

고체추진기관의 탄환충격시험

윤현걸* · 류병태* · 최창선*

Bullet Impact Tests for Solid Rocket Motor

Hyun-Gull Yoon* · Byung-Tae Ryu* · Chang-Sun Choi*

ABSTRACT

Bullet impact tests for solid rocket motor were performed and its results were described. Two motors were made of composite and steel for case material, respectively and their reactions to the bullet impact were compared. Throughout the tests it had been tried to setup the procedure of bullet impact test and criteria of the judgment for the reactions.

초 록

로켓추진기관에 대한 탄환충격시험을 실시하여 그 결과를 서술하였다. 연소관의 재질은 복합재와 금속재 두 종류로 제작하여 각각의 추진기관의 탄환충격에 대한 반응을 비교하였다. 본 시험을 통하여 탄환충격시험의 절차 및 반응의 판정 기준 설정에 참고가 되는 자료를 획득하고자 하였다.

1. 서론

무기체계가 실전 배치되면 운용 중에 여러 형태의 사고의 위험이 항상 존재한다. 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 야기한다. 근래에 미국적의 항공모함인 USS Orikany, USS Forrestal, USS Enterprise, USS Nimitz호에서 발생한 사고를 표 1에 요약하였다.

이런 손실로부터 인적, 물적 자원을 보호하기 위하여 Insensitive Munitions (IM)에 대한 요구가 높아지게 되었으며, 아울러 이런 무기 체계를 효과적으로 시험 평가하는 규격들이 검토되기 시작하였다. 이런 노력이 1960년대 중반부터 시작되어 1991년에 MIL-STD-2105B("Hazards Assessment Tests for Non-Nuclear Munitions")가 채택되었다. 추진기관에는 1985년까지는 무기체계의 설계나 개발에 이러한 안전 규정을 적용하지 않았으며 1991년에서야 비로소 추진기관에 대한 규정이 제정되었다.

본 논문에서는 MIL-STD-2105B에 있는 여러 가지 시험종목 중에 로켓추진기관에 대한 탄환충격 시험(Bullet Impact Test)을 실시하여 그 결과를 서

* 국방과학연구소(Agency for Defence Development)

표 1. Summary of major aircraft-carrier fires since 1966

CARRIER	DATE	PERSONNEL Dead/Injured	AIRCRAFT Damaged or Destroyed	COST	DOWN TIME	CAUSE
ORISKANY	10/66	44/156	3/0	\$ 10M	-	Fire in a flare locker
FORRESTAL	7/67	134/161	21/43	\$ 72M	-	Inadvertent rocket launch
ENTERPRISE	1/69	28/343	15/17	\$ 56M	6 MOS	Huffer exhaust on warhead
NIMITZ	5/81	14/42	3/9	\$ 58M	3 DAYS	Aircraft crash
TOTAL		220/702	42/69	\$196M	-	

술하고자 하였다. Full-scale 시험을 하는데 가장 우려되는 점은 추진기관이 점화되어 예상치 못하는 곳으로 비행하는 것이다. 따라서 이를 방지하기 위하여 치구를 사용하여 고정시켰으며, 연소관의 재질은 복합재와 금속재 두 종류로 제작하였다. 탄환충격시험은 시험 절차나 판정 기준이 객관화되어 있지 못하므로 이번 시험을 통하여 시험 절차 및 판정 기준 설정에 참고가 되는 자료를 획득하는 것과 금속재와 복합재 연소관의 탄환충격에 의한 반응을 비교하는 것이 가장 큰 목적이다.

2. 이론적 배경

과거의 로켓 개발은 비행 가능 거리, 속도, 저장 수명, 단가 등의 향상에 집중되어 왔으나 사용시 안전에 대한 요구가 점차 증대됨에 따라 둔감 추진제 개발을 비롯하여 보관과 운송 시의 안전에 대한 노력이 요구되고 있다.

추진기관의 안전도시험 중 탄환충격시험은 탄두와 폭탄에는 오래 전부터 실시되어 왔으나 로켓 모터에는 최근에 와서야 시험항목에 추가되었다. 과거에는 주로 20-mm armor-piercing (AP) 탄환을 사용하여 왔으나, 최근에 미국과 NATO가 caliber 0.5 type M2 armor-piercing (AP) 탄환을 사용하는 것에 합의하였다.

