

화약작동식 밸브에 관한 연구

강원규* · 최영기**

The Study on Pyrovalve

Wonkyu Kang* · YoungGi Choi**

ABSTRACT

In this study, we described the Pyrovalve used in the propulsion system. It is very important to ensure its reliability of operation because Pyrovalve is a pyrotechnic device for controlling fuel and air line of propulsion system. so we focused on improving operational reliability through several analyses and tests.

초 록

본 논문에서는 화약작동식 밸브 개발에 관해 전반적으로 설명하였다. 화약작동식 밸브는 추진기관의 연료와 공기를 조절하는 파이로장치이므로 신뢰도를 확보하는게 무엇보다도 중요하다. 그러므로, 해석과 성능시험을 통해 작동 신뢰도를 증가시키는데 역점을 두었다.

Key Words: Pyrovalve, Pyrotechnic Device(파이로장치), Propulsion System, FEM(유한요소), Reliability

1. 서 론

군수분야 및 우주항공 분야는 극한 환경조건에서의 운용이 필수적이므로 적용 구성품의 성능 달성을 위한 설계 고려사항은 상상을 초월한다고 볼 수 있다. 특히 외계로 발사된 무인 우주선의 경우 자세제어를 위한 하이드라진 등의 폭발성이 강한 연료를 사용하는 소형 추력기를 우주선의 외부에 각 방향으로 설치하여 각 방향으

로의 미세한 제어를 수행하게 된다. 이러한 추력기는 위험한 작동유체를 연료로 사용하여 추력을 얻는 일종의 가스발생기로서 지상에서 발사하여 자세가 필요한 시점까지는 전혀 누설이 없어야하는 평상시에는 닫혀있는 정상 닫힘형 밸브가 필요하게 된다. 우주선이 예정된 위치에 도달하여 자세제어에 필요한 추력기의 작동이 필요한 경우 주 연료 탱크에 보관된 연료/산화제의 유로를 열기 위해서는 작동명령에 따라 신속하게 구동되는 밸브가 필요하게 된다. 또한 이러한 우주선에는 장착공간의 협소 등으로 작동에 필요한 에너지원으로 사용할 장치로 선택 가능한 것은 화약을 이용한 소형의 압력카트리지가

* 한화 종합연구소

** 국방기술품질원

연락처, E-mail: wkkang@hanwha.co.kr

최적이라고 판단된다. 이와같이 화약장치를 이용한 밸브를 화약작동식 밸브라 하며 우주 항공분야 및 군사용 미사일의 연료 및 공기라인의 개폐에 사용되고 있다. 이에 본 연구에서는 설계, 구조해석, 작동 성능시험을 통해 화약작동식 밸브의 신뢰도를 증가시키는 사항을 중점 검토하였다.

2 설 계

화약작동식 밸브는 Fig. 1에서 보는바와 같이 압력카트리지에 전기적 신호가 인가되어 기폭되고 고압의 가스가 발생하여 피스톤이 하강하면서 그 기능을 수행하게 된다. 밸브의 고유기능인 유로의 개폐는 화약장치인 압력카트리지를 사용하기 때문에 몸체내의 높은 압력에 견딜 수 있는 기밀성과 구조적 설계 여유율 확보 등에 대한 검토가 요구된다.

