

# 복합재 연소관 적용에 따른 추진제 구조안정성 연구

최용규, 정규동, 김종근(국방과학연구소)

## 요 약

추진기관 적용에 따른 복합재연소관의 일반적 사항들을 논하였다. 추진기관의 효율에 주요인자인 경량화에 있어서 복합재 연소관의 무게가 철금속 연소관에 비해 약 50%의 감소효과가 있으며 단가의 측면에서도 부가가치가 있는 것으로 평가된다. 그러나 추진기관 체계적(추진제 공정 및 구조안정성) 관점에서 추진제 내면변형률(Inner Bore Strain)의 증가, 제작공차, 공정의 재현성, EPDM의 접착기밀성 및 외부습도 유입 문제 등의 앞으로 해결되어야 할 사항들이 제시되었다.

## 1. 서 론

1948년도에 미국, Hercules사에서 X248고체 추진기관의 노즐확대면에 Fiberglass를 사용한 Filament Winding을 최초로 적용한 이래로, 실제 연소관적용은 1955년 Hercules의 MATADOR 연소관에 적용되었으나 실용화는 되지못하였다. 실용화는 60년대초부터 시작된 TITAN Booster, MINUTEMENII 1st & 2nd, POLARIS 1st & 2nd 등의 Small ICBM급을 시작으로 REDEYE, SPRINT 등의 소형에 까지 확대되었다. 70년대에 들어서 KEVLAR의 개발로 일대 전기점이 되어 실질적으로 복합재 연소관을 적용한 추진기관 개발과 기존의 금속연소관을 대체하는 사업이 진행되어 왔다.

80년대에는 재료와 공정, 그리고 전용장비의 개발로 항공기나 자동차산업에 까지 사용용도를 창출하여 복합소재의 영향력을 확대시켜 오고 있다. 90년대의 세계정세 변화로 방위산업분야에는 축소일로에 있는것은 사실이나 MINUTEMAN Re-Motoring, PEACE-KEEPERS, TRIDENT II 등과 같은 전략적 방어목적의 복합재 연소관 적용사업은 계속되고 있는 것으로 보고되고 있다[1]. 이와 같이 복합재 연소관이 대형추진기관에 주로 적용되어 오고 있는 것은 경량화, 공정의 간편성, 대형소량에 대한 경제성, 무한한 가능성등의 장점에서 비롯되었다. 그러나 현재 미국의 기술수준에 까지는는 수많은 시행착오와 시험, 그리고 검증의 결과로서 시간적, 경제적 투자의 산물로 평가된다.

본 연구에서는 20여년간의 추진기관 개발경험을 바탕으로 추진기관 체계와 추진제 구조적 안정성 관점에서 복합재 연소관 사용시 고려되어야 할 사항에 대하여 논하고자 한다.

## 2. 연소관으로서의 복합재 압력용기

이질재료로 접착구성된 고체추진기관은 수명만료될 때까지 일/년교차에 의한 반복된 온도하중, 운반 취급시 발생하는 진동과 충격하중, 저장환경 대기의 습도와 오존로부터 노화영향, 그리고 최종적으로 발사시 발생하는 압력하중을 겪게된다. 따라서 추진기관 개발은 상기의 예상하중을 충분히 고려하여 주어진 요구 수명기간 동안 안전율을 유지하도록 설계와 소재선택, 그리고 시험평가하는 일련의 연구과정이다. 이를 위하여 소요기술 확보 뿐만 아니라 체계 적합성, 경제성, 제작기간, 신뢰성 등의 전반적인 비교검토(Trade-Off Study)가 수행되어야 한다[2].

연소관의 궁극적 목적은 추진기관의 에너지원인 추진제를 충전하여 고온고압의 화학반응을 유지토록하는 연소실을 제공하는것으로서 체계적 관점에서 무게경량화된 고압용기가 요구된다. 무게경량화는 체계적합성에 부합되므로 복합소재의 가장 큰 장점이나 추진제를 충전해야 한다는 관점에서 추진제와 관련된 여러요인을 동시에 해결하여야만 고압용기를 추진기관으로 사용할 수 있을 것이다.

