

## 파열판 방식 연소기 점화기의 유량계수 시험

유재한\*, 이종엽\*\*, 이수용\*\*\*

### Flow Coefficient Experiments of a Hypergolic Igniter with Rupture Disc Ends

Jaehan Yoo\*, Joongyup Lee\*\*, Soo Yong Lee\*\*\*

#### Abstract

Many of the liquid rocket engines use a hypergolic igniter with rupture disc ends located in the combustion chamber ignition line. In this study, the flow coefficient tests of the igniter, which have a solenoid valve upstream, were performed. The tension-type rupture discs for radial and circumferential scores and the igniter with them were tested using water at room temperature. The effects of the score, flow rate, the disc thickness, gas pocket and the solenoid valve on the coefficient were analyzed.

#### 초 록

액체 로켓 엔진 점화 라인에 부착되는 연소기 점화기 중에 양단에 파열판이 부착되는 방식이 있다. 본 연구에서는 전단에 솔레노이드밸브가 있는 이러한 연소기 점화기에 대한 유량계수 시험을 수행하였다. 방사형 및 원주형 스코어를 가지는 인장형 파열판, 점화기에 대한 상온 수류 시험을 통하여, 유량계수에 대한 스코어, 유량, 파열판 두께, 전단 공기층 및 솔레노이드밸브의 영향을 살펴보았다.

키워드 : 액체 로켓 엔진 (Liquid Rocket Engine), 자발화 점화기 (Hypergolic Igniter), 파열판 (Rupture Disc), 스코어 (Score), 인장형 (Tension-type) 유량계수 (Flow Coefficient), 시험 (Test)

#### 1. 서 론

액체 로켓 엔진 시동 점화 방식의 대표적인 형태로 공기 중에 노출되면 점화가 되는 자발화 점화제 (hypergolic fuel) 를 이용한 방식이 있다. 이 방법은 엔진 시동 초기에 연료 보조 점화 라인과 연결된 분사기를 이용하거나 혹은 연소실

안으로 직접 점화제를 분사하여 산화제와 연료를 점화시키는 방식이다. 이러한 방식 중에서도, RD-170, RD-180, F-1 및 MC-1 엔진 등은 점화기 양 끝단에 일정한 압력에서 유동이 흐르기 시작하는 파열판이 장착된 자발화 점화기 (hypergolic igniter) 을 이용하였다. 이러한 방식에서는 일정 유량의 점화제가 일정 시간 이상으

접수일(2012년 8월 14일), 수정일(1차 : 2012년 10월 19일, 2차 : 2012년 10월 25일, 게재 확정일 : 2012년 11월 1일)

\* 미래로켓연구팀/tonup@kari.re.kr \*\* 미래로켓연구팀/leejy@kari.re.kr \*\*\* 미래로켓연구팀/sylee@kari.re.kr

로 공급되어야 하므로 점화 라인의 수력학적 특성 파악은 매우 중요하다.

본 연구에서는 전단에 솔레노이드밸브가 있는 양단 파열판 방식의 연소기 점화기의 수력학적 특성 파악을 위해 아래 그림 1과 같은 점화기에 대하여 유량계수 시험을 수행하였다. 점화기는 자발화 점화제를 포함하는 용기와 파열판이 장착되는 입/출구부 커넥터로 구성된다. 파열판은 다양한 종류가 있으나 MC-1 사례를 고려하여 방사형 (+형) 및 원주형 (C형) 스코어를 가지는 인장형을 고려하였다[1].



그림 1 양단 파열판 방식 연소기 점화기

파열판과 관련된 기존의 연구는 주로 파열압의 예측 및 측정에 관하여 수행되었다[1]. 스코어가 있는 파열판의 파열압은 주로 스코어 형상 및 깊이의 함수이나, 유량계수는 파열 후 개방면적의 함수이다. 개방면적은 전단의 유체가 액체인 경우에 비해 기체인 경우에 커지게 되어, 점화기 내부의 점화제와 전단의 연료를 모사하는 상온의 물을 이용하여 시험을 수행하였다. 시험 장치는 흐름 방향으로 공급 탱크, 유량계, 자동 개폐 밸브, 시험편, 수동 불 밸브와 자동 개폐 밸브가 순서대로 장착되었다.

