

論文

이중 와류 동축형 분사기의 연소안정성 평가에 관한 연구

이광진*, 서성현*, 김홍집*, 한영민*, 최환석*, 이수용**

A Study on the Combustion Stability Evaluation of Double Swirl Coaxial Injector

Kwang-Jin Lee*, Seonghyeon Seo*, Hong-Jip Kim*, Yeoung-Min Han*,
Hwan-Seok Choi* and Soo-Yong Lee**

ABSTRACT

A liquid rocket thrust chamber should have a high confidence in its combustion performance and combustion stability. Especially, the injector of which function is spraying and mixing propellants plays an important role in getting the confidence. This study was carried out to evaluate combustion stability of a double swirl coaxial injector by using the model similarity method. Besides, in case of a baffle which was used to improve combustion stability, the length and gap effects of the baffle were investigated.

초 록

액체로켓엔진 연소기는 연소성능 및 연소안정성 분야에 있어서 높은 신뢰도를 가져야 한다. 특히, 추진제의 분무와 혼합을 담당하는 분사기는 이러한 신뢰도를 결정짓는 중요한 요소이다. 본 연구는 모델 상사 기법을 이용하여 이중 와류 동축형 분사기의 연소안정성 특성을 평가하였다. 또한 연소안정성 증대를 위해 사용하는 배플의 경우 길이 및 간극 변화로부터 나타나는 효과를 검토하였다.

Key Words : Combustion Stability(연소안정성), Double Swirl Coaxial Injector (이중 와류 동축형 분사기), Model Similarity Method(모델상사기법)

1. 서 론

액체로켓엔진을 구성하는 다양한 구성품 중에서 연소기는 엔진의 비추력을 결정짓는 중요 요소로서 연소성능과 연소안정성 측면에서 신뢰도가 입증되어야 한다. 높은 신뢰도를 갖는 연소기를 개발하기 위해서는 무엇보다 추진제의 분무와 혼합을 담당하는 분사기의 개발이 중요하다고 하

겠다. 액체로켓엔진용 연소기에 사용되는 다양한 분사기중 이중 와류 동축형 분사기는 러시아를 비롯한 발사체분야 선진국에서 많이 사용하고 있는 형상으로 연소성능과 연소안정성이 우수한 것으로 알려져 있다[1]. 연소성능과 연소안정성의 최종적인 검증은 실물형 연소기에서 이루어지지 만 실물형 연소기를 개발하는 과정에서 다양한 방법을 적용하고 비교 검토함으로써 신뢰성이 높은 연소기 설계방안을 제시할 수 있다.

본 연구에서는 연소기 개발 과정에서 이루어지는 방법 중 하나인 연소안정성 파악을 위한 모델 상사 기법을 이용하여 이중 와류 동축형 분사기의 연소안정성 마진을 예측하고 연소안정성 증대

† 2006년 9월 12일 접수 ~ 2006년 11월 23일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원 연소기그룹

** 정회원, 한국항공우주연구원 우주발사체추진기관실
연락처, E-mail : lkj@kari.re.kr
대전광역시 유성구 어은동 45번지

를 위해 널리 사용되고 있는 배플의 효과도 살펴 보고자 한다.

II. 본 론

2.1 시험방법

연소안정성 파악을 위한 모델 상사 기법은 몇 가지의 물리적 조건들에 대한 가정에서 출발하게 되며 그 주요 관점은 액체로켓엔진 연소기내에서 발생하는 여러 과정 중에서 음향학적 진동을 지배하는 물리적 현상을 혼합과정으로 간주하는 것이다[2~5]. 특히 연소실내의 압력이 추진체의 임계 압력을 초과하는 경우에는 연소실내로 분무되는 액적의 상(phase)을 분간할 수 없기 때문에 혼합과정을 연소 현상에 영향을 주는 주요 요소로 가정할 수 있다. 이 기법을 이용한 시험을 수행하기 위해서는 먼저 대상이 되는 실물형 연소기의 음향학적 공진 주파수를 계산하여야 한다. 본 시험의 대상이 되는 실물형 연소기의 내경은 380 mm, 노즐 목 직경은 189.8 mm 이고 노즐 목까지의 길이는 413 mm 이다. 일반적으로 실물형 연소기에서 가장 발생빈도가 높은 음향공진 모드는 1T 모드로 알려져 있으며 이 주파수는 식 (1)을 이용하여 계산 할 수 있다[1]. 식 (1)에서 λ_{lmn} 은 횡 방향 모드의 고유값, R_c 는 연소실 반지름, L_c 는 연소실 유효 길이, l 은 종 방향 모드, m 은 접선방향 모드 그리고 n 은 반경방향 모드를 의미한다. 식 (1)을 계산하는데 필요한 음속 값은 CEA code [6]를 이용하면 쉽게 계산이 되며 이를 통해 얻어진 1T 모드의 주파수는 설계 점에서 1840 Hz가 된다.

