

## 자연 노화된 폭발볼트의 성능 평가에 관한 연구

김동진<sup>a</sup> · 정동희<sup>a</sup> · 이용조<sup>b</sup> · 이영우<sup>c,\*</sup>

## Study on the Performance Evaluation of the Explosive Bolt that has been Natural Aging

Dongjin Kim<sup>a</sup> · Donghee Jeong<sup>a</sup> · Yeungjo Lee<sup>b</sup> · Youngwoo Lee<sup>c,\*</sup>

<sup>a</sup>Energetic Material & Pyrotechnics Department, Hanwha Corporation R&D Institute, Daejeon, Korea

<sup>b</sup>The 4<sup>th</sup> R&D Institute - 1<sup>st</sup> Directorate, Agency for Defense Development, Korea

<sup>c</sup>Daejeon Center, Defense Agency for Technology and Quality, Korea

\*Corresponding author. E-mail: [lywlyh@dtaq.re.kr](mailto:lywlyh@dtaq.re.kr)

### ABSTRACT

Explosive bolt is coupled in a variety of guided weapons and space projectiles, to perform the separation function. Thus, the role of the explosive bolt in guided weapons systems is very important, as it can cause failure of the entire system in the case of mission failure. For this reason, the design life prediction for explosive bolt is highly and frequently required recently, but its accurate prediction method has not been presented. In order to apply the existing accelerated aging process, we should know the activation energy and the acceleration factor of the explosive bolt. Since the information required for accelerated aging is not presently secured, it is difficult to predict the design life of explosive. Thus, in the present study, we have evaluated the performance of actual explosive bolts in the condition of natural aging over 10 years in order to present a minimum design life.

### 초 록

폭발볼트는 각종 유도무기 및 우주발사체에서 결합 및 분리기능을 수행한다. 이처럼 유도무기 체계에서 폭발볼트의 역할은 매우 중요하며, 임무 실패시 체계 전체 실패의 원인이 될 수 있다. 이와 같은 이유로 폭발볼트의 설계 수명 예측에 대한 요구가 최근에 지속적으로 발생하였지만, 신뢰도 높은 예측 방법이 제시되지 못하고 있다. 기존의 가속노화 방법을 적용하기 위해선 폭발볼트의 활성화 에너지와 가속계수를 알고 있어야 한다. 현재 가속노화에 필요한 정보를 정확히 확보하지 못한 상황에서 폭발볼트의 설계 수명을 예측하는 것은 어렵기 때문에 본 연구에서는 실제 10년 이상 자연 노화된 폭발볼트를 이용해 성능을 평가하고, 이를 바탕으로 최소한의 설계 수명을 제시하였다.

Key Words: Explosive Bolt(폭발볼트), Natural Aging(자연노화), Life Prediction(수명평가)

Received 1 June 2016 / Revised 22 November 2016 / Accepted 28 November 2016

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2016년도 춘계학술대회(2016. 5. 25-27, 제주 사인빌리조트) 발표논문문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

### 1. 서 론

폭발볼트는 볼트 몸체 내부에 화약이 충전되어

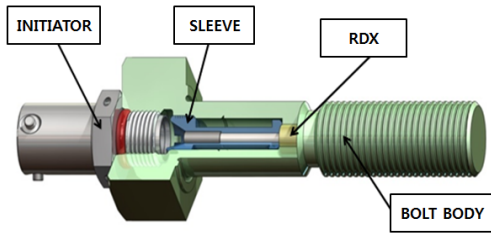


Fig. 1 Explosive bolt configuration.

있으며, 작동시 내부에 충전된 화약이 폭발하면서 발생한 충격과 및 고압에 의해 볼트 몸체가 절단되면서 분리 기능을 수행하는 파이프 장치이다[1]. Fig. 1과 같이 폭발볼트는 크게 착화장치, 볼트몸체 그리고 볼트 몸체를 절단하기 위한 화약으로 구성된다.

폭발볼트는 고폭화약의 폭발력 및 충격과의 힘으로 체결된 두 구조물을 분리시키는 파이프 장치이고 동일한 결합력을 가지는 분리장치들에 비해 크기가 작고 작동원리가 단순하여 분리 신뢰도가 높은 장점을 가지고 있기 때문에 우주발사체 및 각종 유도탄의 고정부 분리, 단분리, 연료탱크 분리, 낙화산 분리 등 다양하게 사용되고 있다[2].

