

추진제 특성을 이용한 에어백 인플레이터 성능 제어에 대한 실험 및 해석에 대한 연구

서영덕¹⁾ · 김건우²⁾ · 홍범석³⁾ · 김진호³⁾ · 정석호¹⁾ · 여재익^{*1)}

서울대학교 기계항공공학부¹⁾ · 현대모비스²⁾ · 한화³⁾

Automotive Airbag Inflator Analysis Using Measured Properties of Modern Propellants

Young-Duk Seo¹⁾ · Gun-Woo Kim²⁾ · Bum-Suk Hong³⁾ · Jin-Ho Kim³⁾ · Suk Ho Chung¹⁾ · Jai-ick Yoh^{*1)}

¹⁾School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²⁾Hyundai Mobis, 80-9 Mabook-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi 446-912, Korea

³⁾Hanwha, Hanwha Building, 1 Jang Gio-dong, Jung-gu, Seoul 100-220, Korea

(Received 6 November 2009 / Accepted 5 May 2010)

Abstract : An airbag is composed of housing assembly, door assembly, cushion assembly, and an inflator. The inflator is the essential part that generates gas for airbag. When an airbag is activated, it effectively absorbs the crash energy of the passenger by inflating a cushion. In this study, tank tests were performed with newly synthesized propellants with various compositions, and the results are compared with the numerical results. In the simulation of inflator, a zonal model has been adopted which consisted of four zones of flow regions: combustion chamber, filter, gas plenum, and discharge tank. Each zone was described by the conservation equations with specified constitutive relations for gas. The pressure and temperature of each zone of the inflator were calculated and analyzed and the results were compared with the tank test data. In the zone of discharge tank the pressure quickly rose, the pattern of pressure curve was very similar to the pressure curve of real test. And in zone 1 & 2 & 3 the mass of products was increased and decreased with time. In zone 4, the mass of products was increased with time like real inflator. From the similarity of pressure curve in zone 4 and closed bomb calculation the modeled results are well correlated with the experimental values.

Key words : Inflator(가스발생기), Airbag(에어백), Propellant(추진제), Flame propagation(화염전파)

1. 서론

현재 자동차에 대한 관심이 높아지고 있고 특히 차량 안전에 대한 소비자들의 요구가 점점 늘어나고 있다. 대표적인 차량 안전장치 중에 하나인 에어백은 차량 충돌 시 승객의 충돌 에너지를 흡수하여 보호하는 역할을 하고 있다. 이러한 에어백의 구성 장치로는 차량 충돌 시 승객과 접촉하여 에너지를 흡수하는 쿠션, 쿠션을 수납하는 하우징 어셈블리

와 도어 어셈블리, 쿠션을 부풀게 하는 가스 발생장치인 인플레이터로 구성되어 있다. 중요한 안전부품인 에어백의 작동원리는, 차량 충돌 시 센서가 충돌 신호를 감지한 후 에어백 컨트롤 유닛으로 신호를 보낸 후, 에어백으로 다시 전기 신호를 보낸다. 그 전기신호로 에어백의 인플레이터가 점화되어 가스를 분출, 쿠션을 부풀리게 되어 승객을 보호한다. 작동원리에서 보다시피 에어백의 구성 장치 중에 하나인 인플레이터는 승객의 충돌에너지를 빠르게 흡수할 수 있도록 가스를 급격히 분출시키는 중요

*Corresponding author, E-mail: jjyoh@snu.ac.kr

한 부품이다. 다양한 충돌 모드 조건, 다양한 체형의 승객 보호가 이루어 질수 있도록 차량 안전 연구가 활발히 이루어지고 있는 상황에서 본 논문은 차량 안전, 특히 에어백에 대한 연구 활동에 적용되는 인플레이터의 특성에 영향을 미치는 추진제에 대하여 연구하고자 한다. 추진제의 연소특성 파악을 위하여 클로즈드 밤 실험을 실시하고 그에 대한 해석 모델을 구축하고자 한다. 또한 인플레이터에 대한 간략화된 해석 모델을 구축하고자 한다. 현재 인플레이터에서 시간에 따라 분출되는 가스 특성들인 압력, 온도 값들이 입력 값들로 쓰여서 Fig. 1의 에어백 자체의 구조 해석이나 Fig. 2의 여러 충돌 모드에서의 승객 상해치 예측을 수행하고 있으며 그에 대한 기본적인 연구를 본 논문에서 수행하고자 한다. 에어백의 구조해석으로는 에어백이 전개할 시 수납하는 하우징의 강건성을 살펴보고 있으며, 또한 여러 충돌모드에서 승객의 상해치가 얼마나 되는지에 대하여서도 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 이러한 기본 연구와 달리 인플레이터 자체의 해석 모델을 구축하는데 중점을 두었다.

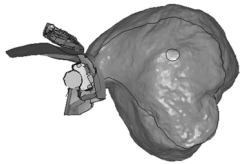


Fig. 1 Schematic of airbag

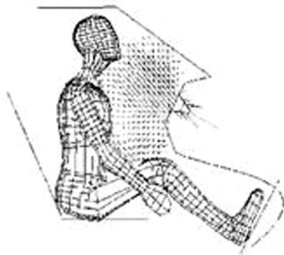


Fig. 2 Schematic of analysis of car crash test

2. 본 론

2.1 인플레이터의 구성

대부분의 인플레이터는 에어백 컨트롤 유닛으로부터 전기 신호를 받아 다수의 추진제를 점화시킬

수 있도록 초기에 온도와 압력을 증가시켜주는 이니시에이터, 그리고 쿠션을 부풀리는데 쓰이는 가스를 생성시키는 추진제, 추진제를 수납하고 연소되는 공간인 연소 챔버, 연소 챔버를 통해 나오는 고온 가스를 냉각시키고 고체 생성물이 걸러지도록 하는 필터, 필터를 통해 나온 가스들이 충전되는 구간인 가스 충전 공간, 그리고 충전 공간으로부터 외부로 가스가 분출되는 노즐로 구성되어 있다.

