

수력파동에 의한 분무변화 및 저주파 연소불안정에의 영향 예측

김태균* · 이상승* · 윤웅섭**†

The change of spray characteristics on hydraulic acoustic wave influence and prediction of low combustion instability

Tae-Kyun Kim*, Sang-seung Lee*, Woong-sup Yoon***†

ABSTRACT

Studies to investigate the influence on hydraulic acoustic wave were conducted using pressure swirl atomizer under making frequency range from 0 to 60Hz using water as a propellant. Pressure oscillation from hydraulic sources gives a strong influences on atomization and mixing processes. The ability to drive these low frequency pressure oscillations makes spray characteristics changeable. The effect of pressure perturbation and its spray characteristics showed that low injector pressure with pressure pulsation gives more significantly than high injector pressure with pressure perturbation in SMD, spray cone angle, breakup length. Moreover, this data could be used for prediction of low combustion instability getting G factor.

Key Words : Pressure perturbation, Spray characteristics, SMD. Frequency Pressure-swirl-atomizer, Spray cone angle, Breakup length

1. 서 론

수력학적 소스를 사용하는 모든 기계의 엔진에서 연소실 내의 연소과정은 완전히 원활하다고는 실제로 말할 수 없다. 특히 연료와 산화제를 추진체로서 사용하는 로켓엔진의 경우 음향불안정은 연소과정과 압력섭동사이의 비정상 다차원 상호 교란에 의해 발생하는 현상으로 압력의 급격한 증가는 엔진구조물의 파괴 및 폭발을 일으킬 수 있다. 이러한 연소불안정 문제는 로켓개발 초기인 1950년대부터 나타났으며 이에 대한 연구가 일찍부터 지금까지 진행되어왔으나 다수의 물리현상들의 결합으로 정확한 메커니즘을 규명하지 못하고 있는 실정이다.[1]

10~400Hz의 저주파 연소 불안정은 연소실 압력진동에 따른 분사기의 유량변화로 인하여 추진체가 어떤 시간지연을 지니고 연소가스가 발생하

여 생기는 압력진동이다.[2] 저주파 연소불안정의 주원인으로는 추진제 펌프의 cavitation, 추진제 라인 및 엔진 지지대의 진동으로 인해 발생하게 된다. 이런 저주파 연소불안정은 구조와 추진기관 연계에 의해 축방향의 불안정한 진동인 포고 불안정으로 추진기관을 지나는 산화제와 연료의 압력이나 유량을 변화시킨다. 이 변화는 결국 연소실 연소성능에 영향을 주게 되며 추력을 변화시키게 된다. 이 현상에 대한 제어방법으로는 완충기를 사용한 시스템 설계, 제어방법이 사용되어지고 있다. [3]

본 연구에서는 저주파 연소 불안정을 중심으로 추진제 공급 시스템으로부터 공급관내의 수력학적소스로 인한 진동 및 공진 등의 압력교란이 스프레이 특성에 어떻게 변화를 미치는지 압력식스웰 노즐을 사용하여 SMD, 분열길이, 분사각을 중심으로 분석하였다. 본 실험결과는 압력교란시 인젝터로부터의 질량유량의 변화를 평균액적지름의 변화량으로 계산하여 이에 대한 연소실 음향장과 커플시켜 저주파 연소불안정 연소특성을 모델링 하는데 중요한 자료로 활용될 것이다.

* 연세대학교 기계공학과 대학원

** 연세대학교 기계공학부

† 연락처, wsyoon@yonsei.ac.kr

2. 선형해석 이론 및 실험장치

2.1 저주파 연소불안정의 선형해석 이론

저주파 연소 불안정의 이해를 얻기 위해서는 선형이론에 기초한 해석을 수행해야한다, 로켓엔진의 경우 연소실에서의 지배방정식으로 질량, 운동량, 화학, 에너지 보존 방정식으로 구성되어 있으며 비선형 편미분 방정식으로 이루어져있다. 따라서 여러 가지 변수들의 변동량이 그 평균값에 비해 작아서 방정식을 선형화하여 복잡한 현상을 근사적으로 활용할 수 있다. 저주파 불안정에서는 연소실내의 음파의 전파시간에 비해 연소실내 압력진동에 주기가 충분히 커서 연소실내에서 파동을 생각할 필요가 없으며 간단해진다. 연소실 내에서 액상의 추진제가 차지하는 체적은 매우 작아 이것을 연소실 전체 체적에 비해 무시할 수 있으므로 연소실내에 존재하는 연소 가스의 연속식을 도출해 낼 수 있다.

