

고체 로켓 모터의 탄환 충격 시험

윤현걸* · 최창선**

Bullet Impact Tests for Solid Rocket Motor

Hyun-Gull Yoon* · Chang-Sun Choi**

ABSTRACT

Bullet impact tests for two solid rocket motors were performed and its results were compared and analyzed. One was loaded with the existing propellant with decreased weight content of burning rate catalyst and added high density additives to improve mechanical properties and the other was loaded with the existing propellant with decreased weight content of burning rate catalyst to improve its insensitivity as well as to maintain the ballistic performance. The composite cases were used for both motors.

초 록

복합재 연소관에 기계적 물성을 향상시킨 추진제를 충전한 모터와 복합재 연소관에 기존의 내탄도 성능을 어느 정도 유지하며 연소속도의 조절로 추진제의 둔감화를 시도한 추진제를 충전한 로켓모터에 대하여 탄환충격시험을 실시하여 그 반응을 비교·분석하였다.

Key Words: Bullet Impact Test(탄환충격시험), Solid Rocket Motor(고체로켓모터), Insensitive Munitions(탄약둔감화)

1. 서 론

무기체계가 실전 배치되면 운용 중에 여러 형태의 사고의 위험이 항상 존재하며 이런 사고가 특히 항공기나 함상에서 발생하는 경우에는 그 위험 및 손상이 막대하다. 항공모함같이 거대한 함선에서 화재가 발생하면 그 화재는 함정에 탑재되어 있는 미사일, 비행기 연료, 로켓, 함포

등에 연쇄적으로 전파되어 커다란 위험을 야기할 수 있을 뿐 아니라 많은 인적·물적 손실을 유발한다. 따라서 이런 사고로부터 인적·물적 자원을 보호하기 위하여 탄약의 둔감화에 대한 요구가 높아지게 되었으며, 아울러 이런 무기체계를 효과적으로 시험 평가하는 규격들이 검토되기 시작하여 1991년에 MIL-STD-2105B^[1]가 채택되었다.

* 2001년 11월 4일 접수 ~ 2002년 3월 4일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소(Agency for Defence Development)

주연락저자, E-mail : hsp1212@yahoo.co.kr, 대전 유성우체국 사서함 35-5호 기술 4-7

** 정회원, 국방과학연구소(Agency for Defence Development)

Table 1. 반응유형(MIL-STD-2105B)

반응등급	이름	반응특성
I	폭굉	<ul style="list-style-type: none"> 강한 충격과 금속 케이스의 매우 빠른 소성 변형 에너지 발생 물질 전소 시험물 아래 혹은 주위에 땅이 파이고 주위의 금속판에 구멍을 내거나 소성 유동 변형
II	부분폭굉	<ul style="list-style-type: none"> 에너지 물질의 일부가 폭굉 반응 강한 충격 및 케이스의 일부분이 작은 조각으로 깨짐 땅이 파이며 주변의 금속판이 폭굉에 피해를 받고 폭굉시 압력에 의해 주위 구조물에 피해.
III	폭발	<ul style="list-style-type: none"> 에너지 물질의 빠른 연소와 구조물의 강력한 파열 금속 케이스는 큰 조각으로 부서져 멀리 날라 감 반응하지 않은, 또는 연소중의 에너지 물질이 뿌려짐 주위 구조물에 피해를 줄 수 있는 충격과 생성 땅이 조금 파이며 근처의 금속판에 피해
IV	폭연	<ul style="list-style-type: none"> 용기내의 에너지 물질의 점화, 연소가스가 취약한 케이스를 통해 새어나가 격렬하지 않는 압력 분출 케이스가 파열이 되나 조각이 나지는 않는다. 연소되지 않은 혹은 연소되고 있는 에너지 물질이 흩어짐 시험물에 추력이 발생하며 연소중인 에너지 물질에 의해 열과 연기로 인한 피해 발생
V	연소	<ul style="list-style-type: none"> 에너지 물질이 연소되나 추력을 발생시키지는 않음 케이스가 벌어지거나, 녹아 파열되고 연소가스가 조용히 분출될 수 있다. 파편은 주로 화재지역 내에 있으며 이것이 인명에 치명적 손상을 주지 않으며, 15m이상 멀리 떨어진 것이 일정 중량 이하임.