여기서 연소 챔버와 필터 사이, 충전 공간과 노즐 사이에는 붕괴 막들이 존재하는데, 이 붕괴 막들은 전, 후 구간의 압력차가 어느 수준이상이 되었을 때 열리게 되어 가스의 흐름이 이루어지도록 한다. 또한 전 구간의 내부 압력이 상승되도록 하여 전체 추진제의 연소가 급격히 이루어지도록 한다. 인플레이터의 상세 내부 구조는 Fig. 3과 같으며 개략적인 구조도는 Fig. 4와 같다.

Fig. 4의 디스차지 탱크는 인플레이터 자체 성능 평가 시에 수행하는 인플레이터 탱크 테스트(Fig. 5)의 탱크를 나타내며 인플레이터에서 나오는 가스의 압력을 실측하여 에어백 쿠션으로 보내지는 가스의 압력을 알 수 있다.

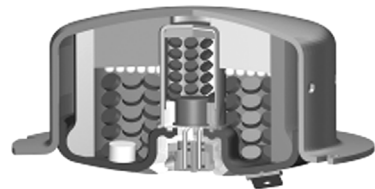


Fig. 3 Schematic of typical airbag inflator

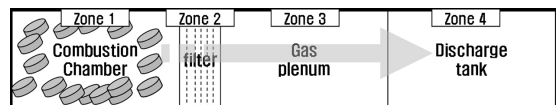


Fig. 4 Proposed gas flow domain in the present analysis

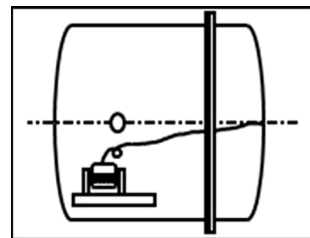


Fig. 5 Schematic of closed tank for testing inflator assembly

본 논문에서는 인플레이터의 각 구간별 가스흐름, 탱크로의 가스흐름까지 묘사하도록 하였다.

2.2 고체 추진제 연소 실험

2.2.1 클로즈드 밤 실험

본 논문에서는 Fig. 6에 보이는 클로즈드 밤 테스트기를 이용하여 여러 가지 조성비를 가진 고체 추진제의 연소 실험들을 실시하였다. 실험에 쓰인 테스트기는 193CC 용량짜리를 사용하였으며 추진제를 연소 시키면서 시간에 따른 압력 데이터를 측정할 수 있다. 실험 과정에 대하여 간략히 묘사하면 10g의 추진제와 2g의 이니시에이터를 테스트기에 삽입 후 이니시에이터에 전기 신호를 보내어 연소 시키면서 연소 과정 중의 압력 데이터를 압력 측정 센서에서 측정하여 컴퓨터에 데이터를 저장하게 된다.

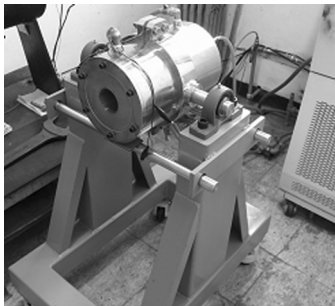


Fig. 6 Picture of closed bomb for testing burn characteristic of solid propellants

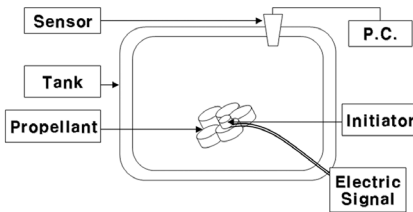


Fig. 7 Schematic of closed bomb for testing solid propellants

2.2.2 추진제 타입별 클로즈드 밤 실험

현재 여러 회사에서 쓰이고 있는 추진제들의 연소 특성을 파악하기 위하여 클로즈드 밤 테스트기로 3개 회사의 추진제의 연소 실험을 실시하였다.

그리하여 본 실험 진행에 있어 연소 속도가 빠르

Table 1 Test propellants

Type	A	B	C
Shape			
Mass (g/EA)	0.105	0.1	0.115

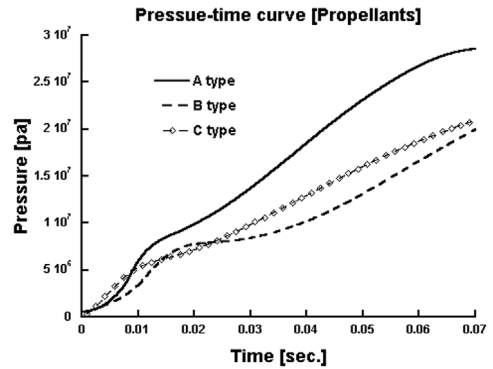


Fig. 8 Pressure-time curve

고 또한 최대 압력 값도 높은 A type의 추진제를 목표 성능으로 두고 D type의 추진제의 조성비들을 변경하여 실험을 진행하였다.

2.2.3 조성별 클로즈드 밤 실험

D type의 추진제 조성은 총 6개의 성분과 첨가제로 이루어져 있으며 Table 2에 질량비율이 나와 있다.