점화기의 설계 목표는 일정 점화제 유량을 공급하기 위해, 점화 가능한 유량에서 목표 유량계수 이상을 가지는 것이다. 유량계수의 정의는 아래와 같다.

$$q = C_v \left( \frac{\Delta P}{G} \right)^{1/2} \quad (1)$$

여기서,  $q$ 는 유량으로 단위는 US gal/min,  $C_v$ 는 유량계수,  $\Delta P$ 는 시험편의 전후단 차압으로 단위는 psi,  $G$ 는 비중으로 물의 경우는 1이다. 본 연

구에서 모든 유량계수는 파열판의 목표 유량계수로, 유량은 앞서 언급한 점화유량으로 나누어져 무차원화되었다.

## 2. 방사형 스코어 파열판

그림 2와 같은 방사형 스코어 파열판의 재질은 Monel 400으로, 돔의 흐름 전단면에 '+' 형의 스코어가 있으며, 두께 영향을 알아보기 위하여 두께 0.1 mm (0.1t) 및 0.15 mm (0.15t) 의 두 가지로 제작되었다. 파열압은 상온 25-50 bar 범위에 있으며, 공압으로는 그림 1과 같이 파열 후에 완전히 개방된다.

일반적으로 제작 측면에서는 두께가 얇아질수록 동일한 파열압 공차 요구조건을 만족시키기 어려워져 보다 많은 제작 비용이 소요된다.



그림 2 방사형 스코어 파열판 (좌:파열전, 우:공압 파열 후)

### 2.1 파열판 시험 (유량 증가)

초기에 개방면적이 거의 없이, 스코어가 이미 파열된 0.1t 파열판 한 개에 대하여 10 초 이상씩, 그림 3과 같이 유량 계수 시험을 수행하였다. 후단 불 밸브는 고정하고 공급압을 증가시키는 방법으로 유량을 증가시켜 가며 8회의 시험을 수행하였다. 파열판 전/후단에 압력 센서를 설치하고, 전단에 니들 밸브를 장착하여 시험 전에 전단 공기층을 제거하였으며, 후단은 대기압의 공기 상태이다.

그림 4는 최대 유량 시험 이후의 개방 형상이며, 개방면적비율이 전체의 1/2인 것을 알 수 있다. 개방면적비율은 육안으로 관찰하여 총 4 개의 페탈 (petal) 중에서 1 개가 개방된 경우가 1/4, 2 개가 개방된 경우는 1/2 이다. 페탈이 개

방된 부분의 형상을 보면 스코어 끝단에 'V' 자형으로 2-3 mm의 균열 진전이 있으며, 폐탈과 평평한 링의 연결부에서 주로 변형이 된다.

물을 이용한 수류 시험에서 폐탈이 모두 개방되지 않고 부분적으로 개방되는 이유는 다음과 같다. 폐탈의 연결부인 '+' 스코어는 동일하게 제작되나, 실제의 경우는 편차로 인해 전체 스코어가 동시에 파열되지 않는다. 먼저 파열된 일부 스코어로 유동이 흐르면, 파열판 전/후단의 압력차가 급격히 작아져 다른 스코어가 파열되지 않는다.



그림 3 파열판 단독 시험



그림 4 최대 유량 시험 이후 변형 형상 (좌우 : 동일 시험)

그림 5는 유량 증가에 따른 유량계수 시험 결과이다. 유량 2.5~3.2 구간에서는 유량계수가 약 1.8, 개방면적 비율이 1/4이고, 유량이 증가하여 4.2~4.8 구간에서는 유량계수가 약 2.7, 개방면적 비율이 1/2이다. 유량이 증가할수록 유량계수가 선형이 아닌 계단 형태로 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 비선형성의 원인은 크게 두 가지로 추정될 수 있다. 하나는 물에 의해 폐탈에 가해지는 힘과 폐탈 변형의 관계가 비선형이기 때문이다. 이는 그림 3에 나타난 것처럼 변형이 폐탈 끝에서 주로 국부적으로 대변형이 발생하는 점과 'V'형 균열에 기인한다. 또 다른 하나는 폐탈이

모두 4 개로, 하나가 개방되면 개방면적이 증가하여 물에 의해 폐탈에 가해지는 힘이 줄어들기 때문이다.