$$f_{lmn} = \frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda_{lmn}^2}{R_c^2} + \frac{l^2 \pi^2}{L_c^2}} \quad (1)$$

$$l, m, n = 0, 1, 2, \dots$$

이 주파수를 동조시키고 실물형 연소기와 모델 상사 시험의 음속(C)값을 식 (1)에 대입하여 계산하면 직경 130 mm, 축 방향 길이 280 mm의 모델 연소실 사이즈를 구할 수 있다. 실 유체를 적용한 연소 시험 시에는 액체산소를 산화제로 케로신을 연료로 사용하게 되는데, 본 시험에서는 앞에서 기술한 바와 같이 혼합 과정이 연소 불안정에 가장 큰 영향을 미치는 메커니즘이라 가정할 상태에서 산화제로는 기체 산소를 연료로는 메탄을 모의 추진체로 사용하였다. 혼합 과정에 가장 큰 영향을 주는 물리량은 분사기 출구에서의 추진체 운동량 비가 되며 실제 조건과 모델

Table 1. Experimental condition

model	real
$\bar{Q}_m = Q_{o,m}/Q_{f,m} = 1.83$	$\bar{Q}_a = Q_o/Q_f = 1.83$
$K_{m,m} = \dot{m}_{o_2}/\dot{m}_{CH_4} = 3.66$	$K_{m,a} = 2.77$
$\alpha_m = K_m/L_o = 3.66/4 = 0.92$	$\alpha_a = 0.81$
$\bar{\rho}_m = \rho_{o_2}/\rho_{CH_4} = 2.0$	$\bar{\rho}_a = 1.51$
$q_m = \bar{Q} \times \bar{\rho}^{0.5} = 2.6$	$q_a = 2.25$

시험 조건에서의 밀도비 및 속도비는 식 (2)와 식 (3)으로 계산된다. 또한 시험결과 분석에 사용되는 변수로 산화제 과잉인자(α)를 사용하기도 하는데 이 값은 식 (4)로 계산된다. 식 (2)~(4)로 계산된 설계점에서의 상사 조건은 Table 1과 같다. Table 1에서 $Q_{o,m}$ 는 모의 산화제의 체적 유량(l/s), $Q_{f,m}$ 는 모의 연료의 체적 유량(l/s), Q_o 는 산화제의 체적 유량(l/s) 그리고 Q_f 는 연료의 체적 유량(l/s)을 의미한다. 모델 상사 시험으로부터 얻어진 결과는 실물형 연소기의 시험조건으로 역변환을 수행하여 연소안정성 마진(margin)을 계산하게 되며 이를 위해 먼저 산화제 과잉인자와 특성배기속도간의 관계식을 찾아내고 이후 특성배기속도와 연소실 압력과의 관계식을 이용하여 예상되는 압력을 구한다. 얻어진 압력은 식

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_o}{\rho_f} = \frac{\rho_{o,m}}{\rho_{f,m}} \quad (2)$$

$$q = \bar{\rho}^{0.5} \bar{U} = \frac{A_f}{A_o} \times \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_f} \times \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_o}} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{K_m \left(\frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_f} \right)}{L_o (\text{stoichiometric ratio})} \quad (4)$$

여기서,

ρ_o : 산화제 밀도 (kg/m^3)

ρ_f : 연료 밀도 (kg/m^3)

$\rho_{o,m}$: 모의 산화제 밀도 (kg/m^3)

$\rho_{f,m}$: 모의 연료 밀도 (kg/m^3)

\dot{m}_o : 산화제 질 유량 (kg/s)

\dot{m}_f : 연료 질 유량 (kg/s)

A_o : 분사기의 산화제 유출 면적 (m^2)

A_f : 분사기의 연료 유출 면적 (m^2)

$$R = \left[\left(\frac{\Delta P_{ch}}{P_{ch,a}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta K_m}{K_{m,a}} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (5)$$