선형해석의 기법에 따라 변동하는 양과 복소진폭, 미소진동의 각 주파수, 진동의 증폭 계수를 고려하여 복소진폭에 관한 저주파 연소불안정 해석의 특성방정식 도출한다. 연소에 의해 생성되는 가스의 온도는 연소실 압력이 변화하여도 거의 크게 변화하지 않아서 연소실의 상당부분을 점하는 반응부분에서 가스온도를 일정하다고 가정하고 단위 시간에서 연소가스의 생성량을 산화제와 연료로 나누어 복소진폭을 적용한다.

저주파 진동에 대해서는 노즐의 내부가스유동에 대해 준 정상의 가정이 허락됨으로써 유출유동은 압력에 비례하고 온도에 반비례한다고 보고 연소 가스온도와 특성배기속도를 적용하고 연소실로 분사된 추진제의 덩어리에 주목하여 연소가스가 되는 분률이 연소의 시간지연으로 연소가스로 되는 분률을 변동량으로 나타내고 무차원화하여 최종적으로 다음식을 유도할 수 있다.

$$\frac{\bar{m}'_{ox}}{\bar{m}_\alpha} = \frac{\bar{m}'_{ox}}{\bar{m}_\alpha} e^{-sr_\alpha} = -G_\alpha \frac{p_c}{p_c} e^{-sr_\alpha} \quad (1)$$

$$\frac{\bar{m}'_{fb}}{\bar{m}_F} = \frac{\bar{m}'_{fb}}{\bar{m}_F} e^{-sr_F} = -G_F \frac{p_c}{p_c} e^{-sr_F} \quad (2)$$

여기서 G_{Ox} 와 G_F 는 산화제와 연료의 분사 어드미턴스로서 연소실의 압력변동에 대한 추진제 공급시스템의 응답을 나타내는 계수이며 추진제 공급 시스템의 임피던스의 역수로 나타내게 된다.[2]

본 실험은 저주파 연소불안정의 예측에 필요한 응답 계수 G factor를 구하기 위해 연구되었다.

분사어드미턴스는 압력변동 시 유량변동이 스프레이 분사과정을 걸쳐 일어나기 때문에 그 현상이 잘 알려지지 않은 실험값이다.

2.2 실험장치 및 방법

2.1.2 실험장치 및 실험조건

압력변동에 대한 질량유량 및 스프레이 특성인 분사각, 분열길이, SMD의 변화를 측정하기위한 실험 장치로서는 압력식 스웰인젝터, 가압장치, 압력교란장치, LaVision사에서 제공하는 Flow Master 3S 디지털 카메라와 VDS사의 HCC 1000 고속카메라, PTU(Programmable Timing Unit) Stroboscope, 이송장치로 구성하였다. Computer에 장착된 PTU System에 의해 CCD 카메라와 Stroboscope가 동기화되어 노출시간 15ns 동안 액적의 사진을 찍게 된다. HCC 1000 고속카메라는 131 frames/sec로 액적의 크기변화를 이미징하는데 사용되었다. 실험에 사용된 압력식 스웰 인젝터는 잘 알려진 수력학적 절차에 의해 설계되었으며 내부 인젝터 오리피스 내경은 1 mm로 하였다.

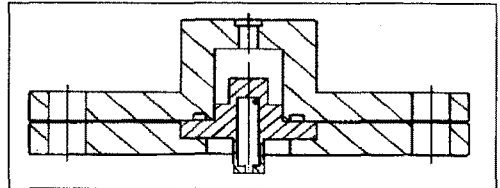


Fig. 1 Pressure swirl injector

Table 1. Specification of Pressure swirl atomizer (단위 : mm)

D_s	l_s	D_0	l_0
2.5	12	1	1.5

Fig. 1 은 본 연구에서 사용된 압력식 스웰인젝터의 구조를 개략적으로 도시한 것이다. 노즐은 스웰실의 직경(D_s), 오리피스 직경(D_0), 스웰실의 높이(l_s), 오리피스의 길이(l_0), 스웰 유입포트는 직경 1mm로써 4개를 설치하였다,

