

금속-물반응연료의 실험적연구

김정혁, 장명수, 고성진

위대한 수령 김일성 동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《과학자들은 우리 나라의 현실이 요구하는 문제를 연구하여야 하며 우리 인민에게 필요한것을 만들어 내기 위하여 노력하여야 합니다.》(《김일성전집》 제35권 374페이지)

금속-물반응연료는 물반응금속연소제와 산화제, 결합제, 연소안정제, 촉매를 비롯한 몇개의 고체 및 액체물질들이 혼합되어 하나의 분체계를 이루는 고밀도에너지재료이다.

연료의 에네르기밀도를 높이기 위하여 산화제는 1차정상연소를 보장할 량만큼 넣어 주고 물반응금속연소제의 량은 많아야 한다. 결합제량은 연료에 들어가는 고체물질들의 량과 립도, 연료제작기술에 따라 달라진다. 최근 복합금속연소제(Mg/Al 0.72)를 리용하여 금속포함량 60%, 전체 고체포함량 84%인 금속-물반응연료를 주조성형기술로 제작하였다.[4] 이때 밀도가 큰 Al의 량은 늘이고 밀도가 작은 Mg의 량은 줄이는 방법으로 연료의 에네르기밀도를 보장하며 Mg의 량을 늘이면 내면연소분출효율은 높아진다.

분체계의 모든 립자들을 립면체충전하는 경우 기공체적 $0.18D^3$ (D 는 립경), 공간을 25.95%, 충전률 74.05%인 최밀충전상태를 보장할수 있지만 실제로 최밀충전상태에서 분체계의 공간률은 보통 35%정도이다.[1]

Mg계물반응연료에서 Mg의 결보기밀도($0.35 \sim 0.85\text{g/cm}^3$)가 작으므로 연료의 에네르기밀도를 보장하기 위하여 결합제량을 줄이고 금속포함량을 늘이면 연료분체작이 어렵다.[2] 또한 압착성형기술로 제조한 시험연료봉을 선연소시킬 때 연소실압력에서 불안정한 맥동현상이 나타나는것은 연료봉을 수공업적으로 불균일하게 제작한데 있으며 따라서 주조성형기술을 리용하여야 한다. 50~65%의 Mg를 포함하고 산화제로 Z-1을 넣은 금속-물반응연료의 1차연소속도는 2.0MPa에서 $1.35 \sim 7.92\text{mm/s}$ 이고 분출효율은 88.3~95.2%이다.[3]

Al계물반응연료에서 산화제 Z-1은 열분해과정에 HCl을 내보낸다.

우리는 Al, Mg복합금속연소제와 결합제, 산화제(Z-1, Z-2)로 연료를 구성하고 성분물질들의 포함량과 립도에 따르는 연료의 충전률평가프로그램을 작성하여 주조성형기술로 제작한 시험연료봉의 충전률을 평가하였다. 또한 산화제 Z-2를 넣을 때 연소반응과정에 대한 분석에 기초하여 대기압조건에서 연료봉의 연소특성을 실험적으로 연구하였다.

1. 연료의 충전률평가프로그램의 이론적기초

결정구조에 따르는 분체계의 충전률 분체계를 구성하는 모든 립자들을 고른 구모양으로 가정하고 결정구조에 따르는 충전상태를 계산한 결과는 표 1과 같다.

표 1에서 보는바와 같이 결정구조에 따라 분체계의 공간률은 이론적으로 28~48%이다.

표 1. 결정구조에 따르는 충전상태

결정구조	기공체적/ D^3	공간률/%	충전률/%	충전상태
사방정계(립방충전)	0.477	47.7	52.3	가장 성금
등축정계	0.343	39.6	60.4	중간정도
삼방정계(릉면체충전)	0.207	28.4	71.6	최밀충전

립도가 서로 다른 성분들의 질량비 립도가 서로 다른 립자들로 분체계를 형성하면 최밀 충전상태를 실현할수 있다.

