論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.38.5.456

하이브리드 로켓에서의 DC-shift 발생 특성

강동훈*, 이창진**

The Characteristics of DC-shift in Hybrid Rocket

Donghoon Kang* and Changjin Lee**

ABSTRACT

Typical combustion instability such as DC-Shift found in the hybrid rocket motor is characterized by non-linearity. DC-Shift can occur in two different realizations. One is so-called a positive shift of measured DC voltage where the pressure increase suddenly. The other is a negative shift where the pressure drops abruptly. In the present work, specifically the negative DC-Shift was investigated to analyze the effect of oxidizer flow condition and the resonance between fundamental frequency and other ones, such as Helmholtz frequency, and acoustic frequency. Results show a peak frequency of several hundreds HZ shifts as combustion proceeds. A negative DC-shift was found as the result of phase cancellation between two dominant frequency, combustion frequency and flow related frequency. Still is it required to study further to identify the change of dominance of frequency during the combustion.

초 록

전형적인 하이브리드 모터의 연소 불안정 현상인 DC-Shift는 비선형적 특성을 갖는다. DC-Shift는 두 가지 형태로 나타나게 되는데, 압력이 급격하게 상승하는 양의 DC-shift와 연소 도중에 압력이 갑자기 감소하는 음의 DC-shift로 구분된다. 이 논문에서는 산화제 공급 유동 조건을 다양하게 변화시켜 음의 DC-shift 현상을 유도하고 산화제 공급 유동 조건과 하이브리드 로켓이 갖고 있는 기본적인 주파수와 Helmholtz 주파수, 음향모드와의 공진을 유도하여 음의 DC-shift 현상의 발생 조건과 특징에 대하여 알아보았다. 실험 결과 연소 중 수백 Hz 대역의 압력 주파수 이동을 확인하였으며, 음의 DC-Shift가 연소로 발생하는 주파수와 유동의 흐름으로 인한 주파수간 위상이 상호 감쇠되어 발생한 것으로 나타났다. 향후 연소 중 나타나는 주파수의 변화에 따른 DC-Shift 현상에 대해서는 계속 연구되어야 한다.

Key Words : DC-shift, Hybrid Rocket(하이브리드 로켓), Combustion Instability(연소불안정), Acoustic mode(음향모드), Vortex shedding frequency(와류유출 주파수)

Ⅰ. 서 론

하이브리드 로켓에서의 연소불안정 현상은 비선형적 특징이 있다. 하이브리드 로켓에서의 연소불안정은 주로 음파 교란에 의한 고주파 불안정성 현상보다는 수십, 수백 Hz의 불안정 현상이 주로 관찰되고 있다. 발생 원인에 따라 몇 가

† 2009년 12월 1일 접수 ~ 2010년 4월 26일 심사완료
* 정회원, 건국대학교 항공우주정보시스템 공학과 대학원
** 정회원, 건국대학교 항공우주정보시스템 공학과
교신저자, E-mail : cjlee@konkuk.ac.kr
서울시 광진구 화양동 1번지

지로 분류해 보면, 산화제 공급시스템의 진동으로 인한 불안정성, 고체 연료의 열 관성으로 인한 불안정성, 산화제 난류 유동에 의한 불안정성, 그리고 비선형 불안정성이 있다. 지금까지는 주로 산화제 공급시스템이나 기계적 진동에 의한 불안정성에 대한 연구가 이루어졌다. Rocker는 비-음파 연소불안정을 실험적으로 확인하였는데, 그의 실험에 의하면 산화제 인젝터(injector)의 기계적 진동, 예-연소실의 와류유출이 비-음파 연소불안정의 원인인 것으로 나타났다[1].

비선형 불안정성의 대표적인 예인 DC-shift 현상은 연소 압력이 갑자기 상승하는 양의(positive) DC-shift 현상과 연소 압력이 하강하는 음의(negative) DC-shift 현상으로 나눌 수 있다. Fig. 1은 HTPB와 GOx를 이용한 Carmicino의 실험에서 관찰된 양의 DC-shift 실험 결과이다. Carmicino[2] 등은 음향가진(acoustic excitation)이 있는 경우, 로켓 후반부의 후-연소실의 음파 교란과 예-혼합실의 와류유출 주파수에 의한 공진 현상과 양의 DC-shift 발생과의 관계를 실험적으로 연구하였다. 그의 실험에서는 산화제를 반경 방향으로 공급하고 연료 후반부에 링을 장

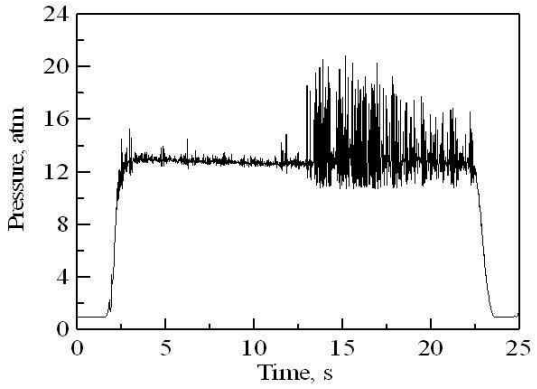

Fig. 1. 양의 DC-shift 현상 [2]

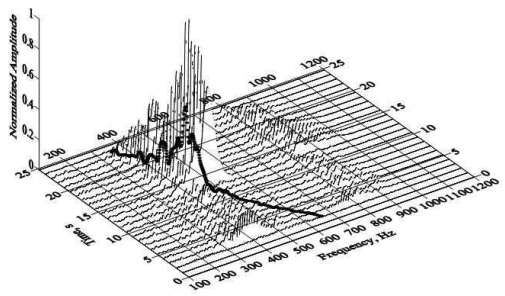

Fig. 2. 양의 DC-shift 현상의 주파수 특성 [2]

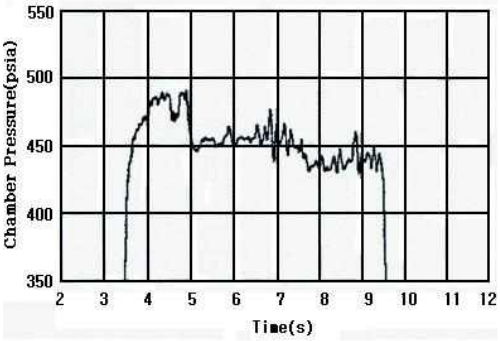

Fig. 3. Negative DC-shift의 연소압력 변화 [3]

