

액체 램제트 엔진용 소형 연소기 직접 연결식 시험장치의 설계 방법과 시험 데이터 분석 (I)

성홍계 · 김인식 · 이규준 · 김경무 · 이도형 · 변종렬 · 황용석 · 오석진 · 한정식 · 김운곤

Design Method and Preliminary Data Analysis of Subscale Direct-Connect Test Facility for Liquid Ramjet Combustor (I)

ADD, Tech-4

ABSTRACT

This paper describes the conceptual design method of subscale direct-connect test facility for liquid fuel ramjet combustion study and preliminary analysis of test results. The measured pressure signal represents the successful operation of the test facility. The pressure oscillation in combustion chamber shows the dominant frequency of 190Hz, relatively very low frequency to 1L acoustic mode (1200Hz) based on the length of combustor. It is suspected that there were several driving sources, which are vortex street at backward step of combustor, inlet resonance induced by the long length of unchoked inlet, and/or combustor configuration with optical window.

초 록

액체 램제트의 연소 현상을 연구하기 위한 소형 직접 연결식 시험 장치에 대한 개념 설계 방법을 기술하였다. 본 시험 장치를 이용하여 수차례의 시험 결과 시험장치가 정상적으로 작동됨을 확인하였다. 측정된 연소실 압력 데이터에서 약190Hz대의 특정 주파수가 계측되었으며, 이는 연소실의 1L 음향 주파수(1200Hz)와는 차이가 큰 것이다. 불안정 모드를 야기하는 원인으로 dump combustor에서 발생하는 흡입 공기의 vortex street, 초크 되지 않은 긴 흡입관에서 발생하는 흡입구의 resonance, 관 축장으로 인해 변형된 연소실 형상 등이 그 원인으로 판단된다.

1. 서 론

다른 공기 흡입식 엔진과는 달리 램제트 엔진은 연소실 작동 과정에서 흡입구 작동의 영향을 직접적으로 받는다. 예를 들어 엔진 흡입구에 의해 발생된 유입 공기 교란은 일반적인 공기 흡입식 엔진인 경우 엔진 압축기에 의해 부드럽게 되지만, 램제트 엔진인 경우 교란은 연소실 내로 그대로 유입되어 연소실 유동에 영향을 미치게 된다. 기체 역학적 과정에서 유동의

Reynolds 수 영향과 연료/공기혼합 및 연소 과정을 완전히 모사하는 것이 불가능하기 때문에 시험 성격에 따라 실기형 또는 축소형에 대한 실험적인 연구가 요구된다.

공기 흡입식 엔진 시험장치의 주요 목적은 다음과 같은 방향의 연구를 제공하는데 있다.

- 연료/공기 혼합물의 기체 역학적 그리고 열역학적 특성
- 혼합물 점화와 연소 과정의 메카니즘 파악
- 흡입조건 변화에 따른 연소 안정 경계 도출

* 국방과학연구소(Agency for Defence Development), 기술연구본부 4부

며, 용기의 체적은 다음과 같다.

$$V_v = \frac{m_{op}}{\frac{P_{in}}{RT_{in}} - \frac{P_{fin}}{RT_{fin}}}$$

여기서 시험중 소요되는 공기량(m_{op})은 연소기 작동 중 필요한 공기량과 시험 전/후에 요구되는 공기량을 합한 공기량이다. 또한

$$T_{fin}' = T_{in} C_1$$

C_1 값은 압력비 P_{fin}/P_{in} 과 polytropic 지수 n 에 의해 결정되고 용기 벽에서 가스로의 열전달에 의해 지배된다. 실험에 의하면 실제 잔여공기의 온도는 polytropic 방정식에 계산된 잔여 공기의 온도보다 높으므로 $T_{fin} = C_2 T_{in}'$ 이며 C_1, C_2 의 근사값은 표 1과 같다.