탄환충격에 대한 추진기관의 반응에 따라 MIL-STD-2105B에서는 표 2와 같이 반응유형을 다섯 등급으로 나누었으며 Type V에서 Type I로 갈수록 그 반응정도가 심한 것이다.

추진기관이 탄환과 같은 빠른 금속체와 충돌하면 금속체의 종류, 크기 및 속도와 충돌하는 대상물의 종류, 크기 등에 따라 여러 가지 다른 현상이 나타나게 된다. 탄환이 추진기관에 충돌한 후 아무런 반응이 발생하지 않으면 가장 이상적이지만 추력을 발생시키지 않고 burning만 일어나는 것이 일반적으로 기대할 수 있는 최상의 반응형태이다. 추진기관의 연소관, 라이너, 추진제의 종류에 따라 탄환이 연소관에 부딪히는 순간에 발생하는 충격(shock)에 의하여 연소관이 부서지거나 추진제가 점화되기도 하는데, 연소관이 부서지는 경우에는 파편이나 부서진 추진제 연소에 의한 손상은 예상되더라도 내부 압력이 떨어지므로 추진기관이 추력을 가지고 비행하지는 않으므로 추진기관의 충돌에 의한 위험은 없게 된다. 추진기관의 경우에는 추진제가 점화되더라도 연소관에 난 구멍 때문에 정상시의 추력보다는 작은 추력이 발생하게 된다. 오히려 탄환이 추진제를 완전히 통과하지 못하고 중간에 정지되는 경우에는 내부 압력의 증가로 explosion이 발생할 가능성도 있다. 추진기관에서 가장 위험한 것은 내부 추진제가 충격 등에 의하여 crack이 발생하여 순간적으로 연소 면적이 증가된 상태에서 추진제의 연소가 시작되는 것이다. 이 경우에는 급속한 내부 압력의 증가로 deflagration이 아닌 explosion이나 detonation이 발생하게 된다. 따라서 추진기관의 연소관이 일정 압력 이상에서 파괴되도록 제작하는 것이 탄환충격 시험에서 유리하다. 최근에는 strip laminate, composites 등의 재질로 연소관을 제작함으로써 유사시 연소관의 일부분을 통해 배기가 되기 쉽도록 하고 있다.

표 2. 반응유형

Type	Name	Reaction Behavior
I	Detonation	<ul style="list-style-type: none"> • Very rapid plastic deformation of metallic cases • All energetic material will be consumed. • Large ground craters and blast overpressure damage to nearby structures
II	Partial Detonation	<ul style="list-style-type: none"> • Some of the energetic material reacts as in a detonation. • An intense shock is formed; some of the case is broken into small fragments • Ground craters and blast overpressure damage to nearby structures.
III	Explosion	<ul style="list-style-type: none"> • High local pressures leading to violent pressure rupturing of the case • Metal cases are fragmented into large pieces and thrown long distances. • Air shocks can cause damage to nearby structures. • Minor ground craters and blast damage to adjacent metal plates.
IV	Deflagration	<ul style="list-style-type: none"> • The case might rupture but does not fragment • Propulsion might launch an unsecured test item • Only heat and smoke damage from the burning energetic material.
V	Burning	<ul style="list-style-type: none"> • The energetic material ignites and burns, non-propulsively. • The case may open, melt or weaken sufficiently to rupture nonviolently, allowing mild release of combustion gases. • Debris stays mainly within the area of the fire • No fatal wounds to personnel or hazardous fragments beyond 15 m

3. 시험 내용

연소관의 소재가 각각 스틸과 복합재인 추진기관 2기를 Mil-STD-2105B에 규정된 탄환충격시험을 하였을 때 그 반응 정도를 비교하고자 하였다. 시험된 추진기관의 제원은 표 3과 같다.

표 3. 추진기관 제원

구분	금속재 모타	복합재 모타
연소관 재료	스틸(AISI 4130)	Carbon-Epoxy
연소관 두께(mm)	3.3	6.0
연소관 무게(kg)	39	22
추진기관 길이(mm)	850	886
추진기관 직경(mm)	360	360

본시험에 사용된 추진제는 연소속도가 빠르고 추진제의 무게는 90kg, 추진제 조성은 AP 85.5%, HTPB 바인더 및 연소촉매 13%, 그리고 연소안정제 1.5%이다. (표 4 참고)

표 4. 추진제 원료 및 조성

원 료	무게비(%)
산화제(AP)	85.500
HTPB 바인더 및 연소촉매	13.000
연소안정제	1.500

또한 이 추진제의 기계적 특성은 표 5와 같으며 두 모타간에 큰 차이는 없다.

