

# 동축스월분사기에서 와류실 유무 및 노즐길이에 따른 연소특성 변화

임병직\* · 서성현\* · 최환석\* · 최영환\*\* · 이석진\*\* · 김유\*\*\*

## Combustion Characteristics associated with a Swirl Chamber and Nozzle Length of Coaxial Swirl Injectors

Byoungjik Lim\* · Seonghyeon Seo\* · Hwan-Seok Choi\* · Young-Hwan Choi\*\* · Seok-Jin Lee\*\* · Yoo Kim\*\*\*\*

### ABSTRACT

A study on the variation of combustion characteristics by injector geometries was conducted. Coaxial swirl injectors were used. Existence of swirl chamber and variation of a nozzle length become key parameters. Injectors were identified as open, closed and mixed type by existence of swirl chamber. Variation of nozzle length was made extruding the both nozzle along the axis while other design parameters remain the same. A uni-element combustor with ablative material liner and a water cooled nozzle made by oxygen free copper with outer stainless steel casing were used.

### 초 록

액체 로켓엔진 연소기에 적용되는 분사기 형상에 따른 연소특성 변화를 알아보기 위해 연소시험을 수행하였다. 사용된 분사기는 동축와류형으로서 챔버 와류실의 유무와 노즐 길이에 의한 특성변화에 초점을 맞추었다. 챔버 와류실의 유무에 따라 닫힘형과 열림형으로 구분이 된다. 노즐 길이에 따른 변화는 산화제와 연료가 분사되는 노즐을 증가시킨 분사기를 통해 이루어졌다. 연소기는 분사기가 한 개만 장착된 단일분사기 헤드, 내열재 형식의 연소실, 냉각 유로를 가진 동 재질의 노즐로 구성되어 있으며 연소실과 노즐의 외부는 스테인레스 스틸로 이루어졌다.

Key Words: Closed Type(닫힘형), Mixed Type(혼합형), Open Type(열림형), Recess Number(리세스 수), Characteristic Velocity(특성속도), Nozzle Length(노즐길이), Uni-element Combustor(단일분사기 연소기), Coaxial Swirl Injector(동축와류분사기)

### 1. 서 론

\* 한국항공우주연구원 연소기그룹

\*\* 충남대학교 항공우주공학과

\*\*\* 충남대학교 기계공학과

연락처, E-mail: tachyon@kari.re.kr

로켓엔진에서 연소기의 고성능화와 효율증가

를 위해서는 설계, 해석, 제작 등 다양한 기술들의 조화가 필요하다. 간단한 예로 고성능화에 따른 연소압, 열유속 증가를 견디기 위한 재료의 개발과 구조적 강도 확보를 위해 설계 및 해석 기술이 필요하며 또한 적절한 냉각을 통해 연소실 내벽과 노즐을 보호하기 위해 연소실의 열유동 특성과 재생냉각에 의한 열전달 특성에 대한 신뢰성 있는 해석기술도 필요하게 된다.

단순한 예로 제시하였지만 실제 연소기 설계, 제작, 시험에는 더욱 복잡하고 어려운 문제들이 존재하고 여러 가지 기술들이 서로 영향을 주고받기 때문에 로켓엔진에 사용되는 연소기 개발은 많은 시간과 예산을 필요로 한다. 이와 같은 이유로 연소기 개발 초기 단계에서는 단일분사기나 축소형 연소기를 제작하여 연소특성 및 성능 등에 대한 기초 자료를 확보하게 된다. 실물형에서 크기를 줄인 축소형, 더 나아가서 단일분사기 연소기로 시험 대상이 축소되면 고려의 대상이 되는 복잡한 문제들이 상대적으로 단순하게 되고 성능비교가 용이하게 된다.

특히 단일분사기 연소기에서는 분사기에 따른 연소특성을 가장 확실하게 비교 검토할 수 있다. 연소기의 성능과 특성에 핵심적인 요소인 분사기 설계에서는 유량, 분사각, 분사각도, 액막두께, 발생 액적크기 등이 고려되어야 한다. 이와 같은 성능 변수들을 만족시키기 위해 설계 변수들이 결정되고 조정된다. 이번 연구에서 사용된 분사기는 동축와류형으로 노즐직경, 리세스수, 와류실 유무 및 형상, 와류실직경, 노즐길이, 유입구 직경 및 개수 등의 설계변수가 존재한다.