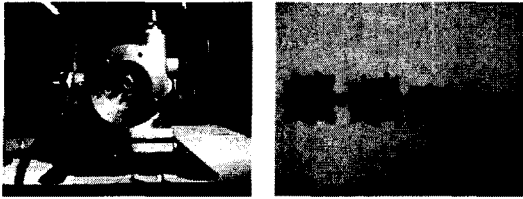


Fig. 2 Flex impeller pump assembly

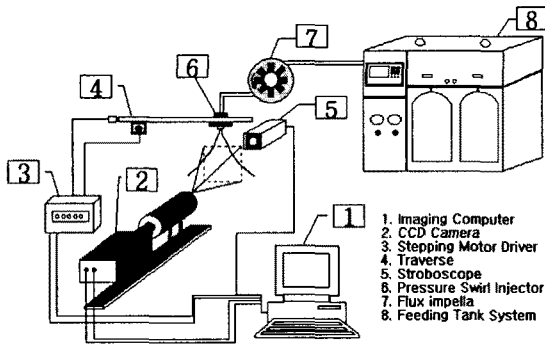


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 2는 압력교란을 발생시키기 위한 장치로서 Flex impeller를 사용하여 압력식 스월인젝터로 분사되기 직전 30 cm 지점에 설치하였다. Flex impeller를 회전시키는데 사용되는 모터는 인버터로 속도 조절이 가능하도록 구성하였으며 최대 주파수 60Hz 범위 내에서 관내의 유동교란을 일으키도록 작동하였다. Fig. 3은 전체적인 실험장치의 개략도를 나타낸 모습입니다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기초실험

본 실험에 사용된 추진제는 액체산소와의 밀도와 점성에서 가장 유사한 물을 사용하였다. 분사기의 제작 성능, 실험장비의 압력 조절 성능 및 제어계측 시스템 연결 상태를 확인하기 위하여 분사기의 분사 압력 강하 범위 (10 -100 psi)에서 유량계수와 기초유량 실험을 수행하다. 또한 추가로 관내의 유동교란이 발생할 때의 유량계수와 기초유량 실험도 병행하였다.

Fig.4 는 유량측정결과를 나타낸 것으로 유량계수 C_d 는 0.3 ~0.42, 질량유량은 2.6~9.7g/s 이다. 일반적으로 스월인젝터의 유량계수는 중심부에 air-core의 형성으로 인해 작게 나타난다. 주파수변화에 따라 질량 유량은 선형적으로 증가하는 것을 보였으며 이는 3.2절과 3.3절에 기술할 분무특성과 평균액적 직경에 관계가 있음을 보여준다.

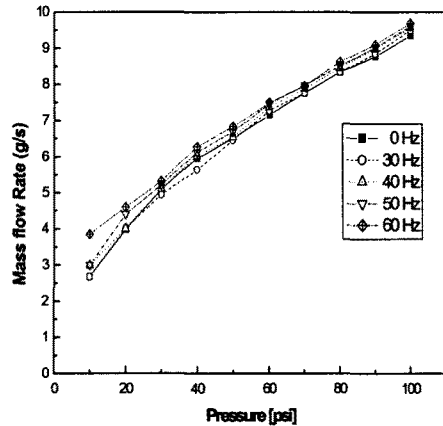


Fig. 4 Mass flow rate with perturbation



Fig. 5 Photograph of We=1955 and 0Hz

고속카메라를 이용한 PTU 장치는 Fig. 5와 같이 압력섭동에 대한 분무특성을 관찰하기 위해서 거시적 관점과 미시적 관점으로 나누어 분석하였다. 평균액적크기(SMD)의 계측 위치로는 원추형 액막이 완전히 분열된 이후로서 화염이 형성되는 압력식 스월인젝터의 하류 40mm로 정하였다.

3.2 교란에 의한 거시적 변화

$$2\theta = 6K^{-0.15} \left(\frac{\Delta P_L d_o^2 \rho_L}{\mu_L^2} \right)^{0.11} \quad (4)$$

3.2.1 분무각

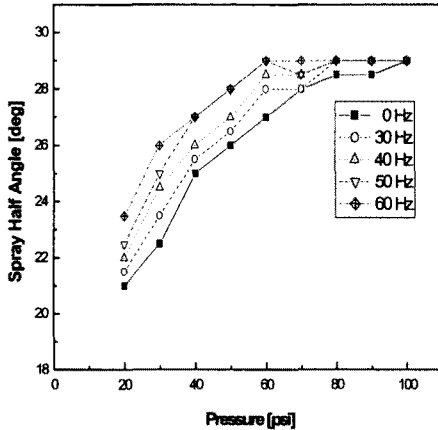


Fig. 6 Spray cone angle variation with pressure perturbation

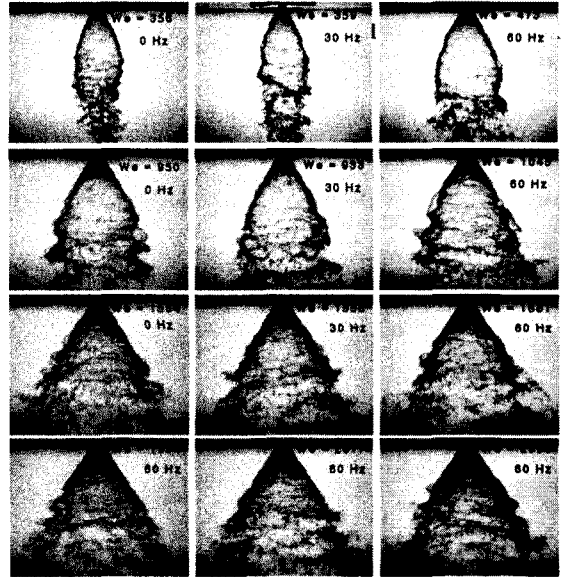


Fig. 7 Spray pattern with pressure pulsation

압력식 스웰인젝터는 노즐 내부의 와류실 바깥 부분에서 접선방향의 유입포트를 통해 액체가 유입되며 와류실 중심부분에 air-core를 형성하며 원심력에 의해 액체는 속이 빈 hollow cone 액막의 형태로 분출하고 하류로 진행됨에 따라 분열과 액적이 형성된다.[4]