탄환충격에 대한 추진기관의 반응에 따라 MIL-STD-2105B에서는 표 1과 같이 반응유형을 다섯 등급으로 나누었으며 등급 V에서 등급 I로 갈수록 그 반응 정도가 심한 것이다.

추진기관이 탄환과 같은 빠른 금속체와 충돌하면 금속체의 종류, 크기 및 속도와 충돌하는 대상물에 따라 여러 가지 다른 현상이 나타나게 된다. 탄환이 추진기관에 충돌한 후 아무런 반응이 발생하지 않으면 가장 이상적이지만 추력을 발생시키지 않고 연소만 일어나는 것이 일반적으로 기대할 수 있는 최상의 반응 형태이다.

추진기관의 연소관, 라이너, 추진제의 종류에 따라 탄환이 연소관에 부딪치는 순간에 발생하는 충격에 의하여 연소관이 부서지거나 추진제가 점화되기도 하는데, 연소관이 부서지는 경우에는 파편이나 부서진 추진제 연소에 의한 손상은 예상되더라도 내부 압력이 떨어지므로 추진기관이 추력을 가지고 비행하지는 않으므로 추

진기관의 충돌에 의한 위험은 없게 된다. 탄환이 추진기관을 관통하면 추진제가 점화되더라도 연소관에 난 구멍 때문에 정상시의 추력보다는 작은 추력이 발생하게 되며, 탄환이 추진제를 완전히 통과하지 못하고, 중간에 정지되는 경우에는 내부 압력의 증가로 폭발이 발생할 가능성도 있다. 추진기관에서 가장 위험한 것은 내부 추진제가 충격 등에 의하여 균열이 발생하여 순간적으로 연소 면적이 급증된 상태에서 추진제의 연소가 시작되어 폭발로 이어지는 것이다.

HTPB/AP계 유연 추진제는 일반적으로 탄환 충격에 취약한 것으로 알려져 있으며, 특히 철 화합물 등의 연소촉매를 함유한 추진제의 경우, 탄환 충격에 더욱 취약한 것으로 알려져 있다. 이러한 추진제의 경우 산화제인 과염소산암모늄(ammonium perchlorate)을 산화비스무스(Bi_2O_3) 등과 같은 고밀도 첨가제로 대체하여 추진제의 인성을 증가시키면 탄환 충격에 대한 취약성을

상당히 감소시키는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 고밀도 첨가제를 사용하여 바인더 부피분율을 증가시킴으로써 추진제의 기계적 물성을 향상시켜 추진제의 둔감화를 피한 추진제를 충전한 모터와 복합재 연소관에 기존의 내탄도 성능을 어느 정도 유지하며 연소축매의 양을 조금 줄여 둔감화를 시도한 추진제를 충전한 모터에 대하여 탄환충격시험을 실시하여 그 결과를 서술하였다.

2. 시험 내용

소재가 복합재인 연소관에 안전도를 향상시킨 두 종류의 추진제를 각각 충전하여 MIL-STD-2105B에 규정된 탄환충격시험을 하였을 때 그 반응 정도를 비교하고자 하였다. 시험된 모터의 제원은 표 2와 같고, 연소관의 기계적 특성은 표 3과 같다.

Table 2. 시험모터 제원

구분	복합재 모터
연소관 재료	탄소섬유/에폭시수지
연소관 두께 (mm)	6.0
연소관 무게 (kg)	22
추진기관 길이 (mm)	886
추진기관 직경 (mm)	360

Table 3. 연소관의 기계적 특성

항목	섬유방향(°)	물성
인장강도 (kg/mm ²)	0	248
	90	4.33
인장강성 (kg/mm ²)	0	14,490
	90	320
최대신율 (%)	0	1.4
	90	0.34

높은 충전을 및 짧은 연소시간을 위해 고연소속도 추진제가 요구되어 고연소축매를 사용한 추진제의 조성을 개발하였으나, 이전의 탄환충격시험 결과 격렬한 반응을 나타내었으며^[2], 탄환이 추진제 그레인을 통과할 때 균열의 발생이

