

# 침식연소가 방지되는 사출용 다발 원통형 그레인 가스발생기 개발

오석진\*<sup>†</sup> · 차홍석\* · 장승교\*

## Development of a Ejection Gas Generator for precluding Erosive Burning by using Bundle Cylindrical Grains

Seok-Jin Oh\*<sup>†</sup> · Hong-Seok Cha\* · Seung-Gyo Jang\*

### ABSTRACT

An achieving method of highly progressive pressure gradient is presented to enhance the missile ejection system's performance by using a gas generator in the condition of preventing erosive burning. To obtain and confirm a stable burning, a ground burning test was performed to evaluate the new methods of a radial-hole and a multi-row propellant grain. The test results show that a radial-hole grain takes good effect on erosive burning and not on ejection performance. On the other hand, a multi-row grain which reduces the length-to-diameter ratio(L/D) of grain is very effective to prevent the erosive burning and to enhance the ejection performance simultaneously.

### 초 록

본 논문에는 유도탄 사출시스템의 사출성능 향상을 위해 침식연소 현상이 발생하지 않는 상태에서 가스발생기의 압력 기울기를 증가시키는 방법에 대해 기술하였다. 안정연소를 얻기 위해 그레인에 반경방향홀을 뚫는 방법과 그레인의 길이대 직경비를 줄이는 방법을 고안하여 이를 적용, 연소시험을 실시하였다. 시험결과 반경방향홀 그레인을 적용했을 경우 침식연소 방지효과는 좋았으나 사출성능을 저하시키는 쪽으로 성능이 변화하였다. 반면에, 다열형 그레인을 적용시 침식연소 방지효과와 함께 사출성능을 향상시키는데 유용한 것으로 나타났다.

Key Words: Gas generator(가스발생기), Erosive burning(침식연소), Multi-row grain(다열형 그레인)  
Radial-hole grain(반경방향홀 그레인), Length-to-diameter ratio(길이대 직경비)

### 1. 서 론

유도탄 발사 방식은 비행시 사용되는 추진기 관 끝 로켓모터의 추진력을 일부 이용하는 부스터 발사방식(hot launch)과 별도의 사출장치를 이용하는 사출 발사방식(cold launch)이 있다. 사

\* 국방과학연구소 1기술연구본부-6부

<sup>†</sup> 교신저자, E-mail: seokjin5@empal.com

출 발사방식은 부스터외에 별도의 가스발생기 등이 요구되는 번거로움이 있으나 발사초기 발사관 이탈에 소요되는 추진기관의 에너지를 절감할 수 있으므로 이에 상응하는 유도탄 사거리 증가, 가스발생기의 화염이 거의 없으므로 발사시 위치노출 가능성 감소로 플랫폼 및 유도탄의 생존성 증가, 함정탐재시 화염처리 장치의 불필요에 의한 발사대 설치공간 감소 및 발사장치 재사용 가능 등의 장점을 갖는다.

사출 발사방식을 적용한 유도탄 발사체계에서 에너지원으로 고체 추진제가 적용된 가스발생기가 주로 사용되고 있다. 유도탄의 안전하고 정확한 사출조건은 일정수준 이상의 사출종말속도와 함께 최대가속도 허용수준 이하의 두 조건을 동시에 만족시켜야 한다. 이 두 가지 요구조건은 서로 상반되는 특성으로 가스발생기 개발에 가장 어려운 점으로 귀결된다. 단순히 생각하면 추진제 양이 많아질수록 사출속도는 그에 비례하여 증가한다. 반면, 최대가속도 역시 이에 비례하여 커진다. 따라서 이 두 조건을 동시에 만족시키기 위해서는, 유도탄 하부공간이 가장 작은 사출 초기에는 가스발생기 압력(질량유량 발생과 비례)을 가능한 작게 만들어주고, 유도탄이 발사관내에서 이동하면서 하부공간이 커짐에 따라 충분한 사출에너지 공급을 위해 점차 가스발생기 압력을 증가시킬 필요가 있다. 결국 사출용 가스발생기는 안정적 연소상황에서 급격한 증가형상(highly progressive)의 압력구배가 필수적인 성능인 것이다.