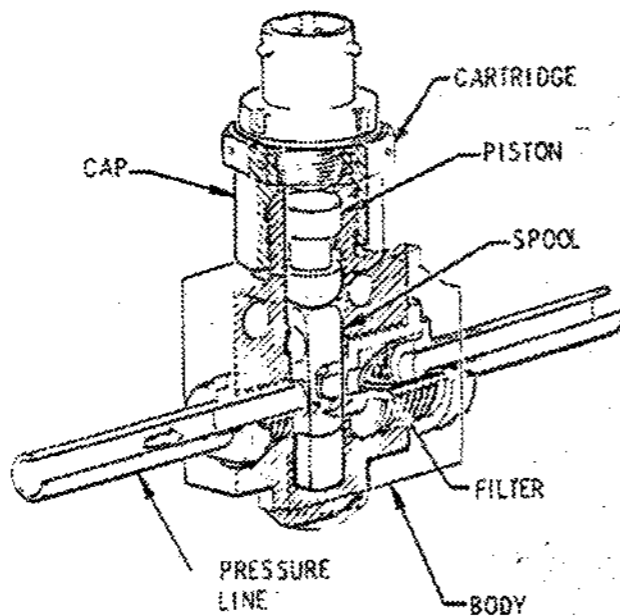


Fig. 1 Operational mechanism of Pyrovalve

21 몸체 설계

화약작동식 밸브의 몸체는 작동유체 및 고압의 압력카트리지 가스에 대한 기밀을 유지해야 한다. 그러므로, 피스톤의 하강으로 인해 니플이 파단되고 피스톤이 몸체내부에 고정되도록 테이퍼를 두었다.

22 피스톤 설계

피스톤은 화약작동식 밸브 핵심부품중의 하나로 연소실에 형성된 고온 고압의 연소가스에 의한 니플의 파단하중을 전달하기 위한 강도를 갖

고 있어야 하며 압력카트리지의 작동에 의한 압력에 대하여 실린더 벽면과의 완벽한 기밀유지가 필수적이다. 이를 위하여 피스톤의 움직임은 고려하여 오링의 파손을 최대한 예방하고 기밀을 유지하도록 설계하였다. 또한, 피스톤은 구조적 강성을 유지하여야 하므로 고강도의 니플과 유사한 강도 및 경도를 갖도록 설계하였다.

23 니플 설계

니플 재질의 선정은 파단시 파편발생 여부 및 충격하중에 의한 적정의 파단하중의 결정, 반응성을 고려하여야 하며 압력카트리지의 순간적인 압력상승에 의하여 발생한 하중에 의하여 신속하게 절단되도록 피스톤에 의한 파단 부위에 응력집중을 고려한 적절한 노치를 설계하였다.

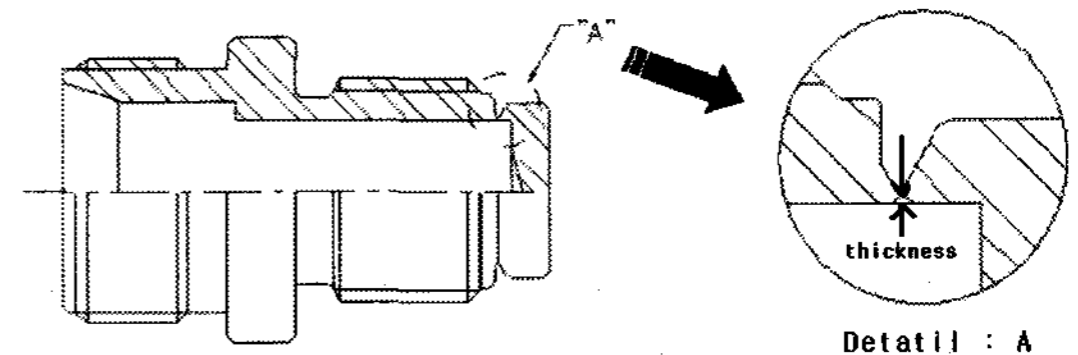


Fig. 2 Scheme of Nipple

니플의 파단부위는 노치에 의한 응력집중 효과가 크고 화약의 폭발에 의한 압력카트리지의 압력형성은 수 msec 범위 내에서 이루어지므로 일반적으로 수행되는 재료의 인장시험으로는 파손강도를 측정하기 어렵다. 그래서 파괴거동 프로그램인 AutoDyn 2D를 이용하여 니플에 대한 파단현상을 예측하였고, 이를 기반으로 파괴 성능시험을 수행하였다.

3. 구조해석

화약작동식 밸브 구성품중 니플의 유로개폐가 가장 중요한 요인이므로 이에 대한 검증이 요구되어 본 연구에서는 초기 작동유체 압력에 의한 정적해석과 압력카트리지 작동에 의한 니플 파괴거동 해석을 수행하였다.

3.1 정적 구조해석

니플의 유로 개폐에 있어 가장 중요한 설계인자는 니플 두께 결정이다. 니플두께는 응력해석 식과 각종 자료 해석, 시험을 통해 최적의 두께를 결정하였다.

작동유체의 압력에 의한 니플의 정적해석에서 실제 압력은 100psig내외이나 설계요구 압력인 1000psig를 적용하여 수행하였다.

