

에어백용 인플레이터를 이용한 미니 가스발생기 연소특성 실험연구

An Experimental Study on Combustion Characteristics of Mini Gas Generator by using a Automotive Airbag Inflater

김종한* 이상무* 김방식**
Jong-Han Kim Sang-Moo Lee Bang-Sik Kim

ABSTRACT

A basic study was performed to develop a mini gas generator by using a commercial automotive airbag inflater. The mini gas generator can be used for industrial and military application like a seat belt pretensioner. Some parameters were experimentally investigated to reduce the size of the inflater. Basic combustion tests were performed in the closed chamber and measured the pressure and the temperature behavior according to the design parameters. From the study, essential parameters were determined to design a mini gas generator.

Keywords : Inflater(인플레이터), Gas Generator(가스발생기), Combustion(연소), Pressure(압력), Temperature(온도), Metal Filter(금속 필터)

1. 서론

자동차용 에어백 시스템은 차량 충돌 시 승객을 보호하기 위한 장치로서 충돌감지센서와 에어백(airbag) 그리고 백을 부풀리기 위한 인플레이터(inflater) 등으로 구성되어 있다. 에어백시스템은 자동차가 충돌 시 센서가 외부 충격을 감지하고 전자 제어장치가 이를 유효한 신호로 판단하여 점화신호를 인플레이터에 인가하면, 인플레이터의 가스발생제가 점화되고 이때 발생하는 고온, 고압의 가스가 순간적으로 백을 부풀려

탑승자가 차량 핸들이나 앞 유리 등에 직접 충격하지 않고 백에 부딪혀 완충작용을 하게 함으로써 탑승자를 보호하게 한다. 이를 위해 인플레이터는 점화 신호 접수 이후 4 ms 이내에 가스를 방출시키기 시작하여 30~50 ms 정도의 시간 동안 가스를 방출하여 에어백을 부풀리고 팽창을 유지하여야 한다.

에어백시스템의 주요 구성요소 중 하나인 인플레이터는 가스 생성 방식에 따라 가스발생제를 연소시켜 가스를 얻는 화약식과 고압충전 가스를 사용하는 고압충전 가스식 및 혼합형인 하이브리드 식으로 나누어진다. 두 인플레이터의 장단점은 다음 표 1과 같다.

본 연구는 자동차의 에어백에 사용하는 화약식 인플레이터를 이용한 소형 가스발생기의 개발가능성을 검토할 목적으로 수행되었다. 상용 인플레이터는 치열한 경쟁의 결과로 개별 요소가 최적화되어 있어 소형 가

† 2013년 6월 27일 접수~2013년 10월 18일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

** (주)한화

책임저자 : 김종한(hanbellkim@add.re.kr)

스발생기의 개발에 필요한 최적의 경제적, 기술적 여건을 갖추고 있다. 소형 가스발생기는 자동차의 안전벨트시스템에서 충돌 시 벨트를 미리 당겨주어 탑승자를 안전하게 구속시켜 주는 프리텐서너(pretensioner) 등에 사용되기도 한다¹⁻³⁾. 소형 가스발생기는 이와 같은 민수분야 외에도 빠르고 정밀한 제어가 필요한 군사용 구동기기로 다양한 파이프테크닉 장치 등과 함께 활용이 가능할 것으로 판단된다.

Table 1. Pros/Cons of pyrotechnic and cold gas inflators

	화약식	고압충전가스식
장점	저가, 소형 경량 저장성 양호	저온 배출가스 안정적인 성능
단점	고온 배출가스	고가, 대형

본 연구에서는 자동차용 인플레이터를 구성하고 있는 기본 설계 변수들에 따른 기초시험을 통해 연소특성을 검토하고 소형 가스발생기를 설계할 수 있는 기초자료를 획득하였다.

2. 인플레이터 성능 평가조건 설정

가. 인플레이터의 기본 구성 및 주요 인자

현재 국내에서 양산중인 인플레이터는 사용하는 점화기(igniter)의 수량에 따라 이중구조(dual) 또는 단일구조(single) 제품으로 구분된다. 인플레이터의 기본 구성을 나타내기 위한 예로서 단일 점화기 구조 제품의 구성 예를 Fig. 1, 2에 나타내었다.

