

추진제 특성분석과 추진기관 설계 자동화 연구(I)

최용규, 양준서(국방과학연구소)

요 약

체계적 관점에서 추진기관에 요구되는 설계 제한조건의 합리적 조정에 의한 최적화 달성을 위하여 주 체계(Main System)와의 신속한 자료출/교환이 요구된다. 이를 위하여 비록 많은 가정사항들이 내재해 있더라도 성능과 형상, 그리고 무게에 대한 자료출 제시할 수 있는 추진기관 설계 자동화 도구를 개발한다. 본 연구에서는 일차적으로 추진제 조성/특성의 상관관계를 추진기관 체계와 그레인 내탄도/구조성능의 설계 관점에서 관계식화하여 제시하였다.

1. 서론

발사체의 에너지를 제공하는 기능을 갖고 있는 추진기관은 궁극적으로 주 체계(사용자)의 목적을 충족시킬수 있도록 개발되어야 한다. 따라서 체계 개념형성 단계부터 개발 완료까지 주체계와의 신속한 자료교환이 요구된다. 특히 체계개발의 초기단계에는 사용자의 체계요구사항(ROC)만 확정된 상황에서 주체계의 부여임무 성공도와 성능 최적화를 위한 모든분야의 형상과 무게의 설정과 분배작업이 수행된다.

이 단계에서 추진기관 분야의 자료가 타 구성분야보다도 최우선적으로 요구되며, 이는 체계개념 형성단계에서 추진기관이 주 체계에 지대한 영향이 있음을 의미한다. 체계개념 형성단계에서 신속한 제공이 요구되는 추진기관 분야의 자료에는 성능, 형상, 길이 및 무게와 관련된 정보로서, 이를 신속히 제공하려면 설계자동화된 계산도구(Software)가 요구된다. 추진기관 설계 자동화를 위해서는 국내외의 추진기관 정보와 풍부한 개발경험, 그리고 확보 또는 1-2년내로 개발가능한 소재의 판단과 정리된 특성/경험식 등이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 2차에 나누어 체계 개념설계 단계에서의 추진기관 설계자동화 기법과 컴퓨터코드 및 결과를 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1 체계 요구사항 분석

추진기관 개념설계의 초기단계에서 가장 시급히 수행되어야 할 연구활동은 그림 1)과같이 체계요구사항을 분석하여 내적으로는 체계요구에 부합되는 추진제 개발 Spec.을 제시하고, 외적으로는 개발 가능한 추진기관 외형 형상(Dimension)을 체계에 제시하는 것이다. 외형 형상은 추진기관의 내탄도적 성능과 추진제 충전율에 따른 그레인의 구조적 안정성 뿐만 아니라 미사일 체계의 공력설계와 연계되어 발사체의 길이와 직경을 결정하는 수차례 반복되는 검토과정이 요구되기 때문이다.

본 반복적 과정을 통하여 추진기관 분야에서는 체계 개발개념을 이해하고 추진기관 개발 위험도를 최대한 낮춘 체계 요구조건을 유도하여야 한다. 따라서 반복 계산의 시간적 인력 절감을 위하여서는 국내외의 개발된 추진기관과 추진제 조성/특성에 관한 지식의 확보가 우선되어야 한다.

2.2 추진제 조성/특성과 그레인 형상설계

추진제 그레인 형상설계의 지배인자는 내탄도성능과 구조적 안정성(또는 요구수명)으로 대분된다. 체계요구조건 분석에 따른 추진기관 개발을 위한 개념적 흐름도는 그림 1)과 같이 구성되나, 개념설계 단계에서는 반복되는 체계와 추진기관 및 추진제의 개발요구사항 분석/조정까지 도출하기 위한 단계별 검토사항은 그림 2)와 같이 1)요구조건 분석, 2-1) 직경과 가용추진제 연소속도에 의한 그레인 형상설계, 2-2) 내탄도 설계와 그레인 구조안정성 분석,

3) 추진제 요구규격에 따른 기능개념 설계, 4) 추진제 조성 & 공정 개발, 5) 추진제 특성분석 등으로 구성되어 있다. 따라서 추진기관 체계와 내탄도 설계/추진제 구조 안정성 해석의 관점에서 추진제 조성에 따른 특성(내탄도/기계물성)관계식을 산출하여 추진기관 개념 설계 기법을 제시하였다.

2.3 추진기관과 적용 추진제 자료분석

추진기관을 설계하기 위해서는 국내외에서 개발된 기존 추진제의 종류와 특성에 대한 정보가 요구된다. 추진제 선정에는 추진기관이 갖추어야 할 추력, 연소시간 등의 필수적 성능인자 뿐만 아니라, 체계적 관점에서 요구되는 추진기관 운용성/수명, 진술전략적 개념의 연기, 전파방해(Radar Attenuation) 등의 체계적 인자들에 의해 지배된다. 수십여종의 원료로 구성되어 원료분석, 합성, 공정 등의 매우 복잡한 과정을 통하여 개발 제작되는 추진제는 그레인 설계에 필요한 내탄도특성과 점탄성 기계특성을 산출하게 되나, 추진제분야 연구원들은 이보다 더 복잡한 연소안정성, 정전기 민감도, 충격폭발 위험도 등과 같은 물리/화학적 복합적 고유인자 뿐만 아니라 우리의 특수상황에서 기인되는 원료수급과 국내제작 등도 개발인자로 고려하고 있다. 일반적으로 문헌[1]에 수록된 추진제 명칭과 이와 관련된 추진제 특성은 표 1)과 같다.

개발초기의 추진기관 설계에는 추진제 뿐만 아니라 연소관이나 노즐과 같은 비활성 구조물에 대한 가정이 요구된다. 이는 비록 많은 오차가 내재해 있더라도 가정화된 입력자료를 사용하여 추진기관의 제원을 제시하여야 체계와의 구체화 협의를 할 수있기 때문이다. 그러나 가정화된 입력자료의 오차가 작으면 작을수록 시행착오와 오류에 빠질수 있는 사업 전체의 위험도를 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 개발기간의 단축과 저가(Low Cost)를 도모할 수 있다. 따라서 체계 개념설계 단계에서 시급히 요구되는 추진기관과 추진제의 개발방향의 오차를 최소화하기 위해서는 기존의 개발된 자료를 근거로 제시하여야 한다. 국방과 학연구소가 연구개발하고 있는 추진제 분야는 혼합형 복합추진제(Composite Polybutadien Propellant, C/PB) 계열로서, 이를 적용하여

독자 개발했거나 개발중인 대표적 추진기관과 적용 추진제의 제원을 정리하면 표 2)와 같다.

2.4 모타직경과 연소시간 분석

추진제 Web 두께(T_{web})는 연소관 반경(R_i)의 0.1~0.9 범위로 활용할 수 있지만, 추진제 구조적 안정성과 충전률을 고려하면 특별한 경우를 제외하고는 0.2~0.8 정도의 수준이므로 연소속도는 다음 식으로 표현된다.

$$R_b = T_{web}/t_b = (0.2\sim 0.8) \times R_i/t_b$$

$$D_i/t_b = (0.1\sim 0.4) \times R_b,$$

$$\text{여기서 } T_{web} = (0.2\sim 0.8) \times R_i$$

일반적으로 Low Cost 추진제는 원료수급/개발이 용이한 추진제를 의미하며 문헌[2]에 의하면 6~10mm/sec @1000 Psia이나 현재 국과연에서 개발사용중인 추진제는 6.7~14.7 mm/sec으로서 연소실 설계압력범위를 800~1500 Psia로 가정하면 6.22~17.8mm/sec이다. 물론 ADP-309와 같이 21.68mm/sec @1000 Psia도 있으나 여기서는 Low Cost 추진제에 대해서만 논한다. 따라서 체계요구조조건인 직경대 연소시간(D_i/t_b)은 15.5~178 mm/sec 범위 내에 있어야 한다. 그레인 설계 특수조건부로 Web Fraction을 0.1~0.9로 하는 경우와 단기간내에 개발가능한 추진제 연소속도를 6~16mm/sec @1000Psia로 추론하면 표 3)과 같다. 따라서 특수 조건이나 이 범위를 벗어나는 경우에는 체계/내탄도/구조/추진제 설계 개발과 관련된 연구원들과의 협의와 추진제의 장기간 연구개발이 요구된다.

