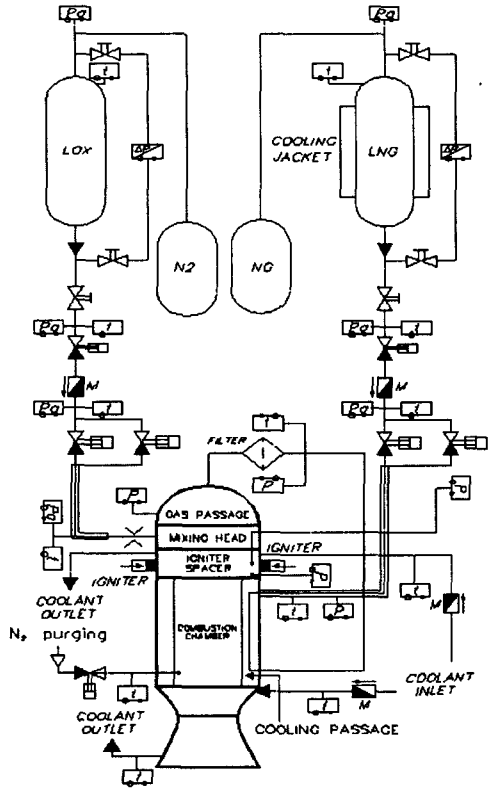

Fig. 2 Schematic of pressurization system and test setup. Rectangular lines depict double pipe line for propellant cooling.

성분비 비균일에 따른 시험의 불확실성을 최소화하기 위하여 BOG 가스를 이용해 천연가스 내 메탄 성분의 조성을 높여주었으며, 점화장치와 노즐의 냉각을 위해 공급하는 냉각수가 냉각 유로에서 끓는 점 이상으로 가열되어 냉각 유로가 파열되는 것을 방지하기 위해 냉각 유로 끝에 오리피스를 달아 냉각 유로를 따라 흐르는 냉각수의 압력을 3MPa 이상으로 유지하여 냉각수의 끓는점을 증가시켰다. 또한 연소기 내에서 추진제가 점화되지 않았을 경우 안전을 위하여 수소와 천연가스를 사용한 2개의 afterburner를 설치, 연소기 내에서 점화가 되지 않더라도 노즐을 빠져나오는 순간 afterburner에 의해 연소되도록 하였다.

Table 2. Test conditions of alternative Cooling(H_2O) and regenerative cooling(NG/LNG).

Exp. No.		추진제유량 [kg/s]		혼합비		연소실압력 [MPa]
		LO_2	NG	MR	α	
대체냉각	W1	11.74	4.76	2.46	0.63	3.66
	W2	24.5	9.63	2.55	0.66	7.61
	W3	23.9	7.74	3.09	0.79	7.11
	W4	12.3	3.64	3.38	0.87	3.53
	W5	27.5	8.07	3.42	0.87	7.74
재생냉각	N2	15.17	7.59	2.0	0.51	5.1
	N2	16.61	6.61	2.51	0.66	5.3
	L1	15.7	12.4	1.27	0.33	4.88
	L2	17.95	6.15	2.92	0.74	4.82
	L3	17.42	5.60	3.11	0.78	4.88

2.2 시험방법

본 연구를 위한 재생냉각 연소시험은 LRE 전체를 물로 냉각하는 대체냉각 연소시험과 LRE의 실린더 부분의 경우 연료 추진제를, 나머지 부분의 경우 물로 냉각하는 재생냉각 시험으로 대별된다. Table 2는 대체냉각 시험과 재생냉각 시험 조건을 보여주고 있다. 이때 시험 기호 W는 대체냉각, N은 NG 냉각 그리고 L은 LNG 냉각을 의미한다. 혼합비 α는 stoichiometric 혼합비에 대한 실제 혼합비의 비로서 산화제 과잉 정도를 나타낸다.

대체냉각 연소시험은 물을 사용하여 혼합비와 연소실 압력을 달리하며 5회의 연소시험을 수행하였다. 냉각수의 냉각 유로 입출구 온도를 측정하여 냉각제가 얻은 열량을 측정하였다. 각 연소 시험 시 일련의 시험 변수들이 정상상태를 유지하는데 필요한 충분한 시간이 되도록 7초 이상 수행하였다.

