

온도 측정과 분석을 통한 40 mm 장축공동실린더의 열적특성 고찰

신내호[†] · 정동윤 · 오명호 · 유삼현 · 남석현*

육군사관학교, *국방과학연구소

Thermal Property Analysis of 40 mm Long Hollow Cylinders Though Measurements and Analysis of Transient Temperatures

Naeho Shin[†], Dong-Yoon Chung, Myoungoh Oh, Sam-Hyeon Yoo and Seok-Hyun Nam*

Korea Military Academy

*Agency for Defence Development, Rep. of Korea

Abstract – A simple and effective analysis method is presented for gaining a complete transient temperatures on the internal and external surfaces of a 40 mm gun tube subjected to a series of rapid firings. Two series of temperature data for both Hs and As were measured by using two rapid response k-type surface thermocouples near the firing origin and the muzzle. With other available temperature data, patterns of temperature variations of the gun tube as a function of time variable were driven through complete evaluations of the data. It is found that overall temperature gradients which increase exponentially toward saturation temperature, actually consist of a series of linear temperature gradients corresponding to the firing sequences. Under the similar firing sequences, patterns of temperature variations for both the surface temperatures near the chamber and those near the muzzle were found to have linear temperature gradients with different values and the same response frequencies, i.e. they had peaks and lows in temperatures at the same time. The resultant complete temperature data can be used as the fundamental bases for analysis of thermoelastic properties of the materials such as thermal strain and stress, and for the prediction of cannon tube life-time through calculation of wear rate.

Key words – gun barrel, wear, temperature of barrel, temperature gradient, heat input.

1. 서 론

포신과 같이 고압과 고온의 연소가스에 반복적으로 노출되는 폭이 두꺼운 장축의 원통 구조물은 현대 공학에서 그 응용이 매우 다양한 중요한 구조물이다. 대표적으로 핵공학에서 사용되는 구조물, 로켓의 노즐, 포신, 고열 동작기구 등이 그 예이다.

고온 고압에 의해 구조물은 열적 팽창과 압축을 반복하게 되고, 열응력을 증가시켜 열적 변형을 초래하여 궁극적으로 구조물의 수명을 크게 단축시킬 것이다. 공학적으로 급속 가열로 인한 구조물에 대한 열 충격은 동적 열탄성문제(dynamic thermoelastic problem)에 속

한다. 그럼에도 불구하고 현재까지 많은 연구들이 온도를 정적인 변수로 다루었거나[1-4], 온도 변화를 시간에 독립적인 변수로 취급하여 문제를 해결하려하였다[5-6]. 이것은 소수 군사적인 용도의 실험[7-9]을 제외하고는 실측에 의한 온도자료를 구하기 힘들기 때문이었다. 따라서 대부분의 연구에서 주로 사용된 온도 자료는 실제 측정에 의한 계측자료가 아닌 수치해석기법에 의한 가정치를 사용하였다.

실측에 의한 위치와 시간의 함수로 얻어지는 온도, $T(r, t)$ 는 온도와 압력 변화에 의한 구조물의 변형연구에서 매우 중요하다. 그럼에도 대부분의 연구에서 온도 분포를 수치해석의 결과에 의존하는 것은[1], 고온 고압하의 실험이기 때문에 실험에 의한 측정치 계측이 매우 어렵고[2], 근본적으로 열충격은 마이크로 초 단위

[†]주저자 · 책임저자 : nhshin@kma.ac.kr

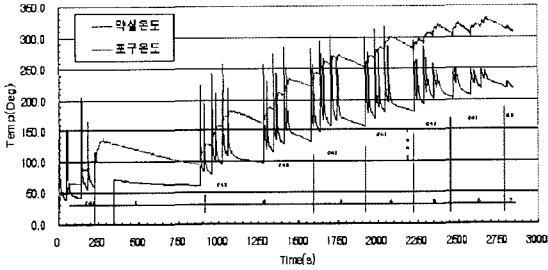


Fig. 3. Temperature variation measured from the origin of rifling and the surface of muzzle for H type projectiles (192 rounds).

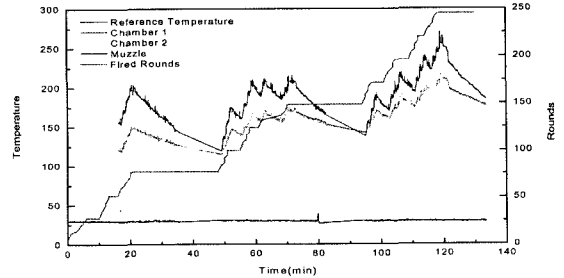


Fig. 5. Measured temperatures on the surface of the chamber and the surface of muzzle (B type projectile, 245 rounds).