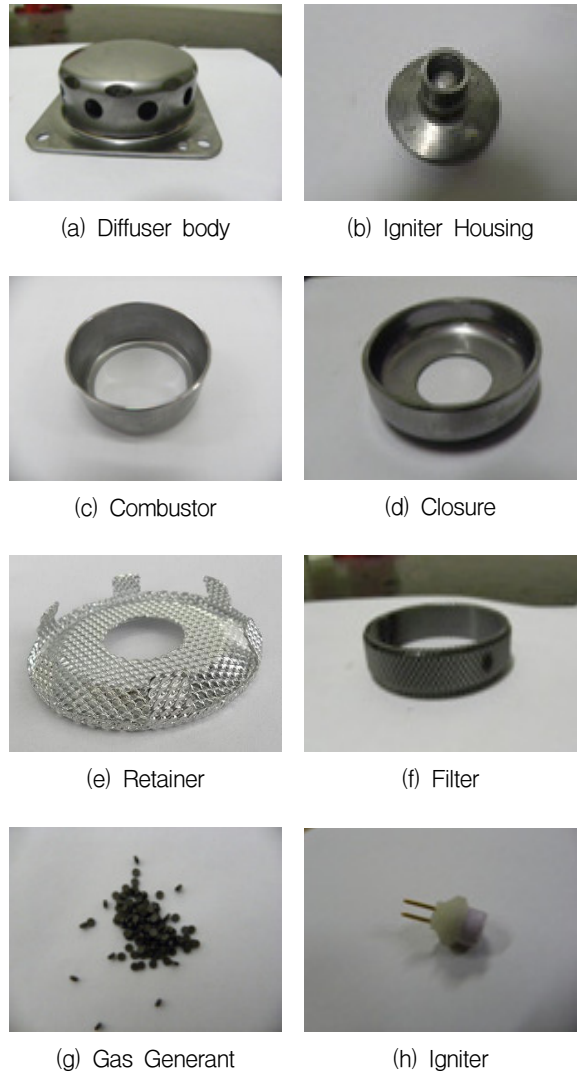


Fig. 2. Pictures of inflator elements

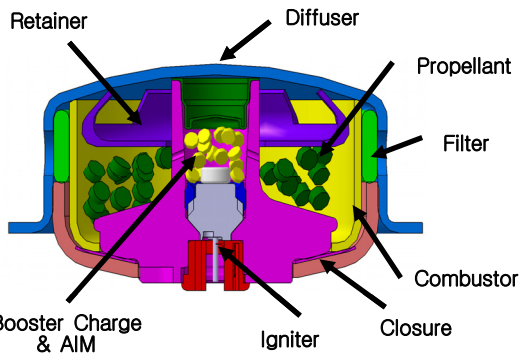


Fig. 1. Schematic representation of single mode inflator

인플레이터는 다음과 같은 순서로 작동된다. 먼저 자동차의 사고 등으로 충돌 감지센서가 충격신호를 에어백 콘트롤 유닛으로 보내면 에어백 콘트롤 유닛이 신호를 판단하여 점화기에 점화신호를 인가한다. 점화기에서 시작된 연소는 부스터화약(booster charge)으로 전달되고 부스터화약의 연소로 발생한 고온 고압으로 가스발생제가 연소를 시작한다. 연소실(combustor)내의 가스발생제에서 연소가 진행되면 압력이 상승하고 일정압력(220 bar) 이상이 되면 디퓨져 커버와 연소실 상부에 간극이 발생하여 고압가스가 분출된다. 이 가스는 필터를 통과하고 최종적으로 디퓨져의 구멍을 통해

외부로 확산되어 에어백(airbag)을 부풀리게 된다.

인플레이터에 따라서는 발화온도가 가스발생제에 비해 상대적으로 낮은 자동점화약(auto ignition material)을 추가하여 안전성을 높이기도 하는데 정상적인 작동 상황에서는 가스발생제의 점화를 돕거나, 보조 가스발생제로서의 역할을 수행하다가, 차량 화재 시에는 가스 발생제를 조기 점화시켜 고온으로 약화된 인플레이터의 금속 케이스가 폭발적으로 비산하는 것을 방지하는 작용을 한다.

본 연구에 사용한 인플레이터는 운전자용 에어백에 사용되는 독일 TRW 사의 이중 구조 모델 DI 9.2를 국내 생산한 것으로 연간 100만개 이상이 생산되고 있다. 이 인플레이터의 주요 특성은 다음과 같다.