분무각은 분사의 분포와 무화의 세밀함을 간접적으로 나타내는 척도이다. 넓은 분무각은 얇은 액막 두께와 관련이 있으며 이는 작은 액적을 만들 수 있음을 의미한다.[5] Giffen and Muraszew[6]는 비점성 유체에 대해서 분사각의 반각 θ 를 다음과 같이 예측하였다.

$$\sin \theta = \frac{(\Pi/2)C_D}{K(1+\sqrt{X})} \quad (3)$$

여기서 $K=A_p/D_s d_o$ 와 $X=A_p/A_o$ 이며 이 관계는 air-core의 크기와 평균 분사각의 연관성을 나타내고 있다. 다시 말해 이론적으로 분사각은 오직 분사기의 함수로서 분사압력과 액체의 상태량에 독립적이라 밝히고 있다. 그러나 이것은 비점성 유체의 경우이며 Rizk 와 Lefebvre[7]는 분사압력과 유체의 상태량에 대한 결과로서 다음과 같은 식을 제시하였다.

Fig. 6은 압력과 유동교란에 따른 분무각의 변화를 보여주는 결과이다. 압력에 따라 급격한 분무각의 증가를 볼 수 있다. 단 압력이 80 psi 이상이 되면 분무각의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. Fig. 7에서 보면 흥미롭게도 유동교란이 발생하게 되면 동일 압력에 대해 분무각이 커지는 것을 발견하였다. We수가 낮을 때에는 그 변화량이 큰 반면에, 큰 We수에서 분무각의 변화량은 작아지는 것을 볼 수 있었다. 이것은 We수가 작을 경우 압력식 스웰인젝터내에 충분한 유체속도가 형성되지 않아 유동교란으로 의해 관내에 공급유량이 증가하고 노즐의 접선방향으로 유입되는 속도성분이 커져 분무각이 상대적으로 증가했을 것이라 판단된다. 하지만 We수가 1500~2100 범위에서는 유동교란에 따라 분무각의 큰 변화는 없었으며 분열길어도 크게 영향을 받지 않았다. 이는 인젝터 내부의 유체속도가 충분히 형성된 We수에서는 스웰챔버 내의 완전 발달된 유동이 impeller에 의해 영향을 더 이상 받지 못한 것이라 판단된다.

3.2.2 분열 길이

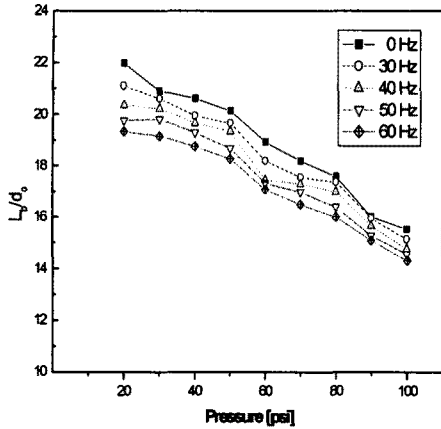


Fig. 8 Spray breakup length variation with pressure perturbation

스웰인젝터의 액막에서 발생하는 분열길이는 복잡한 현상으로 일정하지 않은 비선형적 과정이라 할 수 있다. Rizk 와 Lefebvre[6]는 공기와 유체 사이의 상대속도의 증가로 분열길이는 짧아진다고 하였으며 액막 속도의 증가와 낮은 점성력이 분열길이를 감소시킨다고 보고하였다. Takahashi et al.[8]은 막의 분열은 유체액막에 수직으로 작용하는 속도변동에 의해 야기된다고 보고하였다. 따라서 분사압력이 증가하게 되면 파동진폭의 성장률이 커져 분열길이는 인젝터 출구에 가깝게 발생한다고 설명하고 있다.

Fig. 8은 위에서 설명한 것과 같이 압력증가에 대해 분열길이가 짧아지고 있는 것을 보여주고 있다. 또한 유동교란이 발생하게 되면 분열길이도 감소하는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 분사기 내에 압력상승이 있었다는 것으로 해석된다. 분사압력이 일정할 때 유동교란의 발생은 인젝터 챔버내의 압력상승을 의미하며 이는 곧 파동진폭의 성장률이 커진다고 볼 수 있다.

