Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 21, No. 7 pp. 82-89, 2020

https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.7.82
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

Zr/Ni계 지연제의 주변 온도에 따른 연소속도 변화 연구

김호섭[1*], 임호영[1], 강요한[1], 김도현[2], 이근우[2]
[1]국방기술품질원, [2](주)한화

A Study on the Change of Burning Rate of Zirconium-Nickel Delay Elements Depending on the Ambient Temperature

Ho-Sub Kim[1*], Ho Young Lim[1], Yo Han Kang[1], Do Hyun Kim[2], Geun Woo Lee[2]
[1]Defense Agency for Technology and Quality
[2]Hanwha Corporation

요 약 탄약내의 화약류 특히, 지연제의 지연시간에 대한 온도의 영향은 우리나라와 같이 연평균 최고최저 온도차가 뚜렷한 환경에서 충분히 존재할 수 있음에도 불구하고 이와 관련한 연구는 아직까지 국내에 보고된 바가 없다. 이에 본 연구는 우리나라 탄약류에 주로 사용되는 Zr/Ni계 지연제에 대해 주변 온도에 따른 연소속도 변화를 실험적으로 확인하였다. 이를 위해, K413 수류탄용 K414 신관에 Zr/Ni계 지연제를 충전하고 우리나라 기상환경을 고려한 주변 온도 구간(-40 ℃ ~ 50 ℃)에서 온도변화에 따른 K414 신관의 지연시간 변화를 확인 및 분석하였다. K414 신관의 지연시간은 상기 시험 온도구간 내에서 시험온도를 10 ℃ 씩 변화시켜가며 측정하였고, 측정된 지연시간은 Zr/Ni계 지연제 충전 시에 기록한 지연제의 높이를 이용하여 연소속도로 환산되었다. 시험결과, Zr/Ni계 지연제의 지연시간은 주변 온도가 증가함에 따라 선형적으로 감소하는 경향이 있으며, Zr/Ni계 지연제 온도가 1 ℃ 상승할 때 마다 지연시간이 4.18 ms 감소하고, 연소속도는 2.73 mm/ms 로 빨라진 것으로 분석되었다. 즉, 연평균 최고최저 온도차이가 20 ℃ 이상인 주변 온도 환경에서는 약 80 ms 의 지연시간 차이가 발생하므로, Zr/Ni계 지연제의 시험평가 기준수립 시, 지연제가 노출된 주변 온도 조건을 반영한 지연시간이 고려되어야 할 것으로 사료된다.

Abstract Among the explosives in ammunition, the delay elements, which are used as a retardant, could be influenced by the ambient temperature in the Republic of Korea, where the highest and lowest average annual temperature difference is clear. On the other hand, there has been no domestic research on this. This study examined the linear burning rates of the zirconium-nickel delay elements depending on the ambient temperature in South Korea. The ambient temperature data of South Korea were obtained from the meteorological administration, which was used to set the experimental conditions. The operational time for the K414 fuze was measured by changing the ambient temperature by 10 ℃ from -40 ℃ to 50 ℃. To convert the delay time into the burning rates, the height of the delay element in the K414 fuze body was used. The results indicated that the characteristics of the burning rates for the zirconium-nickel delay element could be estimated as linear, and both the burning rates and the delay time of the zirconium-nickel delay element were 2.73mm/ms and -4.18ms, respectively. This led to an approximately 80 ms delay time difference in the environment where the highest and lowest average annual temperature difference was above 20 ℃. Therefore, the delay time reflecting the ambient temperature should be considered when the test evaluation criteria of zirconium-nickel delay elements are established.

Keywords : Delay Elements, Delay Time, Burning Rates, Zirconium-Nickel Alloy, Pyrotechnics

*Corresponding Author : Ho-Sub Kim(Defense Agency for Technology and Quality)
email: kimhosub@dtaq.re.kr
Received May 26, 2020 Revised June 19, 2020
Accepted July 3, 2020 Published July 31, 2020

1. 서론

지연제(delay elements)는 폭발 계열(explosive train)에 관여하여 시간적 지연을 제공하는 화학적 타이머(chemical timers)이다[1]. 지연제는 연료(fuel)와 산화제(oxidizer)로 구성되는데 Tungsten계, Zirconium-Nickel계, Chromium계 등 연료의 종류에 따라 구분할 수 있다. 이러한 화학적 지연제는 값이 저렴하고 구조가 간단하여 항력감소탄, 박격포탄, 연막탄 등과 같이 일반 탄약 적용에 이점이 있다[2]. 한편, 우리나라에서 사용하고 있는 K413 수류탄용 K414 신관과, 60MM 또는 81MM 박격포탄용 K510 신관 등에는 Zirconium-Nickel계(이하 Zr/Ni계) 지연제가 사용된다.