안정연소가 아닌 이상연소 중 하나인 침식연소(erosive burning) 현상은 일반적으로 추진제 그레인 표면에 연소가스가 빠른 속도로 이동해감으로 인해 추진제 연소속도에서 급격한 증가가 발생하는 것을 의미한다[1]. 본 연구에서는 이러한 침식연소 방지와 함께 사출성능의 향상을 위해 새로운 방식의 그레인을 설계 제작한 후 가스발생기에 적용하여 그 개선정도를 지상 연소시험을 통해 조사하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 가스발생기 개요

Figure 1의 개념도에서 알 수 있듯이 캐니스터 하부공간에 장착되는 사출용 가스발생기는 유도탄을 밀어 올리는데 필요한 에너지원이 되는 장치이다. 가스발생기는 추진제 그레인이 연소될 때 발생하는 고온고압의 연소가스가 연소관 내부를 채우고 결국 가스발생기의 노즐을 통해 탄이 장착된 발사관의 유도탄 하부측 공간에 모여 큰 압력을 발생시키도록 함으로써 이 압력에 의해, 유도탄이 발사관으로부터 사출될 수 있도록 구성되고 작동한다.

가스발생기의 개략적인 형상은 Fig. 2에서 나타나있다. Fig. 2 (a)에는 반경방향홀 그레인이, (b)에는 다열형 그레인이 적용된 형상을 보여주고 있다. 가스발생기는 에너지원이 되는 추진제 그레인, 점화를 위한 점화기, 추진제 연소로 생성되는 연소가스가 빠져나가는 노즐 그리고 이와 같은 일련의 작동시 고온고압의 연소가스에도 견딜 수 있는 연소관 등으로 구성된다. 노즐은 총 6개로 구성되고 있으며, 연소관 내부 연소실의 격자판은 추진제 그레인을 지지하는 역할을 한다.

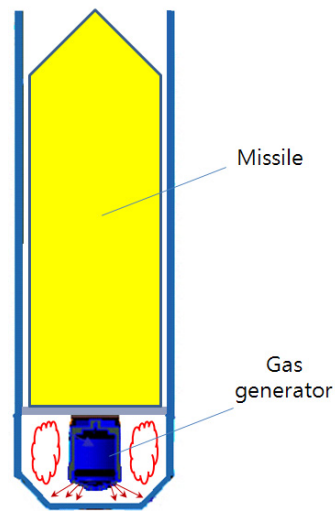
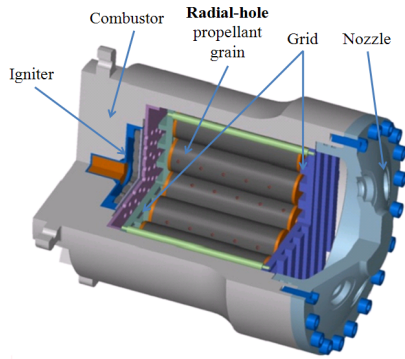
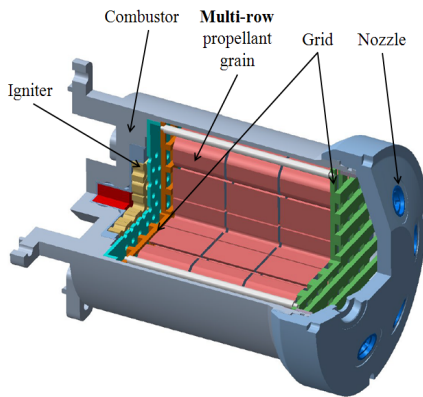


