

추진제 그레인 래디얼 슬롯내의 폼 코어에 의한 압력증가 해석

A Study on the Pressure Increase due to the Foam Left in the Radial Slot of
Propellant Grain

김 종 율*
Kim, Jong-Yul

정 규 동*
Jung, Gyoo-Dong

양 준 서*
Yang, Jun-Seo

ABSTRACT

The radial slot configuration in the solid propellant grain is usually fabricated by the polyurethane foam slot former. The foam cannot be easily removed from the solid propellant, some can remain in the slot. Analogue solid propellant rocket motors using polyurethane foam to shape the slot are static fired with the foam former still in place in the slot. The pressure increases at the slot part are measured and there are indications of the propellant cracks at the insulations above the slot. The pressure increase is produced at the beginning of the burning sequence as the foam will hinder the combustion gas of the burning propellant from flowing into the central bore. The pressure increase up to about 300psi is predicted for the motor tested and this pressure increase depends on the gap between the propellant and foam surfaces and remaining foam volume. This amount of pressure increase inside of the slot is estimated to cause the propellant crack. To prevent this pressure increase, minimizing the foam remainder in the slot and making sufficient chamfering at the corner of the slot entrance are suggested.

주요기술용어(주제어) : Radial Slot(래디얼 슬롯), Foam Core(폼 코어), Pressure Increase(압력증가), Propellant Crack (추진제 크랙)

1. 서 론

추진기관은 유도무기가 목표 지점까지 도달할 수 있는 추력을 제공하며, 추진제는 연소되어 추력을 발생시키게 된다. 이중 고체 추진제는 액체와 달리 한

번 점화되면 추진제의 연소량을 조절하거나 수정할 수 없기 때문에 추진제 그레인의 형상과 연소속도를 조절하여 원하는 압력과 추력의 성능을 만족시키도록 설계해야 한다. 즉 연소면적을 성능요구조건에 충족 하도록 설계해야 하는데 이를 위하여 추진제 그레인은 다양한 유동 통로와 슬롯형상을 적용하게 되며 작용 응력도 감소시키는 형상설계가 이루어지고 있다. 일반적으로 적용되는 그레인 형상은 연소관 중심부에 유동통로가 있는 원통형과 반경방향이나 축 방향으로 배열되는 슬롯의 조합이 가장 많이 사용된다. 이중

† 2004년 10월 22일 접수~2004년 12월 8일 심사완료

* 국방과학연구소(Agency for Defense Development) 기술연구본부

주저자 이메일 : jjykim@add.re.kr

래디얼 슬롯 형상은 그레인 전방이나 중앙부위에 주로 적용되어 연소시간에 따라 일정한 압력, 추력을 발생시키고 그레인에 작용하는 응력의 집중을 완화시키는 등의 목적으로 적용된다. 그레인의 원통형 내면 제작은 금속 맨드렐을 빈 연소관에 장착 후 추진제를 충전하여 경화 후 맨드렐을 제거하는 방법을 사용하여 제작된다. 그러나 래디얼 슬롯은 그 형상의 특성상 맨드렐 제거가 용이하지 않으므로 제작 방법이 간단하지 않다. 그 제작방법으로는 추진제 경화 후 기계 가공하는 방법, 고무튜브를 사용하는 방법을 고려할 수 있는데 이 방법들은 위험하고 추진제가 손상을 입는 경우가 있거나, 슬롯형상이 정확하게 제작이 안 되고 충전 중 고무의 파열 가능성 등의 단점이 존재하여 폴리우레탄 폼을 사용하는 방법이 많이 적용된다. 이 방법은 값싸고 편리한 방법이나 추진제 경화 후 폼의 완전제거가 용이하지 않으므로 슬롯 내에 폼이 일부 잔존하게 된다. 이 경우 연소초기에 압력이 증가할 수가 있다. 즉 슬롯부위 추진제가 점화되어 생성된 연소가스가 슬롯에서 원통형 중앙공동으로 빠져나가려 하는데 잔존하는 폼이 유동을 방해하여 이 부위에서 미처 빠져나가지 못한 연소가스로 인해 국부적으로 압력이 증가하고 이 압력상승이 과도할 경우 추진기관의 파열까지 발생할 수 있다^[1].

