

## 추진제 저장수명에 미치는 활성탄소섬유의 영향

윤근식 · 이종찬

국방품질관리소

## The Effect of Activated Carbon Fiber on the Shelf Life of the Propellants

Yoon, Keun-sig · Lee, Jong-chan

Defense Quality Assurance Agency

### Abstract

As the propellants decompose, they release nitrogen oxides which reduce the shelf life of the propellants by accelerating decomposition rate.

The activated carbon fiber was used to extend the shelf life of the propellants that was stockpiled by the military. It is found that the activated carbon fiber adsorbs the nitrogen oxides which were produced by spontaneous reaction of the propellants. As a result, the activated carbon fiber extend the shelf life of the propellants by reducing decomposition rate of the propellants. If 20g of propellant store with 2g of activated carbon fiber, the shelf life of the propellants can be lengthened by 1.4 times.

## 1. 서론

추진제는 고유의 특성으로 인해 장기 저장시 자연분해가 일어나며, 이러한 추진제의 자연분해속도는 추진제의 주요 성분, 안정제의 종류 및 함량, 제조방법 및 저장온도, 습도 등의 조건에 따라 달라진다. 그리고 추진제의 자연분해로 발생하는 생성물이 반응의 촉매로 작용해 추진제의 분해속도를 가속시키는 특성이 있다. 따라서 추진제의 저장수명 향상을 위해서는 1차적인 자연분해반응 자체를 억제하는 방법과 분해반응 생성물을 제거하여 분해반응이 가속되는 것을 방지하는 방법을 생각해 볼 수 있다.

일반적으로 추진제의 잔류 안정제 함량이 저하되면 추진제의 급속한 분해반응으로 자연발화의 위험성이 증가할 뿐만 아니라, 수명연한이 조기에 도래하여 순기비용이 증가하게 된다 [1]. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 추진제의 저장수명 향상에 대한 연구가 필요하다. 특히 우리나라는 단기추진제의 생산을 계속하고 있으며, 국내 여러 곳에 장기간 저장해야 하는 실정이므로 저장수명 연장에 대한 연구의 필요성이 더욱 절실한 실정이다.

국내에서는 주로 제조 단계에서 적용할 수 있는 추진제의 저장수명 연장에 대한 연구가 진행되고 있으나 군에서 보유하고 있는 추진제에 대한 수명연장 방안에 대한 연구는 없는 실태이다. 따라서 본 연구에서는 활성탄소섬유(Activated Carbon Fiber; ACF)를 이용하여 단기추진제에서 발생하는 분해생성물을 흡착하여 추진제의 저장수명에 미치는 영향을 고찰하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 활성탄소섬유와 흡착

흡착이란 두개의 상이 접할 때 그 상을 구성하고 있는 성분 물질이 상의 경계면에 농축되는 현상을 말하는 것이다. 즉, 기체나 용액의 분자들이 고체의 표면에 달라붙는 현상을 말하는 것으로 용질이 두상의 경계면을 지나 다른 상으로 이동하는 흡수와는 구별되는 현상이다. 흡착에 사용되는 흡착재료는 표면적이 넓은 활성탄, 알루미나, 제올라이트 등이 많이 사용되어지고 있다. 최근에는 탄소재료를 이용한 흡착 연구도 활발하게 진행되고 있다. 한편, 활성탄소섬유는 원료물질의 종류에 따라 판, 레이온, 페놀, 피치계 등으로 분류되며, 구조적으로는 흑연과 유사하며, 기능적인 면에서는 제올라이트와 비슷한 성질을 지닌다. 또한 섬유라는 고유의 특성 때문에 사용되는 환경에 관계없이 광범위하게 사용할 수 있다.

