[UCI]I804:24011-200000231703

2007년 2月

석사학위논문

로켓 엔진 연소기에서 기체-액체형 분사기의 음향 감쇠 특성에 관한 실험적 연구

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY
100374003 2007-04-09

조 선 대 학 교 대 학 원

항 공 우 주 공 학 과

김 학 순

로켓 엔진 연소기에서 기체-액체형 분사기의 음향 감쇠 특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study of Acoustic Damping Induced by Gas-Liquid Scheme Injector in a Rocket Combustor

2007년 2月

조 선 대 학 교 대 학 원

항 공 우 주 공 학 과

김 학 순

로켓 엔진 연소기에서 기체-액체형 분사기의 음향 감쇠 특성에 관한 실험적 연구

지도교수 손 채 훈

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함.

2006年 10月

조 선 대 학 교 대 학 원

항 공 우 주 공 학 과

김 학 순

김학순 석사학위논문을 인준함

위 원 장 조선대학교 교수 김 재 수 (印)

위 원 조선대학교 교수 손 채 훈 (印)

위 원 한국항공우주연구원 김 홍 배 (印)

2006年 11月

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES ---------- iii

LIST OF FIGURES ---------- iv

NOMENCLATURE ---------- vii

ABSTRACT ---------- vii

제 1 장 서론

제 2 장 가진 신호와 신호 처리에 대한 고찰

2. 1 연소실에 대한 고찰

2. 2 음향학적 실험 방안 및 장치

2. 2. 1 상온음향시험장치

2. 2. 2 FFT 프로그램 및 음향센서

2. 3 가진신호(random noise)에 대한 고찰

2. 4 신호처리(signal conditioning)에 관한 고찰

2. 4. 1 주파수 분해능

2. 4. 2 신호의 평균처리(signal averaging)

제 3 장 음향학적 고찰과 이론

3. 1 분사기에 관한 음향학적 고찰

제 4 장 상온음향해석 결과

4. 1 연소실 공진주파수의 이론적 특성

4. 2 연소실 공진주파수의 실험적 특성
4. 3 단일 분사기를 장착한 연소실의 음향응답 특성
4. 3. 1 직경 7 mm인 분사기를 장착한 연소실
4. 3. 2 열린조건(open condition)과 닫힌조건(closed condition)의 비교
4. 3. 3 14 mm & 20 mm인 분사기의 음향학적 특징
4. 3. 4 동일한 열린 면적비를 가지는 분사기의 음향학적 특징
4. 4 다수 분사기를 장착한 연소실의 음향응답 특성
4. 4. 1 시험 장치 및 방안
4. 4. 2 PC(poly carbonate)를 사용한 단일 분사기의 음향학적 특성
4. 4. 3 다수 분사기와 연소실의 상호 작용에 의한 음향학적 특성

제 5 장 결론

참고문헌

LIST OF TABLE

Table 1 Comparison of resonant frequencies in a combustion chamber without injector ---------- 18

Table 2 Damping factors in a combustion chamber without injector ---------- 19

LIST OF FIGURE

Fig. 1 Injector and baffle in the combustion chamber ---------- 1

Fig. 2 Coaxial gas-liquid scheme injector ---------- 2

Fig. 3 Actual combustion chamber ---------- 4

Fig. 4 Configuration of combustion chamber---------- 5

Fig. 5 Geometry of the chamber with a single injector ---------- 5

Fig. 6 Geometry of the chamber with multi-injectors ---------- 5

Fig. 7 Schematic diagram of acoustic-test apparatus with a single injector ------- 6

Fig. 8 Microphones position of with several degree ---------- 6

Fig. 9 Comparison FRF & Coherence between B&K pulse and Signallink's SVA-pro ---------- 8

Fig. 10 Random noise in time domain ---------- 9

Fig. 11 Random noise in frequency domain ---------- 9

Fig. 12 FFT analyzer for several frequency resolution ---------- 11

Fig. 13 Effect of frequency domain with FFT ---------- 13

Fig. 14 Effect of frequency domain with FRF ---------- 14

Fig. 15 Quarter-wave Resonator ---------- 15

Fig. 16 Half-wave Resonator ---------- 15

Fig. 17 Acoustic-pressure responses in the chamber without injector ---------- 18

Fig. 18 Spatial distributions of acoustic fluctuation responding to each sinusoidal excitation ---------- 19

Fig. 19 Acoustic-pressure responses near f_{1T} for several length of l_{inj} = 0, 150, 302mm in a chamber with a single injector of d_{inj} = 7mm ---------- 21

Fig. 20 Acoustic Amplitudes and Frequencies as a function of injector length at 1T mode (d_{inj} = 7 mm) ---------- 22

Fig. 21 Damping factors as a function of injector length at 1T mode (d_{inj} = 7 mm) ---------- 22

Fig. 22 Longitudinal acoustic oscillations within the injector with open end and the elongated injector with closed end at injector inlet ---------- 24

Fig. 23 open end condition vs closed end condition (d_{inj} = 7 mm) ---------- 24

Fig. 24 Acoustic-pressure response near f_{1T} for several lengths of l_{ing} = 0, 150, and 295mm in the chamber with a single injector of d_{inj} = 14 mm ---------- 25

Fig. 25 Acoustic Frequencies as for several diameters of d_{inj} = 7, 14 mm in the chamber with a single injector ---------- 26

Fig. 26 Damping factors as a function of injector length at 1T mode (d_{inj} = 14 mm) ---------- 27

Fig. 27 Damping factors for several diameters of d_{inj} = 7, 14, and 20mm in the chamber with a single injector ---------- 27

Fig. 28 Acoustic-pressure responses near f_{1T} in the chamber with two injectors of d_{inj} = 14 mm and a single injector of d_{inj} = 20 mm (l_{inj} = 300 mm) -- 28

Fig. 29 Damping factors as a function of injector length in the chamber with two injectors of d_{inj} = 14 mm and a single injector of d_{inj} = 20 mm -------- 29

Fig. 30 Damping factors as a function of injector length with boundary absorption coefficients of 0.002 and 0.005 (d_{inj} = 14 mm) ---------- 30

Fig. 31 Configuration of injectors mounted to the faceplate (d_{inj} = 27 mm) ---- 31

Fig. 32 Schematic diagram of acoustic-test apparatus with multi-injectors -------- 31

Fig. 33 Acoustic-pressure responses near f_{1T} in the chamber with two injectors of d_{inj} = 20 mm and a single injector of d_{inj} = 27 mm (l_{inj} = 300 mm) -- 33

Fig. 34 Damping factors as a function of injector length at 1T mode (d_{inj} = 27 mm) ---------- 34

Fig. 35 Acoustic-pressure responses in chamber with multi-injectors ---------- 35

Fig. 36 Spatial distributions of acoustic fluctuation responding to each sinusoidal excitation ---------- 37

Fig. 37 Acoustic frequencies and amplitudes of 1T, 1T1L*, and 1T2L* modes as a function of injector length in chamber with multi-injectors ---------- 38

Fig. 38 Damping factors of 1T, 1T1L*, and 1T2L* modes as a function of injector length in chamber with multi-injectors ---------- 39

NOMENCLATURE

α_{mn}	Eigen value
c_{ch}	Velocity of Sound
d	Injector Diameter
d_{inj}	Injector of Diameter
f_0	Resonator Frequency [Hz]
l_{inj}	Injector of Length
l_R	Length of Resonator
L_1	Length of Cylinder part
L_2	Length of Contraction part
L_{effect}	Effective Combustion Chamber Length
Δl	Orifice Length Correction of Resonator
M	Mach Number
P′	Acoustic Pressure Reponse
ρ_{ch}	Density
σ_A	Open Area Ratio
1L	First Longitudinal mode
1T	First Tangential mode
2L	Second Longitudinal mode
1T1L*	Injector Coupled 1T1L Acoustic Mode
1T2L*	Injector Coupled 1T2L Acoustic Mode

Subscripts

inj	injector

ABSTRACT

Experimental Study of Acoustic Damping Induced by Gas-Liquid Scheme Injector in a Rocket Combustor

by Haksoon Kim
Advisor : Prof. Chae Hoon Sohn, Ph. D.
Department of Aerospace Engineering,
Graduate School of Chosun University

In a liquid rocket engine, the role of gas-liquid scheme injector as an acoustic resonator or absorber is studied experimentally for combustion stability by adopting linear acoustic test.

First, acoustic behavior in a rocket combustor with a single injector is investigated and the acoustic-damping effect of the injector is evaluated for cold condition by the quantitative parameter of damping factor as a function of injector length. From the experimental data, it is found that the injector can play a significant role in acoustic damping when it is tuned finely. The optimum tuning-length of the injector to maximize the damping capacity is near half of a full wavelength of the first longitudinal overtone mode traveling in the injector with the acoustic frequency intended for damping in the chamber. When the injector has large diameter, the phenomenon of the mode split is observed near the

optimum injector length and thereby, the acoustic-damping effect of the tuned injectors can be degraded.

Second, acoustic-damping characteristics of multi-injectors are intensively investigated. From the experimental data, it is found that acoustic oscillations are almost damped out by multi-injectors when they have the tuning length. The length corresponds to a half wavelength of the first longitudinal overtone mode traveling inside the injector with the acoustic frequency intended for damping in the chamber. But, new injector-coupled acoustic modes show up in the chamber with the injectors of the tuning length although the target mode is nearly damped out. And, appreciable frequency shift is always observed except for the case of the worst tuned injector. Accordingly, it is proposed that the tuning length is adjusted to have the shorter length than a half wavelength when these phenomena are considered.

제 1 장 서론

액체 로켓엔진 개발과정에 있어서 매우 중요한 설계 인자 중 하나는 고주파 연소 불안정(high frequency combustion instability)이다. 이는 연소 과정에서 연소실의 내부 반응 유동과 음향장과의 상호 작용에 의해 발생하는 것으로 알려져 있으며, 연소 과정으로부터 공급된 에너지가 연소시 내부 유동장의 압력 및 속도를 증폭시키는 현상으로 연소실 내부의 진동과 연소실 벽면으로의 과도한 열전달을 수반한다[1-7]. 따라서, 고주파 연소 불안정은 엔진과 발사체 개발에 있어서 큰 장애 요인으로 인식되어 왔다[1-2]. 고주파 연소 불안정 발생시 연소성능 저하 및 심한 경우 로켓엔진 자체의 파괴와 전체 발사 시스템의 작동에 치명적인 손상을 유발한다.

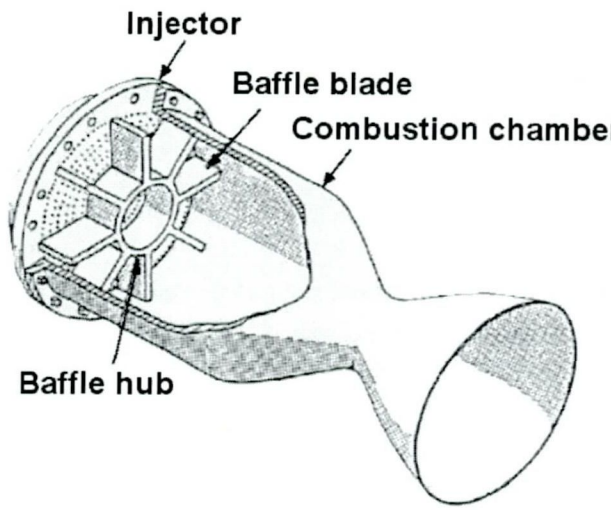


Fig. 1 Injector and baffle in a combustion chamber

연소불안정을 제어하기 위한 방법으로 엔진의 개발 초기에 연소실의 음향장을 파악하는 것이 매우 유용하며, 여기서 얻은 정보를 바탕으로 작동 조건에서 유해한 음향 모드를 감쇠시키기 위한 제어 기구를 개발하여 적용시키고 있다[1-7]. 일반적으로 채택되는 수동적인(passive) 제어 기구로는 배플(baffle)과 음향공(acoustic cavity)이 있다. Figure 1에 나타난 바와 같이 배플은 인젝터 면에 축방향으로 장착되며, 반경방향으로 설치된 블레이드와 원통모양의 허브로 구성된다. 배플은 연소실내 공진주파수를

변화시켜 연소실 내부에서 진동하는 음향파의 상호작용을 제한하여 연소 불안정을 제어한다. 하지만, 배플이 분사기 면에 장착되므로 분사효율의 감소로 인해 분사기 장착전과 비교하여 낮은 추력이 나오며, 횡방향 모드의 감쇠에 초점을 맞추고 있어 종방향 관련한 모드는 억제할 수 없다는 단점이 있다. 음향공의 경우는 음향공 내에서 압력파를 소산시켜 압력 섭동 에너지를 감쇠시킨다. 또는 압력파를 상쇄시켜 압력 섭동을 감쇠시킨다. 음향공은 비교적 간단한 방법으로 연소실내 적용 시킬 수 있으나, 연소 생성물의 정확한 물성치를 알 수 없어 정확한 주파수 동조가 어렵고 감쇠 주파수 대역이 좁은 것이 단점이며, 최적의 감쇠효과를 얻기 위하여 미세한 음향학적인 동조(tuning)가 필요하다.

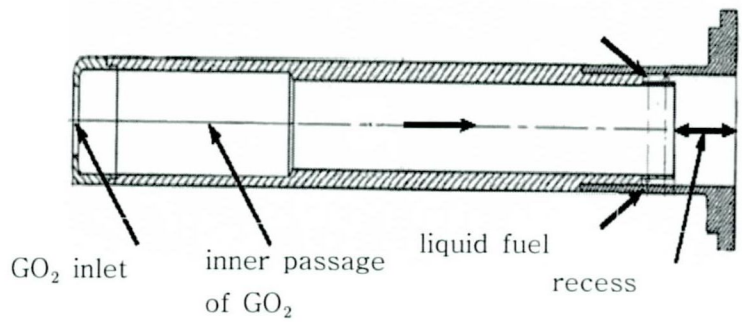


Fig. 2 Coaxial gas-liquid scheme injector

이러한 수동적인 제어기구는 연소실에 추가되어 장착되므로, 연소 성능을 감소시키거나 제작의 복합성을 유발한다. 또한, 액체 추진제 로켓엔진 연소기는 추진제를 분사하기 위해 필수적으로 분사기가 장착된다. 분사기는 추진제의 상(phase)에 따라 액체-액체형과 액체-기체형으로 나눌 수 있다. 일반적으로 고성능, 고추력의 연소기는 가스 발생기를 사용하고 재생냉각을 사용하는 밀폐형 사이클을 사용하게 될 것이다 [3]. 이 경우 Fig. 2와 같은 동축형 분사기를 사용하게 될 것이다. Figure 2 에서 동축형 분사기는 분사기 중심으로는 기체 추진제가, 그리고 분사기 출구 근처에서 액체 추진제가 공급되어 연소기 내부로 분출된다. 이러한 경우 동축형 분사기의 본질적인 기능은 분사이지만, 내부의 체적의 대부분을 기체가 차지하므로, 그 형태상 공명기 역할

을 할 수 있다면, 추가적인 수동기구의 장착이 아닌 분사기의 적절한 설계를 통해서도 음향 감쇠 효과를 볼 수 있을 것이다.

본 연구는 향후 고성능 연소기에 채택될 수 있는 기체-액체 조합의 추진제를 분사하는 분사기의 사용에 대비하여 기체-액체형 분사기가 장착된 연소실내의 음향장에 대한 선형 음향 실험을 수행하였고, 이를 통해 분사기를 음향공명기로 사용할 수 있는 가능성을 검증해 보고자 한다. 연소실에 장착되는 분사기의 경우 양쪽 면에서 압력 마디 조건이 형성될 것이므로 반파장 공명기의 역할을 할 수 있을 것이 예상된다. 파장의 길이만 다를 뿐 분사기의 음향 억제 매커니즘은 1/4파장 공명기의 음향 진동 억제 매커니즘과 동일하므로 분사기를 반파장 공명기로 사용할 수 있을 것이다[9].

