

## 혼합형 고체 추진제의 연소 속도에 관한 연구

임유진 · 노만균\* · 이승무

연세대학교 공과대학 화학공학과 \*홍능기계  
(1983년 9월 13일 접수, 1983년 12월 14일 채택)

## A Study on the Burning Rate of Composite Solid Propellant

Yoo-Jin Yim, \*Man-Kyun Rho, and Sung-Moo Lee

Department of Chem. Eng., Yonsei Univ., Seoul 120, R. O. K.

\*Hongneung Machin Co.

(Received 13 September 1983; accepted 14 December 1983)

### 〈요 약〉

혼합형 고체 추진제의 연소 속도를 이론적으로 계산함에 있어서 불꽃을 형성하고 있는 기체의 비열, 열전도도와 점도 등은 추진제의 조성 과 불꽃의 종류에 따라 각각 다르다고 보았으며, 화산 불꽃의 거리는 ammonium perchlorate (AP) 입자와 binder간의 거리에만 비례한다고 가정하였다. 또한 aluminium (Al) 이 있는 추진제에서는 Al이 점화되기 전까지 열수체 역할을 한다고 가정함으로써 에너지 수지식에서 필요한 불꽃의 온도를 보정하여 사용하였다.

본 실험에서 binder는 carboxyl terminated polybutadiene 또는 hydroxyl terminated polybutadiene 을, 산화제는 AP를 그리고 금속 연료로서는 Al을 사용하여 추진제를 제조하였으며 이들 추진제의 연소 속도를 실험 측정하여 이론치와 비교 고찰 하였다.

Bimodal AP 추진제에서 입자가 큰 AP의 함량이 증가할수록 연소 속도의 감소 폭이 작아지는 것으로 나타났으며, AP의 함량이 62~70% 범위인 추진제에서는 AP의 함량이 감소할수록 pressure exponent의 값이 증가하였다.

**Abstract**— This study was carried out to predict the burning rate of composite solid propellant through the burning mechanism. In this investigation, specific heat, thermal conductivity and viscosity of flame gas mixture were treated as dependent variables of propellant compositions and flames. The diffusion flame height was assumed to be proportional to the only distance between ammonium perchlorate (AP) particle and binder. For the aluminized propellant, aluminium (Al) was assumed to act as heat sink until the ignition of Al, thereby flame temperatures were corrected in energy balance.

The burning rates of the propellants that were prepared with carboxyl or hydroxyl terminated polybutadiene as a binder, AP as an oxidizer and Al as a metal fuel, were measured by strand burner method.

In a bimodal AP composite propellant, the decreasing gap of the burning rate became smaller as the amount of coarse AP was increased. When the amount of AP contained from 62% to 70% in the propellant, the pressure exponent was suddenly increased as AP content was decreased.

## 1. 서론

현재 추진기관에는 대부분이 고체 연료를 사용하고 있으며, 또 이러한 추진기관의 대다수가 혼합형 고체 추진제로 충전되어 있다[13, 15]. 혼합형 고체 추진제는 고분자질 binder와 입자 크기가 1  $\mu\text{m}$  이하로 부터 수 백  $\mu\text{m}$  되는 산화제로 구성된 혼합물이며 현재 산화제로서는 주로 ammonium perchlorate (이하 AP라 약칭함) 결정체를 사용하고 있다.[1, 11, 17, 18]. 그러나 연료의 비추력을 상승시키고 동시에 연소시 압력의 변동 현상을 감소시키기 위하여 금속 연료와 함께 사용하고 있다[21, 28, 30]. 최근에는 금속 연료로서 주로 aluminium (이하 Al이라 약칭함)을 사용하고 있는데, 그 이유는 독성이 없고 밀도가 높으며 혼합형 고체 추진제의 점화 및 연소성을 향상시키기 때문이다[12, 22].

고체 추진제의 내탄도 정전중에서도 가장 중요하게 여겨고 있는 것은 연소 속도이며, 고체 추진제의 연소 속도에 대한 연구가 오래전부터 시작되어 현재까지도 활발히 진행되고 있다[4, 13]. 특히 Al이 함유된 고체 추진제의 연소 속도에 관한 이론적 연구내용을 최근에 와서 Beckstad[6], Cohen[14] 그리고 Renie 와 Osborn[28, 29] 등이 발표한 바 있다.

본 연구에서는 Gibbs 자유 에너지의 최소화 방법에 의한 열역학적 화학 평형[33, 34]을 이용하여 모든 열역학적 특성과 전달 특성치를 추진제의 조성 및 불꽃의 종류에 따라 변하는 값으로 다루었으며, 화산 불꽃의 거리를 새로이 가정하였다. 또한 Al이 함유된 고체 추진제의 연소 속도에 대한 이론치가 실험치와 상당한 차이가 있기 때문에 [24, 28] Al이 함유된 고체 추진제의 에너지 관계를 새로이 제시하여 실험치와 이론치가 좀 더 잘 부합되도록 하였다.