활성탄소섬유에서의 흡착 현상은 흡착표면에 발달된 미세 기공 채움 효과에 의해 일어나며, 흡착되는 정도는 흡착제의 기공의 형태와 부피에 의해 결정된다. 이러한 활성탄소섬유의 표면

에 형성되는 기공구조는 원료가 되는 섬유물질의 구조적 균일성 및 함유된 무기성분의 양과 활성화시킬 때의 온도와 시간 등에 따라 많은 영향을 받게 된다. 활성탄소섬유의 특징은 20Å 이하의 미세 기공으로 이루어져 있고 단위체적당 외부 표면적이 크므로 많은 양을 흡착할 수 있는 우수한 흡착 특성을 지니고 있다는 것이다. 또한 섬유 형태이므로 가벼우면서 투과저항이 적어 펠트, 직물, 부직포, 시트형태 등으로 다양하게 제작이 가능하므로 취급이 용이하다. 또한 다성분계의 경우에도 선택적인 흡착능력이 뛰어난 뿐만 아니라 액상에서의 부유물질 같은 오염원이나 기상에서의 휘발성 유기성분, SOx, NOx와 같은 오염물질의 제거에 널리 쓰일 수 있다.

## 2.2 추진제 분해특성 및 안정제

추진제는 높은 화학적 에너지를 가지고 있는 물질로서 연소시 고온 고압의 가스가 발생하므로 정지해 있는 물체에 운동에너지를 부여하여 비행체를 목표지점까지 운반한다. 이 중 단기 추진제는 니트로셀룰로오스(Nitrocellulose; NC)를 주요 에너지원으로 하는 추진제로서 저장기간이 경과됨에 따라 자연분해된다. 이는 NC가 다른 에스테르 화합물과 마찬가지로 오랫동안 저장하면 수분, 직사광선, 열, 산성물질에 의해 자연분해되어 NO, NO<sub>2</sub> 등의 기체와 질산(HNO<sub>3</sub>)을 생성시키기 때문이다. 이러한 분해반응속도는 온도에 따라 달라지는데 20세기 초에는 분해생성물을 제거하여 자동 촉매반응을 억제시킨 조건에서 NC분해반응속도가 온도 증가에 따라 빨라지는 것이 증명되었다. 그 이후 NC분해반응의 반응속도상수 k를 계산하여 온도증가에 따라 분해속도가 증가함을 설명하였다[2].

NC의 분해로 야기되는 추진제의 자연분해는 그 변화를 근본적으로 방지할 수는 없으나, 분해생성물에 의한 자동촉매반응의 유도를 억제하면 분해반응의 가속을 지연시킬 수 있다. 그러므로 NC의 분해반응 생성물인 질소산화물을 제거하기 위하여 추진제 제조시 약염기성을 띤 안정제를 첨가하여 제조하고 있다.

안정제는 크게 유기안정제와 무기안정제로 나누어지는데 단기추진제에서는 일반적으로 유기안정제인 디페닐아민(Diphenylamine; DPA)이 사용된다. DPA는 약염기성의 유기물질로서 추진제 안정제로 사용시 DPA 한 분자는 NC에서 분해되는 질소산화물과 최대 6개까지 반응할 수 있어 추진제의 자연분해를 억제할 수 있다. 그리고 DPA는 금속과 반응하거나 산화될 경우 그 색상이 노란색에서 푸른색이나 검은색 등으로 변하므로 추진제의 안정제 역할뿐만 아니라 추진제 내에서 일어나는 산화반응 및 분해반응의 발생여부 및 그 정도를 알려주는 지시제의 역할도 하고 있다.

## 2.3 저장수명 추정

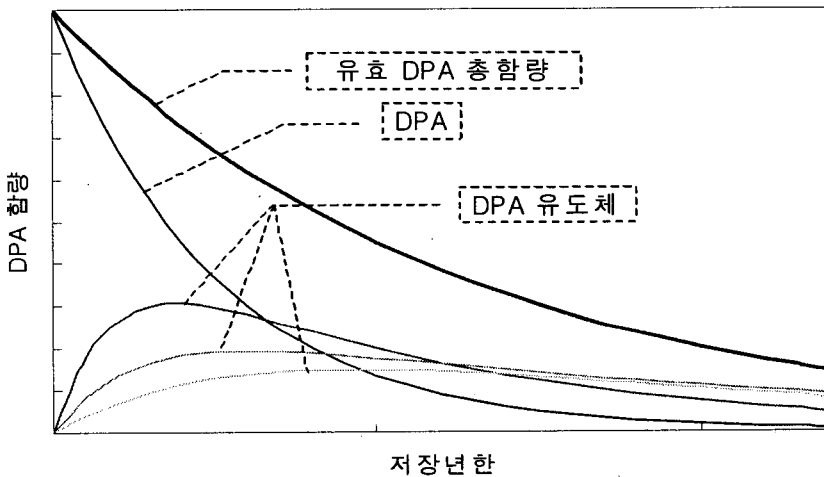
추진제는 저장 중 자연분해가 일어나는 특성을 가진 시효성 물질로서 심한 경우 자연발화가 일어날 수 있으므로 저장 중 안전을 확보하기 위하여 추진제저장안정성평가를 수행하고 있다. 현재 추진제저장안정성평가는 저장중인 추진제 시료를 샘플링하여 추진제 속의 유효 DPA 함