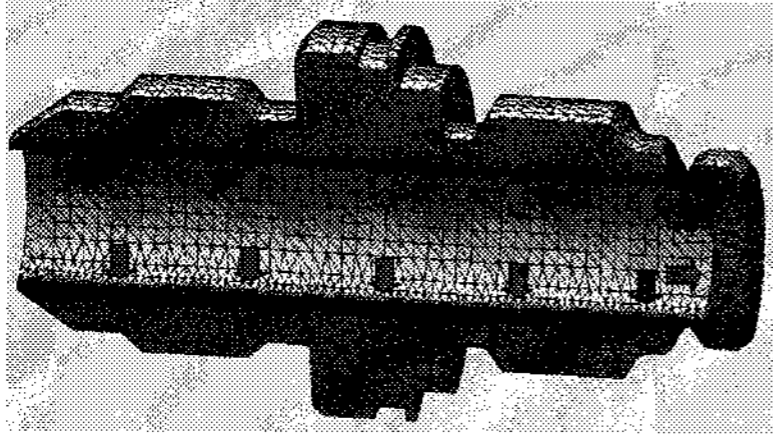


Fig. 3 Analysis model of Nipple

적용재질은 HRc 45로 열처리된 17-4PH을 사용하였다.

Table 1. Property of 17-4PH(H900)

재질	E (GPa)	ν	ρ (kg/m ³)	yield str. (GPa)
17-4PH (H900)	196.5	0.27	7,805	1.31

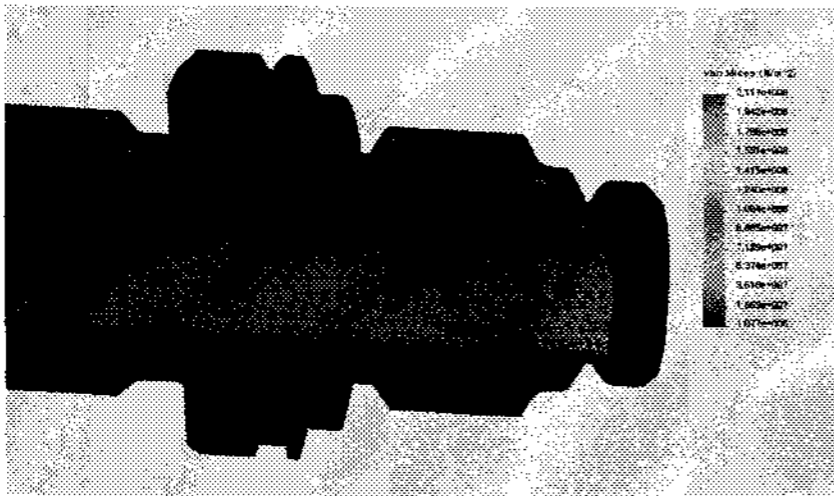


Fig. 4 Static analysis result of Nipple

정적해석 수행 결과 설계요구 압력 1000psig을 적용한 경우 vonmises Stress가 17-4ph의 항복응력에 비해 20%수준인 것으로 해석되어 니플의 안전율을 확보하였다.

3.2 파괴거동 해석

파괴거동 해석은 Autoyn 6.1 2D를 사용하였고, 압력카트리지에서 발생하는 압력에 의한 니플의 파단여부를 판단하기 위해 Fig. 5와 같이 구성하였다.