3.3 교란에 의한 미시적 변화

엔진의 성능과 안전성 그리고 연소효율의 영향을 반영하는 분무의 미시적 특성으로는 평균액적크기(SMD)와 액적크기의 분포에 관한 것이다.[5] 본 실험에서는 SMD를 압력과 관내의 유동교란의 함수로 보고 실험하였다.

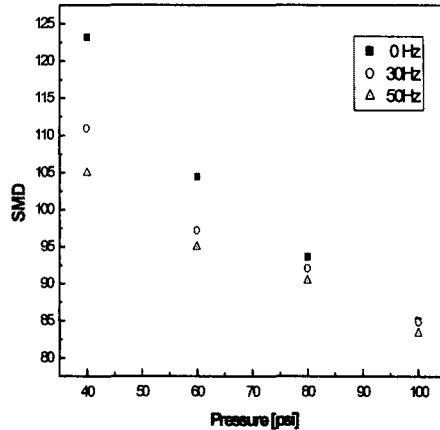


Fig. 9 Variation of SMD with pressure and pressure perturbation

Fig. 9는 관내유동교란에 따른 평균액적직경(SMD)을 압력에 따라 나타낸 그림이다. 압력이 커짐에 따라 SMD는 작아는 것을 볼 수 있다. Lefebvre[4]는 압력강하의 증가는 높은 속도에서 노즐로부터의 큰 유량을 방출하게 하며 작은 분무를 만든다고 기술한바 있다. 노즐압력강하의 증가는 다음과 같이 정략적으로 표현 할 수 있다.

$$SMD \propto \Delta P_L^d \tag{5}$$

그러나 동일 압력 하에 유동교란이 발생했을 경우가 그렇지 않은 경우 보다 평균 액적직경(SMD)이 작아지는 경향을 보였다. Lefebvre는 모든 보고된 자료에서 큰 유량이 평균액적크기를 크게 한다고 했다.[4] 이것은 위의 실험결과와 일치하지 않는다. 다만 교란에 의한 유량변동보다 압력상승폭이 상대적으로 더 커져 이 영향을 넘어섰다고 이해할 수 있다.

압력이 80 psi 이상일 때는 유동교란에 대해 SMD는 크게 변하지 않았다. 이것은 압력 80 psi 이상에서 질량유량의 변화량이 작았기 때문으로 설명할 수 있다. 또한 인젝터 내에 충분한 속도와 압력이 형성되어 유동교란에 의해 잘 발달된 스웰은 영향을 받기 힘들다고 판단할 수 있다.

Fig. 10은 압력과 관내유동교란에 따른 평균액적크기(SMD)의 반경방향 분포를 나타낸 그림이다. SMD 분포결과는 압력 40, 60, 80, 100 psi에서 유동교란 30, 50Hz 일 때에 각각 나타낸 것이다. 압력 40, 60 psi에서 SMD는 대체로 비슷한 경향을 보였으며 중심 쪽에선 약간 작아지는

것을 발견하였다. 이러한 경향은 앞에서 언급했듯이 작은 We수에서 분무각이 상대적으로 증가했기 때문으로 생각된다. 즉 분열길이가 비슷할 경우 분무각이 상대적으로 커지면 중심 코어쪽의 SMD는 작아지는 경향과 일치한다. 압력이 80, 100psi 일 때는 약간의 SMD 크기 차이는 있으나 대체로 비슷한 경향을 보이고 있다. 이것은 인젝터 내부의 충분한 속도, 압력이 유동교란에 의해 영향을 받지 않으며 SMD의 반경반향 분포에도 영향을 주지 못했을 것이라 판단된다.