착하여 일정한 와류유출 주파수를 발생시킴으로서 양의 DC-shift 현상을 생성하였다. 연구 결과 양의 DC-shift 현상은 연소 중 나타나는 주파수의 공진 현상에 의한 것으로 나타났다. Fig. 2는 Fig. 1 실험의 압력 주파수를 시간에 따라 표시한 것이며 다른 두 가지의 주파수가 공진되는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 HTPB와 LOx를 이용한 Arves의 실험에서 관찰된 음의 DC-shift 현상이다. Arves의 실험에서는 음의 DC-shift 발생시 산화제 유량이 0.2% 감소한 것에 비해 연료의 연소는 12%나 감소한 것으로 나타났다. 이 실험에서 Arves 등은 특성 속도(characteristic velocity)가 음의 DC-shift 현상과 깊은 관련이 있는 것으로 추측하였고 아직 연구가 진행중이다[3].

이와 같은 현상은 순간적인 압력 상승과 압력 하강으로 인한 구조적인 문제나 추력 감소로 하이브리드 로켓의 성능에 커다란 영향을 주고 있다. 연소 압력에 대한 일반적인 정의 식을 살펴보자.

$$P_0 = \frac{c^* \dot{m}}{A^*} \tag{1}$$

연소 압력(P_0)은 특성속도(c^*)와 질량유량($\dot{m}$)에 비례하며, 노즐 목 면적(A^*)에 반비례한다. 여기서 노즐 목 면적이나 질량유량은 연소하는 동안 일정하므로, 연소 압력의 변화는 특성 속도의 변화에 의한 것이라고 할 수 있으며, 이는 어떤 원인에 의해서 연소 온도가 변화하기 때문인 것으로 추정할 수 있다[3, 5].

DC-shift 현상은 원래 고체 로켓에서 발생하는 비선형 연소불안정 현상으로 알려져 있다[2]. 고체 로켓에서 관찰되던 DC-shift 연소 불안정 현상이 하이브리드 로켓에서도 나타난다는 사실은 두 종류의 로켓 연소 과정이 공통적으로 갖는 특성이 존재한다는 것을 의미한다. 따라서 고체 로

켓의 DC-shift 현상의 원인으로 알려진 음향모드(acoustic mode)와 와류유출 주파수(vortex shedding frequency)의 간섭이 하이브리드 로켓의 DC-shift 현상에서도 원인이 될 것으로 생각된다. 또한 고체 로켓의 경우에는 연소실로 유입되는 유동이 없지만, 하이브리드 로켓에서는 연소실 외부에서 유입되는 산화제의 난류 유동이 있으므로 외부에서 유입되는 산화제 유동이 하이브리드 로켓 연소의 DC-shift 현상의 또 다른 발생 원인이 될 것으로 판단된다[4].

여러 연구자들의 실험에 의하여 DC-shift 현상이 관찰되었으나, 아직까지 어떤 원인에 의하여 이러한 현상이 발생하는지에 대한 명확한 설명은 제시되고 있지 않다. 본 논문에서는 PMMA와 기체 산소를 이용하여 DC-shift 현상이 일어나는 조건에 대하여 알아보고, DC-shift 현상이 발생할 경우 어떠한 특징들이 나타나는지를 실험적으로 알아보았다. DC-shift 현상을 발생시키기 위해 산화제 공급을 달리 할 수 있는 각기 다른 인젝터와 평판(plate)을 제작하고 각각의 산화제 공급 유동 조건에서 음의 DC-shift 현상이 발생하는지 알아보았다. DC-shift 현상이 발생할 때와 그렇지 않을 때의 연소 현상의 특징에 대해서 분석하였다. 또한 음의 DC-shift 현상과 양의 DC-shift 현상의 차이점을 분석하여 각각의 DC-shift 현상의 특징을 알아보았다.

II. 본 론

2.1 실험장치

하이브리드 로켓 연소에서 대부분의 DC-shift 현상은 예-혼합실, 연소실, 후-연소실을 갖는 형상에서 나타나고 있다[2]. 이는 로켓 후반부의 음파 교란과 예-혼합실에서 연소실로 유동이 유입될 때의 와류유출 주파수의 간섭에 의한 것으로 알려져 있다. 하이브리드 로켓 연소에서 고려되는 주파수는 연소실 크기와 기타 특성의 함수이므로 예-혼합실과 후-연소실의 길이는 음파 교란과 와류유출을 발생시키고, 이들 주파수의 간섭이 발생하도록 연소실 길이에 따른 주파수의 상관관계를 고려하여 제작되었다. Fig. 4는 연구에 사용된 실험 연소기의 그림이다. 인젝터를 통해 산화제를 공급하고 평판을 이용하여 반경 방향으로 산화제를 공급할 수 있도록 되어 있다. 예-혼합실과 후-연소실의 직경과 길이는 50 mm로 설계되었고, 연소실의 길이는 200 mm이다.

Carmicino는 인젝터 형상에 따른 산화제 공급 유동 특성이 양의 DC-shift 현상의 중요한 인자가 되는 것을 확인하였다. 그는 연료 입구에서의 와류 생성이 양의 DC-shift 현상과 깊은 관련이 있음을 밝혀내었다. 그의 실험에서는 인젝터 형상을 축방향 분사에서 반경 방향 분사로 변경하여 연료 입구에서 와류를 생성하였다. 그의 실험에서는 반경 방향으로 산화제를 공급하는 인젝터를 사용하여 연료 입구에서 와류를 생성하였고, 연료 후반부에 링을 장착하여 양의 DC-shift 현상을 구현하였다. 따라서 본 연구에서도 연료 입구에서 와류를 생성할 수 있도록 실험 장치를 구성하였다. 본 연구에서는 인젝터 캡과 같은 역할을 할 수 있도록 인젝터와 평판을 제작하여 설치하였다. 평판은 인젝터 캡과 같이 연료 입구에서 와류를 생성하는 역할을 한다.