2.5 그레인 형상설계

그레인 형상설계는 특별한 목적(2중추력이나 초기추력등의 특수제한조건)이 없는 한, 비활성 무게(Dummy Weight)를 최소화하기 위한 고충전의 Natural Burning을 최대목표로 하고 있다. 따라서 그레인 형상설계는 1) 추진기관의 길이대 직경비(L/D), 2) Web 두께에 따라 결정된다. 여기서 Web 두께는 연소관 직경 과 연소시간 및 연소실 압력의 함수로 결정되므로 추진제 연소속도 범위는 한정화된다.

고체 로켓트에 있어서의 그레인 형상과 이와 관련된 자료는 표 4)와 같다. 혼합형 고체추진제는 연소실 내부의 열차폐 및 충전효를 증가의 장점에 근거하여 주조공정의 Case Bonded Internal Burning (CBIR) Grain으로 주로 설계된다. 체계적 관점에서 CBIR 그레인의 직경과 연소시간(t_b)이 결정되면 가용할 수 있는 추진제 연소속도 범위는 한정화된다.

2.6 유도방식과 연기에 따른 AI 함량결정

추진제의 AI 첨가는 비추력의 증가와 연소 안정성을 위하여 저렴한 가격으로 손쉽게 적용가능한 물질로 널리 사용되고 있으나 부수적으로 연기와 전파교란이 야기된다. 전술적 개념의 연기 최소화나 Radar 유도방식이 요구될 경우에는 AI 함량을 2%이하로 제한 사용하고 있으며, 요구제한조건이 심각한 경우 AI 함량을 0%로 하는 대신 가격상승의 요인이 있더라도 연소특성의 안정화를 위하여 ZnC와 같은 금속물질을 사용하고 있다. 비추력 증가 목적으로 AI를 적용하는 경우, 문헌에 의하면 직경 50.8cm 이하의 추진기관에는 10-16%, 매우 큰 추진기관에서는 20-21% 범위가 비추력을 극대화시키는 최적조건으로 제시하고 있다. 이는 직경이 크면 모타길도 클 것이라는 일반적 사고에 근거한 것이다. 초기개념설계에 적용한 체계조건/추진기관 직경에 따른 AI 함량과의 관계식을 제시하면 그림 3)과 같다. 직경에 따른 AI 함량 결정의 근본적 이유는 AI의 화학적 연소반응시간(MPRT: Metal Particle Residence Time)에 따라 5%의 비추력 변화를 나타내므로 연소효율을 극대화 하기 위해서는 $L^*(=Vc/At)$ 를 점검하여야 한다. 여기서 Vc는 연소자유체적, At는 노즐목 면적으로서, 어떤 추진제의 경우 MPRT= 10 msec, $L^* = 4.06m$ 에서 급격히 연소효율이 떨어지는 현상이 있다[3]. 추진제가 점차 연소하면서 MPRT(또는 L^*)가 증가하므로 평균값이 고려되어야 할 것이다. AI은 화염온도 상승과 노즐목/내열재 삭마에 영향을 주므로 열설계 관련연구원과의 긴밀한 협의도 또한 요구된다. 상기 관계식에 의한 기존의 추진제와 추진기관을 검증하면 표 5)과 같다.

표5)에서 체계요구조건에 따라 연기최소화나 유도방식 유무에 의한 AI 함량은 상기에 제시한 관계식과 일치하고 있다. 단, HB의 경우 약간 낮은 값을 보인것은 백곰의 4 Cluster Boosters로 부터 발생된 영향으로 평가 된다.

2.7 그레인 설계를 위한 추진제 특성 분석

추진제의 임무는 형상유지를 위한 기계적 특성과 연소추력을 위한 연소특성과 내탄도와 구조안정성 설계를 위한 기계특성이 요구된다. 일반적으로 추진제 조성은 80% 이상의 고체입자(Solid Particles)와 20%이하의 고분자 물질(Polymer)로 구성되어 있으며, 고체입자는 Ap와 AI로 구분된다.

◎ AI과 Ap의 상관관계

국과연에서 개발되는 추진제의 고체입자 함량은 그림 4)와 같이 85~88% 범위내에서 추진제 비추력에 종속되며 AI-Ap의 관계는 체계의 요구사항(연기, 유도방식, 수명 등)에 따라 결정된다. 고체입자 이외의 물질은 고체입자를 형상 유지시켜 주는 Binder기능을 갖는 Polymer와 미소량의 부가물질로 구성되어 있으며, Binder의 양의 결정은 추진제에 작용하는 응력과 관계된다. 응력은 그레인 형상과 충전률에 종속되므로 Binder양의 결정은 추진제 구조설계에서 언급하기로 한다.

◎ 기존 추진제의 조성특성치 분석

추진제 특성이 규정되지 않은 상황에서 체계업무를 진행시켜야 하는 모순적 상황에서는 과거의 추진제 자료를 근거로 경험식화할 필요성이 있다. 물론 상세설계나 기존의 추진제 특성으로 체계제한조건을 만족하지 못할 경우에는 즉각적으로 추진제 개발자의 긴밀한 협조를 구하여야 할 것이다. 기존 추진제의 조성특성치를 정리하면 표 6)과 같다. AI과 Ap에 따른 연소특성(밀도, 화염온도, 비열비, 분자량)의 상관관계는 그림 4)~5)에서와 같으며 AI에 더 종속적임을 알수 있다.

2.8 내탄도 설계

추진제 그레인 설계의 궁극적 목표는 주어진 요구수명동안 무기체계가 요구하는 추력 요구조건(초기추력, 총추력, 연소시간 등의 크기와 변화폭)을 만족시키는 추진제형상을 제시하는데 있다. 여기서 내탄도 설계에는 그레인 형상설계 뿐만 아니라 가장 중요한 노즐설계까지 포함하여야 하나 본 장에서는 추진제와 관련된 체계적 문제점 관점에 있으므로 생략한다. 따라서 가용 또는 개발가능한 추진제의 특성을 활용/가정하여 추진제 형상에 따른 추진제 Web 크기, 충전률을 근거로 체계요구 총 추력, 길이 등의 부합성을 분석하여 체계에 Feed-Back시키고 추진제 구조적 안정성 분석을 수행한다.

그레인은 그림 6)과 같이 2D와 3D형상으로 구분된다. 3D 그레인의 경우, 충전률이 80~95% 범위로서 추진제 내경에 비례하므로 F_{web} 의 함수로 표현되며 Sliver는 거의 Zero에 가깝다. 2D 그레인의 경우, 55~85% 범위로서 동일 F_{web} 에서 3D 그레인의 충전률을 상회하지만 Sliver는 Web두께에 역비례한다. 상기의 자료를 수식/도표화하면 표 7), 그림 7)과 같다.

