예광제 조성이 연소 불꽃의 스펙트럼 및 광도에 미치는 영향

Effect of Tracer Composition on Spectrum and Intensity of Burning Flame

권 순 길* 황 준 식* 이 상 무*
Kwon, Soon-Kil Hwang, Jun-Sik Lee, Sang-Mu

ABSTRACT

Computer simulation was carried out to develop the tracer composition of a high performance to be able to be observed by not only the naked eye but also the thermal imaging system attached to the weapon system. The results of computer simulation show that the optimum Mg content among the trace compositions is about 40% and the formulation consisted of Viton A has a higher flame temperature compared with that of chloride compound. But the only use of Viton A radiates a yellow light and the composition adding a chloride compound radiates the red light. The light intensity of the tracer composition involving Viton A is higher than that of chloride compound. The tracer composition involving Viton A shows more clear images in case of all tests.

주요기술용어(주제어) : Tracer Composition(예광제 조성), Thermal Imaging System(열상관측장비), IR Radiation(적외선 방출), Red Light(적색광)

1. 서 론

통상적으로 예광제는 탄약 후미에 장착되어 추진제 연소 가스에 의해 점화되면 가시광선 영역의 밝은 빛을 내어 사수가 사격 방향을 조절하여 목표물에 빠르게 탄을 적중 시킬 수 있게 한다. 이러한 가시광선 방출형 예광제는 사람 눈에 잘 관측되는 적색 파장이 주로 사용된다[1].

한편 최근 개발되는 전차 및 장갑차는 예외 없이 열상 장비를 탑재하고 있다. 열상장비는 빛이 전혀 없는 상태에서도 표적과 배경이 방출하는 고유한 복사에너지차이(온도차이)를 검출하여 전기적 신호처리를 거친 뒤 영상화하는 장비이다. 이 장치는 표적의 고유한 적외선 영역 에너지 차이를 검출하므로 대기 중 빛의 유무와는 무관한 완전 수동형 장비로 무 월광 상태의 야간에도 관측 성능이 양호하기 때문에 주로 야간 감시 장비 또는 사통장비의 주, 야간 센서로 그 용도가 급격히 증대되고 있다[2].

이러한 열상 장비가 장착되어 있는 무기체계용 예광제는 가시광선만 방출하면 되었던 종래의 예광제 기능에 추가로 열상장비에 잘 관측되도록 적외선 방출량이 많아야 한다.

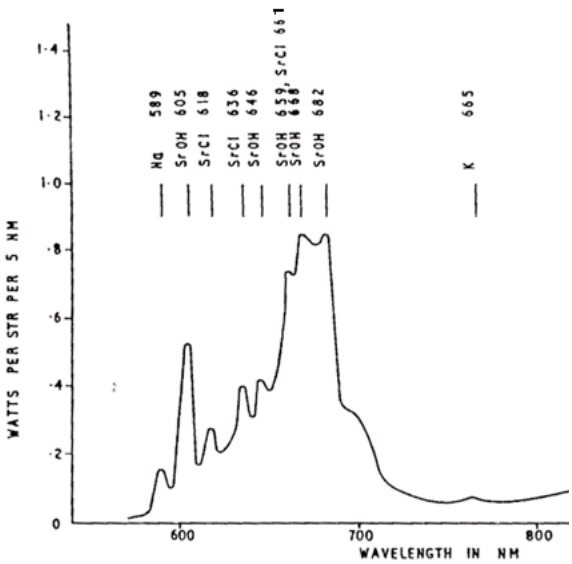
따라서 본 연구의 목적은 사람 눈에 잘 띠는 적색 파장이 방출되는 동시에 열상장비에 잘 관측 되도록 적외선 방출량이 높은 예광제 조성을 개발하는데 있다.