적을수록(즉, 추진제의 인성이 좋을수록), 연소속도는 낮을수록 탄환충격시험에 좋은 반응결과를 나타낸다고 알려져 있다. 혼합형 추진제는 바인더의 부피분율이 클수록 기계적 특성이 좋아진다. 바인더 부피분율을 증가시키기 위해서는 추진제의 고체 충전제의 함량을 감소시키거나 고밀도 충전제(HNIW, 금속연료 등)를 사용할 수 있는데, 전자의 경우는 밀도 및 비추력이 감소함으로 단위 부피당 성능이 감소하게 된다. 따라서 고체 충전제의 무게 비율을 고정하고 바인더의 부피분율을 증가시키기 위해서 고 밀도 첨가제를 사용하였다. (여기서 고밀도 첨가제라 함은 현재 추진제의 주원료인 과염소산암모늄보다는 밀도가 큰 HNIW와 같은 산화제나 Al, B, Zr과 같은 금속연료, 또는 Al₂O₃, Bi₂O₃와 같은 금속 산화물 등을 고려해 볼 수 있다.)

Table 4. 추진제 원료 및 조성

원료 \ 모 타	X1	X2
산화제(AP)	87.00	82.00
HTPB 바인더	9.75	10.00
연소속도 축매	3.25	3.00
고밀도 첨가제	0.00	5.00

Table 5. 추진제의 연소 및 기계적 특성

항 목 \ 모 타	X1	X2	비 고
r _b (mm/s)	32.15	27.71	연소속도
σ _m (bar)	10.2	8.5	최대응력
ε _m (%)	30	33	최대신장률
ε _b (%)	37	45	파단신장률
E ₀ (bar)	59	41	영률
H _s	65	60	경도
ρ(g/cc)	1.724	1.773	밀도

시험된 모터의 추진제 원료 및 조성과 추진제의 연소 및 기계적 특성은 표 4 및 표 5와 같다.

추진기관의 설치는 그림 1과 같이 안전을 위하여 무게가 1.8톤인 밀판에 추진기관의 노즐이 하늘을 향하도록 고정하였다.

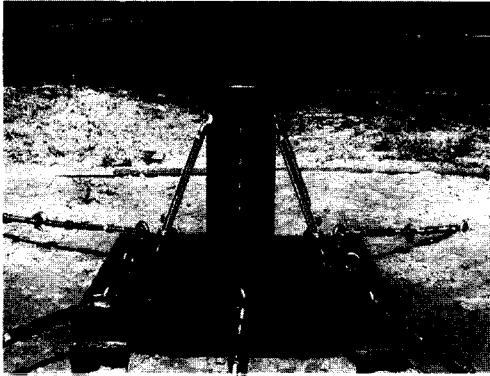


Fig. 1 치구에 장착된 추진기관

시험모터로부터 16.8m 거리에서 솔레노이드를 사용한 원격조종으로 3발의 구경 0.5인치 철갑탄이 약 80ms의 간격으로 연속 격발되고, 탄착지점은 모터의 중간부분인 노즐끝단으로부터 443mm 지점에 직경 20mm의 원 안에 형성되도록 하였으며, 탄속은 총구와 일정 거리에 놓인 회로판을 탄환이 통과하는 시간을 측정하여 구하였다.

또한 음압과 열속을 측정하기 위한 센서는 그림 2와 같이 시험모터를 중심으로 반경 5m, 15m의 원과 탄환의 비행선과 45°의 각을 이루는 직선이 교차하는 점에 각 1개씩을 설치하였다. ((1)~(4)까지 총 4개) 음압은 압력형 마이크로폰 센서를 사용하였으며, 열속은 슈미트-보엘터(Schmidt-Boelter)타입의 열속센서를 사용하여 측정하였다.

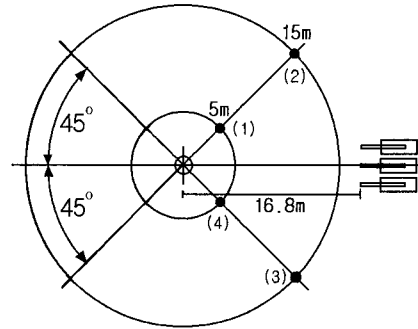


Fig. 2 음압 및 열속센서 위치

음압에 의해 구분되는 반응유형은 시험물로부터 5m의 거리에서 측정하였을 경우 그 값이 5 kPa을 넘지 않을 경우에는 반응유형이 5급이 되고, 15m의 거리에서 측정하였을 경우 그 값이 5 kPa을 넘지 않을 경우에는 반응유형이 4급이 되고, 15m의 거리에서 측정하였을 경우 그 값이 5 kPa을 넘을 경우에는 반응유형이 3급이 된다. 여기서 5m란 주로 민간용 탄약의 화재 발생시 소방관이 작업을 할 수 있는 거리이며, 15m란 주로 군용 탄약의 화재 발생시 소방관이 작업을 할 수 있는 거리이다.

