

技術論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.4.093>

저온 사출장치용 이탈모타 개발

백국현* · 오종윤* · 이영원* · 이지형* · 정진석*

Development of the Drive-away Motor for Cold Launch System

Gookhyun Baek*[†] · Jongyun Oh* · Youngwon Lee* · Jihyung Lee* · Jinsuk Jung*

ABSTRACT

To solve the combustion instability, especially chuffing phenomena, happened during development process of a drive-away motor that was required for cold launch system of missile, various technical approaches have been performed through ground firing tests. The ignition energy or its supply system, generally closely related with the chuffing phenomena, does not affect suppression of the chuffing, but the increase of characteristic length(L^*) as well as the addition of 2% ZrC as a damping material is effective to suppress the chuffing. Therefore we could have a typical experience on the combustion instability in double base propellant.

초 록

유도탄의 저온 사출 시스템 구현에 있어서 요구된 이탈모타 개발 중 나타난 복기 추진제의 연소불안정, 특히 chuffing 현상을 해결하기 위해 시도되었던 여러 가지 기술적 접근방법과 이들의 시험 결과를 수록하였다. 본 이탈모타에서는 일반적으로 점화 에너지와 관련이 깊은 것으로 알려진 chuffing 현상이 점화 에너지의 공급량이나 공급 방법 등에 의해서는 억제 효과가 나타나지 않았고, 특성길이(L^*)의 증가 및 추진제에 감쇄 물질인 ZrC를 2% 첨가함으로써 억제되었다. 이로써 복기 추진제의 연소불안정을 해결할 수 있는 새로운 경험을 얻게 되었다.

Key Words: Cold Launch System(저온 사출장치), Drive-away Motor(이탈모타), Combustion Instability(연소불안정), Damping Material(감쇄물질)

1. 서 론

중대형 유도탄을 발사관으로 부터 사출시키는 방법에는 크게 두 가지로 구분될 수 있다. 유도탄의 추진기관에서 발생하는 추력을 직접 이용하는 hot launch 방법과, 가스발생기를 이용하여 유도탄을 발사관 밖으로 밀어내고 이후에 추진기관이 점화되는 cold launch 방법이 있다. Cold

접수일 2011. 11. 29, 수정완료일 2012. 7. 11, 게재확정일 2012. 7. 18

* 정희원, 국방과학연구소 1기술연구본부 6부

† 교신저자, E-mail: gookhyun2002@yahoo.co.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2011년도 추계학술대회(2011. 11. 24-25, 부산 노보텔 엠베서더) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

launch 방법으로 유도탄을 사출시키기 위해서는 유도탄 후미에 바닥판(bottom plate)이 체결되어 있는데, 가스발생기에서 발생하는 압력을 유도탄에 전달하고 고온의 연소기체로부터 유도탄을 보호하게 된다. 유도탄이 발사관으로부터 이탈한 후 이 바닥판이 유도탄에서 분리되고 추진기관의 추력발생 방향을 벗어남으로써 발사관이나 유도탄에 영향을 주지 않게 된다. 사출용 이탈모타는 바닥판이 유도탄에서 분리된 후 즉 방향으로 이송되도록 하기 위해서 바닥판에 장착이 되며, 바닥판의 무게와 이송거리등에 따라서 요구되는 추력이 결정된다.

개발코자하는 사출용 이탈모타는 평균 추력이 16,000 N 이고 연소시간이 0.5초인 것으로 Fig. 1에 개략적인 모타 및 그레인 형상을 나타내었는데, 모타의 노즐은 연소관의 중심축에서 25° 기울어진 특징을 가지고 있다. 추진제는 복기(double base) 추진제를 적용하였으며 튜브형상의 그레인 7개가 적용되었다. 본 논문에서는 이탈모타의 연소시험 결과를 위주로 구성이 되었으며, 연소시험에서 나타난 연소불안정 현상을 해결하기 위해서 시도된 방법들과 이들의 효과 및 최종적으로 추진제의 조성을 개선함으로써 연소불안정을 완전히 제거할 수 있었던 결과를 수록하였다.