Fig. 1 Schematic of a missile ejection system



(a) Radial-hole grain type



(b) Multi-row grain type

Fig. 2 Schematic of a gas generator

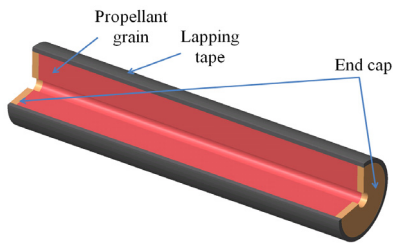


Fig. 3 Schematic of a propellant grain

에너지원이 되는 추진제 그레인 형상을 Fig. 3에 도시하였다. 그레인은 Fig. 3에서 보듯이 양 단면과 외경면이 불활성 테잎과 엔드캡으로 각각 단열처리되어, 점화기로부터의 화염에 의해 추진제의 단열처리된 면이 연소되는 것을 막을 수 있도록 설계, 제작하였다. 작동중에 단열처리 부분이 소실되지 않도록 제작시 많은 주의 및

노하우가 필요하다. 즉 그레인은 내면 연소형 실린더 형상으로 급격한 기율기 연소패턴을 위해서 이와 같이 제작하여 사용하였다. 추진제 그레인은 가스발생기 내부에 총 19개가 들어가게 된다. 다열형의 경우 19×열(row)의 수로 그레인의 개수가 들어가게 된다. 물론 그레인의 길이도 열의 수로 나눈만큼 짧아지게 된다. 추진제의 조성은 복기형(double base) 추진제로 NC(nitrocellulose), NG(nitroglycerin)가 주성분으로 구성되며, 추진제의 연소속도는 20℃, 1000 psia에서 약 25 mm/s인 추진제를 선정하여 적용하였다.

## 2.2 시험장치

설계 제작된 가스발생기의 압력 및 추력을 측정하기 위한 지상연소시험 장면이 Fig. 4에 도시되어있다. 가스발생기는 연소시험시 이탈방지를 위하여 치구에 장착되어 있다. 추력은 노즐의 반대방향에 로드셀을 장착하여 측정하고, 측정된 추력데이터는 캐니스터의 가스발생기 장착 부품인 지지링 설계를 위해 사용된다. 가스발생기 성능평가에 직접적으로 사용되는 압력은 연소관 반경방향에 압력측정을 위한 홀을 뚫고 어댑터를 조립한 후 압력센서를 듀얼로 장착하여 연소시험시 가스발생기 내부압력을 측정한다. 가스발생기 내부압력은 발생하는 연소가스의 질량유량과 비례하므로 압력을 측정함으로써 캐니스터 하부에 연소가스가 채워지는 양을 예측하고, 이로 인해 발생하는 압력에너지를 사용하여 탄이



Fig. 4 Picture of a ground burning test for the evaluation of a gas generator

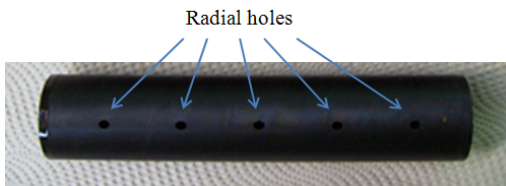
사출되는 거동을 가스동역학 해석을 통해 예측할 수 있다.

### 2.3 시험조건

복기형 추진제가 사용된 가스발생기에서 발생하는 침식연소 현상은 그레인 내부의 유속이 연소초기 그레인 내경이 작을 때 특히 빨라져서 연소속도가 증가하다가 특정속도를 초과할 때 발생하기 때문에 그레인 내부의 속도를 느리게 해 줄 수 있는 방법을 고안하여 적용하였다. 고안된 방법은 첫번째 Fig. 5의 (a)에서 보듯이 그레인 내경면부터 외경면까지 관통될 수 있는 홀을 뚫어서 그레인 내부에서 발생하는 연소가스가 양단면으로 빠져나가는 속도를 줄일 수 있도록 즉 그레인 반경방향으로도 발생된 연소가스의 통로를 만들어주는 방법을 사용하였다. 두번째 Fig. 5 (b)에서 보듯이 그레인 양단면으로 나오는 연소가스 유속을 줄이는 방법으로 그레인을 길이방향으로 절단하여 그레인을 가스발생기 내에 다열형으로 배치하여 길이대 직경비를 줄이는 방법을 고안하였다[2]. 이 방법을 사용시 각각에 절단된 그레인의 양단면에 내열처리를 해야하는 공정이 추가됨에도 불구하고, 그레인에