일반적으로 폭발 계열은 뇌관의 Lead Azide, Lead Styphnate 등과 같이 민감한(sensitive) 화약의 작고 약한 폭발로 시작하여 TNT, RDX 등과 같이 상대적으로 둔감한(insensitive) 화약의 크고 강한 폭발의 순서로 진행되며, 이러한 과정은 매우 짧은 시간에 연속적으로 일어난다[3,4]. 이 폭발 계열 내 지연제가 관여하게 되면, 지연제가 연소하는 중에는 연속적인 폭발이 일어날 수 없고 지연제가 연소하는 일정시간 동안 폭발 계열의 작동은 멈추는 것과 같다[5]. 이 시간을 지연시간(또는 지연초시, delay time)이라고 한다. 이 시간이 필요한 이유는 다음과 같다. 예를 들어, 수류탄 사용자는 폭발계열이 중단되는 이 지연시간 동안 투척한 수류탄으로부터 엄폐할 수 있는 시간을 가지며 수류탄이 폭발하여야하는 목적지까지 비행하는 시간을 갖도록 한다. 또한 박격포탄용 신관의 경우 박격포탄이 포구로부터 떠나 특정거리에 도달하기까지 폭발계열의 진행을 중단시켜 고폭화약이 점화되지 못하도록 하여, 사격자의 안전이 확보된다. 즉, Fig. 1에서 보는 바와 같이 사용자가 탄약을 사용한 직후 지연제의 지연시간으로 인하여 폭발계열을 진행하지 못하도록 일정시간 중단시켜 사용자의 안전이 확보되는 것이다[6]. 그러므로 지연제의 지연시간이 불규칙적이고 예측이 불가하면 사용자의 안전이 확보가 어려워 지연시간은 매우 균일하여야 할 뿐만 아니라 높은 신뢰도를 필요로 한다.

지연시간을 결정하는 대부분의 요소는 지연제가 생산되는 중에 결정된다. 그러나 지연제 주변 환경온도에 따른 지연시간 변화의 경우 탄약의 사용 환경에 따라 언제나 변화될 수 있다[7-9]. 특히 우리나라와 같이 사계절이 뚜렷하여 연평균 최고최저 온도차가 상당한 때에는 탄약의 주변온도(ambient temperature)에 따른 지연시간

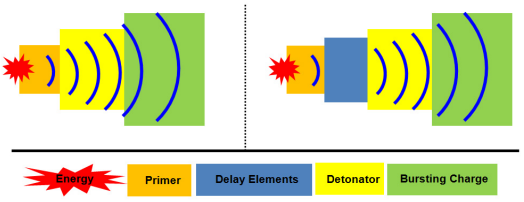


Fig. 1. The schematic drawing of the explosive trains

의 변화가 충분히 발생될 것으로 예상되는데, 그럼에도 불구하고 우리나라에서는 아직까지 온도에 따른 지연시간 변화에 대해 연구된 바가 없다.

따라서, 본 연구는 우리나라 탄약류에 주로 사용되는 Zr/Ni계 지연제에 대해 주변온도에 따른 지연시간 변화를 연구하였다. 이를 위해, K413수류탄용 K414신관에 지연제를 충전하고 우리나라 기온특성을 고려하여 -40 ℃ ~ 50 ℃ 구간을 사용 환경온도로 가정하였으며, 해당 온도구간에서 주변온도를 변화시켜가며 지연시간을 측정하였다. 이 결과를 바탕으로, Zr/Ni계 지연제의 온도환경에 따른 연소속도 변화를 정량적 도출하였으며 실험결과에 대한 고찰을 기술하였다.

2. 이론적 배경

2.1 지연제의 종류

지연제는 연료와 산화제로 구성되며 연료의 종류에 따라 Blackpowder, Tungsten계, Zirconium-Nickel계 등 Table 1과 같이 분류된다[10,11]. 또한, 지연제는 연소 중 발생되는 기체상(gas phase) 생성물의 부피에 따라 Gassy Delays와 Gasless Delays로 나뉠 수 있다. Gasless Delays는 지연제 1 g 당 10 mL보다 작은 양의 기체상 생성물을 발생시키며, 이보다 큰 경우 Gassy Delays라고 한다. 현대 무기체계의 경우 지연제의 지연시간에 대해 높은 수준의 신뢰도와 재현가능성이 요구됨에 따라 Gasless Delays가 선호되고 있는 추세이다[12].

2.2 지연제 연소특성

2.2.1 지연제의 연소속도

지연제의 연소특성은 연소속도(burning rates)로 대표된다. 연소속도는 mass burning rates, linear burning rates 로 표현될 수 있고, 단위는 각각 gram/second, cm/second 와 같다.