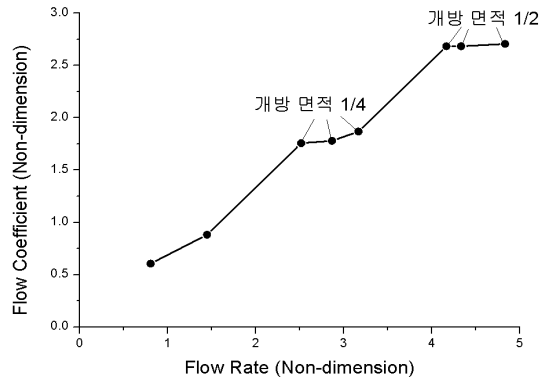


그림 5 유량에 따른 유량계수 ('+'형 스코어, 0.1t)

## 2.2 파열판 시험 (유량 고정)

파열되지 않은 0.1t 및 0.15t 파열판에 대하여, 공급압을 서서히 증가시켜 파열 및 흐름이 발생되게 하였으며, 후단 볼밸브 및 공급압을 고정하여, 유량을 비교적 일정하게 유지하며 시험을 수행하였다.

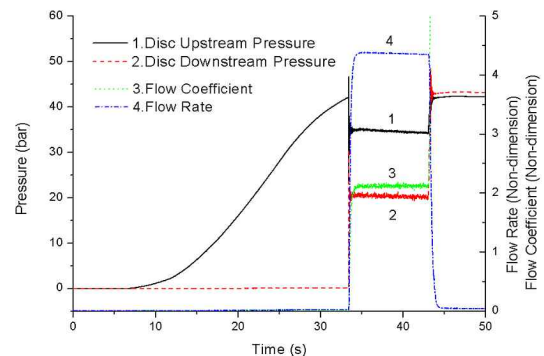


그림 6 유량계수 시험 이력 ('+' 스코어, 0.15t)

그림 6은 0.15t 파열판의 전/후단 압력, 유량 및 유량계수 이력을 나타낸다. 공급압이 서서히 증가하여 파열판 전단의 압력이 파열압에 이르면 파열판이 파열되어 흐름이 발생하고, 천이 과정

이후에 파열판 전/후단에 차압이 발생하는 것을 알 수 있다. 그리고 압력 및 이를 이용하여 계산된 유량계수에 섭동이 있으며, 터빈 방식 유량계를 사용하여 유량 반응은 다소 늦는 것을 알 수 있다. 파열 후에 생기는 전/후단 압력의 급격한 감소 및 증가는 파열판의 파열 및 후단 볼 밸브에 의한 현상이다. 이 현상은 아래 3.2에서 자세히 다룬다.

표 1은 두께에 따른 유량계수 시험 결과를 나타낸다. 0.1t 인 경우에 개방면적비율이 1/2, 유량계수 평균은 2.88이며, 0.15t 인 경우에 개방면적비율이 1/4, 유량계수 평균 2.40이다. 두께가 두꺼워질수록 폐탈 변형에 보다 많은 힘이 필요하므로 동일한 시험 조건에서 개방면적 및 유량계수가 줄어든다.

표 1 두께에 따른 유량계수 시험 결과 (\*형, 유량 고정)

두께	유량	유량계수	개방면적비율
0.1t	4.77	2.93	1/2
	4.68	2.68	1/2
	4.87	3.05	1/2
0.15t	4.50	2.35	1/4
	4.37	2.13	1/4
	4.08	1.74	1/4

그림 7은 표 1의 시험 이후에 파열 형상을 보여준다. 개방되지 않은 면적의 스코어는 파열된 경우도 있고 그렇지 않은 경우도 있다. 이러한 편차는 동일 조건에서의 개방면적과 유량계수 편차의 원인이 된다.



그림 7 시험 후 변형 형상 (위 : 0.1t, 아래 : 0.15t)

표 1의 0.1t 유량 계수를 그림 5와 비교하면 유사하거나 다소 높다. 이는 개방되지 않은 폐탈의 스코어의 파열, 끝단 균열 진전 등의 차이로 인한 편차이다.