## 2. 이론적 고찰

혼합형 고체 추진제의 연소 속도를 이론적으로 계산하기 위하여 본 연구에서는 기존 연소 모델에 있어서 다음과 같은 사항을 보완 수정하였다.

- 1) 에너지 수지식에서 AP와 Al의 비열은 온도의 함수로 나타내어 사용하였고, AP의 선이열과 용해열을 고려해 주었다.
- 2) 고체 추진제의 연소시 형성되는 불꽃의 비열, 열전도도와 점도는 불꽃의 종류와 고체 추진제의 조성에 따라 다르다고 보았다[33, 34].
- 3) 화산 불꽃의 거리는 AP와 binder간의 거리에만 비례한다고 가정하였다.
- 4) Al이 함유된 고체 추진제에서는 Al이 점화되기 전까지 열수체 역할을 하며, 이로 인 하여 화산 불꽃의 온도와 일차 불꽃의 온도가 낮아진다고 가정하였다.

### 2-1. 에너지 수지

고체 추진제의 연소 현상을 삼차원적인 비정상 상태로 표현하는 것이 타당하지만 [9, 16] 수식을 간단하게 하기 위하여 일차원적인 정상 상태로 가정하였고, 각각의 불꽃으로부터 추진제 표면으로 전달되는 에너지가 추진제의 표면 온도를 상승시키지 수적인 연소 현상이 일어난다고 가정하여 전체 에너지에 대한 수지식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & m_B S_B \{ C_B (T_{SB} - T_0) + \Delta H_B + (\alpha_{AL} / \alpha_B) \{ \int_{T_0}^{T_{SB}} C_{AL} dT + C_{ALL} (T_{SB} - T_L) + \Delta H_{AL} \} \} \text{ (binder와 Al을 초기 온도 } T_0 \text{에서 연소시 표면 온도 } T_{SB} \text{까지 상승시키는데 필요한 에너지량)} \\
 & + m_{OX} S_{OX} \{ \int_{T_0}^{T_{PF}} C_{POr} dT + \Delta H_{Tr} + \int_{T_{PF}}^{T_m} C_{PCu} dT + \Delta H_m + C_{PI} (T_s - T_m) + \Delta H_d \} \text{ (산화제인 AP를 초기 온도 } T_0 \text{에서 연소시 표면 온도 } T_s \text{까지 상승시키는데 필요한 에너지량)} \\
 & = \beta_{PF} (m_{OX} S_{OX} + m_B S_B) Q_{PF} \exp(-\xi_{PF}) \\
 & \quad \text{(일차 불꽃으로부터 전달되는 에너지량)} \quad \text{--- (1)} \\
 & + (1 - \beta_{PF}) m_{OX} S_{OX} Q_{AP} \exp(-\xi_{AP}) \text{ (AP 불꽃으로부터 전달되는 에너지량)} \\
 & + (1 - \beta_{PF}) (m_{OX} S_{OX} + m_B S_B) Q_{DF} \exp(-\xi_{DF}) \\
 & \quad \text{(확산불꽃으로부터 전달되는 에너지량)} \\
 & + m_{AL} S_B Q_{AL} \exp(-\xi_{AL}) \\
 & \quad \text{(Al 불꽃으로부터 전달되는 에너지량)}
 \end{aligned}$$

식(1)로부터 산화제의 표면 온도  $T_s$  또는 binder의 표면 온도  $T_{SB}$ 를 계산하여 표면 열 분해식[8, 13]에 의하여 고체 추진제의 연소 속도를 계산하게 된다. 또한 식(1)에서  $\beta_{PF}$  [13]는 0 ~ 1 사이에 존

제하는 수치로서 산화제인 AP가 분해된 총량에서 일차 불꽃으로 간 분율을 나타낸다.

화산 불꽃의 거리는 일차 불꽃의 거리에도 직접 관계가 있는 중요한 인자로써 [2] 현재까지 여러 종류로 표현되어 사용되었다 [10, 13, 25, 32, ]. 그러나 본 연구에서는 Beckstead [5]가 제안한 화산 불꽃 거리를 좀 더 단순화하여 단지 AP 입자와 binder 간의 거리인  $b_i$ 에만 비례한다고 가정하였다.

$$X_D \propto b_i$$

식 (1)에서 나타난 무차원거리 ( $\xi$ )는 화산 불꽃과 일차 불꽃의 경우에  $X_D$ 에 직접 비례한다. 여기서 비례 계수는 0.7를 사용하였으며 일차 불꽃 거리는 화학반응에 필요한 불꽃 거리를 사용하였다. [8]

식 (1)에서 나타난 각 불꽃에서의 에너지인  $Q$ 는 BDP model [8, 15]에서 제시한 표현과 유사하지만 AP불꽃에서의 에너지량  $Q_{AP}$ 와 Al불꽃의 에너지량  $Q_{AL}$ 에 대한 표현은 다르게 된 수, AP의 질이열과 용해열을 고려해 주었고 비열은 온도의 함수 형태로 나타내어 사용하였다. 또한 각 불꽃을 형성하고 있는 기체의 비열은 불꽃의 종류에 따라 그 값이 각각 다르다고 보고 온도범위에서의 평균치를 사용하였다. 액체 성분의 비열은 참고문헌 (35)의 값을 사용하였다.