기체-액체형 분사기가 장착된 연소실내 음향장에 대하여 선형 실험[8, 9]을 수행하였고, 이를 이용하여 분사기의 공명기로서의 역할을 실험적으로 검증하고, 분사기가 장착된 연소실의 음향 감쇠 효과를 조사하여 최적의 음향 감쇠를 가지는 분사기의 길이에 대하여 조사하였다. 또한 다수 분사기 장착된 연소실에 대한 특성을 조사하였으며, 각 모드에 따른 음향 응답파을 측정하여 모드확인을 하였으며, 다수 분사기가 장착되었을 때 연소실과 분사기의 길이에 따른 상호작용에 관하여 조사하였다.

제 2 장 가진 신호와 신호처리에 대한 고찰

2.1 연소실에 대한 고찰

연소실의 기하학적 형상을 Figs. 3, 4에 나타내었다. 일반적으로 수십~수백 개의 분사기가 연소기의 분사면에 장착되지만 분사기의 음향 감쇠 효과를 파악하기 위해 굳이 여러 개의 동일한 분사기를 고려할 필요가 없으므로 가장 음향 감쇠 효과가 큰 위치에서 분사기 1개만 장착하여 시험을 수행하였다. 다음으로, 연소실과 다수 분사기(multi-injectors)와의 음향학적 상호작용(acoustic coupling)으로 나타나는 공진주파수(resonator frequency)와 각 음향 모드에 따른 감쇠인자(damping factor)의 변화와 특성을 파악하기 위해 Fig. 6와 같이 내경이 27 mm인 다수의 분사기가 장착된 연소기에 대한 실험을 수행하였다.

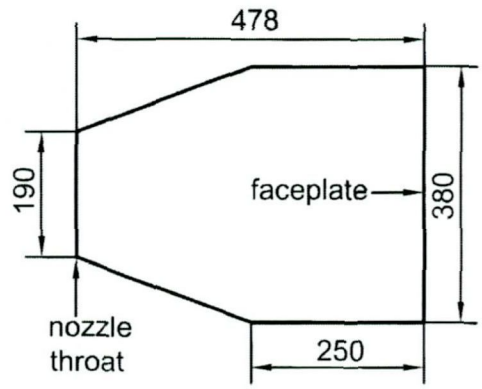


Fig. 3 Actual combustion chamber

실험하고자 하는 실제 연소실의 경우 노즐 목 부분에서는 유동속도가 음속에 도달한 뒤, 확산부에서 초음속으로 가속된다. 확산부와 수축부의 경계조건이 달라 노즐 목에서 음향학적으로 닫힌 조건을 적용할 수 있다. 이러한 관점을 바탕으로 노즐의 확산 부분을 제외한 연소실의 목(throat)부분까지 해석영역으로 설정하여 상온음향실험을 수행하였다. 채택된 연소기의 재질은 아크릴(acrylic)로 선택하였으며, 단일 분사기 또한 같은 재질을 선택하였다. 직경은 380 mm이고 노즐 목 직경은 190 mm, 분사면으로부터 노즐 입구 목까지의 거리는 478 mm, 분사면으로부터 수축부 입구까지 거

리는 250 mm, 노즐 수축 반각은 30°이다. 단일 분사기의 직경은 7 mm를 기준으로 설정하여 분사기 길이에 따른 감쇠 효과를 확인하였으며, 직경에 따른 감쇠 효과를 고려하기 위해 14 mm와 20 mm 분사기를 장착한 연소실 대한 감쇠 효과를 확인하였다.

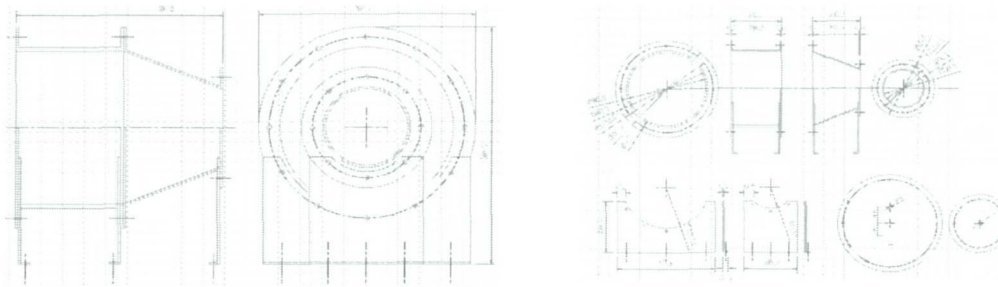


Fig. 4 Configuration of combustion chamber

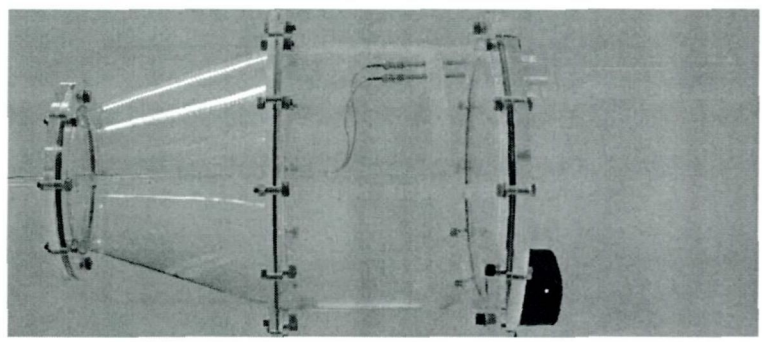


Fig. 5 Geometry of the chamber with a single injector

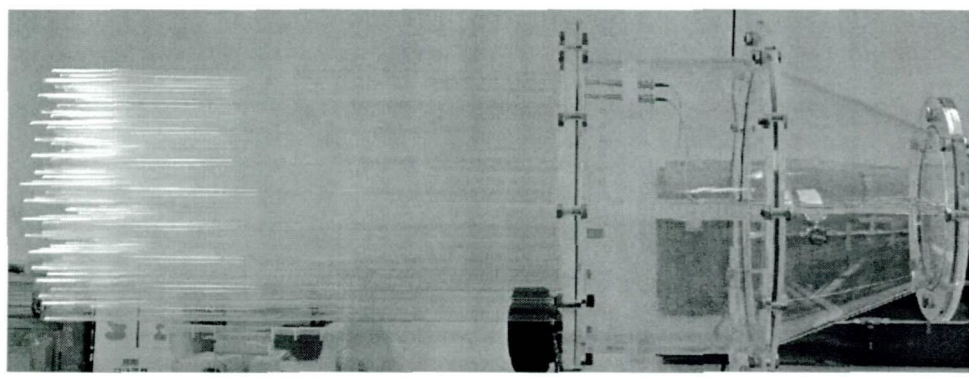


Fig. 6 Geometry of the chamber with multi-injectors

2.2 음향학적 실험 방안 및 장치

2.2.1 상온음향실험장치

액체 로켓 엔진의 형상을 아크릴로 제작하였으며, 음향 가진부는 함수 발생기(function generator), 노트북(random noise generator), 파워 앰프(power amplifier), 스피커(horn driver), 노트북으로 구성된다. 신호 처리부는 음향센서(microphone) 주파수 분석기(FFT analyzer), 그리고 노트북으로 이루어져 있다. 단일 분사기를 장착한 상온음향 시험 장치의 개략도는 Fig. 7와 같다.

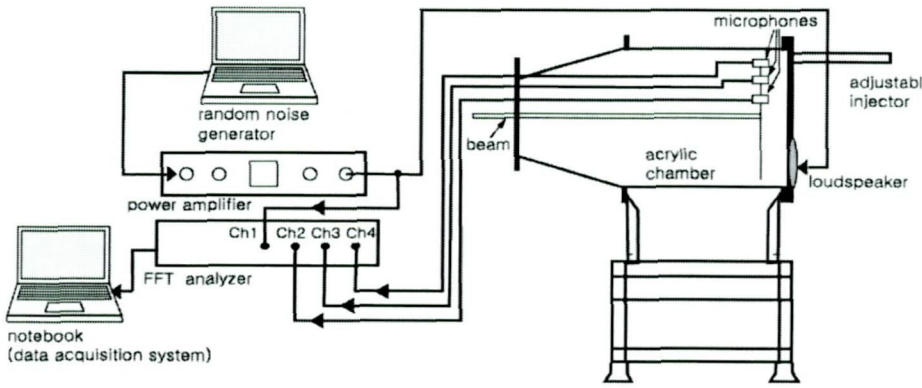
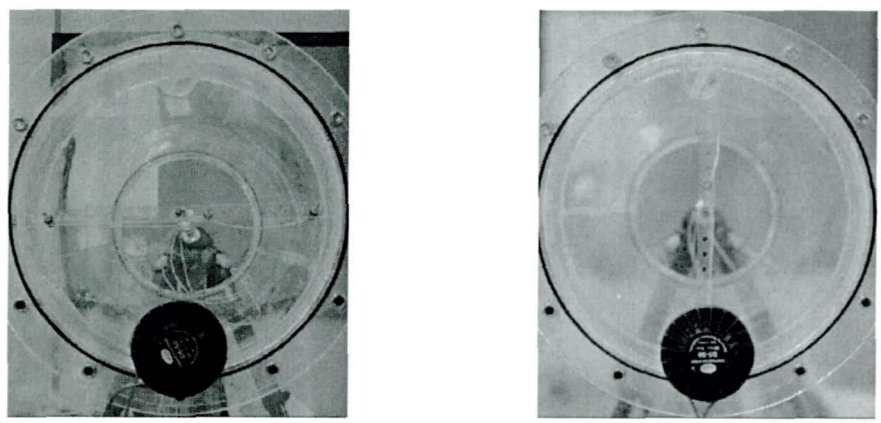


Fig. 7 Schematic diagram of acoustic-test apparatus with a single injector



90° & 270°　　0° & 180°

Fig. 8 Microphones position of with several degrees

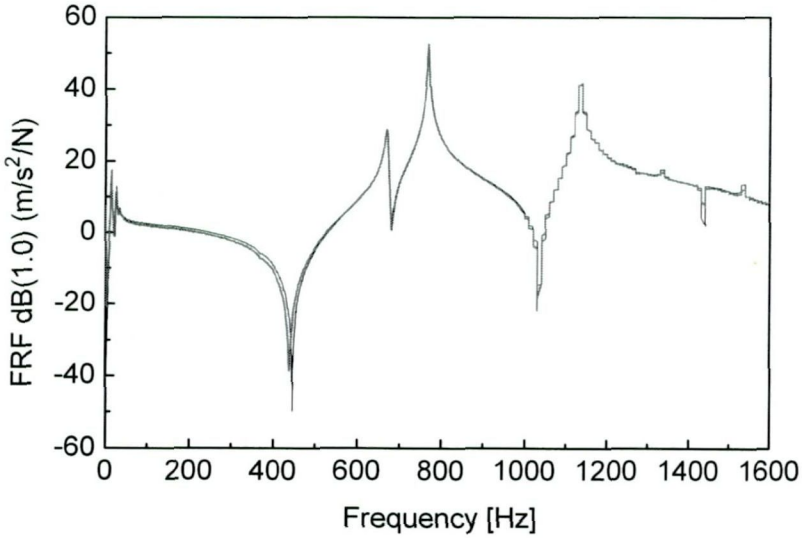
연소실내의 음향응답 특성을 알아보기 위하여, 랜덤 노이즈(random noise)를 노트북을 이용하여 발생시켜, Inter-M사의 음향파워앰프(QD-4960)를 통해 증폭한 후, Inter-M사의 horn driver unit(NSU-50B, 50W)를 이용하여 연소실 내부로 가진 하였다.

Figure 8과 같이 시험대상체의 분사기가 설치되는 Top 부분을 0 °라 정하고, horn이 설치된 반대편 부분을 180°이라 정하였다. 음향센서는 TEAC사의 microphone인 MC-50을 이용하였다. 음향센서의 위치는 가장 감쇠 효과가 크게 나타나는 스피커의 반대 부분에 위치하며, 분사기가 장착되는 면으로부터 1 cm 떨어진 곳에서 측정 하였다. 앰프에서 증폭되어 나오는 신호를 4-채널 FFT 분석기의 Ch1로 측정하였고, beam의 수직방향으로 5 cm의 간격을 두고 설치된 2개의 마이크로폰의 신호는 Ch3, 4로 각각 측정된다. 각각의 음향센서에서 측정된 신호를 입력신호에 대한 주파수 응답함수를 구하여 감쇠인자(damping factor)를 이용하여 정량화하여 나타내었다.

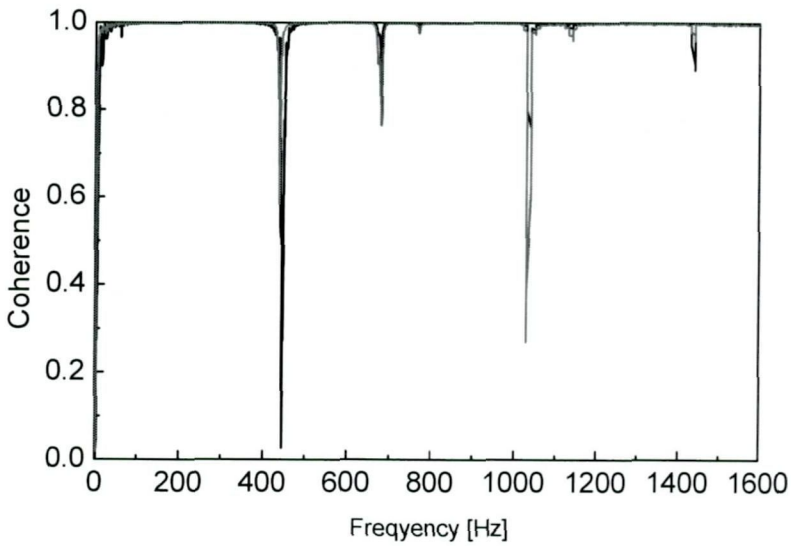
기본 연소실의 공진 주파수는 분사기가 장착되지 않은 연소실로부터 측정할 수 있었다. 측정된 각 주파수의 모드에 대한 특성을 알아보기 위하여 각각의 공진주파수에 대해 정현파(sine wave)의 형태로 음원이 연소실 내부로 가진될 때 연소실내의 음향응답의 크기를 측정하여 각각의 모드를 확인하였다. 이를 통해 모드에 따라 연소실 내부의 음향응답의 극대점과 극소점을 확인하여 모드를 확인 할 수 있었다. 이후 동일한 방법을 이용하여 직경이 다른 단일 분사기와 다수의 분사기가 장착된 연소기의 분사기 길이에 따른 음향응답을 측정하여 분사기가 장착되는 경우 공진되는 음향모드와 음향모드의 감쇠인자, 그리고 분사기의 길이에 따른 공진주파수의 변화와 분사기와 공진주파수간의 상호관계를 연구하였다.

2.2.2 FFT 프로그램 및 음향센서

FFT 분석기에서 측정된 신호는 Signal-Link사에서 제공한 SVA-duo라는 프로그램을 사용하여 FRF 함수와 상관함수(coherence)를 이용하여 측정 신호의 정확성을 확인하였다. Signal-Link사에서 제공한 SVA-duo와 B&K사 Pulse를 동일한 신호에 대한 음향응답과 상관함수를 Fig. 9에 비교하여 나타내었다. Fig. 9의 (a)는 거의 동일한 응답 특성을 보여주고 있으며, Fig. 9 (b)에서 공진 주파수 지점에서 coherence 값의 유사함을 볼 수 있다.