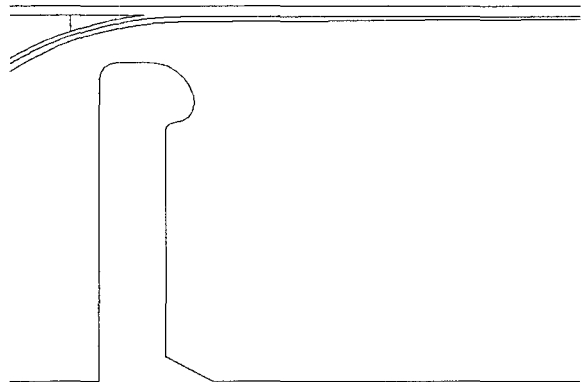
국내에서도 폼 코어를 적용한 래디얼 슬롯형의 그레인이 연구용으로 시험 제작되어 연소시험이 수행되었으며, 이 경우 일부 추진기관의 폼 코어 적용부위에서 연소 초기 압력증가가 발생한 경우가 있었다. 따라서 본 논문에서는 폼 코어를 적용한 추진기관에서 발생할 수 있는 압력증가의 원인과 그 영향에 대하여 분석하였다.

2. 래디얼 슬롯 제작 및 압력증가 현상

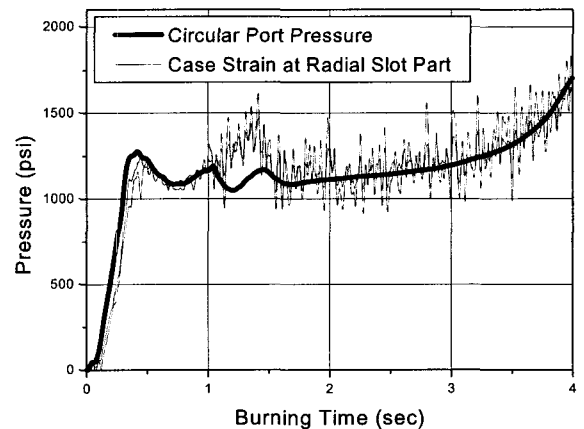
폼 코어를 적용하여 제작 및 시험된 연구용 그레인 형상은 다음 그림 1과 같이 전방부에 래디얼 슬롯이 있는 경우로서 연소관내에 폼 코어를 장착 후 추진제를 충전하여 제작되었다. 이와 같이 폼 코어를 사용하여 제작된 추진기관은 추진제 경화 후 폼 코어를 제거하는데 그 형상과 작업 공정상 완전제거가 어렵

기 때문에 일부가 래디얼 슬롯 내에 잔존하게 된다. 폼 코어의 재질은 폴리우레탄으로써 추진제 연소 시 급속히 열분해(Decomposition)되는 특성이 있으나 추진제가 연소될 때 폼 코어 외면의 열분해에 충분한 고온, 고압의 분위기가 조성되기까지의 시간동안은 열분해 되지 않은 고체상태로 존재하게 된다. 또한 열분해 시간 및 정도는 잔존하는 폼 코어의 부피, 밀도 등에 따라 다르다.

폼 코어 적용 추진기관을 연소 시험한 결과 그림 2와 같이 연소초기에 래디얼 슬롯부위에서 압력이 증가하는 현상이 측정되었으며, 그 원인을 분석한 결과 폼 코어의 잔존에 의한 압력상승으로 분석되었다. 이와 같은 국부적 압력상승은 변형률이 집중되는 래디얼 슬롯 상부 부위에 작용 변형률을 증가시키며 연소



[그림 1] Radial Slot Grain fabricated by Foam Core



[그림 2] Pressure rise at the radial slot Part

실과의 압력 차이에 따라서 추진제 크랙발생의 원인이 된다. 다음 장에서는 압력상승 해석과 크랙발생 가능성에 대하여 분석하였다.

3. 폼 코어 잔존시의 압력 증가 해석

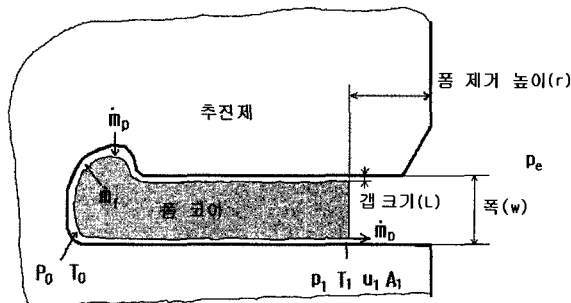
라디얼 슬롯 형상 및 슬롯 형상제로 사용하는 폴리우레탄 폼(이하 폼)의 특성으로 인한 슬롯내부의 과다압력 발생 정도를 연소실 압력과 폼의 제거 높이 및 갭의 크기에 대해서 검토하였다. 계산모델은 그림 3과 같으며 1차원 압축성 유동의 질량보존법칙을 폼이 차지하는 형상의 내압계산에 적용하였다.