Table 1 Thermodynamic coefficients C_1, C_2

$\frac{P_{in}}{P_{fin}}$	10	7	4	2
C1	0.55	0.6	0.7	0.82
C2	0.75	0.8	0.87	0.9

2) reducer(리듀서)

리듀서는 입구에서의 압력에 관계없이 출구에서 가스의 압력이 특정한 범위 내에서 일정한 값을 가지게 해야 한다. 실제로 reducer는 표준화된 제품을 선택할 수도 있고 설비를 위해 특별히 설계하고 제작할 수도 있다. 압력 reducer를 설계하기 위한 reducer의 throttling 단면을 결정해야 한다.

$$F_{red} = \frac{\dot{m}}{\mu A_x \sqrt{\frac{P_{in \min}}{RT_{in \min}}}} = \frac{\pi d_v^2}{4}$$

이때 리듀서 입구의 전압은 연료 저장 탱크의 사용 가능 압력에 영향을 주므로 이를 고려하여 설계 하여야 한다.

3) 오리피스

유량계로 사용되는 오리피스는 차압의 원리를 이용하는 De Laval nozzle 형식과 총 압력으로 유량을 제어하는 sonic nozzle 형식으로 구분

될 수 있다. 오리피스의 부착위치, 시험작동 영역, 작동 유량등에 따라 선별하여 사용한다. 본 시험 장치와 같이 공급되는 공기의 압력이 충분히 커서 시험장치 시동 특성이 우수하고 유량이 작은 경우에는 sonic nozzle 형을 채택한다. 유량계 또는 리듀서에서의 압력 손실을 최소화하기 위해 유량계 전후로 venturi 타입이 적용된다.

4) 공기가열기

실험 장치에서 케로신/공기 혼합물의 점화 및 연소 과정을 연구하기 때문에 공기 가열기는 연소 생성물이나 수증기를 발생 시키지 않는 것이 좋다. 따라서 가능하다면 연료를 연소시켜 공기를 가열하는 타입의 가열기 또는 열교환기를 사용하지 않고 가스와 직접 접촉되어 있는 전기 가열장치를 통해 공기를 가열하는 전기 가열기가 운용 가능하다면 전기가열기가 적당하다. 그러나 공기 유량에 따라 대용량의 전기 시설이 요구되므로 이를 고려해야 한다.

공기가열기에 요구되는 전기용량은 다음과 같은 관계에 의해 결정할 수 있다.

$$P = \frac{C_p \dot{m} (t_k - t_0)}{0.24 \eta}$$

여기서 C_p 는 평균온도 공기의 정압 비열, \dot{m} 은 공기 유량, η 는 가열기의 효율($\eta=0.93 \sim 0.98$), t_k, t_0 는 각각 최종 공기온도와 초기 공기온도이다.

위식에 의해 계산된 전력 공급이 가능하다면 전기 히터를 설계하는데, 본 시험장치에서는 공간 최소화를 위하여 등근 단면을 가진 Ni-Cr 가열기가 Star 회로에 연결된 3개의 3상 형태를 가지고 있다.

5) 흡입관

요구되는 공기 흡입량은 실험하고자 하는 엔진의 크기, 고도-비행 마하수, 구현하고자하는 연소실 압력 등을 고려하여 결정된다. 공기 흡입량의 범위가 결정되면 연소실 입구 유속(80-100m/s)의 범위를 고려하여 흡입구의 단면적을 결정한다. 이때 주의할 점은 간단한 유체 역

학식은 비열비를 포함하는 식으로 표현됨으로 가열 공기의 비열비를 고려하여야한다. 특히 vitiated 히터를 사용할 때는 이를 주의하여 고려하여야 한다.

6) 연료 공급 장치

실험장치의 다지관 입구에서 필요한 연료 압력을 얻기 위해 가압 연료 탱크가 사용된다. 필요한 연료 공급 압력은 연소실 압력(P_c)과 연료 공급 시스템 내에서 압력 손실을 합한 값이다.

$$P_{sup} = P_c + \Delta P_i + \Delta P_f + \Delta P_t + \Delta P_v + \Delta P_r$$

여기서, ΔP_i , ΔP_f , ΔP_v , ΔP_r , ΔP_t 는 각각 분사기, 다지관, 밸브, throttle, 필터에 의한 압력 손실이다.

