

회전 구동부의 신뢰성 개선을 위한 쿠션 성형 방법의 결정

남윤욱¹ · 손기중¹ · 성시일^{2*}

¹국방기술품질원 기동화력1팀, ²인제대학교 공과대학 산업경영공학과

Molding Method Determination of Cushion for Improving Reliability of the Rotation Driving System

Yoonwook Nam¹ · Kijoong Son¹ · Si-Il Sung^{2*}

¹1st Land System Team, Defense Agency for Technology and Quality, Korea

²Department of Industrial and Management Engineering, Inje University

Purpose: This article provides an efficient cushion molding method for improving reliability of the rotation driving system.

Method: Allowable stress level for cushion is calculated by using physical characteristics of the rotation driving system. In addition, various test units are manufactured and used to conduct the rebound resilience, the burst pressure and the alternating load test.

Results: Actual allowable stress level and test results of the rebound resilience, the burst pressure and the alternating load test are provided.

Conclusion: The cushion manufactured by the compression molding method gives more preferable characteristics for improving the reliability of the rotation driving system.

Keywords: Main Battle Tank, Multi-Smoke Projectile Launching System, Poly-tetramethylene Glycol, Cushion, Molding Method

1. 서론

대전차 로켓포와 같은 다양한 대전차 위협 수단으로부터 전차의 생존성을 보장하기 위한 방호 개념은 과거 수동적인 방호에서 최근 능동적인 개념을 적용하는 방식으로 진화하고 있다. 현재 우리나라에서 운용 중인 K2전차는 능동적 방호 개념을 적용한 세계적 수준의 전차이다. 능동 방호 개념의 일환으로써 대전차 유도무기와 같은 위협을 탐지하고 복합연막탄을

발사하는 기능을 갖추고 있다. 이를 통해 적의 위협을 교란하는 동시에 전차의 회피기동을 가능하게 하여 전차의 생존성 및 안전성을 높이고 있다[1]. 이러한 능동 방호 시스템은 <Fig. 1>과 같이 방호용 레이더 장치와 유도 교란 통제 장치 그리고 복합 연막탄 발사 장치로 구성된다.

<Fig. 1>의 시스템을 좀 더 자세히 살펴보면 다음과 같다. 우선 방호용 레이더 장치는 대전차 미사일이나 로켓탄 같은 위협 요소를 탐지한다. 다음으로 유도 교란

* 교신저자 sisung@inje.ac.kr

2017년 7월 26일 접수; 2017년 8월 18일 수정본 접수; 2017년 9월 1일 게재 확정.

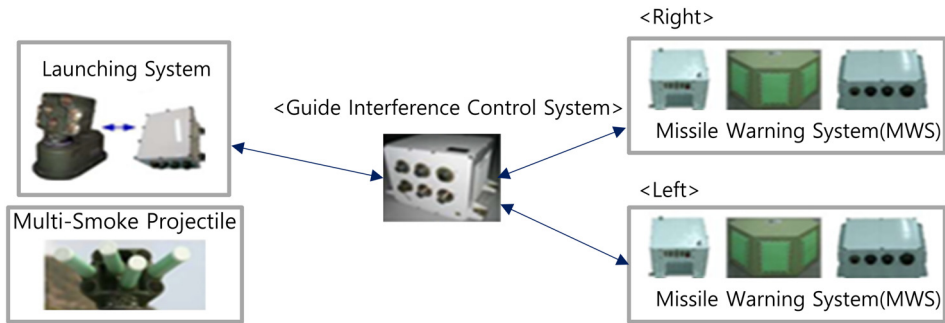


Fig. 1 Configuration of active protection system

통제 장치는 위협체의 정보를 분석하여 위협 신호를 전차장이 사용하는 운용 전시기 화면으로 전달함과 동시에 복합 연막탄 발사 제어기에 구동 명령을 전송한다. 마지막으로 복합 연막탄 발사 장치는 발사 장치의 구동 범위 안에서 복합 연막탄을 발사하는 장치[2]로써 소프트웨어 제어를 통해 발사 구동 범위를 통제한다[3].