Fig. 2는 유도무기 체계에서 적용된 폭발볼트의 예이다. 그림에 나타나 있듯이 폭발볼트는 배의 발사관에서 유도탄 분리, 추력이 소모된 연료통 분리, 발사체에서 유도무기 분리, 유도무기에서 낙화산을 분리시 사용되고 있다. 이처럼 유도무기 체계에서 폭발볼트의 역할은 매우 중요하며, 임무 실패시 체계 전체 실패의 원인이 될 수 있기 때문에 폭발볼트의 수명 평가에 대한 요구가 증대되고 있다.

폭발볼트의 수명은 단기적으로 가속노화 방법을 통해 예측을 하고 있지만 가속노화 방법은 아레니우스 식[3]을 기본으로 하고 있어서 폭발볼트의 정확한 가속노화시험 조건을 찾는 것이 어렵기 때문에 예측된 설계 수명의 정확도도 떨어지게 된다. 폭발볼트에 적용되는 ZPP 및 RDX는 착화장치와 분리장치의 주장약으로 사용되는데, 고체 추진제와 마찬가지로 시한성 품목이어서 노화특성과 수명 예측에 관한 연구가 필요하다.

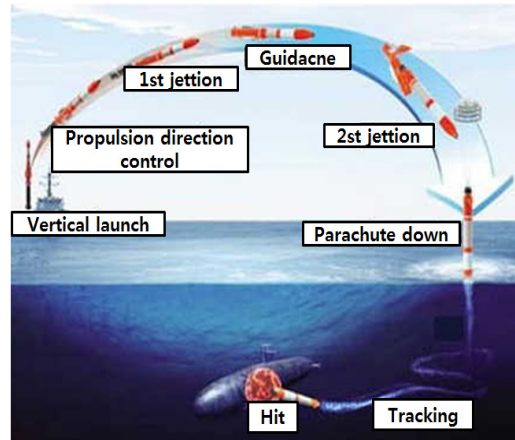


Fig. 2 Example of separation devices.

다. 특히 전략무기에 사용되는 경우에 그 수명을 예측하고 연장시키는 연구가 국방 시스템 운영상 매우 중요한 과제 중 하나일 것이다.

착화장치용 화약으로 사용되는  $TiH_2-KClO_4$ 와  $Zr-KClO_4$ 의 가속노화 연구가 보고된 바 있고[4] 폭발볼트에 분리화약으로 사용되는 RDX에 관한 가속노화[5]에 관련된 논문도 국내외의 연구기관에서 수행되고 있지만 제품 단위의 화공품에 대한 노화특성 및 수명예측에 관한 연구는 국내에서 거의 수행되지 않았다.

본 연구에서는 자연 노화된 폭발볼트의 착화장치, 볼트몸체 및 충전된 화약을 분석하고 최종 제품의 성능평가를 통해 설계 수명에 대한 최소의 기준을 제공하고자 한다. 본 연구에 사용된 폭발볼트는 2004년에 제조되었으며, 냉난방이 되지 않는 무기고와 같은 조건의 창고에서 보관되었다.

## 2. 성능 검사

### 2.1 폭발볼트 검사 기준 및 요구 성능

폭발볼트 착화장치의 검사 기준은 Table 1과 같으며 작동시 10 cc의 밀폐공간에서 250 psi 이상의 압력을 발생시켜야 한다. 폭발볼트는 최소 5.0 A의 전류를 40 ms 동안 공급하였을 때 30 ms 이내에 분리가 되어야 한다. 연구에 사용된

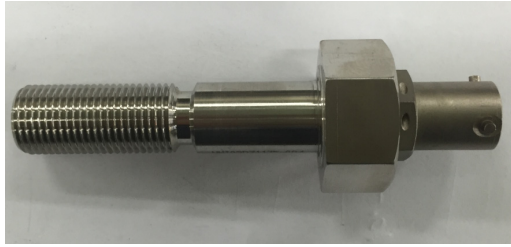


Fig. 3 Shape of explosive bolt.

시료의 형상은 Fig. 3과 같다.

2.2 착화 장치

착화 장치는 내부에 구성된 회로로 전류가 인가되면 발열선에서 열이 발생되고 이때 발생된 열에 의해 내부의 화약이 기폭되어 화염과 압력을 발생시킨다. 내부에 충전된 화약을 소량 회수하여 16년 1월에 혼합된 동일 성분의 화약(이하 비교시료)과 비교 분석을 수행하였다. Fig. 4는 노화시료와 비교시료의 열분석 결과를 비교하여 나타내었다. 분석결과에서 알 수 있듯이 두 비교 화약의 녹는 점 및 분해점이 거의 같기 때문에 노화로 인한 화약 특성의 변화가 크지 않음을 알 수 있다.