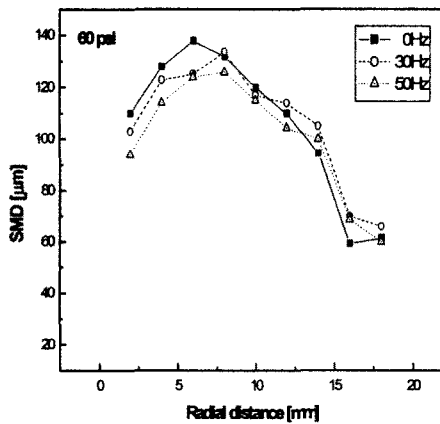
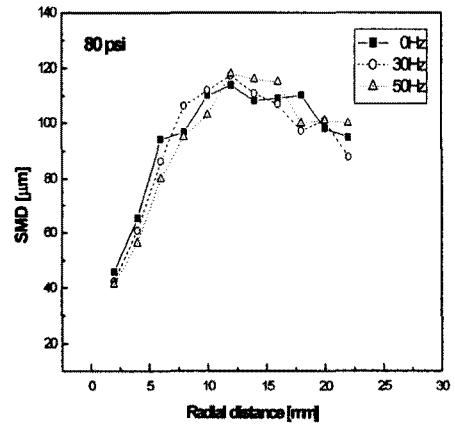
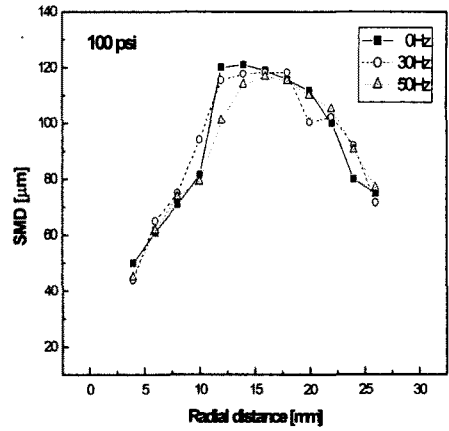
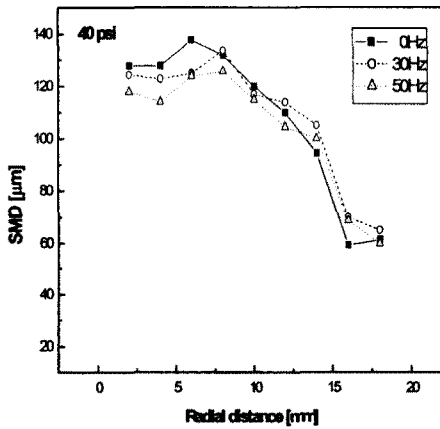


Fig. 10 Radial SMD with ressure and pressure pertubation

3.3 분사어드미턴스 및 연소특성

분사 어드미턴스는 액체추진 로켓엔진의 공급시스템에 가해진 압력섭동에 따른 분무특성의 변화를 평가하는 척도이다. 추진제 공급시스템에 작용하는 비정상 압력섭동은 공급계의 고유 음향진동과 분사요소의 진동특성 및 추력실의 고주파 연소불안정에 의한 음향파동 등에 의해 발생하며 궁극적으로 분무특성 즉 분무액적의 공간적·시간적 특성의 변화를 유발한다. 분사 어드미턴스는 연소시스템의 해석에 있어서 해당 시스템의 섭동 에너지 공급원인 발생항의 특성과 관련되며 실험적인 연구방법을 적용한 연구결과[1]가 보고된 바 있다. 분사 어드미턴스의 모델링을 위해서는

분사 어드미턴스를 구성하는 매개변수인 진폭과 주파수 및 압력섭동에 대한 위상차 등을 결정해야 한다. 본 연구에서는 분사 어드미턴스의 모델링 즉 위 매개변수의 결정을 위한 실험방법을 제시하고 관련 결과에 대한 해석을 시도하고자 하였다.

본 실험에서는 분사 어드미턴스의 진폭을 구하기 위해 분사요소들의 압력강하 40, 60, 80, 100 psi에서 가진하지 않은 경우와 30Hz의 압력파동으로 가진한 경우에 대해 연구하였다. 분사 어드미턴스를 구성하는 다른 매개변수인 주파수 및 압력섭동과의 위상차에 대해서는 추후 실험이 필요하다. 이론-수치적인 고주파 연소불안정 해석코드[11]를 응용한 수치해석 과정에서 평균적인 유량은 일정하다고 가정하였으며 액적 직경의 변화는 유량의 변화에 비례하도록 설정하였다.