평판을 장착하지 않은 실험은 로켓의 축방향으로 산화제가 공급되고 연료 입구에서 와류가 생성되지 않으므로 이를 축방향 산화제 공급 실

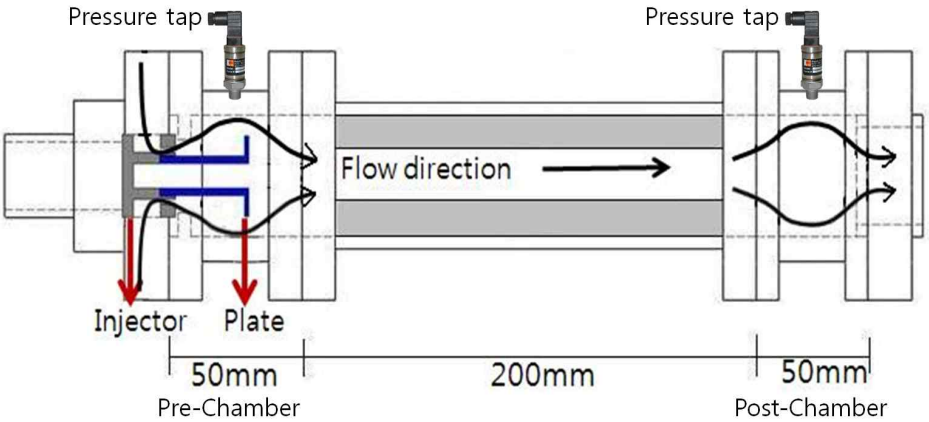

Fig. 4. 제작된 하이브리드 모터

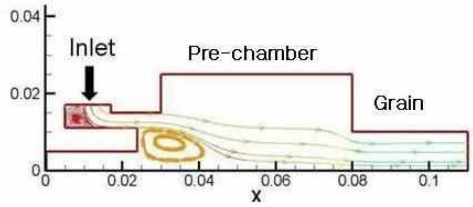

Fig. 5(a). 평판이 장착되지 않은 모습

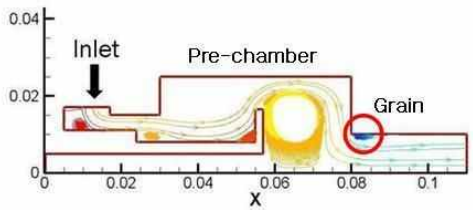

Fig. 5(b). 평판이 장착된 모습

험으로 정의하였다. 평판을 장착한 실험은 산화제가 로켓의 반경 방향으로 공급되고 연료 입구에서 와류가 생성되므로 이를 반경 방향 산화제 공급 실험으로 정의하였다. Fig. 5에 평판을 장착한 경우와 그렇지 않은 경우의 유동의 형태를 나타내었다. 평판은 인젝터에 탈부착 할 수 있도록 제작되어 평판을 변경함으로서 산화제 공급 유동 특성을 달리하고 연료 입구에서의 와류의 세기를 조절할 수 있도록 하였다. 평판의 직경은 33 mm와 45 mm의 두 가지로 제작하였고 평판의 길이는 각각의 직경에서 예-혼합실 길이의 1/4, 2/4, 3/4이 되도록 25.5, 38, 50.5 mm로 제작하였다. 6가지의 평판의 종류에 따른 실험에 대해 Table 1과 같이 명칭을 부여하였다. Fig. 6에 제작된 인젝터와 평판의 모습이 나타나 있다.

사용된 연료는 PMMA(Poly Methyl Meth Acrylate)이며, 산화제는 기체 산소를 사용하였다. Table 2는 실험에 사용된 산화제와 연료의

Fig. 6. 인젝터와 평판

Table 1. 실험에 사용된 평판

예-혼합실에 대한 길이	1/4	2/4	3/4
직경 33 mm	평판-1	평판-2	평판-3
직경 45 mm	평판-4	평판-5	평판-6

Table 2. 사용된 연료

연료	PMMA
연료 길이	200 mm
연료 외경	50 mm
연료 내경	20 mm

조건을 정리한 것이다.

PLC(Programming Logic Controller)와 솔레노이드 밸브를 사용하여 정해진 연소 시간동안 산화제를 공급하였다. 소화 기체로는 기체 질소를 이용하였다. Saga 사의 유량계(MFC)와 밸브를 이용하여 산화제를 10~30 g/s 범위에서 조절하여 사용하였다. 점화는 모델 로켓용 추진제를 이용하였으며, 데이터 수집은 Druck 사의 압력계(PMP4070)와 National Instrument의 데이터 수집 장치 및 LabVIEW 프로그램을 이용하였다[6, 7].

2.2 주파수 예측

하이브리드 로켓 연소에서 고려되는 주파수는 모두 3 종류이며 각각의 음향모드, 와류유출 주파수, Helmholtz 주파수를 관찰할 수 있다. 실험 시 주파수의 공진 현상을 유도할 수 있도록 실험 장치의 주파수 특성을 파악할 필요가 있다. 이에 따라 실험장치에서 어떠한 주파수를 관찰할 수 있으며, 각각의 주파수는 어느 범위에 있는지, 어떤 방법으로 주파수를 조절할 수 있는지 확인하였다.

연소기의 치수와 음속으로 결정되는 음향모드의 주파수는

$$f_a = \frac{c}{2L} = \frac{\sqrt{\gamma RT}}{2L} \tag{2}$$

여기서 c=음속, L=연소실 길이, R=기체 상수, T=평균 온도, γ=비열비이다[8].

연료 전후방에서의 유동의 박리가 주기적인 와류를 생성하며 나타나는 와류유출 주파수는

$$f_v = \eta c^* \psi^2 Sr \frac{D_t^2}{D^3} \tag{3}$$

Table 3. 주파수 계산에 사용된 값

γ	1.125	V	$9.8175\times10^{-5}m^3$
R	277.15J/kg · K	η	0.75~0.8
T	1800K	c^*	1400m/s
L	0.325m	ψ	0.6335
A^*	$3.1416\times10^{-5}m^2$	Sr	0.2
l	0.064m	D_t	0.0065m

여기서 η=효율, c^*=특성 속도, Sr=Strouhal number, D_t=노즐 목 직경, D=그레인 내경이다.

ψ는 $\psi=\sqrt{\gamma\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}$ 으로 표현된다[2].

공동과 좁은 목에 의해 결정되는 Helmholtz 주파수는

$$f_H=\frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{A^*}{lV}} \tag{4}$$

여기서 A^*=목 면적, l=유효 길이, V=체적이다[9].

