다발 원통형 그레인을 사용한 가스발생기의 저주파 연소불안정 소멸에 대한 실험적 연구

성홍계* · 변종렬*

Experimental Study on the Suppression of Low Frequency Unstable Burning Occurred in a Gas Generator Using Bundle Cylindrical Grain

Hong-Gye Sung* · Jong-Ryul Byun*

ABSTRACT

Untypical unstable burning with very low frequency was observed at firing test of a gas generator using bundle cylindrical grain. The pressure unbalance between inside and outside of cylindrical grain brought such a low unstable burning. The grains were radially holed so that the high pressure gas inside of grain could quickly moved outward of gain, resulting dissipation of the pressure unbalance. However too many holes were required to let the burning be stable for all operation regime from low to high temperature of grain and resultantly deteriorate the progressive increase of gas amount produced by a gas generator. So another idea using grids located both sides of a bundle grain was applied to dissipate actively large vorticities enhanced by unbalance pressure distribution in a combustor. Finally stable burning with progressively increase of gas was established by application of 5×5 grid slightly away bundle grain to move bundle gain freely in case pressure unbalance were occurred inside of combustor.

초 록

원통 다발형 그레인의 연소시험 결과 저주파 불안정 현상이 나타났다. 그 원인은 원통 그레인 내면의 압력과 외면의 압력차(압력 비평형)가 주원인임을 알 수 있었으며, 그레인 반경방향으로 홀을 뚫어 그레인 내면에 상승된 압력을 외면으로 빠르게 확산되도록 하여 안정된 연소현상을 얻을 수 있었다. 그러나 고온 조건에서도 안정된 연소 현상을 얻기 위하여 직경 3 mm 홀 7개를 뚫게 됨에 따라 가스발생량의 증가가 많이 둔화되어 격자를 사용하는 방법을 연구하게 되었다. 격자를 사용함으로써 큰 와류(large vorticity)를 소멸시켜 그레인에 홀을 뚫지 않고도 안정된 연소를 얻을 수 있었으며 가스 발생량도 점진적으로 증가시킬 수 있었다. 가로×세로 격자는 5×5, 그레인은 격자에 고정시키지 않을 때 가장 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

Key Words: Combustion Instability(연소불안정), Gas Generator(가스발생기), Ejection System(사출장치)

1. 서 론

비행체의 임무에 따라 요구되는 추진기관의 추력(압력)-시간 선도는 매우 다양하다. 일반적으

† 2004년 7월 15일 접수 ~ 2004년 8월 12일 심사완료
* 정회원, 국방과학연구소 기-4-2
연락저자, E-mail: hgsung1@hanafos.com

로 비행고도의 변화가 크지 않으면서 주추력 발생장치로 사용되는 추진기관의 추력(압력)은 시간에 따라 변화하지 않고 일정(neutral burning)하여 연소실 내압에 대한 연소관의 두께를 필요 이상으로 두껍게 하지 않음으로서 추진기관의 전체 무게를 최소화하는 것이 바람직하며, 비행 중 고도변화가 큰 경우이면서 저고도에서 고고도로 발진하는 비행체의 추진기관은 추력(압력)이 시간에 따라 감소(regressive burning)하게 하므로 비행체의 공기저항을 불필요하게 증가시키지 않음으로써 비행성능을 높일 수 있다. 또한 비행기술이 발달될수록 요구되는 추진기술도 매우 다양하다. 순간적으로 고추력이 요구되는 추진기술(초기 또는 비행 말기 비행체의 방향을 조종하기 위한 방향조종 장치용 추진기관), 추력은 작으면서 연소가스발생량을 크게 요구하는 추진기술(비행체 이륙을 위한 가스발생기, 본 연구에 해당됨)등 추진기술의 적용 대상이 다양해짐에 따라 요구되는 역할도 다양하다.

고체 연료를 이용한 추진기술은 요구되는 추력(압력)-시간 선도를 발생시키기 위하여, 고체추진제의 연소속도와 추진제의 형상(그레인)으로 조절을 하는데, 요구되는 정도의 차이는 있으나 주어진 연소실 공간에 추진제를 고충전하여 유효공간을 효과적으로 사용하므로 비행체 전체 시스템의 부피를 가능한 작게 하는 것은 공통적 요구조건이라 할 수 있다.