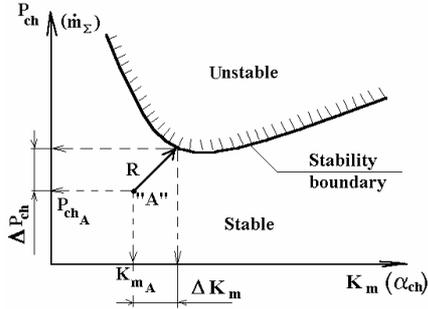


Fig. 1. Diagram of combustion stability margin

(5)를 사용하여 연소안정성 마진(R)을 계산하고, 이 값은 각각의 조건에 대한 비교 값으로 사용하게 된다. 식 (5)의 $K_{m,a}$ 는 추진제 혼합비를 그리고 $P_{ch,a}$ 는 연소실 압력을 의미한다.

2.2 시험장치

모델 상사 시험에 사용된 분사기는 이중 와류 동축형 분사기로 그 형상은 Fig. 2와 같으며 산화제 홀의 개수는 8개 연료 홀의 개수는 4개이다. 산화제 출구부의 직경은 4.1 mm, 연료 출구부의 직경은 8.1 mm이고 설계점에서 산화제의 축방향 유속은 24 m/s, 연료의 축방향 유속은 11 m/s 정도가 된다. 모델 상사 시험에 사용된 배플의 형상은 Fig. 3과 같으며 축 방향 길이는 30 mm, 50 mm 그리고 70 mm가 사용되었다. 또한 배플 간의 간극 차에 의한 효과를 알아보기

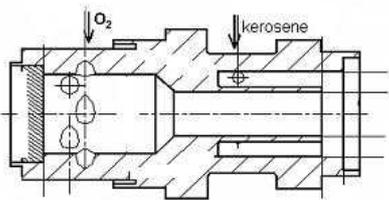


Fig. 2. Schematic of injector

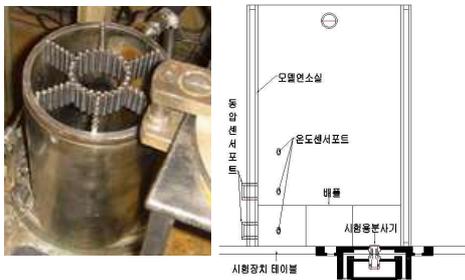
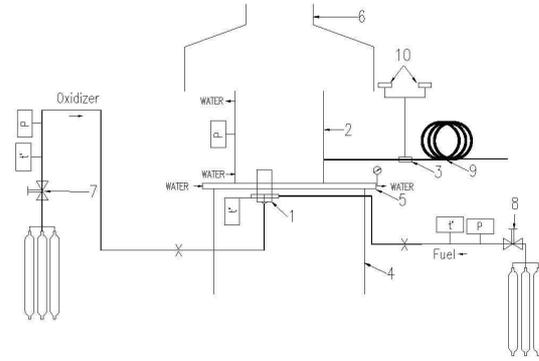


Fig. 3. Model chamber and baffle



- 1: 모델시험용 분사기 헤드
- 2: 모델연소실
- 3: 계측센서
- 4: 시험장치 지지대
- 5: 시험장치 테이블
- 6: 배기덕트
- 7:8: 유량조절밸브
- 9: waveguide
- 10: 계측장비

Fig. 4. Schematic of experimental apparatus

위해 축 방향 길이 50 mm인 배플에서 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm 그리고 0.5 mm의 간극을 갖는 배플을 설계하였다. 전체적인 시험장치의 개략도는 Fig. 4와 같으며 유량조절은 choking orifice를 사용하였고 시험에 사용된 산화제는 기체산소를 연료로는 메탄을 사용하였다. 시험에 사용된 130 mm 내경의 모델연소실은 물냉각이 되도록 제작되었고 모델시험용 분사기 헤드는 시험용 배플의 블레이드 사이에 위치하게 된다.