Table 3에 계산에 사용된 인자들을 정리하였다. 계산에 사용된 인자들 중 연소 현상과 관련된 값은 하이브리드 로켓 제작과 관련한 논문을 이용하였으며 실험장치 관련 치수는 제작된 실험장치와 동일한 값을 사용하였다[10].

식 (2)-(4)를 이용하여 제작된 실험장치에서는 20 g/s의 산화제 공급 유량에서 980 Hz의 음향모드와 600 Hz의 와류유출 주파수, 314 Hz의 Helmholtz 주파수를 관찰할 수 있는 것으로 예측되었다. 이들 주파수를 관찰할 수 있도록 센서의 데이터 수집률은 초당 3000으로 설정하였다. Table 4에는 각 산화제 유량에 따른 예측되는 주파수를 정리하였다. 음향모드는 전체 연소실의 길이와 음속의 영향을 받으므로 실험장치의 형상에 의하여 결정되며 주파수의 대역을 조절하기 어렵다. 반면, 와류유출 주파수는 실험장치의 형상이 정해지더라도 산화제 유량이나 그레인의 내경을 조절함으로서 변화시킬 수 있으므로 이를 조절하여 주파수의 공진 현상을 유도할 수 있다.

Table 4. 산화제 유량과 예측 주파수

산화제 유량(g/s)	음향모드 (Hz)	Helmholtz 주파수(Hz)	와류유출 주파수(Hz)
10	982	314	630
20	982	314	600
30	982	314	540

2.3 기본 주파수 실험

주파수 예측에 사용된 수식은 일반적인 표현으로 형상에 따른 주파수의 변화를 모두 고려하지 못하고 있다. 따라서 실험 전 강제적 공명 및 산화제만의 공급으로 예측한 주파수가 관측되는지, 형상에 의해 수식으로 예측한 주파수가 어떻게 달라지는지 확인할 필요가 있다.

Fig. 7은 축방향 산화제 공급 조건에서 로켓을 연소시키지 않고 산화제 공급이 없는 상태에서 강제로 로켓을 공명시킨 후 연소실 내부에서의 주파수를 측정한 결과이다. 400 Hz~450 Hz 부근과 800 Hz~900 Hz 부근에서의 주파수의 크기가 증가함을 볼 수 있다. 이 주파수는 연소 현상이 없는 경우의 음향모드와 일치하였다. Fig. 8은 축방향 산화제 공급 조건에서 산화제만을 공급하여 실험한 결과이다. 400 Hz~450 Hz 대역의 첫 번째 음향모드가 강하게 가진되는 것을 볼 수 있다. 800 Hz~900 Hz 대역의 두 번째 음향모드는 1000 Hz를 중심으로 넓게 퍼져서 나타나고 있다.

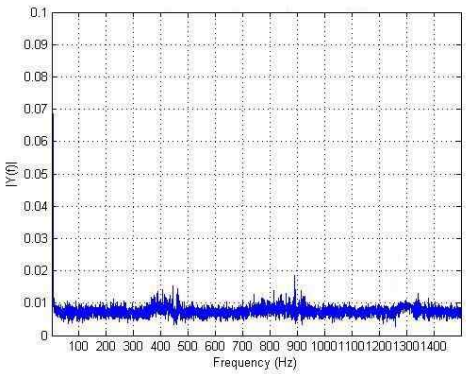

Fig. 7. 연소와 산화제 공급이 없는 실험

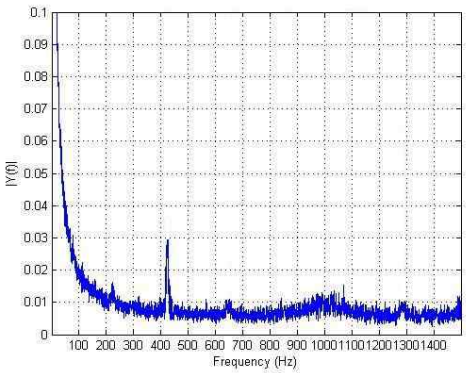

Fig. 8. 산화제만 공급된 실험

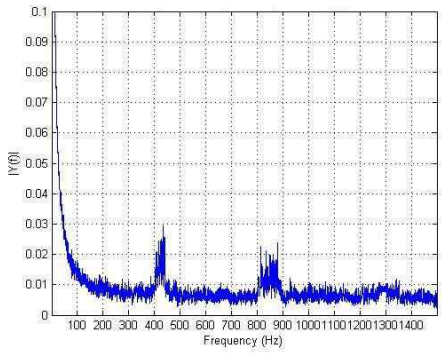

Fig. 9. 산화제만 공급된 평판-4 실험

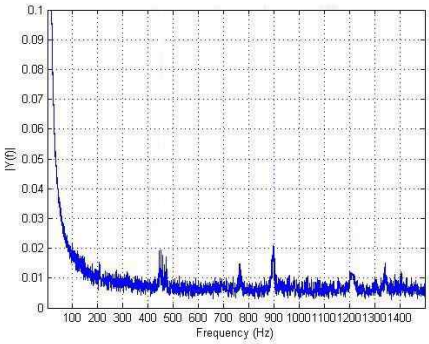

Fig. 10. 산화제만 공급된 평판-5 실험

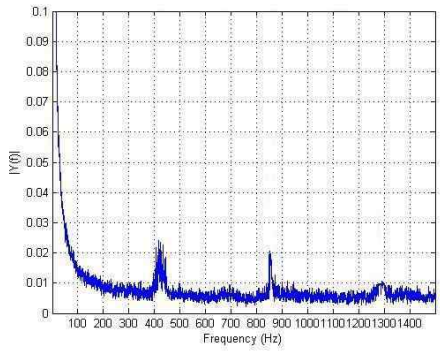

Fig. 11. 산화제만 공급된 평판-6 실험

평판을 장착한 실험에서도 이러한 주파수를 관찰할 수 있는지 알아보기 위해 4, 5, 6번 평판을 사용하여 실험하였다. Fig. 9는 평판-4 실험 조건에서 산화제만을 공급하여 실험한 결과이다. 이 실험에서도 같은 대역의 주파수가 나타났다. 평판을 장착한 경우 800 Hz~900 Hz 대역의 두 번째 음향모드 또한 강하게 가진되었다. 평판-5와 평판-6의 실험 조건에서 산화제만을 공급한 실험인 Fig. 10-11에서도 같은 대역의 주파수의 크기가 증가하였다. 실험 결과, 평판의 유무에 관계없이 연소가 수행되지 않은 조건에서는 기본 주파수인 음향모드를 뚜렷하게 관찰할 수 있었다.

