

금속재와 복합재 이중구조물로 된 압력용기의 설계이론 개발

이방업* · 김원훈* · 구송회* · 손영일*

Development of a design theory of a pressure vessel with combined structure of the metal and the composite

Bang-Eop Lee* · Won-Hoon Kim* · Song-Hoe Koo* · Young-il Son*

ABSTRACT

A theory was developed to design a high pressure vessel with combined structure of the metal and the composite to withstand the pressure of several tens of thousands psias to reduce the weight of the impulse motor which produces high level of thrust within several tens of seconds. The elastic-plastic stress analyses were carried out to prove the validity of the design theory. A combustion chamber of the impulse motor was designed by the design theory, fabricated, and tested by the hydraulic pressure and the static firings. The bursting pressures from the tests were compared to those predicted by the design theory and the stress analyses and found to be almost the same. It will be possible to design the high pressure vessel with combined structure of the metal and the composite very easily by the proposed design theory.

초 록

수십 msec의 단시간에 큰 추력을 발생시키는 임펄스모타의 무게를 가볍게 하기 위하여 금속재와 복합재를 조합하여 수만 psia의 초고압을 지탱하는 압력용기의 설계이론을 개발하였고, 탄소성 구조해석을 통하여 이론식의 타당성을 입증하였다. 임펄스모타의 연소관을 이론식으로 설계하고 제작하여 유압 시험과 지상연소시험을 실시하였다. 실험결과와 파열압력은 설계식과 구조해석 결과로 예측한 값과 유사한 값을 보였다. 본 논문의 설계이론을 통하여 설계단계에서 가볍고도 충분한 안전율을 갖는 고압용기를 간단히 설계할 수 있게 되었다.

Key Words: Finite Element Method(유한요소법), Safety Factor(안전계수), Hydraulic Test(유압시험), Medium Range Surface to Air Missile(중거리 지대공 유도무기), Maximum Expected Operating Pressure (최대작동압력), Impulse Motor(임펄스모타), Pressure Vessel(압력 용기), Side Jet Thrust Engine(측추력기)

* 정회원, 국방과학연구소
연락처, E-mail: llbe130@add.re.kr

최근 선진국에서 개발중인 고기동성의 중거리 지대공유도무기(M-SAM) 체계의 경우 유도탄 발사 후 초기방향 전환에 의한 급선회 능력 요구와 더불어 표적에 근접한 상태에서의 종말유도조종 단계에서 유도탄에 측방향 추력을 제공하는 측추력기(SJTE) 기술⁽¹⁾이 필수적인 기술로 부각되고 있다.

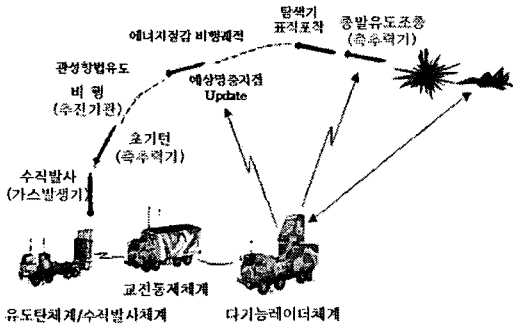


Fig. 1 Operation concept of the SJTE

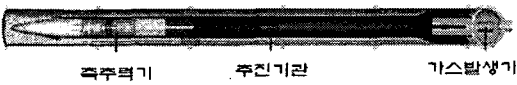


Fig. 2 Configuration of the M-SAM

중거리지대공 유도무기는 전투기나 탄도미사일 등 고속의 표적을 격추하는 유도탄으로서, 고기동성이 생명이므로 초고압을 지탱하며 무게를 최소화하는 구조체 기술의 개발이 필요하게 되었다.

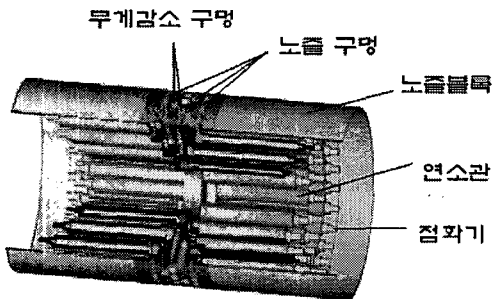


Fig. 3 Configuration of the SJTE

본 논문의 측추력기에는 하나의 노즐블록에 고압 압력용기인 연소관이 Fig. 3과 같이 측방향으로 86개 체결된 형상을 갖고 있다. 연소관을 측방향으로 체결해야 하므로 연소관의 외경을 가능하면 작게 설계해야 한다⁽²⁾.