홀을 뚫는 위험한 가공공정을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 길이대 직경비를 줄여줌으로써 그레인은 상대적으로 적어진 연소면적으로 이에 따라 발생하는 연소가스 역시 감소함으로 양단면에서 나오는 연소가스 유속을 줄여주는데 역할을 하게 된다. 본 연구에서는 이 두 가지 설계인자의 변화가 질량유량 발생특성에 미치는 영향을 각각의 시험조건들로 설정하여 조사하였다.

이와 같은 배경에서의 시험조건을 Table 1에 정리하였다. 첫 번째 시험조건은 그레인 1열형으로 반경방향홀은 없는 경우이다. 아무런 개선사항 적용이 없을 때 침식연소의 영향을 보기 위함이다. 두 번째 시험조건은 그레인 2열형 즉 그레인 1열형을 2개로 나누어 준 경우이다. 이 경우 반경방향 홀이 각 그레인에 8개가 있게 하였다. 시험조건 1은 시험결과가 사용할 수 없는 수준으로 나온 상황이어서 시험조건 2의 경우를 기준모델로 설정하여 사출성능 향상정도를 비교하였다. 시험조건 3은 시험조건 2에서와 같은 그레인 2열형에서 반경방향홀의 개수를 반으로 줄였을 때의 영향을 조사하기 위함이다. 시험조건 4, 5는 반경방향홀이 전혀 없는 상태에서 그레인 2열형과 그레인 3열형을 적용한 시험이다. 참고로 그레인 1열형의 경우 가스발생기 내에 추진제 그레인의 수는 19개이고, 그레인 2열형의 경우는 19×2인 38개 그리고 그레인 3열형은 19×3인 57개가 사용된다. 타당한 비교를 위해 모든 경우 한 가스발생기 안에 들어가는 추진제의 총 무게는 가급적 동일하게 설정하였고, 모든 연소시험은 추진제 그레인 온도조건을 20℃로 조절한 후에 실시하였다.



(a) Radial-hole grain



(b) Multi-row grain

Fig. 5 Propellant grain pictures applied in this study

Table 1. Test conditions by the number of radial holes and grain rows

Test cond.	Number of Radial holes	Number of rows	GT No.
1	0	1	XUGG-0801 XUGG-0802
2 (Ref. M.)	8	2	XUGG-0905
3	4	2	XUGG-0906
4	0	2	XUGG-0907
5	0	3	XUGG-0910

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 침식연소 발생

Figure 6에는 가스발생기 성능평가를 위한 지상연소시험시 사진을 나타냈다.

시험조건 1에 대해 연소시험을 실시하여 획득한 가스발생기 압력을 Fig. 7에 도시하였다. 시험결과는 사출속도 최대화 및 최대가속도 최소화를 만족시킬 수 있는 이상적인 선도와 함께 그려져있다. 연소 중반부 부분에서 침식연소 현상이 발생하여 급격하게 압력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 유도탄 사출시 가스발생기 내부에서 발생하는 침식연소 현상은, 그레이의 외경면과 양측 단면이 단열처리된 추진제 그레이에 연소에 의해 연소가스가 발생할 때, 추진제 그레이의 내경부를 통과하는 연소가스의 유속이 특정 값(threshold velocity)을 초과하는 경우, 유속이 빠른 고온의 연소가스에 의해 내부의 연소면이 침식되면서 비정상적인 연소가 이루어져 연소가스의 질량유량이 순간적으로 급증하는 현상으로 나타난다. 이러한 질량유량의 급격한 증가는 유도탄의 순간 가속도를 증가시켜, 유도탄에 충격으로 작용한다. 이 충격은 유도탄에 조립되어 있는 전자장비 및 기계장비에 악영향을 주게되고 유도탄이 비정상적으로 작동될 수 있는 가능성을 높게 된다. 따라서 본 연구에 사용된 그레이 1열형 가스발생기 같은 설계로는 사출용 가스발생기로 사용이 불가할 수 밖에 없게 된다.

