

자연발화 점화기 및 파열판 기술 동향

유재한*[†] · 이수용*

Technology Trend of Hypergolic Igniter and Rupture Disc

Jaehan Yoo*[†] · Soo Yong Lee*

ABSTRACT

Survey on the hypergolic igniter and rupture disc for liquid rocket engines was performed. The patent of the igniter for US MC-1 and Russia RD-170 Engine and the disc for NASA's space vehicle were analyzed. The types, characteristics, performances, design parameters and ASME standards of the disc are examined. The performances have manufacturing tolerance, reverse pressure, flow disturbance, fragmentation, material, working fluid and operating ratio. Also, survey on structural analyses of the rupture disc were performed.

초 록

파열판이 양 끝에 부착된 액체 로켓 엔진의 자연 발화 점화기와 이에 활용 가능한 파열판에 관하여 문헌 조사를 수행하였다. 특히로 등록된 미국의 MC-1 엔진 및 러시아의 RD-170 엔진의 자연발화 점화기 설계와 NASA에서 사용된 파열판의 기본적인 성능이 분석되었다. 그리고 파열판의 종류, 특성, 성능과 이와 관련된 설계 인자와 ASME 표준이 조사되었다. 성능으로 파열압과 관련된 파열 공차, 역압, 흐름 교란, 파열 후의 조각 발생 여부, 재질, 작동 유체, 운영비 등이 있다. 또한 파열판 구조 해석과 관련된 문헌조사도 수행하였다.

Key Words: Liquid Rocket Engine (액체 로켓 엔진), Hypergolic Igniter (자연 발화 점화기), Rupture Disc (파열판), Holder (홀더), MC-1, RD-170

1. 서 론

액체로켓엔진 시동 점화 방식의 대표적인 형태로 공기 중에 노출되면 점화가 되는 자연발화 점화제 (hypergolic fuel) 를 이용한 방식이 있다. 이 방법은 엔진 시동 초기에 연료 보조 점화 라

인과 연결된 분사기를 이용하여 산화제와 연료를 점화시키는 방식이다. 이 방식은 점화제가 들어있는 자연발화 점화기 (hypergolic igniter) 를 사용하는데, RD-170, RD-180, F-1 및 MC-1 엔진 등은 점화기 양 끝단에 일정한 압력에서 유동이 흐르기 시작하는 파열판을 이용하였다.

파열판은 석유, 화학, 위생 분야 등에서 다양하게 사용되는 장치로 운용 조건에서 누설이 없

* 한국항공우주연구원 미래로켓연구팀

† 교신저자, E-mail: tonup@kari.re.kr

으며 일정한 압력에서 수 msec 내에 파열되어 압력을 경감 (pressure relief) 시키거나 빠르게 유로를 여는 (quick-opening) 역할을 한다.

여기서는 파열판이 양 끝에 부착된 액체 로켓 엔진의 자연 발화 점화기와 이에 활용 가능한 파열판에 관하여 문헌 조사를 수행하였다. 즉, 파열판의 작동 유체가 액체이고, 파열 후에 조각이 떨어져 나가지 않으며, 약 1/2" 튜브 라인에 활용 가능하여야 한다. 그리고 시동 충격과 미연소 추진체를 최소화하기 위하여 가능한 빠른 시간 안에 점화를 일으켜야 하므로 가능한 낮은 파열압을 가지는 경우를 고려한다[1].

구체적으로 자연 발화 점화기 해외 사례와 파열판의 종류, 주요 성능과 이와 관련된 설계 인자, 관련 표준, 상용 헤드에 대하여 알아보았다. 또한 파열판 구조 해석과 관련된 문헌조사도 수행하였다.

2. 자연 발화 점화기

2.1 미국 사례

Figure 1은 2002년[2] 미국 특허로 등록된 자연 발화 점화기 개념도이다. 이 점화기는 MC-1 엔진에 사용되었으며 자연발화 점화제가 연소실로 직접 분사되는 방식이다.