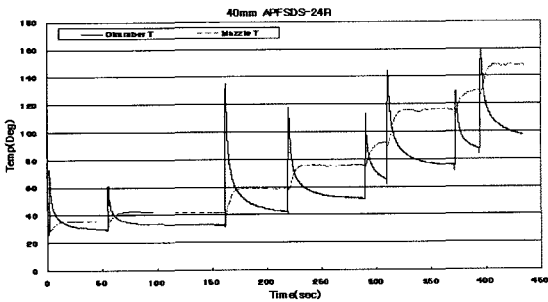


Fig. 4. Measured temperatures on the surface of chamber and the surface of muzzle (A type projectile, 24 rounds).

은 측정 지연을 초래했고, 진동현상은 약실부 센서의 접촉 이완 현상을 초래하였다. 그 결과 그림 3에서 보듯 H탄 총 8주기 192발 사격 중 마지막 8주기 24발의 계측은 누락되었으며, 7주기(145발~168발)의 약실부 내벽온도 계측은 신뢰성이 떨어진다.

한편 동일 종류의 40 mm포신에 대한 온도측정이 245발의 B탄(24발 단위 연발사격)에 대해 본 논문의 제 5저자의 ADD팀에 의해 실시되었다. 이것은 약실부와 포구부 외벽에 대한 온도 측정이다.

그림 5에서 위 부분 톱니 모형은 포구부분 외벽 온도 변화이고 아래 부분 톱니 모형은 약실부분 온도 변화이다.

3. 실험 결과 분석

3-1. 가정 사항

21세기에 들어서서 자연과학 및 공학의 방법론 중 주목을 받고 있는 복잡계이론[12]에 의하면 매우 복잡해 보이는 자연현상이 궁극적으로 매우 단순한 패턴의 반복적인 상호작용에 의한 결과임을 밝히고 있다. 측정을

통해서 본 40 mm 포신의 온도 특성은 사격 방법에 따라 다양한 현상을 보임을 알 수 있다. 즉, 거시적으로는 비선형적인 특성을 보였다. 그러나 유사한 실험조건에서는 유사한 특성을 보인다는 측면에서 복잡계이론이 시사하는 단순 규칙성이 존재하리라는 가정이 가능하다.

따라서 각각의 측정치에 대한 분석은 해당 자료의 분석을 통하여 규칙적인 패턴을 도출하였고, 유사 자료간(그림 3과 그림 5) 온도변화 패턴의 규칙성은 두 자료의 비교 분석으로 도출하였다.

결과 분석은 먼저 각 사격주기(24R 단위)별 사격 시작온도 대비 피크 온도 경향 분석을 통한 H탄 192R의 피크 유실자료 복원실험 하였다. 이어서 B탄 245R 포구외벽 온도 변화와 약실 외벽 온도 변화경향의 상관관계식을 도출하여 H탄 192R의 약실 외벽온도 변화를 유도 하였다.

3-2. 열충격파 peak 패턴 분석

H탄 192R의 유실된 계측자료(peak) 복원을 위해 측정의 신뢰성이 있는 1주기에서 6주기의 피크온도 증가량을 사격시작대비 함수로 분석하였다. 그림 6, 7은 사격 시작온도 함수로 그려본 각각 5연발사격, 3연발 사격의 peak온도 증가량 추세이다. 최적의 추세선은 2차 함수로 나타남을 알 수 있다.

그림 6과 7의 결과를 적용하여 그림 3의 초기 측정치를 복원한 결과가 그림 8이다.

그림 8의 결과 H탄 사격시 최대 상승온도(peak)는 150°C(430 K)에서 350°C(630 K)의 분포를 나타냄을 알 수 있다. 이는 문헌[8,9]에서 보여주는 1000 K(105 mm 포신)대의 포강 표면온도와 큰 차이를 보이고 있다. 이는 본 논문에서 측정된 포신 내벽 온도가 문헌에서(센서를 강선 표면위로 노출 장착)와 달리 강선에서 1 mm

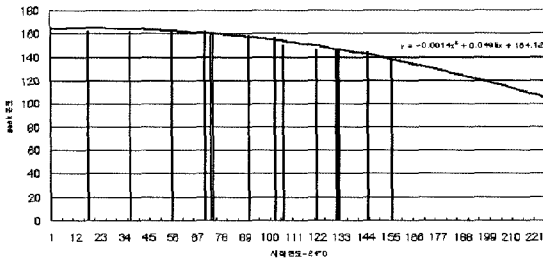


Fig. 6. Regression of the peak temperatures from continuous firing (5 rounds) with H type projectile.