연소가 없는 일반적인 유동 조건에서 와류유출 주파수는 455 Hz로 계산되었다[11]. 이는 첫 번째 음향모드의 주파수 대역과 겹치고 있는데, 이로 인해 Fig. 8과 같이 첫 번째 음향모드가 두 번째 음향모드에 비해 두드러지고 있다.

2.4 축방향 산화제 공급 실험

축방향 산화제 공급 실험을 수행하여 반경 방향 산화제 공급 실험결과와의 차이점을 알아보고자 하였다. 실험 결과는 여러 번 측정하여 정확한 데이터를 얻을 수 있도록 하였다.

Fig. 12는 산화제 유량 20 g/s일 경우의 축방향 산화제 공급 실험의 연소 압력을 측정한 결과이다. 축방향 산화제 공급 실험 결과 연소 압력은 130 psi부근을 유지하면서 15 psi의 진폭을 갖고 진동하는 것을 볼 수 있다. Fig. 13은 축방

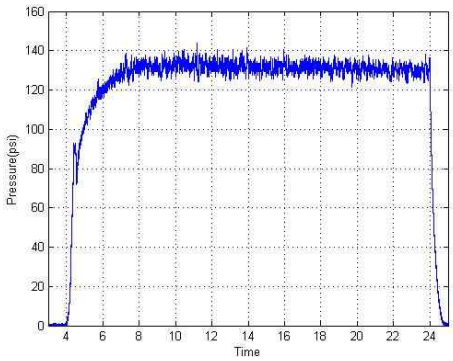

Fig. 12. 축방향 산화제 공급 실험 압력 측정결과

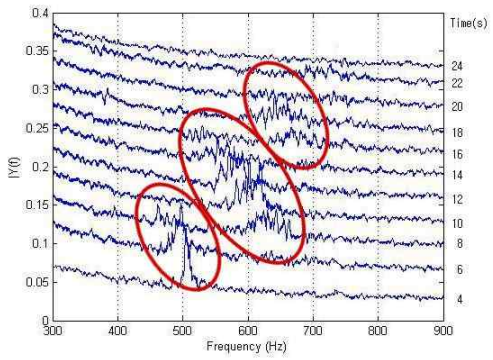

Fig. 13. 축방향 산화제 공급 실험의 압력 주파수 변화

향 산화제 공급 실험의 시간에 따른 압력 주파수 변화를 나타낸 waterfall이다. 이 결과 수백 Hz 대역의 압력 주파수가 시간에 따라 이동하고 있는 모습이 관찰되었다. 축방향 산화제 공급 실험의 경우 연소 직후 520 Hz-480 Hz에서 주파수가 발생하였다가 점점 저주파 대역으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이후 4-6초 마다 주파수가 고주파 대역으로 점프하는 것을 볼 수 있다. 처음 520 Hz 이후 650 Hz, 700 Hz 부근에서 주파수가 정점을 이루며, 각각 주파수가 감소되면서 이동하였다. 연소 초기 나타난 520 Hz-480 Hz의 주파수는 연료 입구에서 생성된 와류에 의한 주파수로 판단된다. 이 주파수는 연소 초기에만 나타나고 있는데, 연소가 진행됨에 따라 연료 입구의 모양이 둥글게 변하면서 없어지는 것으로 판단된다. 이후 나타나는 650 Hz-500 Hz의 주파수가 연료 후반에서의 와류유출 주파수로 생각되어지고, 이는 주파수 예측에서 계산한 결과와도 같은 대역에 있다. 이후 700 Hz-600 Hz의 주파수는 연료의 내경이 넓어지면서 Strouhal number와 특성 속도가 변하여 와류유출 주파수가 변화한 것으로 생각되나 보다 많은 연구를 통해 확인할 필요가 있다. 그러나 기본 주파수 실험에서 나타났던 음향모드는 연소 실험 결과 나타나지 않았다.

2.5 반경 방향 산화제 공급 실험

Fig. 14는 산화제 유량 20 g/s에서의 평판-1을 설치하고 실험한 압력 측정 결과이다. 산화제 공급이 반경 방향임에도 불구하고 연소 압력의 불안정한 모습은 관찰되지 않고 있다. 연소 압력의 진폭은 축방향 산화제 공급 실험결과에서는 15psi의 압력 진동을 보여주었지만, 평판을 이용한 실험에서는 5 psi 정도의 압력 진동이 발생되어 보다 안정한 연소 모습이 관찰되었다. Fig. 15는 평판-1을 장착한 실험의 연소 압력을 시간에 따른 주파수로 나타낸 주파수 waterfall이다. 축방향 산화제 공급 실험에서와 같은 주파수 이동 모습을 볼 수 있다. 연소 압력 모습은 안정해졌지만, 주파수 특성은 축방향 산화제 공급 실험과 같은 모습이다.

Fig. 16은 산화제 유량 20 g/s 조건에서 평판-2를 설치한 실험결과이다. 평판-2를 설치한 실험도 평판-1을 설치한 실험과 같은 형태의 연소 압력의 모습을 보여주고 있다. Fig. 17의 시간에