(a) Frequency response function



(b) Coherence function

Fig. 9 Comparison FRF & Coherence between B&K pulse and Signal -link's SVA-pro

2.3 가진신호(random noise)에 대한 고찰

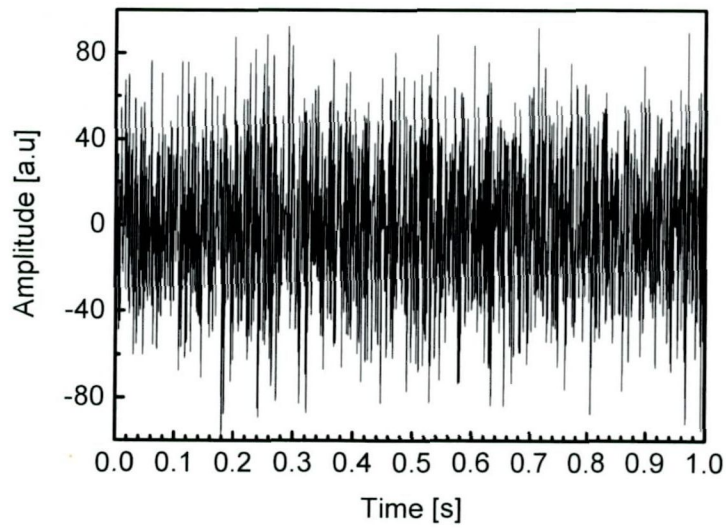


Fig. 10 Random noise in time domain

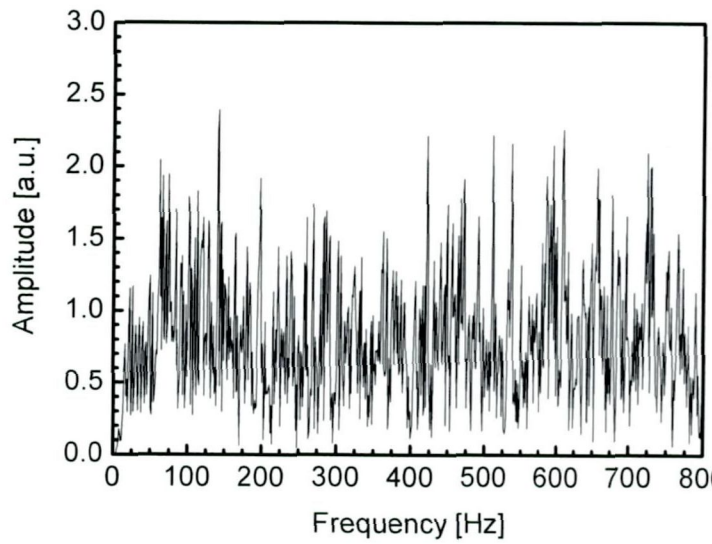


Fig. 11 Random noise in frequency domain

기본 연소실내의 음향 특성을 알아보기 위하여, Fig. 10과 같은 랜덤 노이즈(random noise)를 노트북의 프로그램을 이용하여 재생시켜 모형 연소실 내부로 가진하였다. 화이트 노이즈가 녹음된 전체 신호는 약 7초 정도이며, 이를 프로그램의 연속재생 옵션 이용하여 혼 스피커를 통해 가진 하였다.

랜덤 노이즈로 가진된 신호의 주파수 특성은 Fig. 11과 같다. 분사기 길이에 대한 감쇠 인자를 확인하기 위한 주파수 대역인 0 ~ 800 Hz 에서 어느 정도 크기의 값을 가지고 있다. 하지만, 가진 음압의 크기가 주파수에 따라 일정하지 않음을 확인 할 수 있다. 이러한 입력신호의 불규칙한 특성을 음향센서로 측정된 신호에 영향을 끼치게 된다. 이러한 이유로 인하여 FFT 사용의 문제점이 발생하여, 본 연구에서는 입력신호에 대한 출력신호의 비로 표현되는 주파수 응답함수(FRF, Frequency Response Function)를 이용하여 입력신호에 따른 문제점을 해결하였다.

2.4 신호처리(signal conditioning)에 관한 고찰

2.4.1 주파수 분해능

일반적으로 신호처리는 아날로그 과정을 독립 변수로 기록하는 과정이라 할 수 있다. 처리 과정 동안 아날로그 신호는 디지털 형태로 변환되는데 이러한 처리는 디지털로 변환된 진폭과 시간의 기준을 결정하는 일반적인 방법에 의해 이루어진다. 그러므로 실제 주파수 정보를 얻기 위해서는 충분한 비율로서 샘플링을 해야 한다. 샘플링 이론에서는 샘플링 주파수 f_s에 관한 식 (1)과 같이 나타내고 있다[18].

$$f_{Nyq} = \frac{f_s}{2} \tag{1}$$

f_{Nyq}보다 높은 주파수는 aliasing효과를 초래할 수 있으므로 저주파 통과 필터와 같이 입력신호를 잘라내야 한다. 그리고 실제 필터의 감쇠 특성을 고려해 관심 있는 주파수의 2.56배 또는 4배의 값을 샘플링 비율로 사용한다[18].

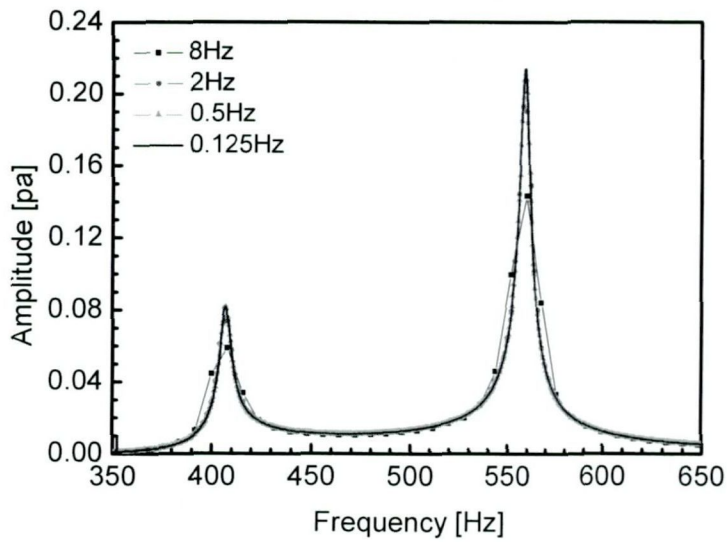


Fig. 12 FFT analyzer for several frequency resolution

T초의 기록 시간동안 측정할 수 있는 가장 낮은 주파수 단위인 주파수 분해능 (f_s : frequency resolution)은 데이터의 포인트의 개수 N은 식 (2)와 같이 나타 낼 수 있으며, 주파수와 관계없이 항상 성립한다. 본 실험에서는 Δf를 변화시켜 가며 측정한 압력신호를 Fig. 12에 나타내었다. Δf = 0.125 Hz일 때 감쇠 인자의 오차가 가장 작게 나타났다.

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = 0.125Hz \tag{2}$$

2.4.2 신호의 평균처리(signal averaging)

불규칙 신호(random noise)를 분석할 때 연속적인 푸리에 변환은 존재할 수 없으므로 신호의 형태를 결정하는데 사용되는 스펙트럼 밀도 함수와 상관함수를 측정해야 한다. 앞서 언급한 두 가지 요인은 푸리에 변환으로 계산되지만, 신호의 정확도나 통계적 신뢰성에 대한 부분은 고려되지 않는다. 결과적으로 불규칙 신호를 처리함에 있어 신호의 평균처리 과정이 수행되어져야 할 것이다. 필요한 평균의 수를 결정하는 두 가지 중요한 고려사항은 통계적인 신뢰성과 신호로부터의 왜곡된 불규칙 잡음의 제거이다 본 실험에서는 잡음의 제거와 데이터의 신뢰성 확보를 위해 평균 횟수를 100회로 하여 측정하여 나타내었다.

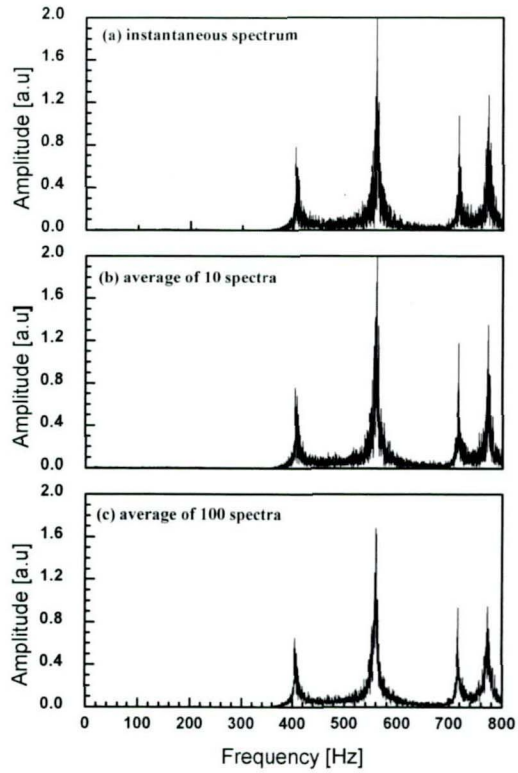


Fig. 13 Effect of frequency domain with FFT

일반적으로 평균처리는 스펙트럼상의 고주파 성분을 제거하여 마치 lowpass filter와 같은 역할을 하여 부드러운 스펙트럼의 형상을 얻을 수 있다. random noise와 같이 불규칙 신호를 시간영역에서 구간으로 나누어 각각의 데이터를 시간영역에서 평균하면 무의미한 값이 되므로, 데이터의 스펙트럼을 구하여 이들의 같은 주파수에 대한 평균값을 측정해야 한다. Figures 13, 14는 FFT와 FRF에 대한 신호를 주파수 영역에서의 평균처리를 하여 나타낸 것이다. 실제 Fig. 13 (a)를 보면 input의 신호에 의한 영향을 많이 받아 frequency domain에서의 감쇠인자를 확인하는 것이 매우 어렵다. 그러므로 신호의 평균처리를 하여 나타낸 결과 Fig. 13 (b)와 (c)는 (a)의 그래프 보다 좀 더 나은 파형을 보여주었다. 하지만, FFT분석에서는 데이터를 100번이상의 평균을 하더라도 그래프의 파형은 더 이상 나아지지 않았다.

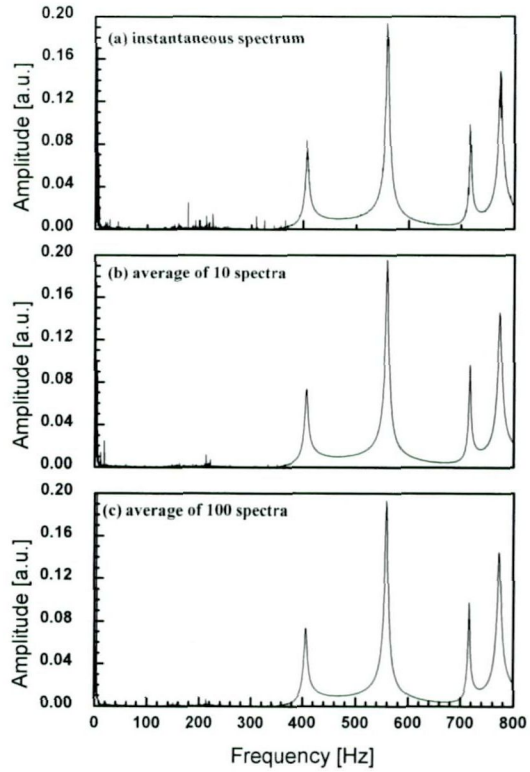


Fig. 14 Effect of frequency domain with FRF

앞에서 언급한 바와 같이 input 신호에 불규칙한 성질이 있어 측정하고자 하는 분사기의 길이에 따른 감쇠인자를 측정하는 것이 거의 불가능 하였다. 이러한 문제점을 주파수응답함수를 사용하였다. Fig. 14는 평균 횟수에 따른 주파수응답함수의 결과를 나타낸 것이다 Fig. 13과 비교해보면 주파수에 따른 파형이 매우 깨끗해진 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 14 (a), (b), (c)의 그래프를 비교하면 거의 동일한 데이터의 파형을 가지며, 평균처리 횟수가 증가할수록 좀 더 부드러운 압력응답파형을 보여주고 있음을 확인 할 수 있다.

제 3 장 음향학적 고찰과 이론

3.1 분사기에 관한 음향학적 고찰

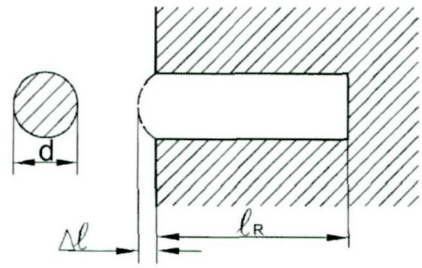


Fig. 15 Quarter-wave Resonator

수동제어기구로 사용되는 음향공명기로서 여러 가지 형태가 있을 수 있는데 그 중 하나로 Fig. 15에 나타낸 것과 같은 1/4-파장 공명기(quarter-wave resonator)가 있다[9]. 본 연구에서 채택한 기체-액체형 분사기와 1/4-파장 공명기 모두 분사기와 연소실이 연결 면에서는 열린 조건(open condition)이 적용되지만 반대쪽은 서로 다른 조건이 적용된다. 결과적으로 기체-액체형 분사기의 경우 양쪽이 열린 조건이 적용된다는 것이다.

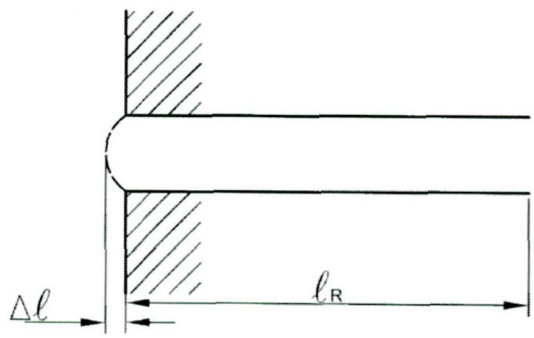


Fig. 16 Half-wave Resonator

이와 같은 경계조건으로부터 1/4-파장 공명기의 경우 각각의 면에서 압력진동의 마디(node)와 배(antinode) 조건이 형성되므로, 1/4-파장 공명기의 역할을 하게 된다. 그렇다면 같은 원리를 적용하면, 기체-액체형 분사기의 경우 양쪽면에서 압력진동의 마디 역할을 할 수 있어 반파장 공명기(half wave resonator)의 역할을 할 수 있을 것이다. 결과적으로 파장의 길이만 다를 뿐, 분사기의 음향 불안정 억제 메커니즘은 1/4-파장 공명기의 음향 진동 억제 메커니즘과 동일할 것이다. 1/4-파장 공명기의 동조 주파수(tuning frequency)는 다음과 같다[9].

$$f_0 = \frac{c_R}{4(l_R + \Delta l)} \tag{3}$$

여기서, f_0는 동조 주파수(연소실 내부에서 진동하는 공진 주파수), c_R은 공명기내 유체의 음속, l_R은 공명기의 길이, Δl은 질량보정인자(길이보정인자)이다. 만일 분사기를 반파장 공명기의 역할을 할 수 있다고 간주하면, 우변항의 분모에서 사용되는 4를 2로 바꾸어 식 (3)을 그대로 사용할 수 있을 것이다.