2.3 시험결과

배플 없이 이중 와류 동축형 분사기만으로 이루어진 시험결과가 Fig. 5에 나타나 있다. 시험결과로부터 얻어진 연소안정성 마진은 대략 small amplitude 기준으로 157 %와 large amplitude 기준으로 187 % 정도가 된다. small amplitude는 불안정모드가 발생하지 않은 정상상태에서의 노이즈 레벨에 비해 2~3배가 되는 섭동 크기를 보이는 구간을 말하며 large amplitude 구간은 small amplitude 구간에 비해 3배 이상 되는 섭동 크기를 보이는 구간을 말한다. 모델 상사 연소시험에서는 시험 조건의 변화 방식에 따른 hysteresis 구간이 존재하는데 이 구간은 시험 경로의 방향성 변화로 확인 할 수 있다. 시험결과로 얻어진 연소안정성 마진의 정량적 의미를 찾는 것은 앞으로 해결해야 하는 과제로서 초기에 세웠던 가정을 바탕으로 시험조건을 단순화 하는 과정에서 생략된 값의 정도에 크게 영향을 받으리라 사료된다. 또한 일반적으로 연소안정성을 증대시키기 위해 사용되고 있는 배플의 성능을

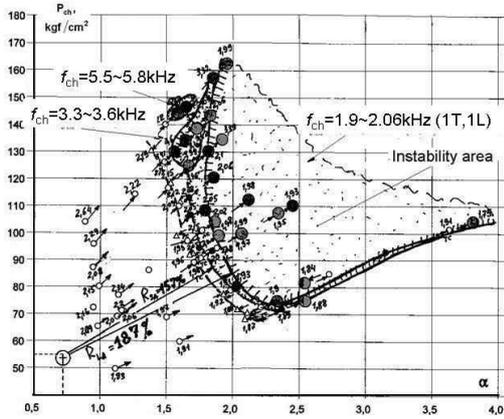


Fig. 5. Combustion instability boundary without baffle

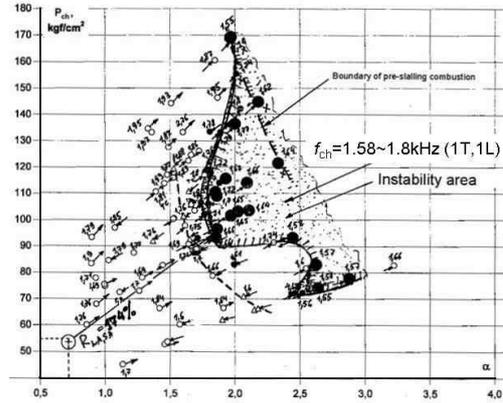


Fig. 6. Combustion instability boundary in case of 30 mm length baffle installed

길이에 따라 비교평가하기 위하여 배플이 장착된 이중 와류 동축형 분사기의 연소안정성 평가시험을 수행하였고 그 결과가 Fig. 6~Fig. 8에 나타나 있다. Fig. 6~Fig. 8은 배플 길이가 각각 30 mm, 50 mm, 70 mm인 경우의 시험결과로 여기서도 역시 hysteresis 영역이 존재함을 알 수 있다. 시험결과에서 보여주는 symbol 중 ○는 정상상태의 연소 구간을, ●는 불안정이 발생한 연소 구간을 보여준다. ●의 크기는 발생한 섭동의 크기를 보여주는 것으로 크기가 증가할수록 large amplitude 불안정 연소가 나타남을 의미한다. 시험결과로부터 불안정 발생 영역에 대한 연소안정성 마진을 계산하여 보면 배플의 길이가 30 mm인 경우 174 % 정도이며 50 mm인 경우에는 160 % 전후의 값을 보여준다. 70 mm인 경우에는 250 % 정도의 값으로 가장 높은 연소안정성 마진을 보여주는데 70 mm 배플에서 급격한 연소안정성 마진의 증가는 단순히 접선방향 모드를 막아주는 역할에서 배플이 공명기의 역할까지 수행했기 때문으로 판단된다. 연소안정성 마진으로 비교하는 경우 배플 길이 70 mm가 가장 높은 결과를 보임을 알 수 있다.

하지만 배플 길이 30 mm와 50 mm에서 발생한 섭동의 크기는 배플이 없이 이중 와류 동축형 분사기만을 가지고 시험을 수행한 경우 발생한 섭동의 크기에 비해 작은 값을 보여준다. 발생한 연소불안정 주파수에 대한 섭동의 크기를 Fig. 9에 제시하였다. 배플이 길수록 불안정 섭동의 크기는 감소되며 연소안정성 마진은 증가하지만 실물형 연소기에 적용하기 위해서는 배플의 제작방식 및 냉각성능을 고려한 길이가 선정되어야 한다.