Steel과 알루미늄 등 여러 가지 소재로 연소관을 설계하여 비교한 결과 금속재의 소성을 허용하고 복합재의 기능을 최대한 활용한 이중재료 압력용기의 개발이 가장 유리하다고 판단되었다.

2. 이론적 배경

2.1 이론식 전개

이론식의 가정 사항은 아래와 같다.

- 티타늄 금속재는 탄소성 거동을 한다.
- 측방향 응력은 금속재가 담당하며 측방향변형율은 변하지 않는다.
- 원주방향 응력은 금속재와 복합재가 함께 담당하며 경계면은 함께 거동한다.
- 두께 내에서의 응력은 일정하다.

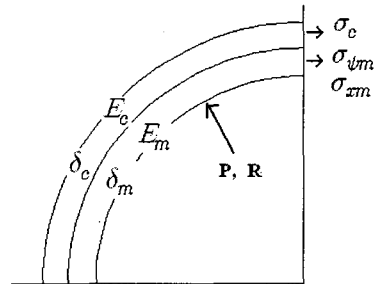


Fig. 4 Nomenclature of the pressure vessel

원주방향 평형방정식은 Eq. 1과 같다.

$$\sigma_{\psi m} \cdot \delta_m + \sigma_c \cdot \delta_c = P \cdot R \quad (1)$$

응력과 변형율의 관계는 Eq. 2와 같다.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{xm} \\ \epsilon_{\psi m} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E_m} \begin{bmatrix} 1 & -\nu \\ -\nu & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xm} \\ \sigma_{\psi m} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

복합재의 원주방향 변형율은 Eq. 3과 같다.

$$\epsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_c} \quad (3)$$

금속재와 복합재의 경계면에서는 Eq. 4와 같이 원주방향 변형율이 같다.

$$\epsilon_{\psi m} = \epsilon_c \quad r = R + \delta_m \quad (4)$$

강도 설계조건은 Eq. 5와 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_c &\leq \sigma_{BC} \\ \sigma_i &\leq \sigma_{BM} \\ \sigma_i &\leq \sigma_{02} \end{aligned} \quad (5)$$

22 이론식의 프로그래밍

프로그램은 Borland C++ s/w⁽³⁾의 C-언어로 작성하였다. 설계압력은 최대압력에 안전계수(SF)를 적용하고, 금속재 두께는 축방향응력이 항복강도 정도 되도록 Eq. 6과 같이 설정한다.

$$\delta_m = \frac{SF \cdot PR}{2\sigma_{02}} \quad (6)$$

금속재의 원주방향응력을 Eq. 7과 같이 축방향응력으로 표현하고 Eq. 1~4에 대입하면 매개상수 B를 Eq. 8과 같이 정리할 수 있다.

$$\sigma_{\psi m} = B \cdot \sigma_{xm} \quad (7)$$

$$B = \left(2 + \nu \frac{\delta_c E_c}{\delta_m E_m}\right) / \left(1 + \frac{\delta_c E_c}{\delta_m E_m}\right) \quad (8)$$

금속재의 등가응력과 등가변형율을 Eq. 9~11로 계산하며 물리적 개념은 Fig. 5와 같다.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{xm}^2 - \sigma_{xm} \sigma_{\psi m} + \sigma_{\psi m}^2} \quad (9)$$

$$e_i = \sigma_{eq} / E_m \quad (10)$$

$$\sigma_i = \sigma_{02} + E_{m1}(e_i - e_{02}) \quad (11)$$

금속재의 계산된 등가응력과 실제 등가응력을 비교하여 에러범위에 들면 계산을 종료한다.