기체-액체 동축형 분사기는 가늘고 길며, 양쪽이 열린 조건이므로 종방향 모드(longitudinal mode)에 대한 반파장 공명기로 볼 수 있다고 가정하고 식(3)를 응용하여 다음의 1/2- 파장 공명기 설계식을 유도 하였다.

$$l_{inj} = \frac{c_{inj}}{2f_0} - \Delta l \tag{4}$$

여기서, l_{inj}은 장착되는 분사기의 길이, c_{inj}는 분사기내 유체의 음속을 나타낸다. 이 식은 f_0의 주파수를 갖는 연소장의 압력섭동이 분사기내로 입사될 때, 입사파동을 분사기내에서 반사파동에 의해 최대로 상쇄시키기 위한 분사기 길이의 이론식이다.

본 연구에서는 액체로켓엔진에 존재할 수 있는 여러 가지 유해 음향 모드 중 가장 유해하다고 알려진 제1접선방향모드(1st tangential; 1T)모드를 감쇠 대상으로 설정하였다. 분사기의 반파장 공명기로서의 역할 즉, 감쇠효과를 조사하는데 있어서 상온의 조건을 설정하여도 무방하므로 음향실험을 상온 조건에서 수행하였다.

제 4 장 측정 및 결과

4.1 연소실 공진주파수의 이론적 특성

본 시험에 사용된 연소기는 연소실 내부가 단면적의 변화가 있는 원통 수축형이며, 한쪽 면이 음향학적으로 닫혀 있는 경계조건(acoustically closed-end condition)을 가진다. 이상적인 원통형의 연소실의 경우 이론해가 존재하며 공진주파수는 식 (5)으로 표현된다. 본 실험에서 사용된 모형연소기의 경우는 식 (6)를 이용하여 연소실의 수축부를 고려하였다.

$$f_{m,n,q} = \frac{c_{ch}}{2}\left[\left(\frac{a_{mn}}{R_{th}}\right)^2 + \left(\frac{q}{L_{effect}}\right)^2\right]^{1/2} \tag{5}$$

$$L_{effect} = L_1 + \frac{2}{3}L_2 \tag{6}$$

여기서 a_{mn}은 고유값(eigenvalue)을 나타내고, c_{ch}는 음속, 하첨자 m, n, q는 각각 축방향, 반경방향, 접선방향의 음향모드 차수를 나타내는 지수(index)이다. R_{th}은 연소실 반경, L_1은 연소실 원통 부분의 길이, L_2는 수축된 연소실 부분의 길이, 연소실의 유효길이를 L_{effect}로 나타내었다. 연소실과 분사기내 유체의 음속과 밀도는 각각 343 m/s, 1.2 kg/m^{3}로 설정하였다.

4.2 연소실 공진주파수의 실험적 특성

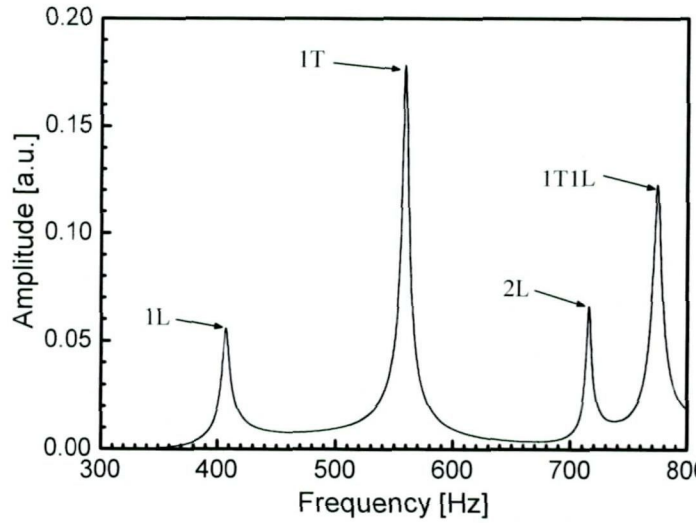
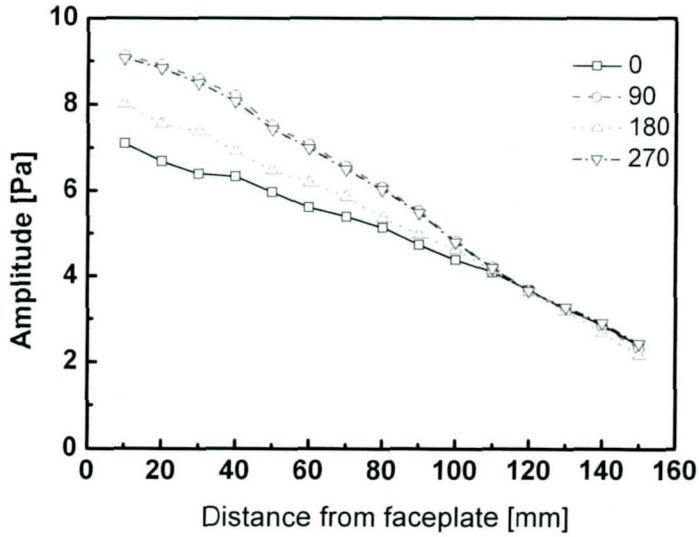


Fig. 17 Acoustic-pressure responses in a chamber without injector

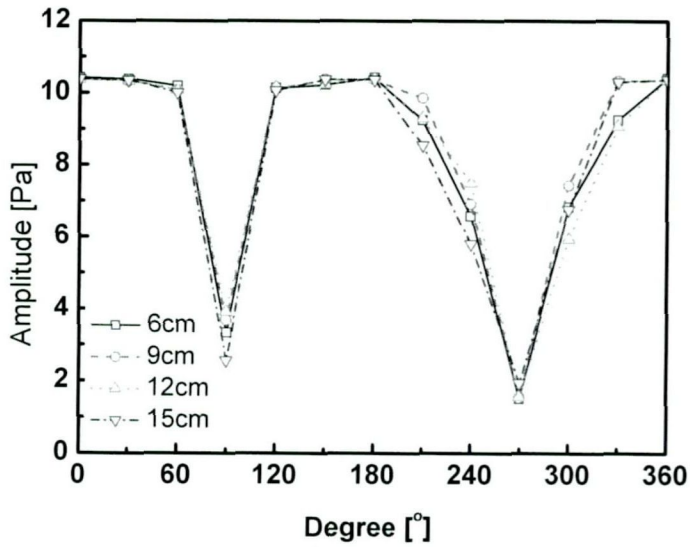
먼저, 분사기를 장착하지 않은 연소실에 대한 실험을 수행하였다. Fig. 17은 random noise를 horn driver을 이용해 연소실로 가진 하여 연소실 내부의 음향응답을 주파수 영역으로 나타낸 것이다. 각각의 공진주파수의 peak에 대하여 연소실 반경방향과 길이방향에 대한 공간적 음향장을 Fig. 18의 (a)와 (b)의 압력응답 신호로부터 확인하여 각각의 음향모드를 파악하였다. 이론값과 수치해, 그리고 실험값을 비교하여 table 1에 나타내었다.

Table 1 Comparison of resonant frequencies in a combustion chamber without injector

	1L	1T	2L	1T1L
Theoretical	414 Hz	524 Hz	667 Hz	677 Hz
Numerical[19]	405 Hz	548 Hz	714 Hz	766 Hz
Experimental	407 Hz	558 Hz	716 Hz	774 Hz



(a) Longitudinal distribution of acoustic-fluctuation(1L : 407 Hz)



(b) Tangential distribution of acoustic-fluctuation(1T : 588 Hz)

Fig. 18 Spatial distributions of acoustic fluctuation responding to each sinusoidal excitation

이론값과 수치해석 또는 실험으로 구한 공진 주파수 사이에는 약간의 오차가 있음을 알 수 있다. 특히 축방향과 관련된 1T1L mode의 경우 수치해와 실험값 모두가 이론값과 많은 차이를 보인다. 이는 연소실의 수축부로 인하여 연소실이 완전한 원통이 아니며, 그로 인하여 연소실의 유효 길이가 달라지기 때문이다. 그러나 수치해와 실험값의 비교를 통해 상온음향실험의 타당성을 확인할 수 있었다.

분사기의 길이에 따른 음향 감쇠 효과는 감쇠인자(damping factor)로 정량화하여 평가할 수 있으며, 감쇠인자가 클수록 감쇠 효과가 크다고 판단할 수 있다. 감쇠 인자는 식 (7)과 같이 표현되며 이를 이용하여 구한 감쇠인자를 table 2에 나타내었다. 수치해와 실험값을 비교하였을 때 감쇠인자 값이 거의 일치함을 보여 주었다.

$$\eta = \frac{f_2 - f_1}{f_{peck}} \tag{7}$$

Table 2 Damping factors in a combustion chamber without injector

Acoustic modes	1L	1T	2L	1T1L
Numerical	1.44 %	1.00 %	0.98 %	0.89 %
Experiment	1.49 %	0.90 %	0.56 %	0.83 %

계측된 음향 모드 중 가장 위해한 모드로 알려진 1T (제 1 접선방향) 모드에 대한 분사기 길이에 따른 감쇠 효과를 측정하기 위하여 두 가지 분사기의 길이를 변화시켜가며 1T 모드의 감쇠인자를 측정하였다.

4.3 단일 분사기를 장착한 연소실의 음향응답

4.3.1 직경 7 mm인 분사기를 장착한 연소실

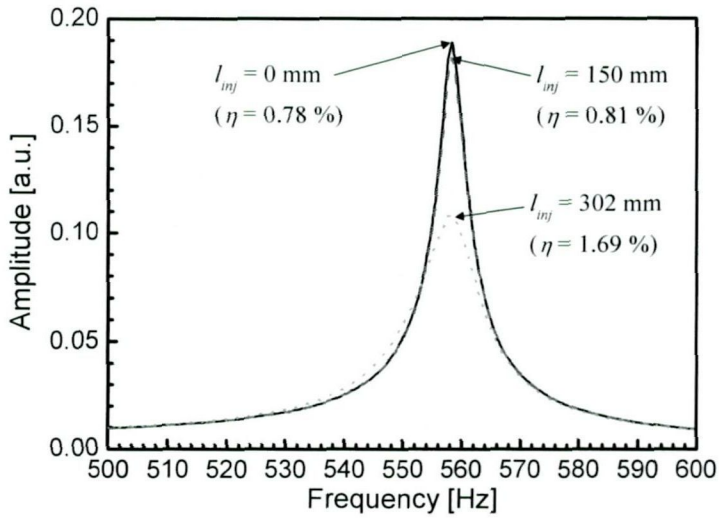


Fig. 19 Acoustic-pressure responses near f_{1T} for several length of l_{inj} = 0, 150, 302mm in a chamber with a single injector of d_{inj} = 7mm

먼저 7 mm 단일 분사기를 장착한 연소실에 대한 상온음향실험을 수행하였다. 길이 l_{inj} = 150, 302 mm인 분사기를 연소기에 장착한 연소실과 분사기가 장착되지 않은 기본 연소실에 대해서 계측된 1T 모드의 음향 응답과 감쇠인자를 Fig. 19에 나타내었다. l_{inj} = 302 mm에서 감쇠 인자가 가장 크며, 분사기 길이가 l_{inj} = 0 mm와 l_{inj} = 150 mm인 경우에는 음향 응답과 감쇠인자가 큰 변화가 없음을 확인할 수 있다.

분사기 길이 l_{inj}를 0 ~ 700 mm의 범위에서 변화시켜가며 측정한 1T 모드의 음향응답으로부터 분사기 길이에 따른 peak의 크기와 공진 주파수를 Fig. 20에 나타내었다. 300 mm와 600 mm 근처에서 peak의 크기가 낮은 지점이 존재하며, 일정하게 유지되던 공진 주파수가 300 mm와 600mm에서 급격하게 변하는 지점을 확인할 수 있다. 다시 정리하면, l_{inj} = 300 mm 근처에서 발생한 패턴이 l_{inj} = 600 mm에 반복되는 현상을 볼 수 있다.

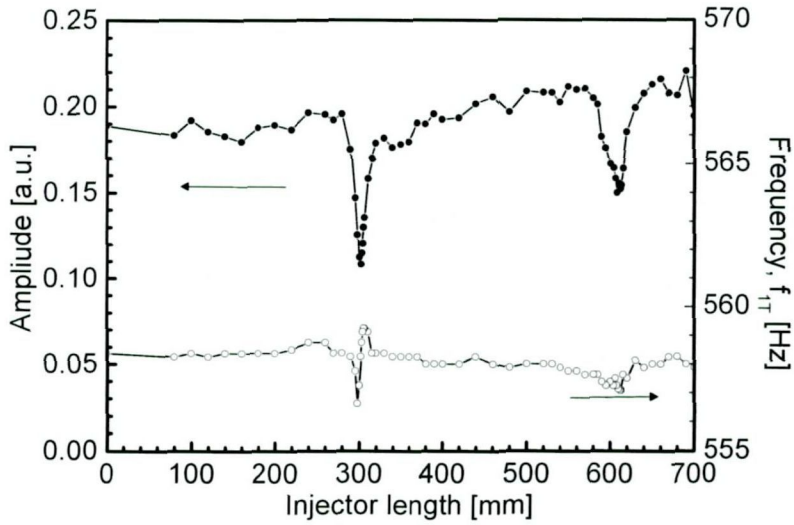


Fig. 20 Acoustic amplitudes and frequencies as a function of injector length at 1T mode (d_{inj} = 7 mm)

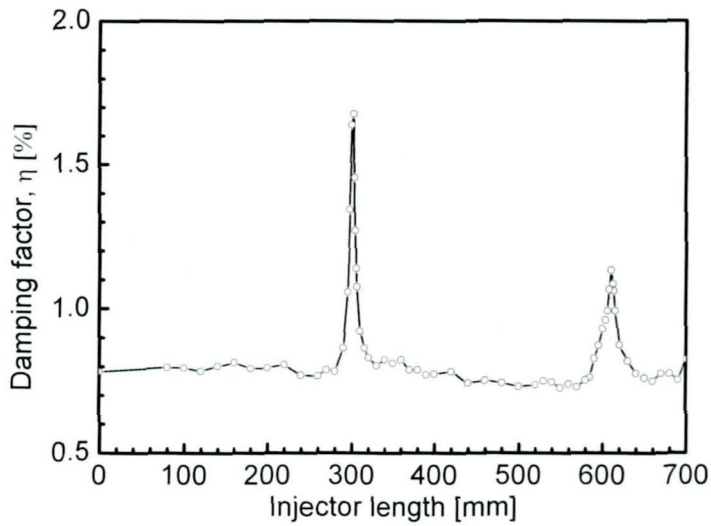


Fig. 21 Damping factors as a function of injector length at 1T mode (d_{inj} = 7 mm)

분사기 길이에 따른 감쇠인자를 계산하여 Fig. 21에 나타내었다. Fig. 21에서 감쇠인자는 l_{inj} = 300, 600 mm 근처에서 peak을 보여주고 있다. 이는 감쇠 효과가 300, 600 mm에서 높게 나타나며, l_{inj} = 302 mm에서 가장 감쇠 효과가 크다. 상온음향 조건인 c_{inj} = 343 m/s에서 계산된 이론적인 한 파장의 길이는 615 mm이므로, 1/2 파장인 경우 307.5 mm이다 실험결과와 비교하면 5.5 mm의 오차를 가진다. 이는 식 (5)로 표현되는 길이보정인자로서 표현 할 수 있다. Fig. 21에서 두 번째로 큰 크기를 감쇠인자를 가지는 분사기의 길이는 610 mm이다. 이는 한 파장(λ)과 관련이 있다. 비록 Fig. 20, 21에서는 측정하지 않았지만, 더 작은 peak이 (3/2)λ, 2λ, (5/2)λ에서도 존재 할 것이다. 하지만, 큰 감쇠 효과를 가지는 분사기의 길이는 반파장이라는 것을 확인하였다.