표 5. 추진제의 기계적 특성

항 목	금속재모타	복합재모타	비 고
σ_m (bar)	9.0	7.9	최대응력
ϵ_m (%)	33	33	최대신장률
ϵ_b (%)	42	40	과탄신장률
E0 (bar)	43	39	영률
Hs	61	60	경도
Density(g/cc)	1.738	1.738	밀도

추진기관의 설치는 그림 1과 같이 안전을 위하여 무게가 1.8톤인 밑판에 추진기관의 노출이 하늘을 향하도록 고정하였다.

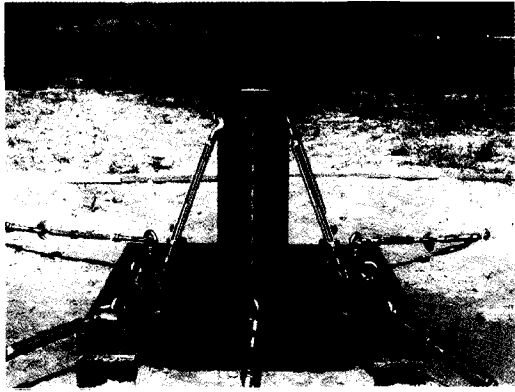


그림 1. 치구에 장착된 추진기관

시험모타로부터 20m 거리에서 3발의 Caliber .50 AP탄이 솔레노이드를 사용하여 원격으로 약 80msec의 간격으로 연속 격발되고, 탄속은 총구와 일정 거리에 놓인 회로판을 탄환이 통과하는 시간을 측정하여 구하였다.

또한 음압과 열속을 측정하기 위한 센서는 그림 2와 같이 5m, 15m에 각 1개씩을 설치하였다. (복합재 연소관 경우 (1)~(8)까지 총 8개, 금속재 연소관 경우 (1), (4), (5), (8)에 총 4개) 음압은 압력형 마이크로폰 센서를 사용하였으며, 열속은 K-type의 열전대(thermocouple)를 이용하여 온도를 측정하여 열속으로 환산하였다.

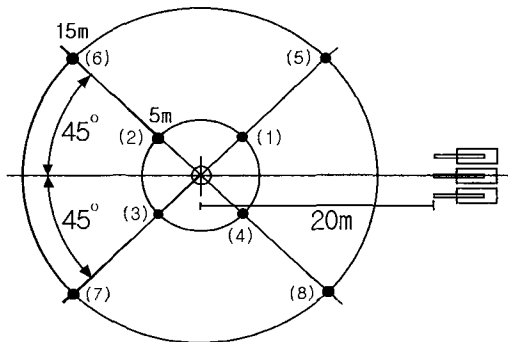


그림 2. 음압 및 열속센서 위치

열속 값에 의하여 구분되는 반응 유형은 시험물로부터 15m의 거리에서 측정하였을 경우 그 값이 4 kW/m^2 이 초과할 경우 반응유형이 4급이 되고 이하의 경우에는 5급이 된다. 4 kW/m^2 의 열속 값은 30초간 노출될 경우 인체 피부에는 2도 화상의 피해를 초래하는 큰 열량이다. NATO AOP-39에는 반응유형에 음압과 열속의 기준이 규정되어 있다. (표 6 참고)

표 6. NATO AOP-39의 반응유형

Type	Name	Additional Criteria(NATO AOP-39)
IV	Deflagration	<ul style="list-style-type: none"> - Overpressure does not exceed 5 kPa at 15m - Test item breaks up in no more than fragments - Scattering of burning materials
V	Burn	<ul style="list-style-type: none"> - Overpressure does not exceed 5 kPa at 5m - Test item splits in a non-violent way - No fragment of more than 79 J or more than 150g beyond 15m - Heat flow is less than 4 kW/m^2 at 15m

4. 시험 결과 분석

4.1 복합재 연소관경우

음압의 예상 최대값을 1 psi(6.9 kpa)로 설정하고 계측하였으나, 측정결과는 최대값 범위를 벗어나 유용한 데이터를 얻지 못하였다. 따라서 음압을 기준으로 판단하면 NATO AOP-39기준으로 III 등급인 Explosion (15m에서 5kpa 이상)으로 판단된다.