사출용 가스발생기에서 이러한 침식연소 현상이 쉽게 발생하는 이유는 사출시 급격한 증가형 압력선도가 얻어져야 하고 이러한 급격한 기울기는 가변되는 노즐이 아닌 이상 그레이의 연소면적을 연소초기에는 매우 작게, 연소중에는 급격하게 커지도록 추진제 그레이의 형상을 설계 및 제작하여야만 하기 때문이다. 초기에 매우 작은 연소면적은 그레이 내경이 줄어드는 설계가 될 수 밖에 없고, 이에 따라 그레이 내부에서의 연소가스의 유출속도는 연소 초중반부에서 상대적으로 커질 수 밖에 없다. 결국 그레이 내경면에서 침식연소가 발생하기 쉬운 환경이 되는 것이다.

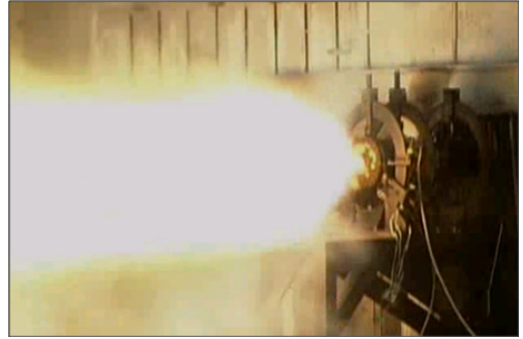


Fig. 6 Ground burning test for evaluation

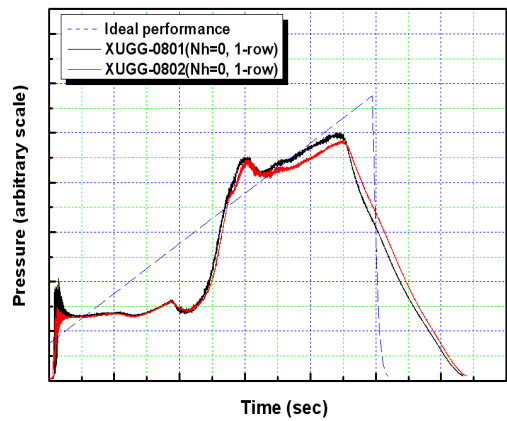


Fig. 7 Pressure vs. time curve for the test condition 1

빠른 연소가스 유속에서 침식연소가 발생하는 물리적인 이유는 추진제 표면에서의 열전달 증가에 주로 기인된다. 추진제 표면에서의 열유속 증가는 고체 추진제를 더 빨리 기화되게 만들고, 이로 인해 연소되고 있는 화염영역에 더 많은 연료와 산화제를 공급하게 되기 때문에 발생한다고 알려져 있다[3-5].

#### 3.2 그레이 반경방향홀의 영향

Figure 8에 그레이 2열형 가스발생기에서 그레이에 반경방향홀의 개수를 변경 적용할 경우에 대한 시험결과가 나타나있다. 기준모델로 선정된 시험조건 2와 이에 비해 반경방향홀의 수를 반으로 줄인 경우가 각각 시험되었다. 시험결과 반경방향홀의 수가 8개인 경우 침식연소 현상은