Table 1. Examples of delay elements corresponding composition and effect

Pyrotechnic composition	Effect	Note
Blackpowder	Gassy	-
Tetranitrocarbazole, Potassium Nitrate	Gassy	-
Boron, Silicon, Potassium Dichromate	Gasless	T-10 delay
Boron, Lead Peroxide	Gasless	-
Boron, Barium Chromate	Gasless	-
Boron, Barium Chromate, Cromic Oxide	Gasless	-
Tungsten, Barium Chromate, Potassium Perchlorate	Gasless	Tungsten delay
Manganese, Lead Chromate, Barium Chromate	Gasless	Manganese delay
Molybdenum, Barium Chromate, Potassium Perchlorate	Gasless	-
Chromium, Barium Chromate, Potassium Perchlorate	Gasless	Chromium delay
Selenium, Barium Peroxide	Gasless	-
Zirconium, Ferric Oxide	Gasless	-
Zirconium, Lead dioxide	Gasless	-
Zirconium, Titanium, Ferric Oxide	Gasless	-
Zirconium-Nickel, Barium Chromate, Potassium Perchlorate	Gasless	Zirconium-Nickel delay

지연제의 연소속도에 따라 적용되는 탄종이 다르다. 예를 들어, 연소속도가 1 mm/ms 보다 큰 경우 탄두류(projectiles), 1 ~ 6 mm/s 의 연소속도일 경우 주로 연막 수류탄(smoke grenades), 최루탄(tear pots) 등 지상화학무기(ground chemical munitions)에 사용된다. 연소속도가 25 ~ 1000 mm/ms 일 경우 채석장 등에서 군사적 목적 이외로 사용된다[13]. 지연제 구성성분에 따른 연소속도는 Table 2에서 보는 바와 같다[14].

Table 2. Burning rate of delay elements

Composition	Ratio (Weight)	Bruning rate (cm/s)
Silicon : Red lead oxide : (Nitrocellulose)	15 : 85 : (1.8)	1.7
Boron : Barium chromate	5 : 95 10 : 90	1.7 4.2
Manganese : Lead chromate : Barium chromate	55 : 45 : 0 37 : 33 : 30 33 : 37 : 30	1.17 0.15 0.30
Zirconium-Nickel alloy : Barium chromate : Potassium perchlorate	17 : 80 : 3	0.16
Tungsten : Barium chromate : Potassium perchlorate	50 : 40 : 10 20 : 70 : 10	0.20 0.06
Zirconium : Lead peroxide	72 : 28	less than 5.08

K. L. Kosanke 등이 연구한 바에 따르면 지연제의 연소속도는 Table 3에서 보는 바와 같이 화학적 영향, 물리적 영향, 또는 화학적·물리적 영향이 복합적으로 작용하여 조절될 수 있고, 지연시간은 연료와 산화제의 종류, 연료와 산화제의 혼합 비율, 지연제의 입자크기와 형상, 지연제 주변 환경온도, 지연제가 충전되어 있는 형상(크기, 높이) 등에 의해 결정된다[15,16]. 지연시간을 결정하는 대부분의 요소는 지연제가 생산되는 중에 결정되므로, 지연제의 원료와 생산 공정에 품질문제가 없다면 생산자가 기대하는 만큼 지연시간이 균일하여야 한다. 그러나 지연시간에 영향을 미치는 요소 중 지연제 주변 환경온도는 지연시간을 변화시킬 수 있는 요소이므로 생산자의 의도와 달리 지연시간이 변화할 수 있다. J. Jakubko 등이 보고한 바에 따르면, Si-Pb_3O_4 계의 연소속도는 온도에 따라 선형적으로 비례하는 관계를 갖는다고 보고하였으며[8], Y. Li 등의 보고에서도 B-Pb_3O_4 계의 연소속도가 온도에 비례하는 것으로 조사되었다[9]. 그러나, 국내에서는 지연제에 관한 온도 영향을 연구한 사례는 아직까지 보고된 바 없다.