4.3.2 분사기의 열린 조건과 닫힌 조건과의 비교

본 연구에서 채택한 기체-액체형 분사기는 Fig. 22과 같이 양쪽이 열린 조건(open-end condition)을 가진다. 이와 같은 경계 조건으로부터 분사기 내부는 양쪽 면에서 열린 조건이므로 각각의 면에서 압력진동의 마디가 형성될 것이다. 이는 분사기의 길이를 1.5배 늘려서 한쪽 면에서 닫힌 조건(closed condition)을 적용시키면 동일한 효과를 볼 수 있을 것이다. 1.5배 늘린 분사기는 한쪽 면은 배(node)와 마디 조건(antinode)으로 표현되며, Fig. 22와 같이 표현할 수 있다. 이는 한파장이 양쪽면의 마디 조건을 가지며, 1.5λ 파장의 경우는 마디(node) 조건과 배(antinode)조건으로 표현할 수 있다는 것이다. 이러한 가정을 바탕으로 분사기의 길이를 1.5배 늘려 한쪽 면이 닫힌 조건(closed condition)을 가지는 분사기 길이에 따른 감쇠 인자를 측정하였다.

Fig. 23은 분사기 길이에 따른 한파장과 1.5파장의 감쇠인자를 나타낸 것이다. 양쪽이 열린 반파장 공명기의 경우 l_{inj} = 302.5 mm에서 감쇠인자가 가장 크며, 한쪽이 닫힌 조건인 경우 l_{inj} = 455 mm에서 가장 큰 감쇠 효과를 가지는 것으로 확인되었다. 앞서 언급한 바와 같이 한쪽 면이 닫힌 조건을 가지는 분사기는 길이가 1.5배 늘린 경우 반파장 공명기와 동일한 효과를 얻을 수 있음을 확인 할 수 있다.

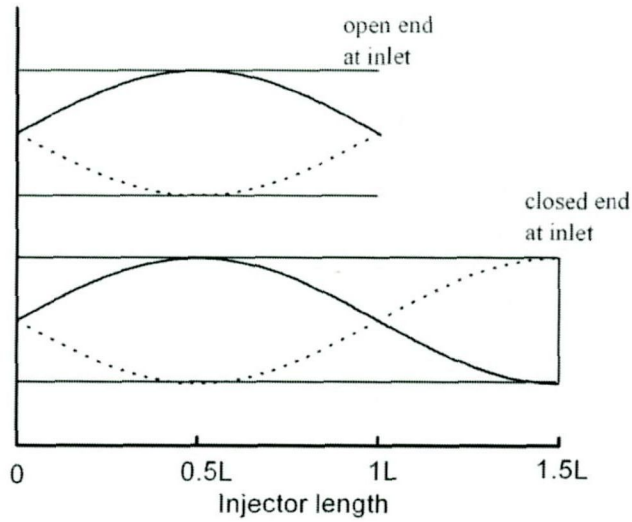


Fig. 22 Longitudinal acoustic oscillations within the injector with open end and the elongated injector with closed end at injector inlet

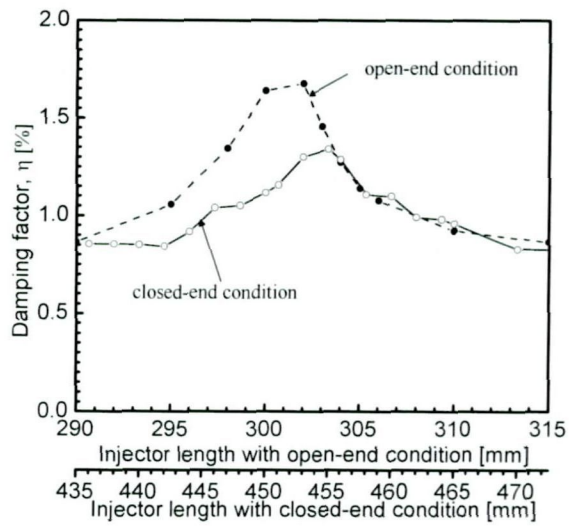


Fig. 23 open end condition vs closed end condition (d_{inj} = 7 mm)

4.3.3 14 mm & 20 mm 분사기의 음향학적 특성

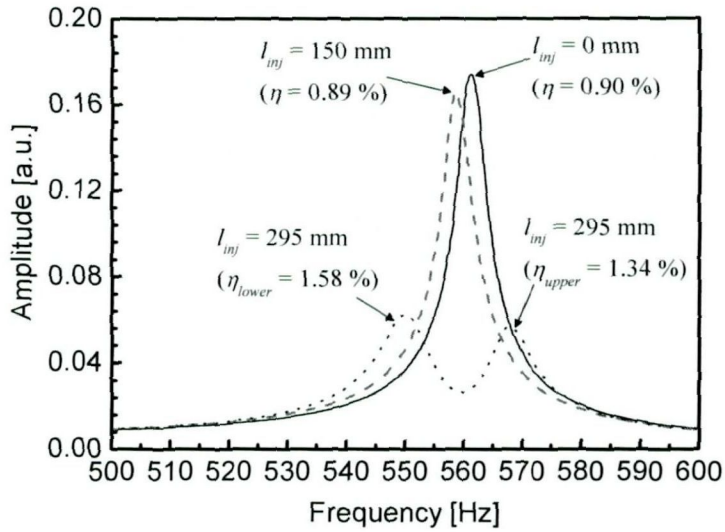


Fig. 24 Acoustic-pressure response near f_{1T} for several lengths of l_{ing} = 0, 150, and 295mm in the chamber with a single injector of d_{inj} = 14 mm

연소기에 장착되는 분사기의 직경에 따른 효과를 보기 위하여 같은 재질의 직경이 다른 분사기를 장착하여 상온 음향 시험을 수행하였다. 먼저 d_{inj} = 14 mm 분사기를 장착하여 세 가지 길이에 대한 음향 응답과 감쇠인자를 Fig. 24에 나타내었다. l_{inj} = 0 와 l_{inj} = 150 감쇠 인자와 음향 응답의 크기는 거의 일치하였다. 하지만 l_{inj} = 295 mm 의 peak은 두 개로 나누어진 것을 볼 수 있다. 또한 감쇠인자도 크게 증가함을 볼 수 있다. 한 개의 peak이 낮은 주파수의 lower mode 와 높은 주파수의 upper mode로 peak 이 나누어진 것이다. 이러한 현상은 기존의 한 개의 peak이 감쇠가 되어 두개의 peak 이 나타나는 현상을 모드분할(mode split)이라 부른다[1, 11]. 모드분할 현상은 d_{inj} = 7 mm 분사기에서는 나타나지 않았으나, d_{inj} = 14 mm 와 20 mm 분사기에서는 나타났다. 이러한 현상은 분사기의 내부 직경의 증가에 따른 감쇠 효과의 증가로부터 확인할 수 있다.

분사기 길이 l_{inj}를 0 ~ 700 mm 범위에서 변화시켜가며 측정한 1T 모드의 공진주파수를 Fig. 25에 나타내었다. d_{inj} = 7 mm 분사기와 유사한 패턴인 음향응답의 크기가 급격하게 변하는 지점이 d_{inj} = 14 mm 와 20 mm에서도 존재하며, l_{inj} = 300 mm 와 600 mm 부근에서 공진 주파수가 급격하게 변하는 지점이 관찰 되었다.

d_{inj} = 14 mm 분사기의 장착 길이에 따른 감쇠 효과를 확인하기 위하여 분사기 길이에 따른 감쇠 인자를 Fig. 26에 나타내었다. d_{inj} = 7 mm 분사기와 비교 하였을 때 d_{inj} = 14 mm 분사기가 장착된 실험에서 더 큰 감쇠 인자가 나타남을 확인 하였다. 하지만 한 파장 부근에서는 d_{inj} = 7 mm와 d_{inj} = 14 mm의 감쇠인자의 차이가 크게 나지 않았다. 또한 d_{inj} = 7 mm에서는 모드분할 현상이 나타나지 않았으나, d_{inj} = 14 mm 에서는 반 파장 부근인 l_{inj} = 290 ~ 315 mm와 한 파장 부근인 l_{inj} = 600 ~ 605 mm에서 모드분할 현상이 발생하였다. 이와 같은 모드 분할은 분사기의 열린 면적비가 클수록 더 넓은 영역에서 모드분할 현상이 관찰되었다.

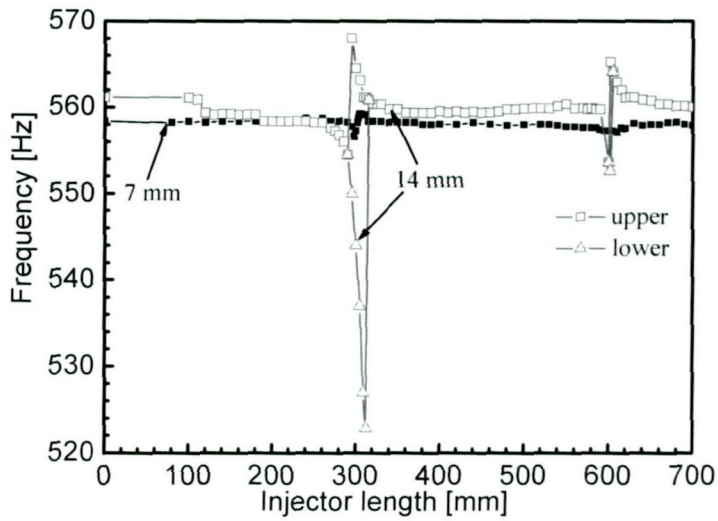


Fig. 25 Acoustic Frequencies as for several diameters of d_{inj} = 7, 14 mm in the chamber with a single injector

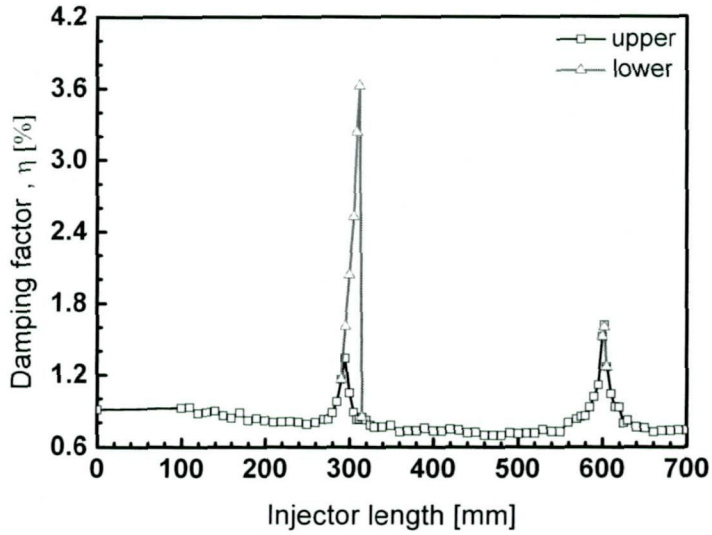


Fig. 26 Damping factors as a function of injector length at 1T mode (d_{inj} = 14 mm)

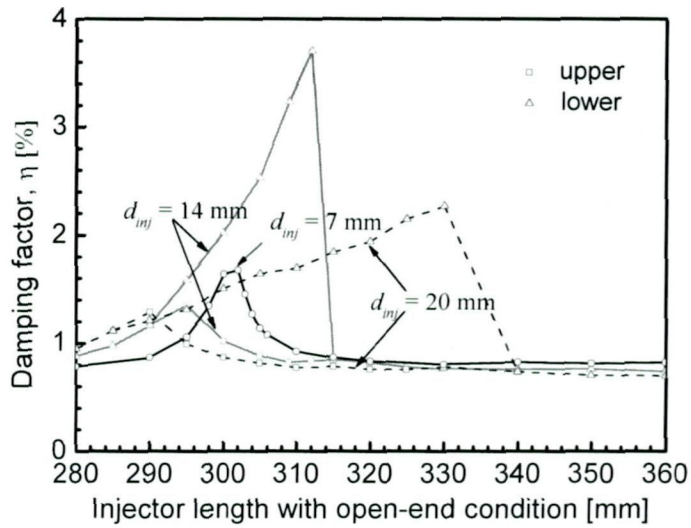


Fig. 27 Damping factors for several diameters of d_{inj} = 7, 14, and 20mm in the chamber with a single injector

반파장 길이를 가지는 세 가지 직경 d_{inj} = 7, 14, and 20 mm 분사기의 반 파장 길이 근처인 l_{inj} = 280 ~ 360 mm에서 분사기의 길이에 따른 감쇠 인자를 Fig. 27에 나타내었다. d_{inj} = 7 mm를 기준으로 하였으며, 분사기의 직경에 따른 분사기 끝 부분의 열린 면적비는 1 : 4 : 9이다. d_{inj} = 14 mm에서 감쇠 효과가 증가하여 모드분할 현상이 발생하기 시작하여 기본형 연소기에 비해 넓은 영역에서 감쇠 효과가 크게 나타남을 확인할 수 있다. d_{inj} = 20 mm 에서는 좀더 넓은 영역에서 감쇠 효과가 나타나며, 감쇠 인자도 기본형 분사기인 d_{inj} = 7 mm에 비해 크게 나타남을 보여준다. 이는 분사기 직경이 커짐에 따라 감쇠 효과가 나타나는 영역이 넓어진다는 것을 의미한다. 이는 분사기의 열린 면적비가 감쇠 효과에 영향을 미치는 영역과 관계가 있다는 것이다.

4.3.4 동일한 열린 면적비를 가지는 분사기의 음향학적 특성

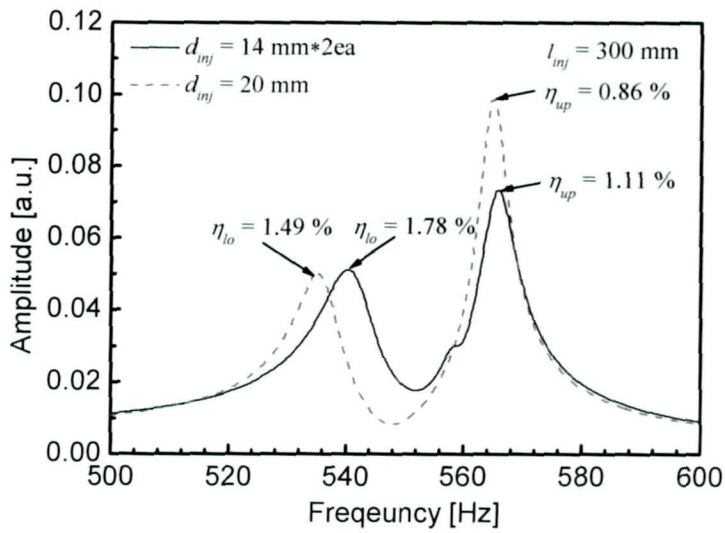


Fig. 28 Acoustic-pressure responses near f_{1T} in the chamber with two injectors of d_{inj} = 14 mm and a single injector of d_{inj} = 20 mm (l_{inj} = 300 mm)

앞에서 수행한 실험 결과로부터 분사기의 열린 면적비(open ratio)는 모드분할이 발생하는 분사기 영역에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 분사기의 직경이 모드분할에 영향을 미치는 점을 확인하기 위하여 동일한 열린 면적 비를 가지는 d_{inj} = 14 mm 분사기 2개와 d_{inj} = 20 mm 분사기 1개를 장착하여 l_{inj} = 300 mm에서의 음향응답과 감쇠인자를 Fig. 28에 나타내었다. Fig. 28에서 선명하게 나타난 lower peak와 upper peak를 확인 할 수 있다. 두 가지 조건의 같은 점은 분사기가 장착될 때 열린 면적 비는 0.28%임을 알 수 있으며, 다른 점은 장착된 분사기의 직경만이 다르다는 점이다. 하지만, 분사기 길이에 따른 최적 감쇠 길이는 (1/2)λ 인 l_{inj} = 300 mm이라는 점이다.