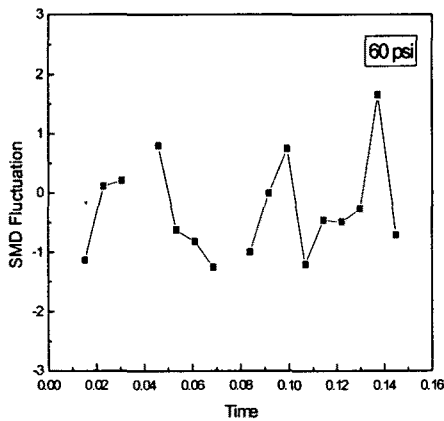
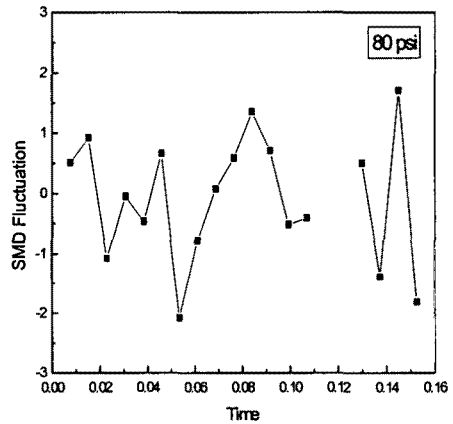
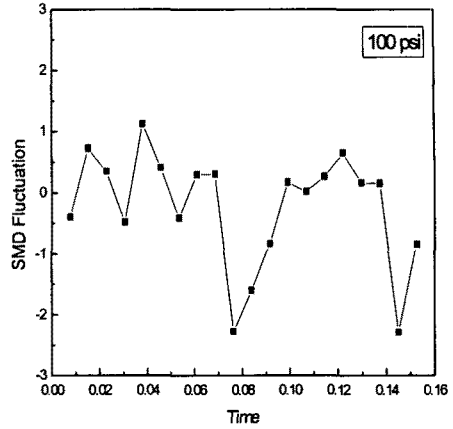
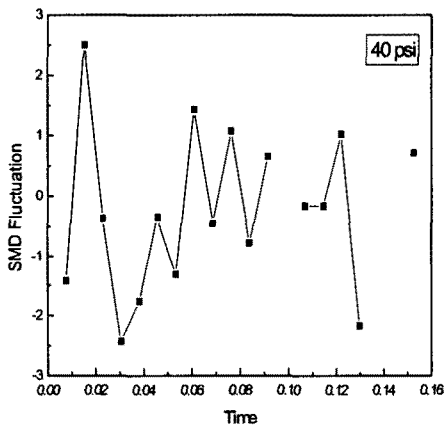


Fig. 10 SMD dimensionless with pressure and pressure perturbation between 0Hz and 30Hz

Fig. 10은 비정상 액적직경의 변화폭을 평균 액적직경으로 무차원하여 나타낸 것이다. 시간에 따른 액적직경의 변화는 HCC 1000 고속카메라를 이용하여 외부교란이 없는 경우와 30Hz의 압력섭동이 있는 경우에 대해서 동일 위치에서 초당 131 frames/sec 단위로 촬영하여 분석하였다. 평균액적직경은 분사요소들의 압력강하가 각각 40, 60, 80, 100 psi 일 때 각각 67, 100, 76, 70 μ m의 값을 갖는다.

$$\dot{m}'_i(\vec{x}, t) = \alpha_v(\vec{x}, t) p_{amp}(\vec{x}, t) \sin(2\pi f_{sys}t + \phi_{pre})$$

$$\alpha_v(\vec{x}, t) = 1 + R_{amp} \sin(2\pi f_{sys}t + \phi_{pre}) \quad (7)$$

식 (6)과 (7)은 액적 표면 부근에서의 주기적 변화를 가정하는 경우에 연소특성을 모델링하는데 쓰이는 식으로 참고문헌[11]에 자세히 명시되어 있다.

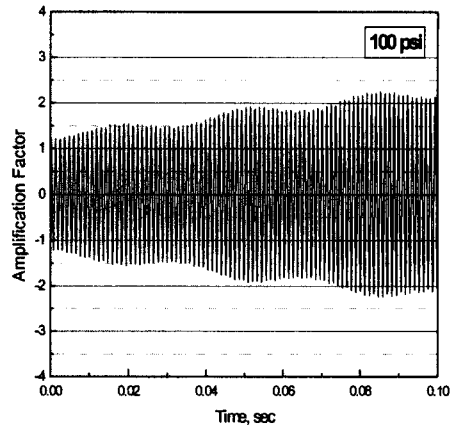
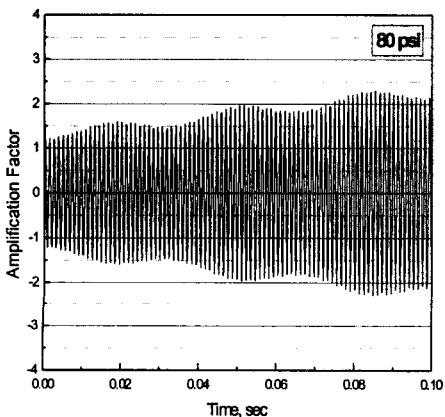
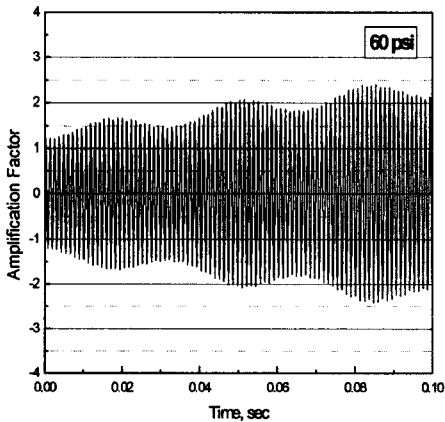
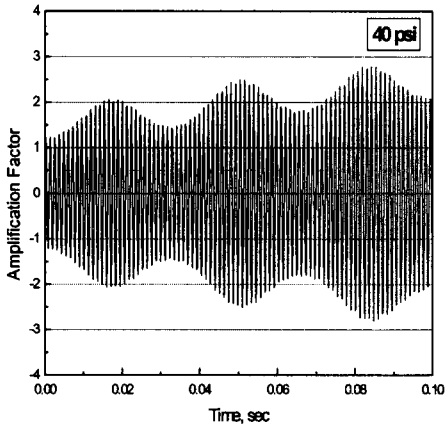