단위질량의 분체계에서 큰 립자의 질량을 m_1 , 밀도를 δ_1 , 공간률을 ε_1 이라고 하면 $\omega_1 = (1 - \varepsilon_1) \cdot \delta_1$ 이다. 마찬가지로 작은 립자의 질량은 $\omega_2 = (1 - \varepsilon_2) \cdot \delta_2$ 이다.

두가지 립도로 구성된 립자계에서 큰 립자의 질량비는 다음과 같다.

$$Z = m_1 / (m_1 + m_2) = ((1 - \varepsilon_1) \cdot \delta_1) / ((1 - \varepsilon_1) \cdot \delta_1 + (1 - \varepsilon_2) \cdot \delta_2 \cdot \varepsilon_1)$$

만일 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$, $\delta_1 = \delta_2$ 라면 다음과 같다.

$$Z = 1 / (1 + \varepsilon) \quad (1)$$

세가지이상의 립도로 구성된 립자계에서 질량비도 같은 방법으로 계산할수 있다.

분체계의 단위질량에 대한 결합제의 충전량 공간률에 따르는 분체계의 충전체적 V_b , 고체의 체적 V_t , 공간체적 V_a 는 다음과 같다.

$$V_b = V_t / (1 - \varepsilon), \quad V_t = \sum_i (\omega_i / \delta_i), \quad V_a = V_b - V_t = \varepsilon \cdot V_b$$

분체계의 밀도는 $\rho = 1 / V_t = 1 / \sum_i (\omega_i / \delta_i)$ 이다. (δ_i 성분들의 밀도, ω_i 포함량)

결합제가 몇개의 물질들로 구성된다면 결합제의 밀도는 다음과 같다.

$$\delta_b = \sum_j \omega_j \cdot \delta_j \quad (2)$$

따라서 공간률에 따르는 분체계단위질량에 대한 결합제의 충전량은 다음과 같다.

$$\omega_B = V_a \cdot \delta_b = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \cdot V_t \cdot \delta_b \quad (3)$$

다성분분체계의 밀도 ρ 와 결합제의 밀도 δ_b 를 알고 공간률 ε 이 주어지면 최밀충전에 필요한 결합제의 충전량을 알수 있다. 즉 다성분분체계의 충전률을 예측할수 있다.

2. 실험 결과

금속-물반응연료를 구성하는 원료들의 특성은 표 2와 같다.

연료의 에네르기밀도와 최밀충전 상태를 보장하기 위하여 계산프로그램으로부터 얻어진 연료조성방안들에 기초하여 주조성형기술로 연료봉을 제작하기 위한 기초실험을 하였다.

표 2. 원료들의 밀도와 립도

원료	Al	Mg		산화제		결합제
		1	2	Z-1	Z-2	
밀도/(g·cm ⁻³)	2.74	1.74	1.74	1.87	2.1	0.96
립도/ μ m	17	150	<88	6	10	—

기초실험에서는 금속포함량을 65%, Al/Mg=1.5, 전체 고체포함량을 85.75%로 하고 금속포함량과 Mg/Al질량비, 결합제량, 산화제종류에 따르는 반죽물의 반죽성과 흐름성, 대기압조건에서 1차연소성능을 평가하였다.

기초실험결과들로부터 얻어진 연료조성방안들은 표 3과 같다.

표 3. 연료조성방안

연료조성	Al/%	Mg/%		산화제/%		결합제/%	밀도/(g·cm ⁻³)	공간률/%	생성열/(kJ·kg ⁻¹)
		1	2	Z-1	Z-2				
방안 1	38.0	27.0	—	20.3	—	14.25	1.825	26.87	—905.2
방안 2	39.0	26.0	—	10.3	10.0	14.25	1.85	27.3	—1 207.3
방안 3	39.0		26.0	—	20.55	14.0	1.87	27.2	—1 526.1

세가지 방안에 따르는 시험연료봉(ϕ 21mm×74mm)을 제작하고 대기압조건에서 연소시키면서 연소특성을 평가하였다. 시험연료봉은 반죽물을 철판안에 다져넣고 70~80℃에서 24h동안 건조시킨것이며 이것을 연소시험대에서 연소시키면서 수자식촬영기로 관측하였다.