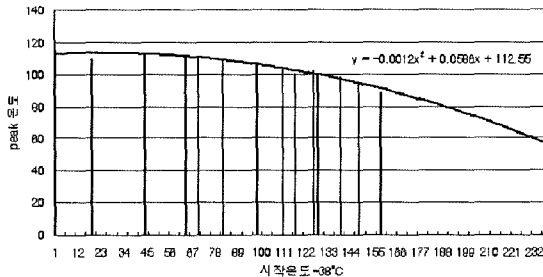


Fig. 7. Regression of the peak temperatures from continuous firing (3 rounds) with H type projectile.

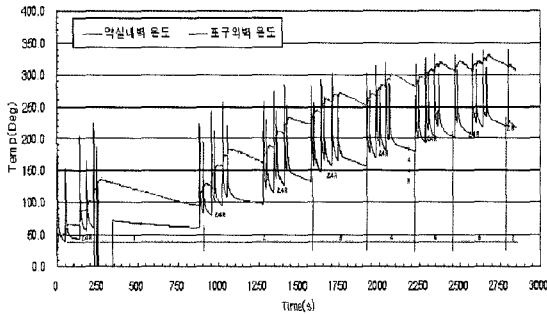


Fig. 8. Recovered temperature variations for H type projectile (192 rounds).

밀의 포신벽 속의 온도를 측정했기 때문이다. 따라서 포탄과 함께 포신을 빠져나가는 연소가스의 화염온도 중 열전도에 기여한 부분만 측정에 반영된 셈이다. 이 경우 문헌[8,9]에서는 화염온도의 70~80% 정도의 내벽온도 상승을 예측하고 있다. 본 논문의 측정결과가 여기에 근접하는 것으로 보아 측정의 신뢰성은 입증되었다고 판단된다.

3-3. 포신 외벽 온도변화 패턴 분석

H탄 192R과 B탄 245R은 3분 이내 24발 연속사격

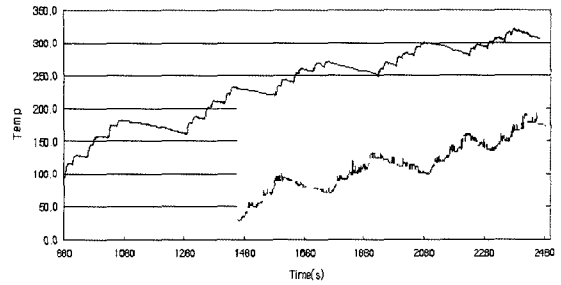


Fig. 9. Comparison of the temperature variations between the H type projectile and the B type projectile on the surface of the muzzle.

이라는 사격 주기의 동일성 조건에서 온도측정이 실시되었다. 실험 조건의 동일성은 그림 9에서 보듯 두 경우 온도변화 기울기의 선형성이라는 유사성을 보이고 있다.

또한 세부 분석결과와 B탄 245R의 포구외벽온도와 약실외벽온도는 같은 주기의 온도변화 반응을 보였다(그림 5). 즉, 포구외벽과 약실 외벽의 온도는 같은 시간에 peak와 low를 형성하였다. 따라서 H탄 192R의 경우도 포구외벽의 온도 변화를 이용하여 약실외벽의 온도변화를 유도할 수 있음을 예측할 수 있다.

포구외벽 온도를 이용한 약실외벽온도의 유도에는 기울기는 다르나 변화주기가 동일한 두 직선간 관계식을 이용하였다.

예를 들어 두 직선

$$y_{input}(x) = a_{input}x + y_{input0} \quad (1)$$

$$y_{output}(x) = a_{output}x + y_{output0} \quad (2)$$

가 있을 때, 식(2)는 식(1)의 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_{output}(x) = \frac{a_{output}}{a_{input}}(y_{input}(x) - y_{input0}) + y_{output0} \quad (3)$$

이와 같은 선형관계식 유도방법은 그림 5의 고압탄 245R의 포구온도와 약실온도 그래프에 적용하여 검증할 수 있다. $T_{output}(t)$ 를 구하고자하는 약실 외벽온도라 하고, $T_{input}(t)$ 를 포구 외벽온도로 가정하여 식(3)을 적용하면 그림 10의 결과가 나온다. 그림 10에서 보듯 유도된 결과는 최초 약실 온도 그래프와 거의 일치하였다.