이런 능동 방호 시스템 중 복합 연막탄을 발사하는 장치에서 물리적인 오작동이 발생할 수 있다. 일반적으로 전차는 매우 거친 지형에서 운용되기 때문에 예상치 못한 진동 혹은 충격이 발사 장치에 영향을 주는 등 다양한 신뢰성 문제가 발생할 수 있다. 이에 따라 발사 구동 장치의 회전 범위에 대한 오작동, 즉 회전 범위의 한계를 벗어나 연막탄이 발사되지 않는 문제가 발생할 수 있다. 실제로 최근 K2전차의 야전 운용 중 제어기 오동작에 따른 복합 연막탄 구동 제어 불량 현상이 발생한 바 있다. 이러한 현상을 개선하여 신뢰성을 향상시키기 위해 기계적 안전장치인 쿠션을 배치하게 되었다. 즉 물리적 오작동을 미연에 방지하여 구동 범위를 통제할 수 있도록 <Fig. 2>와 같이 쿠션(cushion)을 장착하고 있다. 이를 통해 회전부의 구동

범위를 벗어나는 것을 물리적으로 방지하여 운용 간 신뢰성을 기계적으로 보장하고 있다.

현재까지 수행된 연구를 살펴보면 PTMG(poly tetra-methylene glycol) 소재를 사용하는 것이 탄성 회복 측면과 다양한 기계적 물성이 다른 소재에 비해 우수[4]하다고 알려져 있기 때문에 쿠션의 소재로 PTMG가 사용되고 있다. 그러나 PTMG 소재가 사용되어 성형되고 탄성체는 여러 가지 화학적 첨가제가 특수한 비율로 배합되어 있기 때문에 정확한 물성을 파악하기 어려운 한계점이 있다[5]. 또한 고 탄성체의 성형 기술에 관한 연구는 지속적으로 진행[6]되고 있으나 성형방식에 따른 물성을 비교하는 연구는 거의 없는 상황이다.

따라서 이 연구는 전차에 적용되는 복합 연막탄 발사 장치의 쿠션을 대상으로 운용 간 요구되는 물성을 정확히 파악하는 동시에 고 탄성체의 성형방식에 따른 기계적인 물성 비교를 다루고자 한다. 더 나아가 이 연구에서 제안한 성형 방법을 적용하여 생산된 쿠션의 기계적 물성이 군 운용 환경에 적합한지에 대한 신뢰성 검증을 수행한 결과를 제시한다.

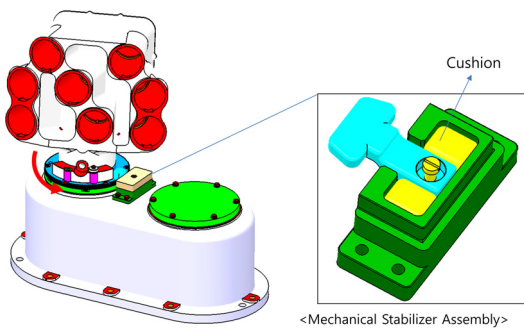


Fig. 2 Image of cushion of multi-smoke projectile launching systems

2. 쿠션의 요구 물성파악 및 개발방안

2.1 운용 요구 물성 파악

복합 연막탄 발사 장치에 장착되는 쿠션의 요구되는 물성 중 하나인 인장강도를 파악하기 위해서 쿠션에 작용되는 최대 허용 응력을 산출해야 한다. 허용 응력을 산출하기 위해서 <Fig. 3>과 같이 모터 구동 토크와 감속비, 브라켓의 접촉반경 그리고 쿠션 면적을 고려해야 한다. 이러한 요소들을 고려하기 위한 식은 다음과 같다.

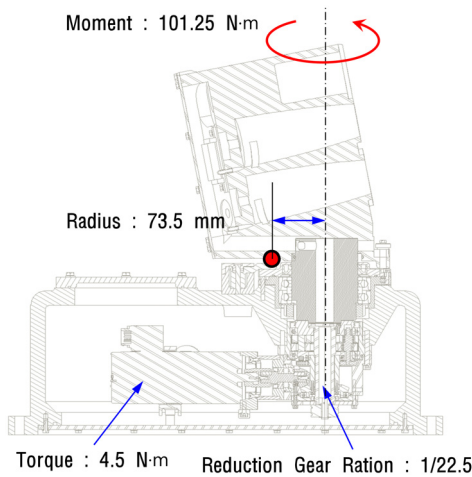


Fig. 3 Stress factors of the cushion

$$I = T \times \frac{1}{N} \tag{1}$$

$$F = \frac{I}{R} \tag{2}$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{3}$$