연료봉의 길이를 연소시간으로 나누는 방법으로 선연소속도를 계산하였으며 분출효율은 장입된 연료질량과 연소후 철판안에 남아있는 잔여물의 질량비로 평가하였다.

상대충전률은 이론적인 최밀충전밀도와 연료봉밀도의 상대오차로 평가하였다.

대기압연소실험결과는 표 4와 같다.

표 4. 대기압연소실험결과

연료조성	연소특성	연소시간/s	연소속도/(mm·s ⁻¹)	분출효율/%	밀도/(g·cm ⁻³)	상대충전률/%
방안 1	정상연소	>55	~1.27	93.9	1.737	4.80
방안 2	정상연소	>95	0.68~0.74	87.8	1.757	5.02
방안 3	연소중단	—	—	—	1.770	5.03

표 4에서 보는바와 같이 방안 3의 연료봉은 대기압조건에서 정상연소되지 못한다. 그것은 산화제인 Z-2의 열분해온도가 Z-1에 비하여 2배로 높고 실험에서 발생하는 분해열들이 열전도와 대기확산에 의하여 연소면에 집중되지 못하고 루실되어 초기연소온도를 보장하지 못하기때문이다.

모든 연료봉시편들은 이론최밀충전상태에 접근하였다. 상대충전률이 비교적 큰것은 시험연료봉을 실험실조건에서 수공업적으로 제작하였기때문이다.

표 4에서 보는바와 같이 Z-2를 첨가하면 연료의 생성열과 연소시간은 증가하고 연소속도와 분출효율은 반대로 줄어든다. 이것은 선행연구결과[3, 4]와 잘 일치하며 적당한 연소안정제를 넣으면 Z-2의 포함량을 조절하여 금속-물반응연료의 연소속도와 연소시간을 충분히 조종할수 있다는것을 보여준다.

맺 는 말

최밀충전상태의 이론적인 연료밀도와 제작된 연료봉의 밀도는 3~5%의 상대오차를 가지고 잘 일치하며 실제상 최밀충전상태에 접근하였다. 복합금속연소제(Al/Mg=1.5)를 넣어 금속포함량을 65%로, 전체 고체포함량을 85.75%로 보장하였다.

연료성분물질들의 립도와 포함량을 잘 조절하면 반죽성과 흐름성을 개선할수 있다.

산화제 Z-2를 10% 첨가하면 대기압조건에서 선연소속도는 1/2배 작아지고 분출효율은 87.8%로 작아진다. 또한 산화제 Z-2의 포함량을 조절하여 연소온도와 압력에 따라 금속-물반응연료의 연소속도와 연소시간을 충분히 조절할수 있다.

참 고 문 헌

- [1] H. T. Huang et al.; Combustion, Explosion and Shock Waves, **49**, 5, 541, 2013.
- [2] 李是良 等; Journal of National University of Defense Technology, **29**, 1, 35, 2007.
- [3] 李是良 等; Journal of Solid Rocket Technology, **32**, 2, 197, 2009.
- [4] 王建儒; <http://www.cnki.net>, 水冲压发动机原理性研究, 23~27, 2004.

주제 105(2016)년 7월 5일 원고접수

Experimental Study on the Metal-based Hydro-Reactive Fuel

Kim Jong Hyok, Jang Myong Su and Ko Song Jin

The density of manufactured fuel rod agree well with one of theoretical densest fuel as relative error of 3~5%.

We made fuel rod which have about 65% metal and about 85.75% solid using composite metal combustion material(Al/Mg=1.5). If we control the grain size and compositions of fuel, we can improve its slurry degree and fluidity. When adding 10% of oxidizer Z-2, line burning rate would decrease by half and its explosion efficiency to 87.8%. In conclusion, adjusting the quantity of the oxidizer Z-2, we can control the burning rate and time of metal-based hydro-reactive fuel according to the temperature and pressure.

Key words: metal-based hydro-reactive fuel, line burning rate, oxidizer