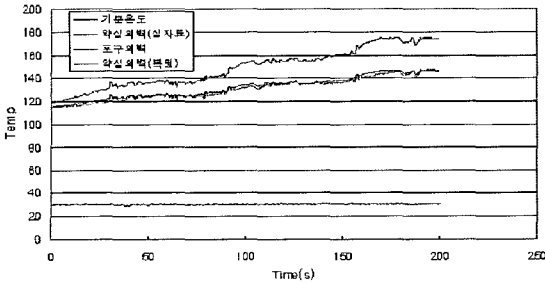


Fig. 10. Measured temperatures on the surface of chamber and the surface of muzzle (B type projectile).

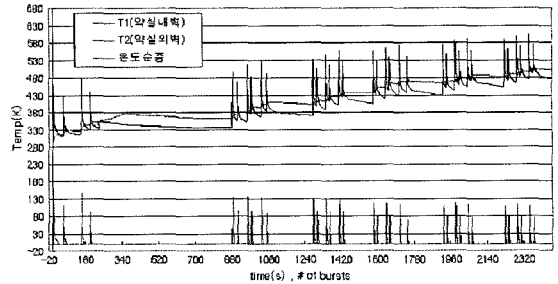


Fig. 13. The temperature difference between on the surface and inside of the chamber (H type projectile, 192 rounds).

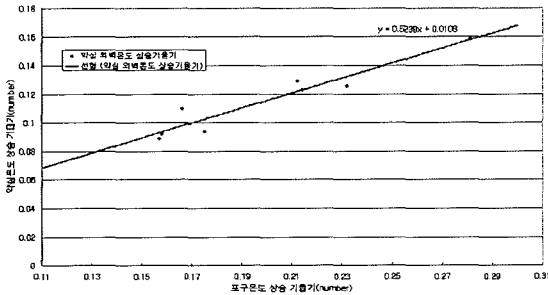


Fig. 11. Regression of the temperature rise on the surface of chamber.

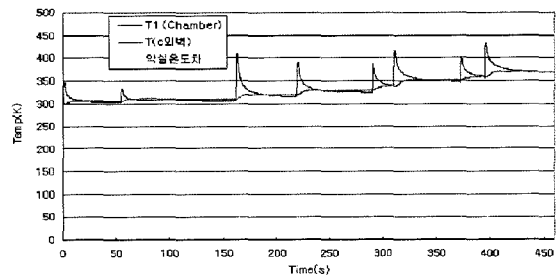


Fig. 14. The temperature difference between on the surface and inside of the chamber (A type projectile, 24 rounds).

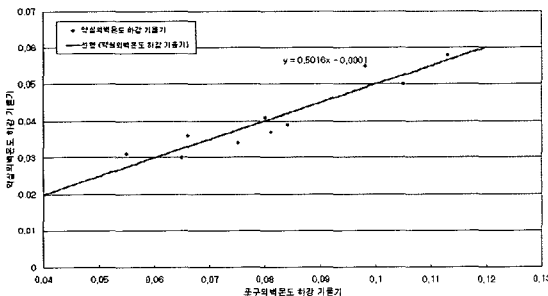


Fig. 12. Regression of the temperature drop on the surface of chamber.

4. 고찰 및 결론

H탄을 24발 단위를 한 주기로 하여 연속 사격한 결과 전체 적인 온도 변화곡선은 사격이 진행될수록 지수함수 적으로 증가하여 포화 온도로 수렴하는 듯 한 비선형성을 보였다. 이는 강체의 열적 특성이 보여주는 일반적인 현상이다. 그러나 세부적인 분석결과 각 주기별로 온도 변화 기울기는 선형성을 보였으며 이는 열특성 해석에 논리적인 분석방법이 가능함을 시사하고 있다.

또한 약실 외벽과 포구 외벽이 동일한 시간에 peak 와 low를 형성하는 동일 주기성을 보였다. 이는 포탄 이 포신에 머무는 시간이 포구속도를 1,000 m/s로 가정할 때 3 m 길이 포신의 경우 3 ms인 점을 고려하면 0.1초의 시간적인 해상도를 갖는 본 실험의 정밀도내 에서 포신 전체가 마치 한 몸처럼 반응함을 예측할 수 있다. 따라서 만일 보다 정밀한 마이크로 초 단위의 측정이 가능하다면 이러한 주기성에 대한 좀 더 세밀 한 분석이 가능할 것이다.