유동은 정상상태(steady-state)이고, 폼의 질량 발생률은 해당부위 추진제의 질량발생률과의 비율로서 정의하였다. 아래 식들에서 아래첨자는 다음을 의미한다.

- p : 추진제, f : 폼, o : 슬롯 내부, 1 : 폼 출구
- $\dot{m}_f = W_f \dot{m}_p$
- W_f : 추진제 대비 폼의 질량을 발생비

폼의 출구부분의 압력(p_1)은 연소실 압력(p_e)과 같다고 가정하였다. ($p_1 = p_e$)

유동 계산의 지배방정식은 질량보존법칙으로 슬롯 형상 내에서 생성된 가스의 양과 폼의 출구를 통하여 배출되는 가스의 양을 같게 한 것으로 생성량은 추진제와 폼에서 생성되는 양을 더한 것이다.



[그림 3] Pressure Calculation Model at the Radial Slot Part

질량보존법칙은 생성량과 배출량이 같으므로 $\dot{m}_G = \dot{m}_D$ 로 표현되고 생성량(\dot{m}_G)과 배출량(\dot{m}_D)은 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{m}_G &= \dot{m}_p + \dot{m}_f & (1) \\ &= (1 + W_f) \dot{m}_p \\ &= (1 + W_f) \rho_p \eta_{rb} r_b A_b \\ &= (1 + W_f) \rho_p \eta_{rb} a P_0^n A_b \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_D &= \rho_1 u_1 A_1 = \frac{P_1}{RT_1} u_1 A_1 = \frac{P_1}{\gamma RT_1} \gamma u_1 A_1 \\ &= P_1 \frac{u_1}{\sqrt{\gamma RT_1}} \sqrt{\frac{\gamma}{RT_1}} A_1 = P_1 A_1 M_1 \sqrt{\frac{\gamma}{RT_1}} \end{aligned}$$

위의 식은 폼의 출구인 국지(local)의 변수에 대한 식으로 구성되는데, 이 값들을 폼 내부인 정체(stagnation)지역의 변수로 바꾸기 위하여 다음과 같은 압축성 유동의 등엔트로피 관계식을 이용한다.

$$\begin{aligned} p &= \rho RT, \\ \frac{P_0}{p_1} &= \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}, & (2) \\ \frac{T_0}{T_1} &= 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_D &= \frac{P_o}{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} A_1 M_1 \sqrt{\frac{\gamma}{RT_o} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1\right)} \\ &= P_o A_1 M_1 \sqrt{\frac{\gamma}{RT_o} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1\right)^{-\frac{\gamma}{\gamma-1} + 1}} \\ &= C_D P_o A_1 \end{aligned}$$

여기서 C_D 는 일반적으로 유출계수(discharge coefficient)로 정의한다.

$$C_D \equiv M_1 \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2\right)^{-\frac{\gamma+1}{\gamma}}} \quad (3)$$

$$= \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{1}{RT_0} \left[\left(\frac{p_1}{P_0}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_1}{P_0}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (5)$$

식 (3)에서 폼 출구의 마하수(M₁)를 1로 하면 출구에서 choking이 발생하는 조건으로 C_D는 상수(constant)화되어 일반적인 로켓 노즐에서의 성능계산에 이용된다. 식 (3)에서 마하수(M₁)를 알 수 없으므로, 구하고자 하는 슬롯의 내부압력(P₀)과 알고 있는 연소실압력(p_e)을 이용하기 위하여, (2)의 식을 이용하여 압력에 관한 관계식으로 변환한다.