Table 2 The composition of 'D' type propellant

Species		Mass (%)	Size(um)
Guanidine nitrate	CH ₆ N ₄ O ₃	46	31
Basic cupric nitrate	Cu(NO ₃) ₂ × 3Cu(OH) ₂	24	22
Ammonium perchlorate	NH ₄ ClO ₄	13	35
Sodium nitrate	NaNO ₃	4	6
Copper oxide	CuO	3	5
Iron oxide	Fe ₂ O ₃	10	1.2
Additives	-	2	-

Table 3 Variables of cases

Variables	Species	Level 1	Level 2
a	Ammonium perchlorate	Mass 13%	Mass 8%
b	Sodium nitrate	Mass 4%	Mass 6%
c	Basic cupric nitrate	Size 22um	Size 44um

여기서 Guanidine Nitrate는 연료의 역할을 하고 첨가제를 제외한 나머지 성분들은 산화제의 역할을 하고 있다. 따라서 연소 속도에 영향을 미칠 수 있는 산화제인 Ammonium Perchlorate, Sodium Nitrate의 성분비를 조정하고 Basic Cupric Nitrate의 입도를 변경하여 압력 상승 비율들을 조정할 수 있도록 시료들을 제작 실험을 실시하였다.

3가지 인자별 적용 조건은 Table 4에 나와 있으며 각 실험 조건별로 시료를 제작 후 3회씩 총 24번의 실험을 진행하였다. 3번씩의 실험 데이터를 평균하여 나타난 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

각 실험 조건별 결과들을 최대 압력 값과 시간별 압력증가율, Absolute Quickness(A.Q.)로 구하여 Table 5에 나타내었다. 여기서 A.Q.값은 최대 압력 값에 대비하여 25%에서 75% 사이 값들의 기울기를 나타낸 값이다. 나타난 결과들에서 살펴보면 구현하기로 하였던 A type의 추진제와 유사한 결과 값을 나타내는 조건은 조건 1임을 알 수 있다. 최대압력 값과 A.Q.값들을 고려하여 볼 때 조건 1이 압력 상승 값과 최대 압력이 A type과 거의 유사함을 알 수 있었다.

Table 4 Cases of closed bomb tests

Variables	a	b	c
Condition 1	1	1	1
Condition 2	1	1	2
Condition 3	1	2	1
Condition 4	1	2	2
Condition 5	2	1	1
Condition 6	2	1	2
Condition 7	2	2	1
Condition 8	2	2	2

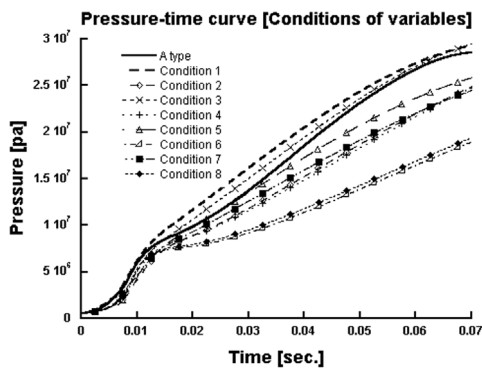


Fig. 9 Pressure-time curve of closed bomb tests

Table 5 Results of closed bomb tests

Results	Pmax [pa]	A.Q. [pa/ms]
Condition 1	2.797E+07	4.685E+05
Condition 2	2.961E+07	3.288E+05
Condition 3	3.025E+07	4.430E+05
Condition 4	3.021E+07	3.192E+05
Condition 5	2.743E+07	3.916E+05
Condition 6	2.761E+07	2.353E+05
Condition 7	2.735E+07	3.378E+05
Condition 8	2.732E+07	2.428E+05
A type	2.832E+07	4.964E+05

초기에 인자들로 잡았던 3가지 변수들에 대하여 최대 압력과 A.Q.에 대한 영향도를 파악하고자 각 인자들의 수준에 대하여 평균값들을 구하여 주효과도를 구해 보았다.

먼저 최대 압력 값에 대하여 Ammonium Perchlorate, Sodium Nitrate의 성분비, Basic Cupric Nitrate의 입도가 주는 영향도를 Fig. 10에 나타내었다.

최대 압력 값에 가장 큰 영향을 미치는 것은 Ammonium Perchlorate의 성분비를 알 수 있으며 그리고 Sodium Nitrate의 성분비, Basic Cupric Nitrate의 입도는 최대 압력에는 크게 기여하지 않는 것을 알 수 있다. 그리고 압력 상승 비율인 A.Q.에 대한 영향도를 알아보면 Fig. 11과 같으며 3가지 변수들이 모두 압력 상승률에는 기여를 하고 있으며 그 영향도는 Basic Cupric Nitrate의 입도, Ammonium Perchlorate, Sodium Nitrate의 성분비 순서임을 알 수 있다. 즉, 위의 결과들로부터 최대 압력 값을 높이기 위해서는 Ammonium Perchlorate의 성분 비율을 높이