### 2.3 점화기 시험

그림 8과 같이 방사형 스코어 파열판이 양단에 장착된 점화기에 대하여 유량계수 시험을 수행하였다. 시험 전 조건 및 진행 방식은 2.2와 마찬가지로 전단 공급압을 증가시켜 파열판을 파열시켰다. 단, 점화기 내부에는 자발화 점화제 대신에 대기압의 물이 채워져 있다. 압력센서는 점화기 전/후단 및 중간에 장착되었으며, 점화기 중간에 있는 압력센서 결과는 확인되는 영역에 있어 유량계수 산출에는 사용될 수 없다.



그림 8 양단 방사형 스코어 파열판 점화기 유량계수 시험

그림 9는 점화기 입/출구부 파열판의 파열 후의 형상을 나타낸다. 앞의 단독 시험과 마찬가지로 파열판 두께가 증가하면 개방면적이 작아지며, 입/출구부의 파열형상은 유사하였다. 0.1t의 경우, 유량 4.05에 개방면적비율이 1/2, 두께 0.15t의 경우, 유량 3.58에 개방면적비율이 1/4이다. 파열판을 제외한 점화기의 유량계수는 별도로 측정하지 않았으나, 상용 전산유체해석 코드인 Fluent를 이용하여 구한 유량계수는 20.8이다. 이 값과 측정된 점화기 유량계수를 이용하여, 개방면적비율이 1/2인 파열판의 유량계수를 구하면 2.74로, 그림 4의 개방면적비율이 1/2인 유량계수 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.



그림 9 시험 후 변형 형상(좌 : 0.1t, 우 : 0.15t)

두께 0.1t의 모든 시험 중의 한 번의 경우에서, 파열직후에 유량이 서서히 증가하다가 약 8초 후에 스코어가 추가로 파열되어 급격히 유량이 증가한 경우가 있다. 이 경우에 최종 개방면적이 1/2, 최종 유량은 4.05이다. 이외의 모든 경우에서 시간에 따라 유량이 증가하는 경우는 없었다.

### 2.4 솔레노이드밸브 연결 점화기 시험

그림 10과 같이 'ㄱ' 자형 (right angle) 솔레노이드밸브[3]와 양단에 0.1t 방사형 스코어 파열판이 장착된 점화기에 대하여 유량계수 시험을 수행하였다. 파열압 이상으로 가압을 한 후에 솔레노이드밸브를 개방하여 유량계수 시험을 수행하였다. 압력센서는 솔레노이드밸브 전단, 점화기 중간 및 후단에 장착되었다. 입구측 파열판과 솔레노이드밸브 사이에는 공기층이 있는 경우와 없는 경우 두 가지에 대하여 수행되었다. 이는 실제 엔진 장착 시에 사이에 공기층이 생길 수도 있기 때문이다.



그림 10 솔레노이드밸브 연결 점화기 시험

공기층이 있는 두 번의 시험을 수행한 결과, 아래 그림 11과 같이 유량 3.13에 개방면적비율이 1/4, 유량 3.28에 개방면적비율 1/2로 차이가 컸다. 이러한 시험 결과를 그림 5에 적용하면 유량-유량계수 선도가 계단형에 더욱 가까워진다. 측정된 솔레노이드밸브 연결 점화기의 유량계수와 해석으로 구하여진 파열판 제외 점화기의 유

량계수를 이용하여, 파열판의 유량계수를 정량적으로 구한 값은 오차가 크다고 판단되어 제시하지 않았다. 이는 솔레노이드밸브의 측정 유량계수가 2.0으로 파열판에 비하여 상대적으로 매우 작기 때문이다.



그림 11 시험 후 변형 형상  
(밸브 연결 점화기, 좌 : 유량 3.13, 우 : 유량 3.28)

공기층이 없는 경우는 유량 3.28에서 개방면적비율이 1/2이었으며, 앞선 공기층이 없는 경우와 동일하여 공기층의 영향은 무시할만하다.