† 2006년 9월 13일 접수~2006년 11월 20일 게재승인
* 국방과학연구소(ADD) 기술-3부
주저자 이메일 : ksk@add.re.kr

가. 가시광선 방출이론

가시광선 방출형 예광제의 기본 조성은 산화제, 금속원료, 및 유기 연료를 함유하는 혼합물이다. 산화제는 strontium nitrate($Sr(NO_3)_2$, 이하 StNi)와 같이 산소함유 금속염을 말하며 산소는 금속 원료와 반응하여 발열 반응을 함으로 연소를 지속하게하고 금속원자는 색상을 내게 하는 기능을 한다. 유기연료는 일반적으로 염소(Cl) 등과 같은 환원 물질을 분자내에 가지고 있어 산화제의 금속과 반응하여 가시광선을 방출하는 생성물을 형성하는 기능을 한다. 또한 예광제가 적절한 연소 시간을 갖도록 반응 속도를 낮추는 기능도 한다[3].

산화제로 StNi, 금속원료로 마그네슘(Mg), 유기연료로 polyvinylchloride(이하 PVC)를 사용한 예광제 조성에서 가시광선 방출 원리를 살펴보면, StNi와 PVC가 반응하여 SrCl을 형성하며 이때 6200Å~6600Å 사이의 스펙트럼을 갖는 적색광을 방출한다. 만약 반응 속도를 낮추는 PVC가 없다면 StNi와 Mg가 격렬하게 결합하여 한 순간에 반응하여 MgO를 형성하며 백색광을 낼 것이다. 유기연료는 PVC와 같은 chloride 화합물이 주로 사용되었으나 최근에는 Viton A와 같은 fluoride화합물이 유기 연료로 사용되었다는 예가 종종 발견 된다[4].

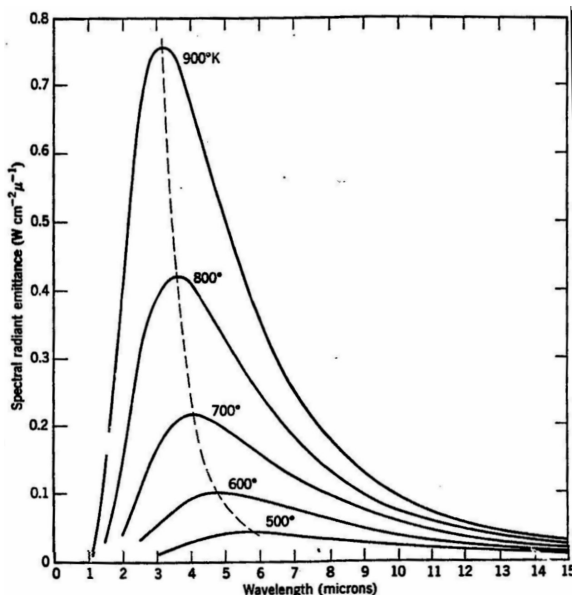


[그림 1] Strontium 화학물의 연소 스펙트럼[5]

그림 1은 strontium 산화제의 연소 스펙트럼을 보여 준다. Strontium이 염소를 함유하지 않은 물질과 반응할 경우에는 SrOH를 형성하여 6050, 6460, 6590, 6820 Å의 파장을 방출하고, 염소를 함유한 물질과 반응 할 경우에는 SrOH와 SrCl을 형성한다. 이때 SrCl은 6180, 6360, 6610Å의 파장을 방출한다[5]. 이상에서 살펴보았듯이 strontium 화학물 산화제의 반응 생성물은 모두 6100~7000Å범위의 적색파장의 빛을 방출하므로 적색 예광제용 산화제로 가장 많이 사용된다.

나. 적외선 방출 이론

모든 물체는 적외선이 나오고 있고 온도가 높으면 높을수록 방출되는 적외선 량이 많아진다. 이러한 이유 때문에 적외선을 열선이라 부른다. 그런데 모든 물체에서 동일한 적외선이 나오는 것은 아니다. 그림 2에 흑체((black body) 방사 강도를 온도에 따라 보였다. 온도가 올라가면 적외선이 나오는 파장의 최대값은 파장이 짧은 가시광선 쪽으로 이동하고, 이에 반해 온도가 낮을수록 파장의 최대값은 긴 파장 쪽으로 이동한다[6]. 그러나 어느 파장에서나 온도가 높아질수록 적외선 방출량 많아진다. 따라서 열상 관측



[그림 2] 온도에 따른 흑체의 방사 강도[6]

장비에 탐지가 용이하게 하기 위해서는 예광제 화염 온도를 높여 적외선 방출량을 많게 하여야 한다.