$$Q_{AP} = \int_{T_0}^{T_{AP}} C_{POrd} dT + \Delta H_{tr} + \int_{T_{tr}}^{T_{AP}} C_{PCu} dT + \Delta H_m + C_{PI} (T_S - T_m) + \Delta H_d + C_{PAF} (T_{AP} - T_S) \quad (3)$$

$$Q_{PF} = \frac{\alpha_B}{\alpha_{OX} + \alpha_B} [C_B (T_{SB} - T_0) + \Delta H_B + C_{BG} (T_{PF} - T_{SB})] + \frac{\alpha_B}{\alpha_{OX} + \alpha_B} [Q_{AP} + C_{PPF} (T_{PF} - T_{AP})] \quad (4)$$

$$Q_{DF} = \frac{\alpha_B}{\alpha_{OX} + \alpha_B} [C_B (T_{SB} - T_0) + \Delta H_B + C_{BG} (T_{DF} - T_{SB})] + \frac{\alpha_{OX}}{\alpha_{OX} + \alpha_B} [C_{PDF} (T_{DF} - T_{AP})] \quad (5)$$

$$Q_{AL} = \int_{T_0}^{T_{AL}} C_{AL} dT + \Delta H_{AL} + C_{ALL} (T_{SB} - T_L) + C_{PAL} (T_{AL} - T_{SB}) \quad (6)$$

식 (4)와 (5)에서  $C_{BG}$ 는 binder의 열분해시에 생성된 기체의 비열이다. 식(4)에서 필요한 일차불꽃의 온도  $T_{PF}$ 는 Cohen [14]의 제안에 따라 계산하면서 압력의 영향도 동시에 고려하였다.

## 2-2. Al에 대한 에너지 보정

고체 추진제에서 Al이 함유된 경우에 추진제 표면을 떠나는 Al입자는 일부 녹아서 합체 현상이

일어난 Al과 합체가 되지 않은 Al이 섞인 상태이므로, 본 연구에서는 추진제 표면을 떠나는 Al의 중량 평균 임경을 다음의 식에 의해 새로이 구하여 모멘텀 수치식 [28]과 Al입자의 침화 지연 시간 [6]을 고려하여 Al의 침화 거리를 계산하였다.

$$D_{AL} = (1 - A) D_{OAL} + A D_{agge} \quad (7)$$

여기서  $D_{OAL}$ 과  $D_{agge}$  [6]은 합체가 안된 Al과 합체가 된 Al의 중량 평균 임경이며  $A$ 는 합체된 Al의 질량 분율이다.

Al이 침화되는 지점을 Al불꽃이 존재하는 지점으로 가정하였으며, Al이 침화되기 전까지는 열수제 역할을 함으로써 주위의 기체 온도는 Al이 없는 경우보다 더 낮아진다고 보았다. 그래서 Al이 침화되는 지점에 도달하였을 때 Al입자의 온도가 주위 기체의 온도와 같게 된다고 가정하여 Al이 함유된 고체 추진제에서는 일차 불꽃 온도와 화산 불꽃 온도를 보정하였다.

Al 입자의 온도와 Al주위에 존재하는 불꽃의 온도가 같게 되었을 때의 평형 온도를  $T_{eq}$ 라 하면, Al이 추진제의 연소 표면에 있을 때의 온도  $T_{SB}$ 에서  $T_{eq}$ 로 되는데 필요한 열량은 Al주위에 있는 기체가 빼앗긴 열량과 같으므로

$$C_{ALL} \alpha_{AL} (T_{eq} - T_{SB}) = C_{PDF} (1 - \alpha_{AL}) (T_{DF} - T_{eq}) \quad (8)$$

여기서 얻어진  $T_{eq}$ 를 식(5)와 식(6)에서  $T_{AL}$ 과 화산불꽃의 온도로 사용하였다.

또한 AP와 binder가 분해된 기체는  $\beta_{PF}$ 만큼 일차 불꽃에서 반응하고 나머지  $(1 - \beta_{PF})$ 만큼 반응은 화산 불꽃에서 반응하므로 일차 불꽃의 온도 역시  $(T_{DF} - T_{eq})$ 만큼 낮아진다고 가정하였다. Al이 존재하는 추진제에서 일차 불꽃의 온도는

$$T'_{PF} = T_{PF} - (T_{DF} - T_{eq}) \quad (9)$$

식(9)에서  $T'_{PF}$ 는 Al이 존재하는 추진제에서 Al 때문에 보정된 일차 불꽃의 온도이다.