Table 3. Factors controlling burning rates of pyrotechnic compositions

Controlling Factor	E_a	ΔH_r	F_{fb}
Choice of fuel and oxidizer	O	O	O
Fuel to oxidizer ratio	-	O	-
Degree of mixing	-	O	-
Particle size	O	-	-
Particle shape	O	-	-
Presence of additives	O	O	O
Presence of catalysts	O	-	-
Ambient temperature	O	-	-
Local pressure	-	-	O
Degree of confinement	-	-	O
Physical form	-	-	O
Degree of consolidation	-	-	O
Geometry	-	-	O
Crystal effects	O	-	O
Environmental effects	O	O	O

- E_a : Activation Energy
- ΔH_r : Heat of Reaction
- F_{fb} : Fraction of energy fed back

특히 기상청에서 기온을 측정한 이래, 우리나라 전체 년 일 최고기온과 일 최저기온은 각각 2018년 8월 1일 북춘천에서 측정된 40.6℃, 1981년 1월 5일 양평에서

측정된 -32.6℃이다. 즉, 약 73.2℃만큼의 온도차이가 발생하며, 이와 같이 사계절이 뚜렷하여 연평균 최고최저 온도차가 큰 경우에는 지연시간의 변화가 충분히 발생될 것으로 예상되며 이는 지연제의 품질에도 충분히 영향을 미칠 수 있을 것으로 사료된다.

2.2.2 지연제의 연소반응

지연제의 연소는 산화환원반응의 일종이다. 연료와 산화제로 구성된 지연제는 연료가 환원제의 역할을 하며, 식 (1) ~ (3) 과 같이 연료는 산화제와 반응하여 산소를 얻게 된다[17,18]. 이 반응은 발열반응이므로 반응 중 열을 발생시키고, 반응 중 기체상(gas phase)의 생성물을 발생시켜 제한된 공간에서 반응이 일어날 때에는 압력을 형성한다.

$$\text{Boron Delay : } 4B + BaCrO_4 \rightarrow 4BO + Ba + Cr \quad (1)$$

$$\text{Silicon Delay : } 2Si + Pb_3O_4 \rightarrow 2SiO_2 + 3Pb \quad (2)$$

$$\text{Tungsten Delay : } 8W + 3KClO_4 \rightarrow 8BaCrO_4 \rightarrow 8WO_3 + 3KCl + 4Cr_2O_3 + 8BaO \quad (3)$$

2.3 K414신관용 Zr/Ni계 지연제의 특성

2.3.1 원료의 구성과 지연제의 제조

K413 수류탄에 사용되는 K414 신관용 지연제는 국방규격(KDS 1330-1023)과 MIL-C-13739의 요구조건[19]을 충족하는 Zr/Ni계이며 각 구성성분별 세부 규격, 성분비율, 평균입자지름 등의 특성은 Table 4와 같다. Zirconium-Nickel계 지연제의 경우 연료의 함량에 따라 지연시간이 달라지는데, 산화제의 비율이 일정한 조건에서 Zirconium에 비해 Nickel의 양이 많을수록 연소속도는 느려지는 특성이 있다.

Table 4. Components, weight percent and particle diameter of delay elements for K414 fuze

Components		Wt.%	Aver. Particle Dia.
Zr/Ni alloy	MIL-Z-11410, Type I	6.0	2 ~ 8 ㎛
	MIL-Z-11410, Type II	20.0	-
$BaCrO_4$	MIL-B-550, A	60.0	2 ㎛, max
$KClO_4$	MIL-P-217, IV	14.0	15 ~ 25 ㎛

지연제의 제조는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 준비된 원료를 이용하여 혼화, 압출, 사분, 건조 공정을 거쳐 제조한다. 건조 후 지연제의 형상은 Fig. 3과 같고, 표면의 형태는 Fig. 4의 주사전자현미경(scanning electron microscope)에 나타난 형상과 같다.

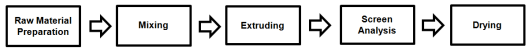


Fig. 2. Procedure of manufacturing Zr/Ni delay elements

Fig. 3. Dried Zr/Ni delay elements

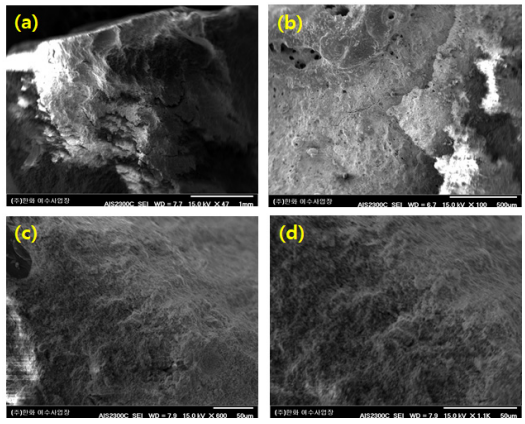


Fig. 4. SEM images of the delay elements after drying

2.3.2 지연제의 충전

2.3.1에서 제조된 지연제는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 원통형의 수류탄 신관에 약 30,000psi 압력으로 4회 분할 압착된다. 이후 공이의 뇌관타격으로 뇌관이 작동하여 지연제가 연소되기 시작하는데, 지연제 연소가 시작된 후 α ~ α+1초 내 연소를 완료하여야 한다. 지연제가 충전되는 원통형 공간은 지름 약 0.00 mm 이고, 지연제 충전 높이는 최소 00 mm 이상이면서 지연시간을 만족시키는 만큼 충전시킬 수 있다(구체적 수치는 보안상 비공개).