2. 예광제 조성 전산 모사

예광제 조성에 따른 특성 예측은 NASA Lewis 연구 센터의 컴퓨터 프로그램인 CEA(Chemical Equilibrium with Applications) 해석 하였다. 이 프로그램은 화학 평형 계산을 위해 free-energy 최소화 법을 사용하며 평형조건, 이상 상태 방정식에 따른다고 가정한 프로그램이다. 예광제 연소 해석 기법은 단열 조건이며 일정한 압력에서 연소한다고 가정한 'enthalpy and pressure problem'을 사용하였다.

고전적으로 사용되는 적색 예광제 조성인 PVC/Mg/StNi 조성과 최근 사용되기 시작하는 Viton A의 특성을 살펴보기 위하여 유기연료의 함량을 각각 8 %로 고정하고 Mg/StNi 비를 변화 시키며 특성 변화를 구하였다. 표 1은 모델링을 하기 위한 예광제 조성을, 표 2는 사용된 유기 연료의 특성을 각각 보였다.

그림 3에 단열 조건에서 Mg량에 따른 연소 불꽃의 화염 온도를 보였다. 유기 연료 PVC를 사용한 것보다 Viton A를 사용한 것이 화염 온도가 높았다.

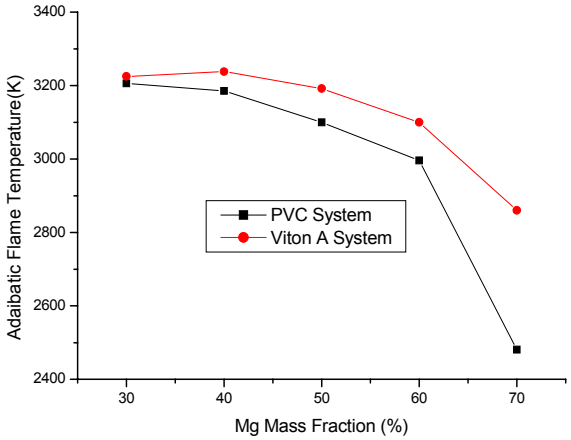
[표 1] 모델링을 위한 예광제 조성

PVC계	Viton A계
PVC : 8 % 고정	Viton A : 8 % 고정
Mg/StNi=30/62, 40/52, 50/42, 60/32, 70/22로 각각 변경	Mg/StNi=30/62, 40/52, 50/42, 60/32, 70/22로 각각 변경