우선 식 (1)을 통해서 출력단의 회전 모멘트(I)를 구할 수 있으며 이 때 T 는 모터의 구동토크를 의미하며 N 은 감속기의 감속비를 나타낸다. 다음으로 식 (1)에서 구한 값을 식 (2)에 대입하여 쿠션 작용 하중(F)를 구할 수 있다. 여기서 R 은 브라켓의 접촉반경을 의미한다. 이제 식 (3)에서 얻는 쿠션 작용 하중을 사용하여 쿠션 작용 응력(σ)을 구할 수 있으며 A 는 쿠션면적을 의미한다. 여기서 σ 는 쿠션에 작용하는 최대 응력으로 쿠션이 만족해야 하는 최소 허용 응력임을 알 수 있다. 이제 이 식을 활용하여 복합 연막탄 발사 장치에 적용되는 쿠션의 허용 응력을 계산하면 다음과 같다. 우선 구동 모터의 최대토크 값은 $4.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 이며 감속기의 감속비인 $1/22.5$ 를 사용하면 출력단의 회전 모멘트는 $101.25 \text{ N}\cdot\text{m}$ 이다. 이때 쿠션은 발사 구동부의 뒤편에 위치하므로 브라켓의 접촉 반경을 고려하면 1377.6 N 의 압축하중이 쿠션에 가해짐을 알 수 있다. 물체에 외력이 발생하면 내부에서는 외력에 저항하는 힘이 생기게 되므로 쿠션 면적을 고려하여 허용 응력, 즉 저항력을 계산하면 4.13 MPa 임을 알 수 있다.

2.2 쿠션의 성형방법에 따른 물성

앞서 언급하였듯이 구동 범위에 대한 신뢰성을 높이기 위해 브라켓에 가해지는 충격을 완화시키기 위한 쿠션의 소재로 PTMG가 사용되고 있다. 이 PTMG는 여러 가지 첨가제를 일정한 비율로 배합하여 만들어진 혼합물의 형태이기 때문에 표준화된 물성을 파악하기 어렵고, 성형방법에 따라서 물성이 상이하게 나타나기 때문에 물리적인 실험을 수행하지 않을 경우 기계적인 물성을 파악할 수 있는 방법이 없다[5]. 대표적인 성형방법으로 압축성형방식과 사출성형방식이 사용되고 있는데[6, 7], 사출성형방식은 고체화된 펠릿(pellet) 소재를 열을 이용해 용융시키고 사출장비를 통해 금형에 주입한 후 냉각하는 생산 공정을 사용한다. 이와 달리 압축성형방식은 액상형 소재를 사용하여 가열된 금형에 붓고 성형 소재가 경화될 때까지 열과 압력을 유지하는 생산 공정을 채택하고 있다.

이 연구는 고 탄성체 성형방식으로 사용되고 있는 사출성형방식과 압축성형방식이 쿠션의 물성에 미치는 영향을 분석하기 위해 성형방법에 따른 고리형 시편을 제작하고 KS M 6518 가황 고무 물리 시험 방법 [8]을 채택하여 시험을 수행하였다. 시험 항목으로 경도(Hs)와 반발탄성을 선택하였다. 물성치를 측정하기 전에 먼저 시편의 경도를 측정하여 시편 간의 오차가 최소가 되도록 한 후[5] 반발탄성을 확인하였다. 경도 시험은 시편의 표면을 시험기에 거치한 후 시험기의 누름 바늘이 스프링 압력에 의해 되돌아오는 거리를 측정하였으며, 반발탄성의 확인을 위해 350g 철봉을 쿠션에 4회 떨어뜨렸을 때 반발하는 높이를 측정하였다. 쿠션의 물성은 <Table 1>에 나타난 것처럼 같은 재질을 사용하더라도 쿠션의 성형 방법에 따라 물성이 상이함을 알 수 있다.