열속 값에 의하여 구분되는 반응 유형은 시험물로부터 15m의 거리에서 측정하였을 경우 그 값이 4 kW/m²이 초과할 경우 반응유형이 4급이 되고 이하의 경우는 5급이 된다.

4 kW/m²의 열속 값은 30초간 노출될 경우 인체 피부에는 2도 화상의 피해를 초래하는 큰 열량이다. 나토(NATO) AOP-39^[3]에는 반응유형에 음압과 열속의 기준이 규정되어있다.(표 6 참고)

Table 6. 나토(NATO) AOP-39의 반응유형

반응 등급	이름	Additional Criteria (NATO AOP-39)
IV	폭연	<ul style="list-style-type: none"> - 폭발압력이 15m 거리에서 5 kPa을 넘지 않음. - 시험물은 3조각 이상으로 쪼개지지 않음. - 연소물질의 비산.
V	연소	<ul style="list-style-type: none"> - 폭발압력이 5m 거리에서 5 kPa을 넘지 않음. - 시험물이 격렬하게 쪼개지지 않음. - 15m 거리에서 79 J 이상의 열을 발생하거나 무게가 150g 이상인 조각이 없어야 함. - 열속은 15m 거리에서 4kW/m² 이하.

3. 시험 결과 분석

계측된 음압은 표 7과 같으며 15°C에서 음압이 10m의 거리를 전파하는데 약 0.03초가 걸리므로 5m와 15m에 설치되어있는 음압센서에서 최대 값이 발생하는 시간을 보면 같은 음원을 측정하였으므로, 음압은 정상으로 계측되었다.

Table 7. 최대 음압

계측값 센서	최대 음압 (psi/kPa)		최대 음압의 발생시간 (sec)	
	X1	X2	X1	X2
(1), 5m	2.69/18.55	2.82/19.44	0.037	0.037
(2), 15m	0.71/4.90	0.60/4.14	0.065	0.064
(3), 15m	0.58/4.00	0.51/3.52	0.064	0.066
(4), 5m	4.11/28.34	4.10/28.27	0.034	0.034

센서 (1), (4)를 기준으로 시험모타가 급격한 압력의 증가로 폭연을 일으키는 시간을 유추해 보면 음압이 5m를 전파하기 위해서는 약 14.7ms의 시간이 소요되며 센서 (1)의 최대 음압의 발생 시간을 기준으로 하면 0.022초에, 센서 (4)의 최대 음압의 발생시간을 기준으로 하면 0.019초

에 시험모타의 폭연이 발생되었다고 예측되므로, 모타 X1의 경우 탄환 발사 시각을 0으로 하고 탄속이 877m/s로 일정하다고 가정하면 약 0.018초에 탄환이 시험모타에 충돌하며, 0.019~0.022초 사이에 폭연이 발생된다고 판단된다.(모타 X2의 경우도 동일)

두 시험모타의 경우 5m의 거리에 위치한 센서 (1), (4)의 최대 음압은 반응유형 5급의 기준인 5 kPa을 초과하며, 15m 거리에 위치한 센서 (2), (3)의 최대 음압은 반응유형 4급의 기준인 5 kPa을 초과하지 않는다. 센서 (1)을 제외한 모든 센서에서 모타 X2의 경우가 모타 X1의 경우보다 낮은 음압이 측정되었다. 그림 3~그림 10은 모타 X1, X2의 음압 측정 결과이다.