앞선 연구 결과에서 리세스수와 와류실 유무에 따른 수력학적 특성 및 연소성능에 대한 연구가 진행되었지만, 동축 분사기 중 연료 분사기의 형상이 단힘형과 열림형인 경우에 대해서만 비교한 것이고, 리세스수 변화에 의한 특성에 대한 연구에서는 내부의 산화제 노즐길이만 변화시켜 시험을 수행하였다[1-4].

본 논문에서는 리세스수를 일정하게 유지하면서 분사기 노즐 길이를 증가시킨 분사기와 연료측 노즐 뿐만 아니라 산화제 분사노즐도 열림형

으로 이루어진 분사기에 대한 시험을 수행하여 기존 분사기 시험결과와 비교 검토하였다.

## 2. 시험장치 및 시험조건

### 2.1 분사기

시험에 사용된 분사기의 형상은 각 추진제 분사 노즐의 와류실 존재 유무에 따라 단힘형과 열림형으로 구분되며, 전체 분사기는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 연료와 산화제가 모두 단힘형으로 구성된 단힘형 분사기(I), 반대인 열림형 분사기(III), 연료는 열림형이며 산화제는 단힘형으로 구성되는 혼합형 분사기(II, IV)로 나뉘어진다.

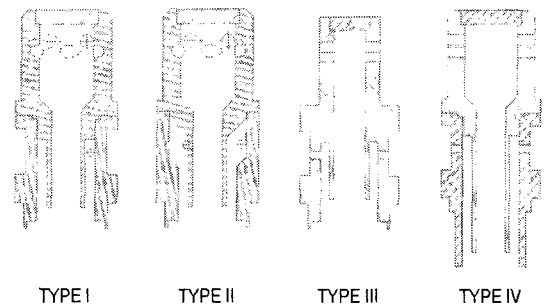


Fig. 1 Section Drawings of Injectors

각 분사기의 유량(산화제 : 232 g/s, 연료 : 84 g/s)과 리세스수(RN=0.6), 유입구의 개수는 동일하다. 또한 분무각(산화제 : 65°, 연료 : 122°)을 동일하게 유지하기 위해 유입구의 지름과 산화제 노즐 길이는 서로 다르다.

혼합형(I) 분사기를 기준으로 단힘형 분사기(III)에서는 연료측이 와류실을 가진 형태가 되고 동일 분무각 조건을 맞추기 위해 유입구의 직경을 늘려 유속을 낮추었다. 열림형 분사기(III)는 산화제 와류실이 열림형으로 되어 있어 단힘형 산화제 와류실을 가진 분사기(I, II, IV)에 비해 작은 직경의 유입구를 가진다. 노즐길이에 따른 특성을 확인하기 위해 사용된 분사기(IV)는 혼합형 분사기(I)와 내부 구조는 동일하지만 노즐 축방향으로 길이를 증가시켜 내부 산화제노즐 직경의 5배가 되도록 하였다. 혼합형 및 단힘형 분사기에서는 노즐 직경의 3배 길이다.

## 22 연소실과 노즐

연소실과 노즐은 외부를 stainless steel로 제작하고 내부는 각각 내열재와 동으로 제작되었다. 동으로 제작된 노즐은 목에서 발생하는 열유속에 의한 손상을 방지하기 위해 4개의 수냉각 유로를 가지도록 하였다. 노즐 목은 52.5 bar의 연소실 압력을 유지하기 위해 11.4 mm로 제작되었으며, 전체 연소실은 1716 mm의 특성길이를 가진다.