2. 본 론

시험용 이탈모타 1, 2, 3호기는 점화기용 리테이너의 크기 및 형상 (Fig. 2 참조)을 변경하여 시험을 수행 하였고, Fig. 3에는 이들의 시험 결과인 압력 선도를 도시하였다. 1호기(DAM-01) 시험 결과 chuffing 현상이 발생하였고, chuffing

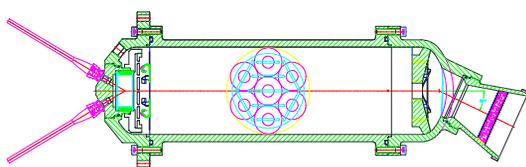


Fig. 1 Configuration of a drive-away motor

현상은 주로 점화기에서 공급되는 에너지가 적거나 에너지가 적절하게 추진제 그레인 표면으로 전달되지 못하는 경우에 발생하는 것으로 알려져 있다[1]. 따라서 2호기(DAM-02)와 3호기(DAM-03)는 리테이너의 형상과 크기를 변경하여 시험하였는데 가급적 점화에너지가 각각의 그레인에 고르게 전달될 수 있도록 하기 위해 리테이너의 크기를 69 mm (Fig. 2, type 1)에서 105 mm (Fig. 2, type 2)로 크게 조정함과 동시에 2호기에서는 hole ($\phi=5$ mm) 모양을 slot ($w=3$ mm) 모양으로 변경하였으며, 3호기에서는 hole의 크기를 $\phi=2.5$ mm (Fig. 2, type 3)로 줄이면서 개수를 31개에서 102개로 증가시켰다. 또한 점화 에너지를 증가시키기 위해 점화제인 $BKNO_3$ 의 함량을 30 g에서 35 g으로 증가시켰다.

2호기에서는 리테이너의 형상을 조절함으로써 그레인에 전달되는 점화에너지를 7개 그레인에 고르게 전달될 수 있을 것으로 판단되었으나, 실험 결과는 1호기와 크게 다르지 않았다. 한편 3호기의 경우 리테이너의 작은 구멍을 통하여 점화에너지가 그레인 후반부까지 더 멀리 전달될 것으로 판단되었고, 또한 점화제의 함량이 약 17% 증가함으로써 연소가 중단되는 현상은 나타나지 않았다. 그러나 점화 후 약 0.4초 경에 압

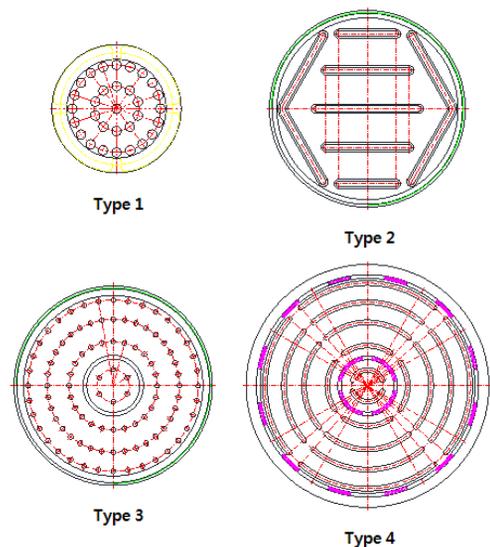


Fig. 2 Shape of 4-type retainers for ignitor

력강하가 나타남으로써 정상적인 연소라고 볼 수 없었다. 이상의 시험 결과로부터, 점화제 함량 증가에 의한 점화에너지 증가와 리테이너의 형상 변경이 chuffing 현상의 억제에 도움이 될 수 있는 가능성을 확인함에 따라서, 5호기(DAM-05)와 6호기(DAM-06)는 리테이너의 크기를 130 mm (Fig. 2, 4안)로 최대한 증가시킴과 동시에 그레인의 위치를 고려하여 그레인 내외부에 점화에너지가 고르게 전달되도록 2.5 mm의 폭을 갖는 slit 형태로 수정하였다. 또한 5호기에는 점화제의 함량을 기존 함량보다 2배 증가시킨 것으로 $BKNO_3$ 를 60 g 적용하였으며, 6호기에는 $BKNO_3$ 45 g에 점화보조제로 single base 추진제 stick을 그레인의 내외부에 부착하였는데 보조제의 무게는 총 40 g 이었다. 예상과 달리 5호기는 여전히 chuffing 현상이 발생되었고, 6호기도 동일한 결과를 보여주었다. 이로써 본 사출용 이탈모타의 chuffing 현상은 점화에너지의 함량이나 공급방법에 문제가 아닌 것으로 판단할 수 있었다.

Figure 4에는 Fig. 3의 압력선도에서 점화기에 의한 압력발생 정도 및 점화 지연시간 등을 확인하기 위해 연소 초기의 압력선도를 도시하였다. 점화제 연소에 의한 압력상승은 점화제의 종류 및 함량과 관련이 있는데, 6호기의 경우 주 점화제($BKNO_3$: 45 g) 및 보조 점화제(single base 추진제: 40 g)의 사용에 의한 충분한 에너지 공급에도 불구하고 chuffing 현상이 발생되었

고 본 시험모타의 chuffing 현상이 점화에너지의 문제가 아님을 확인할 수 있었다. 한편 리테이너를 hole 형태로 가공한 것과 slit 형태로 가공한 것의 차이점을 알 수 있는데 점화지연 측면에서 hole 형태로 가공된 것을 사용한 모타에서 점화 지연시간이 짧고 slit 형태의 리테이너를 사용한 모타의 점화지연시간이 길게 나타났고, 또한 리테이너의 크기가 클수록 지연시간이 증가하였다.