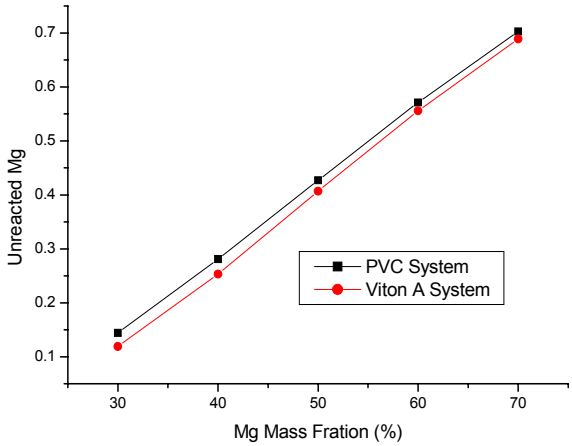
[표 2] 유기 연료 특성

구 분	분자식	ΔH_F(Kcal/mole)
PVC	C_2ClH_3	-22.49
Viton A	$C_{10}F_{13}H_7$	-665.40

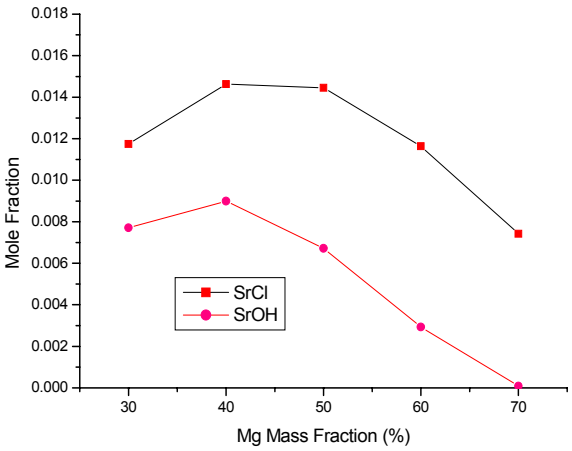
Viton A를 사용한 조성은 화염 온도가 높기 때문에 적외선 방출량이 많아 열상 관측에 유리한 조성이라는 것을 알 수 있다. 또한 PVC계에서는 마그네슘 함량을 증가 시키면 화염온도가 떨어졌지만 Viton A계에서는 화염온도가 마그네슘 함량 40% 근처에서 최대값을 보이고 이보다 마그네슘 함량을 증가 시키면 화염온도는 감소하였다. 이는 마그네슘을 많이 넣으면 상대적으로 산화제인 StNi 함량이 적게 되어 그림 4처럼 미연소 마그네슘의 량이 증가하기 때문이다. 마그네슘이 과다하게 들어간 예광제 조성에서는 예광제 연소 온도가 낮아 예광제 연소가 진행되지 못하고 불 꺼짐 현상이 발생할 수 있다.



[그림 3] Mg 함량에 따른 화염온도 변화(1atm)



[그림 4] 미 반응 마그네슘 함량 변화



[그림 5] 생성된 Strontium 화학물 함량 변화

표 1의 PVC를 원료로 하는 예광제 조성에서 Mg 함량에 따라 적색광을 방출하는 생성물인 SrOH와 SrCl의 생성량을 그림 5에 보였다. 마그네슘 함량이 40%인 예광제 조성에서 적색광을 방출하는 화학종의 생성량이 최대값을 보임을 알 수 있다. 따라서 이때의 예광제 조성이 적색광을 최대로 방출하는 최적의 조성으로 판단된다.

3. 실 험

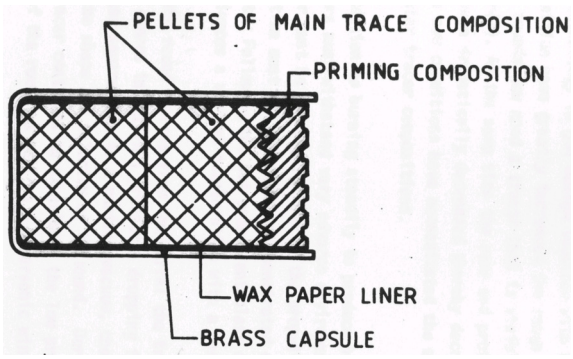
예광제 조성 전산 모사에서 유기 연료로 PVC와 같은 염소 화합물을 첨가 하는 것 보다 Viton A를 첨가하면 화염온도를 높일 수 있어 적외선 방출에 유리하다고 판단되었다. 따라서 무기 체계에 적용하기 위한 예광제 조성도 염소 화합물을 사용한 조성과 Viton A를 사용한 조성을 각각 시험 하였다. 표 3에 무기 체계에 적용한 예광제 조성을 보였다. TR-1은 현재 미군 탄약에서 사용되고 있는 예광제 조성이고 TR-2는 유기연료로 Viton A에 염화 고무를 첨가한 조성이다. Viton A만으로 예광제를 제조한 결과 황색의 연소 불꽃이 방출되어 염소 함유 연료인 염화고무를 첨가하여 적색 불꽃을 만들 수 있었다.

TR-1 조성의 예광제 제조는 분말 상태인 Mg(70 μm)와 시약급 StNi를 예비 혼합한 다음 액상의 유기 원료를 혼합하여 건조했다. 이에 반해 TR-2 예광제

[표 3] 무기체계 적용 예광제 조성

구 분	TR-1	TR-2
Mg	46	37
StNi	44	43
Dechlorane	5	-
염화고무	-	5
Viton A	-	6
VAAR(결합제)*	5	-
Shellac(결합제)	-	4
기타	-	5

* VAAR : Vinyl Alcohol Acetate Resin



[그림 6] 전형적인 예광제 조립체

조성은 마그네슘을 Viton A로 코팅하여 사용하였다.