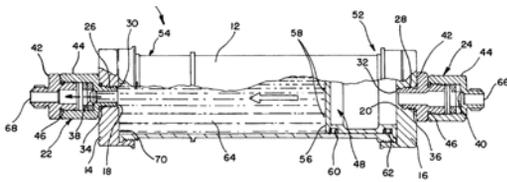


Fig. 1 MC-1 Engine Hypergolic Igniter

이 특허는 기존 자연 발화 점화기가 기성품이 아니며 제작이 비싸고 재사용이 불가능한 단점을 보완하였다. 파열판을 기성품을 활용하여 저렴하고 빠르게 제작이 가능하며, 사용 후에 파열판만을 교체하여 재사용이 용이하다. 실제 엔진 개발 시에는 엔진을 여러 대수를 만들고 각각에

대해 많은 실험을 하므로 이러한 구조에서는 일회용으로 사용되는 자연 발화 점화기에 소요되는 비용을 크게 줄일 수 있다. 또한 실린더로 자연 발화 점화제를 밀어주어 연료와 섞이지 않게 연소실내에 공급해주며, 실린더 출구 부분에 퍼지용 홈이 있어 연료로 남은 자연 발화 점화제를 모두 분출시켜 주는 장점이 있다.

시동전 초기에는 TEA (triethylaluminum) 와 TEB (triethylborane)의 혼합물인 TEAB가 64번의 공간에 차 있다. 파열판 40번과 38번은 스코어 (score) 가 있는 돔 (dome) 형태이며 점화기 입/출구부의 나사 조립체의 형상이 다르다. 그리고 실린더 12번과 실린더 캡 14, 16번의 기밀을 위해 PTFE (polytetrafluoroethylene) 오링 씬이 사용되었다.

실린더의 TEAB 용량은 약 570 cc 이며 파열압은 약 14 barg이다. 유량은 0.45 kg/sec이며 0.9 초 동안 공급되어 4.54 kcal/sec의 열량을 만든다.

용량의 선정은 시스템 설계와 시동 시퀀스에 따라 달라진다. 대개 작은 venier 엔진의 경우의 65.5 cc 에서 680 ton 추력 엔진의 경우의 573 cc 까지 다양하다. 그리고 일반적으로 각 위치에서 16.4 cc 정도의 자연 발화제가 필요하다.

2.2 러시아 사례

Figure 2는 2001년 미국 특허로 등록된 자연 발화 점화기 개념도로, RD-170 및 180 엔진에 사용되었다[3]. 이 점화기는 기존의 전형적인 파열판을 사용하지 않고 격막 일체형 피스톤을 사용하였다.

이 점화기의 특징은 비교적 높은 압력과 낮은 유량에서 격막이 조각 없이 신뢰성 있고 균일하게 원형으로 잘라지는 것이 보증되어, 균일한 유량 특성이 재현될 수 있는 장점이 있다. 특히 여러 개의 연소실이 있는 엔진의 경우에는 연소실간에 동일한 유량 특성을 가지도록 하는 것이 중요하여 유용하게 사용될 수 있다. 또한 자연 발화 점화제 충전 과정을 보다 쉽게 할 수 있도록 21번과 같은 구조가 설계되어 있다.

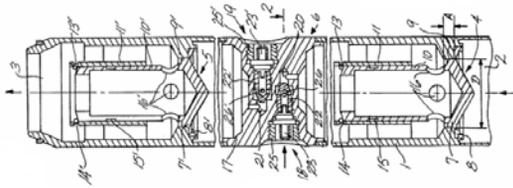


Fig. 2 RD-170 and 180 Engine Hypergolic Igniter

격막 8번은 몸체 1번에 기밀이 유지되어 고정된다. 자연 발화 점화기 입구부의 압력이 높아지면 4번 피스톤에 압력이 가해져 8 번 격막이 파열되고 10번 피스톤이 이동하며, 이 과정에서 출구부 피스톤 5번에 압력이 가해져 격막이 파열되고 자연 발화 점화제가 연소실로 이동한다.