## 2-3. 추진제의 연소 속도

전항에서 제시한 에너지 관계식을 이용하여 Ap의 각 입자 크기에 따른 연소 속도 ( $r$ )를 계산한 후에, 산화제인 AP의 입도 분포에 대한 영향을 고려함으로써 실제 추진제의 연소 속도는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\gamma = \sum_{n=1}^m \frac{\alpha_{oxn}}{\alpha_{ox}} \int_{r_{min}}^{r_{max,n}} r f_n dr \quad (10)$$

식(10)에서  $f_n$ 은 mode가  $n$ 인 AP의 입자크기에 대한 화율분포 함수(15, 27)이며  $D_{max, n}$ 과  $D_{min, n}$ 은 mode가  $n$ 인 AP의 최대 입경과 최소 입경이다. 또한  $\alpha_{oxn}$ 은 mode가  $n$ 인 산화제의 질량 분율이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. AP의 혼합비가 연소 속도에 미치는 영향

CTPB binder 14%에 산화제인 AP를 86% 넣어 만든 고체 추진제의 연소 속도 실험치를 Fig. 1에 도시하였다. Fig. 1에서 AP의 혼합비라는것은 중량 평균 입경이  $184\mu\text{m}$ 인 AP와  $7.5\mu\text{m}$ 인 AP의 상대적인 중량비를 나타낸다. 일반적으로 압력이 높을수록 연소 표면의 온도가 높으므로 추진제의 연소 속도가 빠르게 된다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 600~1200psia인 압력 범위에서 입자가 큰 AP의 함량이 많아질수록 추진제의 연소 속도는 감소하며 연소 속도의 감소폭은 점차 작아지고 있다. 또한 본 연구에서 이론식에 의해 계산한 연소속도는 Fig. 1에 동시에 도시하였는데 실험치와 잘 맞고

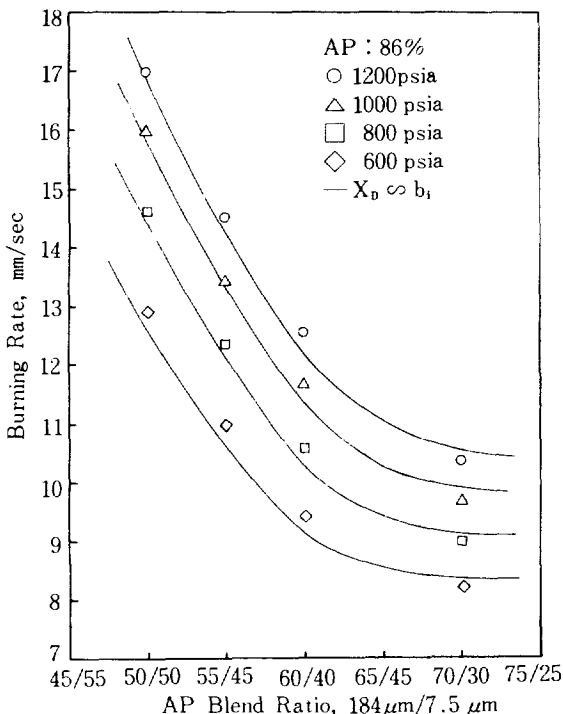


Fig. 1. Effect of AP Blend Ratio on the Burning Rate

-CTPB Propellant without Al.

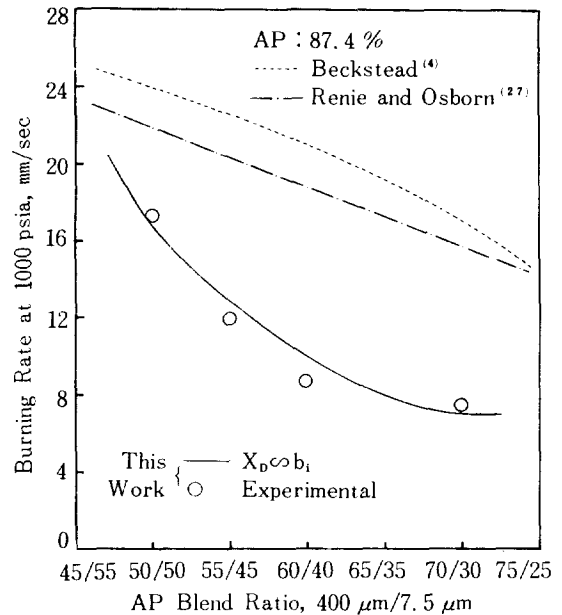


Fig. 2. Effect of AP Blend Ratio on the Burning Rate

-HTPB Propellant without Al.

있음을 알 수 있다.

HTPB계 binder에 AP를 87.4% 충전한 추진제의 연소 속도를 Fig. 2에 도시하였다. 이와 동시에 Beckstead[5], Renie와 Osborn[27]의 계산치도 도시 비교하였다. Fig. 2에서 살펴보면 Beckstead, Renie와 Osborn의 계산치가 잘못되어 있음을 알 수 있으며, 실험치와 본 연구에서 계산한 연소 속도는 서로 잘 맞으면서 입자가 큰 AP의 함량이 증가할수록 연소 속도의 감소 폭은 점차 작아지는 것으로 나타나 있다.