Table 1에는 시험 모타에 적용된 점화제 종류와 함량 그리고 리테이너의 형상 내역을 정리하였다. Chuffing 현상은 연소관의 추진제 그레인을 제외한 빈 공간인 공간 체적(free volume, V)과 노즐목 면적(A)의 비로 알려져 있는 특성 길이(characteristic length, $L^*=V/A$)가 작은 경우에도 나타날 수 있다고 알려져 있다[2]. 따라서 7호기(DAM-07)부터는 연소관의 공간 체적을 증가시키기 위하여 확장튜브(extension tube)를 적용함과 동시에 노즐목 직경을 기존 50 mm에서 44 mm로 감소시킴으로써 기존의 L^* 값이 111.7 cm에서 306.5 cm로 약 2.74배 증가되었다. 한편 이러한 노즐 목 직径의 감소는 연소실의 압력을 증가시키는 효과로 인해 비교적 낮은 압력에서 발생 빈도가 높은 chuffing 현상의 억제를 기대할 수 있다. 또한 점화제를 $BKNO_3$ 보다 에너지 공급 지속력이 높은 MTV로 교체하였고 함량도 70 g으로 증가시켰다.

일반적으로 복기 추진제의 연소불안정은 특히 음향학적 불안정(acoustic instability)의 경우 주

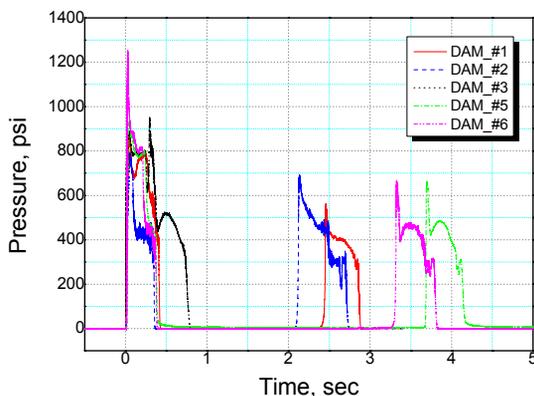


Fig. 3 Chamber pressure of tested motors(#1~#6)

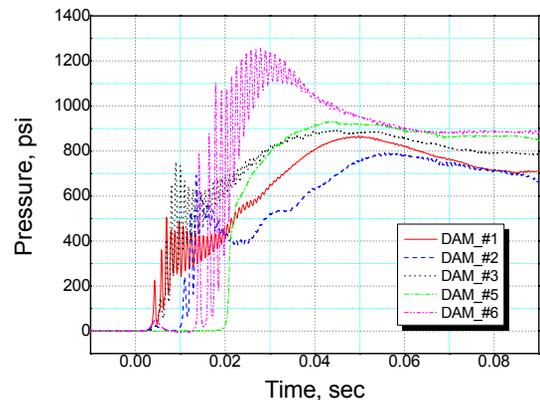


Fig. 4 Chamber pressure during ignition

Table 1. Details of tested motors (DAM: Drive-away Motor)

Motor No.	Ignitor	Retainer	Remark
DAM-01	BKNO ₃ =30 g	O.D.=69 mm 5 mm hole-31	-
DAM-02	BKNO ₃ =30 g	O.D.=105 mm 3 mm slot-7	-
DAM-03	BKNO ₃ =35 g	O.D.=105 mm 2.5 mm hole-102	-
DAM-05	BKNO ₃ =60 g	O.D.=130 mm 3 mm slot-18	-
DAM-06	BKNO ₃ =45 g single base=40 g	O.D.=130 mm 2.5 mm slot-18	-
DAM-07	MTV=70 g	"	Extension Tube f.v. : 4.93→7.4 liter
DAM-08	"	"	6-hole (Φ=4mm) interval : 120 degree
DAM-09	"	"	propellant applied ZrC=2%
DAM-10	"	"	3-hole (Φ=5mm), interval : 120 degree