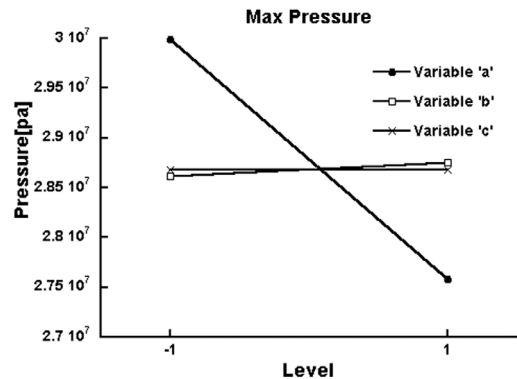


Fig. 10 Max pressure of closed bomb tests

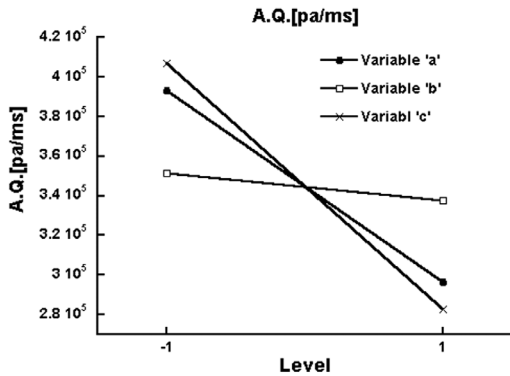


Fig. 11 A.Q. of closed bomb tests

는 방법이 있다. 그리고 압력 상승 비율을 낮추기 위해서는 Basic Cupric Nitrate의 입도를 증가 시키거나 Ammonium Perchlorate의 성분은 낮추고 Sodium Nitrate의 성분비는 증가시키는 방법이 있다.

2.3 해석 모델구성

2.3.1 인플레이터 해석 모델 구성

인플레이터 해석 모델을 설명하기에 앞서 적용된 기본적인 가정들을 설명하고자 한다.

① 각 구간들마다 가스 상태의 물질과 응축상태의(고체 혹은 액체) 물질들은 잘 섞여 있고 가스 상태의 물질은 이상기체로, 응축상태의 물질은 비압축성으로 간주한다.

② 필터는 가스 상태의 물질을 포집하지 못하며 응축상태의 물질만 포집되고 그 비율은 유출되는 응축상태의 물질들의 비율과 동일하다.

③ 가스 상태와 응축상태의 물질들은 온도에 따라 비열비가 변한다.^{1,2)}

④ 추진제가 연소되는 화학 반응은 연소 챔버 내에서만 이루어지는 것으로 간주한다.

상기 가정들은 바탕으로 각 구간별 물질별 질량 보존식, 에너지 보존식들을 구하고 각 보존식들을 연관 관계식들로 연계 시켜 해석 모델을 구성한다.

2.3.2 보존 방정식

우선 물질별 보존식은 하기와 같다.

$$\frac{dm_{k,i,j}}{dt} = Y_{k,i,j-1} \dot{m}_{i,j-1} - Y_{k,i,j} \dot{m}_{i,j} + \psi_{k,i,j} \quad (1)$$

(1)번식에서 첨자 k는 물질의 종류, i는 물질의 상태(i=g는 가스 상태, i=c는 응축된 상태), j는 각 구간을 나타내고, m_k, Y_k 는 k 물질의 질량과 질량비율을 말한다. 가정에서 언급하였듯이 구간 2인 필터에서는 가스 상태의 물질이 포집되지 못하므로 $dm_{k,g,2}/dt=0$ 이 된다. 또한 구간 1에서 이전 구간에서 유입되는 물질이 없으므로 $\dot{m}_{i,0} = 0$ 이다.

그리고 에너지 보존식은 가스 상태 물질과 응축 상태 물질별로 나누고 가스 상태의 물질들은 동일한 온도 $T_{g,j}$ 를 가지고, 응축 상태의 물질들은 동일한 온도 $T_{c,j}$ 를 가지는 것으로 보고 보존식을 세운다. 가스 상태 물질들의 에너지 보존식은 하기와 같다.³⁾

$$m_{g,j} c_{v,g,j} \frac{dT_{g,j}}{dt} = \left\{ \begin{aligned} &\dot{m}_{g,j-1} h_{g,j-1} - \dot{m}_{g,j} h_{g,j} + \omega_{g,j} h_f \\ &+ P_j V_j \frac{d\varphi_j}{dt} + Q_{g,j} \\ &- \sum_k \left[e_{k,g,j} Y_{k,g,j-1} \dot{m}_{g,j-1} \right. \\ &\quad \left. - e_{k,g,j} Y_{k,g,j} \dot{m}_{g,j} \right. \\ &\quad \left. + e_{k,g,j} \omega_{g,j} Y_{k,g,p} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

(2)번식의 j, k, g의 첨자는 (1)번식의 정의와 같다. h는 단위 질량당 엔탈피, e는 단위 질량당 내부 에너지를 말한다. P는 압력, V는 구간 부피, φ 는 응축상태 물질의 부피 비율을 말한다. $Q_{g,j}$ 는 구간j에서 외부와의 열 교환을 의미하고 $\omega_{g,j} h_f$ 는 추진제의 연소 반응과 관련된 항으로 구간 1에서만 해당되는 항으로 h_f 는 그 물질의 단열화염온도에서의 엔탈피를 뜻한다(타 구간에서는 0의 값을 가진다). 그리고 응축 상태 물질들의 에너지 보존식은 식 (3)이고 첨자들은 (2)번식과 동일한 의미를 가진다.

$$m_{c,j} c_{v,c,j} \frac{dT_{c,j}}{dt} = \left\{ \begin{aligned} &\dot{m}_{c,j-1} h_{c,j-1} - \dot{m}_{c,j} h_{c,j} + \omega_{c,j} h_f \\ &- P_j V_j \frac{d\varphi_j}{dt} + Q_{c,j} \\ &- \sum_k \left[e_{k,c,j} Y_{k,c,j-1} \dot{m}_{c,j-1} \right. \\ &\quad \left. - e_{k,c,j} Y_{k,c,j} \dot{m}_{c,j} \right. \\ &\quad \left. + e_{k,c,j} \omega_{c,j} Y_{k,c,p} \right] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2.3.3 연관 관계식

각 보존 방정식들을 연계시켜 동시에 풀기 위해

다음과 같은 연관 관계들이 적용된다. 추진제의 리 그레이션 비율식, 각 구간들 간에 이동하는 물질들의 질량 흐름식, 이상 기체 방정식, 추진제의 질량 생성율로 구성된다.