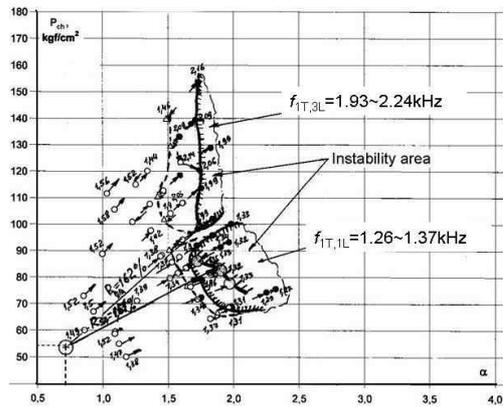


Fig. 7. Combustion instability boundary in case of 50 mm length baffle installed

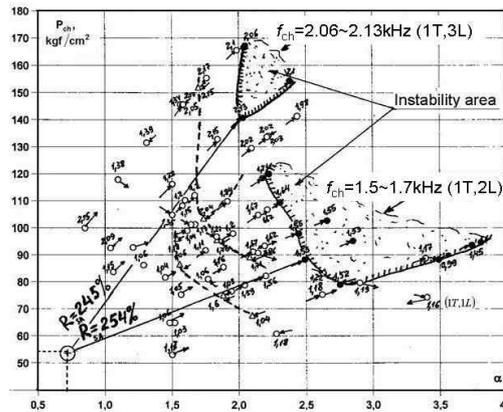


Fig. 8. Combustion instability boundary in case of 70 mm length baffle installed

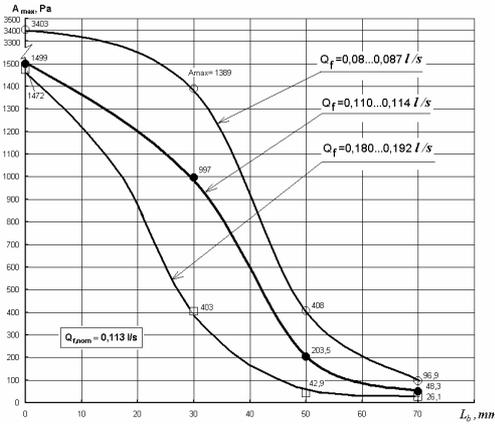


Fig. 9. Spectrum analysis to baffle length

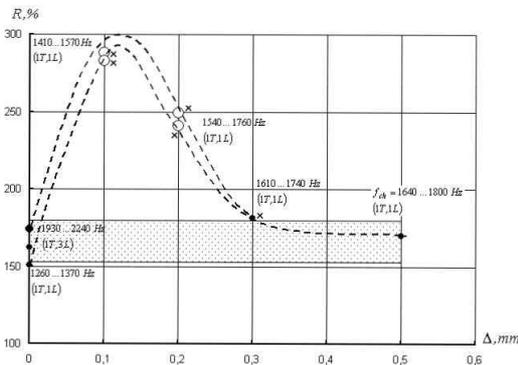


Fig. 10. Combustion stability margin to baffle gap

마지막으로 간극이 있는 배플이 장착된 이중 와류 동축형 분사기의 모델 시험을 수행하였다. 실물형 연소기에 장착하고자 하는 배플의 형상이 Fig. 3과 같은 경우 배플 간의 간극이 발생되며 그에 따른 배플의 성능저하가 발생할 수도 있으며, 반대로 문헌에서 제시하는 바와 같이 적정 간극을 유지하는 경우에는 오히려 연소안정성 효과를 증대시킬 수도 있다[7]. Fig. 10은 배플 간극에 따른 시험결과를 나타내는 것으로 시험에 사용된 배플 길이는 50 mm이다. 이 배플에 적용된 간극(Δ)은 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm 그리고 0.5 mm이다. Fig. 10에 나타나는 두 점선은 시작점이 다른 상태에서의 추세선 차이를 보여주는 것으로 시험을 통해 얻은 R값의 범위로 간주할 수 있다. 시작점이 다른 이유는 Fig. 7에서 알 수 있듯이 불안정 영역이 존재하는 군이 다르기 때문이다. 이 결과로부터 최적의 배플 간극이 존재함을 알 수 있는데 이것은 이전에 본 연구팀에서