열속의 측정은 시험물에서 반경 15m 지점에서 측정된 온도 값이 그림 3과 4와 같이 일정한 값을 나타내어 온도 변화 값을 이용하여 열속을 계산하려는 시도는 무의미하게 되었다. 또한, 탄환 발사 후 20msec 이후에는 큰 변화를 나타내지 않았다.

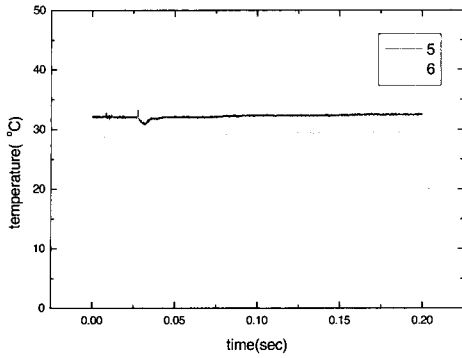


그림 3. (5), (6)에서의 측정 온도

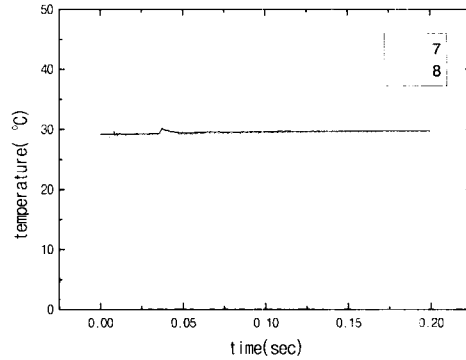


그림 4. (7), (8)에서의 측정 온도

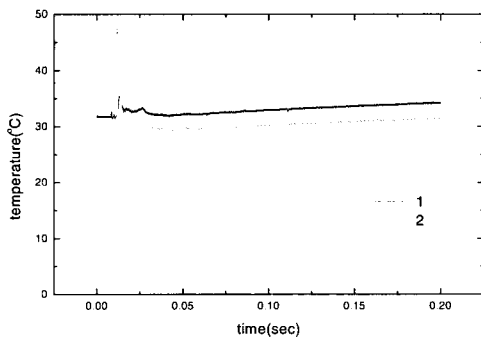


그림 5. (1), (2)에서의 측정 온도

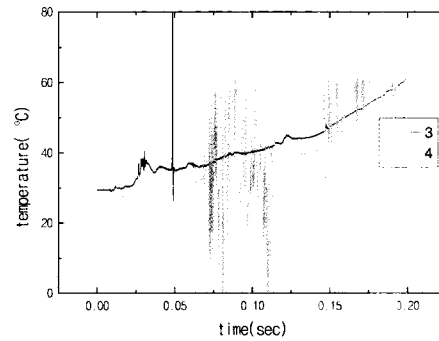


그림 6. (3), (4)에서의 측정 온도

시험물에서 반경 5m에서 측정한 온도(그림 5와 6)는 비교적 시간에 따라 다소 민감하게 변화하였다. 센서위치 (4)에서 측정한 온도는 시간에 따라 심한 변화를 보이는데 그 원인은 시험물이 폭발한 후 일부 추진제 덩어리가 센서 바로 아래로 튀어 그 곳에서 수 초 동안 연소되었기 때문인 것으로 판단된다.

고속(1000frame/sec) 카메라의 촬영 결과(그림 7~11)에 의하면 두 번째 탄환이 발사되기 이전에 첫 번째 탄환에 의하여 이미 추진기관이 폭발하였으므로 연속 사격에 따른 추가적인 반응 현상은 알아 볼 수 없었다. 탄환이 관통된 직후 1 msec가 경과되었을 때의 모습(그림 9)을 보면 탄환이 관통된 뒷부분에서 분출되는 화염이 전면

구멍이나 노즐에서 분출되는 화염의 길이보다 길이가 긴 것으로 보아 전면 구멍보다는 후방이 관통된 구멍의 크기가 크다는 것을 알 수 있고 또한 노즐에서 화염이 분출되기 이전에 관통된 구멍으로 화염이 먼저 분출되었음을 알 수 있다. 탄환이 관통한 후 2msec가 경과된 후의 모습(그림 10)을 보면 노즐에서 분출되는 화염의 크기가 관통된 구멍에서 나오는 화염의 크기보다 커졌으므로 연소관 내부의 연소 면적이 증가하고 있음을 알 수 있다. 탄환이 관통한 후 3msec가 경과된 모습(그림 11)은 연소관이 파괴되기 시작하는 시점이다. 연소관의 균열은 후면의 관통된 구멍에서부터 시작하여 케이스 전체로 퍼져나가고 있음을 알 수 있다.