다지관의 내부 직경은 허용되는 연료의 최고 속도를 사용하여 연속방정식에 의해 결정된다. 연료의 최대 공급 압력은 $P_n = 2.5 \sim 3P_c$ 의 수준으로 설계에 적용하고, 나중에 설비의 유압 시스템이나 분사기, 밸브, throttle 의 상세한 설계가 끝난 후에 다시 상세하게 선택된다.

탱크내 연료의 부피와 연료 공급 압력을 일정하게 유지하기 위해 탱크를 가압하는데 필요한 공기의 양을 결정하여야 한다.

작동이 끝난후 연료 탱크를 연료 공급 시스템과 가압 시스템으로부터 분리하고, 가압 다지관으로부터 높은 압력의 공기를 연료 공급 다지관으로 집어넣어 필터와 유량조절 장치 및 차단 장치, 그리고 모든 연료 다지관에 남아 있던 연료를 불어 내어야 한다. 연료의 유량은 유량 조절(throttling) 콕(cock)에 의해 원하는 유량으로 조절되며 연료의 유량은 throttling 유량계에 의해 측정된다.

7) 냉각 장치

연소실을 약 2200K 되는 화염으로부터 보호하기 위하여, 삭마냉각 또는 수냉각을 이용할 수 있다. 삭마 냉각형은 산화 분위기에 강한 실리카 페놀이 이용된다.

수냉각형은 가스로부터 벽으로의 열유속, 전도에 의해 벽으로 전달되는 열량, 벽으로부터 냉

각 재킷내 유체로 전달되는 열유속을 고려하고,

$$q = \frac{T_e - T_f}{\frac{1}{\alpha_g} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_f}}$$

물의 최대 가열 지점은 냉각류 쪽의 벽이며, 이 온도는 냉각 재킷내 압력을 고려하면 물의 비등점을 고려하여 냉각류와 압력(압력 손실 고려) 선택시 이러한 사실을 고려해야 한다.

냉각류의 양은 레이놀즈수가 층류에서 난류로 변화하는 값 부근에서 존재하도록 선택한다. 따라서 유량은 확인된 최소량보다 약간 적게 공급되도록 한다.

8) 안전 장치

약 20 Mpa의 고압 공기의 환경에서 유독성 연료를 사용한 연소 시험을 수행하는 장치이므로 안전에 특별히 주의를 해야 하므로, 우수한 시험 데이터를 얻기 위한 노력은 물론, 안전에 주의하여야 한다. 이를 위하여 각종 cut-off, shut-down 장치를 주요 부위에 설치하고, 인명과 시험 장치를 유사시에 보호하도록 회로도를 구성하여야 한다.

9) 시험 장치 개략도

설계된 시험 장치의 개략도는 그림3 과 같다.

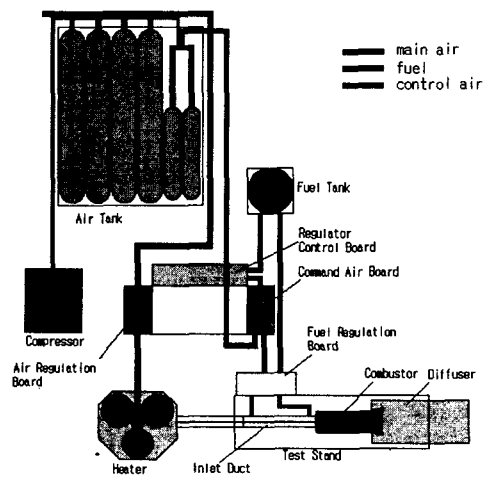


Fig. 3 Schematics of test facility

2.2 시험 장치 작동 점검을 위한 가동 데이터 분석

그림 4는 본 시험장치의 가동 여부를 점검하기 위하여 수행된 일련의 시험 결과로 20Hz로 low pass filtering 한 데이터를 도시한 것이다. 측정 압력은 연소실 온도를 2000 K로 하였을 때의 연소실 압력 (33.47 psia)과 유사한 범위에 있음을 알 수 있다.