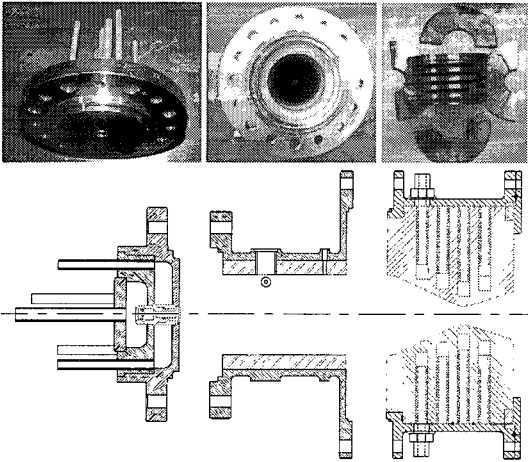


Fig. 2 A Deal Drawing and Photos of Uni-element Combustor Component

내열재로 이루어진 연소실에는 압력섭동을 측정할 수 있는 동압센서, 초기 점화에 사용되는 토치점화기, 연소압 측정을 위한 압력센서 등이 장착되어 있다. 냉각 유로를 가지도록 설계된 노즐에서는 시험시에 유입되는 냉각수의 온도와 유출되는 온도를 측정하여 노즐부근에서의 냉각 특성 및 열유속을 확인할 수 있다. 또한 냉각수 유로 중 연소실로 향하는 면에는 요철을 가지도록 제작하여 냉각 유효면적을 증가시켰고, 유로에서의 국부적 끓음 현상으로 인해 생성되는 기포가 벽면에 부착되지 않도록 하여 벽면 냉각 성능의 급격한 변동을 방지하였다.

연소기 헤드는 전체적으로 sus로 제작되었으며 분사기를 하나만 장착한 단일분사기 형태이

다. 헤드는 산화제와 연료의 메니폴드 두 부분으로 나뉘어지며 각 추진제 유입구, 온도·메니폴드 압력·동압 측정을 위한 포트가 있다.

## 23 시험설비

시험설비는 추진제 가압을 위한 가압용 질소, 추진제 탱크, 유량 제어를 위한 벤츄리, 유량·온도·압력 등의 측정을 위한 센서, 유량 공급/차단을 위한 자동밸브들로 구성된다. 시험의 위험성으로 인해 연소기 장착과 배관 연결 등이 마무리된 상태에서 프로그램화된 제어시스템을 통해 밸브의 개폐시간을 설정하여 시험을 수행한다.

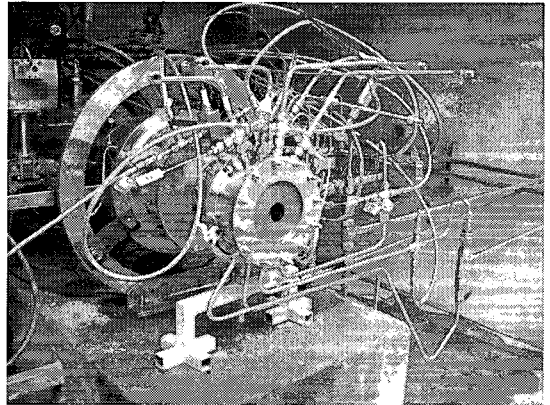


Fig. 3 Uni-element Combustor in Test Stand

## 24 시험조건

본 논문은 앞서 언급한 바와 같이 분사기 형상에 의한 연소특성의 변화를 확인하는 것이 목적이다. 그리고 대상이 되는 분사기들은 현재 개발 중인 연소기 규격에 따라 제작되었기 때문에 연소압 52.5 bar, 전체유량 316 g/s, O/F=2.76를 기준으로 시험을 수행하였으며 각 분사기에 대한 시험은 2회 이상 수행하여 시험의 재현성을 확인했다.

## 4. 시험결과

### 4.1 연소성능 특성

연소시험을 통해서 측정되는 성능변수 중 가장 중요한 것이 연소압이다. 연소압은 사용되는 추진제 종류, 노즐 목 직경, O/F 비에 의해 결정되는데 각 분사기에 따른 연소압의 차이를 설명하기 위해서는 각 변수들의 값 역시 중요하게 여겨져야 한다. 추진제는 액체산소와 케로신을 동일하게 사용하기 때문에 논의로 하고 노즐목 직경과, O/F에 대한 변동성만 고려한다. 누적되는 시험에 의해 동으로 제작된 노즐은 수축되어 노즐목 직경이 줄어들고 가압식 추진제 공급방식의 특성으로 인해 항상 동일한 유량을 공급하는 것은 불가능하기 때문에 시험마다 공급되는 유량과 O/F 비가 변하게 된다. 따라서, 각 분사기에 대한 연소시험 중에서 O/F가 가장 유사한 네 가지 시험 결과를 비교대상으로 하고 Fig. 4에 수록하였다.