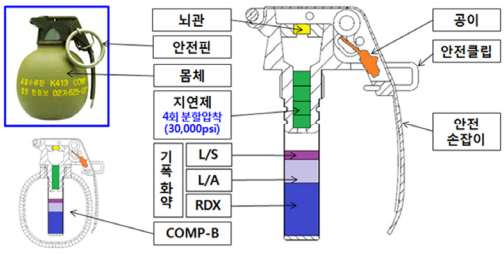


Fig. 5. The cross section of K413 hand grenade

2.3.3 Zr/Ni계 지연제의 연소반응

일반적인 지연제의 연소반응과 마찬가지로, Zr/Ni계 지연제 또한 발열반응이며, Gasless Delays에 분류되지만 기체상의 생성물을 발생시켜 제한된 공간에서 연소반응이 일어날 경우 압력을 발생시킨다. K414 신관용 지연제의 연소반응 메커니즘은 아래 식 (4)~(7)과 같다[20].

$$KClO_4 + 2Zr \rightarrow KCl + 2ZrO_2 \quad (4)$$

$$KClO_4 + 4Ni \rightarrow KCl + 4NiO \quad (5)$$

$$4BaCrO_4 + 3Zr \rightarrow 4BaO + 2Cr_2O_3 + 3ZrO_2 \quad (6)$$

$$2BaCrO_4 + 3Ni \rightarrow 2BaO + Cr_2O_3 + 3NiO \quad (7)$$

3. 실험 및 결과

본 연구에서 수행된 전체 실험절차를 간략하게 Fig. 6과 같이 나타내었다. Zr/Ni계 지연제의 주변온도에 따른 연소속도 변화를 확인하기 위해 K414신관에 지연제를 충전시키고, 기폭관을 결합하여 지연시간을 측정하였다. 우리나라 기상 조건을 고려하여 -40 ℃ 부터 50 ℃ 까지 10 ℃ 씩 차이를 두고 10가지 온도를 기준으로 각 온도 조건에서 30발씩 지연시간 측정 및 지연제 충전 시 측정된 지연제 높이를 이용하여 연소속도(linear burning rate)를 환산하였다.

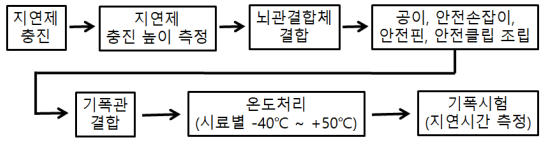


Fig. 6. The flow chart of experimental procedure for measuring delay time of K414 fuze

3.1 시료 준비

지연시간 측정을 위해 사용된 Zr/Ni계 지연제 성분은 Zirconium-Nickel alloy, $BaCrO_4$, $KClO_4$ 등의 원료로 구성되어져 있다. MIL-C-13739A [17], 4.2.2에 따라 각 성분에 대해 함량을 확인한 결과 Table 5와 같다.

Table 5. Chemical Analysis of Zr/Ni Delay Element for K414 Fuze

Components	Wt. %
Zirconium (Zr)	11.9
Nickel (Ni)	14.6
Barium Chromate ($BaCrO_4$)	59.4
Potassium Perchlorate ($KClO_4$)	12.3
Others	1.8

제조된 지연제를 약 30,000 psi의 압력으로 수류탄 신관에 4회 분할 압착하여 충전하고, 지연시간으로부터 연소속도를 산출하기 위해 지연제 충전 후에는 지연제 높이를 측정하였다. 이후 뇌관결합체 조립, 공이결합체 조립, 안전손잡이 및 안전장치(안전핀, 안전클립) 조립, 마지막으로 기폭관 조립 및 방수제 도포 후 건조 과정을 거쳐 수류탄 신관을 제작한다.