- 외형 : 외경 70 mm, 높이 40 mm, 무게 430 g
- 작동/비작동 수준 : 1.2 A, 2 ms / 0.4 A, 10 sec
- 배출 가스 온도 : 880 K
- 발생 압력 : 140~300 kPa

(60 L tank 기준, Fig. 3 참조)

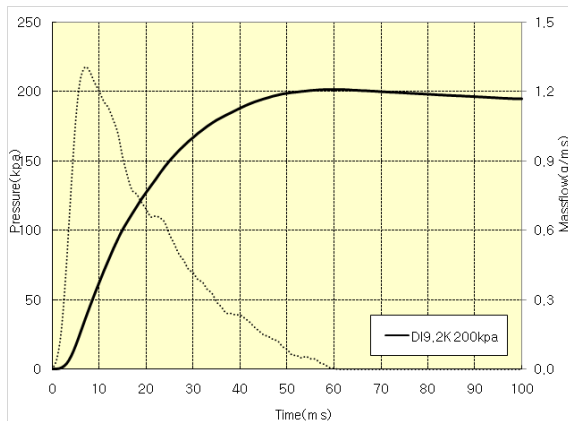


Fig. 3. Typical pressure and mass flow curve of DI-9 inflator

사용 화약으로는 가스발생제로 37 g의 GuNi-75를 사용하며, 부스터화약으로는 650 mg의 GuNi-327을, 자동점화약으로는 200 mg의 TS-1을 사용한다. 가스발생제와 부스터화약은 tablet 형상으로 제작하여 사용하며, 펠렛 형상의 자동점화약이 점화기와 부스터화약 사이에 배치되어 있다. 점화약으로는 ZPP(Zirconium/Potassium Perchlorate) 180 mg을 사용한다. Table 2에 사용 화약들의 개략적인 특성을 제시하였다.

Table 2. Pyrotechnics used in tested inflators

화약	조성 (wt %)	T_{ig} (°C)	형상 (mm)	효율 (%)
GuNi-75	- 질산 구아니딘 (51) - 염기성질산구리(45) - 산화 철(II) (3) - 기타 (1)	230	Φ 4 x t2	75
GuNi-327	- 질산 구아니딘 (39) - 산화구리 (II) (30) - 과염소산칼륨 (21) - 알루미늄 (10)		Φ 3 x t1	58
TS-1	- 질산 구아니딘 (39) - 질산나트륨 (20) - 3-NTO (40) - 기타 (1)	160	Φ 6 x t4	50
ZPP	- 지르코늄 (52) - 과염소산칼륨 (42) - 기타 (6)		powder	-

나. 설계 및 시험 인자

현재 양산중인 인플레이터의 사양을 분석하여 주요 인자에 영향을 미치는 부품을 분류하고 각 부품의 변경 가능성을 판단하여 최적의 설계 조건을 찾고자 하였다.

소용량의 인플레이터를 개발하기 위해 기존의 양산 제품인 DI9.2 모델을 선정하였으며 가스발생제의 양을 축소 조절하고 시험과 계측을 통해 설계 인자에 따른 연소특성을 검토하였다. 현재의 구성에서 조절 가능한 인자로는 가스발생제의 약량을 포함한 부스터화약 및 자동점화약의 약량, 연소실의 내부 부피, 디퓨저의 출구 크기, 필터의 특성 등이 있다. 이들 설계변수들의 변화에 따른 연소가스의 압력특성과 온도 자료를 획득하기 위한 실험적 연구를 수행하였다.

다. 소형 가스발생기 개발 사양

개발목표로 설정한 소형 가스발생기는 기본 인플레이터와 동일한 입력조건에서 작동을 개시하여, 최대 100 ms 이내에 최고압력에 도달하는 것으로 작동조건을 설정하였다. 출구 압력은 기본 인플레이터의 1/20 수준인 10 kPa 이하로 설정하였으며, 출구 측 온도는

최고 100 °C 이하로 설정하였다. 배출 가스온도 100 °C 기준으로 60 L Tank에 0.1 mole의 가스가 충전된 경우 이론 압력은 5.17 kPa 이다.