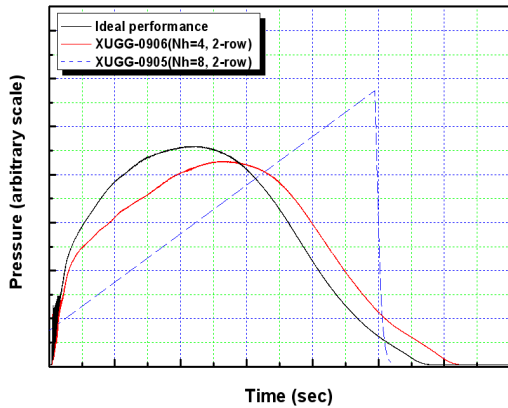


Fig. 8 Pressure vs. time curve for the test condition from 2(ref. model), 3

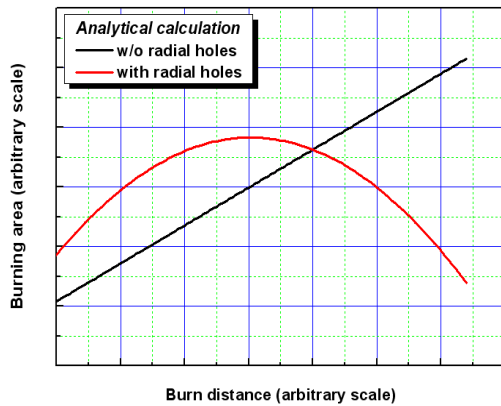


Fig. 9 Burning area with and without radial-hole

완전히 없어졌다. 하지만 사출용 가스발생기에 요구되는 성능선도인 급격한 증가형의 압력선도를 보여주는 이상적인 점선과 같은 선도와는 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 이와 같이 이상적인 경우에 비해 초반에 높은 형상의 선도는 낮아져야 하는 최대가속도를 증가하게 만든다. 시험조건 3인 반경방향홀의 수를 반으로 줄인 경우도 침식연소 현상은 없어졌지만 기준모델과 유사한 연소패턴을 나타냈다.

이러한 연소형태가 나타난 이유를 해석적으로 분석해 보았다. Fig. 9에는 내면연소형 실린더 그레인의 경우 반경방향홀의 유무에 따라 추진제 그레인 연소거리에 따른 연소면적이 해석적으로 계산되어 있다. 큰 영향을 미치지 않을 것

같은 반경방향홀은 그 수가 증가할수록 반경방향홀이 뚫린 홀의 내경면이 모두 연소시 추가 연소면이 되기 때문에 이상적으로 급격히 증가하는 선도에 비해 배가 불룩한 일정압력 유지형을 낼 수 밖에 없게 됨을 확인할 수 있었다.

### 3.3 그레인 다열화의 영향

그레인의 길이대 직경비를 줄여서 그레인을 다열화 시켰을 경우 어떤 영향을 미치는지 조사하기 위해 시험조건 4, 5를 기준모델인 시험조건 2와 함께 Fig. 10에 도시하였다. 길이대 직경비를 반으로 줄인 시험조건 4는 기준모델과 비교시 이상적인 경우에 보다 근접한 결과를 보임을 알 수 있다. 이는 연소패턴을 변화시키는 반경방향홀이 없어도 그레인의 길이대 직경비를 조절하여 그레인 양단면으로 나오는 연소가스 유속을 조절하는 방법이 긍정적인 역할을 하는 것임을 확인할 수 있다. Fig. 7에서 나타낸 그림과 비교시 연소중 압력이 급격히 증가하는 부분이 거의 없음을 확인할 수 있다. 이는 탄에 충격으로 작용하는 연소구간이 없어지는 것으로 탄의 정상작동에 바람직한 현상이라고 볼 수 있다.