대체냉각 시험결과 냉각 채널에서 추진제는 초임계 상태(supercritical state)이므로, 대체재생냉매의 경우 냉각 채널에서 상변화가 없다고 간주할 수 있으나, 실제로는 임의 상의 성질의 편향성을 배제할 수는 없다. 따라서 재생냉매를 사용한 재생냉각 시험의 경우 액상의 재생냉매(LNG)와 기상의 재생냉매(NG) 각각을 사용하여

재생냉매의 상에 따른 재생냉각 효과(재생냉각 안정성, 재생냉매 상에 따른 엔진 성능 변화 등)를 파악하고자 하였다. 재생냉각 시험은 Table 2에서 보는 바와 같이 대체 냉각시험과 유사한 시험조건에서 수행하였으며, 향후 상대적으로 우위에 있는 상의 추진제를 이용하여 LRE 전체에 대해 재생냉각 시험을 수행하도록 할 예정이다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 본 시험에서 사용된 LRE의 경우 실린더로 유입된 재생냉매는 냉각 채널을 따라 실린더를 냉각하면서 고온 고압의 연소실로부터 열에너지를 전달받아 가스 상태로 혼합기로 들어가 인젝터를 통해 연소실로 분사된다. 이때 재생냉각 방향은 시험 전 계산 예측결과 순방향(연소가스 분사방향)과 역방향에 무관하게 거의 유사한 온도 상승을 나타냈으며, 시험 조건에 따라 0.7 ~ 2.0 %정도의 변화를 보였다. 순방향 재생냉각의 경우 연소실 벽면에 손상이 발생하여 냉각제가 유출될 경우 냉각 유로 면을 따라 흘러 연소 가스로부터 벽면을 보호해 주는 효과가 있어, 안전을 고려하여 순방향 재생냉각 방식을 택하였다. 일련의 시험은 급격한 압력 상승으로 인한 엔진의 과부하를 방지하기 위하여 혼합비 1.0, 연소실 압력 3.5 MPa의 보조 모드를 통해 1차 점화시킨 후 설정 모드로 재 점화하여 원하는 압력으로 승압하는 방식을 적용하였다. 엔진 정지 시에도 보조모드를 거쳐 소화시켜 엔진 운용에 있어 안전을 도모하였다.

2.3 시험결과

Fig. 3은 시험 조건에 따른 이론 특성속도($C^*_{theo.}$)와 대체냉각시험, 재생냉각 시험결과로 계산한 실제 특성속도($C^*_{exp.}$, 이하 특성속도) 값을 보여주고 있다. 대체냉각 시험과 NG 재생냉각 시험을 통해 NG 재생냉각의 경우 대체냉각에 비해 연소실 벽으로 손실되는 열에너지가 추진제 엔탈피로의 환원되어 에너지 이득을 얻을 수 있을 뿐 아니라, 환원된 열에너지가 혼합기로 유입되는 추진제의 엔탈피 상승시켜 상대적으로 향상된 연소특성 나타내는 등의 부가적인 이득이 발생한다는 것을 알 수 있다.

LNG 재생냉각 시험의 경우 특성속도 값이 대체냉각이나 NG 냉각 시험에서의 값에 비해서 크게 낮은 것을 볼 수 있는데 이는 LNG 재생냉각 시험의 추진제의 엔탈피가 NG 재생냉각시험에 비해 크게 낮고, 분사되는 추진제의 밀도가 크고 속도가 느려 혼합성능이 떨어지기 때문이다. 대체냉각 시험의 경우 stoichiometric mixture ratio의 약 75% 정도의 혼합비(α)에서 최대 특성속도 값을 가지는 포물선 형태를 보이므로, L1의 경우 매우 낮은 혼합비(L2와 L3의 약 1/3 수준이다)로 인해 특성속도가 일련의 다른 시험과 비교할 때 상대적으로 매우 낮은 특성속도 값을 보인다[5, 6]. 또한 NG 재생냉각의 경우 인젝터에서 분사되는 연료의 경우 기상에 가까운 열역학적 물성을 보임에 반해, L1의 경우 분사기에서 낮은 온도의 vapor 또는 액상에 가까운 열역학적 물성을 가지는 상태로 연료가 분사되어 연료의 밀도가 증가하게 된다. 그 결과 분사 속도가 L2와 L3의 20% 수준으로 낮아지며 엔탈피 또한 감소하게 되어 특성속도가 감소된 것으로 추정된다. L2와 L3의 경우도 유사한 혼합비(α)의 NG 재생냉각시험이나 대체냉각 시험에 비해 상대적으로 낮은 특성속도 값을 보였다.