3. 인플레이터 연소실험 및 결과 분석

가. 시험 장치 구성

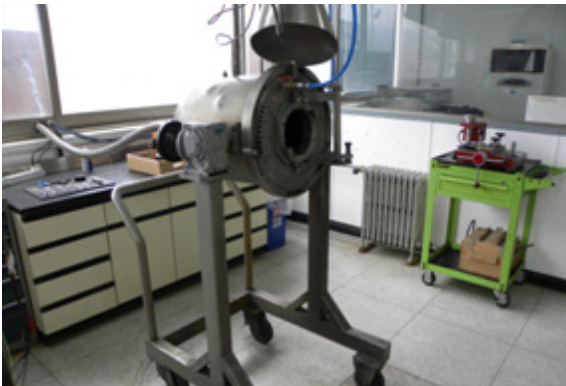
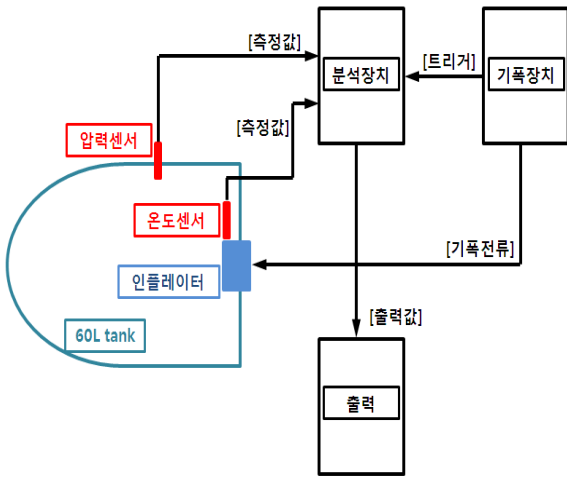


Fig. 4. Inflator test setup

실험을 위해 아래 Fig. 4와 같이 시험장치를 구성하였으며, 챔버는 146 L형 또는 60L 형을 사용하였다. 일반적으로 60 L형 탱크는 운전자용 에어백에 대한 시험용으로 사용하고 있으며, 146L형 탱크는 승객용 에어백에 대한 시험용으로 사용하고 있다. 실험은 챔버 내에 설치한 인플레이터의 점화기에 기폭전류(1.2 A, 2 ms)를 공급하고 기폭신호와 계측장치의 트리거를 연동

시켜 압력(센서 KISTLER - 4043A10) 및 온도의 시간에 따른 변화를 측정하였다. 일반 챔버 실험의 경우 인플레이터의 출구에서 가스의 온도에 대한 정보를 획득하기 어려우나 본 실험의 경우 가능한 수준에서 발생가스의 온도를 측정(센서 KIMO사 TK100)하고자 하였다. 본 연구와 같이 인플레이터의 용량이 매우 작은 시험의 경우 인플레이터로부터 발생한 고온가스와 기존 챔버내에 남아 있는 저온의 공기가 섞이면서 압력-시간 곡선에 영향을 미칠 수 있다⁴⁾.

나. 가스발생제 약량에 따른 연소 특성

1차 시험으로 가스발생제의 약량 축소에 따른 연소 특성에 대하여 실험을 수행하였다.

실험 조건은 다음과 같다.

- Diffuser hole : $\Phi 8 \times 10$
- Igniter Housing : Dual
- Filter : 타공형(Expanded type)
- 가스발생제 : 10.5 g

이 시험에서는 부스터화약과 자동점화약은 적용하지 않았다. 점화기의 약량이 충분히 큰 경우 부스터화약이 없어도 가스 발생제를 연소시킬 수 있다. 실험 결과는 Fig. 5와 같다. 동일한 가스발생제를 적용하여 146 리터 탱크 내에서 5회 실험한 결과 측정 압력은 실험 간에 큰 편차를 보이고 있었으며 가스발생제에 따른 예상압력보다 낮은 압력이 형성되었다. 최고 연소압력에 도달하는 시간도 100 ms를 초과하여 발생하고 있다.