Beckstead[5] 및 Renie와 Osborn[27]의 계산치가 본 연구에서의 결과와 다르게 나타난 이유는 다음과 같다. Beckstead는 화산 불꽃의 거리가  $b_i$ 와 binder의 함량 및 AP가 binder와 반응하는데 필요한 상대적인 량에 비례하며 AP의 함량에 반비례한다고 가정하였다. 또한 입자가 작은 AP와 반응하고 남은 binder 분해기체가 입자가 큰 AP와 다시 반응한다는 것을 무시하고, 각 mode의 AP에 대한 일차 불꽃의 온도를 계산하였기 때문이다.

Renie와 Osborn의 경우에는 bunsen burner에 의한 화산 불꽃 거리를 상용함과 동시에 일차 불꽃의 온도를 AP의 mode에 관계없이 동일한 값을 사

용하였기 때문에 연소 속도가 AP의 혼합비에 비례하는 관계로 나타났다.

### 3-2. AP의 함량이 연소 속도에 미치는 영향

추진제에서 Al의 연소 효과를 높이기 위하여 대체로  $5 \sim 10 \mu\text{m}$  크기인 Al을 사용하고 있기 때문에 [19] 중량 평균 입경이  $9.3 \mu\text{m}$ 인 Al을 2%로 일정하게 하고 AP의 함량을 62%에서 86%까지 변화시킨 CTPB계 추진제를 제조하여 실험 측정한 연소 속도를 Fig. 3에 도시하였다. 이때 AP의 혼합비는  $184 \mu\text{m}/7.5 \mu\text{m} = 60/40$ 으로 일정하게 하였다. AP의 함량이 감소할수록 불꽃의 온도가 낮아지므로 연소 속도는 점차 낮아지게 됨을 알 수 있다.

산화제인 AP의 함량 변화가 심한 경우에 일차 불꽃, 화산불꽃 및 Al불꽃에 대한 각종 특성치들(비열, 열전도도, 점도등)의 변화가 크므로 각 불꽃의 비열, 열전도도 및 점도를 일정하다고 가정하여 계산한 연소 속도와 변환다고 가정하여 계산한 연소 속도를 Fig. 3에 동시에 도시하였다. 각 불꽃의 비열을  $0.3 \text{ cal/g} \cdot \text{K}$ , 열전도도와 점도를

각각  $5 \times 10^{-3} \text{ cal/cm} \cdot \text{K} \cdot \text{sec}$ ,  $5 \times 10^{-3} \text{ g/cm} \cdot \text{sec}$ 로 일정하게 보고 계산한 연소 속도는 이들 특정치를 추진제의 조성 및 불꽃의 종류에 따라 각각 다르게 계산한 연소 속도보다 AP의 함량이 적어질수록 실험치와의 차가 더 커짐을 알 수 있다.

AP의 함량이 86%에서 62%로 감소함에 따라 AP 불꽃을 제외한 나머지 불꽃의 무차원 거리인  $\xi (= mC_p X/\lambda)$  값에서  $C_p/\lambda$ 가 2.3배 증가하며 기체 점도는 2배 감소한다. [33] 기체의 점도가 연소 속도에 미치는 영향은 경미하나  $C_p/\lambda$ 의 영향은 지대하며, 여기서  $C_p/\lambda$ 를 상수로 취급하면 Fig. 3에서와 같이 변수로 취급하는 경우보다 나쁜 결과가 나타나게 된다. 그래서 추진제의 연소시 생성되는 기체의 각종 특성치들을 추진제의 조성 및 불꽃의 종류에 따라 변하는 값으로 다루는 것이 더 타당함을 알았다.

추진제의 연소 속도와 압력간의 관계에 대한 표현은 여러종류[20, 26, 30]가 있으나, 현재까지 수식이 간편하면서도 실험치와 비교적 잘 맞고 있는 de Saint Robert 식(3)이 이용되고 있다. 즉,

$$r = ap^n \quad (11)$$

여기서  $a$ 와  $n$ 은 상수인데 이 중에  $n$ 은 연소 속도에 대한 압력의 영향을 나타내는 값으로 pressure exponent라고 한다.  $n$ 값은 식(11)의 양변에 대수값을 취하여 실험 데이터로부터 최소 제곱법으로 구한다.

AP의 함량을 변화시키면서 제조한 추진제에 대하여 압력이 600, 800, 1000, 1200 psia인 조건하에서 측정한 연소 속도로 부터 구한  $n$ 값을 Fig. 4에 도시하였다. 현재까지는 AP의 함량이 적을수록  $n$ 값이 감소한다고 알려져 있으나 [7], Fig. 4에서 나타난 바와같이 혼합형 고체 추진제에서 AP의 함량이 70%이하에서는 AP의 함량이 적어질수록  $n$ 값은 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구에 의해 계산한 경우에도 AP의 함량이 약 70%인 지점을 분기점으로  $n$ 값은 다시 커지는 것으로 나타나고 있다.