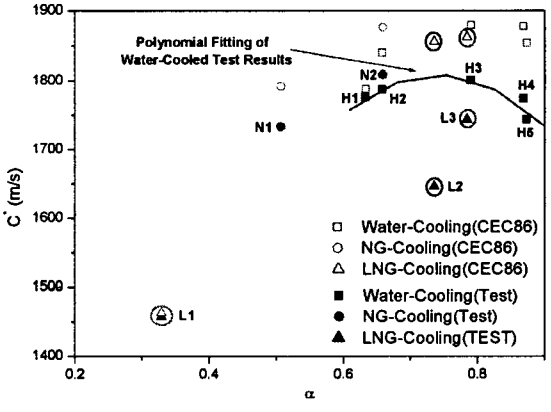

Fig. 3 Characteristic velocity variations with mixture ratio α.

Table 3. Characteristic velocity for W2-N2 and W3-L3

Test compared	Exp. No	α	C^* [m/s]
H_2O/NG	W2	0.66	1787
	N2	0.66	1809
	% difference		1.2
H_2O/LNG	W3	0.79	1800
	L3	0.78	1744
	% difference		3.13

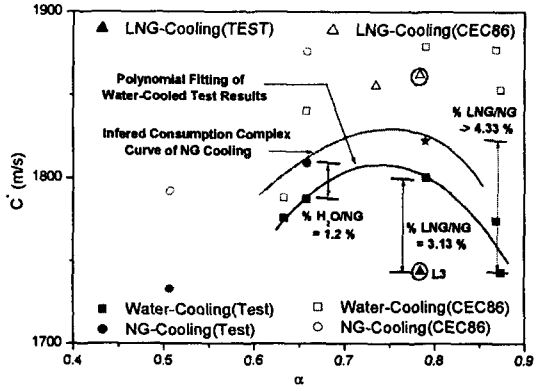

Fig. 4 Characteristic velocity prediction for NG regenerative cooling.

따라서 LNG 재생냉각 시험의 경우 인젝터에서 기상으로 분사되어 상대적으로 엔탈피 수준에서 우위를 가지는 대체냉각이나 NG 재생냉각에서의 특성속도 이득과 같은 재생냉각의 효과를 도출할 수는 없었다. 이때 재생냉각 시험의 경우 대체냉각 시험과는 다른 혼합비(α)에서 최대 특성속도 값이 발생할 것으로 판단된다. Table 3과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 L3의 경우 α ≒ 0.79에서 대체냉각 시험에 비해 약 3.13%의 차이를 보이며, α ≒ 0.66에서 NG 재생냉각의 경우 대체냉각에 비해 약1.2% 정도 높은 값을 보였다. NG 재생냉각의 혼합비(α)에 따른 특성속도 값이 대체냉각의 경우와 유사한 형태를 보일 것이므로 α ≒ 0.79에서 NG 냉각과 LNG 냉각은 4.33% 정도 차이를 보일 것으로 예상된다(Fig. 4의 ★). 따라서 3개의 NG 재생냉각 특성속도를 curve fitting하면 Fig. 4에서 보는 바와 같은 혼합비(α)에 따른 특성속도 변화 곡선을 예상할 수 있다.

Fig. 5는 연료(전술한 바와 같이 재생냉각의 경우 재생냉매, 대체냉각의 경우 NG)의 혼합기 유입 온도에 따른 특성속도 변화를 보여주고 있다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 LNG 재생냉매의 경우 혼합기 유입 온도가 낮아 대체냉각이나 NG 재생냉각에 비해 낮은 특성속도를 가진다(L1과 L2). L1과 L2를 제외하면 전체적으로 혼합기 유입 온도변화에 따른 현격한 특성속도 변화는 없었다. LNG 재생냉각 시험 중 L2와 L3의 경우 주어진 혼합기 유입온도에서 CEC86을 통해 예측한 특성속도 값은 거의 같은 값을 보이는데, 실제의 시험에서 상대적으로 큰 차이를 보였다. Fig.4와 Fig.5를 비교해보면 특성속도는 추진제의 온도보다는 혼합비에 더 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 연소실 압력 변화에 따른 특성속도 변화를 보여주고 있다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 특성속도는 연소실 압력과 거의 무관하다는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 일련의 냉각방식에 있어서 혼합비(α)에 따른 chamber coefficient 변화를 보여주고 있다. 수치계산을 통한 이론적인 특성속도($C^*_{theo.}$) 값에 대한 실제 연소실에서의 특성속도($C^*_{exp.}$) 값의 비인 chamber coefficient는

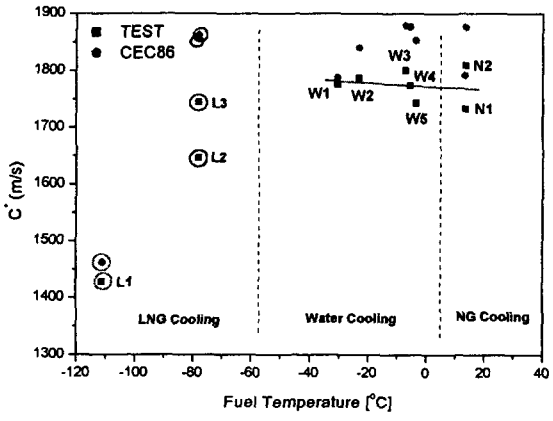

Fig. 5 Characteristic velocity variation with fuel temperature at inlet of cylinder