동일한 분사기 길이에서 d_{inj} = 14 mm 분사기 2개가 장착된 연소실의 감쇠 인자가 높게 측정되는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 동일한 열린 면적비의 분사기가 장착되는 경우 좀더 많은 수의 분사기가 장착된 연소실에서 감쇠 인자가 크게 측정되었다. 반파장 근처에서 분사기 길이에 따른 감쇠 효과를 확인하기 위하여 분사기 길이를 l_{inj} = 260 mm ~ 400 mm 까지 변화시켜가며 음향응답을 측정하였다. 위에서 언급한바와 같이 1T mode의 감쇠 효과를 감쇠인자로 정량화 하여 Fig. 29에 나타내었다. Fig. 22의 d_{inj} = 14 mm와 d_{inj} = 20 mm 보면 거의 동일한 영역에서 모드분할 현상이 발생되는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 분사기가 장착되어 분사면의 열린 면적비율을 일정할 때, 직경이 작은 분사기를 장착하는 경우가 연소실에서 발생하는 음향 섭동을 효과적으로 감쇠시킬 수 있다.

d_{inj} = 14 mm 분사기 2개가 장착되는 경우가 높은 감쇠인자와 감쇠 효과가 높게 나타나는 더 넓은 분사기 길이 영역의 두 가지 측면에서 연소실에서의 음향 섭동을 감쇠시키는데 더 효과적이라는 것을 보여준다. 이러한 결과는 d_{inj} = 14 mm 분사기 2개가 장착되는 경우에 감쇠 인자가 d_{inj} = 20 mm 단일 분사기가 장착되는 경우보다 더 높은 감쇠 인자를 가지고 있으며, 더 넓은 감쇠영역을 가지고 있다는 것으로부터 확인 되었다.

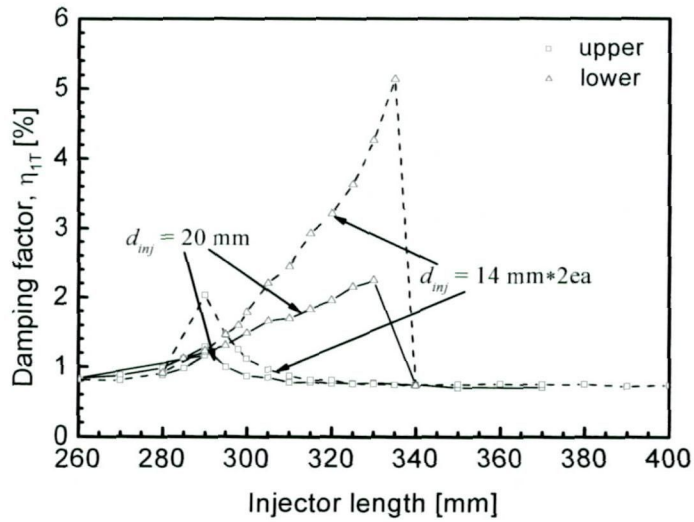


Fig. 29 Damping factors as a function of injector length in the chamber with two injectors of d_{inj} = 14 mm and a single injector of d_{inj} = 20 mm

반파장공명기(half-wave resonator)는 1/4공명기(quarter-wave resonator)와 동일한 감쇠 메커니즘을 가진다. 반파장 공명기는 연소실의 음향 섭동이 공명기 내부 파동으로 상쇄되어 진폭이 감쇠되거나 흡수될 수 있다. 음향 감쇠가 일어나는 원리는 공명기 내부로 들어간 연소실의 음향 파동이 공명기 내부에서 반사파동에 의해 상쇄되어 나타나는 현상이다. 공명기의 감쇠 효과를 향상시키기 위해서는 더 높은 크기를 가지는 압력섭동이 공명기 내부에서 생성되어야 한다는 것을 확인하였다.

앞서 언급한 바와 같이 분사기의 음향 감쇠 능력은 분사기 직경이 커져감에 따라 높아진다. 하지만, 분사기의 직경을 크게 하는 것은 연소실에서의 분사기가 차지하는 면적이 커진다는 것을 의미한다. 또한 분사기의 직경을 크게 하는 문제는 분사기 내부에서 발생하는 파동과 관련이 있다. 분사기 내부에서 생성되는 압력섭동의 음향 에너지는 분사기 내부 벽면에 의해 흡수되고 소산된다. 분사기 면적의 증가는 분사기 내부에서 발생되는 압력섭동을 경감시켜, 분사기에 의한 파동상쇄효과를 감소시키는 결과를 가져와 결과적으로 감쇠 효과가 떨어지게 될 것이다.

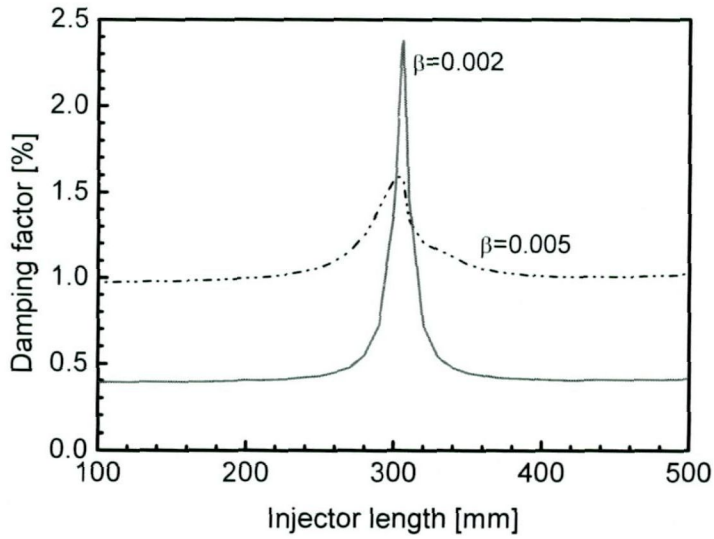


Fig. 30 Damping factors as a function of injector length with boundary absorption coefficients of 0.002 and 0.005 (d_{inj} = 14 mm)[19]

분사기의 d_{inj} = 14 mm을 고정시키고, 두 가지 흡음 계수(absorption coefficient, β) 0.002와 0.005에 따른 분사기 길이에 따른 감쇄인자를 Fig. 30에 나타내었다. β= 0.005일 때가 분사기 벽에서 음향에너지의 흡음률과 소산률이 높다는 것을 의미한다. 이는 적합하지 않은 분사기를 장착하는 경우 분사기 길이가 최적 감쇠 길이로부터 멀어질수록 β = 0.002가 일 때 보다 β = 0.005 감쇠가 크게 일어남을 볼 수 있다. 하지만, 최적 길이인 l_{inj} = 300 mm에 적용하는 경우에는 낮은 β = 0.002일 때가 감쇠 효과가 더 높게 나타났다. 이러한 증거는 Figs. 28, 29에 잘 나타나있다[19].

결과적으로, 반파장 공명기를 이용한 직경이 큰 분사기가 장착되는 것보다 직경이 작은 분사기가 더 많이 장착되는 것이 음향 감쇠가 더 효과적이라는 것을 제시한다. 이러한 이유로 인해 동일 한 열린 면적비 0.28%를 가지는 d_{inj} = 14 mm 분사기 2개가 장착되는 경우가 d_{inj} = 20 mm 단일분사기가 장착되는 경우보다 더 감쇠 효과가 더 큰 이유라고 볼 수 있다.

4.4 다수 분사기를 장착한 연소실의 음향응답

4.4.1 시험 장치 및 방안

실제 엔진이나 액체로켓연소실의 경우 분사기면에 수백 개의 분사기가 장착된다. 이러한 수백 개의 분사기에 대한 영향을 알아보기 위해 다수의 분사기가 장착된 연소실에 대한 상온음향실험을 수행하였다. 다수 분사기에서 사용할 분사기의 재질은 폴리카보네이트(PC, poly carbonate)이며, 직경은 27 mm이다. PC관을 사용한 단일분사기가 장착된 연소실에 대한 상온음향실험을 수행하였고, 54개의 PC관을 이용한 다수분사기가 장착된 연소실에 대한 음향감쇠효과를 조사하였다. Fig. 31, 32은 연소실 분사기면에 장착된 PC관의 배열과 다수 분사기를 장착한 시험 장치의 개략도이다.

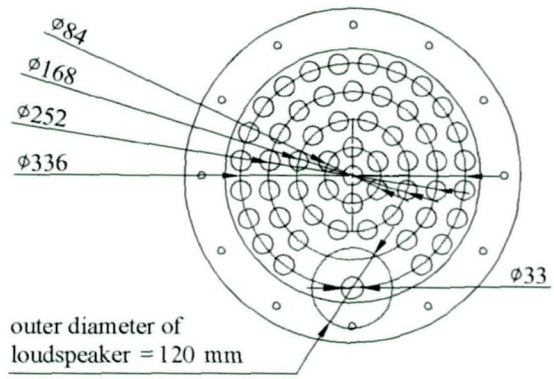


Fig. 31. Configuration of injectors mounted to the faceplate (d_{inj} = 27 mm)

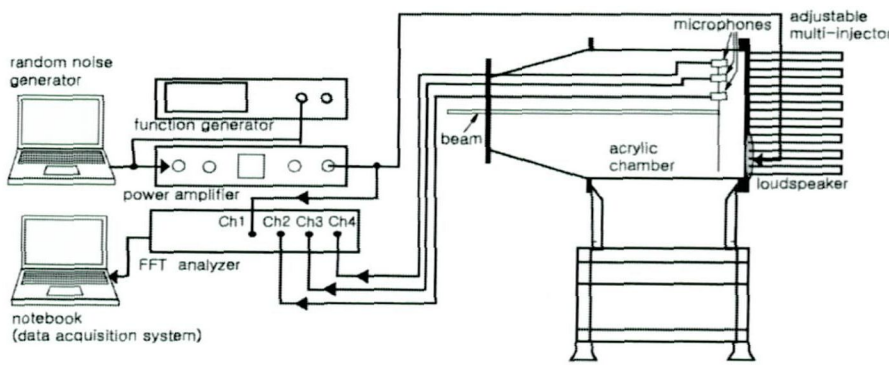


Fig. 32 Schematic diagram of acoustic-test apparatus with multi-injectors

4.4.2 PC(poly carbonate)를 사용한 단일분사기의 음향학적 특성

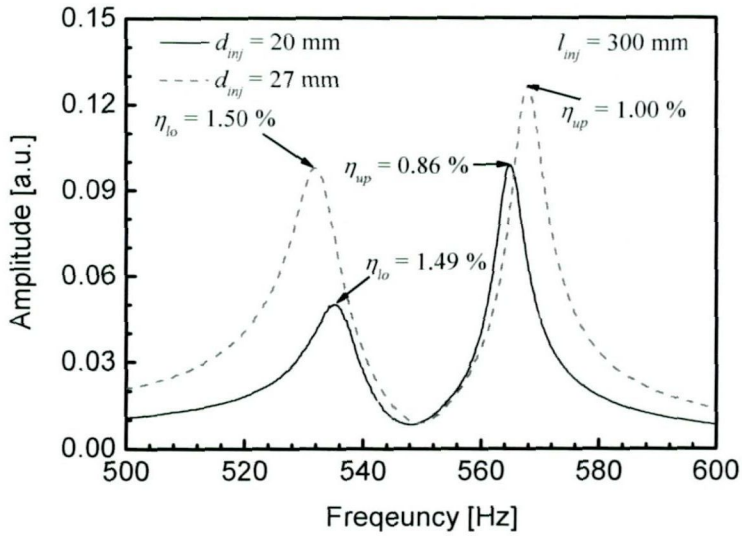


Fig. 33. Acoustic-pressure responses near f_{1T} in the chamber with two injectors of d_{inj} = 20 mm and a single injector of d_{inj} = 27 mm (l_{inj} = 300 mm)

PC관을 사용한 다수 분사기의 길이에 대한 음향 감쇠 효과를 확인하기 위한 기본 실험으로 단일 PC관을 장착하여 상온음향 시험을 수행하였다. 먼저 분사기 길이 l_{inj} = 300mm가 장착된 d_{inj} = 27 mm PC관과 d_{inj} = 20 mm 아크릴 관을 장착한 연소실에 대한 음향응답크기와 감쇠인자를 Fig. 33에 나타내었다. Fig. 33에서 PC관을 장착한 연소실의 음향응답 또한 peak이 두 개로 나누어졌다. 동일한 분사기 길이에서 PC관을 장착한 연소실이 조금 더 큰 감쇠 인자를 가지고 있음을 확인할 수 있다. d_{inj} = 20 mm와 d_{inj} = 27 mm를 장착한 경우 감쇠인자의 변화율은 d_{inj} = 14 mm와 d_{inj} = 20 mm를 장착한 감쇠인자의 변화율보다 줄어든 것을 볼 수 있다. 이는 분사기의 직경이 커질수록 분사기 내부 벽면에서의 소산율과 흡음률이 커져 분사기 길이에 따른 감쇠 효과가 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

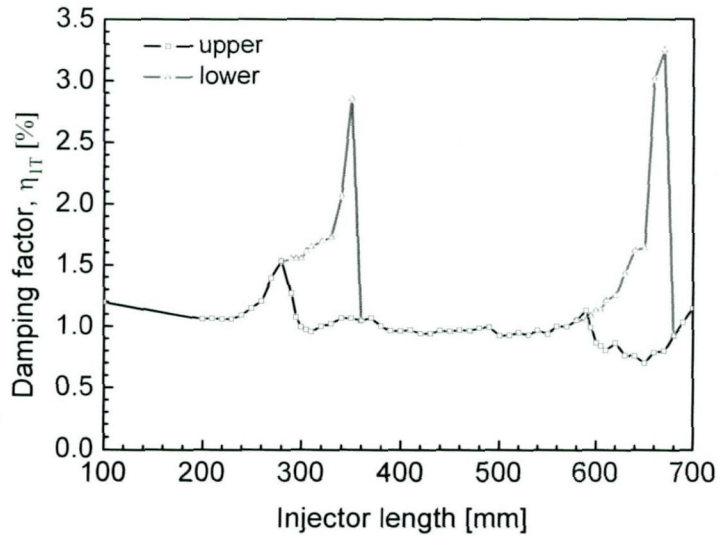


Fig. 34 Damping factors as a function of injector length at 1T mode (d_{inj} = 27 mm)

PC관을 사용한 단일 분사기의 면적 비율은 0.51%이며, 분사기 면에서 분사기 장착에 의한 면적비는 σ_A = 0.0051이다. 아크릴 관을 이용한 단일 분사기는 7, 14, 20 mm를 장착한 열린 면적비는 0.03, 0.14, 그리고 0.28%이다. PC관을 장착한 경우 아크릴 관을 이용한 단일 분사기보다 더 큰 면적비를 가지고 있어서 모드분할이 나타나는 영역이 좀더 넓게 나타날 것으로 예상할 수 있으며, 이러한 예상은 Fig. 34에서 확인할 수 있다. 위의 결과로부터 아크릴 관을 사용하는 경우와 PC관을 사용하는 경우 감쇠인자의 차지는 재질에 의한 것이 아니라 분사기가 장착되는 면적에 따라 결정되는 것이라 볼 수 있다. 이러한 결과로 인해 PC관을 이용한 다수의 분사기를 장착한 연소실의 음향감쇠 실험의 타당성을 확보했다