2.9 추진제 구조적 안정성 해석

그레인 형상설계는 충전률-그레인, 형상-그레인 응력에 상관관계가 있으며, 추진제 그레인에 발생하는 하중의 90%이상이 온도하중에 의해 야기되며 다음과 같다.

$$\epsilon_{\theta} = K^* (1 + \nu_p) (1 - (b/a)^2) \alpha_R \Delta T$$

여기서 a : 추진제 내경(b-Web),

b : 추진제 외경,

K^* : 단면 응력집중계수

ΔT : 온도차= $T_s - T_0$,

T_s =저장온도, T_0 =Stress Free 온도

$$\alpha_R = \alpha_P - \frac{(1+\nu_c)}{(1+\nu_p)} \alpha_c$$

α : 선형 열팽창 계수

ν : 포아송비(P;추진제, C; 연소관)

이를 Web Fraction, F_{web} 으로 표현하면

$$\begin{aligned} \epsilon_{\theta} &= K^* (1+\nu_p)(1-(1/(1-F_{web}))^2) \alpha_R \Delta T \\ &= K^* (1+\nu_p)(1-(1+\sum_{n=1}^{n=\infty} F_{web}^n)^2) \alpha_R \Delta T \\ &= K^* (1+\nu_p)(-\sum_{n=1}^{n=\infty} (n+1)F_{web}^n)^2 \alpha_R \Delta T \end{aligned}$$

응력집중계수(K^*)는 단면형상계수로서 2D 그레인의 대표형상인 Star의 경우 2~2.5 범위로서, 수식/도표화하면 그림 8)과 같다.

응력집중계수(2D):

$$K^* = 3.33 + 2.29 \times F_{web} - 7.86 \times F_{web}^2$$

3D 그레인의 대표형상인 Cylinder와 Slot의 조합 그레인에서는 Slot에서 응력집중계수가 3.5 까지 되지만, Web 두께가 얇을수록 Slot 홈이 깊으므로 응력집중이 커지나 대신에 F_{web} 이 작아지므로 최대응력은 Cylinder 부위에서 발생한다. 결과적으로 Cylinder 부위가 $K^*=1$ 이나, 이경우 $(1/(1-F_{web}))^2 \gg 1$ 로서 2D에서 발생하는 응력을 상회한다. 따라서 일반적으로 $\nu_p = 0.5$, $\alpha_R = 0.9 \times 10^{-4}/^{\circ}C$, $\Delta T = -100, -90, -80^{\circ}C$ 를 적용하여 Hoop Strain을 도표화하면 그림 9)와 같다. 그림에서와 같이 Web Fraction이 0.8이상으로 가면 충전률 증가는 급격히 감소하는 반면, 작용변형률은 급격히 증가하므로 총추력에서나 추진제 그레인의 구조적 안정성이나 수명에 도움이 되지 못한다. 만약 추진제의 허용변형률(Allowable Strain)을 15%(이값은 일반적 추진제의 탄성변형률 값임)로 둘 경우, 3D 그레인을 고려할 최고충전률은 90%이하가 되어야 하다. 만약 L/D가 4이하이고 앞/뒷 돔(Dome)이 있는경우 최고충전률은 93%까지 가능하다. 따라서 추진제 구조적 안정성 관점에서 추진제 충전률과의 관계식은 아래와 같이 제시 가능하며, 자세한 사항은 Binder 함량결정에서 언급하였다.

$F(\text{Binder} + \text{부수첨가제}) =$

$$0.12 + 0.1 \times (\text{충전률} - 0.6)$$

◎ 그레인 설계 종합분석

그레인 설계시 요구되는 충전률과 Web 두께 및 추진제 응력과의 상관 관계를 종합하면 그림 10)과 같다. 추진제 구조안정성적 관점에서 추진제 기계적 탄성영역이 15% 이하를 기준으로 하면, 최대 충전률은 93% 이하가 되어야 하며 F_{web} 은 72% 이하가 되어야 한다.

2.10 Binder 함량 결정

추진제의 조성은 일반적으로 고체입자가 85-88%, Additive(가소제, 촉매 등)가 3-5% 이므로 바인더 역할을 하는 CTPB나 HTPB의 Polymer는 12-7% 범위에 있다. Binder 함량은 추진제 기계특성과 노화도에 지대한 영향을 미치므로 그레인에 작용하는 열/압력 응력에 함수관계가 있다.

그레인 열응력은 그레인 형상에 종속되며 이는 충전률>Loading Fraction)에 일차적으로 직결된다. 여기서 압력에 의해 유발되는 응력은 연소관 강성(Stiffness)에 종속되나, 금속인 경우 일반적 탄성변형을 범위인 0.2% 이내로 설계되기 때문에 온도에 의한 열변형률과 비교하면 무시할만 하다. 또한 압력하중 작용시 추진제의 기계적 특성은 강도가 증가하는 거동을 나타내므로 더욱 무시되고 있다. 물론 복합재 연소관인 경우에는 세심한 주의와 상세 해석이 요구된다. 혼합형 고체 추진제의 기계적 거동은 온도와 시간에 종속되는 매우 복잡하다[4]. 특히 노화에 있어서는 더욱 더 복잡하므로 가속노화에 의한 노화 경향만 확인하더라도 초기 설계에 도움이 될 것이다. 상기의 복잡한 문제는 생략하고, 여기서는 다만 추진제의 바인더 함량이 증가할수록 기계적 특성을 높힐 수 있다는 가정에 기초를 두고 바인더 함량 결정식을 도출하였다. Binder와 부수첨가제(Additive)의 조성비율을 조성개발 전문연구원에 일임한다고 하면 고체입자를 제외한 12-15%의 함량에 대한 관계식을 제시하여야 한다. 여기서 추진제 그레인에 작용하는 응력은 충전률에 종속된다고 가정하면 다음과 같은 식을 제시할 수 있다.

$$F(\text{Binder}+\text{부수첨가제}) = 0.12 + 0.1 \times (\text{충전률} - 0.6)$$

상기식은 그레인 형상과 Web두께의 상관관계로 부터 구한 그레인 응력에 근거하여 제시된 것으로서, 일반적으로 추진제 충전률이 60%~90% 범위에 있음을 고려할 때, Binder와 부수첨가제의 함량이 12~15% 범위임과 일치함을 나타낸다.

2.11 추진제 기계적 물성분석

상기식의 유효성을 위하여 Binder 함량에 따른 추진제 기계적 물성/노화특성의 분석이 요구되며, 궁극적으로 구조적 안정성 해석과의 상관관계가 제시되어야 한다. 일반적으로 Binder 함량이 증가하면 기계적 물성도 증가하는 경향이 있으나 온도/시간/압력에 따른 E, Sm, em, er, err 등의 Master Curve 분석이 요구되므로 추후 분석 제시한다.

2.12 추진제 연소특성 분석

연소특성(밀도, 화염온도, 비열비, 분자량)은 A_I 과 A_p 및 Binder와의 상관관계가 있으며, 100분률에 근거하여 Binder는 A_I 과 A_p 의 함수이므로 표 8)과 같은 2원1차방정식으로 표현가능하다. 본 수식을 적용한 산출값과 실제값을 비교하면 표 9)와 같이 현존 추진제의 특성에는 2% 오차범위 이내로 잘 적용됨을 알수 있다. 여기서 고려되어야 할 점은 ADP-309와 ADP-311과 같이 연기(Smoke)를 최소화하기 위하여 A_I 을 없앤 경우, 연소안정화를 위하여 ZnC 등의 금속성 물질을 첨가함에 따라 연소특성치 간에 차이가 존재하므로 상기식을 사용시에는 세심한 주의가 요구된다.