Table 1은 폭발볼트에 적용되는 착화장치의 검사항목과 그에 대한 기준값이 나타나있다. Table 2는 아래의 검사항목에 대하여 21 개의 착화장치를 검사한 결과값으로 모든 시료에서 기준을 만족하는 것을 확인하였다.

2.3 착화장치 성능시험

착화장치의 성능은 밀폐용기 내에서 화약을 연소시켜 압력 거동을 측정하는 시험인 Closed Bomb Test (CBT)를 적용하였다. 상온(20℃), 저온(-40℃), 고온(60℃)에서 각각 3개씩 시험을 수행하였고 최대압력 및 최대압력 도달시점을 측정하였다. 최대압력 도달시간을 통하여 적용화약의 조성변화 유무와 화약의 균일성 여부를 알 수 있는데, 이는 착화장치가 적용되는 화공품의 작동 성능에 영향을 미치는 요소이기 때문에 필수적인 확인인자이다.

Fig. 5는 CBT시험 후 시간-압력 관계를 나타

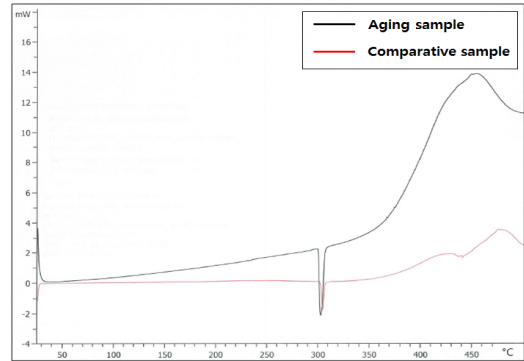


Fig. 4 Results of DSC test (ZPP).

Table 1. Inspection standards.

| No. | Test litem         | Standard   |
|-----|--------------------|--|
| 1   | Resistance test    | A-B: 1.0 ± 0.1 Ω<br>B-C: 1.0 ± 0.3 Ω<br>C-D: 1.0 ± 0.1 Ω |
| 2   | Insulation test    | 50 MΩ ↑  |
| 3   | Dielectric test    | 0.1 mA ↓   |
| 4   | Electrostatic test | Not woking   |

Table 2. Result of inspection.

| No. | Test litem         | Result     |
|-----|--------------------|------------|
| 1   | Resistance test    | Pass       |
| 2   | Insulation test    | Pass       |
| 3   | Dielectric test    | Pass       |
| 4   | Electrostatic test | Not woking |

낸 그래프로서 전원인가 후 작동 시작 시간, 반응으로부터 최대압력 도달시간, 그리고 최대압력 값을 알 수 있다. 시험결과는 Table 3, 4와 같으며 기준값 250 psi 이상 측정됨을 확인하였다. 또한 각 온도 조건별 노화시료 및 비교시료의 최대압력 및 최대압력도달 시간 대한 평균값이 10% 이내로 차이가 나타남을 확인 할 수 있는데, 이는 화약성능 오차 안에 들어오는 편차이기 때문에 자연 노화된 착화장치의 성능저하가 없음을 확인 할 수 있다.

2.4 볼트 몸체

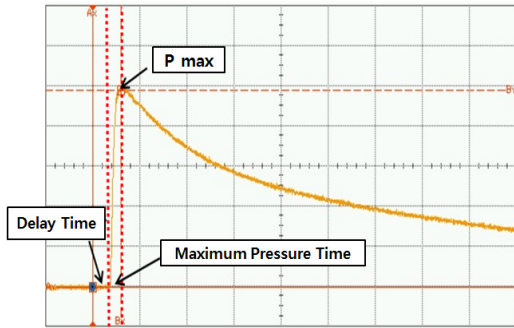


Fig. 5 Time-pressure curve of CBT test.