주어진 공간에서 고체추진제를 고충전화 할 경우, 연소실 내의 빈 공간(free volume)은 작아지게 되므로, 연소실내부의 음향 내란 흡수 공간(cavity volume absorbing acoustic noise)은 작아지게 되므로 연소 불안정의 확률은 높아지게 된다. 일반적으로 알려진 연소불안정은 추진제가 연소되면서 발생되는 음향학적/유동학적 내란이 밀폐되어 있는 추진기관의 공간(노즐이 chocking 되어 있으므로 음향학적으로 밀폐되었다 할 수 있음)에서 발생 가능한 음향 모드와 가진되어 연소실 압력을 증폭시킨다고 할 수 있다. 가진 주파수는 연소실의 형상에 대하여 축방향 모드(longitudinal mode), 횡방향 모드(tangential mode), 반경방향 모드(radial mode)로 구분된다. 위에서 언급된 연소불안정은 음향학적 불안정 모드에 근거하여 해석된 것으로, 연소불안정이 발생되면 우선적으로 음향학적 모드를 도출하고 이에 상응하는 치유방법을 고안하는 것이 상례이다. 이러한 음향모드의 가진에 의한 연소 불안정 현상은 로켓 모타[1,2], 램제트 엔진[3] 등에 자주 등장하는 문제로 물리적 이해와 연소 안정화 방법들이 많이 연구되어 왔다. 본 논문에서는 위에서 언급된 음향학적 가진에 의한 연소 불안정 현상과는 매우 상이한 매우 낮은 주파수의 연소불안정이 발생된 실험결과에 대한 물리적 이해와 이를 치유하기위해 고려된 방법들에 대한 실험적 연구 내용을 기술하였으며, 문헌 조사결과 이러한 부류의 연구물은 매우 희소함을 알 수 있었다.

2. 본 론

2.1 불안정 연소 현상

Figure 1은 가스발생기를 이용한 유도탄의 사출 시스템 개념도이다. 고체 추진제 가스발생기는 발사관 하부, 유도탄 아래에 설치되어있으며, 가스발생기에서 분출된 가스의 압력으로 유도탄을 밀어 올리는 방식의 사출 방법이다. 유도탄이 발사관내에서 움직임에 따라 가스발생기와 유도탄사이의 공간이 커지게 됨으로 일정한 힘으로 유도탄을 사출시키기 위해서는 가스발생량이 시간에 따라 점차 증가되어야 하는 조건이 요구된다. 따라서 그레인의 형상은 연소면적이 점진적으로 증가(progressive burning)가 되도록 설계되는 것이 바람직하다.

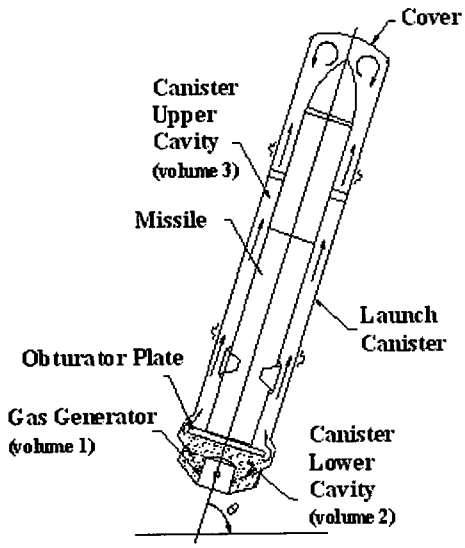

Fig. 1 Conceptual schematic of a missile ejection system

본 유도탄 사출용 가스발생기는 발사관 하부에 설치되어 있으므로 가스발생기의 크기는 다른 용도의 고체 추진기관에 비하여 설계에 중요 인자는 아니지만, 가스발생기가 차지하는 공간은 발사시스템의 크기와 직결되므로 주요한 설계 인자이며, 가능한 작게 설계되어야한다. 점진적으로 가스발생량을 증가시키기 위하여 그레인은 원통형으로 하였고, 원통 외면에는 인히비터(inhibiter) 역할을 하도록 불활성 테이프를 감았으며, 가스발생기가 차지하는 공간을 최소화하기 위하여 여러 개의 원통 그레인을 가스발생기 연소실 내에 다발로 배치하였고 가스발생량이 주위 환경에 영향을 받지 않도록 가스가 유출되는 홀을 chocking 시켰으며, 길이를 최소화하기 위하여 가스발생기 위 몸체에 여러 개의 노즐 구멍을 뚫었다(Fig. 2, 3 참조).