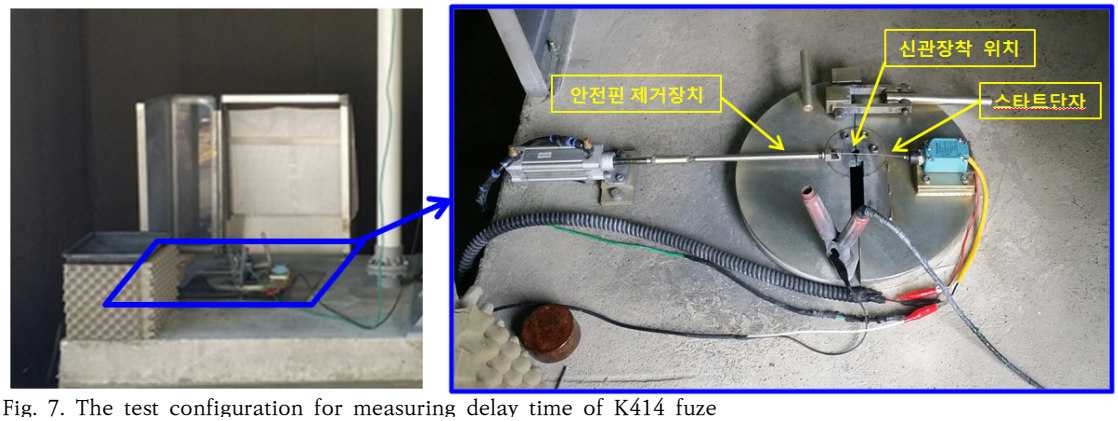


Fig. 7. The test configuration for measuring delay time of K414 fuze

Table 6. The measured delay time of Zr/Ni delay elements depending on the ambient temperature (not open to the public for security reasons)

Temperature (℃)		-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
Delay Time (s)	Max.	□.85	□.84	□.78	□.68	□.71	□.67	□.60	□.59	□.52	□.52
	Min.	□.62	□.52	□.51	□.42	□.27	□.49	□.38	□.30	□.29	□.20
	Ave.	□.74	□.70	□.66	□.55	□.56	□.57	□.48	□.44	□.39	□.35
	STD.	0.07	0.08	0.07	0.06	0.09	0.04	0.05	0.06	0.05	0.08

Table 7. The burning rate of Zr/Ni delay elements depending on the ambient temperature

Temperature (℃)		-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
Burning Rate (mm/s)	Max.	3.01	3.03	3.06	3.11	3.24	3.08	3.32	3.23	3.18	3.27
	Min.	2.81	2.83	2.87	2.94	2.93	2.96	3.00	3.01	3.02	3.01
	Ave.	2.90	2.93	2.95	3.03	3.02	3.01	3.08	3.10	3.12	3.15
	STD.	0.05	0.05	0.05	0.04	0.07	0.03	0.06	0.04	0.04	0.07

3.2 지연시간 측정

K413용 수류탄의 지연시간은 K414 신관 상태에서 확인할 수 있다. 제작된 K414 수류탄 신관을 환경챔버를 이용하여 각 온도조건별 4시간 이상 처리한 후 Fig. 7에서 보는 바와 같이 국방규격(KDS 1330-1023) 따라 SZL-WL-N limit switch(HONEYWELL사)와 ST-1KLA photo transistor(Kodenshi AUK사)가 부착된 ~~제작된~~ 전용 시험기를 이용하여 지연시간을 측정한다. K414 수류탄 신관의 안전손잡이 이탈과 동시에 공이가 뇌관을 타격하게 되면서 지연제의 연소가 시작되는데, 지연제의 연소가 완전히 끝나면 기폭관이 기폭하게 된다.

지연제 연소시작점과 완료시점을 수류탄 신관 상태에서 확인하기 위해, 지연제 연소의 시작점은 안전손잡이가 이탈되는 순간을 limit switch~~스타트단자~~를 이용하여 인지하고, 지연제 연소의 완료시점은 기폭관이 기폭할 때 발생하는 빛을 photo transistor로 감지하여 확인한다 [21].

3.3 지연시간 측정 결과 및 분석

K414 수류탄 신관에 대해 -40 ℃부터 50 ℃까지 10개 온도조건으로 4시간 이상 환경처리 후 지연시간을 측정하여 Table 6에 나타내었으며, 지연제 충전 시 기록한 지연제 높이를 이용하여 연소속도로 환산한 결과 Table 7과 같다. OriginLab 프로그램의 Linear Curve Fitting Tool을 사용하여 지연제 온도에 따른 지연시간 및 연소속도를 분석한 결과, 지연제의 온도가 1 ℃ 상승할 때마다 지연시간이 4.18 ms 감소하며, 연소속도는 2.73 mm/ms 로 빨라짐을 확인하였다. Fig. 8에서 보듯이, 선형회귀분석 결과, R squared 0.94로써 주변 온도에 대한 Zr/Ni계 연소속도는 선형성을 갖는 것으로 사료된다.