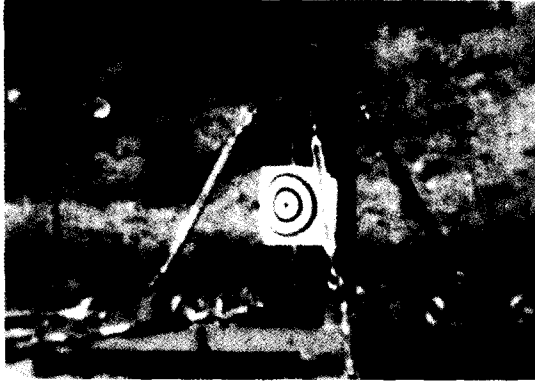


그림 7. 탄환이 관통되기 직전

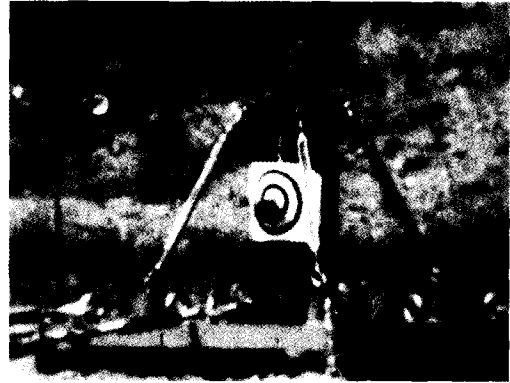


그림 8. 탄환이 관통된 직후

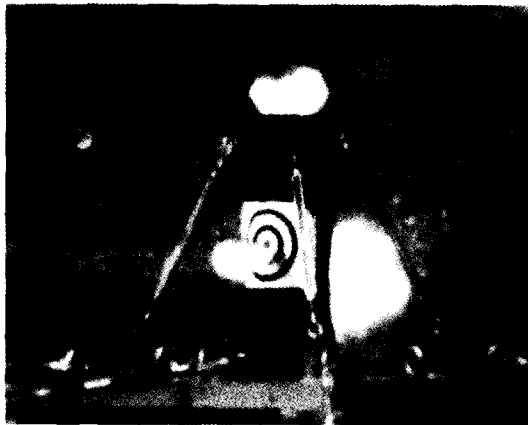


그림 9. 관통후 1msec 경과

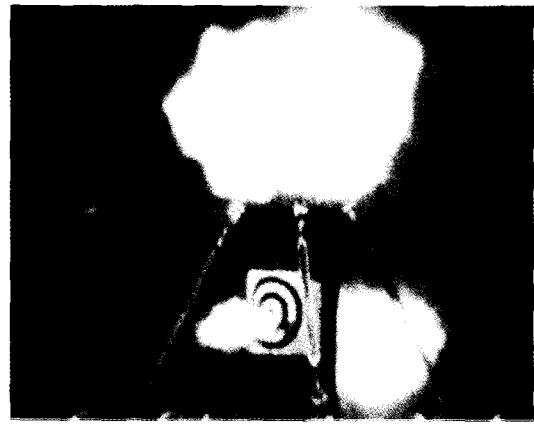


그림 10. 관통후 2msec 경과



그림 11. 관통후 3msec 경과

시험후 연소관의 상태는 전방돔과 스커트 부위가 원통부 본체에서 이탈되어 그 형상을 알아볼 수 없을 정도이며, 남아 있는 부분도 탄소 섬유만 남아 있고 매트릭스 수지는 완전 탄화된 상태로 존재하였다. 후방돔과 후방 스커트 부위는 완전 분리되어 탄화된 상태로 존재하였고 중앙 원통부 부위는 전,후방 Y-Joint를 경계로 완전 절단 및 분리된 후 파편 조각으로 비산되어(반경 30m 지역) 거의 형체를 찾아 볼 수 없었다.(그림 12와 13 참조) 연소관의 30%만이 원형 보존되었다. 추진제가 반경 100m 지역으로 비산되어 화재가 발생하기도 하였다.