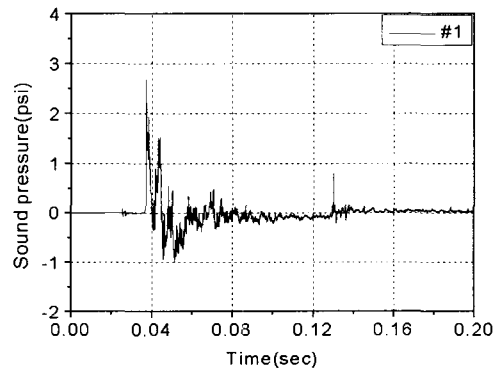


Fig. 3 음압 측정 결과 (X1, 센서(1), 반경(5m))

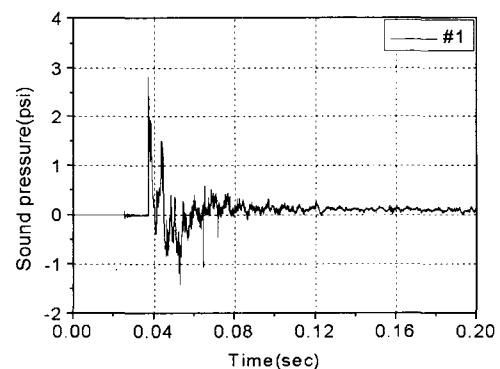


Fig. 4 음압 측정 결과 (X2, 센서(1), 반경(5m))

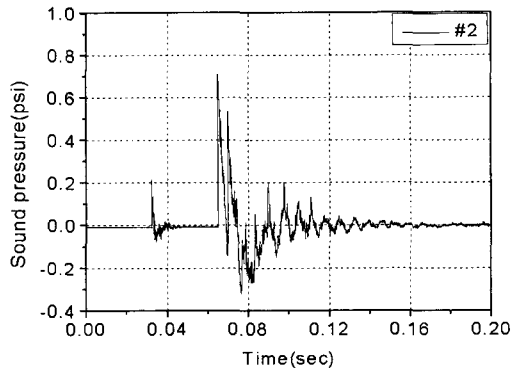


Fig. 5 음압 측정 결과 (X1, 센서(2), 반경(15m))

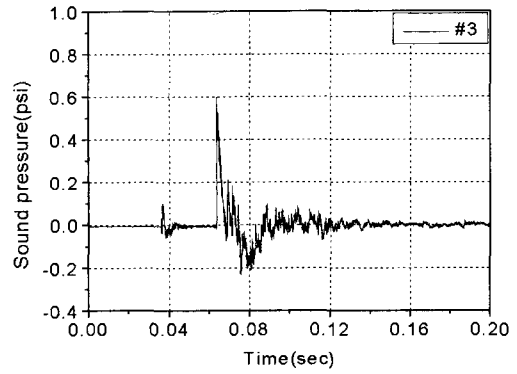


Fig. 8 음압 측정 결과 (X2, 센서(3), 반경(15m))

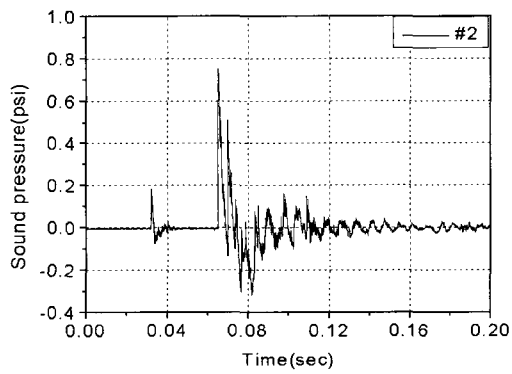


Fig. 6 음압 측정 결과 (X2, 센서(2), 반경(15m))

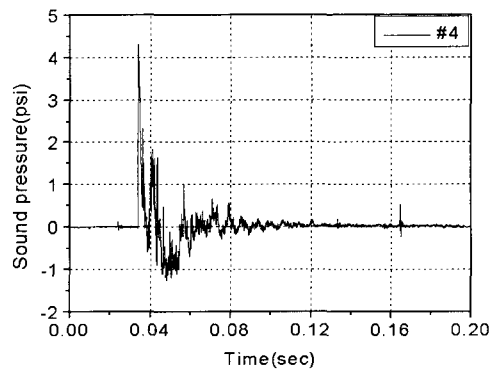


Fig. 9 음압 측정 결과 (X1, 센서(4), 반경(5m))