예광제 컵에 라이너를 넣고 준비된 예광제 혼합물을 40,000~100,000psi로 충전하였다. 예광제 점화성 개선을 위해 점화제를 예광제 위에 놓고 유사한 압력으로 충전했다. 점화제는 산화물을 주성분으로 하고 칼슘 레진이 소량 첨가된 조성을 사용하였다. 본 시험에 사용된 것과 유사한 예광제 조립체를 그림 6에 보였다.

가. 예광제 정치 시험

환풍기가 설치되어 있는 야외 시험장에서 제조된 예광제 조립체를 고정하고 소량의 점화제 파우더를

예광제 조립체 위에 올려놓고 전기 squib를 사용하여 점화 하였다. 연소 시간 및 광도는 광도계(model : OL730D)를 사용하였고, 연소 불꽃의 spectrum은 spectrometer(model : USB4000)를 사용하여 측정하였다.

나. 예광제 발사 시험

본 연구에서 개발하는 예광제 조성을 적용하고자하는 탄은 40미리 날개 안정 철갑탄용 예광제로 기존 40미리 탄에 비해 탄속이 약 1.75배 정도 빨라 1.5 km 도달하는데 1.2초정도 밖에 소요되지 않고, 예광제 컵 직경이 연필 굵기 정도로 매우 작아 예광제 조성 개발에는 매우 불리한 조건을 가진 탄이었다.

탄이 비행할 때 예광제 광도 및 예광 관측 시간을 측정하기 위하여 40미리 강선포(L70)를 사용하여 발사 시험 하였다. 고정포 시험 에서는 육안 관측을, 무기체계에 탑재되어 있는 포에서 시험은 열상 장비로 예광제의 열상을 관측하였다.

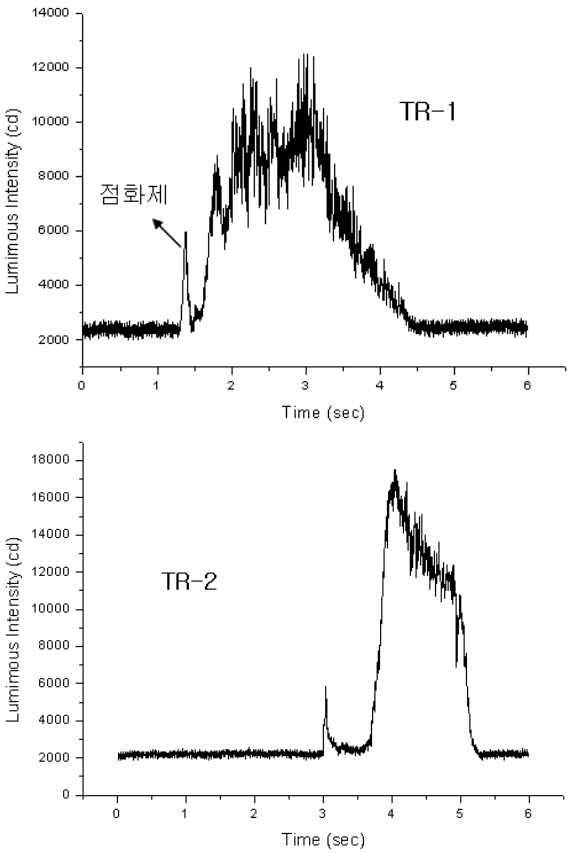
4. 결과 및 토론

가. 정치 시험 결과

그림 7에 TR-1과 TR-2의 광도와 연소 시간을 보였고 표 4에 요약된 결과를 보였다.

그림 7에 처음 나타난 피크(peak)는 예광제를 점화시키기 위해 예광제 컵위에 점화제 파우더를 올려놓고 점화시켰기 때문에 생긴 점화제 광도 peak 이다. 실제 예광제 연소에 의한 광도는 이 피크 뒤에 나타난 신호부터이다.