4.4.3 다수 분사기와 연소실의 상호작용에 의한 음향학적 특성

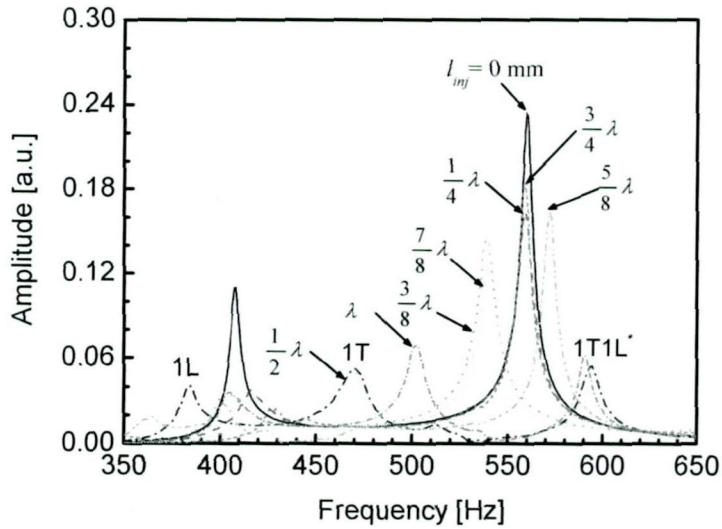


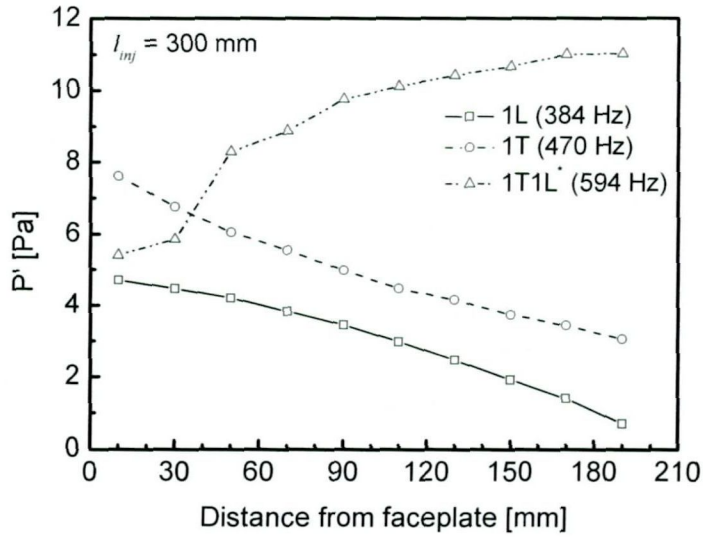
Fig. 35 Acoustic-pressure responses in chamber with multi-injectors

실제의 로켓 엔진의 경우 수십-수백 개의 분사기가 장착되어 운용되므로 다수 분사기가 장착된 연소실의 음향학적 특징을 조사하였다. 연소실에 54개의 분사기가 장착된 분사기면적 비율은 27.8%이며, 분사기면에서 분사기 장착에 의한 열린 면적비는 σ_A = 0.278이다.

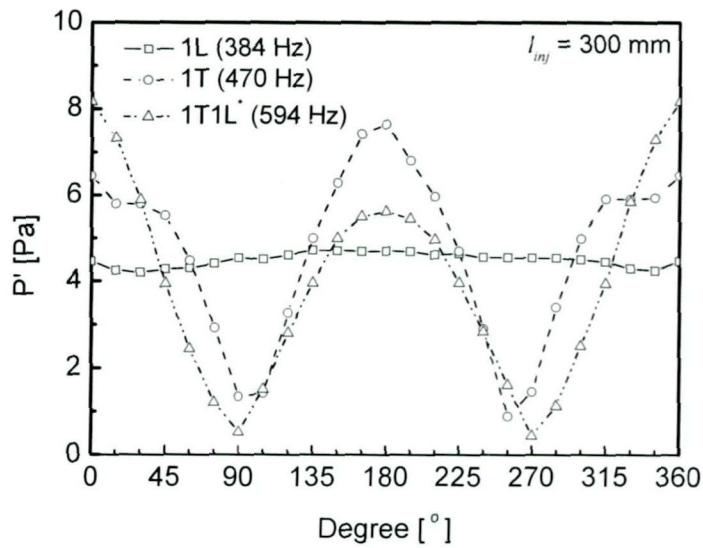
연소실에 내부로 random noise를 가진 한 후 다양한 길이(l_{inj})에 대한 음향응답을 Fig. 35에 나타내었다. 분사기 길이는 0 mm에서부터 1λ까지 측정하였다. Fig. 35에서 보면 음향응답특성이 연소실에 장착되는 분사기의 길이에 많은 영향을 받는 것을 볼 수 있다. 이러한 음향응답 특성은 초기연구에서 수행되었던 단일 분사기와 매우 다르다는 것을 확인 할 수 있다. l_{inj} = 302 mm = (1/2)λ에서 세 개의 주파수(384, 470, and 594Hz) 를 가지는 peak이 존재함을 볼 수 있다. 각각의 peak의 amplitude를 l_{inj} = 0 mm 일 때와 비교해 보면 작아졌음을 확인 할 수 있다. 다수 분사기를 장착하는 경우 l_{inj} = (1/2)λ일 때의 발생하는 peak의 특성을 확인하기 위하여 함수 발생기(function

generator)을 이용하여 정현파형태(sinusoidal)인 sine wave를 사용하여 loudspeaker를 이용하여 연소실 내부로 가진 하였다. 정현파의 주파수를 384, 470, 그리고 594Hz로 고정하여, $l_{inj} = (1/2)\lambda$일 때 발생되는 peak의 공진 주파수 동일하게 해주었다. Fig. 36 가진된 주파수에 따른 연소실의 음향 응답파를 길이 방향과 반경방향에 대해 측정하여 나타낸 것이다. 길이 방향과 반경방향형태로 발생하는 파동으로부터 1L(1st longitudinal)과 1T(1st Tangential) 모드는 음향학에 나오는 기본이론으로부터 쉽게 확인 할 수 있었다. 하지만, 세 번째 peak인 594Hz의 경우 단일 분사기가 장착되는 경우에는 관찰 할 수 없었던 새로운 모드로 확인되었다. 그래서 Fig. 35에서 나타낸 것과 같이 음향 섭동 주파수를 594Hz로 가진 하여 음향 응답파를 측정하였다. 그 결과 594Hz에서 발생하는 음향 모드는 기존에 보여주지 못했던 새로운 형태를 보여주고 있다.

Fig. 35b 반경방향의 분포를 보면 1T mode의 음향장을 가지고 있다. Fig. 35a의 길이 방향 분포도를 보면 분사기와 연소실을 모두 포함하는 1T와 1L모드가 복합적으로 나타나는 것처럼 보인다. 연소실의 분사기의 입구부분과 노즐목 부분에서 압력의 노드(node)가 만들어 질 것이다. 이러한 이유로 인해 Fig. 35a에서 압력섭동의 크기가 분사기 면으로부터 멀어질수록 증가하는 것으로 확인되었다. 594Hz에서 새로운 모드는 기존의 연소실에서 발생하는 1T1L mode와 유사하지만, 다른 것으로 판명되었다. 이러한 분사기와 연소실에 연관된 모드를 분사기 연관 1T1L mode라 부르며, $1T1L^{*}$로 표기하였다. 이러한 독특한 압력장은 연소실과 다수분사기의 상호작용에 의해 생겨났다는 것을 알 수 있다. Fig. 19,20,21을 확인하면 단일 분사기를 장착한 연소실의 음향 응답에서는 음향학적 상호작용이 나타나는 예를 거의 찾아 볼 수가 없다. 엄밀히 말해서 분사기와 연소실의 상호작용 현상은 다수 분사기가 장착되는 경우에서만 확인을 할 수 있다. 다수의 분사기가 장착되는 경우 분사기의 열린 면적비가 $\sigma_A = 1$에 도달하게 되면 분사기와 연소실은 결합되어, 상호작용에 의해 발생되었던 음향모드는 사라지게 될 것이다. 결과적으로, 열린 면적비가 극단적으로 커지는 경우 압력진동 노드가 연소실과 분사기가 접하는 분사면에서 생성될 것이다.



(a) Longitudinal distribution of acoustic-fluctuation



(b) Tangential distribution of acoustic-fluctuation

Fig. 36 Spatial distributions of acoustic fluctuation responding to each sinusoidal excitation

분사기의 l_{inj} = 1λ에서 측정된 음향응답은 l_{inj} = (1/2)λ보다는 약하지만 분사기가 장착되지 않은 경우보다 감쇠 효과가 뛰어남을 볼 수 있다. 이는 한파장 공명기가 반파장 공명기 보다 효율은 떨어지지만, 그 외의 다른 길이 보다 감쇠 효과가 뛰어나다는 것을 보여주고 있다. 이와는 반대로 연소실에 장착되는 다수의 분사기 l_{inj} = (1/4)λ와 l_{inj} = (3/4)λ를 비교해 보면 공진 주파수가 이동하는 경향을 보여주지 않고 있으며, 음향응답의 크기 또한 크게 낮아지지 않음을 볼 수 있다. 이는 분사기의 길이에 의해 음향파의 감쇠가 일어난 것이 아니라, 다수의 분사기 장착으로 인한 음향 에너지가 분사기 내부벽면에 의해 소산되어 나타난 결과라고 볼 수 있다. 결과적으로 분사기의 l_{inj} = (1/4)λ와 l_{inj} = (3/4)λ를 장착하는 경우 분사기를 이용한 감쇠 효과를 얻을 수 없음을 뜻한다.

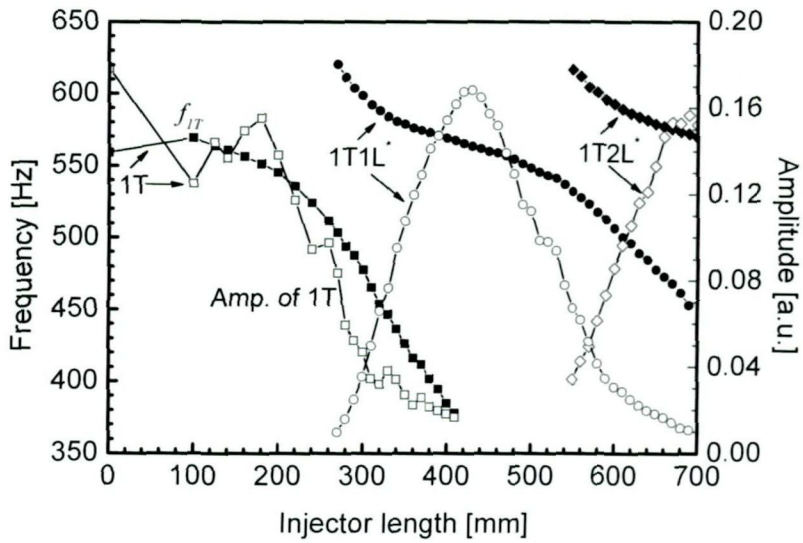


Fig. 37 Acoustic frequencies and amplitudes of 1T, 1T1L*, and 1T2L* modes as a function of injector length in chamber with multi-injectors

또한, 연소실과 다수의 분사기가 결합되어 나오는 독특한 음향 모드는 분사기의 동조주파수에 영향을 미친다. 다수 분사기를 장착하는 경우 분사기의 동조 길이를 찾

기 위해서는 음향응답의 크기와 분사기 길이에 따른 주파수 변화를 고려해야한다. 분사기의 길이에 따른 음향 응답과 주파수를 Fig. 37에 나타내었다. 분사기의 l_{inj} = 0 mm에서 증가함에 따라 f_{1T}항의 주파수와 줄어들며, 음향응답의 크기는 작아진다. 특히 반파장 길이인 l_{inj} = 300 mm 부근에 도달하면, 공진주파수는 급격하게 변화하고 음향응답의 크기도 작아진다. 이는 분사기 길이가 길어짐에 따라 1T mode 가 점점 약해져 가는 것을 의미하며, 분사기의 l_{inj} = 410 mm를 넘어서면 완전히 감쇠 되어 사라진다. 분사기의 l_{inj} = 0 mm에서부터 증가하는 동안 새로운 모드인 1T1L*은 기존에 1T 보다 더 높은 주파수와 낮은 음향응답크기를 가지고 분사기의 l_{inj} = (1/2)λ 바로 앞에서 새롭게 나타난다. 분사기의 l_{inj} = 270 mm에서 주파수는 f_{1T1T}^{*} = 625Hz에서 처음 나타났다. 분사기의 길이가 늘어남에 따라 1T1L*이 나타나는 주파수는 낮은 주파수 영역으로 변화하며, 음향응답의 크기는 l_{inj} = 430 mm에서 가장 크게 나타난다. 분사기 길이가 늘려가며 측정한 결과 새로운 모드인 1T1L*이 생성되고 또 다른 모드인 1T2L*이 같은 패턴으로 나타나는 것을 볼 수 있다.

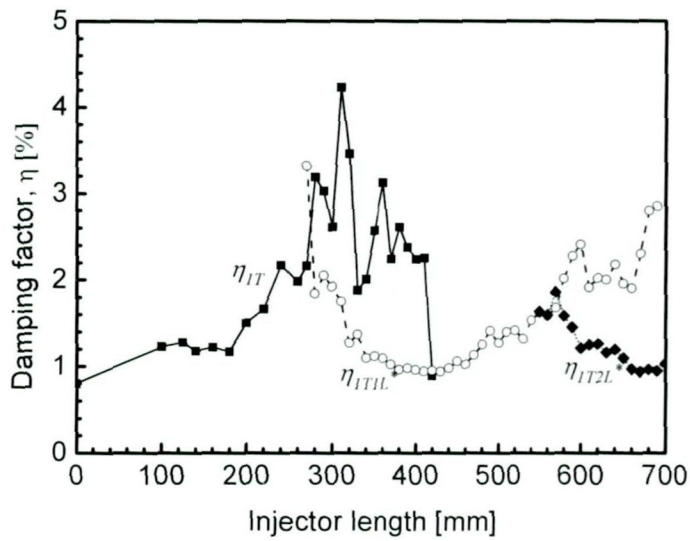


Fig. 38 Damping factors of 1T, 1T1L*, and 1T2L* modes as a function of injector length in chamber with multi -injectors

Figure 38은 1T, 1T1L*, 그리고 1T2L* 의 감쇠 인자를 분사기 길이에 의한 함수로서 나타낸 것이다. Fig. 38에서 보는 분사기 길이에 따른 감쇠 인자는 매우 불규칙적인 특징을 보여주고 있다. 하지만, 분사기 길이가 늘려가며 측정한 결과 1T 모드의 감쇠인자는 분사기 길이가 315 mm까지 증가하며, 그 이후에는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이와는 달리 1T1L*의 경우 초기에는 높은 값을 가지지만, 분사기 길이가 430 mm를 기준으로 다시 증가하는 경향을 보여주고 있다. 또한 1T2L* 의 경우는 1T1L*과 유사한 경향을 보여주고 있다.

Fig. 38에서 분사기의 l_{inj} = (1/2)λ부근에서 1T1L* 모드의 감쇠인자가 1T 모드의 감쇠 인자보다는 작게 나타나는 것을 주목해야한다. 앞에 말한바와 같이 높은 모드인 1T1L*, 1T2L*은 다수 분사기가 장착되어 연소실과 연계되어 나타나는 모드이며, 분사기의 길이는 수동적인 제어기구의 기존 길이보다 작아야 한다는 것을 의미한다. 단일 분사기를 장착하는 경우 최적 동조 길이인 (1/2)λ이라는 것을 제안하였다. 하지만, 다수 분사기가 장착되는 경우 분사기의 최적 동조 길이는 수정되어야 한다. 왜냐하면 기존에 제안 되었던 (1/2)λ에서 감쇠 인자가 낮은 새로운 분사기 연계 모드가 나타나기 때문이다. Figs. 29, 30으로부터 최적의 동조 길이는 반파장 길이보다 조금 짧고, 감쇠 인자가 낮게 나타나는 분사기 연계 모드를 피할 수 있는 길이이다. 결과적으로 수많은 분사기가 장착되더라도 기체-액체형 분사기는 여전히 반파장 공명기로서의 역할을 할 수 있으나, 단일 분사기에서 고려되었던 반파장 길이보다는 좀더 짧은 길이로 동조시켜야 한다는 것이다.