연소시험 결과 약 10 Hz대의 불안정 주파수가 나타났는데(Fig. 4, 5), 이는 음향학적 연소 불안정의 주파수와 매우 상이한 낮은 주파수임을 알 수 있다(본 가스발생기의 형상과 가스 특정치를 고려할 때 음향학적 연소 불안정은 수천 Hz 임).

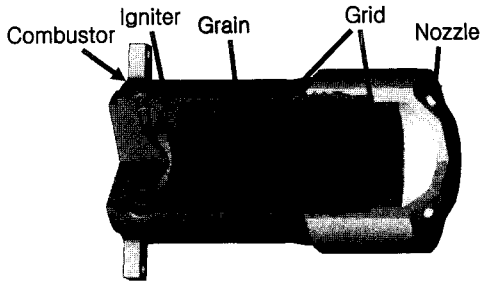

Fig. 2 Schematic of a gas generator applied for this study

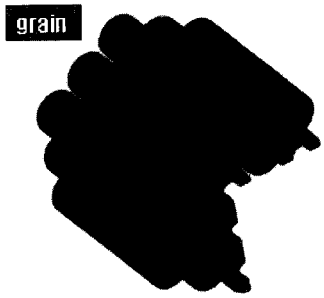

Fig. 3 Bundle cylindrical grains applied for this study

따라서 이렇게 낮은 주파수 영역을 유발하는 원인이 물리적으로 분석되어야 이를 치유하는 방법을 고안할 수 있다. 단일 원통형 그레인의 경우에 이러한 현상과 유사한 연구결과[4]에서 이해의 실마리를 찾을 수가 있었다. 원통형 그레인 내면에는 연소가스에 의하여 압력이 상승되며 상승된 압력이 그레인 외면으로 전파되어야 연소실내 압력 평형을 기대할 수 있다. 그런데 원통 그레인 내의 압력 상승이 외면으로 전파되기 위해서는 어느 정도의 시간이 소요되는데, 이 소요 시간 동안에 압력 비평형이 발생되고, 비평형 압력은 그레인 내외부에 다시 영향을 미치므로 결과적으로 연소실 내부 공간은 지속적으로 압력섭동을 일으켜 불안정한 연소현상을 발생시킨다. 이러한 물리적 이해를 근거로 불안정 연소현상을 제거하기 위해서는 원통 그레인 내면의 압력상승을 가능한 빠르게 외면으로 전달할 필요가 있다.