특허에서 제시된 예로는 D가 44 mm, A가 6 mm, 크롬동 격막의 두께가 $0.3 \text{ mm} \pm 0.02 \text{ mm}$ 일 경우에 파열압은 $50 \pm 10 \text{ kgf/cm}^2$ 이다.

3. 파열판

Table 1. Rupture Disc Examples at NASA

발사체	적용	작동 유체	파열압 (MPa)	재질 (Al-)
Atlas	Hypergolic igniter	TEAB, RP-1	2.07 +0.172 -0.483	6061-O
	Solid ropellent gas generator	Hot gas	4.48 ± 0.345	3003-O
Titan	Autogeneous pressurization	N ₂ O ₄ Vapor	2.07 ± 0.207	1100-O
		A-50 Vapor		
Saturn	Hypergolic igniter	TEAB, RP-1	3.45 +0.172 -0.517	6061-O
			2.07 +0.172 -0.517	
	Pump drain line	O ₂	0.145 ± 0.0034	1100-O

Table 1은 NASA의 발사체에 사용된 대표적인 파열판의 설계 특징[1]을 보여주고 있다. 모든 파열판은 스코어가 있는 형태이며 자연 발화 점화기의 작동 유체는 TEAB와 RP-1, 재질은

Al-6061-0, 파열압은 2.07~3.45 MPa, 공차 +8~-25% 이며 모두 용접으로 부착되었다. 이외의 용도에서는 모두 기계적 체결 방법이 사용되었다.

3.1 분류

돔 (dome) 형태의 파열판은 크게 압력을 받는 면이 오목한 면인 인장 방식 (tension type)과 볼록한 면인 역좌굴 방식 (reverse buckling)으로 나누어질 수 있다.



Fig. 3 Various Rupture Disc Types [4,5]

인장 방식은 크게 가장 초기 형태인 솔리드 형태 (solid type), 슬롯 (slot) 이 있는 파열판에 기밀 막이 부착된 복합 형태 (composite type)와 스코어가 있는 형태가 있다. 솔리드 형태는 파열 후에 조각이 생기는 단점이 있고, 복합 형태는 별도의 기밀막이 필요하다. 두 경우 모두 진공 역압 (reverse pressure) 을 견디기 위해서는 별도 진공 지지 (vacuum support) 구조물이 필요한 경우가 많으며, 조각에 따른 손상을 줄이고 기밀 성능을 높이기 위해 보호 링 (protective

ring) 이 추가되기도 한다. 일반적으로 스코어 형태는 방사형 (radial), 힌지형 (hinge) 등이 있다.

인장 방식에 비해 진보된 형태인 역 좌굴 방식은 날카로운 칼날 (knife blade)을 이용한 파열 방식과 스코어에 의한 방식이 있으며 후자는 전자에 비해 칼날이 제거되어 가벼운 장점이 있다. 이 방식은 파열되는 방식의 특징으로 인해 인장 방식에 비해 파열판을 보다 두껍게 설계를 할 수 있어 대부분 제작 공차를 0% 까지 할 수 있고 부식 저항성도 뛰어나다. 그리고 대부분 상용품의 경우에 조각이 생기지 않으며 추가적인 지지 구조물 없이 진공 역압을 견딜 수 있는 장점이 있다. 그러나 역좌굴방식에서 방사형 스코어 형태는 일반적으로 유체가 가스인 경우에만 적용 가능하다.

3.2 주요 성능

파열판의 가장 주요한 성능은 파열압과 관련된 공차이다. 제작 공차 혹은 ASME 규격의 제작 설계 범위 (manufacturing design range) 는 제작 시의 두께의 불확실성으로 인한 오차로, 설계 압력에 대한 표기 파열압 (marked burst pressure) 의 % 차이이다. 이 값이 -10 %이면 표기 파열압은 설계 파열압의 90~100 % 범위에 있다. 대다수의 역좌굴 방식의 상용품은 제작 설계 범위의 표준이 0 %이며, -5 및 -10 %를 부가적으로 선택할 수 있다.