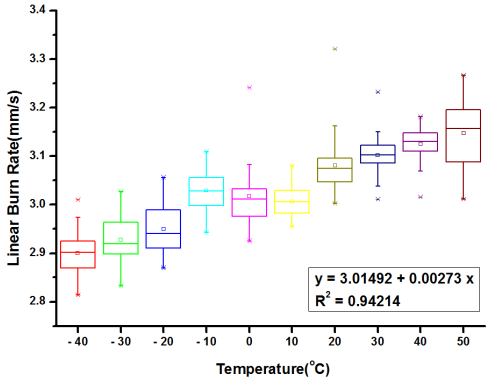


Fig. 8. The burning rate of Zr/Ni delay element depending on the ambient temperature

4. 결론

본 연구는 Zr/Ni계 지연제의 주변온도에 따른 연소속도 변화를 확인하였다. 지연시간은 탄약 사용자의 안전과 밀접한 관계가 있어 균일하여야 하며, 높은 신뢰도를 필요로 한다. 그러나 우리나라에서 사용되는 Zr/Ni계 지연제 온도에 따른 지연시간 또는 연소속도 변화에 대해 연구된 바가 없어 수류탄 등과 같은 탄약의 사용안전에 대한 심리적 부담을 가지고 있었다.

이에 본 연구는 Zr/Ni계 지연제를 사용하는 K414 수류탄 신관을 사용하고, 우리나라 기상환경을 고려하여 설정한 온도구간(-40 ℃ ~ 50 ℃)에 대해 지연시간 변화를 확인한 결과 Zr/Ni계 지연제의 주변온도에 따른 연소속도는 선형적으로 변화하며, 지연제 온도가 1 ℃ 상승할 때마다 지연시간이 4.18 ms 감소하며, 연소속도는 2.73 mm/ms로 빨라짐을 확인하였다. 이 시험결과를 통해, K414 수류탄 신관의 경우 -40 ℃ ~ 50 ℃의 온도조건에서 지연시간 최대값, 최소값 각각이 □.85초와 □.20초임을 확인하여 이 온도구간에서 규격 요구조건인 α~α+1초를 만족할 수 있다는 것 또한 확인하였다. 그러나 생산자가 수류탄 신관의 시험온도 조건을 설정하지 않거나 잘못 설정하여 제품을 생산하는 경우 -40 ℃ ~ 50 ℃ 온도조건에서 규격값을 벗어날 여지도 있다. 한편, 본 연구결과는 K413 수류탄용 신관의 Zr/Ni계 지연제의 온도환경에 따른 연소속도 변화 특성을 확인하고 정량적인 값을 제시하여 사용자에게 사용안전에 대한 심리적 부담을 덜어주고, 생산자에게는 지연시간 측정 시 시험온도 조건의 중요성을 일깨워 줄 수 있을 것으로 기대한다.

References

[1] W. W. Focke, S. M. Tichapondwa, Y. C. Montgomery, J. M. Grobler, M. L. Kalombo, "Review of Gasless Pyrotechnic Time Delays", *Propellants Explos. Pyrotech.*, Vol. 44, pp.55-93, 2019.
DOI: https://doi.org/10.1002/prep.201700311

[2] S. M. Danali, R. S. Palaiah, K. C. Raha, "Developments in Pyrotechnics", *Defence Science Journal*, Vol.60, No.2, pp.152-158, 2010.
DOI: https://doi.org/10.14429/dsj.60.333

[3] B. -C. Park., I. -H. Chang., S. -J. Back, Y. -K. Son. E. -J. Jung, T. -S. Hwang, "Storage Lifetime Prediction of Zr-Ni Delay System in Fuze K510 for High Explosive Shell", *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol.12, No.6, pp. 719-726, Dec. 2009.

[4] B. C. Park. I. H. Chang, S. T. Kim, T. S. Hwang, S. Lee, "A Study on change in thermal properties and chemical structure of Zr-Ni delay system by aging." *Analytical Science & Technology*, Vol.22, No.4, pp.285-292, 2009.

[5] S. M. Tichapondwa, W. W. Focke, O. D. Fabbro, G. Labuschagne, "The Effect of Additives on the Burning Rate of Silicon-Calcium Sulfate Pyrotechnic Delay Compositions", *Propellants Explos. Pyrotech.*, Vol. 41, pp.732-739, 2016.
DOI: https://doi.org/10.1002/prep.201500243

[6] J. P. Agrawal, High Energy Materials : Propellants, Explosives and Pyrotechnics, p.498, WILEY-VCH, 2010, pp.354-358.
DOI: https://doi.org/10.1002/9783527628803

[7] R. H. Comyn, Pyrotechnic Research at DOFL : Part 2. Pyrotechnic Delays, Technical Report, DIAMOND ORDNANCE FUZE LABORATORIES, USA, pp.5-30.