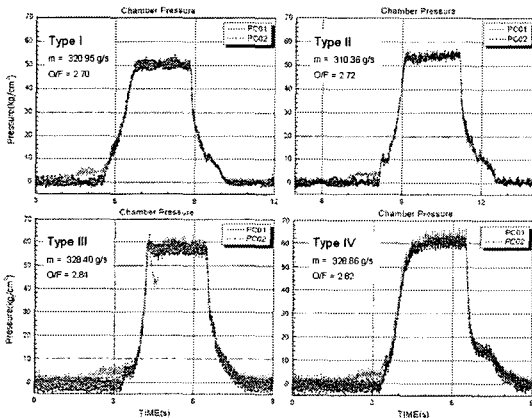


Fig. 4 Representative Chamber Pressure Graphs of Each Type Injector

연소압을 나타낸 Fig. 4의 결과에서 절대적인 값에는 차이가 있지만 4종의 분사기 모두 정상압력에 도달하였다. 정상압력에 도달되는 시간과 그래프의 형태가 분사기 종류마다 차이를 보이지만, 대체로 1초 내외의 특정 범위 값을 가지는 것은 동일한 크기를 가진 연소실과 노즐 형상에 기인한 것을 볼 수 있다. 분사기에 따른 연소압 증가 기울기의 차이는 분무에서 발생하는 액적 크기 차이와 O/F 비로 설명할 수 있다. 즉, 수류시험에 의하면 III과 IV의 분무에서 발생하는 연료의 액적크기가 I, II에 비해 40 $\mu$ m(25%) 정도

작은 값을 가지기 때문에 초기에 발생하는 연소 열에 의해 III, IV 분사기에서 발생하는 연료가 기화되는 시간이 짧아진다. 결과적으로 빠르게 기화된 연료는 쉽게 기화되는 액체산소와 잘 혼합되고 연소가 빠르게 진행될 수 있는 조건이 된다. 간단히 D<sup>2</sup>-law를 적용하면 I, II에서 발생한 연료 액적이 증발하는 시간은 III, IV의 두 배 가까이 된다. O/F 비 역시 다른 원인이 될 수 있는데, Fig. 4과 Table 1에 제시된 것과 같이 III, IV의 O/F 비가 I, II 분사기 시험 상황에 비해 높기 때문에 열량이 증가하고 이로 인해 쉽게 증발되고 혼합이 이뤄지면서 연소가 빠르게 진행되는 것이다.

Table 1. Results on Performance Values

Type	Value	Test No.			
		①	②	③	④
I	정상연소시간(sec)	21	21	20	
	유량(g/s)	316.23	320.95	319.36	
	O/F	2.67	2.70	2.76	
	연소압(bar)	49.07	50.86	50.20	
	노즐목직경(mm)	11.43			
	C*(m/s)	1592	1626	1613	
II	정상연소시간(sec)	20	1.9	2.1	2.1
	유량(g/s)	305.96	310.36	293.18	308.67
	O/F	2.63	2.72	2.42	2.89
	연소압(bar)	54.05	54.97	54.23	57.36
	노즐목직경(mm)	11.15	11.13	10.95	10.94
	C*(m/s)	1724	1722	1742	1746
III	정상연소시간(sec)	24	23		
	유량(g/s)	243.50	242.92		
	O/F	2.86	2.84		
	연소압(bar)	59.26	59.06		
	노즐목직경(mm)	10.78	10.78		
C*(m/s)	1646	1642			
IV	정상연소시간(sec)	23	21		
	유량(g/s)	242.77	247.7		
	O/F	2.82	2.90		
	연소압(bar)	61.34	60.95		
	노즐목직경(mm)	10.78	10.78		
	C*(m/s)	1702	1670		

Fig.1과 Table 1에서 알 수 있는바와 같이 시험 회수가 늘어감에 따라 비슷한 O/F 비에 대

해서도 정상연소압이 증가하고 있다. 이것은 노즐목 감소에 의한 것으로 연소 시험 중에 가열된 노즐이 외부 case에 의해 늘어나지 못하다가 식으면서 오히려 내부가 좁아지기 때문에 발생하는 현상이다. 노즐목 직경은 시험 후 마이크로미터를 이용하여 측정되며 오차를 줄이기 위해 여러 번의 측정값을 평균하였다. 이와 같이 시험 회수의 누적에 따른 노즐목 직경 변화와 추진제 유량에 따른 성능을 비교하기 위해서 특성속도( $C^*$ )를 계산한다. 특성속도는 연소압과 노즐목 면적의 곱을 추진제 유량으로 나눈 값으로 특성속도를 통해 연소기와 분사기의 효율을 논의할 수 있다.