연소의 완성도를 나타내는 지표로서 추진제의 vaporization, mixing, heat loss, kinetic loss 및 boundary layer 등에 의한 손실 등을 포함한다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 LNG 재생냉각의 경우 NG 재생냉각과 대체냉각 시험에 비해 낮은 값을 보이는 것을 알 수 있다. 인젝터 분사속도 차는 추진제의 vaporization과 mixing에 매우 중요한 영향을 미치는 인자로, 인젝터 분사속도 변화에 따라 chamber coefficient 값이 영향을 받는다. LNG 재생냉각 시험의 경우 NG 재생냉각에 비해 상대적으로 높은 밀도의 LNG가 인젝터를 통해 분사되기 때문에 산화제인 액체산소와의 속도차가 작을 뿐 아니라, 두 추진제 간의 온도차가 NG 재생냉각이나 대체냉각과 비교할 때 상대적으로 매우 작아 chamber coefficient 값이 낮아질 수 있다. 재생냉각 시험의 경우 연소실 벽면으로의 열전달에 의한 에너지 손실이 재생냉매로 환원되는 반면, 대체냉각의 경우 추진제로 냉각을 하지 않기 때문에 열손실은 환원되지 않는다. 따라서 동일한 비교 조건을 만들기 위해 대체냉각 시험의 경우에도 대체냉매로 흡수된 열 에너지를 분사되는 연료 추진제의 엔탈피 증가로 환원하여 chamber coefficient를 계산하였다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 혼합비(α)가 증가할 때 chamber coefficient값 또한 증가하는 것을 알 수 있다.

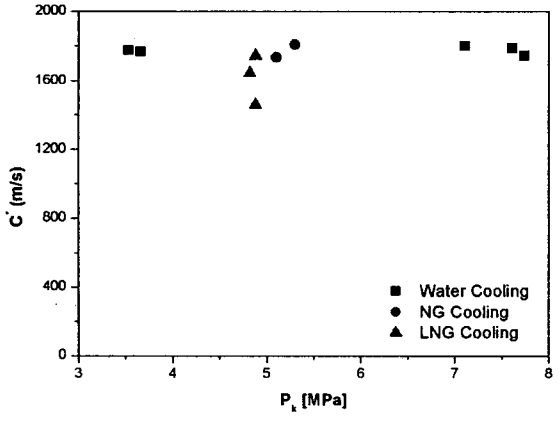

Fig. 6 Characteristic velocity variation with chamber pressure

L1의 경우 다른 LNG 시험에 비해 상대적으로 높은 Chamber coefficient를 갖는데 이것은 앞서 언급한 혼합비와의 관계에 역행하는 것으로, 혼합비는 낮으나 다른 시험에 비해 상대적으로 낮은 엔탈피와 높은 밀도의 추진제로 인젝터에서 상대적으로 높은 추진제 상대속도에 따른 혼합성능의 향상을 추측할 수 있으나, 저 혼합비에서 CEC86의 물성치 계산상의 한계 혹은 오류일 가능성도 배제할 수 없다. 그러나 현재 시험데이터 만으로는 단정 짓기 어려운 관계로 인해 향후 일련의 추가 시험을 통해 규명할 것이다.