량을 기준으로 추진제의 저장수명한계 도래 여부를 판정하고 있으며, 잔여저장수명은 DPA 함량 감소속도로부터 추정한다. DPA 함량 감소속도는 DPA와 NO, NO2 등 질소산화물의 반응 속도 식에서 계산하게 되는데, 식 (1)에 나타내었다.

$$S = p_o \cdot e^{-kt} \text{ 또는 } \ln S = \ln p_o - kt \text{ ----- (1)}$$

- 여기서,  $S$  : 유효 DPA의 총량(%)
- $p_o$  : DPA의 초기 농도(%)
- $k$  : 반응속도상수( $\text{hr}^{-1}$  또는  $\text{day}^{-1}$ )
- $t$  : 시간( $\text{hr}$  또는  $\text{day}$ )

위 식으로부터 유효 DPA의 총량은 시간에 따라 감소하여 반응이 진행됨에 따라 감소속도는 <그림 1>과 같이 점차 느려진다.



<그림 1> DPA 및 DPA유도체의 함량 변화

한편, 식 (1)의 반응속도상수  $k$ 와 온도와의 관계에 대하여 Arrhenius는 식 (2)와 같이 제시하였다.

$$k = k_0 \cdot e^{-E_a/RT} \quad \text{또는} \quad \ln k = \ln k_0 - E_a/RT \quad (2)$$

여기서,  $k$  : 반응속도상수( $\text{day}^{-1}$ )

$k_0$  : 반응속도최빈수( $\text{day}^{-1}$ )

$E_a$  : 활성화에너지( $\text{cal/mol}$ )

$R$  : 기체상수( $1.987\text{cal/mol} \cdot \text{K}$ )

$T$  : 절대온도(K)

이 Arrhenius식은 반응이 진행되기 위한 최소 에너지 이상의 에너지를 갖는 분자가 많을수록 반응속도가 증가하며, 낮은 온도보다 높은 온도에서 활성화에너지 이상의 분자수가 많게 되어 반응온도가 증가할수록 반응속도가 빨라짐을 의미한다.

추진제의 저장성은 추진제의 제조에 사용되는 원료의 종류나 함량, 공정의 조건 등에 따라 결정되는 제품특성과 저장조건에 따라 영향을 받게 된다. NC의 분해반응에 대한 연구 자료에 의하면, NC는 반응온도가  $20^\circ\text{C}$ 에서  $30^\circ\text{C}$ 로 상승할 경우 그 반응속도는 3.45배 증가한다 [3]. 따라서 추진제 제조시 고온에 노출될 경우, 분해반응이 활발해져 노화가 일어나고 저장수명에 영향을 미치게 된다. 그리고 NC를 주요성분으로 하여 제조된 추진제의 경우에도 저장수명은  $10^\circ\text{C}$  증가할 때마다 약 2~6배 감소하는 것으로 알려져 있다 [5]. 이와 같이 저장온도  $10^\circ\text{C}$  증가 시 감소하는 저장수명에 영향을 주는 변수를 상수  $\gamma$ 라고 하며, 이때  $\gamma$ 는 추진제의 종류에 따라 변한다.