이와 관련된 사항들을 발생가능 요인별로 구분하고 작용하중에 따른 영향과 파급효과를 금속재 연소관에 비교하여 언급하면 다음과 같다.

## 2.1 재료 강성과 압력하중

체계적 측면의 경량화를 위하여는 높은강도와 작은 두께가 요구된다. 압력용기로서의 우선적 고려사항은 파괴압력으로서 예상작동 압력(MEOP)에 대한 안전도(Safety Factor, SF)는 재료의 강도(Strength,  $S_t$ )와 압력용기 두께,  $t$ 의 선형적 함수관계( $SF = S_t \cdot t / P \cdot r$ )이며, 압력용기의 변형율은 재료 강성(Stiffness)의 함수로서 모듈러스와 두께의 곱으로 표현되므로 압력용기의 경량화와 변형 최소화를 하기 위하여서는 재료의 강도, 모듈러스(Modulus), 그리고 설계두께 간의 최적화가 되어야 한다.

### 가. 추진제 내면변형율

추진제는 비압축성 재료로 간주되므로 압력하중에 대한 변형율은 연소관 변형율에 직접적으로 영향을 받는다. 따라서 압력하중에 의한 추진제 내부변형율의 안전율은 연소관 재료의 강도, 모듈러스, 설계두께, 그리고 추진제 허용 연신률(Allowable Elongation)간에 최적화가 되어야 한다. 그림 1 과 같은 추진기관 형상에 대하여 추진제 충전률에 대한 추진제와 연소관의 변형률비는 그림 2 와 같다. 여기서 표 1 과 같이 실제 적용된 경우를 고려하면 충전률을 증가시키기 위하여 연소관 변형률을 감소시키는 것이 압력하중의 경우 가장 중요한 요인으로 작용한다.

압력하중의 경우 연소관 변형에 대한 재료 강성으로서의 모듈러스는 추진기관의 형상에 의하여 Hoop 방향 모듈러스가 주된 인자이며 그림 2 에서와 같이 포와송 비는 그 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 연소관 Hoop 방향 모듈러스를 작용압력에 대하여 무차원화시킨 변수에 따른 추진제 내면의 최대 변형률을 표 1 과 같은 각 경우에 대하여 연소관 두께를 변화시키면서 나타내면 그림 3 ~ 5 와 같다. 이 그림은 추진기관 예비설계시 매개변수로서 적용될 수 있으며 추진제 최

대 변형률에 영향을 미치는 주된 인자가 연소관 모듈러스와 두께임을 나타내 주고 있다.

### 나. 접착응력

압력하중에 대한 수직 접착응력(Normal Bond Stress)은 대부분 음의 값으로서 비록 접착면에 크랙이 존재하더라도 Crack Closing Mode이므로 큰문제는 발생되지 않을 것으로 판단하고 있다. 그러나 Crack Closing 과정에서 점화초기의 압력상승에 따른 급격한 외부변형은 추진제 내면 변형을 야기 시키므로 원 설계도면대로 접착되어야 할 곳에는 접착되어 있어야 한다. 부분적인 미접착을 활용하여 온도하중을 미세화 시키고자 고안된 장치가 SRL(Stress Release Liner) System이지만, 빈공간에 대한 불안정성 때문에 현재까지 응력집중 부위에만 부분적으로 적용되고 있다.

## 2.2 열팽창 계수와 온도하중

고체추진기관은 이질재료로 접착구성되므로 각 재료간의 열 팽창계수 차이와 온도 차이(=응력자유온도- 저장온도)에 따라 열응력이 발생한다. 복합재료의 열팽창계수는 Filament Winding 각도와 섬유함유량에 따라 변화 가능하지만, 일반적으로 구조적 최적화 후의 고려사항이므로 기존제품에 근거하여 비교하면 표 2 와 같다.