로 그레이의 기하학적 형상과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있으며, 주어진 그레이 내경에 대한 특정 길이 이상에서 연소불안정이 발생하게 된다. 또한 연소 압력이 낮거나 온도가 낮은 경우에 더욱 발생률이 높다. 본 연구에서 적용된 추진제 그레이는 외경이 40 mm, 내경이 17 mm, 그리고 길이가 380 mm인 튜브형상으로 내경에 대한 길이의 비가 22배 이상이다. 이러한 그레이 형상을 갖는 모타에서 연소불안정의 발생이 그레이 내외부의 압력 차이에 기인한 경험을 많이 하였기 때문에 그레이의 내외부 압력차를 줄이기 위해서 그레이 측면에 내외부가 통하는 구멍을 뚫어서 시험을 수행하였다[3]. 8호기(DAM-08)는 그레이가 관통되도록 4 mm 직경의 구멍을 뚫은 것으로 총 6개의 구멍이 120도 간격의 나선형으로 가공되었고, 10호기(DAM-10)는 직경이 5 mm인 3개의 구멍이 그레이 양끝 단에서 20 mm 떨어진 지점과 중앙에 120도 간격으로 가공되었다.

Figure 5에는 7호기부터 10호기까지의 시험 결과를 도시하였는데, 모두 chuffing 현상은 나타나지 않았다. 그러나 7, 8, 10호기의 연소실 압력 선도에서 점화 후 약 0.25~0.3초 범위에서 압력

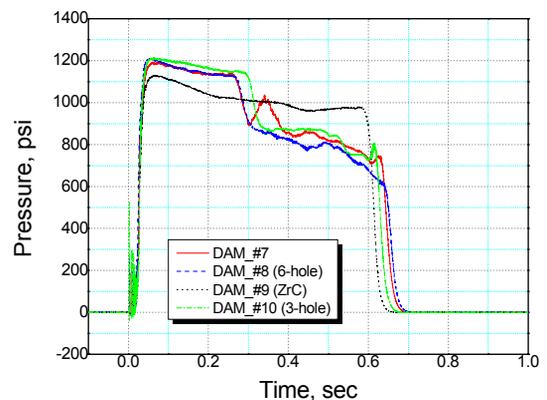


Fig. 5 Chamber pressure of tested motors(#7~#10)

이 정상 압력에서 25~30% 떨어지는 것을 알 수 있었고, 이렇게 압력이 떨어진 이후에 연소압력은 정상 압력으로 복구되지 못하고 연소 종료 시까지 지속되었다. 특히 chuffing이 일어났던 모타에 대해서도 이 시간대에 압력이 감소하였다가 연소가 중단되었는데, 다시 재 점화된 이후의 연소압력은 정상 압력의 절반 수준이었다. 이론적으로 그레이의 연소면적이나 노즐 목의 면적이 바뀌지 않는 한 연소압력의 갑작스런 변화는 매우 이례적인 현상이다. 일부 문헌에서 지적

하는 네거티브 침식연소(erosive burning)[4, 5]에 의해서도 이 현상을 설명하기에는 부족하다.

전체적으로 시험 결과를 관찰하면 연소불안정 (combustion instability)의 큰 영역에는 포함되지만, 특히 시험 초기에 나타났던 chuffing은 대표적인 non-acoustic instability[6] 현상이기 때문에 앞선 시험은 이를 제거하기위해서 초점이 맞춰져 있었고 결국 확장튜브를 적용하여 chuffing 현상을 억제시킬 수 있었다. 그러나 이후에 나타난 연소불안정 현상은 그레인 내외압의 차에 의한 것이 아니었다.

지금까지의 시험 결과로부터 그레인의 형상을 완전히 바꾸지 않을 경우 연소불안정을 해결할 수 있는 방법은 없는 것으로 판단되었고, 최종적으로 추진제의 조성을 개선하고자 하였다. Acoustic instability가 발생하는 경우 이를 해결할 수 있는 방법 중에 하나인 감쇄 물질을 첨가 [7]하는 방법을 시도하였고, 모타 번호 9번 (DAM-09)에서는 기존 추진제에 ZrC를 2% 추가로 첨가한 조성을 적용하였다. Fig. 5의 시험 결과에서 볼 수 있듯이 정상적인 연소가 이루어졌고, 결과를 도시하지는 않았지만 재차 확인 시험에서도 동일한 결과를 획득함으로써 완벽하게 연소불안정이 해결되었음을 확인할 수 있었다.