Table 3. Result of maximum pressure.

| Temp. | P max (psi) |     |     |     | AVG |
|-------|-------------|-----|-----|-----|-----|
|       | No.         | 1   | 2   | 3   |     |
| 20°C  | No.         | 1   | 2   | 3   |     |
|       | A-Sample    | 380 | 374 | 351 | 368 |
|       | C-Sample    | 365 | 361 | 325 | 350 |
| -40°C | No.         | 4   | 5   | 6   |     |
|       | A-Sample    | 380 | 390 | 385 | 385 |
|       | C-Sample    | 366 | 328 | 367 | 353 |
| 60°C  | No.         | 7   | 8   | 9   |     |
|       | A-Sample    | 348 | 373 | 345 | 355 |
|       | C-Sample    | 355 | 365 | 371 | 363 |

Table 4. Result of maximum pressure time.

| Temp. | Maximum Pressure Time (ms) |      |      |      | AVG  |
|-------|----------------------------|------|------|------|------|
|       | No.                        | 1    | 2    | 3    |      |
| 20°C  | No.                        | 1    | 2    | 3    |      |
|       | A-Sample                   | 2.66 | 2.61 | 3.22 | 2.83 |
|       | C-Sample                   | 2.83 | 2.83 | 3.22 | 2.96 |
| -40°C | No.                        | 4    | 5    | 6    |      |
|       | A-Sample                   | 2.44 | 2.55 | 2.83 | 2.60 |
|       | C-Sample                   | 2.77 | 2.94 | 2.94 | 2.88 |
| 60°C  | No.                        | 7    | 8    | 9    |      |
|       | A-Sample                   | 2.83 | 2.44 | 3.55 | 2.94 |
|       | C-Sample                   | 2.94 | 3.00 | 3.11 | 3.01 |

볼트 몸체는 STS630 (17-4PH)로 KSB1010-96 시험 방법으로 수행하였을 경우 인장강도는 1200 MPa 이상이고 경도는 HRC 45±2 이어야 한다. 하지만 자연 노화된 폭발볼트의 경우 인장하중 시험에 필요한 시편을 만들 수 없어 신규 제작된 제품의 인장하중과 비교 시험을 통해 성능을 확인하였다. 신규 제품의 인장하중은 7 kN 이상이어야 한다.

인장강도 및 경도 확인을 위해 3개의 볼트 몸체를 사용하였다. 인장시험 후 시료는 Fig. 6과 같이 단면적이 가장 작은 볼트 헤드 부분에서 파단이 일어났음을 확인할 수 있다. Table 5는 인장하중시험 및 경도시험 결과값이고 모든 시료가 기준값을 만족하였다. 또한 노화시료의 볼트 몸체의 크랙 발생 여부를 확인하기 위하여 시료 21개 전수 X-Ray 검사를 수행하였다. X-Ray 검사결과는 Fig. 7에 나타나 있고 모든 제품에서 크랙은 발견되지 않았다.

Table 5. Result of tensile test.

| Specimen | Tensile Load(kN) | HRC |
|----------|------------------|-----|
| 1        | 11               | 45  |
| 2        | 11               | 45  |
| 3        | 11               | 45  |

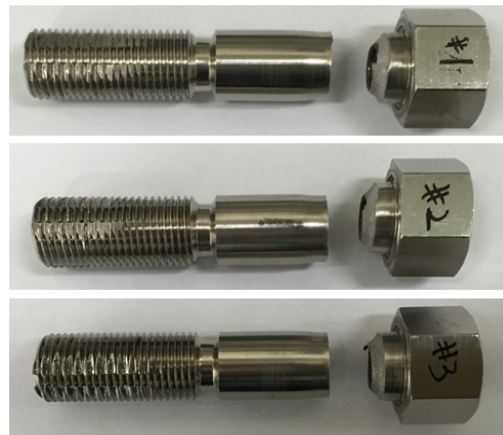


Fig. 6 Results of tensile test.

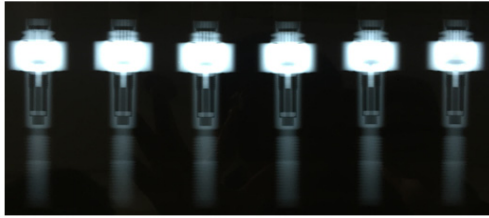


Fig. 7 Results of x-ray test.

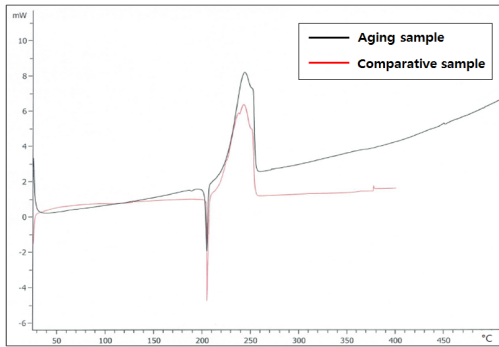


Fig. 8 Results of DSC test (RDX).