### 가. 추진제 내면변형율

추진기관에서 추진제충전률은 체적비로 80 ~ 95% 정도 범위에 있으므로 추진제의 열팽창계수와 비슷하거나 저장성일수록 추진제에 발생하는 열하중은 작다. 표 2 와 같이 추진제와 약 10배 정도 차이나는 연소관의 열팽창계수는 고압용기의 불가피한 고유특성이므로 추진제의 물성을 증가시키거나 응력집중부위를 둔화시키는 설계로 해결하여야만 한다.

### 나. 접착응력

라이너나 EPDM의 경우 저장성/소량이면서 추진제와 열팽창계수가 비슷하므로 열하중에 의한 추진제 내면변형을 영향은 거의 무시되며, 다만 상대적으로 고강성을 갖는 연소관

내면에 접착되어 있는 추진제-라이너-EPDM-연소관 간의 고유접착강도에 안전도 여부가 종속된다. 추진제에 발생하는 접착응력은 추진제의 양 끝단에서 최대가 된다. 추진제 끝단은 접착된 이질재료간의 연속체 역학적 Displacement Compatibility 조건을 만족시키기 위해 구조해석적으로 특이해(Singularity)가 발생하는 구간으로서, 이를 제거하기 위하여 설계적으로 추진제 끝단형상을 변화시키거나 응력이완장치(Stress Relief Flap or Boot with Stress Relief Bulb)를 고안하여 해결하고 있다. 접착은 3차원상에서는 면적, 2차원상에서는 선이므로, 만약 부분 미접착이 발생하면 크랙으로 간주되며 온도하중에 의한 전파유무는 접착강도와 라이너나 EPDM의 모듈러스에 종속된다.

### 2.3 추진제 변형율/응력을 줄이는 방안

추진제 그래인에 발생하는 변형율/응력을 최소화하는 방안에는 1)추진기관 설계에 이미 적용되고 있는 응력이완 장치, 2)추진제 충전 후 고형화(Curing)공정에서 압력을 부가, 3)Precured 나 Cured 상태의 추진제 위에 라이너-탄성내열재를 부착하고 Filament Winding하는 방안 등이 제시 가능하다[3].

항목 2)에서 부가 압력은 연소관의 변형을 유발시켜 열팽창계수 차이에 의해 발생하는 추진제 열수축 상태 만큼을 미리 늘린 상태에서 고형화 시키면 상온에서는 응력 자유상태 (Stress Free Condition)가 될수 있을 뿐만 아니라 압력하중에서도 추진제 내의 응력을 줄일수 있다는 발상에 근거한다. 추진제 충전 과정에서의 함입된 기공이나 중합반응 과정에서 발생하는 개스가 추진제 외부로 나오는 것을 방해하는 역작용은 있으나, 충전후 추진제의 점도가 급격히 증가하므로 기공의 외부 유출은 충전직후 충분한 진공시간을 유지시키면 큰문제가 없을것으로 판단된다. 따라서 압력 부가 고형화공정은 부가적으로 기공합침을 방지하고 기공축소로 미세화된 기공을 얻을 수 있으며 추진제의 밀도증가를 예상할 수 있다.

항목 3)의 기법은 추진제 열응력제거의 최선책이지만 상온에서 Cured Resin/Fiber의 고온에서의 기계적 강도 문제, 연소관의 구조적

검증(수압 또는 공압시험)하기가 용이하지 않은 결점이 있다.

### 2.4 기타 고려사항

- EPDM 미접착:

EPDM의 접착을 위하여 다양한 공법(Co-Curing, Precured and Cured)이 개발되고 있다. EPDM 미접착에 의해 발생하는 추진제 구조적 영향으로 1) 온도하중에 의한 열응력은 SRL과 같이 응력이완 효과가 있으나 미접착 끝단 부위의 접착응력이 국부적으로 증가되며, 2) 압력하중에 의한 급격한 변형을 발생시켜 추진제 내면변형율을 증가시킨다.