가 되며, 여기서 r_p ≡ p₁/P₀(압력비율)을 정의하고, 다른 값들은 상수로 취급이 가능하므로 아래와 같이 정의하였다.

$$Q_1 \equiv (1 + W_f) \frac{\eta_{rb}}{\eta_D} a \rho_p p_1^{n-1} \frac{A_b}{A_1},$$

$$Q_2 \equiv \frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{1}{RT_0}$$

식 (5)는

$$Q_1 (r_p^{1-n}) = \sqrt{Q_2 [r_p^{2/\gamma} - r_p^{(\gamma+1)/\gamma}]} \\ \rightarrow Q_1^2 r_p^{2(1-n)} = Q_2 [r_p^{2/\gamma} - r_p^{(\gamma+1)/\gamma}]$$

가 되며, Q ≡ Q₁²/Q₂라고 하면

$$F(r_p) = Q r_p^{2(1-n)} - r_p^{2/\gamma} + r_p^{(\gamma+1)/\gamma} = 0 \quad (6)$$

로 압력비(r_p)에 관한 간략한 식으로 정리된다.

식 (6)은 비선형 대수식(nonlinear algebraic equation) 이므로 다음과 같은 Newton-Raphson 방법을 이용하여 압력비(r_p)를 계산한다.

$$r_p^{(m+1)} = r_p^{(m)} - \frac{F(r_p)^{(m)}}{dF(r_p)^{(m)}}$$

여기서

$$dF(r_p) = 2(1-n) Q r_p^{1-2n} - \frac{2}{\gamma} r_p^{(2-\gamma)/\gamma} + \frac{\gamma+1}{\gamma} r_p^{1/\gamma}$$

로 식 (6)을 미분한 식이고, 위첨자 m은 계산반복단계(iteration step)를 나타낸다. 초기 압력비, r_p⁽⁰⁾=1.0으로 설정하고 반복계산을 수행하여

$$|r_p^{(m+1)} - r_p^{(m)}| \leq \epsilon$$

$$M_1 = \sqrt{\frac{2}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_0}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \text{ 이고,}$$

$$\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2\right) = \left(\frac{P_0}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \text{ 이므로}$$

$$C_D = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_0}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \frac{\gamma}{RT_0} \left(\frac{P_0}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma} \left(-\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\right)}}$$

$$= \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{1}{RT_0} \left[\left(\frac{P_0}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma} - \frac{\gamma+1}{\gamma}} - \left(\frac{P_0}{p_1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}$$

$$= \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{1}{RT_0} \left[\left(\frac{P_0}{p_1}\right)^{-\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_0}{p_1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}$$

$$= \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{1}{RT_0} \left[\left(\frac{p_1}{P_0}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_1}{P_0}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (4)$$

앞에서 구한 식들을 질량보존법칙에 적용하면

$$(1 + W_f) \rho_p \eta_{rb} a P_0^n A_b = \eta_D C_D P_o A_1$$

$$\rightarrow (1 + W_f) \rho_p \frac{\eta_{rb}}{\eta_D} a \frac{P_0^n}{P_0} \frac{A_b}{A_1} = C_D$$

$$\rightarrow (1 + W_f) \rho_p \frac{\eta_{rb}}{\eta_D} a \left(\frac{P_0}{p_1}\right)^{n-1} p_1^{n-1} \frac{A_b}{A_1}$$

을 만족할 때 계산을 멈춘다. 계산 프로그램에서 ϵ 은 1.e-4를 사용하였다.

폼 내부압력 계산을 위해 사용한 값들은 다음과 같다. 추진제 연소 특성 값들로서 연소속도 계수(a)는 0.03282in/sec, 연소속도지수(n)는 0.28, 밀도(ρ_p)는 1.798g/cc, 화염온도(T_c)는 6360 R이고 비열비(γ)는 1.1435이다. 보정계수로는 추진제의 연소속도보정(η_{rb})이 1.15, 유출보정계수(η_D)는 일반적인 관(tube) 유동에서 사용하는 0.8~0.85 중 낮은 값인 0.8을 사용하였다.

래디얼 슬롯 입구부터 폼 제거높이에 따라 추진제 연소면적을 계산하여 적용하였다. 연소실 압력(p_e)은 1000psia(0.4초경)를 기준으로, 연소초기의 영향을 보기 위하여 압력 상승과정에서 임의로 500psia(0.2초경)인 경우도 검토하였다. 출구가 되는 폼과 추진제사이 겹의 면적(A_1)은 겹의 크기(L)를 각각 최소 8mm와 최대 12mm로 고정하고 제거높이(r)에 따라서 $2\pi rL$ [cm²]로 계산하였다.