수행하였던 비연소 음향 시험결과와 유사한 경향을 보여준다[8]. 시험조건 중 0.1 mm의 배플 간극에서 최대 성능을 보여주는 원인은 간극이 없는 경우의 배플에 비해 마찰에 의한 점성 효과가 증가되었기 때문으로 사료된다. 간극 시험으로부터 주의 깊게 살펴봐야 하는 부분은 배플 간극이 0.5 mm인 경우이다. 0.5 mm의 간극을 갖는 배플의 경우 간극이 없는 배플과 유사한 연소안정성 마진을 보여주는데 이것은 간극으로 발생하였던 추가적인 마찰에 의한 점성 효과에 반해 배플의 기본 기능인 점선방향모드의 차단 성능저하 때문으로 사료된다. 이중 와류 동축형 분사기의 화염 강도를 CH 방출 강도를 통해 살펴보았다. 배플이 없는 경우에 대하여 축방향 길이(h) 102 mm까지 측정하였으며 그 결과에 대한 것이 Fig. 11에 나타나 있다. Fig. 11에서 h의 값이 15 mm까지는 점선으로 표시한 모의추진제의 재순환 영역으로 인해 h가 11 mm인 영역에서 변곡점이 존재하지만 최대 CH 방출 강도를 보이는 지점은 h가 25 mm 근처가 된다. h의 값이 15 mm까지의 실선 부분은 재순환 영역을 배제한 경우에 대한 추세선이다.

Fig. 11에서 배플 길이에 따른 CH 방출 강도를 적분하면 다음과 같다. 배플이 없는 경우 Fig. 11에서 h의 값 5.5 mm에서 140 mm까지 적분한 I_* 는 49 정도가 된다. 배플 길이가 30 mm인 경우 h의 값 30 mm에서 140 mm까지 적분하면 I_* 는 31 정도가 된다. 배플 길이가 50 mm인 경우 I_* 는 19 정도가 되며 배플 길이가 70 mm인 경우 I_* 는 9 정도가 된다. 최대 I_* 로 각각의 I_* 를 나누어 표현한 것이 \bar{I}_* 이다. 시험결과로부터 제시한 Fig. 12의 \bar{A} 는 Fig. 9에서 가운데 곡선의

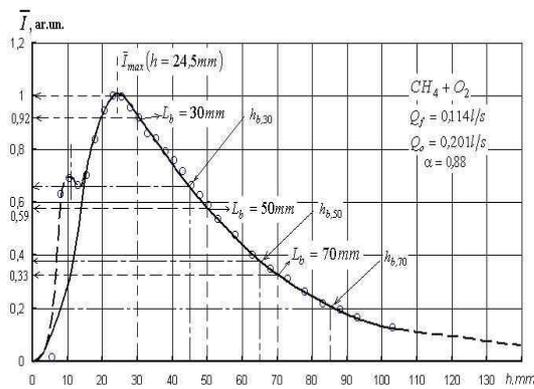


Fig. 11. CH radical shining intensity

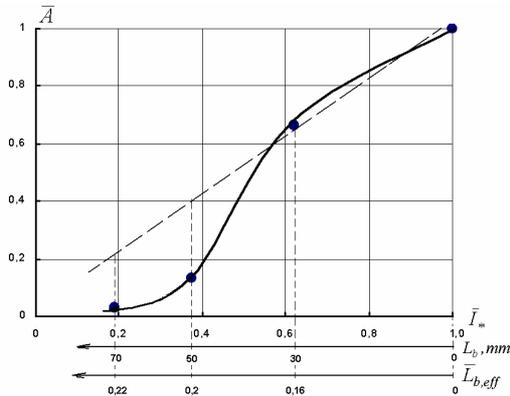


Fig. 12. Normalized amplitude of 1T1L to normalized integration value of CH radical shining intensity

값을 최대값에 대하여 정규화한 것으로 스펙트럼 분석을 통한 1T1L 주파수의 에너지 크기를 나타낸다. Fig. 12의 점선은 배플이 없는 경우와 배플 길이 30 mm인 경우를 기준으로 선형 커브 피팅을 이용하여 구한 값이고 실선은 모델 상사 연소 시험으로부터 얻은 값이다. 배플 길이가 50 mm와 70 mm인 경우 예측되는 선형 관계로부터 실제 값은 많이 이탈되어 있음을 알 수 있다. 앞서 언급했듯이 이러한 이탈되는 관계요소로 배플이 추가적인 기능을 하고 있다고 사료되며 그 기능은 바로 시험 시 발생하는 주파수에 동조된 quarter wave resonator 기능이다. 모델 연소 시험의 경우 발생된 온도가 낮고 그에 따라 음속 값이 작기 때문에 시험 시 발생된 1T1L 주파수에 동조 될 가능성이 발생하지만 실물형 연소기의 경우 같은 배플 길이에 대해 연소기내의 음속 값이 높기 때문에 모델 시험에서와 같이 배플이 quarter wave resonator 기능을 하기는 어렵다. 단, 모델 연소시험과 실물형 연소시험에서 발생하는 음속비 만큼 배플의 길이가 길어진다면 가능할 수도 있으나 이것은 배플의 내구성 및 내열성 등 다른 복잡한 문제를 야기하므로 배플 자체를 quarter wave resonator 기능까지 고려하여 설계하는 것은 무리가 있다고 사료된다.