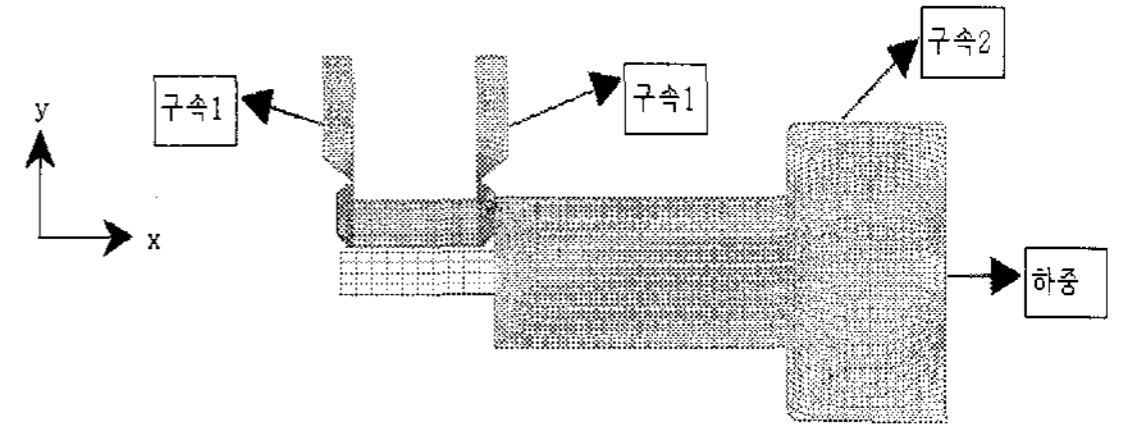


Fig. 5 Analysis model for nipple failure

적용하중은 착화기에서 생성되는 고압이 10cc에서 800±200psi로 측정되므로 본 해석에서는 화약작동식 밸브의 초기부피가 약 1cc인 점을 감안하여 압력이 선형적으로 감소한다고 가정하고 마찰 등에 의한 에너지 손실을 고려하여 6000psi (4.1369 X 10⁴kpa) 최대압력을 적용하였다. 최대압력 도달시간은 압력카트리지가 대략 3msec~4msec이므로 본 해석에서는 4msec을 적용하였다. 하중 시나리오는 AutoDyn에서 제공하는 (triangular) stress를 적용하였다.

강성모델은 변형률과 변형률 속도가 클 때에 주로 사용되는 Johnson-Cook 모델을 사용하였고, 파손모델은 최대 주응력을 기준으로 하였다. 이 기준은 해석에서 계산된 주응력이 일정한 값 (파손응력)에 도달하면 파손이 발생한다는 것으로 파손이 발생한 요소는 더 이상의 인장응력을 지탱할 수 없으며 단지 압축응력만을 지탱한다.

금속재료의 경우 파손응력은 변형률과 변형률 속도가 증가함에 따라 그 값도 증가한다고 알려져 있으므로, 일반적으로 수행되는 재료의 인장 시험에서 취득한 인장강도를 파손강도로 사용하여서는 안되며, 실제의 현상과 유사한 상황의 시험을 통하여 결정하여야 한다. 그러나, 이러한 재료시험은 현실적으로 수행하기가 상당히 어려우므로 본 해석에서는 같은 재질인 폭발볼트 해석시에 사용되었던 물성치를 사용하였다.