Fig. 11 Amplification factor with Pressure

그림 11은 식 (6)과 (7)을 이용하여 분사 어드미턴스를 고려한 연소응답을 이용하여 연소불안정을 해석한 결과이다. 분사요소의 압력강하가 작을 경우가 압력강하가 큰 경우보다 외부 교란에 민감함을 보여주고 있다. 다시 말해 같은 압력섭동에 대해서 분사요소의 압력강하가 작을수록 연소실 압력섭동의 진폭이 더 크다. 따라서 분사요소의 압력강하에 대한 민감도는 시스템의 연소불안정에 대한 민감도와 비례한다.

4. 결 론

본 연구에서는 공급시스템으로 나온 유체의 수력파동이 스프레이 특성에 어떻게 영향을 미치고 더 나아가서 저주파 연소불안정 연소특성의 예측에 필요한 데이터를 제공하기위해 압력식 스웰인체터를 사용하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 관내의 수력학적 파동소로부터의 관내 유동교란이 발생하게 되면 분무특성이 압력에 따라 달라짐을 확인할 수 있었다.
2. 낮은 압력에서는 관내 유동교란의 주파수가 커질수록 분사각과 분열길이의 변동량이 커지는 반면 높은 압력에서는 그것의 영향을 별로 받지 않았다. 이것은 높은 속도와 압력에서 완전 발달된 압력식 스웰인체터의 분무특성이 유동교란에 영향을 미치지 못하기 때문이다.
3. 낮은 압력에서는 유동교란에 의한 전체 SMD의 변화량이 큰 반면에 높은 압력에서는 크게 변

화하지 않았다.

4. 낮은 압력에서 관내 교란이 발생하게 되면 압력식 스웰인젝터의 반경방향 SMD는 유동교란이 없을 때와 비슷한 경향을 보이거나 중심쪽의 SMD는 대체로 작아짐을 알 수 있었다. 이것은 낮은 압력에서의 유동교란이 분무각을 크게 변화시켰기 때문이다.

5. 주파수와 압력섭동과의 위상을 제외하고 분사 어드미턴스의 진폭만으로 연소특성을 모델링 해본 결과 분사압력이 작을 경우 외부 교란에 의해 연소실내에서의 분사유량의 섭동이 더 크다는 것을 알 수 있었다. 보다 명확한 모델링을 위해선 분사 어드미턴스의 주파수와 압력섭동과의 위상 차에 대한 보충적인 실험이 필요하다.

참고문헌

- [1] V. yang and W.E. Anderson, "Liquid Rocket Engine Combustion Instability." Progress in AIAA, 1995
- [2] 기무라, 윤용섭, 김영수 옮김, "로켓공학" 경문사, 2004
- [3] George P. Sutton, "Rocket Propulsion element" John Wiley & Sons Inc. 1992
- [4] Lefebvre, A.W., "Atomization and Spray" Hemisphere Publishing Corporation, 1989
- [5] Shamim A. Rahman, "Primary Atomization Study of a Swirl Coaxial Liquid Propellant Rocket Injector", Thesis of Doctor Degree, 1997
- [6] Giffen, E., and Muraszew, A., Atomization of Liquid Fuels, Chapman & Hall, London, 1953
- [7] Rizk, N. K., Lefebvre, A. H. "Internal Flow Characteristics of Simplex Swirl Atomizers, AIAA J. Propulsion and Power, Vol. 1, No. 3, 1985, pp 193-199
- [8] Takahashi, F., Schmoll, W.J., and Gressler, J.L., "Characteristics of a Velocity-modulated Pressure=Swirl Atomizing Spray", J.Propulsion, Vol. 11, No.5., 1995, pp 528-533
- [9] Wang, X. F., Lefebvre, A. H. "Mean Drop Sizes from Pressure-Swirl Nozzles, AIAA J. Propulsion and. Power, Vol. 3, No. 1, 1987
- [10] Vladimir G. Bazarov, Vigor Yang "Liquid-Propellant Rocket Engine Injector Dynamics" Journal of Propulsion and Power Vol. 14, No. 5, 1998
- [11] 이길용, 윤용섭, 손채훈, 김영목, "고주파연소불안정 예측을 위한 수치적 해석 모델" 한국항공우주학회, 2001