3. 결론

본 연구는 추진기관 설계단계에서의 개략설계 과정을 분석하고, 일차적으로 설계에 요구되는 추진제 특성치를 조성과 체계 제한요구조건과 관련하여 경험식을 제시하였다. 또한 추진제 조성에 종속되는 내탄도/기계적 특성을 그레인의 성능(충전률)/구조안정성(수명)과 관련된 관계식으로 제시하였다.

본 연구에서 제시된 추진제 조성특성에 대한 관계식은 다분히 경험식에 근거하였으며, 시급히 요구되는 개념설계시 유효할 것으로 판단된다.

이와 같은 관계식들은 내탄도설계 과정에서의 노즐형상과 연소관 및 내열재의 입력자료로서 활용되어, 궁극적으로 제시할 추진기관 설계 자동화의 필수식으로 적용된다[5][6]. 따라서 체계부서 뿐만 아니라 추진제 개발연구원과 신속한 Feed-Back으로 체계개발의 개념설계가 합리적인 개발방향으로 진전하는데 기여할 것이다. 다만 추진제 특성은 실제의 추진제 개발에 관련된 화학/화공분야 전문가들의 수많은 원료 합성과 공정개발 및 분석에 대한 노력의 결실로 나타나기 때문에 적용시 세심한 주의와 상호 협의가 필수적으로 요망된다.

본 연구에 제시된 설계과정은 국방과학연구소 4연구개발본부4부1실에서 개발중인 PSP(Propulsion Sizing Program) Computer Code의 일부로서 관련분야 연구원의 조언과 Up-Data가 요망된다.

참고문헌

- 1] A. Davenas, "Solid Rocket Propulsion Technology", Pergamon Press Ltd., 1993.
- 2] K. Mouri et al, "H-II Solid Rocket Booster Development Overview", AIAA 95-2737
- 3] NASA SP-8076, "Solid Propellant Grain Design and Internal Ballistics", March 1972.
- 4] A.E. Oberth, "Principles of Solid Propellant Development", DoD I.A. Center, March 1987.
- 5] 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.
- 6] J.L. Thurman, "Computer Program for Sizing and Performance analysis of Solid Propellant Rocket Motor", MS-ABMDA-1683, Nov. 1972.