이와 같은 효과를 확인하고 시험조건 5와 같이 길이대 직경비를 기준에 비해 1/3로 줄여서 시험한 경우 다른 모든 시험조건에 비해 이상적인 선도와 가장 유사하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 실제로 이렇게 얻어진 압력선도를 근거로 사출성능을 예측시 유사한 종말속도를 갖는 상태에서도 최대가속도를 많이 낮출 수 있는 것으로 확인되었다. Fig. 11에는 다열형 그레인이 적용된 경우 연소시 연소가스가 어떤 패턴으로 유동하면서 작동되고 각 그레인에서 발생하는 질량유량을 줄여줄 수 있는지에 대한 개념도를 나타내었다. 그레인 1열형에 비해 각각의 그레인의 연소면적이 작아지게 되기 때문에 발생하는 연소가스의 양도 줄어서 각각의 그레인에서 발생하는 연소가스의 질량유량 즉 유속이 감소하게 되고 이는 침식연소가 방지되는 효과를 내는 것으로 판단된다. 참고로 이상연소의 종류가 침식연소 현상이 아니라 음향학적 연소불안정과 같

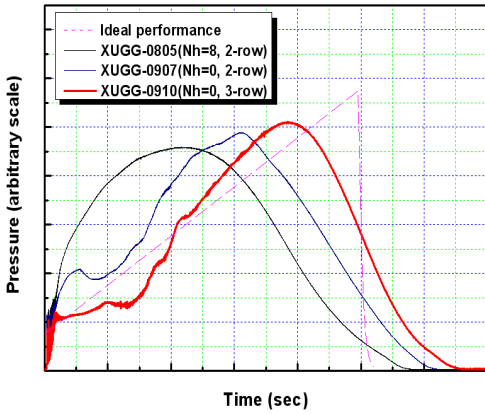


Fig. 10 Pressure vs. time curve for the test condition 4, 5 with ref. model

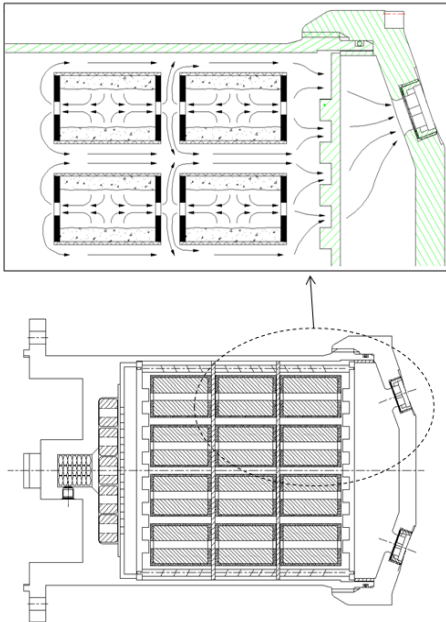


Fig. 11 Burning pattern in the case of multi-row grain gas generator

은 이상연소에는 이와 같은 그레인 길이대 직경 비만을 줄여서 그 해결이 되지 않을 수도 있다.

실제 가스발생기 설계시 침식연소 방지를 위해 추진제 그레인을 과도하게 많은 열수로 만드는 것은 바람직하지 않은데 그 이유는 각각의 나누어진 그레인의 양단면을 급격한 증가형의

압력선도를 얻기 위해 단일처리하게 됨으로 추가적인 공정이 들어가고, 또한 추진제 그레인의 양단면을 단일처리하는 엔드캡의 두께도 있어서 추진제 충전가능 공간이 점차 줄어들게 되기 때문이다. 또한 각각의 그레인 열을 분리하여 조립시 용이하고, 운송시 각 열의 그레인을 보호할 수 있는 별도의 분리판과 같은 부품[2]도 필요하기 때문에 적용되는 가스발생기의 용도 및 체계 적용시 중요도 즉 체계요구조건에 따라 최적의 열 수를 선정하는 검토과정이 필요하다.