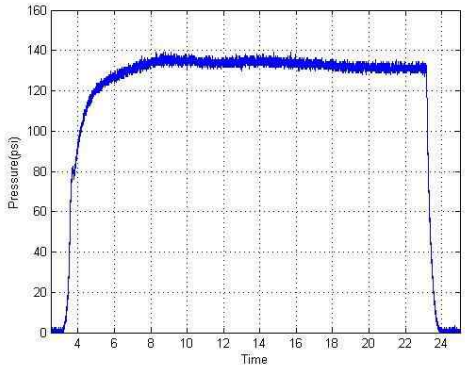

Fig. 14. 평판-1 실험 압력측정결과

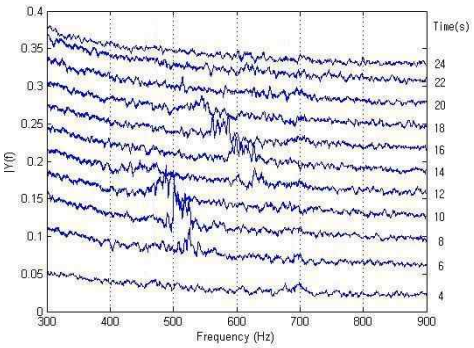

Fig. 15. 평판-1 실험의 압력 주파수 변화

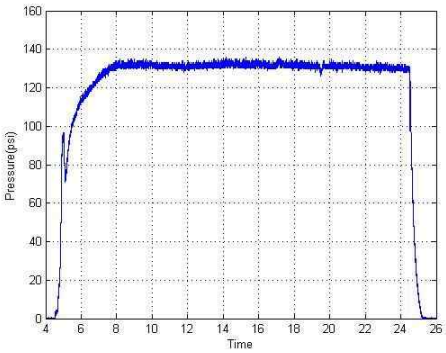

Fig. 16. 평판-2 실험 압력측정결과

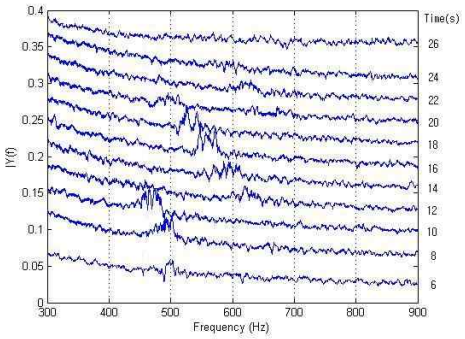

Fig. 17. 평판-2 실험의 압력 주파수 변화

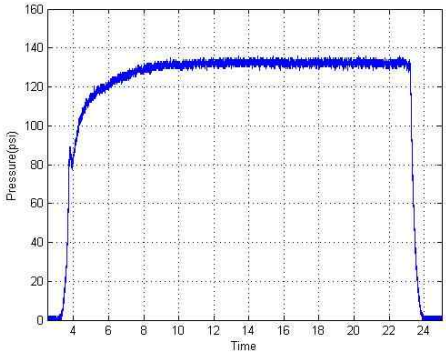

Fig. 18. 평판-3 실험 압력측정결과

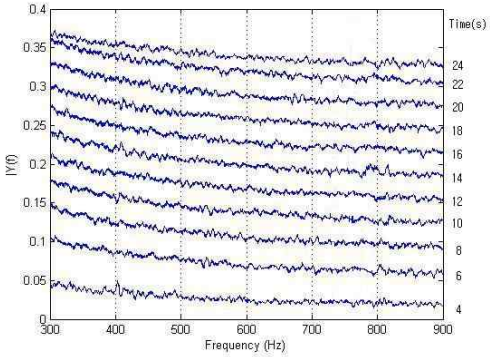

Fig. 19. 평판-3 실험의 압력 주파수 변화

따른 압력 주파수 변화 모습도 축방향 산화제 공급 실험과 같은 형태로 수백 Hz 대역의 주파수의 이동을 관찰할 수 있다.

Fig. 18은 산화제 유량 20 g/s 에서의 평판-3을 설치한 실험의 압력 측정 결과이다. 평판-3을 설치한 실험에서의 압력은 평판-1, 2를 설치한 실험과 마찬가지로 압력의 진폭이 축방향 산화제 공급 실험에 비해 작고 안정한 연소 모습을 보여주고 있지만, Fig. 19의 주파수 특성을 살펴보면 연소 시 발생하는 모든 주파수가 감쇠된 것을 볼 수 있다.

직경 33 mm를 갖는 평판 1, 2, 3을 설치한 실험 모두 연소불안정성을 나타내지 못하였으며 오히려 연소 압력이 더욱 안정해지는 결과를 보여주었다. 연소 압력의 불안정한 모습이 나타나지 않은 원인은 예-혼합실에 설치된 평판이 산화제 공급 유동에 연소 압력이 불안정해질 정도의 충분한 와류를 생성하지 못하였기 때문이라고 판단된다. 따라서 산화제 공급 유동의 방향에 보다 많은 변화를 주기 위하여 직경 45 mm의 평판 실험을 수행하였다.

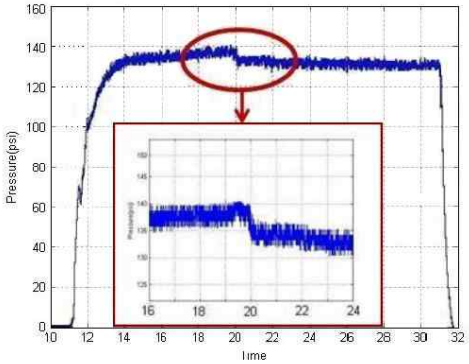

Fig. 20. 평판-4 실험 압력측정결과

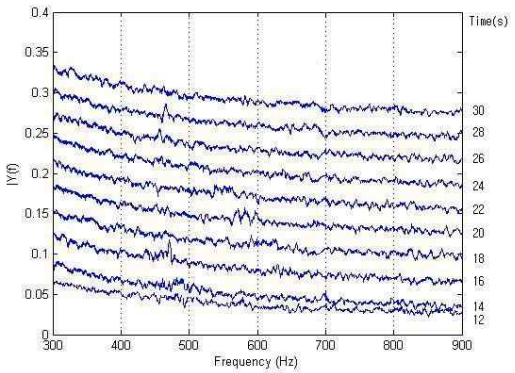

Fig. 21. 평판-4 실험의 압력 주파수 변화

Fig. 20은 산화제 유량 20 g/s에서의 평판-4를 설치한 실험의 압력 측정 결과를 나타낸 것이다. 13.5초 이후에 연소 압력이 불연속적으로 하강한 후 지속적으로 연소 압력이 떨어지고 있다. 45 mm의 직경을 갖는 평판으로 실험할 경우 음의 DC-shift 현상이 발생하였다. 이 경우에도 음의 DC-shift 현상이 일어난 구간을 제외하면 연소 압력의 진동이 매우 작아져 축방향 산화제 공급 실험에 비해 안정하다고 할 수 있다. 20초를 기준으로 이후에 연소 압력이 5 psi 감소된 것을 볼 수 있다.

Fig. 21은 평판-4를 설치한 실험에서의 시간에 따른 주파수의 변화이다. 주파수의 변화를 살펴보면 수백 Hz 대역의 주파수의 이동이 대부분 감쇠되어 뚜렷이 보이지 않으나 연소 압력의 불연속적인 변화가 있는 곳의 전후로 약 600 Hz 부근의 주파수가 미약하게 정점을 이루는 것을 볼 수 있다.