본 연구에서는 식 (3)과 같이  $10^\circ\text{C}$ 단위의 온도차의 수만큼  $\gamma$ 의  $\alpha$ 승으로 하여  $65^\circ\text{C}$ 에서의 가속수명을  $25^\circ\text{C}$ 의 저장수명으로 환산하여 추진제의 저장수명을 추정하였다. 즉  $65^\circ\text{C}$ 에서  $25^\circ\text{C}$ 로의 저장수명은 상수  $\gamma$ 의 4승으로 하고, 이때 상수  $\gamma$ 는 저장수명 예측의 오차를 감소시키며 일반적으로 단기추진제에 사용하는 상수 3을 사용하였다. 이러한 방법을 이용하여 상온에서의 추진제의 저장수명을 계산하면  $65^\circ\text{C}$ 에서의 가속수명의 34(81배)가 된다 [5].

$$Y_n = g^\alpha Y_s \quad (3)$$

여기서,  $Y_n$  : 저장수명(day)

$Y_s$  : 가속수명(day)

$g$  : 상수  $\gamma$ , 추진제 특성에 따른 추정값 (2 ~ 6 또는 6 이상)

$\alpha$  :  $10^\circ\text{C}$  단위의 온도차의 수

### 3. 실험

군에서 저장중인 추진제와 피치계 활성탄소섬유를 사용하였다. 추진제는 NC를 주요성분으로 하여 제조된 단기추진제로 81, 87, 91년에 제조된 것들로서 세부 조성은 <표 1>과 같다. 활성탄소섬유는 피치계로서 세부 물성은 <표 2>와 같다.

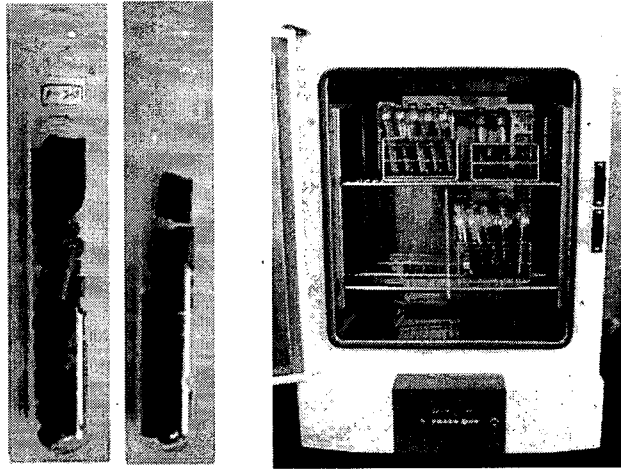
<표 1> 추진제 세부 조성

Components	Content (wt%)	Notice
Nitrocellulose (NC)	85	
Dinitrotoluene (DNT)	8 ~ 12	
Dibuthylphthalate (DBP)	4 ~ 6	
Diphenylamine (DPA)	0.42, 0.53, 0.88	81, 87, 91년
Potassium sulfate (K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	0.7 ~ 1.3	

<표 2> 활성탄소섬유의 물성

Property	Value
Fiber Diameter (μm)	8 ~ 10
Specific Surface area (m <sup>2</sup> /g)	1,000 ~ 2,500
Pore Volume (ml/g)	0.2 ~ 1.2
Pore SIZE (Å)	1.6 ~ 22

추진제의 저장수명을 예측하기 위하여 65℃에서 수명시험을 수행하였다. 실험은 제조년도가 다른 3개의 추진제 시료 각 20g에 대하여 활성탄소섬유 0.2g을 넣은 것과 넣지 않은 것으로 구분하여 비교하였다. <그림 2>는 추진제 20g에 활성탄소섬유를 넣은 것과 넣지 않은 시험관과 환경시험장비를 나타낸다. 노화시키는 동안 외부의 영향을 최소화하기 위하여 추진제를 시험관에 넣어 시험관을 막은 상태로 시험을 수행하였다. 저장성 변화를 관찰하기 위하여 14일 주기로 안정제 함량을 분석하였고, 활성탄소섬유와 추진제의 질량을 측정하여 고온노화에 따른 시료의 변화를 관찰하였다. 안정제 함량의 측정은 HPLC(Waters Symmetry C18 5 μm, 4.6×150mm) 및 UV-VIS Spectrometer(HP 8453, 285nm)를 사용하였다.