### 3.4 설계인자에 변화에 따른 사출성능

최종적으로 사출성능 비교를 위해 각각의 시험조건에서 얻어진 가스발생기 시간-압력 선도를 가스동역학 해석시 입력조건으로 사용하여 계산을 수행한 결과가 Table 2에 정리되어 있다. 적용이 불가능한 시험조건 1을 제외한 기준모델인 시험조건 2와 비교시 모든 경우 유사한 종말속도를 갖는 것으로 예측되었고, 최대가속도는 반경방향홀이 없이 상대적으로 안정연소를 나타낸 시험조건 5에서 가장 최소화되어 기준모델에 비해 약 33%의 감소효과를 얻을 수 있었다. 시험조건 4의 경우 기준모델에 비해 이상적인 선도와 유사한 경향을 나타냈지만 초반에 기준모델에 비해 압력수준이 낮아지는 효과가 크지 않아서 최대가속도는 약 7% 감소하는 것에 그치고 말았다. 초반의 압력을 추가적으로 낮출 수 있는 방법은 점화제의 종류를 바꾸어서 또는 노즐마개의 파열압력을 조절하는 방법 등이 있다 [6-7].

Table 2. Results of a gas dynamics calculation

Test cond.	Max. acceleration (G)	Ejecting velocity (m/s)	GT No.
1	N/A	N/A	XUGG-0803 XUGG-0804
<b>2 (Ref. M.)</b>	<b>16.5</b>	<b>29.2</b>	XUGG-0905
3	16.1	29.7	XUGG-0906
4	15.4	30.0	XUGG-0907
5	<b>11.0</b>	<b>28.3</b>	XUGG-0910

#### 4. 결 론

본 연구에서는 사출용 가스발생기에서 발생되기 쉬운 침식연소 현상을 해결하기 위해 추진제 그레인의 형상을 변경해주는 방법을 고안 적용하여 시험한 결과들을 정리하였다. 추진제 그레인에 반경방향홀을 뚫어주는 방법과 추진제 그레인의 길이대 직경비를 감소시키기 위해 그레인을 다열형으로 제작하여 배치해주는 두 가지 방법이 제시되었다.

반경방향홀 그레인은 침식연소 방지에 탁월한 역할을 하였지만 사출용 가스발생기의 근본 목적인 사출성능이 저하되는 관계로 체계적용시 문제가 있음을 알 수 있었다. 그러나 그레인의 길이대 직경비를 감소시키기 위하여 다열형 그레인으로 만들어 배치해주는 경우 침식연소 방지에도 효과가 있었고, 가장 중요한 사출성능 중 하나인 최대가속도를 저감하는 측면에서도 매우 긍정적인 결과를 나타내었다.

본 연구에서 제시된 기준모델과의 비교시 그레인 3열형의 경우 최대가속도가 16.5G에서 11.0G로 감소하여 유도탄에서 많은 부품의 내구성 설계한도로 사용되는 최대가속도를 약 33% 감소시킬 수 있음을 최종 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

1. K. K. Kuo and M. Summerfield, "Fundamental of Solid-Propellant Combustion," AIAA Inc., 1984
2. 오석진 "침식연소가 방지되는 가스발생기," 특허출원번호 10-2010-138410, 출원일 2010. 12.30
3. H. S. Mukunda and P. J. Paul, "Universal Behaviour in erosive burning of solid propellant," Combustion and Flame, 109, 1997, pp.224-236.
4. J. Moss, S. Heuster, and K. Linke, "Experimental Program to Assess Erosive Burning in Segmented Solid Rocket Motors," AIAA 2007-5782
5. 조민경, 허준영, 성홍계 "침식연소를 고려한 고체로켓의 비정상 내탄도 해석 기법," 한국추진공학회지, 제13권, 제2호, 2009, pp.17-25
6. 차홍석, 오석진, 이응조 "가스발생기 점화초기 압력 저감화 연구," 한국추진공학회 춘계학술대회 논문집, 2010, pp.138-141
7. 차홍석, 오석진, 박재범, 이응조 "가스발생기 용 노즐마개 파열압력 저감화에 따른 점화특성," 한국추진공학회 추계학술대회 논문집, 2010, pp.217-220