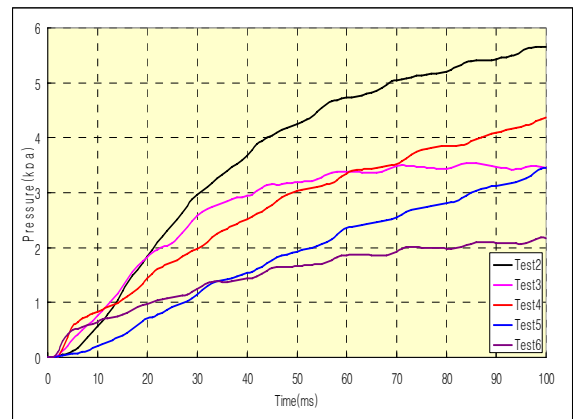


Fig. 5. Effect of gas generant weights

이는 충분한 연소조건이 형성되지 않아 연소속도가 늦어지고 압력도 낮아진 것으로 분석된다. 디퓨저의 바깥에서 측정된 연소가스의 온도는 대략 84 °C 수준이다. 이 시험결과로부터 우선 균일한 연소결과를 얻기 위하여 점화속도를 상승시키는 것이 필요하다고 판단하여 추가로 부스터화약을 적용하여 시험을 수행할 필요가 있음을 확인하였다.

2차 시험은 가스발생제의 점화 속도를 높이고자 부스터화약 1그램을 추가 적용하였으며 연소실험은 60 리터 탱크에서 수행하였다.

<시험조건>

- Diffuser hole : $\Phi 8\text{mm} \times 10\text{개}$
- Igniter Housing : Dual구조
- Filter : 타공형
- 가스발생제 : 9 g
- 부스터화약 : 1 g

연소시험 결과 압력상승 패턴이 Fig. 6과 같이 100~300 ms에서 다단연소 형태로 나타났으며 최고압력도 매우 지연되어 나타나고 있다. 이는 가스발생제의 적정 연소조건(220 bar 이상)을 충족하지 못하기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

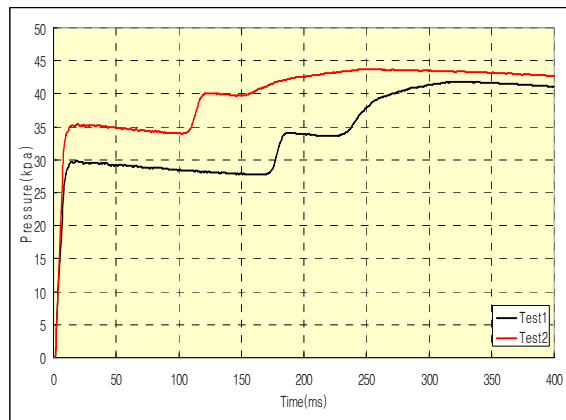


Fig. 6. Effect of booster charge

기존의 부품을 그대로 사용하면서 적은 양의 가스발생제를 충전하기 때문에 생기는 빈 공간이 정상 연소 및 압력상승에 불리하게 작용한 것으로 판단되어 가스발생제의 약량에 맞는 단일점화구조의 소형 연소실 (combustor)을 새로 가공하여 적용할 필요가 있음을 확

인하였다.

따라서 기존 모델의 연소실(내용적 45.7 cc)을 소형 단일점화구조의 연소실(내용적 5.6 cc) 형태로 제작하여 적용하였으며 최고압력 도달시간을 단축하기 위해 부스터화약(650 mg)과 자동점화약(200 mg)을 같이 적용하였다.

<시험조건>

- 소형 Combustor(single) (내용적 5.6 cc)
- Diffuser hole : $\Phi 8\text{mm} \times 10\text{개}$
- Filter : 타공형
- 가스발생제 : 10.5 g / 9.0 g
- 부스터화약 : 650 mg / 자동 점화약 : 200 mg

시험결과 Fig. 7과 같이 다단연소 현상이 해소되었으며 측정압력의 편차가 개선되었다. 최고 압력은 35~55 kPa로 60~80 ms에서 도달하였으며 출구 온도는 약 130 °C로 측정되었다. 시험 결과로부터 연소실 부피를 줄이고 부스터 화약과 자동점화약을 사용하면 가스발생제를 안정적으로 연소시킬 수 있음을 확인할 수 있었고, 목표로하는 출구압력을 얻기 위해서는 가스발생제의 약량을 감소 조절해야 함을 알 수 있었다.