2.5 분리화약

볼트 몸체를 절단시키는 역할을 수행하는 분리 화약은 RDX 계열의 화약이 사용되었다. 분리화약 역시 열분석을 통하여 최신화약과 비교하였다. Fig. 8에서 결과에 나타나 있듯이 각 화약의 녹는 점 및 분해점이 거의 같기 때문에 노화로 인한 화약 물성의 변화가 크지 않음을 알 수 있다.

3. 시험 평가

3.1 분리시간 정의

폭발볼트의 분리 성능시험의 Fig. 9와 같이 구성하고 Current Pulser을 통해 착화장치, 폭발볼트에 전원을 인가한 후 분리시간 측정 치구가 분리되는 시간을 측정한다. 분리시간은 Current Pulser의 스위칭 회로에 의해 트리거된 전원이 폭발볼트에 가해진 시점을 기준으로 폭발볼트내의 분리화약이 작동해서 몸체가 절단되어 결합되어있던 원통형 치구가 분리되는 시점을 작동 완료 시간으로 정의한다.

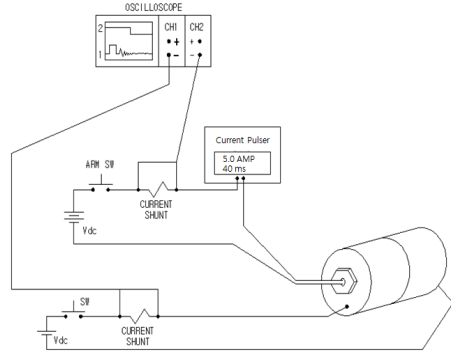


Fig. 9 Test circuit configuration.

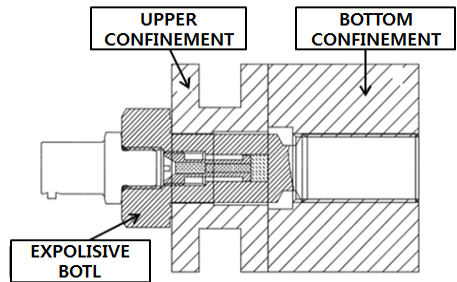


Fig. 10 Test equipment of separation time.

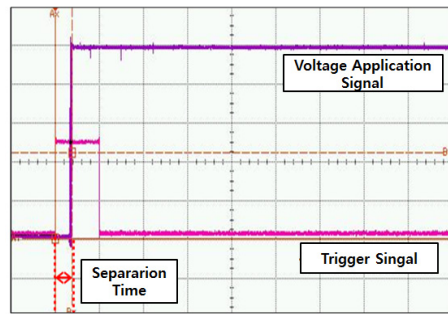


Fig. 11 Curve of separation test.

3.2 분리 성능 시험

폭발볼트 분리성능 시험은 Fig. 10에 나타나 있는 상, 하부 분리치구에 폭발볼트를 삽입하여 오븐에서 상온 (20°C), 저온(-40°C), 고온(60°C)에 4시간 이상 유지한 후 꺼내어 5분 이내에 시험을 수행하였다. 본 연구에서는 21개의 시료를 각 온도조건에서 7조씩 시험을 수행하였다.

분리시간은 Fig. 11과 같이 분리치구에 트리거

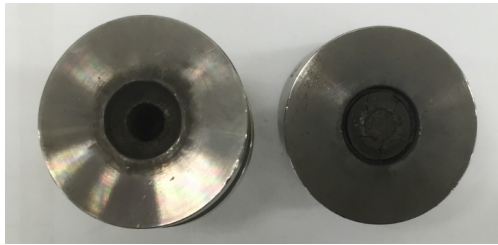


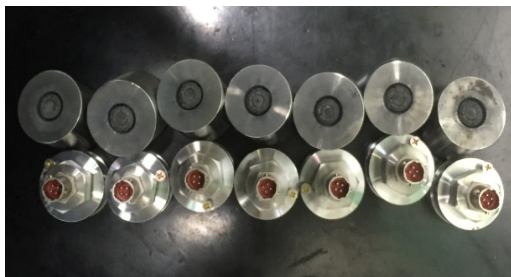
Fig. 12 The shape of separation plane.