결과를 통해 혼합형 분사기(I)에 비하여 단침형 분사기(II)의 특성속도가 100 m/s(5.9%) 정도 큰 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 다른 단일분사기 연소기의 시험 결과에 비해 높은 값을 보여주는 것이지만 아직 신빙성 있는 원인을 찾아내지 못하고 있으며, 동일한 형상의 분사기를 다시 제작하여 재시험을 수행하였으나 역시 비슷한 결과를 얻었다. 열림형 분사기(III)의 특성속도는 혼합형 분사기에 비해 높은 값이지만 뚜렷한 차이를 나타내지는 않는다. 반면 노즐 길이를 증가시킨 분사기(IV)에서는 다른 조건이 모두 동일한 혼합형 분사기(I)에 비해 높은 특성속도를 얻었다.

#### 4.2 연소압력섭동 특성

로켓연소기와 같이 고밀도의 에너지를 발산하는 연소기에서 알 수 없는 원인에 의해 발생한 연소장 교란이 상호 작용하여 증폭되고 결국은 연소기에 손상을 주게 되는 불안정 현상이 발생할 가능성이 존재한다. 이러한 불안정 현상의 발생은 예측이 어렵기 때문에 개발과정의 축소형 혹은 실물형 연소기에서 강제적인 교란을 통해 압력섭동 특성을 파악한다[5]. 하지만, 단일분사기 연소기에는 압력교란 장치 장착이 어렵고, 실물형과 단일분사기 연소기의 결과에 대한 상관성이 부족하기 때문에 일반적으로 정상연소시험에서 동특성을 파악하는 수준으로 마무리한다. 본 논문에서도 정상연소시험과정에서 발생한 연소실(CDP)과 각 추진제 메니폴드(산화제:FOIC, 연

료:FFIC)의 압력섭동의 특성에 대해서만 논의한다.

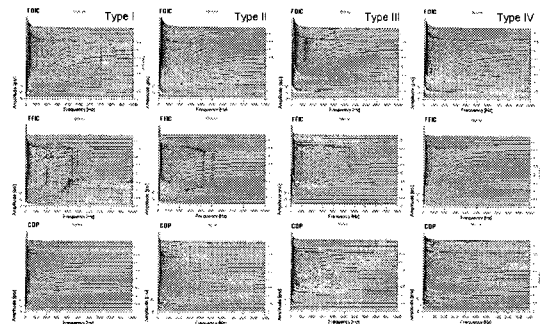


Fig. 5 Waterfall

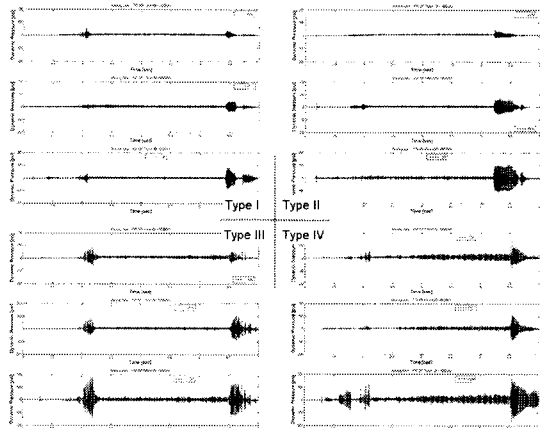


Fig. 6 Filtering Data (Bandpass 30~10,000 Hz)