AP의 함량이 70%인 지점을 기점으로  $n$ 값이 다시 커지는 것은 주로 다음의 두가지 이유 때문이다. 첫째, AP의 함량이 70%이하인 경우에는 상대적으로 연소에 필요한 산소의 양이 훨씬 더 모자

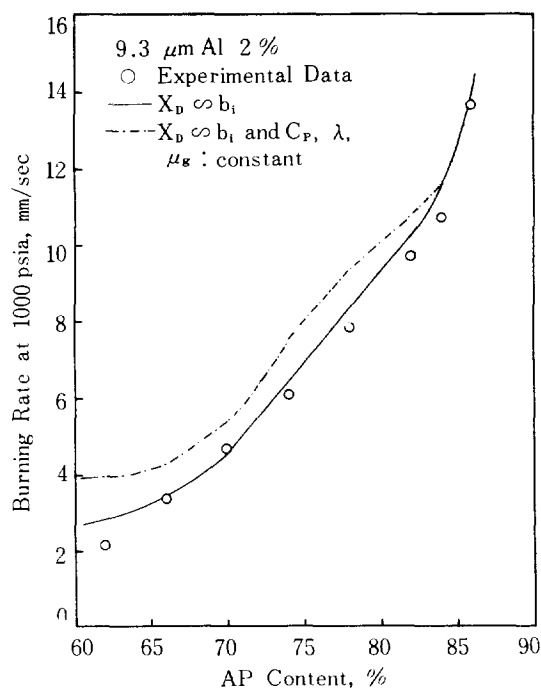


Fig. 3. Variation of Burning Rate with AP Content.

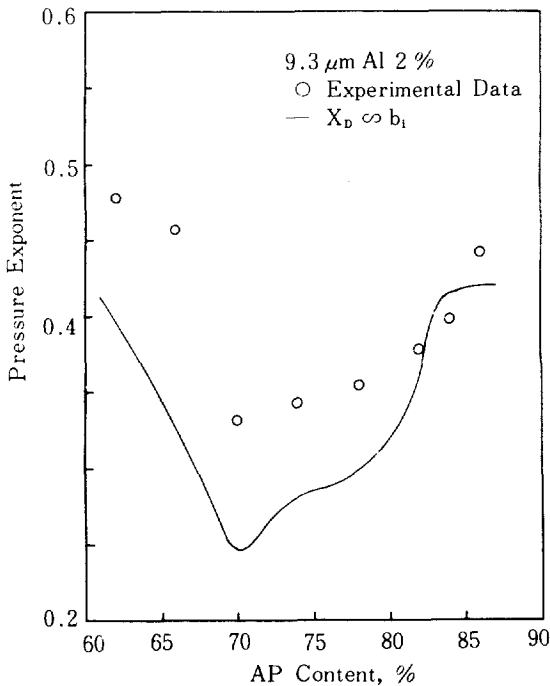


Fig. 4. Variation of Pressure Exponent with AP Content.

라는 경우가 되어 압력 변화에 대한 불꽃 온도의 변화가 커지고 있으며 [33], 둘째 이유는 압력이 증가할수록  $C_p/\lambda$  값이 크게 낮아지고 있으므로  $\xi$  가 감소하게 되어 연소 속도가 큰 폭으로 증가 되기

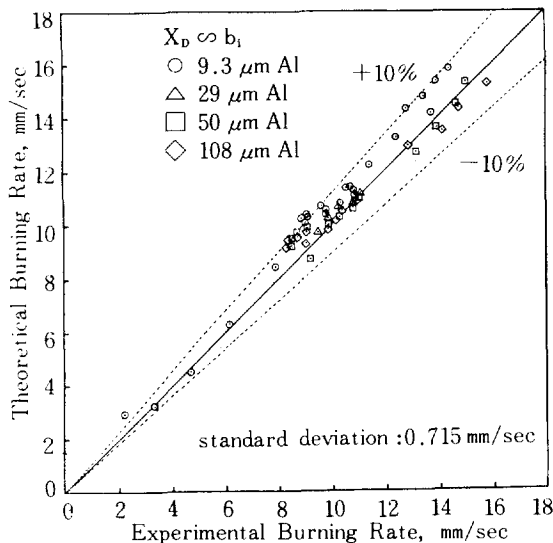


Fig. 5. Comparison of Theoretical and Experimental Burning Rate at 1000 psia-CTPB Aluminized Propellant.

때문이다.

### 3-3. 이론치와 실험치의 종합적 비교

본 연구에서 CTPB계 추진제중 4종의 Al을 0 ~ 12% 변화시키면서 제조한 55종의 추진제에 대한 연소 속도 실험치를 이론적으로 계산한 값과 비교 검토하기 위하여 Fig. 5에 도시하였다. 여기서 CTPB binder의 함량은 14%이며 Fig. 5에서 Al의 입자크기는 중량 평균 입경을 나타낸다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 실험치와 이론치가 비교적 잘 맞고 있으며 실험치와 이론치의 차로 계산한 표준편차는 0.715 mm/sec이었다.