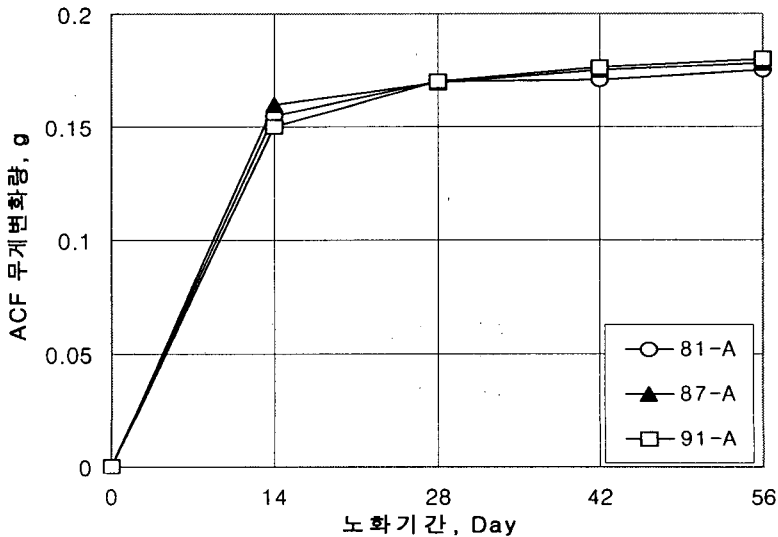


<그림 2> 노화용 시료 및 환경시험장비

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 활성탄소섬유의 질량 변화

활성탄소섬유가 추진제의 저장성에 미치는 영향을 확인하고자 노화기간에 따른 활성탄소섬유의 질량변화를 측정하였으며 결과를 <그림 3>에 나타내었다.



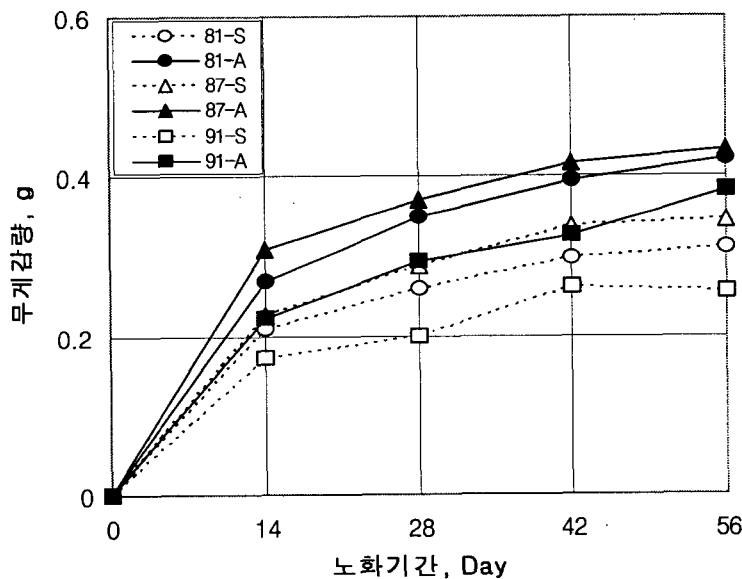
<그림 3> 활성탄소섬유의 질량변화

그림에서 보는 바와 같이 추진제를 노화시키는 동안 활성탄소섬유의 질량이 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 실험결과로부터 활성탄소섬유를 추진제와 같이 고온 노화시킬 경우, 활성탄소섬유가 추진제에서 발생하는 기체성분들을 흡착하고 있음을 알 수 있다. 이 때 흡착되는 기체물질은 추진제의 제조공정에서 각 성분을 혼합하기 위해 사용하는 용매 중 제거하지 못한 일부분과 추진제의 주요성분인 NC가 분해되면서 발생하는 NO<sub>x</sub>가 있다. 이 중 NO<sub>x</sub>는 추진제의 자연분해를 가속시키는 역할을 하는데 활성탄소섬유가 흡착하여 제거함으로써 추진제의 저장수명을 연장할 수 있다.

추진제의 안정제 함량 변화에 따른 활성탄소섬유의 흡착능의 변화는 관찰되지 않았다. 활성탄소섬유에 의한 흡착은 초기 단계에서 빠른 속도로 일어나고 약 14일이 기점으로 속도가 둔화됨을 알 수 있다. 활성탄소섬유의 최대흡착량은 0.182g으로 활성탄소섬유 질량의 약 9%정도임을 알 수 있다. 일반적으로 활성탄소섬유는 온도가 낮아지면 흡착량이 증가하므로 실험온도인 65℃보다 낮은 실제 적용환경인 상온에서는 활성탄소섬유의 흡착능력은 좋아지게 될 것이다.