(a) Temperature: 20°C



(b) Temperature: - 40°C



(c) Temperature: 60°C

Fig. 13 Results of separation test.

신호(전원공급) 시점부터 구속치구 분리시 발생되는 5 V 전압의 발생시점을 종점으로 하여 측정하였다.

Table 6. Separation time results.

| Temp. | Separation time(ms) |      |      |      |
|-------|---------------------|------|------|------|
|       | 1                   | 2    | 3    | 4    |
| 20°C  | 2.28                | 2.16 | 2.22 | 2.16 |
|       | 8                   | 6    | 7    | AVG  |
|       | 2.11                | 2.22 | 2.11 | 2.18 |
|       | 8                   | 9    | 10   | 11   |
| -40°C | 2.22                | 2.22 | 2.27 | 2.50 |
|       | 12                  | 13   | 14   | AVG  |
|       | 2.55                | 2.44 | 2.44 | 2.37 |
|       | 15                  | 16   | 17   | 18   |
| 60°C  | 2.11                | 2.11 | 2.11 | 2.00 |
|       | 19                  | 20   | 21   | AVG  |
|       | 2.05                | 1.83 | 2.05 | 2.03 |
|       |                     |      |      |      |

온도 조건별 분리시험결과는 Fig. 12, 13과 같고 모든 시료에서 예상 절단면이 분리됨을 확인하였다. 또한 모든 시료의 분리시간은 2~3 ms 안에 분리되어 분리시간 30 ms 기준값에 만족하였다. Table 6은 시료별 분리시간이 나타나 있다.

#### 4. 결 론

폭발볼트와 같은 원샷 장치의 신뢰도를 추정하는 방법으로 가장 많이 사용되는 것이 시간에 따른 성능 변화를 나타내는 열화(degradation) 데이터를 이용하는 것이다. 그러나 짧은 시간 내에 제품의 신뢰도를 평가하기 위해선 가속 노화를 수행하여야 한다. 가속노화의 이론적 배경은 아레니우스 식으로서 실제 적용하기 위해선 각각의 제품에 대한 활성화 에너지 및 가속 계수에 대한 정보를 갖고 있어야 한다. 하지만 폭발볼트의 경우 정확한 정보를 획득하기 위한 방법 및 규격이 제시되어 있지 않기 때문에 가속 노화를 통한 수명 예측에 한계가 있다. 본 연구에서는 실제 13년 이상 자연 노화된 폭발볼트를 이용하여 성능 평가를 수행하였기 때문에 가속 노화를 통해서 수명 예측하는 방법보다 월등히 정확도가 뛰어나다.

본 연구에서는 자연 노화된 폭발볼트의 성능을 최초 생산된 제품에 적용되는 규격으로 시험을 수행하여 모든 요구 조건을 만족하는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구를 통해, 생산된지 13년이 경과한 폭발볼트의 성능은 초기 제작 상태와 비교하여 전혀 차이가 발생되지 않았기 때문에 최소 13년 이상의 설계 수명을 갖고 있다는 결론을 도출하였다. 따라서 폭발볼트가 적용되는 무기체계에 시한성 품목으로 관리될 때 설계 수명으로 참고할 수 있는 근거를 제시하였다.

#### References

1. Lee, Y.J., "The Interpretation of Separation Mechanism of Ridge-Cut Explosive Bolt Using Simulation Programs," *Journal of Korea Society of Propulsion Engineers*, Vol. 8, No. 2, pp. 102-114, 2004.
2. Karl O. Brauer, *Handbook of Pyrotechnics*, Chemical Publishing Inc., N.Y., U.S.A., pp. 119-128, 1974.
3. Jang, S.G., Kim, J.H., Ryu, B.T. and Hwang, J.M., "Arrhenius Kinetic Constants Analysis of BKNO<sub>3</sub> under Accelerated Aging," *Journal of Korea Society of Propulsion Engineers*, Vol. 20, No. 4, pp. 34-39, 2016.
4. Sanborn, W.B., Boyd, D.E., Sorensen, D.N. and Quebral, A.P., "The Accelerated Aging of the Pyrotechnic Materials THPP and ZPP," *44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Hartford., C.T., U.S.A., AIAA, July 2008.
5. Donald, A.W., "Changes in the Mechanical Properties of Energetic Materials With Aging," *Journal of Energetic Materials*, Vol. 21, No. 2, pp. 125-140, 2003.