추진제의 질량 생성율은 식 (1)에 쓰인 항인 $\psi_{k,i,j}$ 이며

$$\psi_{k,i,j} = Y_{k,i,p} \omega_{i,j} \quad (4)$$

식 (4)와 같다. 여기서 $\omega_{i,j}$ 는 j구간에서 i상태(기체 또는 압축 상태)의 질량 생성율이며 $Y_{k,i,p}$ 는 추진제의 연소 생성물들 중 i상태 생성물질들에 대한 k 물질의 질량 비율을 뜻한다. 식 (4)가 적용되는 구간은 1구간에 국한된다(즉 타 구간에서의 값은 0이다.) 질량 생성율 $\omega_{i,j}$ 는

$$\omega_{g,1} = Y_{g,p} \frac{dm_r}{dt} \quad (5)$$

$$\omega_{c,1} = Y_{c,p} \frac{dm_r}{dt} \quad (6)$$

로 주어지고 식 (5),(6)에 쓰인 미분항은

$$\frac{dm_r}{dt} = NA_r(t) \rho_r r_r \quad (7)$$

식 (7)로 주어진다. 여기서 N은 고체 추진제의 전체 개수이고 ρ_r 은 고체 추진제의 밀도, $A_r(t)$ 은 추진제의 시간에 따른 면적 함수이다. 본 모델에서는 고체 추진제의 형상이 실린더 형상으로 되어 있고 모든 면에서 동시에 연소가 된다고 가정하여 함수를 적용하였다. 또한 추진제 면적함수는 추진제 자체 실험인 클로드스 밤 실험의 결과와 비교하여 보정과 유효성 검토를 필요로 한다. r_r 은 추진제의 리 그레이션 비율로 하기와 같다.⁴⁾

$$r_r = aP^n \quad (8)$$

식 (8)에서 지수인 n과 계수 a도 추진제 자체 실험인 클로드스 밤 실험으로 구해지는 실험적 상수이다.

각 구간별로 흐르는 가스 상태 및 응축 상태의 물질들에 대한 질량 흐름식은 복잡한 인플레이터 형상의 영향도를 배제하고 가스 역학의 기본 방정식들을 적용하였다.⁵⁾

우선 구간 1에서 구간 2로 가스 상태 물질의 질량 흐름은 다음과 같다.

$$\dot{m}_{g,1,out} = A_f c_1 \left\{ \frac{2k}{k-1} P_1 \rho_1 \left[\left(\frac{P_3}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_3}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

A_f 는 필터의 가스 출구 면적, c_1 은 필터 출구 면적의 유출 상수를 말한다. 그리고 구간 1에서의 응축 상태 물질 흐름은 아래 식 (10)의 비율로 주어진다.

$$\dot{m}_{c,1,out} = \dot{m}_{g,1,out} \frac{m_{c,1}}{m_{g,1}} \quad (10)$$

구간 3에서 구간 4로 가스 상태 물질의 질량 흐름은

$$\dot{m}_{g,3,out} = A_n c_3 \sqrt{k P_3 \rho_3} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \quad (11)$$

A_n 는 인플레이터 노즐의 출구 면적, c_3 은 노즐 출구 면적의 유출 상수를 말한다. 그리고 응축상태 물질의 흐름은

$$\dot{m}_{c,3,out} = \dot{m}_{g,3,out} \frac{m_{c,3}}{m_{g,3}} \quad (12)$$

이다.

식 (2),(3)에 쓰인 응축 상태 물질들의 부피 비율로 인한 항은

$$\frac{d\varphi_j}{dt} = \frac{1}{V_j} \sum_k \frac{1}{\rho_{k,c}} \frac{dm_{k,c,j}}{dt} \quad (13)$$

으로 주어지고 이상기체의 상태 방정식은

$$P = \rho RT \quad (14)$$

이다.

2.3.4 인플레이터 모델 해석 결과

해석 모델 구축에 적용한 추진제의 조성(NaN_3 와 Fe_2O_3)과 비율들은 Table 6에 나타내었다. 그리고 보존 방정식들과 연관 관계식들인 1차 미분방정식을 matlab R2006b를 이용하여 풀었다. 그리고 에너지 식들에 적용된 $Q_{g,j}$ 항들은 이번 해석에서는 배제 후 실시하였다. 각 식들에 적용된 계수 값과 조건들은 Table 6과 같다.