파열 후에 파열판의 조각 발생 여부도 중요한 성능이다. 조각이 떨어져 나가게 되면 흐름 아래의 부품에 문제를 일으킬 수 있다. 또한 지속적인 흐름이 있는 경우에는 플러터 (flutter) 및 피로 파괴도 주의하여야 한다. 대부분의 상용 파열판은 이러한 현상이 생기지 않게 설계되어 있다.

역압 성능은 고압의 외부 시스템으로부터 누설이 발생하지 않아야 하는 경우에 중요하게 된다. 로켓 엔진에서는 재점화에 사용되는 고체 추진제가 있는 다수의 점화 시동기의 경우에 해당된다.

압력 강하와 흐름 교란은 스코어의 형태에 따라서 변하게 된다. 방사형의 경우는 가운데 흐름

이 있어 비교적 흐름 교란이 적으나 완전히 열리지 않았을 경우에 비교적 높은 차압을 가지게 된다. 힌지형은 완전히 열리지 않았을 경우에 흐름 교란이 한쪽에 치우치게 되는 단점이 있다.

파열판의 재질은 알루미늄, 300 계열 스테인레스 강, Monel 합금, Inconel 합금, 구리, 은, 금, 니켈 등이 있으며 작동 유체와의 적합성을 판단하는 주요 인자이다. 알루미늄은 상대적으로 낮은 기계적 물성치로 인해 파열판 및 스코어를 두껍게 설계할 수 있어 비교적 공차에 덜 민감한 편이나 온도에 따른 물성 변화가 크고 최대 사용 온도(394 K)가 낮은 단점이 있다. 스테인레스 강이나 Inconel 합금은 비교적 제작이 어려우나 부식 저항성이 우수하고, 특히 후자는 온도에 따라 비교적 일관된 물성을 가지고 있다.

파열판은 작동 유체의 상(phase)에 따라서도 나누어지게 되며 기체만 사용 가능한 경우와 기체, 액체 모두 사용 가능한 경우가 있다. 후자의 경우는 작동 유체가 기체인 경우에는 파열 후의 개구부가 넓으나 유체인 경우에는 작아지게 된다. 따라서 기체에 비해 액체가 흐름 저항이 커지게 된다. 작동 유체가 기체인 제품 중 일부는 부분적인 가스(gas pocket)가 있으면 액체인 경우에도 활용이 가능하다. 이 경우에 파열 후의 개구부가 기체인 경우와 유사하게 된다.

파열판은 설치 방법에 따라 기계적인 체결과 용접 방법이 있다. 설치 방법은 상용품의 경우 제조사가 제시하는 방법을 사용하면 되나 상용품이 아닌 경우에 용접을 할 경우에는 용접에 의한 열변형으로 파열판에 응력이 생기지 않게 유의하여야 한다. 이러한 방법으로 컵 형태로 용접하는 방법이 있다.

운영비는 최소 표기압에 대한 최대 운용압의 비율로 피로 파괴에 의한 조기 파열을 방지하기 위한 목적으로 만들어졌다. 파열판은 운용전의 저장, 조작 및 운송 과정에서도 파열이 없어야 하며 이러한 요구 조건은 운영비와 관련이 깊다. 대부분 돔 형태의 상용품은 약 80~90 %의 운영비를 가지며 돔 형태가 아닌 평평한 파열판의 경우는 상대적으로 낮아 자연 발화 점화기에 사용할 경우에 운용 전의 환경에 따라 신뢰성이

떨어질 수 있다.