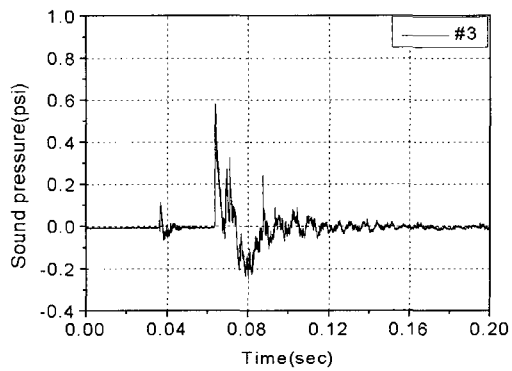


Fig. 7 음압 측정 결과 (X1, 센서(3), 반경(15m))

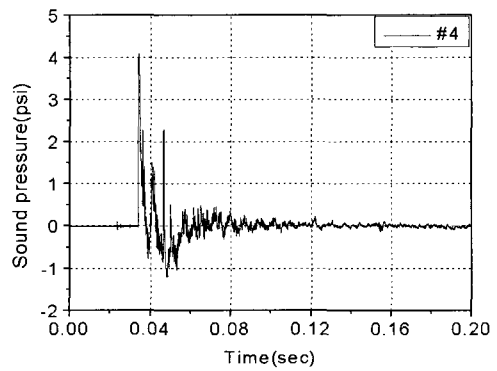


Fig. 10 음압 측정 결과 (X1, 센서(4), 반경(5m))

측정된 열속 값은 표 8과 같다. 모터 X1의 경우를 보면 15m거리에 위치한 센서 (2), (3)에서

는 최대 3.1, 4.2 kW/m² 가 측정되었다. 따라서 센서 (2)의 경우는 반응유형 5급의 기준인 4 kW/m²를 초과하지 않고, 센서 (3)의 경우는 4 kW/m²를 조금 초과한다. 한편 모타 X2의 경우는 센서 (2), (3)에서 각각 최대 2.4, 3.7 kW/m² 가 측정되어 모두 반응유형 5급의 기준인 4 kW/m²를 초과하지 않는다.

Table 8. 열속 데이터

계측값 센서	최대값 (kW/m ²)		최대값 발생시간 (sec)		30초간의 평균열속 (kW/m ²)	
	X1	X2	X1	X2	X1	X2
(1), 5m	98.2	79.9	0.949	0.724	16.02	12.21
(2), 15m	3.1	2.4	3.208	2.423	1.03	0.63
(3), 15m	4.2	3.7	2.919	2.548	1.44	1.11
(4), 5m	402.9	436.4	0.907	0.767	18.69	27.08

나토 AOP-39의 반응유형 5급의 기준인 15 m에서 4 kW/m²란 30초 동안에 약 4 kW/m²의 열속에 노출되면 2도 화상을 입는다는 근거로 결정된 사항이므로 본 시험 데이터를 통하여 30초간의 평균 열속을 구하면 센서 (2), (3)의 열속은 각각 반응유형 5급의 기준인 4 kW/m²에 훨씬 못 미치는 0.63~1.44 kW/m²이다. 열속 또한 모든 센서위치에서 모타 X2의 경우가 모타 X1의 경우보다 낮은 값이 측정되었다. 그림 11~그림 18은 모타 X1, X2의 열속 측정 결과이다.

복합재 연소관은 외형상 크게 3등분으로 나눌 수 있다. 즉 전방돔과 스키투, 후방돔과 스키투, 그리고 중앙 원통부 실린더 부위로 구분할 수 있다. 시험 후 연소관은 전방 Y자형 연결부위를 경계로 2등분 파단 현상을 보이고 있다. 모타 X1의 경우 60%, 모타 X2의 경우에는 70%가 원형을 보존하고 있음을 시험 후 육안 및 개략 치수 검사를 통해서 알 수 있었다. 또한 수집된 파편은 조각으로 존재치 않고 탄소 섬유와 실