#### 4.2 추진제의 질량 변화

추진제를 65℃에서 56일간 노화시키면서 14일 간격으로 추진제의 질량을 측정하였다. <그림 4>는 노화에 따른 추진제의 질량 변화량을 나타낸 것으로 실선으로 표시된 것(-A)은 활성탄소섬유를 사용한 것이고, 점선으로 표시된 것(-S)은 활성탄소섬유 없이 수명시험을 진행한 것이다.



<그림 4> 추진제 질량 변화량

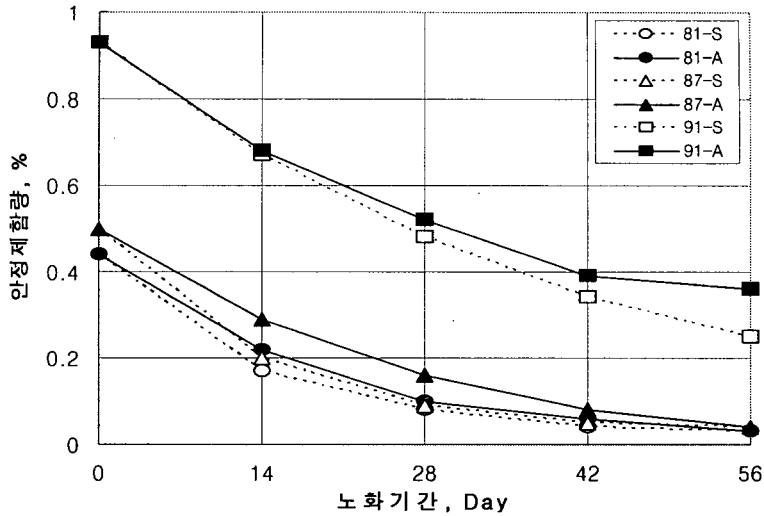


모든 추진제 시료에서 활성탄소섬유를 사용한 경우에 추진제의 무게가 많이 감소함을 관찰할 수 있다. 활성탄소섬유를 적용한 경우 추진제의 감량이 큰 것은 추진제에서 발생하는 물질을 활성탄소섬유가 흡착하여 추진제 입자 내에 잔류하는 물질을 최소화한데 기인한 것으로 판단된다. 한편, 추진제에서 감소한 질량과 활성탄소섬유가 흡착한 질량을 비교해보면 추진제에서 빠져나온 물질 중 일부만 활성탄소섬유에 흡착된 것을 알 수 있다. 즉, 추진제에서 빠져나온 물질 중 일부는 시험관내의 공간에 존재하고 공기 중으로 확산되고 이중 일부만 활성탄소섬유에 흡착되었음을 알 수 있다.

### 4.3 안정제 함량의 변화

추진제의 저장수명에 미치는 영향을 파악하기 위하여 추진제의 성분 중 하나인 안정제의 함량을 14일 주기로 4회 측정하였다. 그 결과를 <그림 5>에 나타내었다. 그림에서 안정제 함량은 고온노화가 진행됨에 따라 감소하고 있다.

활성탄소섬유 적용여부(A:적용, S:미적용)에 따라 안정제 함량의 감소속도가 서로 다르게 나타나고 있다. 활성탄소섬유를 적용한 경우에 전 노화기간 동안 안정제 함량이 높게 유지되고 있다. 이러한 결과에서 활성탄소섬유가 추진제의 저장수명을 연장하는 효과가 있음을 알 수 있다. 이는 활성탄소섬유가 추진제의 자연분해반응을 가속시키는 것으로 알려진 NO, NO<sub>2</sub> 등의 기체를 흡착해서 제거하였기 때문이다. NO, NO<sub>2</sub> 등 기체의 흡착은 기체와 활성탄소섬유의 표면 간에 작용하는 물리적 인력에 의한 물리흡착 형태 또는 액체형태로 미세기공 내에 존재하는 미세기공 채움 형태이다[4]. 이러한 형태의 흡착은 온도가 높아질수록 흡착능력이 저하되게 된다. 실험을 수행한 온도가 65℃로서 흡착능력이 저하될 수 있는 높은 온도임에도 불구하고 활성탄소섬유가 추진제의 저장수명을 연장되는 것으로 확인되었으므로 실제 추진제를 저장하는 상온에서는 더욱 효과적일 것으로 판단된다.