Table 1 Comparison of injection and compression molding method

Identification	Hardness(-)	Rebound resilience(%)
Injection	91	48
Compression	92	60

실험 결과, 압축성형방식이 사출성형방식에 비해 반발탄성이 더 우수함을 확인할 수 있다. 여기서 반발

탄성은 순간적으로 쿠션이 변형된 후 빠르게 원형으로 되돌아가는 능력을 말한다. 복합 연막탄 구동 장치에서 오작동이 발생할 경우 쿠션에 에너지가 가해지게 되고 회복하지 못한 에너지 일부는 쿠션 내에서 열의 형태로 변형된다. 또한 쿠션의 물리적 특성으로 하중과 이에 따른 변형은 비선형적인 관계를 가지며, 쿠션에 하중을 가하였다 제거하면 쿠션에 하중을 가할 때와는 다른 히스테리시스 성질을 보인다[9]. 특히 하중을 가할 때와 가하지 않을 때의 차이는 쿠션 내부에 열로 축적되어 일의 양에 대응하는 발열과 영구 줄임 등의 원인을 제공하게 된다. 즉, 반발탄성 값이 높은 것은 쿠션 내부에 발생하는 열에너지가 적다는 것을 의미한다[10]. 반면, 반발탄성 값이 낮은 쿠션은 압력이 가해짐에 따라 고무 내부에서 열의 발생량이 크고, 열은 일반적으로 고무의 물성, 즉 쿠션 기능을 열화시키는 경향이 있다[11]. 또한 반발탄성이 높은 쿠션은 응력이 집중될 경우 충격 응력을 흡수 및 분산시키고 쿠션 내부에 균열이 생성되거나 진행되는 것을 억제하는 등 초기 균열의 발생을 지연시킨다[12, 13]. 마지막으로 구동 제어장치의 오동작에 따른 발사대 초과 구동이 발생할 때 반발탄성이 높은 쿠션은 이탈을 방지하는 동시에 구동범위 내로 장치를 빠르게 복귀시키는 스톱퍼(stopper) 역할을 효과적으로 수행할 수 있다. 따라서 발사 장치에 설치되는 쿠션의 최적 성형 방식을 결정하기 위해서 제 2장에서 제시하는 허용 응력을 만족하는 동시에 발사 장치 회전부가 발사 구동 범위를 벗어났을 때 효율적으로 대응할 수 있도록 반발탄성이 좋은 성형방식을 고려해야 함을 알 수 있다. 위 두 가지 조건을 만족하는 최적의 성형방식을 결정하기 위해 파괴시험 중 한 방법인 파손압력시험을 통해 사출성형방식을 적용한 쿠션과 압축성형방식을 적용한 쿠션의 비교 시험을 수행하였다.

3. 비교 시험

사출성형방식의 쿠션과 압축성형방식의 쿠션을 비교하기 위해 파손 압력 시험을 적용하여 외력에 대한 충분한 내부응력이 확보되었는지 확인해 보았다. 비교 시험은 <Fig. 4>와 같이 압축 시험기를 이용하여 수행하였다.