폼과 추진제의 질량발생률 비(W_f)는 폼이 슬롯 내부 가스 생성량에 전혀 영향을 주지 않는 경우와 연소특성을 갖고 생성량에 영향을 주는 경우의 두 가지로 하였다. 후자의 경우 시험 전 폼의 무게와 폼의 연소시간에 따라 폼의 질량 생성률, \dot{m}_f 는 폼 질량/연소시간=6.57kg/s가 되고, 계산 영역 내의 추진제의 생성량, \dot{m}_p 는 $\eta_{rb}r_b\rho_p A_b$ 로 계산하면 24.55kg/s가 되어, 그 비율은 $W_f = \dot{m}_f / \dot{m}_p = 6.57 / 24.55 = 0.268$ 이 된다. 계산 결과는 겹 크기(L, mm)와 폼의 제거 높이(r, mm)에 따른 폼 형상 내부와 연소실압력(p_e)과의 압력차이(단위: psia)이다.

계산결과 연소초기 연소실의 압력이 낮고, 겹의 크기와 폼 제거 높이가 낮을 때 슬롯 내부와의 연소실의 압력차이가 더 커진다.

그림 1과 같은 래디얼 슬롯을 적용한 연구용 추진기관 6개에 대하여 연소시험이 수행되었으며 이중 1~5번은 래디얼 슬롯부의 이상현상이 없었으나 6번째 추진기관의 경우는 그림 2와 같이 래디얼 슬롯부에 압력이 상승되는 이상현상을 나타내었다. 이중 잔존 폼에 관련된 사항은 표 3과 같으며, 래디얼 슬롯부위의 이상현상은 잔존 폼의 무게보다는 부피의 영

[표 1] Pressure Increase at Several Foam Height Left in the Slot Part ($W_f = 0.268$)

제거높이/폭 겹	$p_e=500$		$p_e=1000$	
	8mm	12mm	8mm	12mm
0.43	400	128	205	83
0.71	290	100	162	67
1.00	220	81	131	55
1.29	173	66	107	45
1.57	139	54	89	38
1.86	113	45	74	32
2.14	93	38	62	27
2.43	77	32	52	23
2.71	64	27	44	19
3.00	53	22	37	16
3.29	44	19	31	14
3.57	37	16	26	11

[표 2] Pressure Increase at Several Foam Height Left in the Slot Part ($W_f = 0.0$)

제거높이/폭 겹	$p_e=500$		$p_e=1000$	
	8mm	12mm	8mm	12mm
0.43	197	74	120	50
0.71	152	59	96	40
1.00	120	48	78	33
1.29	97	39	64	28
1.57	79	33	53	23
1.86	65	27	45	20
2.14	54	23	38	17
2.43	45	19	32	14
2.71	38	16	27	12
3.00	32	14	23	10
3.29	27	12	19	8
3.57	22	10	16	7

향이 지배적임을 알 수 있다. 상기 압력증가 해석결과인 표 1, 2중 6번 추진기관에 대한 결과(압력차)는 표 4와 같다. 이 결과를 보아 래디얼 슬롯부에 압력이 최대로 증가하는 경우는 연소 초기로써 약 100~290psi 수준이다. 따라서 폼 부위 추진제 그레이에 크랙과 같은 구조적인 문제가 발생한다면 발생시점은 연소 초기 저압(400~500psi)인 시점일 것으로 판단되며, 초기에 발생한 문제로 발생하는 연소 면적의 증가는 전체에 비해서 작은 부분으로 있을 수 있으므로 전체 성능(압력, 추력) 선도에 거의 영향을 주지 않을 수도 있다.

계산 결과로써 알 수 있는 현상은 다음과 같이 종합할 수 있다. 폼이 슬롯 내에서 완전히 제거되지 않

은 상태에서는 연소초기에 과도한 압력차가 발생할 수 있으며 그 증가량은 추진제와 폼의 갭 크기와 폼 제거 높이에 따라서 많은 차이가 발생한다. 따라서 폼 형상 및 연소특성의 영향으로 폼 부위에서 원통부 연소실과 큰 압력차가 발생할 수 있으므로 슬롯 형상재(slot former)인 폴리우레탄 폼은 최대한 제거해야 하며, 슬롯입구에 충분한 크기의 모서리 따냄을 하여 슬롯 내에서 유동 방해원인을 없애야 할 것으로 판단된다^[2].