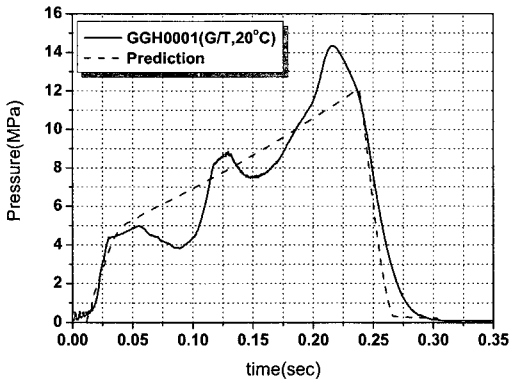

Fig. 4 Pressure vs. time history of 1st firing test

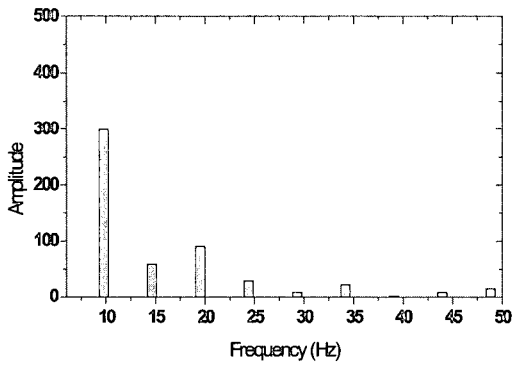

Fig. 5 FFT results of pressure trace of 1st firing test

2.2 홀이 불안정 연소에 미치는 영향

압력전파 소요 시간은 비평형 압력이 전파되어야하는 경로의 길이, 연소실 내의 유속과 음파 속도, 가스발생기의 내면 형상에 지배를 받는다. 따라서 압력 전파의 속도를 빠르게 하거나 이동 거리를 짧게 하는 것이 필요한데, 압력 전파의 속도 증가를 위하여 연소가스의 온도를 크게 변화시킬 수 없고, 연소실 내의 유로와 유속도 많은 변화를 줄 수 없으므로, 압력전파 이동 거리를 짧게 하는 방법이 현실적으로 효과적이라 할 수 있다. 이를 위하여 그레인 내면의 압력이 외면으로 빠르게 전파되도록 반경방향으로 홀을 뚫었으며(Fig. 6), 홀의 개수와 직경 변화에 따른 영향을 조사하

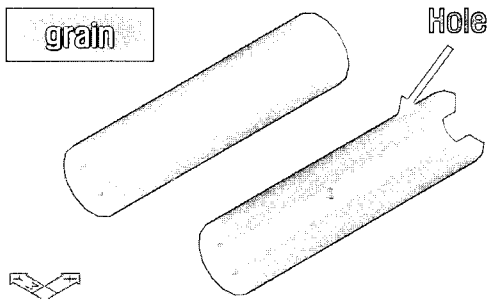

Fig. 6 Grain configurations with three holes

Table 1. Test combination to inspect hole effect

	홀 직경(mm)	홀 개수	시험온도(℃)
1	2	0	20
2	2	2	20
3	2	3	20
4	2	4	20, 60
5	2	7	20, 60
6	3	4	20, 60
7	3	7	20, 60

기 위해 Table 1과 같이 다양한 조합으로 실험을 하였다.

Figure 7은 홀의 직경이 2 mm일 때 홀 개수의 영향을 살펴보기 위한 시험으로써 추진제 초기 온도가 상온(20℃)일 때이다. 홀의 개수가 많아짐에 따라 압력 섭동이 줄어들다가, 4개의 홀을 뚫을 때, Fig. 4와 같이 홀이 없는 그레인과는 달리 안정된 연소를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 고온(60℃)에서는 홀의 개수를 7까지 증가하였으나 한 개의 압력 불연속 구간이 존재함을 알 수 있었다(Fig. 8). 고온에서 더 많은 홀을 뚫어야하는 이유는 그레인의 온도가 상승할 때 연소속도가 빨라져서, 원통 그레인 내부에서 발생되는 연소가스의 양이 증가되므로 내부 압력이 더욱 빨리 상승되어 외부와의 압력차이가 더욱 커지게 되는데, 이러한 현상이 불안정 연소를 크게 일으키는 요인으로 작용하기 때문이다.

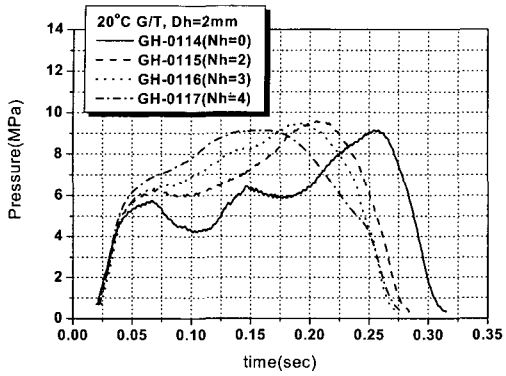

Fig. 7 Pressure vs. time history of firing test (hole diameter: 2mm, firing temperature: 20℃)