Table 6 The composition of inflator analysis propellant

	Species	Mass %	Phase
Reactants	NaN_3	70.95	solid
	Fe_2O_3	29.05	solid
Products	Na_2O	33.82	solid
	Fe	20.32	solid
	N_2	45.86	gas

Table 7 The input variables of inflator model

Variable	Value	Unit
A_f	0.010	m^2
A_n	7.85×10^{-5}	m^2
a	4.45×10^{-5}	-
n	0.4	-
c_1	0.049	-
c_3	0.8	-
D	0.0075	m
H	0.0045	m
m_{ignitor}	0.002	kg
m_p	0.180	kg
P_0	101325	Pa
T_0	300	K
V_1	1.27×10^{-4}	m^2
V_3	5.56×10^{-4}	m^2
V_4	0.06	m^2
ΔP_{inner}	2×10^6	Pa
ΔP_{outer}	5×10^6	Pa

Table 7에서 A_f 는 filter의 가스 유출 면적, A_n 은 노즐의 면적이다. D는 고체 추진제의 지름, H는 고체 추진제의 높이, m_p 는 추진제 총 질량을 뜻한다. 각 구간들의 초기 압력과 온도는 대기압과 상온을 적용하였고 V_1, V_2, V_3 는 각 구간의 부피이다. ΔP_{inner} , ΔP_{outer} 는 붕괴막이 열릴 수 있는 압력차를 말한다.

Fig. 12은 구간 1에서의 반응물들의 시간에 따른 질량 비율로 전체추진제 질량에 대한 반응물들의 질량 비율을 나타내고 Fig. 13은 구간 1에서 시간에 따른 생성물들의 질량비율을 나타내었다.

결과에서 나타났듯이 추진제의 연소 반응이 일어나서 시간에 따라 반응물들이 감소되고 생성물들이 증가됨을 알 수 있다. 72ms시 추진제의 연소가 완료되고 반응물들이 완전히 사라지게 된다. Fig. 13에서는 생성물들이 35ms시에 구간 1에서 잔존량이 최대였다가 점차 감소되어 가는 것을 알 수 있다. Fig. 14

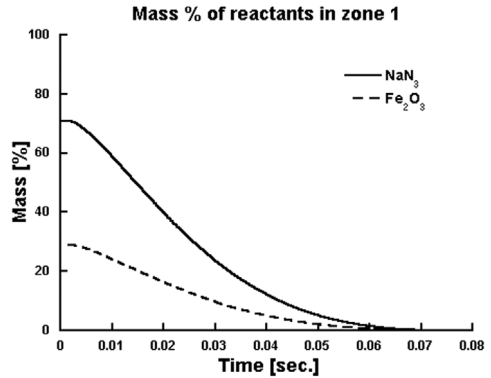


Fig. 12 Percent mass of reactants in zone 1

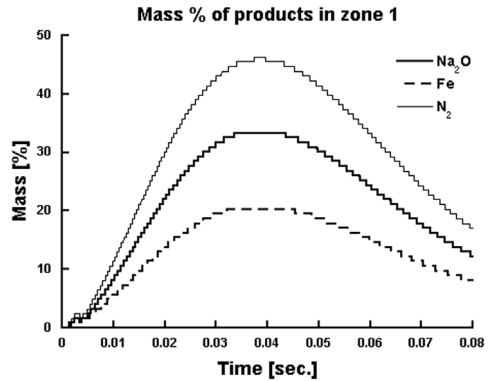


Fig. 13 Percent mass of products in zone 1

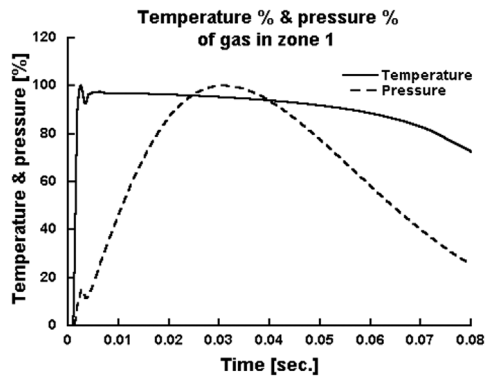


Fig. 14 Temperature and pressure ratio of gas in zone 1. Shown in percent ratio

는 구간 1에서의 온도와 압력 비율을 나타냈으며 초기 5ms이내에서 급격한 온도 상승과 하강이 나타난다. 이는 구간 1에서의 압력 상승으로 인하여 안쪽과 바깥쪽의 붕괴 막들이 열리면서 급격한 압력 증가와 하강 현상이 발생하였다.