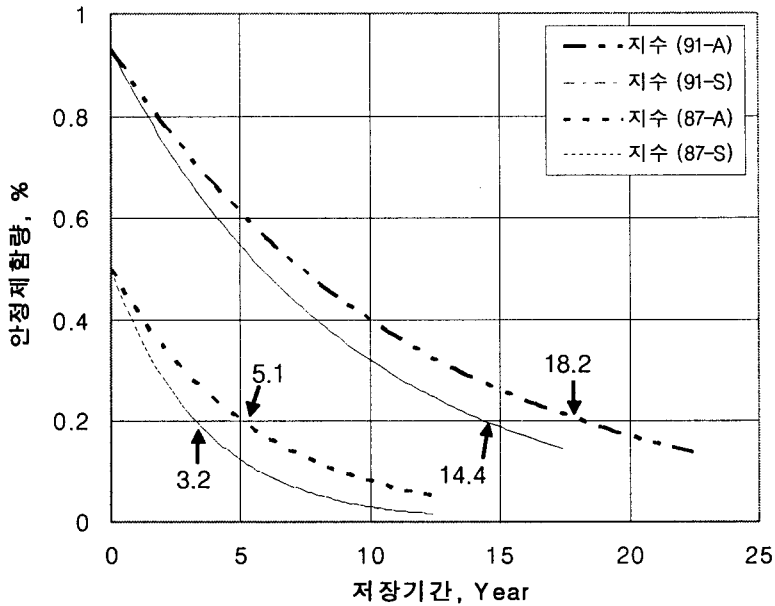
<그림 5> 안정제 함량 측정 결과

한편, 초기 안정제 함량이 높은 경우에는 노화일수가 길어질수록 활성탄소섭유의 효과에 의하여 안정제 함량이 계속 높게 유지되고 그 차이가 계속 커지고 있다. 이와 달리 초기의 안정제 함량이 0.45% 정도로 낮을 경우에는 고온노화에 의해 안정제의 함량이 0.2~0.3%로 감소하는 시점까지는 활성탄소섭유의 안정화 효과에 의하여 안정제 함량의 차이가 증가하다가 그 이후부터는 그 차이가 감소하고 있다. 이는 추진제가 고온에서 노화되면서 안정제 함량이 0.2% 미만으로 저하되면 반응에 관여하는 안정제의 농도가 낮아져 반응속도가 저하되기 때문이다.

활성탄소섭유가 추진제의 저장수명을 연장시키는 효과가 있음을 확인할 수 있었으며 추진제의 안정제 함량에 관계없이 정도의 차이는 있으나 추진제의 저장수명에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 특히, 추진제를 계속 저장가능한 수준인 안정제 함량 0.3%까지는 활성탄소섭유가 효과적으로 저장수명을 연장하는 것을 확인하였다.

#### 4.4 저장수명 추정

앞에서 살펴본 바와 같이 추진제의 저장수명은 온도가 올라갈수록 떨어지게 된다. 따라서 고온에서 수행한 안정제 함량 측정결과를 이용하여 상온 저장 시 추진제의 저장수명을 추정할 수 있다[5,6]. 식 (3)을 이용하여 추진제의 저장수명을 계산하여 그래프로 도시하면 <그림 6>과 같다. <표 3>은 추진제 저장기간에 따른 안정제 함량 추정식을 나타낸 것이다.



<그림 6> 추진제 저장수명 예측

<그림 6>에서 노화초기 안정제의 함량이 높고 낮음에 관계없이 노화기간이 길어짐에 따라 ACF를 사용한 경우 안정제 함량의 감소속도가 늦음을 알 수 있다. 추진제를 저장할 수 있는 최소한의 안정제 함량인 0.2%를 기준으로 할 때 저장수명을 구해보면 초기의 안정제 함량이 높은 경우에는 14.4년에서 18.2년으로 증가하고, 초기의 안정제 함량이 0.5%정도로 낮은 경우에도 3.2년에서 5.1년으로 증가하는 것을 알 수 있다.