그림 12. 헤드부위 (시험후)

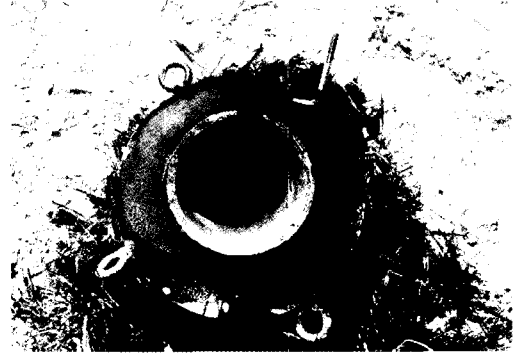
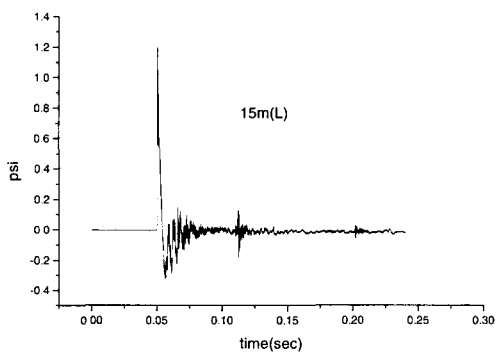
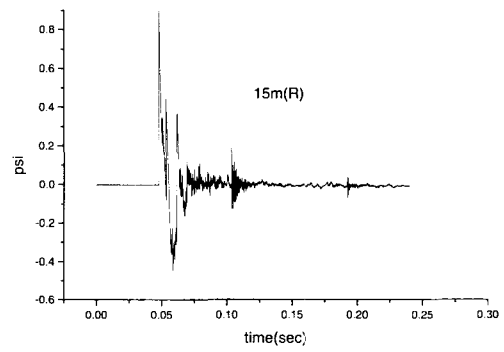


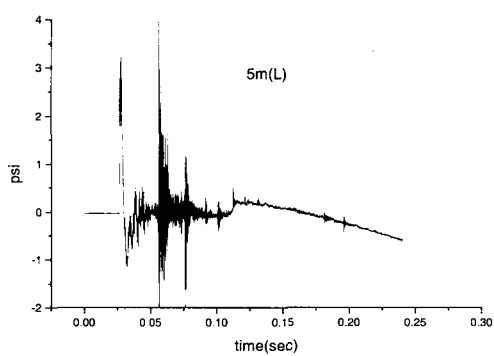
그림 13. 노즐부위 (시험후)



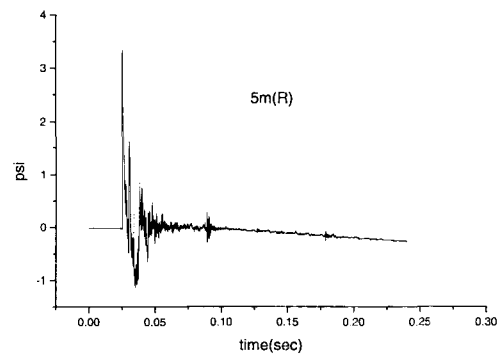
(a) 센서위치 (8)



(b) 센서위치 (4)



(c) 센서위치 (4)



(d) 센서위치 (1)

그림 14. 음압 계측 결과

4.2 금속재 연소관의 경우

그림 14는 음압을 계측한 결과이다. 15m 거리에서 약 1.2 psi(8.27kpa), 5m 거리에서 약 4 psi(27.6kpa)로 NATO AOP-39 기준으로 판정하면 Explosion 반응을 한 것으로 판단된다.

고속 카메라의 촬영 결과(그림 15~17)는 시험 당일 기상관계로 초당 500 frame 이상 촬영하지 못하였고 필름의 상태도 좋지 않아 위의 복합재 연소관 시험의 경우와 같은 분석은 불가능하였다. 그림 16에서 전방에서 분출되는 화염의 빛이 추진기관을 고정하기 위하여 사용한 네 개의 지지봉 중 앞 쪽 두 개에서만 밝게 반사되고 있는 것을 알 수 있어 연소관의 전면이 탄환 충격에 의해 먼저 파괴되면서 화염이 분출되고 있다고 판단된다.