TR-1의 광도 값은 시간에 따라 요동(fluctuation)이 많았다. 전체 연소 시간은 2.85초, 충전 깊이를 연소 시간으로 나누어 구한 연소 속도는 1.77mm/sec, 평균광도는 6,000cd(candela) 정도였다. TR-2는 시간에 따라 광도값이 비교적 일정하였고 연소시간은 1.53초, 연소 속도는 2.32mm/sec, 평균 광도는 10,000cd 정도 이었다. TR-2의 연소 형태가 안정 되어 있는 것은 Viton A로 마그네슘을 코팅하여 사용하였으므로 마그네슘과 산화제의 반응이 균일했기 때문으로 생각된다. 예광제 조성에 따른 광도 시 험의 가장 큰



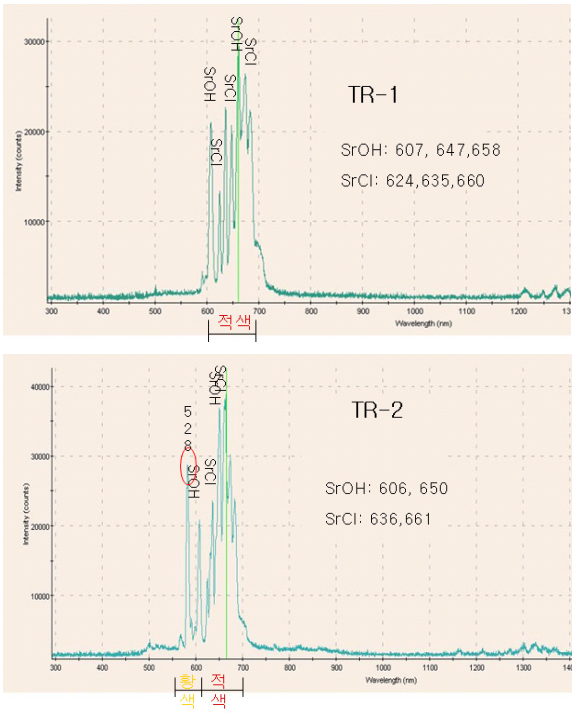
[그림 7] 예광제 광도 변화

[표 4] 광도 시험 결과 요약

구 분	TR-1	TR-2
연소시간(초)	2.85	1.53
연소속도(mm/s)	1.77	2.32
평균광도(cd)	6,000	10,000

특징은 TR-1보다 TR-2조성이 연소 속도가 빠르고 광도도 높다는 것이다.

그림 8에 TR-1과 TR-2의 연소 시 방출되는 빛의 spectrum을 보였다. TR-1은 SrOH를 형성함으로 생기는 607, 647, 658nm와 SrCl을 형성함으로 생기는 624, 635, 660nm의 파장을 방출하였다. 이 파장들은 모두 적색을 보이는 파장으로 TR-1조성은 적색광을