$$(\sigma_{eq} - \sigma_i) < error \quad (12)$$

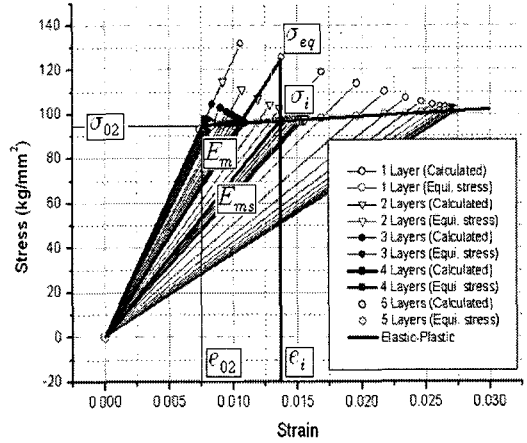


Fig. 5 Stress vs. strain for design procedure

금속재의 등가응력 차이가 에러범위를 벗어나면 탄성계수와 포아송비를 Eq. 13~14와 같이 최신회한다.

$$E_{ms} = \sigma_i / e_i \quad (13)$$

$$\nu = (1 - \frac{E_{ms}}{E_m}(1 - 2\nu_0)) / 2 \quad (14)$$

Equation 14의 포아송비는 축방향 변형율이 항상 같다는 가정으로부터 유도할 수 있다.

$$\epsilon_{xm} = \frac{\sigma_{xm} - \nu \sigma_{\psi m}}{E_m} \quad (15)$$

$$= \frac{PR}{2\delta_m E_m}(1 - 2\nu) = \frac{PR}{2\delta_{m0} E_{m0}}(1 - 2\nu_0)$$

복합재를 한 층씩 추가 와인딩하며 금속재의 등가응력을 계산하여 Eq. 12와 Eq. 16의 판별식으로 계산의 종결여부를 결정한다.

$$(\sigma_i - \sigma_{02}) < error \quad (16)$$

23 설계 결과

설계압력에서 금속재 두께는 축방향응력을 지탱하도록 Eq. 17과 같이 1mm로 설계한다.

$$\delta_m = \frac{SF \cdot PR}{2\sigma_{02}} = 0.98 \quad (17)$$

Figure 5에서 보는 바와 같이 복합재를 5층 와 인딩할 때 탄성범위가 되며 복합재의 두께는 1.0mm가 된다. 축추력기 연소관의 경우는 수십 msec의 아주 짧은 시간동안 작동하므로 금속재에 소성변형을 허용하여 복합재를 0.6mm로 설계한다.

Table 1 Design results at the design pressure

층수	부품		T800 복합재		비 고
	티타늄 등가 응력	금속재 안전 여유	Hoop 응력	안전 여유	
3층 (0.6mm)	96.1	0.14	143.9	0.84	소성역
5층 (1 mm)	92.9	0.18	92.4	1.87	탄성역

설계된 두께에서의 구조해석 결과, 구조해석시 응력집중에 의해 소성역에 일찍 도달하게 되며 파열압력은 Fig. 6과 같이 유사하게 예측되었다.

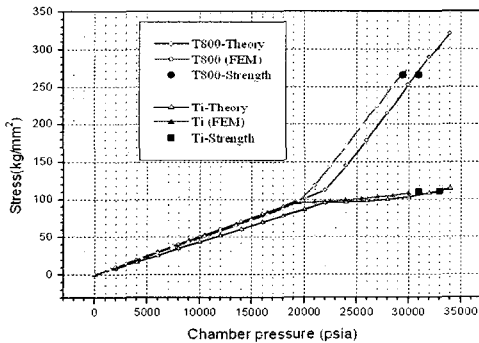


Fig. 6 Stress vs. chamber pressure

3. 구조해석과 구조시험 및 지상연소시험

3.1 구조해석

구조해석시의 FEM 해석코드는 ABAQUS s/w⁽⁴⁾의 탄소성 응력해석 모듈을 사용하였으며, 결과분석은 MSC PATRAN s/w⁽⁵⁾를 사용하였다.

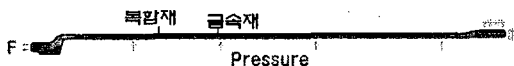


Fig. 7 FEM model of the chamber

3.2 구조시험

5만 psia 까지 가압할 수 있는 유압시험 장비로 구조시험을 실시하여 설계이론 및 지상연소 시험결과와 비교한 Fig. 7을 보면, 구조시험에서의 변형율이 설계이론 보다 낮은 값을 보이는데, 이는 계산시 사용된 재료물성의 차이와 복합재가 약간 두껍게 제작되었기 때문으로 판단된다.