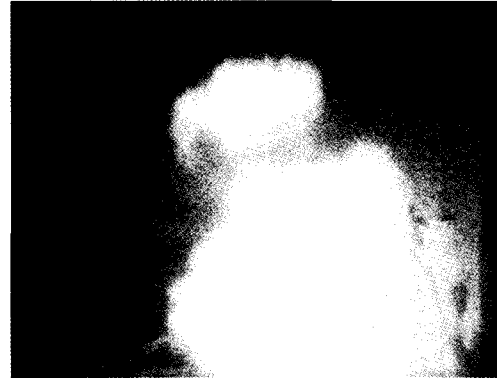


그림 17. 탄환 관통 후 3~4msec

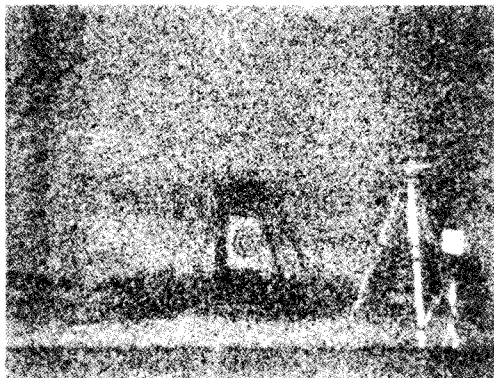


그림 15. 탄환 관통 직전



그림 18. 노즐부위(시험후)



그림 16. 탄환 관통 후 1~2msec



그림 19. 헤드부위(시험후)

표 7. 시험 결과 요약

측정내용	기준치	측정치		판정
		복합재	금속재	
탄환속도 (m/sec)	850 ± 60	883	900	기준 만족
탄 환 발사간격 (msec)	80 + 40	80	80	기준 만족
음압	MIL-STD-2105B : 기준없음 NATO AOP-39 : III Explosion: 15m에서 5kPa 이상 IV Deflagration: 15m에서 5kPa 이하 V Burn: 5m에서 5kPa 이하	15m에서 1 psi (6.9 kpa)	15m에서 1 psi (6.9 kpa)	NATO 규격 : Explosion
연소관상태	MIL-STD-2105B III Explosion: 큰 파편 발생하여 멀리 날아감 IV Deflagration: 케이스가 파열되나 조각나지 않음 V Burn: 케이스 일부 파열 NATO AOP-39 : III Explosion: Violent breaking of large fragments IV Deflagration: Test item breaks up in no more than three fragments V Burn: No fragment more than 150g beyond 15m	케이스는 3조각으로 분리, 복합재 파편 30m 비산, 추진재 파편 100m 비산	케이스는 2조각으로 분리, 금속재 파편 70m 비산, 추진재 파편 200m 비산	규격이 금속재 케이스 위주로 작성. 복합재의 경우에는 판정이 곤란
종합판정		III Explosion	III Explosion	

시험후 연소관의 상태는 헤드와 노즐이 모두 분리되어 시험지구 옆에 있었으며(그림 18~19) 연소관은 4~5개의 큰 파편과 다수의 소형 파편으로 절단된 상태였고 후방부 케이스 파편은 반경 70m 지점에 낙하하였다. 또한, 연소 중인 추진제가 반경 200m 지역까지 비산되었다.

이상의 결과를 종합하여 판단하면 탄환충격시험에 대한 추진기관의 반응유형은 표 7에 나타낸 바와 같이 복합재와 금속재 모두 Type III인 Explosion으로 그 정도는 복합재로 만든 추진기관에 비해 금속재로 만든 추진기관이 더 심한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 시험은 탄환충격시험 절차 및 판정 기준 설정에 참고가 되는 자료를 획득하는 것과 복합재

와 금속재 연소관의 충격에 대한 반응을 비교하는 것이 가장 큰 목적이었다.

사용된 추진제는 본질적으로 탄환충격시험 반응에 불리한 고 연소속도 추진제이지만, 소재 특성상 복합재 연소관의 경우 금속재에 비해 상대적으로 안전할 것으로 예상하였으나 두 경우 모두 Type III "Explosion"의 반응으로 나타났다.

앞으로 추진제에 고밀도 첨가제를 사용하여 바인더 부피 분율을 증가시킴으로써 기계적 물성을 향상시키고, 복합재 연소관의 최적화 및 내탄도 설계 수정 등의 방법을 통하여 탄환충격시험에서 추진기관의 반응정도를 둔감화 시킬 수 있는 연구가 필요하다.