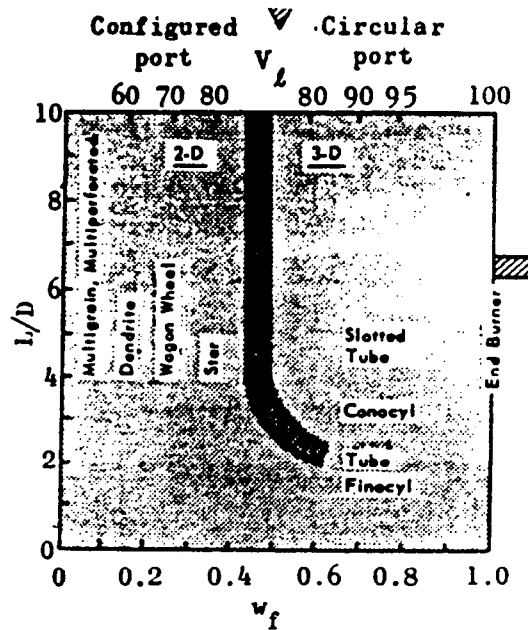


그림 6) 2D & 3D 그레인과 충전률

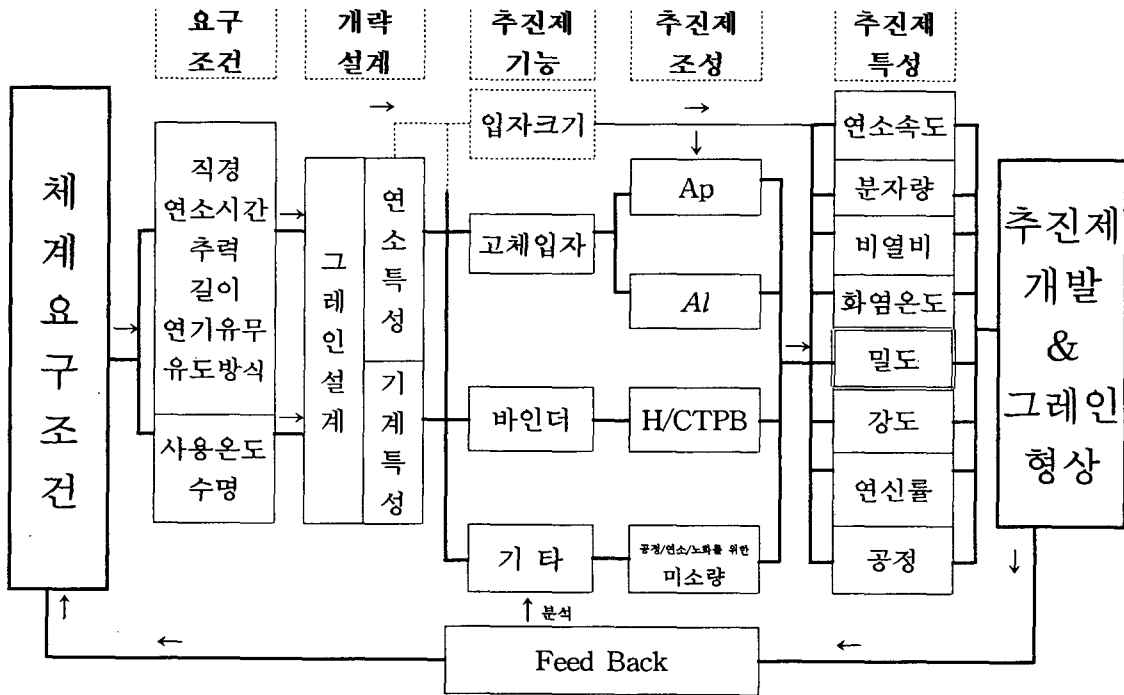


그림 1) 추진기관 개발을 위한 체계요구조건과 추진제간의 상관관계

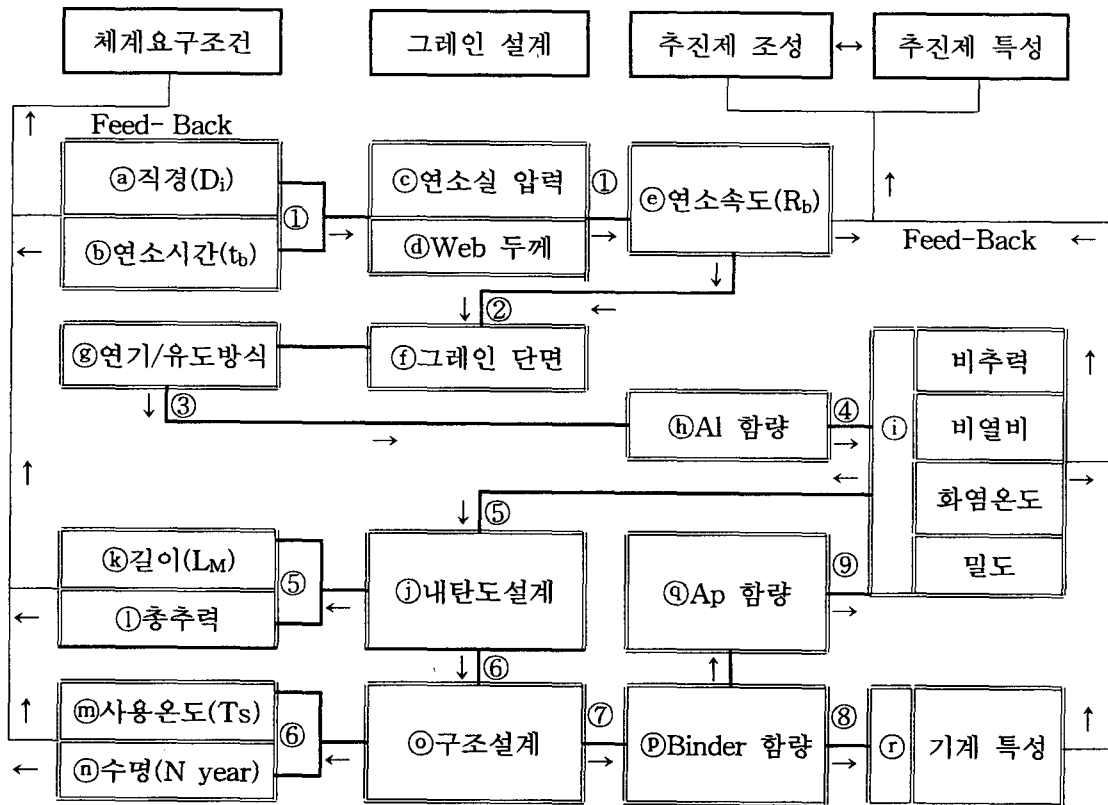


그림 2) 추진기관 설계와 추진제 개발규격 정립 과정

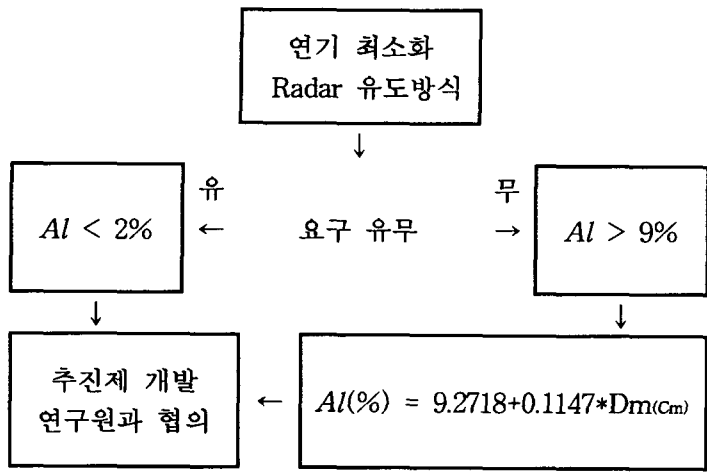


그림 3) 체계요구조건에 따른 Al함량 결정

$y = 85.621 - 0.88212x \quad R^2 = 0.993$

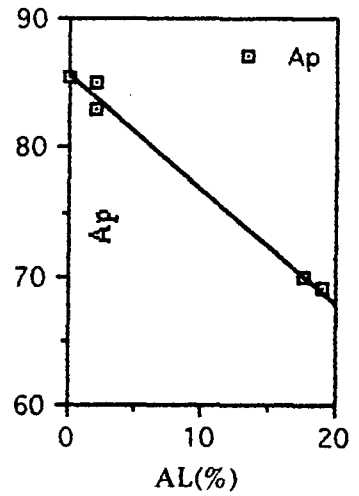
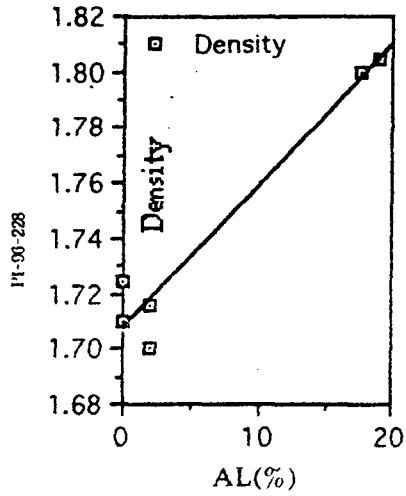


그림 4) Ap-Al 함량 관계

$y = 1.7080 + 5.1154e-3x \quad R^2 = 0.946$



$y = 2.1987 - 5.7268e-3x \quad R^2 = 0.929$

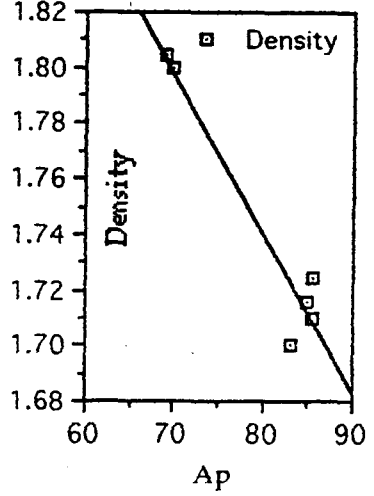
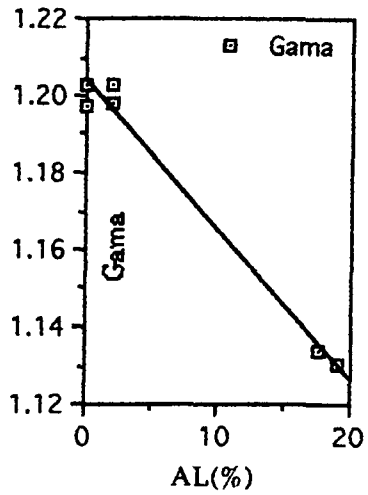
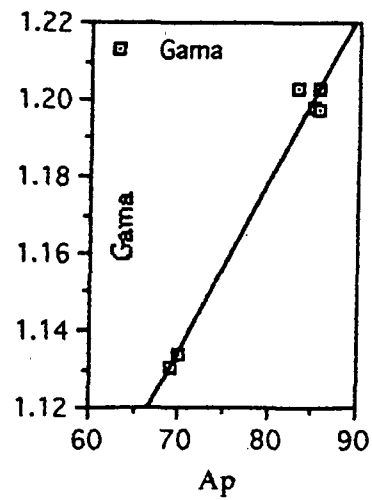


그림 5a) Ap과 Al 함량에 따른 추진제 밀도

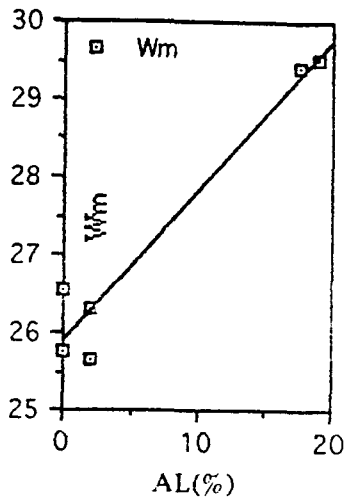
$$y = 1.2039 - 3.9017e-3x \quad R^2 = 0.986$$



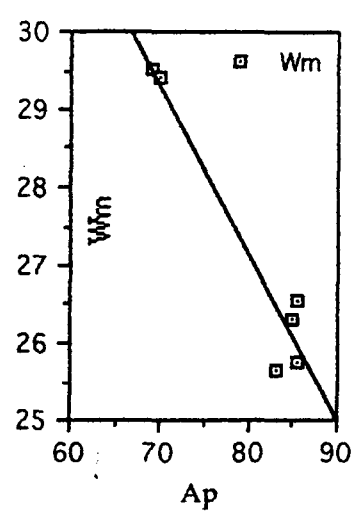
$$y = 0.82809 + 4.3867e-3x \quad R^2 = 0.976$$