III. 결 론

이중 와류 동축형 분사기의 연소안정성 파악을 위한 모델 연소시험을 수행하였으며 그 결과 분사기가 갖는 연소안정성 마진을 제시하였다. 또한 연소불안정 수동제어기구로 널리 사용하고

있는 배플에 대해서도 그 효과를 살펴보았다. 단, 연소안정성 마진의 정량적 평가는 시험 기법에서 가정된 부분으로 인해 어려움 있으며 앞으로 보완해야 하는 부분으로 남아있다.

배플이 적용된 동축 와류 분사기의 시험에서 연소안정성 효과는 배플 길이에 지배적인 영향을 받음을 알 수 있었다. 이와 더불어 일정 간극이 유지된 배플의 경우에는 마찰에 의한 점성 효과로 인해 추가적인 연소안정화 효과가 발생됨을 확인 할 수 있었고 시험으로부터 얻어진 최적의 배플 간극은 0.1~0.2 mm 근방에서 나타났다. 이 간극이 유지되는 배플의 경우 시험조건 중에서 최대 연소안정성 마진을 보여준 축 방향 길이 70 mm의 무간극 배플을 축 방향 길이 50 mm까지 축소하여도 그 성능이 유지됨을 확인하였다.

연소안정성 마진의 증대와 더불어 이 간극은 배플 장착 시 발생할 수 있는 오차의 한계를 제시 할 수 있는 값으로도 활용할 수 있으리라 사료된다. 시험을 통해 얻어진 부수적인 결과로 배플이 quarter wave resonator의 기능을 할 수 있음을 보여 주었는데 이것은 배플의 내구성 및 내열성 등 다른 복잡한 문제를 해결할 경우 고려할 수 있는 부분임을 제시하였다.

참고문헌

- 1) V. Yang and W. E. Anderson, "Liquid Rocket Engine Combustion Instability", Vol. 169.
- 2) Pikalov, V. P., Shibanov, A. A., Narizhny, A. A., Agarkov, A. F., and Nedashkovsky, A. K., "Studies of the Combustion Stability to Acoustic Oscillations Using KARI Injectors of Basic Configuration under Model Operation Conditions", Progress Report of KARI-00-14, Phase 2, PART C, January, 2001.
- 3) 서성현, 이광진, "분사기의 연소 안정성 평가를 위한 실험적 방법 연구", 한국항공우주학회지, 제 32권, 제 4호, pp. 61-66, 2004.
- 4) 이광진, 서성현, 송주영, 설우석, "모의 추진체를 이용한 액체로켓엔진용 다중 분사기의 연소안정성 평가 방법", 제23회 한국추진공학회 추계 학술대회 논문집, pp. 229-234, 2004.
- 5) Lee, K., Seo, S., Song, J., Han, Y. and Seol, W., "Combustion Stability Assessment of Double Swirl Coaxial Injectors Using Simulant Propellants", AIAA-2005-4443, 41st AIAA/ASEM/SAE/ASEE Joint Prop. Conf. & Exhibit, Tucson, AZ, Jul. 10-13, 2005.

- 6) McBride, B. J., Gordon, S., "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications", NASA RP-1311, 1996.
- 7) Sutton, G. P., "History of Liquid propellant Rocket Engines in Russia, Formerly the Soviet Union", Journal of Propulsion and Power, Vol. 19, No. 6, pp. 1008~1037, 2003.
- 8) Kim, H., Lee, K., Choi, H. and Seol, W., "An Experimental Study on Acoustic Damping Enhancement by the Gap of Baffled Injectors", AIAA-2005-4446, 41st AIAA/ASEM/SAE/ASME Joint Prop. Conf. & Exhibit, Tucson, AZ, Jul. 10-13, 2005.