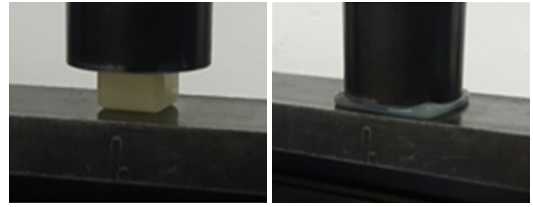


Fig. 4 Image of failure pressure test

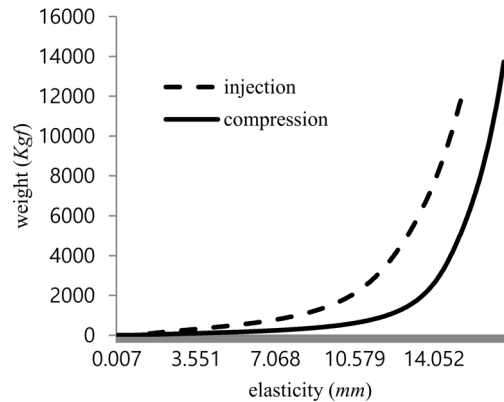




Fig. 5 Elasticity of cushion

제 2장에서 산출한 허용 응력이 4.13 Mpa 이므로 각 쿠션에 4.13 MPa 까지 하중을 가한 후 쿠션의 복원력을 확인하였다. 시험 결과 두 종류의 쿠션 모두에서 이상이 없었다. 다음으로 <Fig. 5>와 같이 쿠션이 파손될 때까지 압축 응력을 가하여 쿠션의 변형률을 확인해 보았다. 파손압력시험에 따른 응력-변위 그래프 추이를 볼 때 압축성형방식의 쿠션이 사출성형방식의 쿠션에 비해 고탄성영역에서 더 완만하게 하중이 증가하며, 사출성형방식 쿠션의 경우 변위 11.4 mm 에서, 압축성형방식의 쿠션은 14.7 mm 의 하중에서 탄성 거동이 급격히 증가한다.

또한 <Table 2>에서 보는 바와 같이 사출성형방식의 쿠션은 균열과 영구 변형이 발생하였고, 압축성형방식의 쿠션은 사출성형방식의 쿠션의 변형률에 비해 22.79% 감소됨을 알 수 있다. 여기서 각 쿠션의 변형률은 아래의 식 (4)를 통해 계산할 수 있다(여기서 T' 는 최초두께를 의미하며 T 는 압축 후의 두께를 의미한다). 따라서 압축성형방식의 쿠션은 사출성형방식의 쿠션보다 기계적인 물성이 우수함을 알 수 있다.

$$\text{변형률} = (T - T') \cdot 100 / T' \quad (4)$$

Table 2 Results of burst pressure test

	Load (Kgf)	Height of cushion(mm)		Strain (%)	Remark
		Before test	After test		
Injection molding	12863.0 (= 394.13MPa)	20.1	15.37	- 23.53	
Compression molding	13037.7 (= 399.55MPa)		19.95	- 0.74	

4. 운용 적합성 시험

압축성형방식을 적용한 쿠션이 거친 환경에서 운용에 적합한지 확인하기 위해 반복 하중 시험을 수행하였다. 시험을 수행하기 위해 압축성형방식의 쿠션을 <Fig. 6>과 같이 기계적 안전장치 조립체에 적용하고 회전부가 브라켓에 충돌할 수 있도록 구동범위를 제어하는 소프트웨어를 수정하였다.

쿠션의 운영 적합성을 살펴보기 위한 반복하중시험의 경우 특별한 규격이나 기준이 정해져있지 않기 때문에 실사용 환경인 야전 운용 환경을 고려하여 시험횟수를 결정하였다[14]. 야전 운용 환경 조건에서 발생하는 각종 고장정보를 참고하여 제어기의 소프트웨어 오동작 수를 산출하고 창 정비 연수 및 안전을 기준으로 <Table 3>과 같은 조건을 결정하였다. 여기서 상세한 구동 조건은 보안상OO 처리하였다. 시험 종료 후 쿠션의 손상여부를 확인한 결과 균열 등의 이상이 없음을 확인하였다 따라서 압축성형방식의 쿠션은 K2 전차의 수명주기 동안 외부로부터 받는 하중에 대해 신뢰할 수 있음을 알 수 있다.



Fig. 6 Image of cyclic load test

Table 3 Condition of cyclic load test

Input Value	Mechanical limited angle(°)	Cycle(n)
0° → +90°	±00	100
0° → -90°	±00	100

5. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구는 복합 연막탄 발사 장치에 부착되는 쿠션의 기계적 요구 물성을 도출하였으며, 쿠션의 성형방식에 따른 물성을 비교하기 위해 파손 압력 시험과 반복 하중 시험을 수행하였다. 우선 기계적 안전장치 조립체에 적용된 쿠션의 요구 물성을 도출하기 위해 모터의 구동 토크와 감속비, 접촉반경 그리고 쿠션의 면적을 고려하였으며, 이를 통해 4.13 MPa 이상의 허용응력을 산출하였다. 다음으로 반발탄성시험을 통해 압축성형방식으로 제작된 쿠션이 사출성형방식으로 제작된 쿠션보다 우수한 반발탄성 값을 가지고 있음을 확인하였다. 다음으로 파손압력시험을 통해 사출성형방식의 쿠션과 압축성형방식의 쿠션에 대한 비교 시험을 수행한 결과, 사출성형방식의 쿠션에서 균열과 영구 줄임 변형이 발생함을 확인하였으며 압축성형방식의 쿠션은 균열이 발생하지 않았으며 영구 줄임 변형률이 사출성형방식의 쿠션에 비해 22.79% 감소되었음을 알 수 있었다. 마지막으로 복합 연막탄 발사 장치에 압축성형방식의 쿠션을 부착하여 반복 하중 시험을 평가한 결과 전차의 수명주기 동안 외부로부터 받는 하중 조건에 대해 신뢰성 기준을 만족함을 보였다.