Miller [24]가 6 μm Al 18%와 HTPB binder 12%로 제조한 추진제는 중량 평균 입경이 0.7 μm ~ 488 μm 범위인 8종의 AP를 다양하게 사용하였기 때문에 혼합형 고체 추진제의 연소 속도를 연구하는 사람들이 많이 이용하고 있다 [5, 14, 23, 28]. 따라서 본 연구에서 제안한 이론에 의해 계산된 연소 속도를 Miller의 실험결과와 비교 고찰해 보았다.

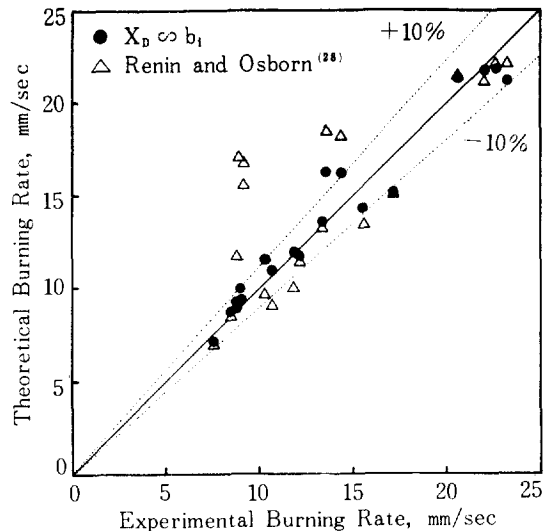


Fig. 6. Comparison of Theoretical and Experimental Burning Rate at 1000 psia-Miller's HTPB Aluminized Propellant.

Fig. 6에 Miller의 실험치와 본 연구에서 계산한 연소 속도를 비교 도시하였는 바, 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 Renie와 Osborn [28]이 계산한 이론치도 Fig. 6에 도시하였는데, 본 연구에서 얻은 결과가 Renie와 Osborn이 얻은 결과보다

훨씬 더 실험치에 근접되어 있음을 알 수 있다.

Renie와 Osborn은 Al이 함유된 추진제의 연소 속도 계산에서 Al의 연수제 역할로 인한 불꽃 온도의 보정과 Al의 합제 현상을 고려하지 않았다.

#### 4. 결론

- 1) 추진제의 연소시에 Al이 집화되기 전까지 연수제 역할을 함으로써 불꽃의 온도가 낮아진다고 가정하여 계산한 연소 속도가 불꽃의 온도를 보정하지 않은 경우보다 실험치와 더 잘 부합되었다.
- 2) 연소 불꽃의 비열 일진도도 및 점도를 추진제의 조성과 불꽃의 종류에 따라 각각 다르게 취급하고 계산한 연소 속도 값이 상수로 취급할 때보다 실험치와 더 잘 부합되었다.
- 3) Bimodal AP를 사용한 혼합형 고체 추진제에서 입자가 큰 AP의 함량이 증가할수록 연소 속도의 감소 폭이 작아졌다.
- 4) 혼합형 고체 추진제에서 AP의 함량이 62~70% 범위에서는 AP의 함량이 적을수록 pressure exponent가 증가하였다.

#### 기호 설명

A	fraction of Al agglomeration, (—)
bi	distance between AP particle and binder, ( $\mu\text{m}$ )
$C_{AL}$	specific heat of solid Al, ( $\text{cal/g}\cdot\text{K}$ )
$C_{ALL}$	specific heat of liquid Al, ( $\text{cal/g}\cdot\text{K}$ )
$C_B$	specific heat of binder, ( $\text{cal/g}\cdot\text{K}$ )
$C_P$	specific heat at constant pressure, ( $\text{cal/g}\cdot\text{K}$ )
$C_{PCU}$	specific heat of cubic AP, ( $\text{cal/g}\cdot\text{K}$ )
$C_{PI}$	specific heat of liquid AP, ( $\text{cal/g}\cdot\text{K}$ )
$C_{POR}$	specific heat of orthorhombic AP, ( $\text{cal/g}\cdot\text{K}$ )
Daggl	agglomerate diameter of Al, ( $\mu\text{m}$ )
$D_{AL}$	Al diameter in flame, ( $\mu\text{m}$ )
$D_{oAL}$	weight median diameter of initial Al, ( $\mu\text{m}$ )
E	activation energy, ( $\text{cal/gmol}$ )
$f_n$	AP particle size probability function of nth

mode,	(—)
$\Delta H_{AL}$	heat to melt aluminium, ( $\text{cal/g}$ )
$\Delta H_B$	heat to dissociate the binder, ( $\text{cal/g}$ )
$\Delta H_a$	heat to dissociate AP, ( $\text{cal/g}$ )
$\Delta H_m$	heat to melt AP, ( $\text{cal/g}$ )
$\Delta H_{tr}$	heat to translate orthorhombic to cubic state of AP, ( $\text{cal/g}$ )
m	mass flux, ( $\text{g/cm}^2\cdot\text{sec}$ )
P	pressure, (psia)
Q	energy content of flame, ( $\text{cal/g}$ )
r	linear burning rate of pseudopropellant, ( $\text{mm/sec}$ )
$\bar{r}$	linear burning rate of propellant, ( $\text{mm/sec}$ )
S	surface area, ( $\text{cm}^2$ )
T	temperature, (K)
$T_L$	melting temperature of Al, (K)
$T_m$	melting temperature of AP, (K)
$T_o$	initial temperature of propellant, (K)
$T_s$	AP surface temperature, (K)
$T_{sb}$	binder surface temperature, (K)
$X_D$	diffusion flame height, (cm)