본 시험모타에 적용된 추진제(N-5)는 2.75" 로켓 모타에 적용되었던 추진제로 문헌에[8] 나타난 폭발열(Heat of explosion)이 850 cal/g이고

화염온도가 2298 K로 비교적 에너지가 낮은 추진제이다. Fig. 6에는 기존 N-5 추진제와 ZrC가 2% 첨가된 추진제들의 연소속도(@20°C) 측정 결과를 도시하였다. 기존의 N-5 추진제는 1000 psia 기준으로 연소속도가 약 11 mm/s 수준으로 비교적 낮은 연소속도를 갖고있으며, 1000~1500 psia 영역에서는 압력지수가 음의 값 (mesa region이라고 함)을 갖는 특성을 나타내고 있다.

한편 ZrC가 2% 첨가된 modified N-5 추진제는 mesa 특성이 없어지고 낮은 압력영역에서 기존 추진제보다 연소속도가 낮은 특성을 보였고, 1000 psia 기준으로 약 9.5 mm/s로 기존 추진제보다 약 15%의 연소속도가 감소하였다.

Table 2에서와 같이 CEA code에 의한 이론적인 추진제 성능계산을 통해서 ZrC가 2% 첨가된 경우 화염온도와 생성열 그리고 비추력 등을 비교하였는데, 매우 미미한 차이를 보임으로써 ZrC 첨가에 의한 추진제의 에너지 측면은 변화가 없다고 할 수 있다. 그러나 시험 결과에서 나타났듯이 연소 패턴은 완전히 변하였음을 알 수 있는데, 결국 ZrC에 의한 acoustic instability의 해소로 사료되고 있으며, 향후 보다 정밀한 시험/계측 및 분석을 통한 연구가 요구되는 사항이다.

3. 결 론

저온사출장치용 이탈모타의 개발과정에서 발생된 연소불안정 현상중 하나인 chuffing 현상을 해결하기 위한 점화에너지의 공급 방법(리테이너 형상 변경) 및 에너지량(점화제 함량 및 종류)의 변화는 실질적인 효과를 볼 수 없었으나, 연소관

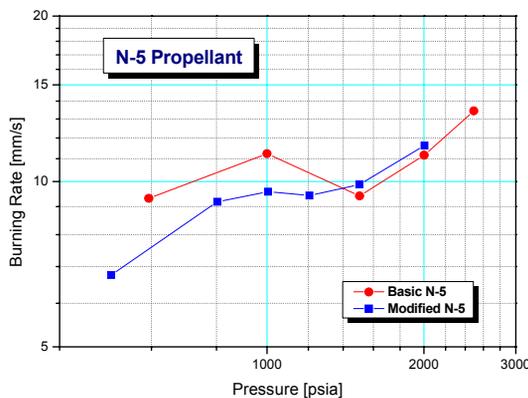


Fig. 6 Burning rate of basic and modified N-5 propellants

Table 2. Results of theoretical calculation of N-5 propellant

ZrC (%)	Chamber Temp. (K)	ΔH_f at 298K (cal/g)	Isp (s)
-	2245	-545.98	225.0
2	2257	-544.16	223.9

의 공간체적을 증가시키기위해 extension tube를 적용하여 특성길이(L*)를 증가시킴으로써 소화 후 재 점화하는 chuffing 현상을 억제시킬 수 있었다. 한편 chuffing 현상 억제 후에도 계속 나타났던 연소불안정 현상은 추진제의 조성을 개선(감쇄물질인 ZrC 2% 첨가) 함으로써 음향학적 불안정 연소를 감쇄시켜 문제를 해결 할 수 있었다. 현재까지는 연소불안정 요인에 대한 명확한 설명이 부족한 상태이며 문제해결의 메카니즘도 명확하다고는 할 수 없는 상태이다. 따라서 향후 다각적인 원인분석 및 확인시험이 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. George P. Sutton, Rocket Propulsion Elements, 6th ed., John Wiley & Sons Inc., 1992
2. H. F. R. Schöyer, "Results of Experimental Investigations of the L-Star Instability Phenomena," AIAA-78-1075, 1978
3. 성홍계, 변종렬, "다발 원통형 그레인을 사용한 가스발생기의 저주파 연소불안정 소멸에 대한 실험적 연구," 한국추진공학회지 Vol. 8, No. 3, 2004, pp.10-16
4. Lu Zhen-Zhong, "Experimental Analysis of Unstable Combustion in Double Base Solid Propellant Rocket Motors," AIAA-86-0534, 1986
5. David R. Greatrix, "Model for Prediction of Negative and Positive Erosive Burning," AIAA-2006-5112, 2006
6. 이도형, 김경무, 윤명원, "입자의 음향 감쇄 효과를 이용한 고체 로켓 모터의 연소불안정 억제 연구," 국방과학연구소 기술보고서 TEDC-421- 060634, 2006
7. Alain Davenas, Solid Rocket Propulsion Technology, Pergamon Press, 1993
8. CPIA Handbook