## 3. 원주형 스코어 파열판

방사형 파열판의 유량계수가 유량의 함수이며, 점화유량에서 목표 유량계수를 만족하지 못해, 이를 개선하기 위해 그림 12와 같이 0.1t Nickel 200과 0.4t Aluminum 3003 H16 재질의 원주형 스코어 파열판이 제작되었다. 공압으로 파열압을 측정한 결과, 파열압은  $15 \pm 3$  bar 이며, 파열 후에는 그림 12에서처럼 완전히 개방되는 것을 확인하였다. 파열압은 재질 및 제작의 공차를 포함하여 12~18 bar 사이에 있게 제작이 되며, 이를 위해 제작 중에 주기적으로 일부 샘플에 대한 시험이 수행된다. Aluminum은 다른 재질에 비해 상대적으로 강도가 낮아 파열판의 두께를 두껍게



그림 12 원주형 스코어 파열판  
(좌 : Ni 01t 파열전, 우 : Al 0.4t 공압 파열후)

할 수 있어 제작이 용이하며, 가스발생기 싸이클 로켓 엔진의 사례[1]가 많다.

원주형 파열판 시험은 방사형 파열판과 유사한 구성으로 시험되었으나, 상대적으로 시험편 후단 수동 볼 밸브를 적게 열어 유량을 적게 하였다. 대부분의 경우에 적은 유량에서 시험되고 유량계수가 커서 시험편의 차압이 작아, 압력 측정을 위해 정압 센서 대신에 차압 센서를 이용하였다.

### 3.1 파열판 시험

파열판 시험은 AI 파열판에 대하여 2.2와 같이 수행되었다. 시험 결과, 유량 1.0에서 유량계수 3.07이며, 파열 후의 변형 형상은 공압 파열 후와 동일하게 완전 개방되었다. 방사형과 비교하면 적은 유량에서 개방면적이 더욱 넓어 유량계수가 더 크고, 점화유량에서 유량계수 목표를 만족하는 것을 알 수 있다. 또한 마진 확인을 위한 추가적인 시험을 통하여 보다 적은 유량 0.83에서도 파열판이 동일하게 완전히 개방되며, 유량계수도 2.99로 목표를 만족하는 것을 확인하였다.

표 2는 파열판 재질로 사용된 Monel 400, Nickel 200 및 AI 3003 H16의 상온 기계적 물성치이다. 파열판의 두께를 곱한 인장강도 및 항복강도의 상대적인 순서는 AI > Monel > Nickel이며, 두께를 곱한 강성의 경우는 AI > Nickel > Monel 이다. 게다가 AI의 연신율은 다른 재질에 비해 매우 작다. 따라서 AI 파열판의 유량계수가 목표를 만족하면 강성 및 강도가 더 작아 변형에 더 적은 힘이 소요되는 Ni과 Monel도 목표를 만족할 것으로 추정된다. 그리고 원주형이 방사형보다 개방면적이 넓은 이유가 재질이 아닌 스코어 형상에 의해서라고 볼 수 있다.

표 2 파열판 재질의 상온 기계적 물성치 (sheet) [4,5]

Sheet	탄성계수 (GPa)	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	연신율 (%)
Monel 400 (Annealed)	179	482~586	207~310	35~45
Nickel 200 (Annealed)	205	380~520	105~210	40~55
Al 3003 H16	69 (=276/4)	175 (=700/4)	170 (=680/4)	5~12

### 3.2 솔레노이드밸브 연결 점화기 시험

솔레노이드밸브 연결 점화기 시험은 2.4와 동일한 방법으로 수행되었다. 단, 방사형과는 달리 입구측 파열판 전단과 솔레노이드밸브 사이에 압력 센서를 추가하였다. AI 파열판에 대한 시험 결과, 솔레노이드밸브와 입구측 파열판 사이에 공기층이 없는 경우에 유량 0.63에서 파열판이 완전 개방되는 것을 확인하였다.

Ni 파열판에 대한 시험에서는 공기층의 영향 및 수격 (water hammering) 현상을 살펴보았다. 방사형과 마찬가지로 원주형의 경우도 개방면적에 대한 공기층 유무의 영향은 무시할만하였다.