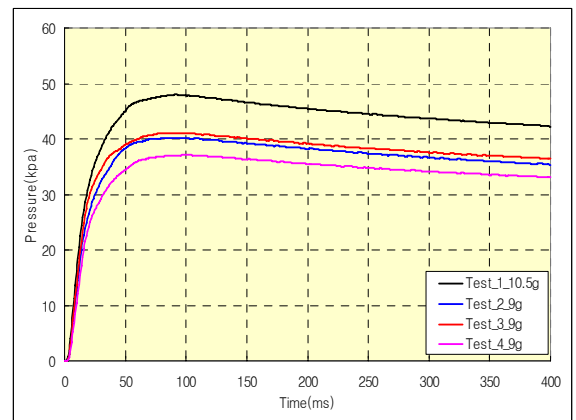


Fig. 7. Effect of combustion chamber volume

Table 3에 가스발생제 약량을 달리한 연소시험 결과를 제시하였다. 가스발생제 약량을 제외한 모든 시험 조건은 앞의 시험에서와 동일하며, 시험 후 연소 잔량의 무게를 측정하여 연소량을 얻었다. Table 3에서 실효 연소량은 자동점화약과 부스터 화약에 대해서는 50%와 58%, 가스발생제에 대해서는 75%의 연소 효율

을 적용하여 아래식에 따라 계산한 예측치로서, 시험 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

$$W_e = W_1 \cdot \eta_1 + W_2 \cdot \eta_2 + \dots + W_n \cdot \eta_n = \sum_1^n W_i \cdot \eta_i \quad (1)$$

여기서

W_e 실효 연소량

W_i 가스발생제(/부스터화약/자동점화약)약량

η_i 연소효율

Table 3. Result of gas generant weight tests

가스 발생제 약량(g)	측정연소량 (g)	실효연소량 (g)	측정 압력 (kPa)
10.5	8.3	8.352	48
9	7.2	7.227	40
6	5	4.977	25
4	3.5	3.477	14
3	2.8	2.727	10

실효 연소량, W_e 와 실험을 통해 구한 최고압력과의 관계는 Fig. 8과 같이 잘 정리되고 있으며 실효 연소량 (g)에 따른 연소가스압력(kPa)의 평균치는 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$\bar{P} = 6.813 W_e - 9.036 \quad (2)$$

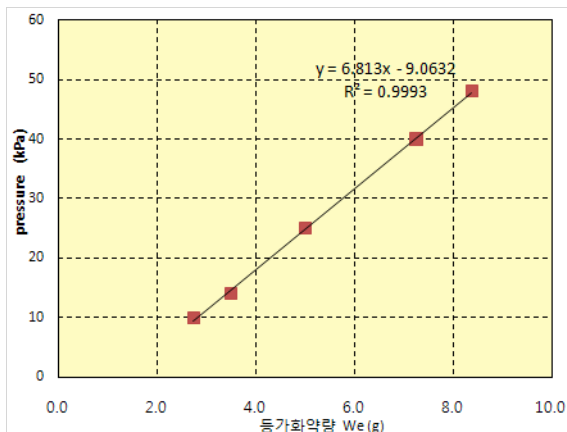


Fig. 8. Correlation between equivalent charge weight and pressure

위 관계식에 따르면 예상 실효 연소량이 3 g이면 압력 10 kPa을 충족할 수 있을 것으로 예상된다.

실제 적용시에는 산화구리 같은 잔사물질로 인한 손실과 연소효율을 고려하여 가스발생제를 4 g 충전해야 하는 것으로 예상된다.

다. 필터 특성시험

다음은 필터 특성에 따른 연소특성을 분석하고자 하였다. 가스발생기에 적용하는 필터는 연소 시 발생하는 고온의 가스가 필터를 통과하면서 필터에 열을 전달함으로써 연소기체를 냉각시키거나 연소시 발생한 잔사물질을 걸러주는 역할을 하는 것으로 메시(mesh) 형태나 다공성(porous) 매질을 사용할 수 있다. 본 연구에서 기본적으로 사용한 필터는 다음 Fig. 9의 좌측에 있는 타공형(Expanded type)이며 추가로 선경 0.7 mm의 편물형(knitted type) 스테인레스 필터를 제작하여 적용하였다.