3.3 ASME 표준

파열판은 매우 오래전부터 개발되어 관련된 표준이 많이 있으며 이중에서 대표적으로 ASME, API, Crane 표준 등이 있다. ASME 규격으로는 모두 8 부분이 있다[7]. 이 표준에서는 제작업체는 표기 파열압을 제시하도록 하며 재질의 불확실성을 나타내는 파열 공차가 $\pm 5\%$ 안 (표기 파열압이 2.76 barg 이상인 경우) 에 있도록 한다.

이 표준에서는 파열판의 크기 선정을 위해 배출 계수 방법 (coefficient of discharge method), 조합 용량 방법 (combination capacity method) 과 흐름 저항 방법 (resistance to flow method) 을 제시한다. 이 방법들은 압력 경감을 위한 배출 성능을 계산하여 파열판의 크기가 적합한지 판단한다. 첫 번째 방법은 4가지의 조건을 만족하는 상황에서 제작사에서 제공하는 최소 순수 유동 면적 (Minimum Net Flow Area, MNFA) 을 이용한다. 두 번째 방법은 압력 경감 밸브와 파열판이 함께 사용될 경우에 적용된다. 세 번째 방법은 파열판을 하나의 부품으로 보고, 인증 시험에서 얻어진 흐름 저항을 이용한다.

3.4 상용 헤드

파열판 국내 제작 업체로는 FDC 등, ASME 인증을 받은 해외 유명 상용 업체로는 BS&B, Continental, Fike, Oseco 등이 있다.

파열판을 구속하고 기밀을 유지하는 홀더 (holder) 혹은 헤드 (head)의 상용품은 Fig. 4와 같이 삽입 형태, 볼트 체결 형태, 나사 형태, 유니온 형태 등이 있다. 각 형태의 헤드에 적용할 수 있는 파열판은 형태에 제한이 있다.

Fig. 4(a)의 가장 기본적인 널리 이용되는 삽입 형태의 헤드로 표준 플랜지 사이에 끼워진다. Fig. 4(b)의 볼트 체결 형태도 표준 플랜지와 호환이 된다. Fig. 4(c)와 같은 나사 형태는 소형 시스템에 적용 가능하며 입/출구부가 나사산으로, 그 사이에는 링이 삽입되어 금속 대 금속 기

밀면이 형성한다. 이를 자연 발화 점화기에 적용하면 앞서 언급한 MC-1 엔진처럼 비교적 용이하게 점화기를 제작할 수 있고 사용 후에 파열판만을 교체하여 재사용이 가능하다.

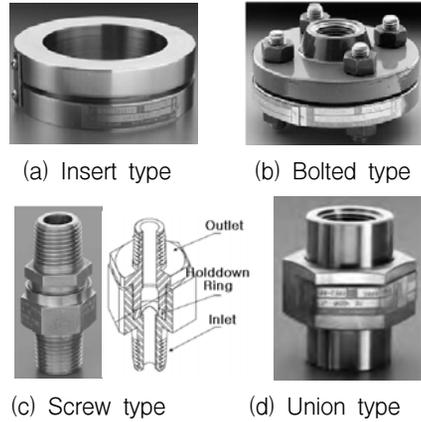


Fig. 4. Commercial Rupture Disc Head [4]

4. 파열판 구조 해석 및 시험 동향

최근 유한 요소 해석의 기술의 발전과 더불어 구조 해석이 비교적 용이해졌으며 이에 따라 파열압 예측을 위한 구조 해석 및 시험에 관한 여러 연구가 수행되었다.

Jones와 Holliday [6]는 평평한 파열판에 대하여 유한 요소 해석을 수행하고 파열압 시험값과 비교하였다. 여러 해석 방법 중에 대변형이 포함된 탄소성 해석이 가장 시험값에 근접하였으며 해석의 정확도는 주로 재료의 응력-변형률 선도에 의존하는 것으로 나타났다.