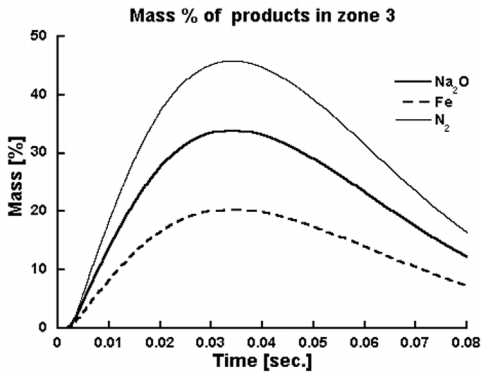


Fig. 15 Percent mass of products in zone 3

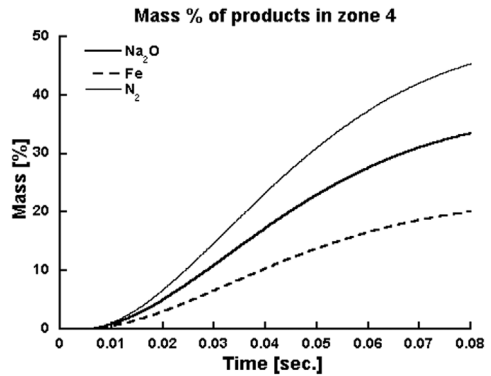


Fig. 17 Percent mass of products in zone 4

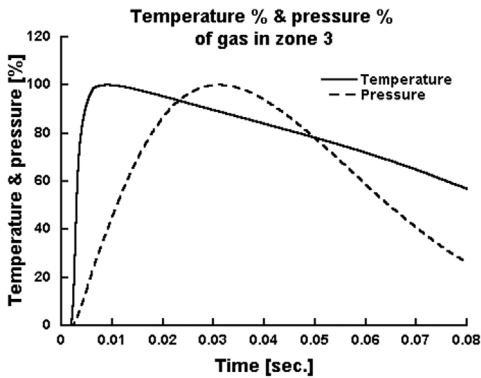


Fig. 16 Temperature and pressure ratio of gas in zone 3

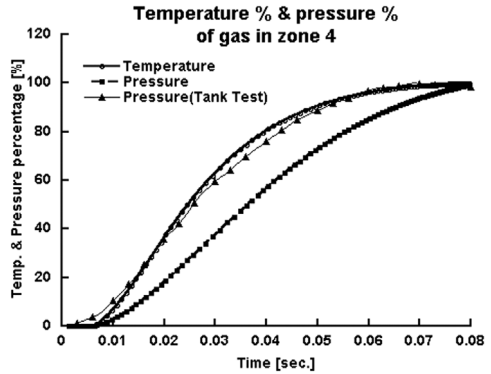


Fig. 18 Temperature and pressure ratio of gas in zone 4

구간3에서의 생성물들의 질량 비율, 온도와 압력 비율을 Fig. 15, Fig. 16에 나타내었다. 구간 1과 비슷한 양상으로 생성물 질량 비율을 가지며, 온도와 압력 상승 시점도 유사하다.

구간4에서의 생성물들의 질량 비율, 온도와 압력 비율은 Fig. 17, Fig. 18과 같으며 마지막 구간인 관계로 다른 구간으로의 질량 유출이 없으므로 질량 유입 비율에 따라 온도 및 압력 상승 비율이 유사함을 알 수 있다.

구간 1인 연소 챔버는 타 구간으로의 질량 유출이 없을 시에는 추진제 특성 평가 실험 중에 하나인 클로드 밤 실험과 유사하게 묘사될 수 있으며, 구간 4의 경우는 인플레이터 특성 평가 실험인 인플레이터 탱크 실험과 유사하게 묘사될 수 있다.

Fig. 18에서 보는 바와 같이, 비교된 탱크 테스트의 실험값이 해석에 쓰인 추진제와 동일한 조성이 아니고 인플레이터를 구성하는 부품들이 동일한 조

건은 아니므로 다소 차이는 발생하고 있으나 인플레이터 모델 해석 결과에서 나타나는 구간 4의 압력 비율 그래프는, 실제 인플레이터 탱크 실험의 결과의 유사한 상승 비율을 나타내고 있다.

2.3.5 클로드 밤 실험 묘사 해석 결과

구간 1인 연소 챔버를 앞에서 실시한 클로드 밤 실험에 적용하기 위하여 부피를 193CC로 변경하고 또한 적용되는 추진제의 조성을 이전 실험을 했던 D type 추진제의 조성 과 유사하게 적용하여 해석을 진행하였으며 조성과 질량비는 Table 8에 기재하였다. 여기서 조성물들 중 질량 비율이 미미한 성분은 배제를 하였으며 그 결과를 실제 실험한 결과인 조건 1의 결과 값과 비교하였다. 또한 이전 인플레이터의 구간 1의 조건이 아닌 클로드 밤 실험에 적용하기 위하여 시간에 따른 면적 함수인 $A_r(t)$ 의 계수들을 조정하여 실시하였다. Fig. 19에서 보는 바와 같이 실험 치와 해석결과 값들이 유사한 경향을 보

Table 8 The composition of closed bomb test propellant

	Species	Mass %	Phase
Reactants	CH ₆ N ₄ O ₃	46	solid
	Cu(NO ₃) ₂ × 3Cu(OH) ₂	28	solid
	NH ₄ ClO ₄	13	solid
	Fe ₂ O ₃	13	solid
Products	H ₂ O	34.45	gas
	N ₂	20.8	gas
	CO ₂	9.75	gas
	Na ₂ O	21	solid
	Fe	14	solid

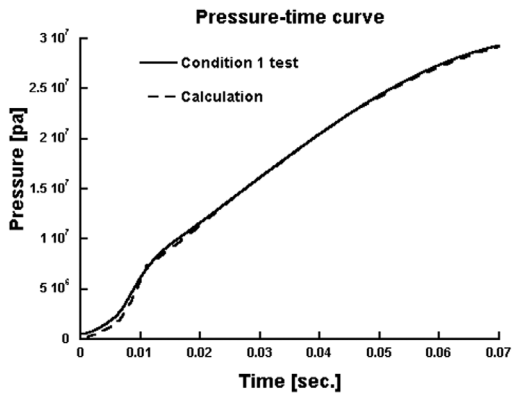
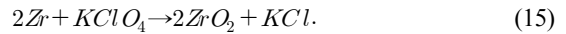


Fig. 19 Pressure of gas in zone 1 (in closed bomb)

이는 것을 알 수 있으며 실제 조건 1의 경우 최대 압력은 2.797E+07 Pa이고 해석의 경우는 2.971+07 Pa, A.Q.값의 경우는 실험치의 경우는 4.685E+05 Pa/ms 이고 해석치의 경우는 4.462E+05 Pa/ms인 것을 알 수 있다.