[8] J. Jakubko, "Pressure and temperature effects on burning rate of the silicon-red lead system", *Journal of Energetic Materials*, Vol.15, pp.151-161, 1997.
DOI: https://doi.org/10.1080/07370659708216079

[9] Y. Li, Y. Cheng, Y. -L. Hui, S. Yan, "The Effect of Ambient Temperature and Boron Content on the Burning Rate of the B/Pb_3O_4 Delay Compositions", *Journal of Energetic Materials*, Vol.28, pp.77-84, 2010.
DOI: https://doi.org/10.1080/07370650903193299

[10] HEADQUARTERS. US ARMY MATERIEL COMMAND, Engineering Design Handbook, Explosives Series : Explosive Trains, p.144, AMC PAMPHLET, 1974, pp.6-1-6-12.

[11] J. Akhavan, The Chemistry of Explosives, p.193, RCS Publishing, 2011, pp.173-174.
DOI: https://doi.org/10.1039/9781847552020

[12] J. R. Bentley, P. P. Elischer, DEVELOPMENT OF A GASLESS PYROTECHNIC CAP, Technical Report, DEPARTMENT OF DEFENCE MATERIALS RESEARCH LABORATORIES, Australia, pp.1-8.

[13] H. Ellern, Military and Civilian Pyrotechnics, p.464, Chemical Publishing Company INC., 1968, pp.197-215.

[14] DEPARTMENT OF THE ARMY TECHNICAL MANUAL, MILITARY EXPLOSIVES, Technical Manual, DEPARTMENT OF THE ARMY, USA, pp.10-1-10-13.

[15] B. J., K. L. Kosanke, "Control of Pyrotechnic Burn Rate", *Proceedings of the Second International Symposium on Fireworks*, Vancouver, BC, Canada, pp.275-288, October 1994.

[16] Y. C. Montgomery, W. W. Focke, C. Kelly, "Measurement and Modelling of Pyrotechnic Time Delay Burning Rates:Application and Prediction of a Fast Burning Delay Composition" *Propellants Explos. Pyrotech.*, Vol. 42, pp.1289-1295, 2017.

DOI: https://doi.org/10.1002/prep.201700105

[17] T. M. Klapotke, Chemistry of High-Energy Materials, p.319, DE GRUYTER, 2015, pp.70-97. DOI: https://doi.org/10.1515/9783110439335

[18] J. A. Conkling, C. J. Mocella, Chemistry of Pyrotechnics : Basic Principles and Theory, p.298, CRC Press, 2011, pp.163-168. DOI: https://doi.org/10.1002/prep.201180003

[19] Military Specification, Composition, Delay, MIL-C-13739A, pp.1-11.

[20] V. N. Sheptunov, Heat Generating Compositions for Thermal Batteries, ROYAL AEROSPACE ESTABLISHMENT, UK, pp.3-9.

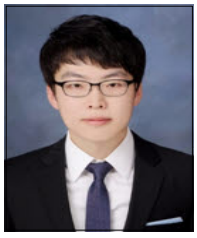
[21] Y. C. Montgomery, W. W. Focke, C. Kelly, "Measurement and Modelling of Pyrotechnic Time Delay Burning Rates:Method and Model Development", *Propellants Explos. Pyrotech.*, Vol. 42, pp.1161-1167, 2017. DOI: https://doi.org/10.1002/prep.201700107

김 호 섭(Ho-Sub Kim) [정회원]

- 2014년 2월 : 부산대학교 기계공학부 (학사)
- 2016년 2월 : KAIST 원자력 및 양자공학과 (석사)
- 2019년 2월 : KAIST 원자력 및 양자공학과 (박사수료)
- 2019년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원 유도탄약센터 연구원

〈관심분야〉
재료 시험평가, 유도탄약 개발 품질관리

임 호 영(Hoyoung Lim) [정회원]



- 2013년 2월 : 인하대학교 화학과 (이학사), 화학공학과(공학사)
- 2013년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 유도탄약센터 선임연구원

〈관심분야〉
추진제 및 화공품용 화약류, LASER 무기체계

강 요 한(Yo-Han Kang) [정회원]

- 2012년 2월 : 한양대학교 응용화학과 (학사)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원 선임연구원

〈관심분야〉
화학, 화공/에너지

김 도 현(Do Hyun Kim) [정회원]

- 2014년 6월 : University of California, Los Angeles, Chemical Engineering (학사)
- 2015년 7월 ~ 현재 : ㈜한화 방산대리

〈관심분야〉
화학공학, 품질경영

이 근 우(Lee Geun Woo) [정회원]

- 2011년 2월 : 부산대학교 화학과 (학사)
- 2013년 7월 ~ 현재 : ㈜한화 방산대리

〈관심분야〉
생산관리, 품질보증