- 외기와의 호흡:

추진제의 노화속도와 경향은 습기와 오존의 량에 의해 결정된다. 일반적으로 금속 연소관은 대기와의 호흡이 불가능한 재료(Non-Porous Material)로 간주하고 있다. 복합재 연소관에 있어서 외기와의 호흡은 표면 Painting으로 일부 보완 가능하나, 근본적으로 내부 기밀고무가 필수적인 외기호흡 재료이다. 그림 6 은 Minuteman에서 연소관을 통하여 추진제에 유입되는 습도확산(Moisture Diffusion)상태를 나타낸 것이다[4]. Canister 나 Silo 운용개념이 아닌 야전 운용개념에 있어서는 대기습기와 습도 확산율이 추진제 노화에 미치는 영향에 대한 연구가 필수적이다.

- 진직도/진원도:

복합재 연소관은 체결/기밀을 위하여 금속 보스를 양개구(Opening)에 적용하고 있다. 따라서 연소관 제작 이후의 공정은 양 개구에 위치한 금속보스에 기준점을 두고 추진제 충전과 노즐/점화기 조립이 수행된다. 복합재와 금속보스간의 접착부위는 특이해가 존재하는 응력집중 부위로서 수압시험 이후 잔류변형이 발생된다. 복합재 연소관의 역사가 짧은 우리의 현실에서 보스간 거리의 보스가 상당히 떨어져 있는 상황에서 폭 35cm 정도의 두 원에 대한 진직도 공차를 기계가공으로 제작되는 일체형의 금속연소관 수준의 공차를 기대할 수 없으나 다양한 공법과 Mendrel 개발로 공차최소화를 요구된다.

- 연소관 내부 체적제어:

복합재연소관은 외면과 내면의 거친표면으로 측정길이가 불균일하고 총 연소관 길이도 Mandrell 조립공차 및 공정에 종속되므로 수치상의 내부부피 계산이 불가능한 상황이다. 연구단계에서는 큰문제가 없으나 체계개발시 추진제량의 제어가 요구된다.

- 결합판독과 판정:

복합재의 거동은 일반적으로 충격에 취약하고 반복된 작용하중에 의해 축적손상과 노화에 의한 강도저하를 발생시킨다고 알려져 있다. 복합재 연소관의 품질보증은 구조적 방법인 수압시험으로 확인하고 있으나, 제작이나 취급/운반시 발생가능한 결합의 검출기법과 영향 및 판정에 대한 해석적 연구가 보완 요구된다.

3. 결론

복합재 압력용기는 복합소재의 고유한 장점으로 다양한 용도의 활용성과 경제성을 확보하고 있으며 앞으로 시장성의 확대가 예상되는 품목이다. 따라서 추진기관 연소관으로서의 복합재 압력용기에 대한 제반사항들을 논하였다. 추진기관의 효율에 주요인자인 무게비는 Steel연소관에 비해 약 50%의 감소효과가 있으며 단가의 측면에서도 부가가치가 있는 것으로 평가된다. Stiffness에 의한 추진제 내면변형율의 증가, 제작공차, 공정의 재현성, EPDM의 접착성 및 외부습도유입 문제 등의 제반 사항들을 추진제 공정과 구조적 안정성 관점에서 논하고 공정설계시 고려사항을 제시하였다. 추진기관 부품으로서의 복합재 연소관에 대한 우리의 실정은 제작/시험/평가의 역사가 짧고, 특수목적의 제한된 시장성으로 외국기술수준에 미흡한점도 있으나 국과연의 연구개발과 제작사의 기술개발로 최적설계된 고성능 추진기관이 창출될 것이다.