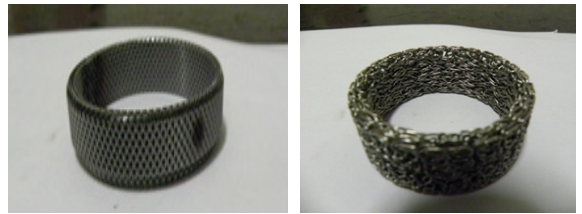


Fig. 9. Metal filters(Expanded and Knitted type)

필터의 재질은 모두 스테인레스이며 타공형과 편물형의 밀도는 각각 2.9 g/cc 및 2.34 g/cc 이다. 필터특성에 따른 연소특성 시험 조건은 다음과 같다.

<시험조건>

- 소형 Single combustor(내용적 5.6 cc)
- Diffuser hole : $\Phi 8\text{mm} \times 10\text{개}$
- Filter : 복합형(타공형 + 편물형)
- 가스발생제 : 4 g
- 부스터화약 : 650 mg / 자동 점화약 : 200 mg

Fig. 10은 타공형 필터만 적용한 경우와 편물형 필터를 추가적으로 적용한 경우의 실험결과이다. 일반적으로 필터는 열흡수(heat sink) 기능과 연소 중 발생한 고형물을 거르는 기능을 하며 성긴 필터와 조밀한 필터를 비교하면 조밀한 필터가 압력강하에 기여하는 정도가 상대적으로 크다.

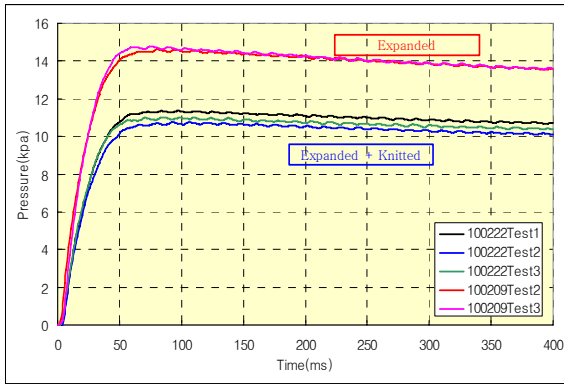


Fig. 10. Effect of filters

기존 필터에 가스발생제를 4 g 적용한 경우 최고 압력은 14.5 kPa이며 출구측 온도는 72 °C였다.

편물형태의 금속필터를 추가로 적용하여 실험한 결과 배출되는 가스의 최고 압력은 25~30 % 정도 낮아지고, 디퓨저를 통과하는 출구측의 평균가스 온도도 68 °C로 낮아짐을 확인하였다.

라. 디퓨저 홀 크기 영향 시험

다음은 디퓨저 홀의 크기에 따른 영향을 검토하였다. 기존 인플레이터 모델에는 직경 8.0 mm의 구멍이 10개 적용되어 있으며 비교 시험에서는 직경 4.0 mm의 구멍을 4개만 적용하여 디퓨저 홀의 전체면적을 1/10로 축소하였다. 디퓨저 홀 크기에 따른 연소특성 시험 조건은 다음과 같고, 실험 결과를 Fig. 11에 제시하였다.

<시험조건>

- 소형 Single combustor(내용적 5.6 cc)
- Diffuser hole : $\Phi 4\text{mm} \times 4\text{개}$ (면적 1/10)
- Filter : 타공형
- 가스발생제 : 4 g
- 부스터화약 : 650 mg / 자동 점화약 : 200 mg

연소실험 결과 디퓨저 홀의 갯수와 단위 디퓨저 홀 면적의 축소로 인하여 고온의 가스 압력이 빠져나가는 시간이 길어지므로 완충 작용이 강화되어 배출 가스의 에너지가 감소하게 된다. 디퓨저 홀 크기를 1/10로 축소함으로써 탱크의 최종 압력은 약 33 % 감소되었다. 출구 측 가스 온도는 72 °C에서 63 °C로 저하되었다.

앞의 실험결과를 통해 확인할 수 있는 바와 같이 금

속 필터를 추가하여 열 흡수량을 늘리거나 디퓨저 홀의 크기를 축소함으로써 출구의 배출가스 온도를 낮출 수 있음을 확인하였다.

최근의 연구에서는 특정 연소제를 사용하여 연소온도를 획기적으로 낮춘 저온형 가스발생기(solid propellant cool gas generator)가 보고된^[5,6] 적도 있다.