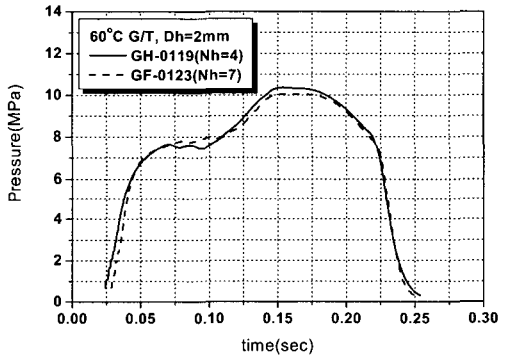

Fig. 8 Pressure vs. time history of firing test (hole diameter: 2mm, firing temperature: 60℃)

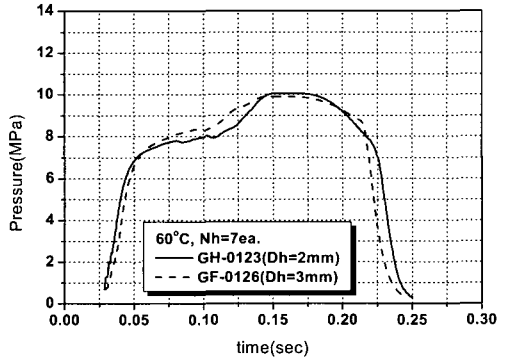

Fig. 9 Pressure vs. time history in case of different hole diameter

따라서 홀로 통과하는 연소가스의 양을 증가시켜 원통 그레인의 내외면 압력 평형을 빠르게 하기 위하여 홀의 직경을 2 mm에서 3 mm로 증가시켰다. Fig. 9는 고온에서 홀의 직경 변화에 따른 압력-시간 선도를 나타낸다. 시험결과 직경이 증가할수록 연소안정화가 개선되고 있음을 알 수 있으며, 이는 저주파 연소 불안정 원인은 원통 그레인의 안과 밖의 압력차이가 주원인임을 확인하는 시험결과이기도 하다. Fig. 10은 홀직경 3 mm, 홀갯수 7개인 가스발생기의 고온 시험 FFT 결과인데 Fig. 5 (상온시험 결과)와 비교시, 고온 시험임에도 10 Hz대의 이상의 주파수대 진폭이 감소되었으며, 20 Hz 이상의 진폭의 증가는 연소가스가 홀을 통과하면서 생성되는 주파수와 고온시 에너지 증가에 의한 것으로 사료된다.

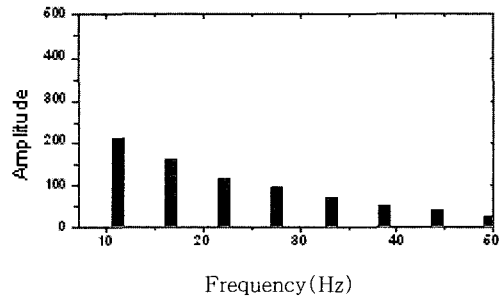

Fig. 10 FFT results of pressure trace (hole diameter: 3mm, number of hole: 7, firing temperature: 60℃)

2.3 격자가 불안정 연소에 미치는 영향

2.1절에 기술되었던 것처럼, 본 연구의 가스발생기는 유도탄을 사출시키는 장치이며, 유도탄이 발사관 내에서 움직임에 따라 가스발생기와 유도탄 사이의 공간이 커지게 되므로, 가스발생량이 점진적으로 증가되도록 설계하는 것이 바람직하다. 이를 위하여 그레인의 형상을 원통형으로 하면서 그레인 외면은 불활성 테이프(인히비터)로 접착되어 있다. 그러나 불안정 연소 현상을 치유하기 위하여 그레인에 홀(직경 3 mm)을 7개 뚫어서 불안정한 압력 섭동은 개선하였으나(2.2절 참조) 압력 상승이 완만하여(가스발생량의 상승

이 둔화됨을 의미), 홀을 이용하여 안정성을 증대시켰으나 가스발생량을 지속적으로 증가시키는 데는 바람직하지 못한 방법이었다. 이를 개선하기 위하여 액체엔진에서 자주 사용되는 배플의 개념과 유사한 격자를 고려한다. Fig. 11과 같이 그레인을 지지하는 원판형을 격자형으로 수정하였다. 이는 액체엔진에서 사용되는 배플과도 같은 역할을 한다고 볼 수 있으나, 액체 엔진에서의 배플은 음향 정현파를 산란시키는 기능을 하는데, 본 연구에서 사용한 격자는 흐르는 유동의 큰 와류(large vorticity)가 격자사이를 통과하면서 산란시키고, 격자를 90도로 엇갈리게 하여 연소관내의 저주파 압력파를 소멸시키는 방법이라 할 수 있다. 이러한 아이디어는 우연하게 발견된 러시아의 가스 발생기 개념도에서 착안하게 되었다[5].