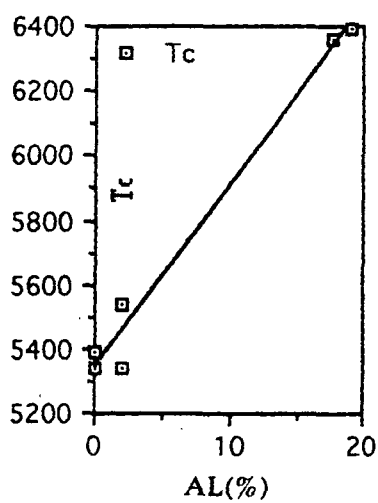
$$y = 25.897 + 0.19356x \quad R^2 = 0.948$$



$$y = 44.447 - 0.21644x \quad R^2 = 0.928$$



$$y = 5347.4 + 56.083x \quad R^2 = 0.981$$



$$y = 1.0712e+4 - 62.584x \quad R^2 = 0.957$$

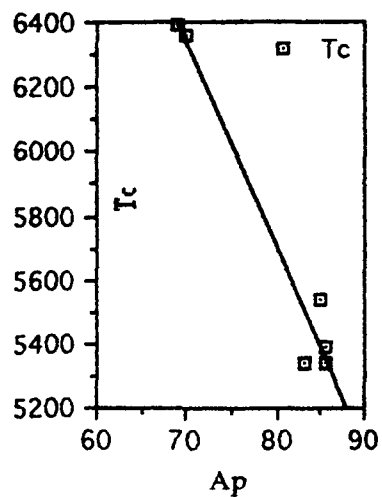


그림 5b) Ap과 Al 함량에 따른 연소가스 특성

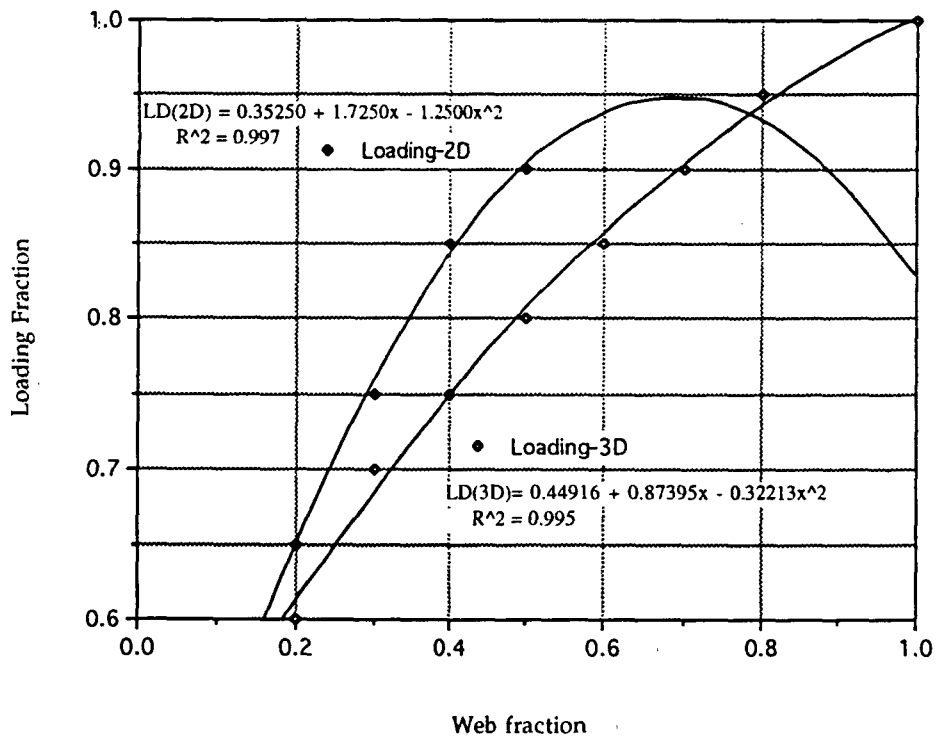
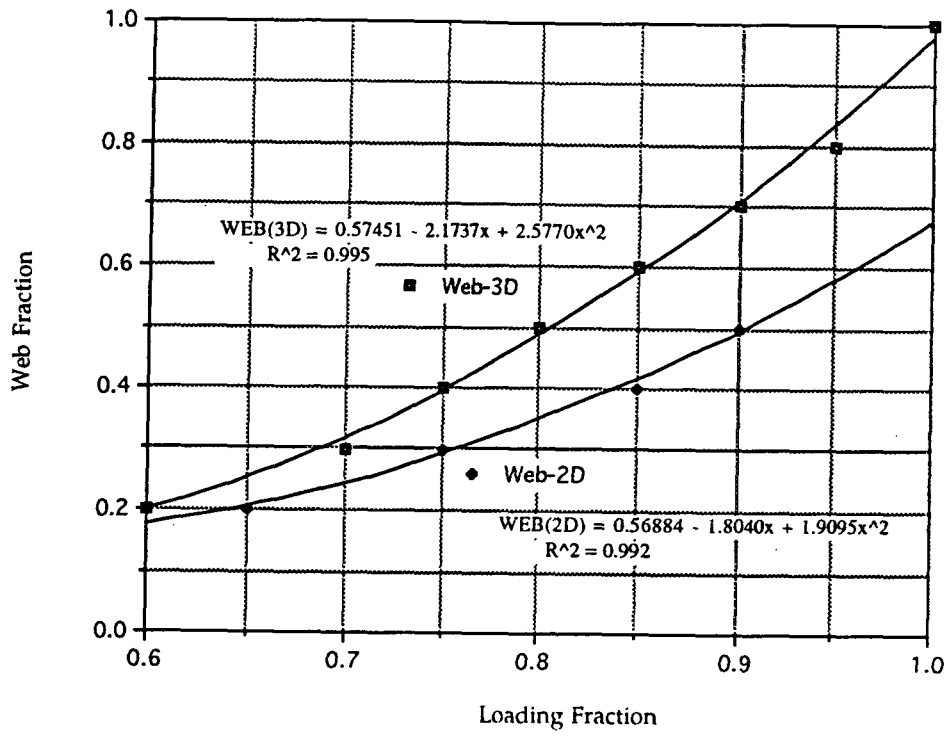