본 논문과 같이 온도센서를 포신 내 · 외벽에 장착

H탄 192R 약실외벽 온도자료의 완벽한 유도를 위해 필요한 추가 자료인 각 사격 주기별 약실 외벽 온도 기울기 값은 그림 11, 12와 같이 B탄 245R의 포구외 벽 온도 기울기 대비 약실 외벽온도 기울기 상관관계 를 통하여 유도하였다.

3-4. 포신 내 외벽 온도자료 복원

위와 같은 과정을 거쳐 H탄 192R과 A탄 24R의 약실부 내벽 및 외벽 온도, 두 지점간 온도 차 그래프 는 그림 13, 14와 같다.

하여 포신의 온도를 측정 및 분석한 것은 포신의 열적 특성을 해석하는데 중요한 의미를 가지고 있다. 원통형 좌표계에 Fourier 방정식을 이용하여 이론적 수치적인 기법으로 강체의 열응력과 열변형을 분석하는 대부분의 논문에서 초기 조건 및 경계 조건으로 사용되는 온도 값은 시간에 독립적인 상수 이거나 변수분리법을 적용하여 시간에 대해 지수 함수적으로 구한 가정치이다. 때문에 대부분의 연구결과는 처음부터 오차를 가지고 수치해석을 시작하는 것과 마찬가지이다 [1-6]. 이는 이러한 이론적 수치적인 해석에 실측에 의한 온도자료를 사용하지 못했기 때문이다. 따라서 본 논문에서 제시하는 바와 같이 선형적 분석을 통한 시간의 함수로 구해진 경계면에서 온도 실측 자료를 활용하면 보다 실제 값에 가까운 이론적 수치해석을 통한 열응력 열변형 값을 얻게 되어 열 구조물 설계에 큰 도움을 줄 수 있을 것이다.

또한 본 논문에서 제시하는 온도 자료는 포신에 유입되는 열유입량 계산을 통하여 포신의 마모율을 결정하는 공식 유도에 활용되어 포신 수명 결정에 적용될 수 있을 것이다[11].

참고 문헌

1. S. T. Stasyuk, V. I. Gromovjk and A. L. Bichuya, "Thermal-stress Analysis of Hollow Cylinder with Temperature-dependent," *Acad. of Sci. of the Ukrainian SSR, L'VOV. USSR*, Vol. 11, No. 1, pp. 41-43, Jan. 1979, Translated in: *Strength of Materials*, Vol. 11, No. 1, pp. 50-52, Sep. 1979.
2. H. Vollbrecht, "Stress in Cylindrical and Spherical Walls Subjected to Internal Pressure and Stationary Heat Flow," *Verfahrenstechnik* Vol. 8, pp. 109-12, 1974.
3. S. A. R. Naga, "Optimum working Conditions in Thick Walled Cylinders," *J. Eng. Mater. Technol. Trans. ASME*, Vol. 108, pp. 374-7, 1986.
4. V. N. Zukhova and P. G. Pimshtein, "Thermally Stressed State of a Laminated Cylinder exposed to Internal Pressure and Steady-state External Heating," *Sov. Appl. Mech.*, Vol. 25, pp. 808-13, 1990.
5. T. Yoitiro and N. Naotake, "The Effects of Dynamical treatment of Thermal Stress on a Circular Region due to Continuous Point Heat Source," *Int. Journal of Eng. Sci.*, Vol. 12, pp. 261-271, 1974.
6. X. Wang, "Thermal Shock in a Hollow Cylinder Caused by Rapid Arbitrary Heating," *J. of Sound and Vibration*, Vol. 183, No. 5, pp. 899-906, 1995.
7. I. A. Johnston, "Understanding and Predicting Gun Barrel Erosion," DSTO-TR-1757, Weapons Systems Division, DOD, Australian Government, Aug., 2005.
8. C. E. Moeller and A. J. Bossert, "Measurement of Transient Bore-Surface temperatures in 7.62 mm Gun Tubes," R-RR-1-81-73, Rock Island Arsenal, Nov. 1973.
9. C. W. Nelson and J. R. Ward, "Calculation of Heat Transfer to the Gun Barrel Wall," ARBRL-MR-03094, USA Ballistic Research Laboratory, Mar. 1981.
10. http://www.navweaps.com/Weapons/WNSweden_4 cm -70_m1948.htm.
11. D. Y. Chung and M. Oh, "New Empirical Method to Enhance the Accuracy in the Erosion Prediction of Cannon Tube," *Wear*, Vol. 255, pp. 98-101, 2003.
12. J. Moffat, "Complexity Theory," Sept., 2003, CCRP.