다수 분사기가 장착된 연소실의 분사기 길이에 따른 각 모드의 공진 주파수와 파장에 따른 동조 주파수를 Fig. 39에 나타내었다. 1T의 주파수가 지속적으로 감소하며, 1T1L*, 1T2L* 모드 또한 주파수가 지속적으로 감소하는 하며 특히 (1/2)λ, 1λ에서 주파수는 급격하게 변화함을 볼 수 있다. 분사기 길이의 변화에 따른 새로운 모드의 생성과 주파수 변화는 분사기가 공명기로서의 역할을 하기 때문이다. 그 결과 분사기의 길이가 최적으로 동조 되었을 때 음향응답의 크기를 감쇠 시키며, 주파수 또한 급격하게 변화시킨다. 하지만, 분사기가 최적 동조 길이가 아닌 경우 주파수의 변화가 적으며, 음향응답의 크기도 크게 나타남을 알 수 있다.

제 5 장 결론

고성능 액체로켓에 기체-액체 추진제 조합을 추진제를 분사하는 동축형 분사기가 채택될 수 있다. 동축형 분사기의 경우 반파장 공명기의 형태와 비슷하므로, 기체-액체형 분사기의 적절한 설계를 통해 수동적인 감쇠 기구로 사용될 수 있음을 착안하여, 본 연구에서는 분사기의 공명기로서의 역할을 선형음향실험을 통해 검증하였다.

분사기가 장착되지 않은 기본 연소실에 대한 음향응답을 측정하여, 공진주파수와 각각의 모드의 특성을 확인하였다.(406 Hz : 1st Longitudinal mode 559Hz : 1st Tangential mode) 연소실에 단일 분사기가 장착되는 경우 각각의 열린 면적비에 따른 음향 감쇠 효과를 조사하였고, 이러한 결과로부터 음향 감쇠 효과가 최대로 나타나는 최적 분사기의 길이는 상온음향 실험으로부터 직경 7 mm 분사기가 장착되는 경우 302.5 mm이며, 장착되는 직경에 따른 열린 면적비가 증가하는 경우 감쇠 효과가 커져 모드분할(mode split) 현상이 발생하였다. 분사기의 열린 면적비는 모드 분할이 발생하는 분사기 길이 영역에 영향을 주는 것으로 확인되었다. 동일한 열린 면적비로 분사기를 수량을 변화시켜가며 측정하였다. 열린 면적비를 고정시키는 경우 분사기의 수량이 많을수록 연소실에서 발생하는 음향 섭동을 더 효과적으로 감쇠 시킬 수 있었다. 이러한 결과를 토대로 단일 분사기가 장착되는 경우 반파장 길이에서 최적 감쇠 효과가 나타났으며, 분사기가 반파장 공명기의 역할을 수행할 수 있음을 확인하였다

다수 분사기가 장착되는 경우 분사기와 연소실의 연계 모드 생성으로 인한 최적의 동조 길이를 반파장 길이보다 조금 짧게 해야, 감쇠 인자가 낮게 나타나는 분사기 연계 모드를 피할 수 있는 길이이다. 결과적으로 수많은 분사기가 장착되더라도 기체-액체형 분사기는 여전히 반파장 공명기로서의 역할을 할 수 있으나, 단일 분사기에서 고려되었던 반파장 길이보다는 좀더 짧은 길이로 동조 시켜야 한다는 것이다.

위의 결과로서 분사기가 반파장 공명기로서의 역할을 수행할 수 있음을 확인하였다. 또한 다수 분사기가 장착되는 경우 연소실과 분사기와의 음향학적 연계성(acoustic coupling)을 가질 수 있다는 것을 확인하였다. 다수 분사기가 장착되는 경우 분사기 길이가 길어짐에 따라 각 공진 주파수가 지속적으로 감소하고 반파장 길이 이전에서 음향감쇠 효과가 최적으로 나타나는 것을 확인하였다. 반파장 길이에서 분사기 연계 모드인 1T1L*모드가 새로 생성됨을 알 수 있었다. 1T 계열 모드의 경우 반파장 근처에 감쇠되고, 주파수가 급격하게 변하였으나, 그 외 영역에서는 주파수의 변화가 적고 음향 감쇠 효과가 작다는 것을 확인하였다

본 연구 결과로서 기체-액체형 분사기가 반파장 공명기로서의 역할을 충분히 수행할 수 있음을 확인하였으며, 분사기의 적절한 설계(분사기의 열린 면적비)를 통해 연소실의 음향감쇠 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. Harrje, D. T., and Reardon, F H. (eds.), *Liquid Propellant Rocket Combustion Instability*, NASA SP-194, 1972.
2. Ducruix, S., Schuller, T., Durox, D. and Candel, S.: *"Combustion Dynamics and Instabilities Elementary Coupling and Driving Mechanisms,"* Journal of Propulsion and Power, Vol. 19, No. 5, 2003, pp. 722~734.
3. Huzel, D. K. and Huang, D. H.: *Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines*, Progress in Astronautics and aeronautics, Vol. 147, AIAA, Washington, DC, pp. 113, 1992.
4. Keller, Jr., R. B. (ed.): *Liquid Rocket Engine Combustion Stabilization Devices*, SP-8113, NASA, 1974.
5. Kim, S.-K., Kim, H. J., Seol, W. S., and Sohn, C. H.: *"Acoustic Stability Analysis of Liquid Propellant Rocket Combustion Chambers,"* AIAA 2004,Paper 2004-4142.
6. Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., and Sanders, J. V.: *Fundamentals of Acoustics*, 4th Ed, John Wiley & Sons, Inc., NY, Chap. 2, 2000
7. Kim, H. and Sohn, C. H.: *"Experimental Study of role of Gas-Liquid Scheme Injector as an Acoustic Resonator in a Combustion Chamber,"* Journal of Mechanical Science and Technology, 2006, Vol. 20, No. 6, pp. 896~904.
8. Ko, Y. S., Lee, K. J., and Kim, H. J.: *"Acoustic Tests on Atmospheric Condition in a Liquid Rocket Engine Chamber,"* Transactions of the KSME(B) (in Korea), 2004, Vol. 28, No. 1, pp. 16~23.
9. Laudien, E., Pongratz, R., Pierro, R., and Preclik, D.: *In Liquid Rocket Engine Combustion Instability* (Edited by Yang, V. and Anderson, W. E.), Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 169, AIAA, Washington DC, 1995, pp. 377~399.

10. McManus, K. R., Poinsot, T., and Candel, S. M.: *"A Review of Active Control of Combustion Instabilities,"* Progress in Energy and Combustion Science, 1993, Vol. 19, pp. 1~29.

11. Natanzon, M. S.: *Combustion Instability* (Translated by Culick, F. E. C. in 1966), Mashinostroyeniye, Moscow, 1986.

12. Oefelein, J. C. and Yang, V.: *"Comprehensive Review of Liquid-Propellant Combustion Instabilities in F-1 Engines,"* Journal of Propulsion and Power, 1993, Vol. 9, No. 5, pp. 657~677.

13. Sohn, C. H.: *"A Numerical Study on Acoustic Behavior in Baffled Combustion Chambers,"* Transactions of the KSME(B) (in Korea), 2002, Vol. 26, No. 7, pp. 966~975.

14. Sohn, C. H., Kim. S.-K., and Kim, Y.-M.: *"Effects of Various Baffle Design on Acoustic Characteristics in Combustion Chamber of Liquid Rocket Engines,"* KSME International Journal, 2004, Vol. 18, No. 1, pp. 154~161.

15. Sutton, G. P.: *Rocket Propulsion Elements,* 6th Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992.

16. Zucrow, M. J. and Hoffman, J. D.: *Gas Dynamics,* Vol. II, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1977.

17. Sohn, C. H., Kim, S.-K., and Kim, Y.-M.: "*Effects of Baffle Designs on Acoustic Characteristics in Combustion Chamber of Liquid Rocket Engines,*" *KSME Int'l Journal*, Vol. 18, No. 1, pp. 145-152, 2004.

18. Newland, D. E.: *Random vibrations, Spectral and Wavelet Analysis*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994.

19. 박이선., *"액체 로켓엔진 분사기의 음향 감쇠에 관한 수치적 연구"* 조선대학교 대학원 항공우주공학과 석사학위논문, 2005.

감사의 글

감사의 글을 통해 주위의 분들에게 고마운 마음을 전하고자 합니다. 대학원의 2년이라는 시간 동안 저 혼자였다면 할 수 없었던 일을 해낼 수 있었습니다. 석사 2년 동안 제겐 정말 행복했던 시간들이었습니다. 힘들고, 지칠 때마다 제게 힘이 되어 주었던 사람들을 알게 하는 시간 이였고, 즐거웠던 추억들을 평생 지니고 살아갈 수 있도록 해주었습니다.

이 자리에서 가장 감사의 마음을 표현하고 싶은 사람은, 묵묵히 제 뒷바라지를 해주셨던 부모님입니다. 글을 통해 자식이 부모님의 마음을 표현 할 수 있을까 생각이 듭니다. 이제야 말을 하는 못난 자식을 용서해 주세요.

어머니, 아버지 사랑합니다. 그리고 감사합니다.

부모님이 묵묵히 지켜 주셨다면, 언제나 저를 위해 살아오신 할머님이 있습니다. 논문을 쓰는 도중 할머님이 수술을 하셨습니다. 제가 오래전 아파서 입원했을 때, 제 옆을 지켜 주셨던... 하지만, 전 그러질 못했네요. 그래서 더욱 죄송스럽고, 미안합니다. 지금까지 힘들고, 쓸쓸하게 살아오셨으니, 앞으론 아프지 않고, 오래오래 사셔야 합니다. 그래야 지금까지 제가 못한 것 해드릴 수 있잖아요.

글을 쓰면서 제 논문이 나오기까지 가장 제게 많은 도움을 주신 손채훈 교수님께 감사를 드립니다. 언제나 새로운 것을 접해야 했기 때문에 시행착오를 많이 겪어야 했습니다. 그 때마다 제게 채찍과 격려를 주셨던 것 정말 감사드립니다. 교수님이 제게 주신 마음가짐은 professional이라는 단어로 표현할 수 있을 것 같습니다. 더 이상의 아마추어라는 생각은 버리고 프로라는 생각을 가지고 모든 일을 하려 합니다.

논문 심사를 위해 광주까지 와주신 김홍배 박사님 감사드립니다. 박사님께서 주신 소음 및 진동이라는 분야에 대한 박사님의 열정을 볼 수 있게 정말 좋았습니다. 심사위원장을 맞아 주신 김재수 교수님 감사드립니다. 언제나 한결같은 교수님의 모습을 제가 볼 수 있어서 행복했습니다. 언제나 소음과 진동이라는 부분을 어려워 할 때, 제게 도움을 주셨던 김우영 교수님께도 이 자리를 빌어 감사의 말씀을 드립니다. 제게 많은 가르침을 주신 공창덕 교수님, 이상기 교수님, 그리고 김동규 교수님께도 감사를 드립니다.

3년이라는 실험실 생활동안 같이 했던 이선이, 한결같은 모습을 보면서 나에게 너의 모습은 채찍이 되었던 것 같다. 그래서 고마워. 옆자리에서 웃고 있는 철희와 도움을 많이 주지 못했던 중연이, 실험실에서 궂은 일을 도 맞아 하는 주현이, 3년이라는 시간동안 너희들과 실험실을 생활을 같이 할 수 있어서 즐거웠다.

구조 실험실의 현범, 주일 드디어 졸업을 하는구나, 박사 과정에 들어간 범 열심히 해랑, 주일이도 좋은 곳으로 취업을 했으면 좋겠다. 내게 새로운 눈을 뜨게 해준 영광

성, 한결같은 모습의 재휘한테도 고마움을 전하고 싶다. 유체 실험실의 , 상수, 홍일, 태훈 열심히 대학원 생활을 했으면 좋겠다. 언제나 나의 카운슬러가 되어준 상수, 나의 편이 되어준 홍일, 묵묵한 태훈 고마워. 박사 과정에 있는 종진이 형과, 종록이 형에게도 감사를 드립니다. 그리고 언제나 부족했던 저를 도와주신 NURI 사업단의 익태형, 혜경이 누나. 현준이형에게 감사를 드립니다. 대학 때부터 많은 것을 가르쳐 주신 방조혁박사님과, 이환박사님께도 감사를 드리며 행복하시길 기원합니다. 영국에 가있는 명철이형, 일과 공부를 다시 시작하신 성희형과, 인수형의 앞날의 좋은 일만 있길 기원합니다. 참치 습격사건이 후 잠잠해진 해군 소위 경원이, 미국에 있는 선옥, 대한항공에 있는 기산에게도 감사의 마음을 전합니다. 이들과 조만간 하와이 습격사건을 계획 중에 있습니다. 학부 4년 동안 나의 생활을 같이 했던 자유비행의 모든 선후배님에게도 감사의 마음을 전하려 합니다. 하늘 비행의 교주이신 현종이형, 열심히 취업을 준비하고 계시는 창연성, 기완성, 철훈성, 대한항공에 있는 보훈이 형에게 감사의 마음을 전합니다. 올해 결혼한 승우형과 신애, 시영성과 여미누나, 경석형과 복순누나 언제나 행복하시길 기원합니다. 이제 두 아이의 엄마 아빠가 된 승렬형과 안옥누나, 그리고 동민군과 동숙양에게도 감사를 드립니다. 육항에 있는 승민이형, 정철이, 승환이에게도 좋은 일만 있길 기원합니다. 항우연에 있는 미연과, 상무대에 있는 깜시 상희형 감사드려요. 후배인 세환, 성훈, 봉하, 진영, 정래, 고맙다는 인사를 하고 싶습니다. 여러분들이 있었기에 대학이라는 생활이 즐거웠습니다.

제겐 정말 사랑하는 친구들이 있습니다. 언제나 또갈 장군이라 부르는 현학, 든든하게 지켜주는 모함이라 불리는 성환, 별명은 적을 수 없는 윤수, 그리고 언제나 성환이 옆에 있는 지현이 에게 고마움을 전하고 싶습니다. 우리가 뭉치면 두려운 것은 없잖아 친구들아 정말 고맙다. 언제나 곁에 있진 않지만, 내겐 너무 든든한 녀석들입니다. 나의 옆에서 든든한 친구가 되어준 지민, 두 명의 애 엄마인 은정(행복해라), 제주도 아가씨인 주현이에게도 감사의 마음을 전합니다.

지금쯤 강릉에서 일을 하고 있을 종두형(바쁘다는 핑계만 늘어 가네요), 다시 제가 사진의 취미를 붙일 수 있게 해준 시영성(라이카 환등기 줘요), 펜탁스 클럽의 광주지부 회장님인 호동성, 동생 같지 않은 형석이, 내일 결혼하는 영화누나, 너무 바쁜 박박사님 주훈성, 결혼식에 가보지 못해 애써 미안한 다니누나 그리고 광전방의 모든 회원님에게도 감사의 마음을 전합니다.

옆에 있는 것 만 으로 든든한 내 동생 연수, 미주에게도 고마움을 전합니다. 끝까지 함께 하진 못했지만, 오랜 시간동안 곁에 있어준 지혜에게도 고마움 마음을 전합니다.

전 참 행복한 사람인 것 같습니다. 이렇게 제가 감사하는 마음을 가져야 할 사람들이 많아서요. 앞으로 제가 받았던 여러분의 마음을 평생 가슴에 간직하려 합니다. 여러분 모두 건강하시고 모든 일이 이루어지길 기원합니다.