그림 7) 충전률과 Web Fraction의 상관관계

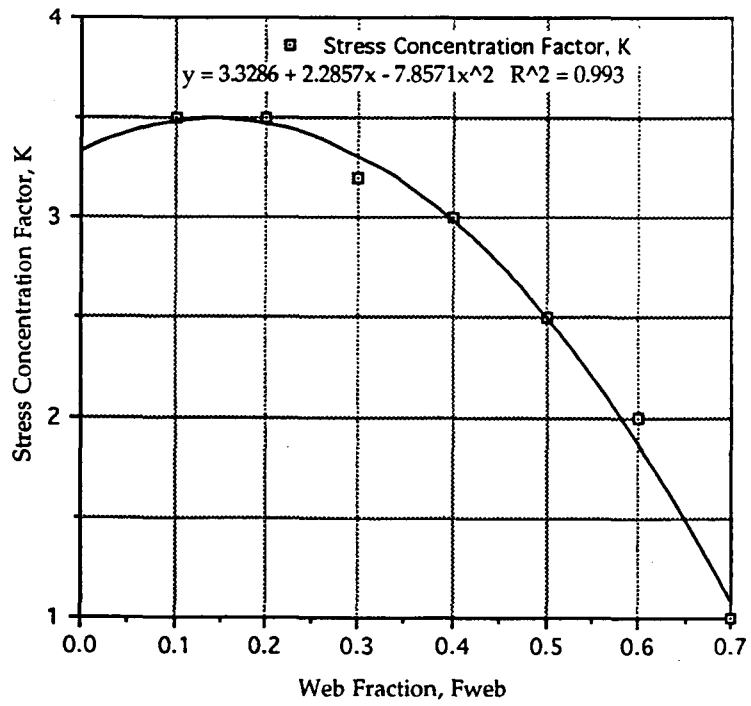
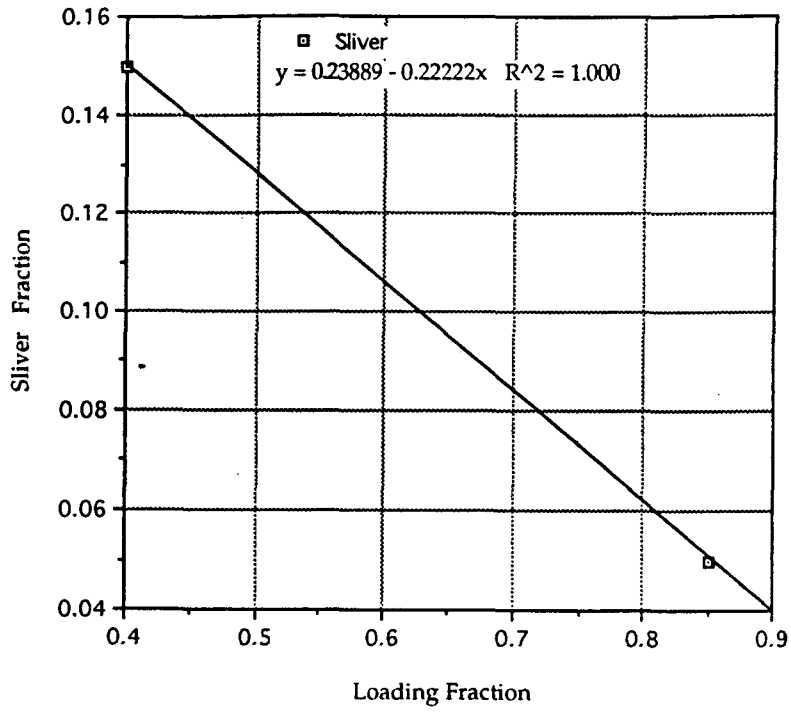