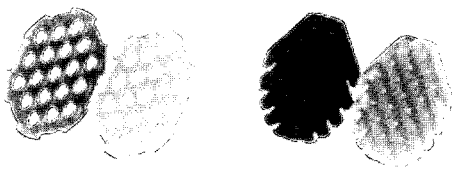

Fig. 11 Configuration of gain supporter (a: flat plate type, b: grind type)

Figure 12는 그레인에 홀을 뚫지 않고 격자형 그레인 지지판을 사용하였을 경우이며, 그레인을 격자에 고정할 경우와 자유스럽게 움직일 수 있도록 했을 경우의 실험 결과이다. 두 경우 모두 판형을 사용했을 때(Fig. 9) 보다 우수한 점진적 증가형 압력-시간 선도를 나타냄을 알 수 있다. 본 실험을 통하여 그레인을 고정하지 않고 자유스럽게 움직이도록 하므로 연소실 내의 압력 비평형을 그레인의 움직임으로 흡수할 수 있도록 하는 것이 안정된 연소에 기여함을 알 수 있다. Fig. 13은 홀이 없이 격자만을 사용한 고온 시험 FFT 결과이다. Fig. 5(상온시험 결과), Fig. 10과 비교 시, 10 Hz대의 진폭이 감소되었으며, 홀을 사용하였을 때보다 20 Hz 이상 주파수대의 진폭이 감소되었는데, 이는 앞에서 지적하였듯이 홀의 영향 또는 격자에 의한 산란 효과인 것으로 판단된다.

Figure 14는 격자의 개수를 바꿈으로 큰 와류의 소멸 효과를 조사하기 위한 시험 결과이다. 가로×세로 방향의 격자의수가 5×5와 6×6인 경우 모두 큰 차이는 나타나지 않는 것으로 나타났다. 지지판의 가공성을 쉽게 하면서 음향학적 관점에서, 홀수인 5×5의 격자를 사용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 격자의 수를 5×5를 사용하여 그레인 앞뒤 지지판의 마주보는 각도의 영향을 보기 위하여 180도 회전된 경우와 비교하였는데, 그 영향은 크지 않는 것으로 나타났다(Fig. 15).

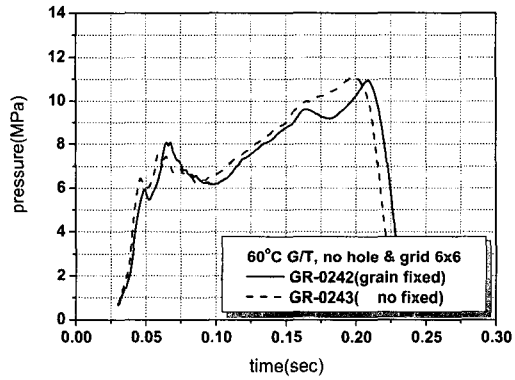

Fig. 12 Pressure vs. time of firing test in case of using grids with no hole through gain

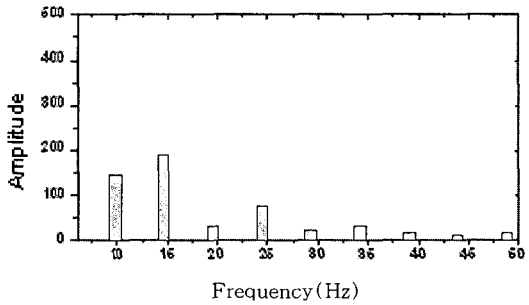

Fig. 13 FFT results of pressure trace (with grid, no hole, firing temperature: 60℃)