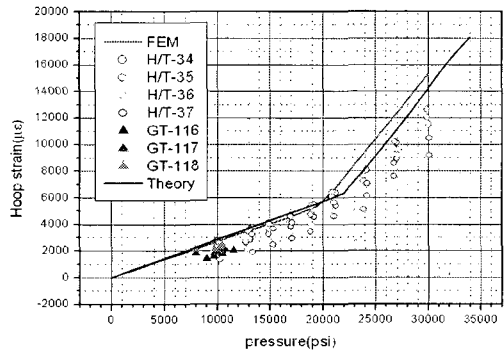


Fig. 7 Hoop strains of the composite at the center of the chamber

파열된 연소관 형상은 Fig. 8과 같고 파열압력은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Predicted and measured bursting pressure

예측방법	파열부위	금속재	복합재
설계이론식		33,000	31,000
구조해석		31,000	29,000
구조시험		31,474 - 32,157	
지상연소시험		32,500 - 36,000	



Fig. 8 Bursted chamber at the hydraulic test

3.3 지상연소시험

Figure 9와 같이 연소관에 추진제를 충전하고 노즐치구를 장착하여 Fig. 10과 같이 지상연소시험^(6,7)을 실시하였다.

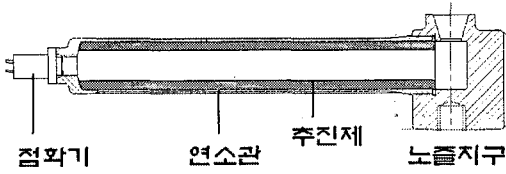


Fig. 9 Configuration of the impulse motor

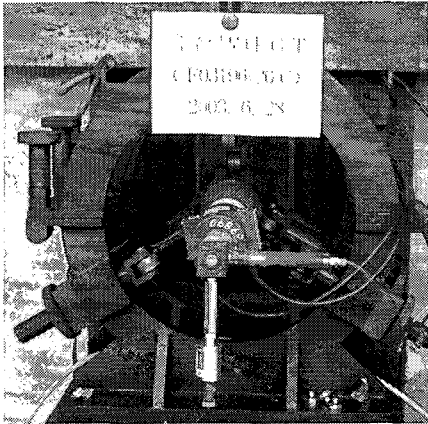


Fig. 10 Impulse motor for firing test

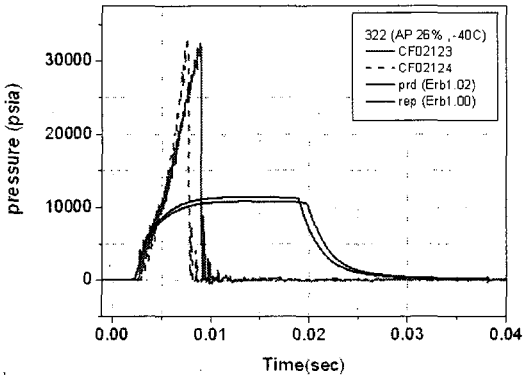


Fig. 11 Pressure curve of the impulse motor bursted during firing test

Figure 11의 압력선도에서 측정된 파열압력이 Table 2에 나타난 설계이론과 구조해석 및 구조 시험 결과들과 유사한 값들을 보여 설계이론의 타당성을 입증하고 있다.

4. 결 론

금속재와 복합재의 이중재료를 적용하여 가볍고도 구조적으로 안전한 압력 용기의 설계이론을 개발하였으며, 탄소성 구조해석과 구조시험 및 지상연소시험을 통해 설계이론의 타당성을 입증하였다.

참고 문헌

1. 박상현, 기무현, 김성익, 천명석, "중거리지대 공유도무기 체계 개념 설계(2)," 국방과학연구소 기술보고서, 1999.9, pp.112-127
2. 손영일, 구송희, 김원훈, "M-SAM 추추력 구조체 개발," 국방과학연구소 기술보고서, 2005.10
3. Borland C++ V4.5, Borland International Inc., 1994
4. ABAQUS v.6.5.4, HKS, 2005
5. MSC PATRAN v.2.03, 2005
6. 이방업, 김원훈, 손영일, 구송희 외 8인, "M-SAM 추추력모타 63~68차 지상연소시험," 국방과학연구소 기술보고서, 2003.4
7. 이방업, 김원훈, 손영일 외 10인, "M-SAM 추추력모타 119~134차 지상연소시험 및 추추력기의 1차 진자시험 보고서," 국방과학연구소 보고서, 2003.11