향후 연구 방향은 다음과 같다. 우선 쿠션의 신뢰성에 대해 합의된 표준 혹은 규격에 대한 연구가 필요하다.

이 연구에서는 군의 운용 환경을 고려하여 시험 방법을 결정하였으나 좀 더 세밀한 연구가 필요하다. 다음으로 쿠션의 경우 정확한 교환 기준에 대한 정의가 부족한 상태이다. 따라서 쿠션 종류에 대한 신뢰성 시험을 수행하여 효율적인 창 정비 기준을 제시할 필요가 있다.

References

- [1] Park, G. C. and Ha, J. S. (2009). "L-band Pulsed Doppler Radar Development for Main Battle Tank". The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 20, No. 6, pp. 580-588.
- [2] Lee, H. K. and Kim, J. B. (2014). "Prediction of Active Protection Performance of a Plate". The Korean Society of Mechanical Engineers, No. 2, p. 169.
- [3] Koo, B. M., Choi, S. J., and Choi, J. K. (2006). "Development of a Precision BLDC Servo Position Controller for Composite Smoke Bomb Azimuth Driving System". The Korean Institute of Maritime Information and Communication Sciences, Vol. 10, No. 3, pp. 467-472.
- [4] Park, Y. H. and Cho, C. G. (1998). "Synthesis and Characterization of PBS-PTMG Segmented Block Copolymer". The Polymer Society of Korea, Vol. 22, No. 4, pp. 559-569.
- [5] Woo, C. S., Park, H. S., and Lee, G. A. (2008). "Physical Test and Finite Element Analysis of Elastomer for Steel Rack Tube Forming". The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 43, No. 3, pp. 173-182.
- [6] Lee, J. M., Kim, B. M., and Ko, D. C. (2016). "CFRP Compression Forming Technology". The Korean Society for Technology of Plasticity, Vol. 25, No. 3, pp. 203-208.
- [7] Lee, Y. C. (2013). "The Improvement of Weldline and Flow mark Defection by using Injection Molding Analysis". The Korean Society of Precision Engineering, Vol. 30, No. 12, pp. 1295-1301.
- [8] The Korea Agency for Technology and Standards. (2006). "KS M 6518, Physical Test Methods for Vulcanized Rubber". pp. 3-20.
- [9] Yoo, S. R., Ju, J. H., Choi, S. J., and Kim, D. M. (2016). "Non Linear Viscoelastic Constitutive Relation of Elastomers for Hysteresis Behavior". The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 40, No. 4, pp. 353-362.
- [10] Sohn, B. Y. and Park, C. Y. (1997). "Estimation of Loss Energy from the Measurement Returning Time of Rebound for Carbon Black-Filled Natural Rubber Compounds". The Korean Institute of Chemical Engineers, Vol. 35, No. 2, pp. 154-161.
- [11] Kim, Y. S., Beak, U. K., and Jung, H. C. (1999) "The Study of Track Rubber Parts on Heat Generation Mechanism". The Korean Society For Power System Engineering, pp. 150-156.
- [12] Park, T. S. and Lee, Y. S. (2006). "Behavior of High-elastic Stress Absorbing Interlayer for Reflective Cracking Resistance". Korean Society of Civil Engineers, Vol. 26, No. 3, pp. 445-451.
- [13] Lee, K. Y. and Baik, W. C. (1990). "Stress Analysis and Fatigue Failure of Rubber in Automobile". The Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 12, No. 2, pp. 11-15.
- [14] Yoon, H. J., Nam, Y. W., and Kim, K. R. (2016). "A Study on the Impact Resistance Improvement of Reducer by Impact Load". The Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 18, No. 4, pp. 591-596.