참고문헌

- 1] B.A. Wilson, "Filament Winding--Past, Present, and Future", 34th International SAMPE Symposium, May 8-11, 1989.
- 2] W.S. Woltosz, G.P. Roys and P.R. McFall, "A Powerful New Tool for Solid Rocket Motor Design", 1979 JANNAF, CPIA Pub. 300, pp 315 - 341.
- 3] H.L. Schreuder, "Adhesion of SolidRocket Materials", Rubber World, pp34-44, Nov. 1990.
- 4] S.J. Bennett and R.L. Carpenter, "Migration at Interfaces", 1983 JANNAF Propulsion Meeting, Vol.II, AD-A129853, pp 53-65

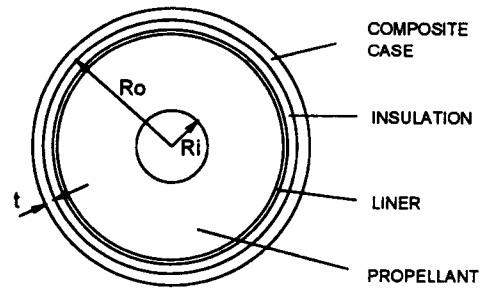


Fig.1 MOTOR CROSS-SECTION (plane strain state)

표 1 복합재 연소관 경우의 적용예

추진제 종류	ADP-311	ADP-314	ADP-315
Ri (mm)	26.5	90	110
Ro (mm)	79.5	321	440.5
t (mm)	4	10	10
복합재 연소관 Hoop 방향 모듈러스 (Psi)	$1.22 \times 10^7$	$1.29 \times 10^7$	$1.22 \times 10^7$

표 2 추진기관 구성 부품의 열팽창 계수

재료명	열팽창 계수( / °C)	비고
추진제	$1.0 \times 10^{-4}$	
라이너	$1.8 \times 10^{-4}$	
EPDM		
Steel	$1.1 \times 10^{-5}$	
Al	$2.3 \times 10^{-5}$	
C/E	$(1.0 \sim 50) \times 10^{-6}$	기존제품기준