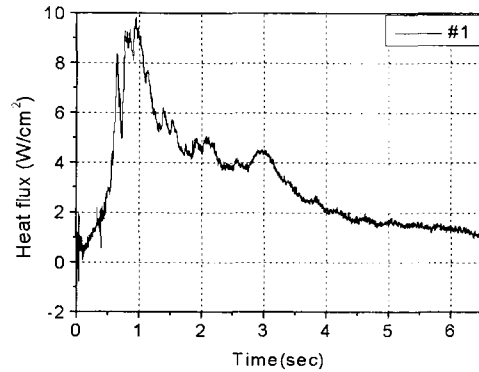


Fig. 11 열속 측정 결과 (X1, 센서(1), 반경(5m))

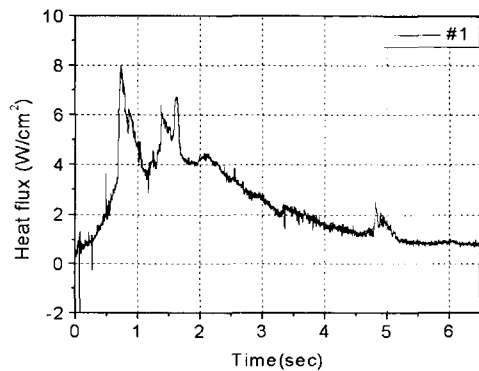


Fig. 12 열속 측정 결과 (X2, 센서(1), 반경(5m))

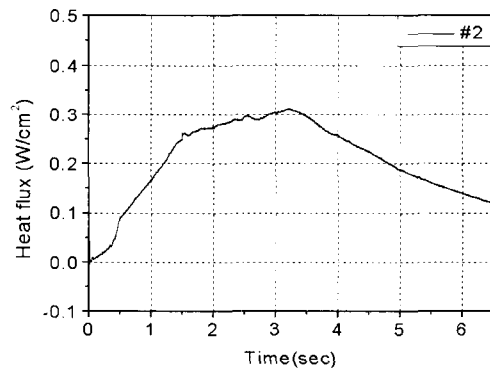


Fig. 13 열속 측정 결과 (X1, 센서(2), 반경(15m))

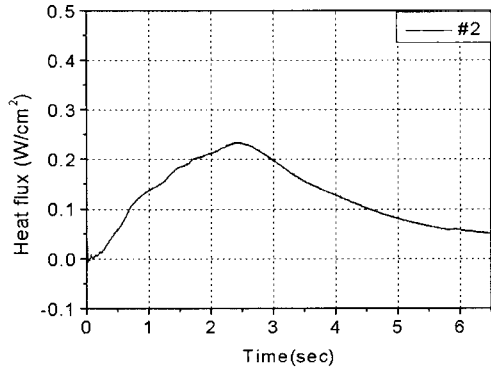


Fig. 14 열속 측정 결과 (X2, 센서(2), 반경(15m))

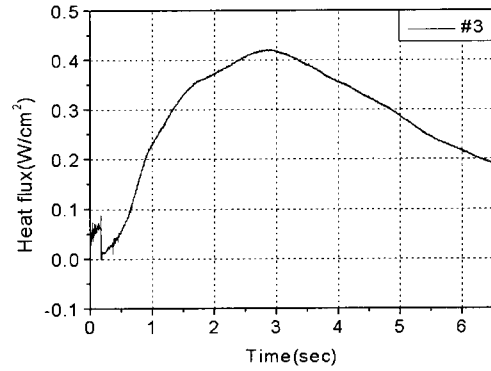


Fig. 15 열속 측정 결과 (X1, 센서(3), 반경(15m))

Table 9. 탄환충격시험 결과요약

측정내용	기준치	측정치		판정
		X1	X2	
탄환속도 (m/sec)	850±60	877	893	기준 만족
음압	MIL-STD-2105B : 기준없음 나토 AOP-39 : 등급 III : 15m에서 5kPa 이상 등급 IV : 15m에서 5kPa 이하 등급 V : 5m에서 5kPa 이하	15m에서 최대 4.9 kpa, 5m에서 최대 28.3 kpa	15m에서 최대 4.1 kpa, 5m에서 최대 28.3 kpa	나토 규격 : 등급 IV
열속	나토AOP-39 : 등급 V : 15m에서 4 kW/m' 이하	15m에서 최대 4.2 kW/m'	15m에서 최대 3.7 kW/m'	X1: 등급 IV X2: 등급 V
연소관 상태	MIL-STD-2105B: 등급 III : 큰 파편 발생하여 멀리 날아감 등급 IV : 케이스가 파열되나 조각나지 않음 등급 V : 케이스 일부 파열 나토 AOP-39 : 등급 III : 시험물이 격렬하게 큰 조각들로 쪼개짐. 등급 IV : 시험물은 3조각 이상으로 쪼개지지 않음. 등급 V : 15m 거리에서 79 J 이상의 열을 발생하거나 무게가 150g 이상인 조각이 없어야 함.	하단 분리 연소관 60% 원형보존, 파편조각은 실형태로 7m 정도 비산	하단 분리 연소관 70% 원형보존, 파편조각은 실형태로 7m 정도 비산	등급 IV
종합판정		등급 IV. 폭연	등급 IV. 폭연	