Table 2. Property of 17-4PH(H900) for Failure analysis

상수 [단위]	A [KPa]	B [KPa]	n	C	m	TH [K]
17-4PH	1.47e6	4.47	0.18	0.012	1	1763

ρ	Γ	G [KPa]	ν	Erosion Strain
7.86	2.17	2.0	0.272	3

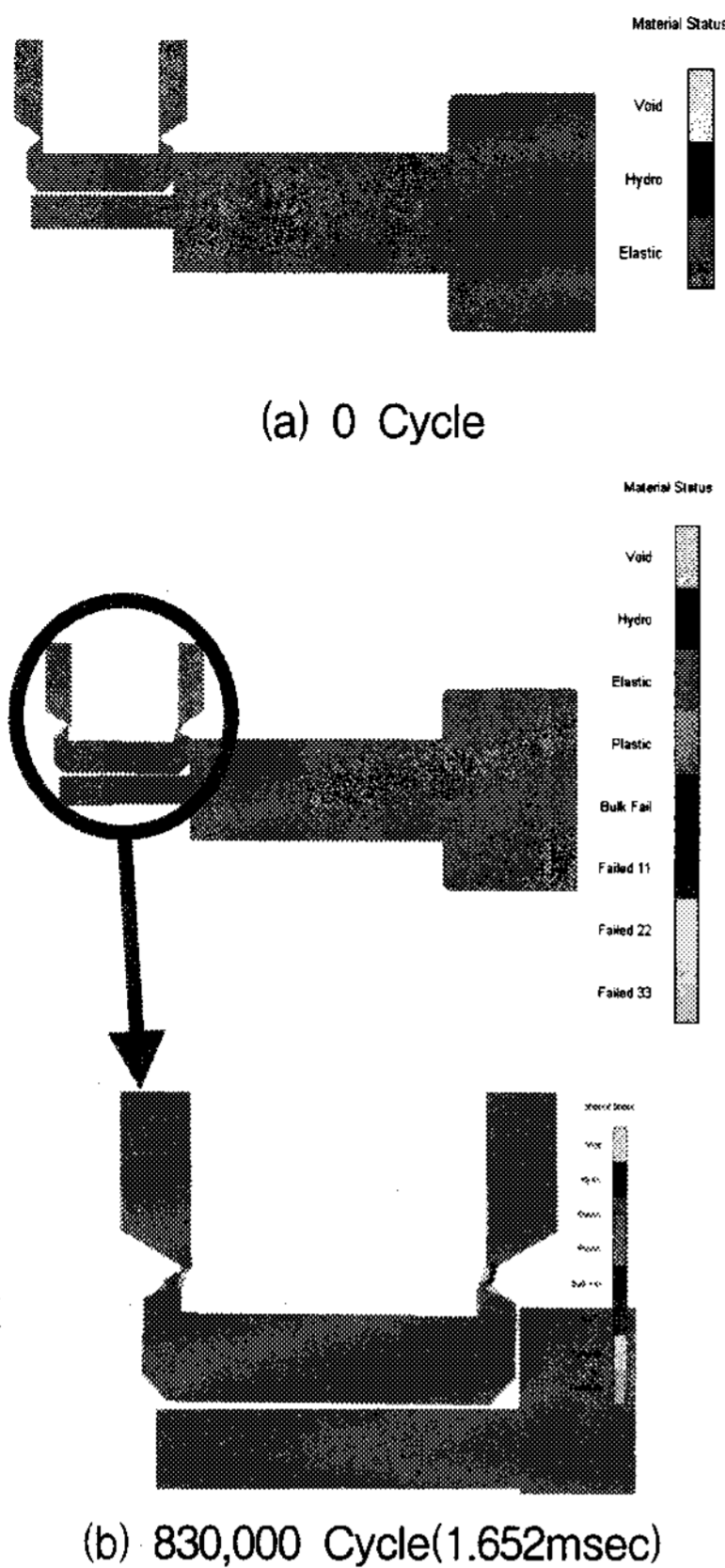


Fig. 6 Failure analysis results of Nipple

해석결과 니플은 1.652msec에서 파단되는 것으로 나타났고, 예상대로 노치부근에서 응력이 집중 발생하였다. 실제 시험에서는 착화기 작동 시간, 피스톤과 몸체 사이의 마찰 등에 의해 파단시간이 지연될 것으로 예상된다.

4. 시 험

화약작동식 밸브에 대해 온습도시험, 진동 및

충격시험, 가속도시험, 고도시험, 염수분무 시험 등과 같은 환경시험을 수행하고 성능시험을 통해 신뢰도를 확보하였다. 화약작동식 밸브에 대한 성능시험을 통해 밀폐성과 니플 파단여부를 중점 관찰하였다.

작동 성능시험 결과 압력카트리지의 기폭으로 피스톤이 하강하면서 니플을 파단시키고 유로가 완벽하게 형성됨을 알 수 있었다. 작동성능시험에는 50조의 화약작동식 밸브가 사용되었고 니플은 100% 파단되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 작동유체에 대한 완벽한 밀폐와 니플 파단이 확실하게 일어나도록 설계를 수행하였고, 정적 구조해석을 통해 작동유체의 압력에 대한 니플의 구조 건전성을 확보하였으며, 파괴거동 해석을 통해 주어진 압력카트리지 생성 압력에 대한 니플파단을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Karl O. Brauer, "Handbook of Pyrotechnics" Chemical Publishing Co.Inc.,1974
2. Joseph D. Kutschka," Pyrotechnically Actuated Mechanism Performance Prediction and Test Correlation", AIAA-2000-3513, 2000
3. 차홍석,장석태,최창선, "통계적 기법에 의한 파이로밸브 신뢰도 분석", 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 2006, pp.913-915
4. 김동진,강원규,"고압을 이용한 분리볼트 설계에 관한 연구", 우주발사체 심포지움, 2005