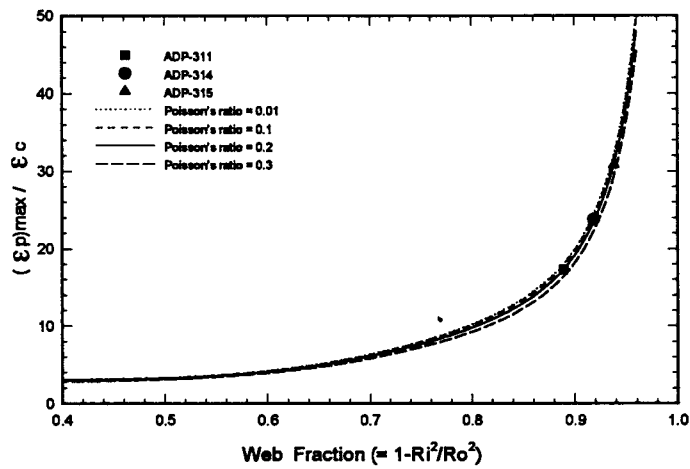


Fig. 2 Strain Ratio vs Web Fraction with varying Poisson's Ratio

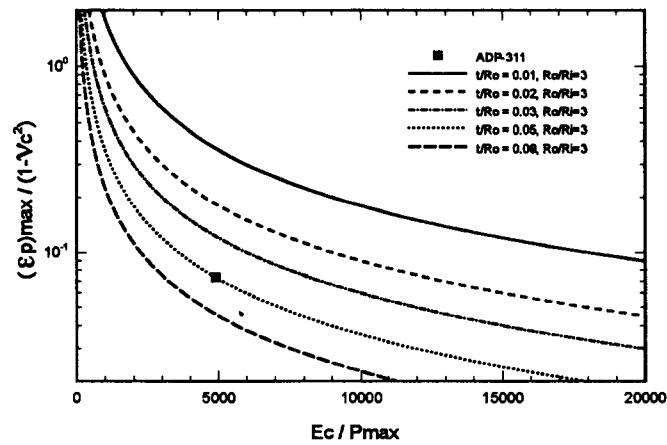


Fig. 3 Max. Propellant Strain vs Case Modulus/Max. Chamber Pressure (Ro/Ri) = 3

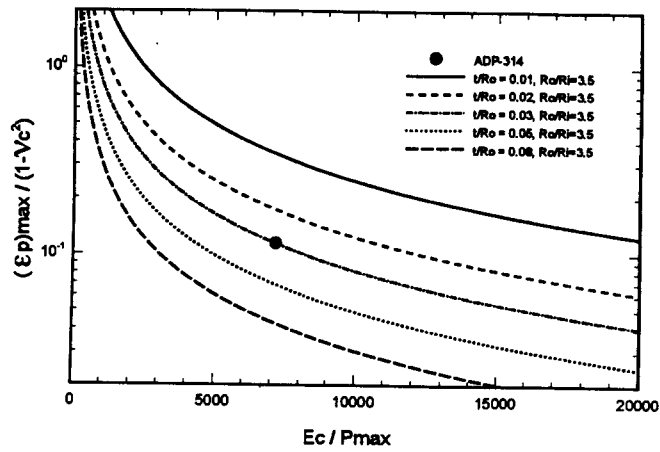


Fig. 4 Max. Propellant Strain vs Case Modulus/Max. Chamber Pressure  
(Ro/Ri) = 3.5

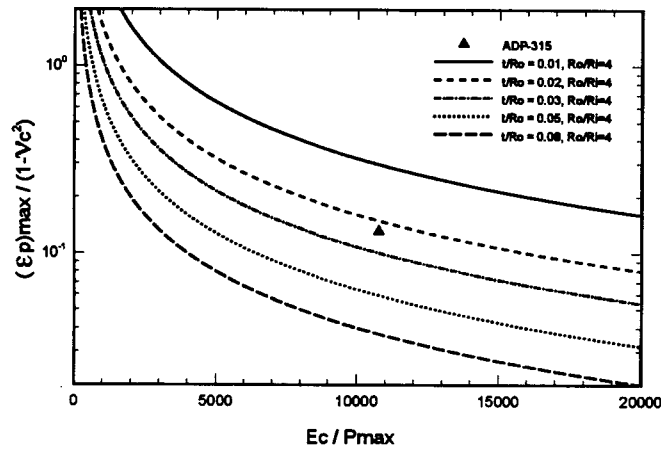


Fig. 5 Max. Propellant Strain vs Case Modulus/Max. Chamber Pressure  
(Ro/Ri) = 4

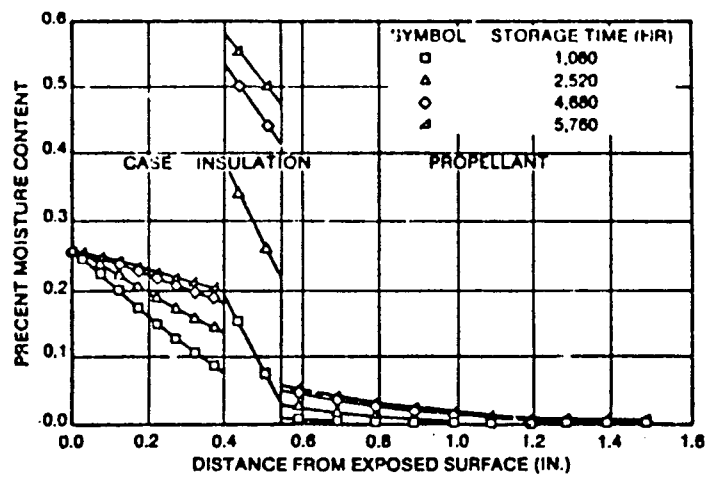


Fig. 6 Moisture Diffusion into a Motor (75 °F and 75 % R.H.)