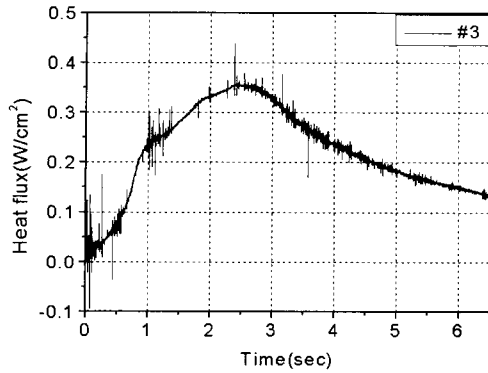


Fig. 16 열속 측정 결과 (X2, 센서(3), 반경(15m))

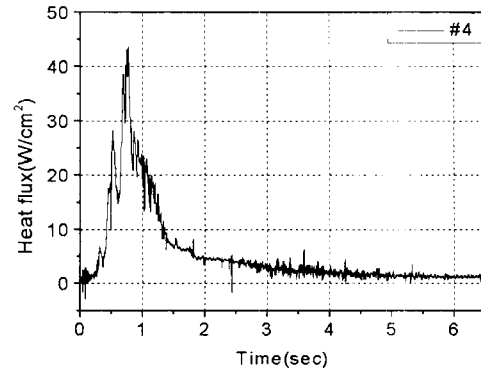


Fig. 18 열속 측정 결과 (X2, 센서(4), 반경(5m))

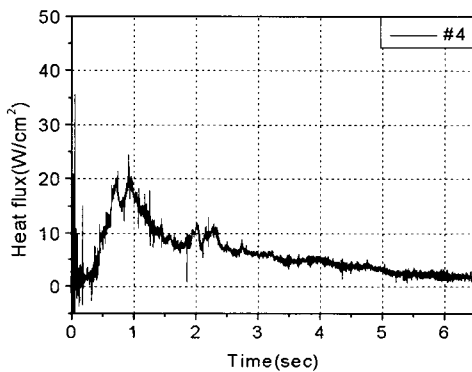


Fig. 17 열속 측정 결과 (X1, 센서(4), 반경(5m))

형태로 반경 약 7 m 정도에 비산되어 있었다. 이상의 결과를 종합하여 판단하면 표 9와 같이 시험된 두 모타 모두 반응등급 4급인 폭연으로 판정된다.

4. 결론

복합재 연소관에 기존의 내탄도 성능을 어느 정도 유지하며 추진제의 둔감화를 꾀한 즉, 연

소촉매 3.25%를 사용한 추진제를 충전한 모타와 복합재 연소관에 고밀도 첨가제 5%와 연소촉매 3%를 사용하여 추진제의 기계적 물성을 향상시킨 추진제를 충전한 모타에 대하여 탄환 충격시험을 실시하여 그 반응을 분석하였다.

음압, 열속, 연소관 상태의 분석 결과는 종합적으로 두 시험모타 모두 반응등급 4급 폭연으로 판정되었으나, 두 시험 모타를 비교할 때 모타 X2가 모타 X1보다 탄환충격시험에서의 반응이 상대적으로 좋은 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. MIL-STD-2105B, "Hazards Assessment Tests for Non-Nuclear Munitions", 12 January 1994.
2. 윤현걸, 류병태, 최창선, "고체 추진기관의 탄환 충격시험", 한국추진공학회지, 제4권, 제4호, 2000.
3. NATO AOP-39, "Guidance on the Development, Assessment and Testing of Insensitive Munitions(MURAT)", June 1997