그림 5는 test 1의 실험 데이터를 연소 전, 연소 중으로 2단계 부분으로 나누어 수행된 FFT(Fast Fourier Transform) 결과이며, 190Hz 근방에서 특정 주파수가 나타나고 있다. 연소기의 형상에 따른 음향학적 1L 모드는 약 1200Hz 인 것으로 판단되므로, 측정된 주파수와 큰 차이가 있다. 그 이유를 몇가지 유추해 볼 수 있다. 1) 본 시험 장치에서 사용된 연소관은 연소관 내의 연소 현상을 관측하기 위하여 관측창이 4개 있으며, 관측창을 화염의 고온에서 보호하기 위하여 연소관 내면과 외면 사이에 공간이 있고, 공간 사이로 질소 가스가 주입되도록 되어 있다. 이러한 공간과 질소가스의 주입은 음향 모드를 바꾸는 역할을 하며, 공간이 상대적으로 크고, 질소 가스의 주입 속도가 유입되는 흐름의 속도와 비교하여 작으므로, 음향 모드의 주파수는 산란되고, 그 크기는 작아짐을 유추할 수 있다. 2) 연소 전후에서 나타난 주파수가 서로 유사하다는 관점에서 흡입구 유동의 vortex street의 영향일 수 있다. 그 이유는 빠른 속도로 유입되는 공기는 연소실로 팽창되는 부위에서 저속 저압의 환경 속에 있으므로 ring vortex가 발생되는데 ring vortex의 주기는 연소실의 음향 진동과 유입 흐름의 Reynolds수의 영향을 받기 때문이다. 3) 흡입구의 unchoked 된 공간이 연소실 보다 상대적으로 매우 크므로 흡입구의 음향 resonance가 그 원인일 수 있다. 흡입구에서의 choke 지점은 히터의 상류에 놓여 있고 히터가 차지하는 큰 공간과 긴 흡입구는 저주파 resonator의 역할을 할 수 있기 때문이다.

이에 대하여는 지속적으로 수행될 연구 분야이다.

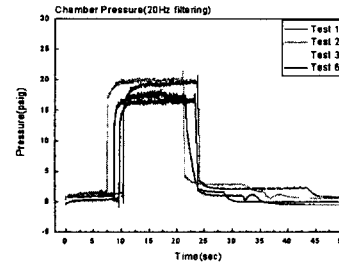


Fig. 4 Chamber pressure vs. time

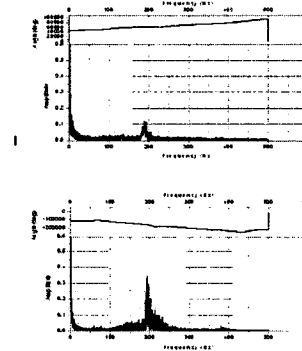


Fig. 5 FFT results of chamber pressure
a)before combustion(top) b)on combustion(bottom)

3. 결론

램제트 엔진용 소형 직접 연결식 시험장치의 설계 과정과 시험장치에서 측정된 데이터의 분석 결과를 기술 하였다. 측정된 연소실을 분석하여 시험장치가 정상적으로 가동하고 있음을 확인하였다. 측정된 연소실 압력 데이터에서 190Hz대의 특정 주파수가 계속되었다. 본 주파수는 연소실의 1L 음향 모드인 1200Hz 주파수에 비하여 상당히 작은 주파수이다. 그 원인으로 1) 연소실 공간 변화/ 질소 주입에 따른 주파수의 전이, 2) 흡입구 유동에 의한 vortex street 모드, 3) 흡입구의 저주파 resonant에 의한 영향 등으로 유추 할 수 있다. 연소 메커니즘을 연구하기 위한 구체화된 연구가 계속될 것이다.