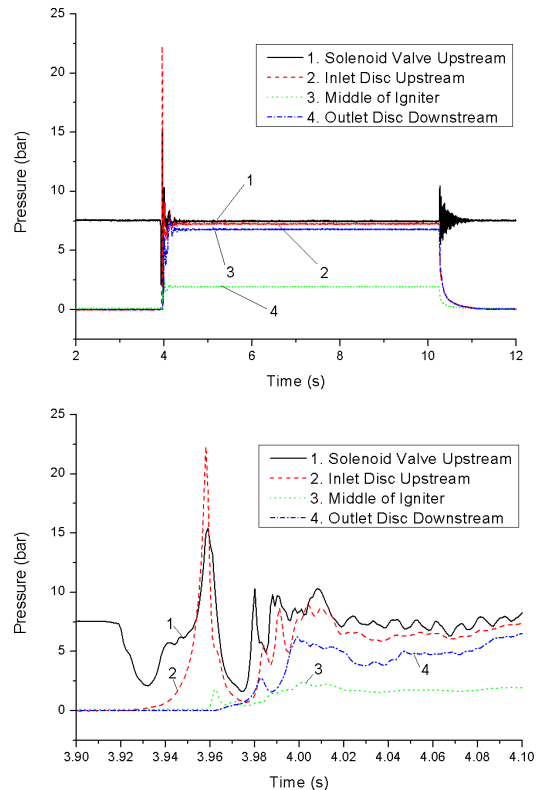


그림 13 유량계수 시험 압력 이력 ('C' 스코어, Ni 0.1t)

그림 13은 수격 현상을 자세히 살펴보기 위하여 샘플링 주파수를 1000 Hz 로 하였을 때, 압력 이력을 나타낸다. 공급압을 파열압 하한치인

12 bar 보다 작은 7.5 bar 로 하였다. 솔레노이드 밸브를 개방하면, 솔레노이드밸브 전단의 압력이 감소하면서 수격 현상으로 인하여 입구측 파열판 전단의 압력이 22 bar 까지 상승하여 입구측 뿐만 아니라 출구측 파열판이 파열된다. 동시에 점화기 중간 및 후단의 압력이 증가하면서, 점화기 전단의 압력은 감소하고, 모든 압력들이 후단 불밸브에 의하여 다시 상승하면서 진동하는 것을 알 수 있다.

점화유량보다 높은 유량에서 파열판의 유체 유발 진동에 의한 수명 평가를 위해, 솔레노이드 밸브 없이 양단에 Ni 파열판이 장착된 점화기에 대해 수명 시험을 하였다. 11 분 동안에 유량 3.24를 흐르게 한 결과, 유량계수의 변화나 파열판의 분리는 없었다. 이러한 경우에는 차압이 커서 정압 센서로 측정된 차압과 차압센서 값이 동일하다.

원주형 파열판 시험에서는 파열되지 않거나 완전 개방되지 않은 경우는 없었다.

신뢰성을 통계적으로 제시할 필요가 있다.

## 참 고 문 헌

1. 유재한, 이수용, “자연발화 점화기 및 파열판 기술 동향”, 한국추진공학회 2012 춘계학술대회, 213~218.
2. US Patent. US 6,497,091 B1, Hypergolic Ignitor Assembly, 2002.
3. 이중엽, 이수용, “솔레노이드 밸브의 고유유량 계수에 대한 실험과 성능예측”, 항공우주기술, 제10권, 제1호, pp. 168~176.
4. www.specialmetals.com
5. www.matweb.com

## 4. 결 론

양단 파열판 방식 점화기에 대한 유량계수 시험의 결론은 아래와 같다.

- 방사형 스코어 파열판의 유량계수는 유량의 계단형 함수이고, 파열판 두께와 반비례한다. 그리고 스코어 파열의 편차로 인해 유량계수 편차가 발생할 수 있다.
- 방사형 스코어 파열판은 점화유량에서 목표유량계수를 만족하지 못하였으나 원주형은 만족하였다.
- 점화기 입/출구부 파열판의 파열 형상은 유사하였고, 솔레노이드밸브 장착 시험 결과, 공기층의 영향은 무시할만하다.
- 점화기 전단의 솔레노이드밸브 개방으로 공급압을 초과하는 수격 현상이 발생하여, 공급압이 파열압과 유사한 수준이더라도 파열판이 신뢰성있게 파열될 수 있다.
- 향후, 파열판 제작 및 시험 과정을 고려하여