<표 3> 추진제 저장기간에 따른 안정제 함량 추정식

구분	추정식	R <sup>2</sup>
81-A	$y = 0.44e^{-0.2354x}$	0.9983
81-S	$y = 0.44e^{-0.2807x}$	0.9947
87-A	$y = 0.50e^{-0.1818x}$	0.9992
87-S	$y = 0.50e^{-0.2798x}$	0.9981
91-A	$y = 0.93e^{-0.0845x}$	0.9636
91-S	$y = 0.93e^{-0.1065x}$	0.9997

## 5. 결 론

추진제의 저장수명에 활성탄소섬유가 미치는 영향을 연구하기 위하여 단기추진제를 고온에서 노화시키면서 안정제의 함량, 추진제의 질량 및 활성탄소섬유의 질량을 주기적으로 확인하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 단기추진제를 고온에서 노화시키면 추진제의 질량이 지속적으로 감소함을 알 수 있었다. 이는 추진제가 고온에 노출되면 추진제 속에 잔류하고 있는 휘발성 물질이 빠져 나가고, 추진제의 주요성분의 하나인 NC에서 NO, NO<sub>2</sub> 가 분해되어 기상으로 빠져 나오기 때문으로 판단된다.
- 2) 활성탄소섬유는 고온노화가 진행됨에 따라 질량이 서서히 증가하는 경향을 보이고 일정한 질량에 수렴하였다. 활성탄소섬유의 질량이 증가하는 것은 추진제에서 빠져나오는 휘발성 물질과 NO, NO<sub>2</sub> 등을 흡착하기 때문이며, 활성탄소섬유가 흡착할 수 있는 용량이 제한적이기 때문에 일정한 값에 수렴하였다.
- 3) 노화기간이 증가함에 따라 안정제의 함량은 감소하는데 지수함수 형태를 띠고 있었다. 이는 질소산화물과 안정제의 반응메커니즘에서 밝혀진 바와 같았다. 그리고 활성탄소섬유를 추진제와 같이 노화시킨 경우 안정제 함량의 감소 폭이 작은 것으로 나타나 활성탄소섬유가 추진제의 저장수명을 연장하는 효과가 있는 것으로 확인되었다.

연구 결과를 종합해보면 활성탄소섬유가 추진제에서 발생하는 질소산화물을 흡착하여 추진제의 자연분해를 지연시켜 추진제의 저장수명을 연장하는 것으로 판단된다. 그리고 추진제를 활성탄소섬유를 같이 저장함으로써 저장수명을 약 1.4배 연장할 수 있는 것으로 예측되었다. 또한 실험온도보다 낮은 상온에서는 흡착성능이 고온에서 보다 더 좋아지므로 일반적인 추진제 저장조건에서 활성탄소섬유를 이용하면 추진제의 저장수명 연장효과는 더욱 증가할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 65℃에서 추진제 수명시험을 통해 활성탄소섬유의 적용여부에 따른 추진제의 저장수명을 예측 비교하였다. 향후에는 보다 낮은 온도에서 추진제의 저장수명에 미치는 활성탄소섬유의 영향과 반응속도상수와 온도와의 관계를 파악하여 추진제의 저장안정성에 대한 신뢰성을 향상시키는 노력이 필요하겠다.

## 참고문헌

- [1] U.S. Army Defence Ammunition Center(2003), "Propellant Management Guide", Logistics Review and Technical Assistance Office
- [2] V. Lindner(1978), "Explosives-propellants Theory and Practice", U.S. Army Armament Research & Development Commands
- [3] Jean Quinchon, Jean Transcahant(1986), "NitroCellulose", ELLIS HORWOOD
- [4] S. J. Gregg, K. S. Sing(1982), "Adsorption, Surface Area and Porosity", Academic Press, Inc.
- [5] Technical Report ARAED-TR-96019(1996), Establishment of Safe Interval Prediction and a modified Time-to-Fume test
- [6] Wong Fun Ark, Dudley Roberston(1993), "Treatment of accelerated aging data using first order reaction equation", CPIA