다른 길이의 평판을 이용한 실험에서도 같은 실험 결과가 나타나는지를 보기 위하여 다른 길

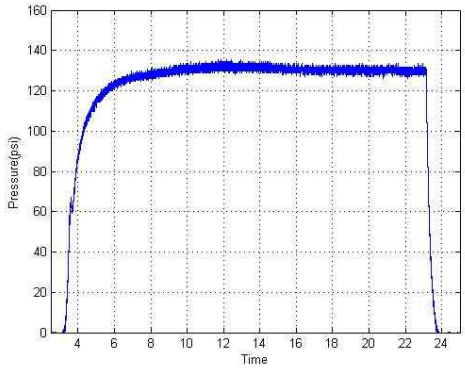

Fig. 22. 평판-5 실험 압력측정결과

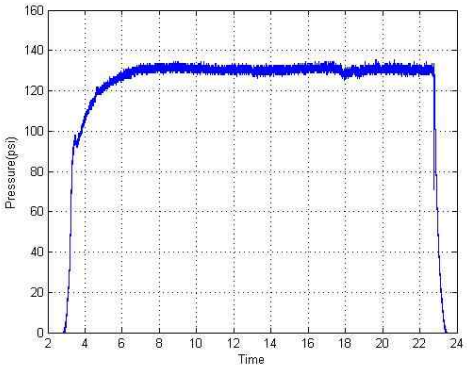

Fig. 24. 평판-6 실험 압력측정결과

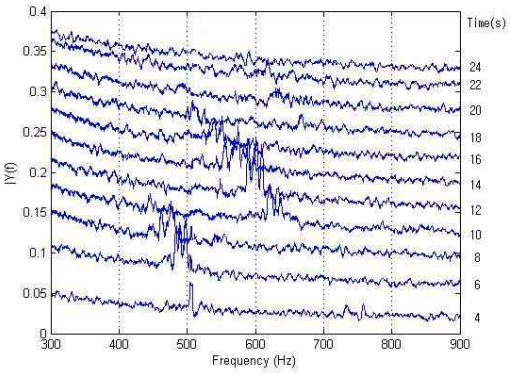

Fig. 23. 평판-5 실험의 압력 주파수 변화

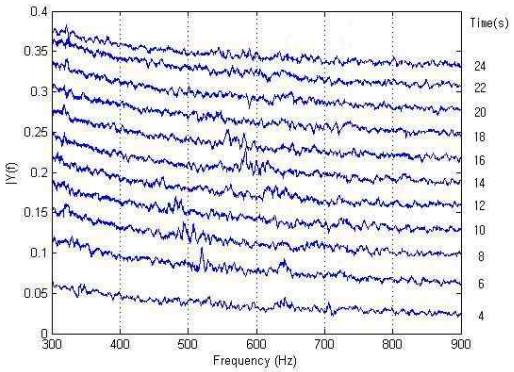

Fig. 25. 평판-6 실험의 압력 주파수 변화

이를 가진 평판을 이용하여 실험하였다. Fig. 22는 산화제 유량 20 g/s에서의 평판-5를 설치한 실험의 모습이다. 반경 방향으로 산화제를 공급하지만 연소 압력의 불연속적인 변화는 볼 수 없다. Fig. 23의 시간에 따른 주파수 변화도 축방향 산화제 공급 실험과 같이 520 Hz, 650 Hz 부근에서 주파수가 정점을 이루며 저주파 대역으로 이동하는 을 것을 볼 수 있다.

Fig. 24에 나타난 산화제 유량 20 g/s에서의 평판-6을 설치한 실험은 조금 다른 연소 압력을 보여주고 있다. 연소 후반부인 18초가 되는 시점에서 압력이 하강하였다가 회복되는 모습을 보여주고 있다. 연소 압력을 FFT 분석해 보면 평판-4를 설치한 실험과 같이 주파수의 이동이 뚜렷이 보이지 않으나 연소 압력의 불연속적인 변화가 있는 18초 부근에서 600 Hz 부근에서 정점을 이루며 이동하던 주파수가 소멸됨을 확인할 수 있다.

평판을 사용하여 유동에 큰 교란을 가하여 실험한 결과 연소 압력이 평판을 사용하지 않았을 때보다 안정해지는 결과를 나타내었다. 다른 형상의 평판을 사용하여 반경 방향으로 산화제를 공급하는 실험을 한 결과 산화제 공급 방식은 반경 방향으로 같지만 평판의 형상을 달리한 경우 산화제 공급 유동 특성이 달라지면서 연소 압력의 진폭과 주파수의 변화에도 영향을 미치는 것으로 나타났다. 평판의 직경이 클수록 연소 압력이 불연속적으로 변화하는 모습을 보여주었고, 평판의 길이가 긴 경우, 연소 압력 주파수는 감쇠되었다. 이를 통해 연소 압력의 불연속적인 변화는 인젝터로부터의 거리보다 평판의 직경이 더 큰 영향을 미친다고 할 수 있다.

연소가 진행됨에 따라 연소 압력 주파수의 이동을 관찰할 수 있었다. 압력 주파수의 이동은 수백 Hz 대역의 범위에서 이루어지고 있었으며, 처음 500 Hz 부근에서 정점을 이룬 후 저주파 대역으로 이동하다 650 Hz, 700 Hz의 고주파 대역으로 점프하는 모습을 보여주었다. 주파수가 고주파 대역으로 점프할 때마다 평균 연소 압력의 변화가 관찰되었는데, 연소 압력의 진폭이 작은 평판을 장착한 실험에서 이를 명확하게 확인

할 수 있었다. 연소 직후 나타나는 500 Hz 대역의 주파수가 450 Hz 부근에서 소멸하면서 연소압력의 overshoot가 사라지고 있었고 이후 나타나는 600 Hz 부근의 주파수가 500 Hz 부근에서 소멸하는 시점에서 평균 연소 압력의 증감을 확인할 있었다. Negative DC-shift 현상이 나타난 평판-4, 6 실험에서도 이러한 600 Hz 부근의 주파수가 생성, 소멸되는 시점과 연소 압력의 불연속적인 변화 시점이 일치하고 있다. 수백 Hz 대역의 주파수 변화와 평균 연소 압력과의 관계는 평판-3 실험과 비교하면 더욱 명확해진다. 평판-3 실험을 살펴보면 주파수의 이동 모습을 확인할 수 없고 연소 압력도 평균연소 압력의 변화 없이 안정하게 나타나고 있다. 이는 연소 시 나타나는 주파수의 위상이 크기가 같고 부호가 반대로 형성되어 주파수가 상호 감쇠되었고, 이로 인해 평균 연소 압력의 변화가 없는 것으로 판단된다. 즉 주파수의 이동 모습과 주파수의 위상이 연소 안정성을 결정짓는 요인으로 판단할 수 있다.