4. 추진제 크랙 발생 가능성 분석

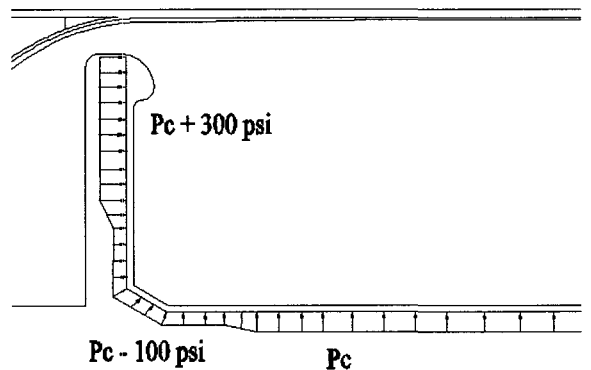
래디얼 슬롯부에 국부적 압력증가가 존재할 경우 추진제 그레이의 안전성을 분석하기 위하여 추진제 그레이의 구조해석을 수행하였다. 해석 대상인 추진제 래디얼 슬롯부위의 추진제 그레이는 슬롯부와 연소관 내의 압력이 동일할 경우 안전율이 충분하여 크랙발생이 예상되지 않는 형상이다. 래디얼 슬롯내의 압력분포는 폼의 잔존에 의하여 발생할 수 있는 슬롯 상부의 압력증가분 300psi를 적용하였으며, 슬롯 입구부위의 압력은 유동속도 차이로 인하여 낮게 설정하였다^[2]. 따라서 그림 4와 같은 압력분포를 적용하여 그레이의 구조해석을 수행하였다. 해석시점은 연소초기로서 대기온도 30℃에서 시험모타의 연소압력이 200msec 동안 1200psi 상승하는 하중 부가율을 적용하였다. 해석 프로그램은 ABAQUS를 적용하였으며^[3], 2차원 8절점 요소를 적용하였다. 해석 시 적

[표 3] Relations between Tested Motors and Foam Amount Left

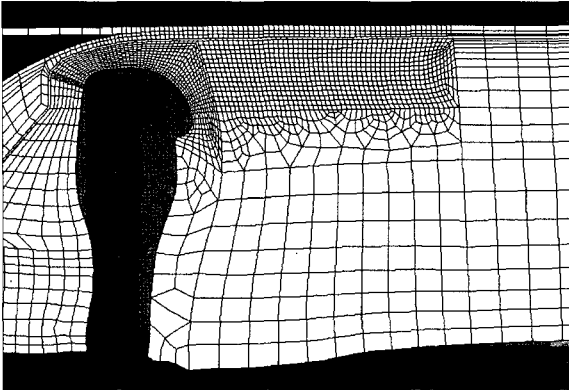
시험모타	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6
슬롯부 이상현상	정상	정상	정상	정상	정상	압력증가 및 크랙흔적
밀도 (g/cc)	0.09	0.09	0.11	0.12	0.14	0.12
폼 무게 잔여비율 (%)	67.3	57.1	18.4	57.4	62.4	59.9
제거 높이/폭	2.21	2.86	4.21	2.86	2.50	0.86

[표 4] Pressure Increase in the Slot Part for the # 6 Motor

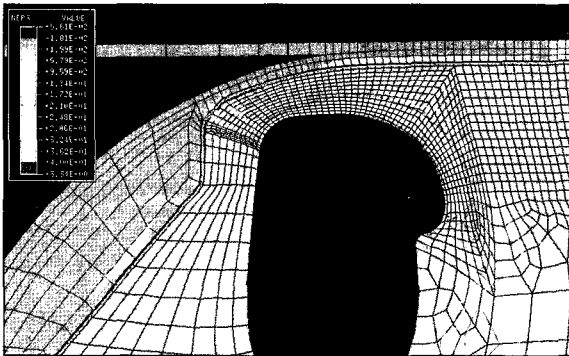
연소실 압력 (psia)	Gap 크기 (mm)	압력차(psia)		Mach 수 (@ $W_f=0.268$)
		$W_f=0.0$	$W_f=0.268$	
500	8	120	290	0.91
	12	50	100	0.57
1000	8	78	160	0.58
	12	34	67	0.34



[그림 4] Pressure Distributions in the Stress Analysis



[그림 5] Deformed Shape of the Radial Slot Part



[그림 6] Maximum Strain Location at the Radial Slot Part

용한 구성모델은 추진제, 라이너, 내열재에 대하여 비압축성, 균질의 비선형 점탄성 구성모델을 적용하였다.