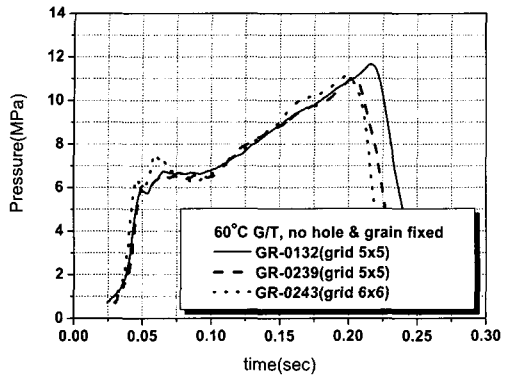

Fig. 14 The effect of the number of grid

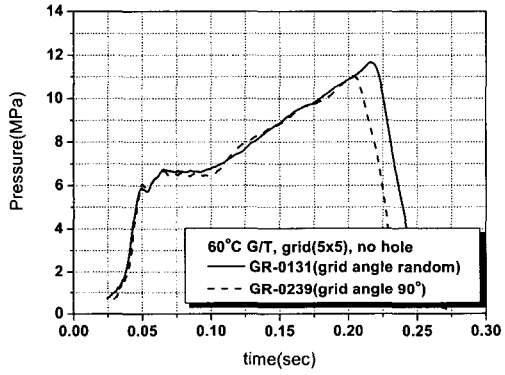

Fig. 15 The effect of the face angle of two grids

3. 결 론

본 논문에서는 다발 원통형 그레인을 사용한 고체 추진기관에서 발생되는 불안정 연소현상에 대한 연구내용을 기술하였다. 원통형 그레인의 연소 불안정요인은 원통내부의 압력과 외부의 압력 비평형이 주원인임을 알 수 있었다. 연소 불안정을 소멸시키기 위하여 두 가지 방법, 즉 1)그레인 반경방향으로 홀을 뚫는 방법, 2) 그레인 지지판을 격자형 지지판으로 사용하는 방법, 을 사용하여 안정된 연소 현상을 얻을 수 있었다. 각 방법에 대한 연구 결과는 다음과 같다.

1) 그레인에 홀을 뚫는 방법

그레인 원통 내면의 압력 상승이 그레인 외면으로 빠르게 전파되도록 그레인에 홀을 뚫어 불안정 연소현상을 치유하였다. 직경 2 mm 홀이 4개 일 때 상온(20℃)에서 안정된 연소현상을 얻을 수 있었으나, 고온(60℃)에서 불안정하여 직경 3 mm 홀 7개로 증가시킴으로 고온에서 안정된 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 홀의 개수와 크기가 증가되어 가스발생량의 증가 효과가 많이 둔화되는 결과를 나타내어 유도탄 사출용 가스발생기의 성능을 저하시켰다.

2) 격자형 지지판을 사용하는 방법

유동의 큰 와류를 소멸시키는 방법으로써 유도탄 사출 성능 향상을 도모하도록 가스 발생량을 점진적으로 증가 시키면서 안정된 연소 시험결과를 얻을 수 있었다. 가로×세로 방향의 격자가 5×5일 때와 6×6일 때 모두 큰 차이는 없었으며, 앞뒤 격자판의 각도에 대한 영향도 무시할만하였다. 그러나 그레인이 격자판에 고정되게 하는 것보다는 자유스럽게 움직이게 하여 연소실 내부의 압력 비평형이 그레인 움직임에 의해 흡수되게 함으로써 더욱 안정된 연소현상을 얻을 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Luca, L. D., Price, E., and Summerfield, M., Nonsteady Burning and Combustion Instability of Solid Propellant: Vol 143, Progress in Astronautics and Aeronautics, 1992
2. Natanzon, M. S., "Combustion Instability," Moscow, 1986, Translated in 1996 by Culick, F. C.
3. Eggleston, D.S, "Liquid Fueled Ramjet Combustion Instability: Acoustical and Vortical Interactions with Burning Sprays," AD-A222752, 1990
4. Wimpress, R.N., "Internal Ballistics of Solid Fuel Rockets," Chapter 9, MacGraw-Hill, New York
5. Technical Drawing from Fakel in Russia