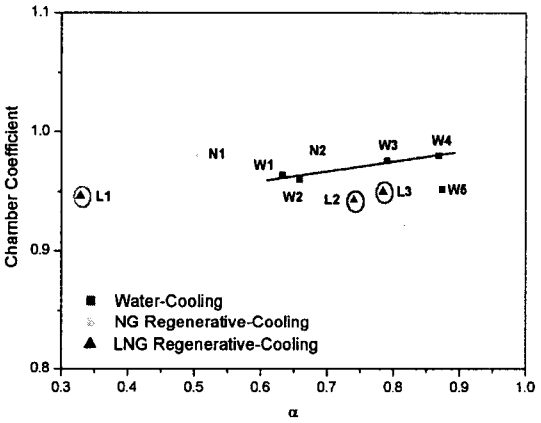

Fig. 7 Chamber coefficient variation with mixture ratio α

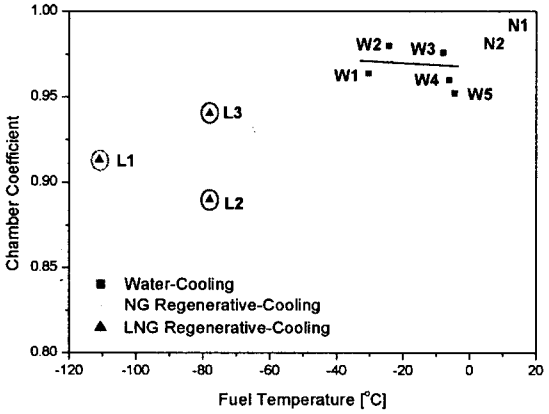

Fig. 8 Chamber coefficient variation with fuel temperature at inlet of cylinder

LNG 재생냉각 시험의 경우 냉각의 안정성은 측면에서는 우수하나, 연소성능 면에서는 NG 재생냉각 시험이나 대체냉각 시험에 비해 상대적으로 떨어지는 것을 볼 수 있는데, 이를 통해 LNG를 사용한 액체로켓엔진 재생냉각시스템 설계에 있어 LNG의 연소실 유입 온도에 따라 연소성능이 크게 변한다는 것을 알 수 있다. 따라서 냉각 측면에서는 최대 허용온도로 LNG를 연소실에 공급해 주는 것이 가장 바람직하다는 결론을 얻을 수 있다.

재생냉각을 통한 재생냉매의 온도상승이 chamber coefficient에 미치는 영향을 보기 위해 Fig. 8에서와 같이 연소실로 유입되는 연료의 온도에 따른 LNG 재생냉각, NG 재생냉각 및 대체냉각 시험에 대한 그래프를 그려보았다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 chamber coefficient는 연소실 유입 연료의 온도와 비례한다는 것을 알 수 있으며, NG 재생냉각의 경우 가장 높은 온도로 연소실로 유입되므로 chamber coefficient 값이 가장 높게 나타나며 추진제의 엔탈피가 낮고 인젝터의 상대 분사 속도가 작은 LNG 재생냉각의 경우 상대적으로 낮은 chamber coefficient 값을 보인다는 것을 확인할 수 있다.

3. 결 론

혼합비에 대한 재생냉각엔진에 대한 parametric study를 위해 연소실압력을 고정하고 혼합비를 변화시켜 성능 특성을 관찰하였다. 결론은 다음과 같다.

1. 재생냉각 시험을 통해 엔탈피가 낮고 밀도가 높은 LNG의 공급에 따라 특성속도와 chamber coefficient 값의 저하가 있었으며, 혼합비와 연소실 압력에 대한 경향은 혼합비와 포물선 형태의 관계를 연소실 압력의 영향은 크지 않은 것으로 밝혀졌다.

2. 극저온 유체인 LNG의 경우 물과 NG에 비해 상대적으로 낮은 온도의 액체질소를 이용하여 냉각·공급하기 때문에 과냉각 또는 냉각부족 등과 같이 적정 온도로 추진제를 공급하는데 많은 어려움이 발생하였다. 특히 L1에서는 추진제의 온도가 매우 낮아 LNG 성분이 결빙할 수 있는 문제점이 발생하여 정확한 물성 파악이 어려웠으며, 그 결과 특성속도를 계산함에 있어 이에 따른 오차가 수반되었을 것으로 판단된다. 또한 L1과 같은 낮은 추진제 혼합비가 발생할 경우 CEC86을 이용한 thermodynamic calculation 상에서도 오차가 발생하였을 것으로 추정된다.

참 고 문 헌

1. D. K. Huzel and D. H. Huang, "Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines," Vol. 147, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, 1992
2. O. H. Mayer, "TEKAN-Research on Cryogenic Rocker Engines at DLR Lampoldshausen," AIAA 2000-3219, 36th AIAA/ASME/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 16-19 July 20002.
3. 장행수, 한풍규 외, "천연가스/액체산소를 사용하는 액체로켓엔진의 열유동 특성 분석," 한국항공우주학회 2001 추계학술대회
4. 장행수, 한풍규, "액화천연가스 로켓엔진의 재생냉각 특성연구," 한국추진공학회 2002 춘계학술대회
5. H. Miyajima and K. Nakahashi, "Low-Thrust LO2/LH2 Engine Performance with a 300:1 Nozzle," Journal of spacecraft, Vol. 22, No. 3, March-April, 1985
6. H. Tamura, F. Ono and et al, "LOx/Methane Staged Combustion Rocket Combustor Investigation," AIAA-87-1856, 23th AIAA/SAE/ASME/ASEE Joint Propulsion Conference, June 29-July 2, 1987