해석 결과 압력 작용 시 래디얼 슬롯부의 변형은 그림 5와 같이 슬롯 끝단부위의 변형이 커지고 슬롯 입구부위는 상대적으로 좁아지며 원통부로 추진제가 수축 변형되는 형상을 나타낸다. 이 경우 작용하는 슬롯 끝단 부위에는 변형률이 집중되어 최대 변형률이 크게 증가하게 된다. 그 결과 최대변형률은 그림 6과 같이 슬롯 상부 추진제 표면에서 발생하며 50% 수준이다. 이때의 안전율은 추진제의 과단변형률을 적용하여 산출하면 1.02로써 허용 안전율 1.1보다 낮으므로^[4], 추진제 크랙이 발생할 가능성이 높다. 래디얼 슬롯부위에 압력증가가 없이 원통부와 동일한 압력일 경우 추진제에 작용하는 최대 변형률은 14% 수

준으로서 이때의 안전율은 4.5수준이다. 따라서 래디얼 슬롯부의 압력증가는 추진제의 변형률 증가를 가져오며, 연소 시험된 연구용 추진기관 6번의 경우와 같이 압력증가가 300psi 수준이면 추진제 크랙 발생 가능성이 높다.

실제로 추진제에 크랙이 발생한 증거는 연소시험 후의 계측 및 실물자료에서 발견되었다. 먼저 래디얼 슬롯부위의 연소관에서 측정된 변형률이 비정상적으로 상승하여 슬롯부위에서 연소 중 압력이 증가한 현상을 나타내었다. 이러한 압력증가시점은 연소중 추진제/라이너의 접착부위가 노출되기 전으로서 압력증가 원인은 추진제 크랙발생으로 판단된다. 또한 연소 종료 후의 실물분석에서 래디얼 슬롯 상부의 EPDM 내열재에 비정상적인 과도한 삭마흔적이 있었으며 이는 추진제 크랙발생으로 인하여 조기 노출된 내열재가 연소가스의 와류 흐름에 의하여 삭마된 것으로 분석되었다. 표 3에서와 같이 압력증가가 유발된 추진기관에서는 다른 정상연소 추진기관보다 잔존하는 폼의 부피가 크며 슬롯부위에 폼 코어 잔존시의 압력증가 가능성은 관련 문헌에서도 언급되어 있다^[1].

5. 맺음말

본 연구에서는 폼 코어를 사용하여 제작된 고체 추진기관의 연소 시 압력 증가 현상에 대하여 폼의 잔존형상에 따른 압력증가와 이로 인한 크랙발생 가능성을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 래디얼 슬롯에 폼이 잔존하는 상태에서는 연소초기에 슬롯부위에 과도한 압력이 증가할 수 있으며, 그 크기는 추진제와 폼의 간격크기와 폼 제거 높이에 따라서 많은 차이가 발생한다.
- 2) 연소초기 래디얼 슬롯부에서 300psi 수준의 압력증가가 발생할 경우 추진제 크랙이 발생할 수 있으며 슬롯부위의 계측압력 및 실제 연소 후의 실물분석에서 추진제 크랙 발생의 증거가 보였다.
- 3) 래디얼 슬롯 형상의 그레이는 폼 코어의 잔존량을 최소화시키고 슬롯입구에 충분한 크기의 모서

리 따냄을 하여 슬롯 내에서의 유동 방해원인을 없앴으로서 국부적 압력증가 가능성을 배제시켜야 한다.

참 고 문 헌

- [1] Knaresboro et al, "Method of Manufacturing Solid Rocket Motors", United States Patent 6,101,948, 2000.
- [2] J. W. Murdock and W. A. Johnston, "Flow-Structural Interaction in Solid Rocket Motors", The Aerospace Corporation RTO-EN-023, 2002.
- [3] ABAQUS, Version 5.8, User's Manual, Hibbit, Karlson and Sorensen, Inc. Palo Alto, CA.
- [4] Structural Assessment of Solid Propellant Grains, AGARD-AR-350, 1997.