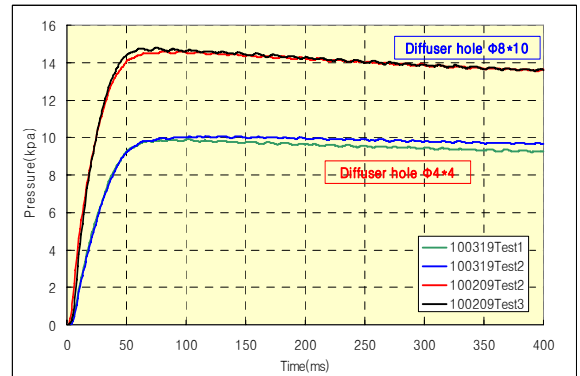


Fig. 11. Effect of diffuser hole size

마. 최종 조건 적용 시험

최종 시험은 복합형 이중 필터 조건 및 디퓨저 홀의 크기를 줄인 조건으로 수행하였다.

<시험조건>

- 소형 Single combustor(내용적 5.6 cc)
- Diffuser hole: $\Phi 4\text{mm} \times 4\text{개}$
- Filter : 복합형(타공형 + 편물형)
- 가스발생제 : 4 g
- 부스터화약 : 650 mg / 자동 점화약 : 200 mg

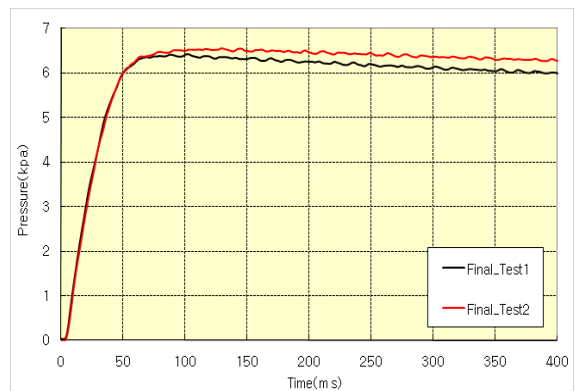


Fig. 12. Pressure history curves of final test

시험결과는 Fig. 12와 같이 70 msec 부근에서 약 6.4 kPa 수준의 최고 압력에 도달하였으며, 출구 측 온도는 평균 55 °C로 측정되었다.

본 시험결과는 초기에 목표로 설정하였던 압력과 온도 요구조건을 만족하고 있다.

4. 결론

소형 가스발생기의 개발 가능성을 검토하기 위하여 대량 생산되는 자동차용 인플레이터를 이용하여 인플레이터의 주요 설계 파라미터에 대한 연소특성 실험을 수행하였다. 가스발생제의 약량과 필터, 디퓨저의 영향 등에 대한 실험적 검토를 통해 소형 가스발생기 개발을 위한 주요 설계 파라미터 자료를 획득하였으며 최종 압력 기준으로 출구압력이 10 kPa(60리터 탱크 기준) 이하이면서 출구측 온도도 100 °C 이하인 소형 가스발생기의 설계가 가능함을 확인하였다.

향후 본 연구결과를 활용하고 기본 점화기 등 일부 구성품만 군규격에 맞도록 개선한다면 최소의 노력과 비용으로 소형 가스발생기의 개발이 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] Belt Pretensioner with a Pyrotechnic Gas Generator, US Patent, 5468019, 1995.
- [2] Gas Generator for Seat Belt Pretensioner, US Patent, 6454306, 2002.
- [3] Micro Gas Generator, US Patent, 7370885, 2008.
- [4] Jochen Neutz, Andres Konig etc, "Mass Flow Discharge and Total Temperature Characterization of a Pyrotechnic Gas Generator Formulation for Airbag Systems", Propellant Explos. Pyrotech., 34, pp. 267 ~273, 2009.
- [5] V. A. Shanda Kov etc, "Method of Generating Cold Gas in Solid-Fuel Gas Generator", Combustion, Explosion and Shock Waves, Vol. 35, No. 4., pp. 418~421, 1999.
- [6] H. M. Sanders, L. D. van Vliet, P. van Put, J. Kuiper, "Cool Gas Generators, an Innovation in the Storage of Pneumatic Energy", Trends and Future of On-Board Energy in Space Systems, Avignon, France, 2008.