실험 전 관측할 수 있는 주파수를 예측하였으나, 실험에서 나타난 주파수는 600 Hz 부근으로 연료에서의 와류유출 주파수만이 관측되었다. 이 결과 본 실험 장치에서 연소가 진행될 경우 음향모드가 감쇠되는 것으로 생각할 수 있다. 이는 평판-3 실험에서와 같이 주파수 위상이 달라져 상호 감쇠되는 작용에 의해서 음향모드가 감쇠되는 것으로 판단된다. 또한 314 Hz 부근에서 Helmholtz 주파수를 관찰할 수 있을 것으로 예측하였으나 모든 실험 결과에서 나타나지 않고 있었다. 이는 예-혼합실로 유입되는 산화제 유동의 영향으로 예측한 대역의 주파수가 나타나지 않는 것으로 판단된다.

본 연구 결과에서는 산화제 공급 유동에 교란이 가해질 경우 연소 압력의 진폭이 작아져 보다 안정한 연소 현상을 보이고 있었다. 이는 산화제 공급 유동에 교란이 가해질 경우 연소 압력이 불안정해지는 양의 DC-shift 현상과 다른 점이다. 양의 DC-shift 현상이 발생할 경우에 특징과 원인은 Fig. 2에 나타난 압력 주파수 변화에서 보듯이 압력 주파수의 간섭과 공진이 주요한 원인으로 파악되지만 음의 DC-shift 현상은 수백 Hz 대역의 압력 주파수의 변화와 위상과의 관계가 원인인 것으로 판단된다.

Ⅲ. 결 론

본 연구에서는 산화제 유동 특성을 변화시켜 음의 DC-shift 현상을 관찰하였다. 하이브리드 로켓 연소에서 음의 DC-shift 현상이 일어나는 조건과 음의 DC-shift 현상의 특징에 대해서 실험적으로 연구하였다. 실험 결과에 의하면 산화제 공급 유동이 반경 방향으로 공급될 경우 연소 압력의 불연속적인 감소가 발생하였고, 평판이 인젝터로부터 떨어진 거리보다 평판의 직경이 연소 압력의 불안정성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 산화제가 반경 방향으로 공급되더라도 유동에 충분한 교란이 가해지는 경우에만 연소 압력의 불안정성을 관찰할 수 있었다. 압력이 불연속적으로 변화하는 경우에는 연소 압력의 특성 주파수가 생성되거나 소멸하고 있었다. 음의 DC-shift 현상의 특징으로는 수백 Hz 대역의 주파수의 이동이라 할 수 있으며 이러한 주파수가 주기적으로 점프하며 고주파 대역으로 이동하는 것이 연소불안정 발생에 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다. 이는 평균 연소 압력의 변화와 주파수가 생성, 소멸하는 시점이 일치하는 것으로 설명할 수 있다. 실험 결과 연소 안정성은 주파수의 이동과 위상이 중요한 것으로 판단되었다.

초기 주파수 예측과는 달리 연소 실험 시 음향모드가 감소되는 원인과, 산화제 공급 유동 특성만으로 양과 음의 DC-shift 현상을 조절할 수 있는지에 대해서는 압력 주파수의 위상과 연계하여 앞으로 계속적으로 연구되어야 한다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 2008년도 기초연구과제 사업으로 이루어진 연구이며 지원해주신 한국연구재단에 감사드립니다.

참고문헌

1) Rocker, M., "Simulation of Non Acoustic Combustion Instability in a Hybrid Motor", NASA/Marshall Space Flight Center.

2) Carmicino, C., Russo Sorge, A., "On the Role of Vortex shedding in Hybrid Rockets Combustion Instability", *Joint Propulsion Conference*, 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE, AIAA 2008-5016.

3) Arves, J. P., Jones, H. S., "Explanation of the DC shift In Hybrid Motors", *Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 33rd AIAA/ASME/SAE/ASEE, AIAA 1997-2398.

4) 나양, 이창진, "채널유동에서 질량분사에 의

한 표면유동의 진동 특성", 한국항공우주학회, 추계 학술발표회 논문집, 2008, pp. 776-779

5) Boardman, T. A., Carpenter, R. L., "A Comparative Study of The Effects of Liquid-versus gaseous Oxygen Injection on Combustion Stability In 11-inch diameter Hybrid Motors", *Joint Propulsion Conference and Exhibit,* 33rd AIAA/ASME/SAE/ASEE, AIAA 1997-2936.

6) Wernimont, E. J., "Experimental study of Combustion in Hydrogen preoxide Hybrid rockets", Ph.D Thesis, School of Aero., Purdue university, 1997.

7) Humble, R. W., Gary N. H., Wiley J. L., *Space Propulsion Analysis and Design*, McGraw-Hill, pp. 365-439.

8) Karabeyoglu, M. A., Zilwa, S. D., Cantwell, B., Zilliac, G., "Modeling of Hybrid Rocket Low Frequency Instabilities", *Journal of propulsion and power,* 2005, Vol.21, No.6, pp. 1107-11160

9) 서상현, 박순홍, 장영순, 이영무, 조광래, "위성 발사체 탑재부 저주파 음향 모드 제어를 위한 공명기 배치 설계", 한국소음진동공학회, 춘계 학술대회논문집, 2005, pp. 521-524

10) 하윤호, 이창진, 권순탁, "HTPB 연료를 이용한 하이브리드 로켓 기초설계", 한국항공우주학회지, 제 30권 제 1호, 2001, pp. 124-131

11) 권대건, 최창근, 김한수, "모서리 절단 및 영각을 가지는 사각단면의 스트로할 수(I): 수의 결정", 한국풍공학회지, 제 5권 제 2호, 2001, pp. 165-172.