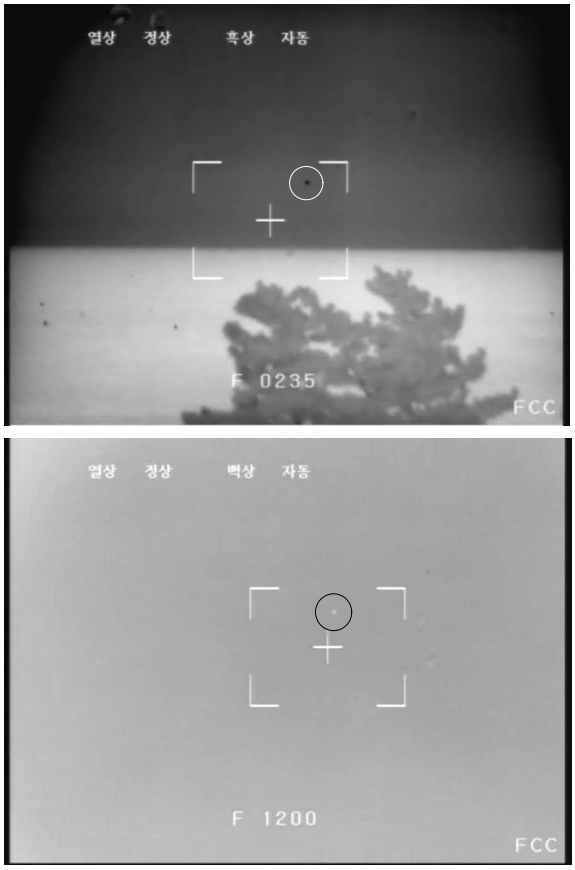
[그림 8] 예광제 spectrum

내는 트레이서용 예광제 조성으로 매우 우수함을 알 수 있다. TR-2의 spectrum은 SrOH와 SrCl의 고유 파장 이외에 황색을 띠는 528nm의 파장이 방출됨을 알 수 있다. 이 파장은 Viton A에 포함되어 있는 fluoride 성분이 반응하여 생긴 생성물 때문에 방출하는 것으로 생각된다.

나. 발사 시험 결과

TR-1과 TR-2의 연소 생성물의 spectrum만을 살펴보면 TR-1은 적색 파장으로만 이루어져 있고 TR-2는 황색 파장이 섞여 있어 spectrum 관점만으로는 TR-1이 더 선명하게 관측 되어야 한다. 그러나 실제 발사 시험에서 관측된 예광제 불빛은 TR-2가 TR-1보다 눈에 더 선명하게 보였다. 이는 TR-2의 연소 불꽃의 광도가 TR-1보다 훨씬 높기 때문이라고 판단된다.

무기 체계에 탑재되어 있는 열상 장비로 관측하였을 경우, TR-1은 일부 시험 조건에서 관측 되지 않았지만 TR-2 조성은 주, 야간, 고, 저온 환경 처리



[그림 9] 열상장비에서 관측 결과(TR-2)

시료 등 모든 시료에서 비교적 선명하게 관측 되었다. 그림 9에 TR-2 조성을 열상장비에서 관측한 결과를 보였다. 표적 조준점 상단에 위치하는 둥근원 속에 있는 예광제 불꽃은 흑상 혹은 백상 mode 모두에서 선명하게 보여 탄이 비행하는 궤적을 추적할 수 있었다.

5. 결 론

적색광 방출 광도가 높아 육안으로 관측이 쉽고 무기체계에 장착되어 있는 열상 장비에 선명하게 관측되는 조성의 예광제 개발을 위해 전산모사를 수행하였다. 전산 모사 결과는 Mg가 40% 정도가 최적 조성이고 Viton A를 연료로 사용할 경우 화염 온도

가 높아 적외선 방출에 유리한 것으로 판단되었다. 실제로 예광제를 제조하여 측정한 연소 spectrum은 Viton A만 사용하면 황색광이 방출되고 염소가 포함된 연료를 혼합하여 사용하였을 때 적색광을 방출 하였다. 예광제 광도를 측정한 결과에서는 염소 화합물만을 연료로 사용한 조성보다 Viton A를 첨가한 조성이 광도가 훨씬 높았다. 육안 관측 및 열상 장비로 관측한 발사 시험 결과도 Viton A를 첨가한 조성은 모든 시험 조건에서 관측이 용이 하였다.

참 고 문 헌

[1] TM(Technical Manual, 미국 군 기술교범), 9-1300-214/TO 11A-I-34.

[2] 홍석민, “전차 조준경용 열상 센서 기술”, TEDC-417-040061, 국방과학연구소 연구 보고서, p.7, 2004.

[3] B. M. Steven, “Development of Alternate 7.62 mm Tracer Formulations”, 93-12, SAA Report, 1993.

[4] P. Briere, “Improved Tracer Compositions for Small Arms Ammunition”, 11th Int. Pyrotech. Semi., pp.59~80, 1986.

[5] Izod, “Improved Red Tracer Flares”, Royal Armament Research and Development Establishment, Report, United Kingdom.

[6] J. M. Loyld, “Thermal Imaging System”, Plenum, London, 1975.