#### Greek Letters

$\alpha$	weight fraction, (—)
$\beta_{PF}$	fraction of AP that enters into the primary flame reaction, (—)
$\lambda$	thermal conductivity of flame, ( $\text{cal/cm}\cdot\text{K}\cdot\text{sec}$ )
$\mu_g$	gas viscosity, ( $\text{g/cm}\cdot\text{sec}$ )
$\xi$	nondimensional flame standoff distance, $mC_P X/\lambda$ , (—)

#### Subscripts

AL	aluminium flame
AP	ammonium perchlorate flame
B	binder
DF	diffusion flame
OX	oxidizer or AP
PF	primary flame

#### 참고 문헌

1. Acheson, R. J. and Jacobs, P. W. M. : *AIAA J.*,

- 8 (1970), 1483.
2. Anderson, R., Brown, R. S. and Shannon, L. J. : *AIAA J.*, 2 (1964), 179.
3. Ball, A. M. : AD 830265, US Army Material Command, Washington, D. C., 1964.
4. Bastress, E. K. : *Ph. D. Thesis*, Princeton University, New Jersey, 1961.
5. Beckstead, M. W. : CPIA Publication 281, II (1976), 299.
6. Beckstead, M. W. : CPIA Publication 292, I (1977), 281.
7. Beckstead, M. W. and Cohen, N. S. : "Temperature and Pressure Sensitivity of Composite propellants," Lockheed Propulsion Co., Privately Obtained, 1971.
8. Beckstead, M. W., Derr, R. L. and Price, C. F. : *AIAA J.*, 8 (1970), 2200.
9. Boggs, T. L. and Zurn, D. E. : *Combustion Science and Technology*, 4 (1972), 279.
10. Burke, S. P. and Schumann, E. W. : *Ind. and Eng. Chem.*, 20 (1928), 998.
11. Caveny, L. H. and Pittanan, C. U. : Jr., *AIAA J.*, 6 (1968), 1461.
12. Cohen, N. E. : 13th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, (1971), 1019.
13. Cohen, N. S. and Price, C. F. : *J. of Spacecraft and Rockets*, 12 (1976), 608.
14. Cohen, N. S. and Strand, L. D. : CPIA Publication 329, I (1980), 53.
15. Condon, J. A. and Osborn, J. R. : AFRPL-TR-78-17, Purdue University, IN., 1978.
16. Derr, R. L. and Osborn, J. R. : *AIAA J.*, 8 (1970), 1488.
17. Guirao, C. and Williams, F. A. : *J. of Phys. Chem.*, 73 (1969), 4302.
18. Jacobs, P. W. M. and Whitehead, H. M. : *Chemical Reviews*, 69 (1968), 551.
19. King, M. K. : CPIA Publication 292, I (1977), 181.
20. Kishore, K. : *AIAA J.*, 17 (1979), 1216.
21. Kuehl, D. K. : *AIAA J.*, 3 (1965), 2239.
22. Kuo, K. K. and Coates, G. R. : 16th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, (1976), 1177.
23. Miller, M. S. : CPIA Publication 329, I (1980), 123.
24. Miller, R. R. and Martin, J. R. : CPIA Publication 292, I (1977), 259.
25. Powell, H. N. : 5th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, (1955), 290.
26. Rastogi, R. P., Singh, H. J., Deepak, D. and Srivastava, A. K. : *AIAA J.*, 16 (1978), 534.
27. Renie, J. P., Condon, J. A. and Osborn, J. R. : *AIAA J.*, 17 (1979), 877.
28. Renie, J. P. and Osborn, J. R. : AIAA Paper No. 79-1131, 1979.
29. Renie, J. P. and Osborn, J. R. : AIAA Paper No. 80-1166, 1980.
30. Saner, S. F. : "Propellant Chemistry", Reinhold Publishing Co., 1966.
31. Steinz, J. A., Stang, P. L. and Summerfield, M. : Aerospace and Mechanical Science Report No. 830, Princeton University, NJ., 1969.
32. Williams, F. A. : "Combustion Theory", Addison-Wesley Publishing Co., 1965, p. 47.
33. Yim, Y. J., Rho, M. K. and Yoon, Y. K. : "Computer Program for Calculation of Thermodynamic and Transport Properties of Complex Chemical System", Hong Neung Machine Co., 1981.
34. Yim, Y. J., Yoon, Y. K. and Lee, S. M. : *Hwahak Konghak*, 19 (1981), 327.
35. Stull, D. R. and Prophet, H. : "JANNAF Thermochemical Tables," 2nd ed., Dow Chemical Co., Midland, Mich., 1961. 1971.