그림 8) Web Fraction과 Sliver Fraction에 대한 응력집중 계수

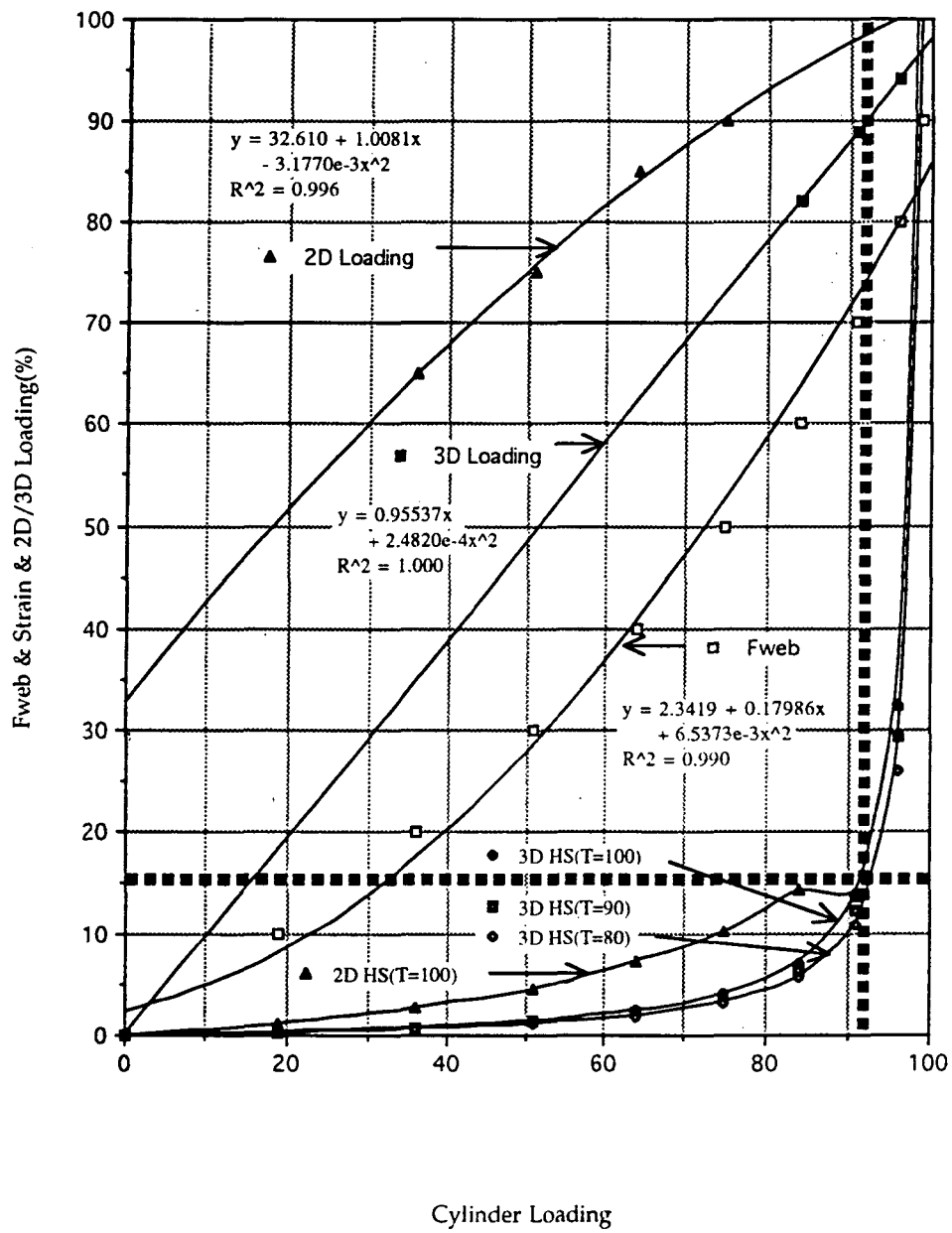


그림 9) 충전률에 따른 Web Fraction과 추진제 작용응력

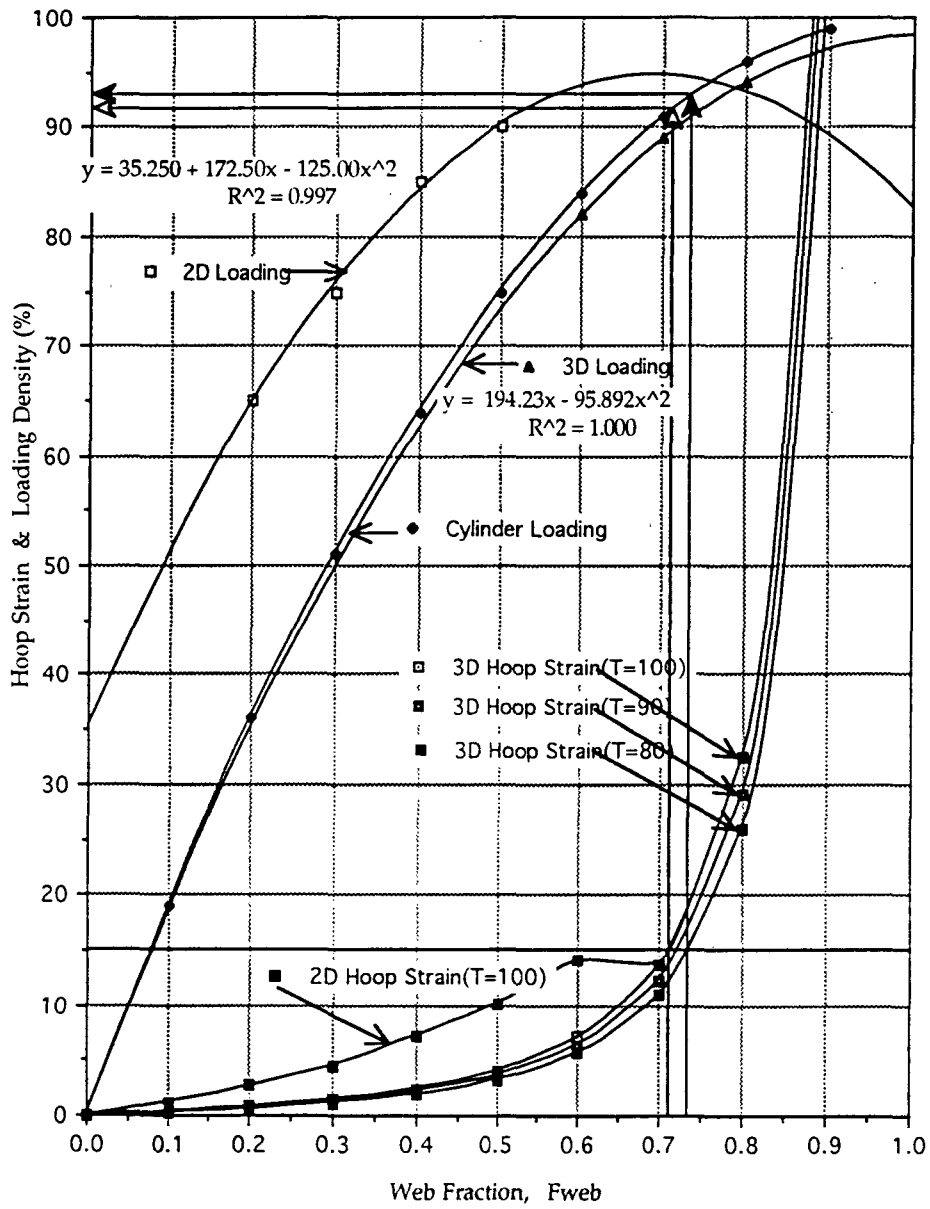


그림 10) Web Fraction에 따른 충전률과 추진제 작용응력

표 1) 추진제 조성에 따른 일반적 특성

추진제		(Isp) _{max} /sec	최대밀도 (g/cc)	연소속도@ 1000 Psia		온도 민감도	충전 상태	연기	Hazard Class/ Card Gap Test	정전기 민감도	가격	
				mm/sec	n						공정	원료
C/PB	Non Al	240	1.73	4-60	0.3-0.5	저-중	FC	2	1.3/0	무	중	저
	Al	245	1.86	5.5-80	0.2-0.5	저-중	FC	1&2	1.3/0	중	중	저
E/DB		225	1.65	5-40	≅0	최저	FS	0	1.3/110	무	저	저
C/DB		215	1.60	4-22	≅0	최저	FS	0	1.3/100	무	고	저
C/CMDB		230	1.70	3-28	0-0.2	저	FC	0	1.3/150	무	고	중 (RDX)
CL/ DB	Non AP	245	1.79	10-25	0.45-0.6	중	CB	0	1.3/180	무	중	중 (RDX)
	Al Non AP	235	1.75	5-10				2				고 (RDX)
	Al	254	1.86	9-25	0.5-0.7	중	CB	1&2	1.3/180	무	중	고 (RDX)
C/ : Casted E/ : Extruded CL/Cross Linked		FS: Free Standing CB: Case Bonded FC: FS+CB					0: No Smoke 1: Primary 2: Secondary					

표 3) 추진제 연소속도와 그레인 설계에 따른 추진기관 직경과 연소시간 가능범위

추진제	연소속도 (mm/sec)		체계요구조건 Di/t _b 가능범위 (mm/sec)			
	@ 1000Psia	@ 800/1500	정상 F _{web} =0.2~0.8		설계특수조건 F _{web} =0.1~0.9	
기준	6.7~14.7	6.22~17.8	15.5~178		13.8~356	
개발가능	6.0~16.0	5.50~19.4	13.9~194		12.3~387	
Di/t _b (mm/scc)						
	12.3	13.8	15.5	178	194	356 387
불가능			정상			불가능
			특수 설계			
			추진제 개발			
			특수 설계+ 추진제 개발			

표 4) 추진제 그레인 형상에 따른 충전률 및 기타 제원

형상명	충전률 (%)	Web 두께	연소 면적	Neutrality	Sliver Fr.(%)	Web Fr.	L/D	충전 형태	특기 사항
Wagon Wheel	55-70	소	특대	상	5-10	0.1-0.3	∞	C&F	3초이내
Star	with Dome	75-90	중	중	중	5-10	0.285-0.6	∞	C&F
	Full	75-85	중	중	중	5-10	0.33-0.6	∞	CB
	Bipropellant	90	대	중	상	5이하	0.4-0.33	∞	CB
Slotted Tube	55-95	대	대	중	0	0.5-0.9	3-10	CB	
Trumpet	85-88	대	중	상	0	>0.5	<10	FS	
Finocyl	85-95	대	대	중상	0	0.6-0.9	2-4	CB	
Axil	88-93	중	대	상	5	0.33	1	CB	
Axar	88-95	대	대	중상	0	0.2-0.5	∞	CB	
End-burning	98-100	특대	소	상	0	1	∞	C&F	소추력

표 7) 2D & 3D 그레인의 충전률과 Web Fraction 및 Sliver 관계식

Web Fraction	$F_{web}(2D) = 0.569 - 1.80 \times F_{Loading} + 1.91 \times F_{Loading}^2$
	$F_{web}(3D) = 0.575 - 2.17 \times F_{Loading} + 2.58 \times F_{Loading}^2$
Loading Fraction	$F_{Loading}(2D) = 0.35 + 1.73 \times F_{web} + 1.25 \times F_{web}^2$
	$F_{Loading}(3D) = 0.45 + 0.87 \times F_{web} - 0.32 \times F_{web}^2$
Sliver Fraction	$F_{Sliver} = 0.24 - 0.22 \times F_{Loading}$

표 8) 추진제 특성치의 수식과 상수

관계식: $f = a + bX + cY$, where $X = A/l$, $Y = Ap$ (단위: 무게 백분율)				
특성치(f)	a	b	c	비고
밀도(g/cc)	1.167	1.059	0.6337	
화염온도(°R)	-2,465	13,720	9,109	
비열비(r)	1.303	-0.4931	0.1156	
분자량(M)	12.26	33.52	15.91	

본 논문에 수록되지 않은 표는 발표시 제시함.