한혁섭 등[7]은 316L 복합형 파열판에 대하여 유한 요소 해석을 수행하고 파열압 시험값과 비교하였다. 여기서 Johnson-Cook 탄소성 모델과 Ductile failure 모델을 사용하였으며 외제적 해석으로 파열 후의 형상까지 나타내었다. 또한 이후[8]에 인장형 파열판에 대한 유한 요소 해석을 수행하여 시험값과 비교하였다. 여기서 파열압의 해석-시험간 일치를 위해 시험으로 얻어진 진응

력-진변형을 선도를 수정하여 해석-시험간 결과가 5%이내에서 일치함을 보였다.

Murty와 Rao [9]는 니켈 재질의 평판 파열판에 대하여 구조 해석을 수행하여 시험 결과와 비교하였다. 재질 및 기하 비선형성이 고려되었으며 셸 요소를 이용하였다. 해석 결과, 파열압은 시험 결과와 유사하였으나 중심점에서의 최대 변위는 두 해석 결과 간에 오차가 큰 것을 확인하였다.

유한 요소 해석 이외에 시험 보정 상수를 포함하는 간단한 형태의 반 시험식(semi-empirical solution)을 이용하는 방법들도 있다 [10].

그리고 스코어가 있는 평평한 파열판과 관련된 시험 연구도 수행된 바가 있다[11]. 여기서 파열판의 두께, 스코어 깊이와 모양, 압력 상승 속도 변화 등에 따른 파열압과 파열후의 파열반경에 대한 시험을 수행하였다. 최종 개발된 파열판은 설계 파열압의 $\pm 10\%$ 내에서 파열되었다.

5. 결론

자연 발화 점화기와 파열판에 관한 문헌조사를 통하여 아래와 같은 주요 기술 사항들을 얻었다.

- MC-1 엔진에 사용된 자연 발화 점화기는 재사용이 용이하다. 자연 발화 점화제와 연료가 섞이지 않기 위한 별도의 피스톤이 있으며 파열판은 스코어가 있는 인장형 돔 형태가 사용되었다.
- RD-170 엔진에 사용된 자연 발화 점화기는 제작 및 재사용이 어렵다.
- 파열압 : 조사된 경우에 한하여 NASA 자연 발화 점화기의 파열압은 14~35 barg 이다.
- 형태 : 인장 솔리드 형태의 파열판은 파열 후에 조각이 발생하고, 역좌굴 방사 스코어 형태의 파열판은 작동 유체가 기체인 경우만 가능하여 자연 발화 점화기의 적용이 어렵다.

참 고 문 헌

1. Liquid Rocket Pressure Regulators, Relief Valves, Check Valves, Burst Disks, and Explosive Valves, NASA SP-8080, 1973.
2. US Patent. US 6,497,091 B1, Hypergolic Ignitor Assembly, 2002.
3. US Patent. US 6,324,832 B1, Ampoule with starting fuel for igniting LRE propellant components, 2001.
4. www.contdisc.com
5. www.oseco.com
6. Jones, D. P. and Holliday, J. E., "Elastic-Plastic Analysis of the PVRC Burst Disk Tests with Comparison to the ASME Code Primary Stress Limits," ASME PVPC Conference, MA, 1999.
7. 한혁섭, 조원만, 이원복, 구송희, 이방업, "펠스 분리 장치의 이중 슬릿형 파열판 매개변수 연구," 한국추진공학회지, 제14권, 제5호, 2010, pp.101-110.
8. 한혁섭, 이원복, 구송희, 이방업, "탄소성 해석을 이용한 파열판의 파열예측", 한국추진공학회 추계학술대회, 2011.
9. Murty, D. V. R. and Rao, Y. R. "Computer Simulation of Rupture Disc Design", PVP2006-ICPVT-11-94060.
10. Lake, G. F. and Inglis, N. P., "The Design and Manufacture of Bursting Disks", Proc. Inst. Mech. Engrs, Vol. 142, pp. 365~378.
11. 박호준, 홍문근, 이수용, "파이로스타터용 립쳐디스크 개발", 한국추진공학회 춘계학술대회, 2009.