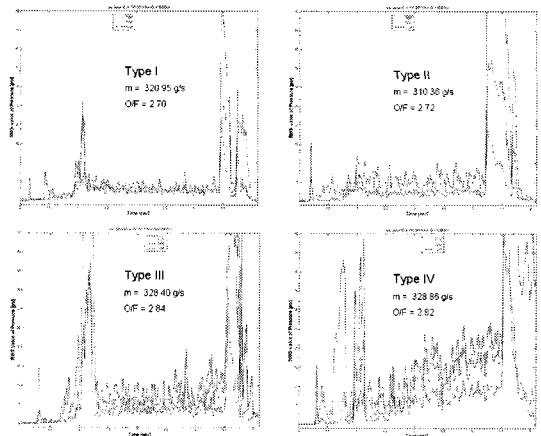


Fig. 7 RMS Value of Pressure Perturbation

노즐길이 증가형 분사기(IV)를 제외한 나머지 분사기는 연소실 압력섭동이 1 bar 수준에도 미치지 못하는 낮은 수준이고, 특정 주파수 대역에서의 불안정 현상도 발생하지 않았다. 하지만, 노즐길이 증가형 분사기(IV)에서 발생하는 압력섭동은 시험이 종료되기 전까지 증가하고 종료직전에는 2 bar 이상의 섭동이 발생한다. 물론 발생된 섭동에서 고주파 특성이 나타나지 않았기 때문에 일반적으로 연소실에서 방출되는 열량과 압력의 섭동이 연동되어 발생하는 연소불안정은 아니지만, 지속적인 증가가 진행된다면 하드웨어에 대한 손상 우려가 있으므로 주의가 필요하다. 각 시험의 정상연소시간동안(1 sec)의 RMS 값을 계산하여 Table 2에 나타내었다. 분사기 특성과 관련하여 압력섭동이 작은 분사기를 선정한다면 단협형(II) 분사기가 가장 좋은 특성을 보인다.

Table 2. Results on Pressure Perturbation

Type	RMS(bar)	Test No.			
		①	②	③	④
I	FOIC	0.1936	0.1807	0.1745	
	FFIC	0.3450	0.1872	0.2602	
	CDP	0.3575	0.2602	0.2710	
II	FOIC	0.1306	0.1538	0.1187	0.1308
	FFIC	0.1233	0.1988	0.1649	0.1815
	CDP	0.2578	0.3898	0.2861	0.3420
III	FOIC	0.6657	0.3566		
	FFIC	0.3535	0.2587		
	CDP	1.0125	0.5579		
IV	FOIC	0.9291	1.0591		
	FFIC	0.5153	0.5223		
	CDP	1.1782	1.4253		

### 5. 결론

분사기의 형상에 따른 연소특성 변화를 확인하기 위해 단일분사기 연소기를 이용한 연소시험을 수행하였다. 연소시험 결과를 통해 분사기에 따른 연소성능과 압력섭동 특성을 파악할 수 있었다. 연소성능과 압력섭동의 모든 측면을 고려할 때 단협형 분사기(II)가 연료측 외류챔버의 유량섭동감쇠 효과로 인해 가장 우수한 성능을 나타

내지만, 수류시험과 연소시험에서 분사차압이 가장 높게 나타나는 단점을 보인다.

반대로, 분사차압이 상대적으로 낮은 열림형 분사기(III)와 노즐길이 증가형 분사기(IV)는 다른 두 종류의 분사기에 비하여 높은 압력섭동을 보인다.

### 후 기

본 연구는 '소형위성발사체(KSLV-I) 개발사업' 및 '로켓엔진 고성능화 기술개발'의 일환으로 진행되었으며 이에 감사드리며 시험 수행에 도움을 준 충남대학교 로켓실험실 분들에게도 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. 김종규, 김인태, 임병직, 김승한, 문일윤, 한영민, 설우석, "액체로켓엔진 연소기용 분사기의 분무특성 및 혼합특성에 관한 연구", 한국유체공학학술대회 논문집, 2004, pp.403~406
2. 이광진, 서성현, 한영민, 김승한, 조원국, "액체로켓엔진용 동축스웰 분사기의 recess 변화에 따른 연소성능연구", 한국유체공학학술대회 논문집, 2004, pp.419~422
3. 김승한, 한영민, 서성현, 문일윤, 이광진, 김종규, 김인태, "액체로켓엔진용 충돌형 및 이중와류 분사기 설계에 따른 단일분사기 연소기의 연소특성", 한국유체공학학술대회 논문집, 2004, pp.423~426
4. 서성현, 이광진, 한영민, 김승한, 김종규, 문일윤, 설우석, "다종의 동축 스웰형 단일 분사기 연소 특성에 관한 실험적 연구", 한국추진공학회지, 제8권, 제2호, 2004, pp.85~94
5. 이광진, 서성현, 강동혁, 송주영, 임병직, 한영민, "실물형 액체로켓 연소기의 연소안정성에 대한 시험적인 고찰", 한국추진공학회 추계학술대회, 2005