앞에서 보인 실제 실험 결과 값들과 해석 값들의 비교에서 보다시피, 인플레이터의 경우는 실제 인플레이터의 압력 곡선과 유사한 경향의 압력 곡선을 나타내도록 본 해석 모델을 구성하였고 또한 이전에 실시한 클로즈드 밤 실험과 같이 해석 모델을 구간1로 재구성하여 실시한 결과에서도 유사한 결과와 경향을 보여 주고 있다. 따라서 본 해석 모델을 실제 다른 추진제의 성분들과 조성에도 적용하여 클로즈드 밤 실험을 통하여 나올 수 있는 추진제의 연소특성들을 예상할 수 있고 이러한 추진제의 변경 사항들을 인플레이터에 적용을 하여 최종적으로 나오는 인플레이터의 가스의 온도와 압력을 예측할 수 있도록 하였다.

현재 본 해석 모델에는 추진제의 해석 모델만이 구성되어 있는데 실제로는 전기신호를 받은 2g가량의 이니시에이터의 점화 후 추진제가 연소하게 된다. 대부분의 이니시에이터는 ZPP(Zirconium - Potassium Perchlorate) 로 이루어져 있으며 화학반응식은 (16)과 같다.



$$Z = Ae^{(-E_a/RT)} \quad (16)$$

$$\dot{Q} = \rho Z \Delta H_R = \rho \Delta H_R Ae^{(-E_a/RT)} \quad (17)$$

그리고 식 (15)의 화학식과 관계된 Reaction rate와 Rate of volumetric energy release은 식 (16), 식 (17)과 같고 상기 식들을 이용하여 본 논문의 해석 모델에 이니시에이터의 부분을 추가하여 연구한다.⁶⁾

3. 결론

본 논문에서는 추진제의 조성비들을 변경하여 각각의 조건들에 대하여 클로즈드 밤 실험을 실시하여 각 조성물 인자들에 대한 최대 압력과 압력 상승에 대한 영향도를 파악해 보았다. 이러한 인자들을 조절하여 개발자가 목표로 하는 추진제의 성능을 구현할 수 있도록 영향도 파악을 실시하여 추진제의 특성을 제어할 수 있게 하였다. 그리고 인플레이터를 4개의 구간으로 나누고 각 구간별로 질량과 에너지 보존식들을 적용, 각 지배방정식을 연계시키기 위한 연관관계식들을 적용하여 해석 모델을 구축하였다. 그리고 연계된 1차 미분 방정식들을 matlab R200b 솔버로 시간에 따른 결과들을 구하였다. 각 구간마다의 물질별 질량 비율, 압력과 온도의 증감 비율들을 통하여 인플레이터 내부에서의 가스 및 응축상태 물질들의 흐름 상태를 파악할 수 있었다. 앞의 결과 그래프들에서 알 수 있듯이 구간 1인 연소 챔버에서는 온도와 압력이 급격하게 증가하여 짧은 시간 내에 추진제가 연소가 되게 하여 인플레이터 외부로 가스가 유출된다(구간 4 탱크로의 급격한 가스 유출). 이는 구간 1과 2 사이, 구간 3과 4 사이에 붕괴막이 존재하여 일정압력차에 도달해야만 가스 흐름이 일어나도록 모델을 구성한 결과이고 이러한 급격한 내부 압력 증가에 따라 추진제의 연

소가 급격히 발생, 각 구간별로 생성물의 질량이 증가하게 된다(이는 생성물의 질량 생성이 구간 1의 압력에 지수로 비례하기 때문이다).

그리고 구축한 인플레이터 해석 모델을 이용하여 구간 1만으로 해석 모델을 구성, 보완하여 이전에 실시한 클로즈드 밤 실험을 묘사하는 해석 모델을 구축하였고 실제 실험 결과와 해석 결과를 비교하여 보았다. 인플레이터 해석 모델과 클로즈드 밤 실험을 묘사하는 해석모델은 실제 실험 치와 유사한 경향과 결과를 나타내었으며 차후 추진체의 조성 변경에 따른 인플레이터의 성능을 예측할 수 있도록 해석 모델 구축을 하게 되었다.

본 인플레이터의 해석 모델을 이용하여 현재 에어백의 해석 모델에 적용하여 실제 사고시의 승객의 상해치를 알 수 있는데 도움을 줄 수 있다. 즉, 에어백의 해석 모델에 적용되는 인플레이터의 압력, 시간 값을 인플레이터 해석 모델을 적용하여 해석을 진행할 수 있다.

후 기

본 연구는 BK21-II 의 지원과 현대모비스 산학과제 (0591-20080027) 의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) R. T. Grimley and J. L. Margrave, "The High Temperature Heat Content of Sodium Oxide," J. Phys. Chem., Vol.64, No.11, pp.1763-1764, 1960.
- 2) W. C. Robert and F. W. Edgar, "Thermodynamics of Alkali and Related Azides I. Heat Capacity of NaN_3 from 5 to 350K," J. Chem. Thermodynamics, Vol.8, pp.565-573, 1976.
- 3) P. B. Butler, H. Krier, E. M. Fraigle, J. H. Semchena, R. Thompson and R. Isermann, "Numerical Simulation of Passenger-side Automotive Inflators," SAE 920848, 1992.
- 4) G. P. Sutton, Rocket Propulsion Elements, 6th Edn, John Wiley, New York, 1992.
- 5) M. J. Zucrow and J. D. Hoffman, Gas Dynamics, Vol.1., John Wiley, New York, 1976.
- 6) P. L. Varghese, Investigation of Energy Transfer in the Ignition Mechanism of a NASA Standard Initiator, Grant No. NAG9-201, 1988.