

자동포용 주퇴복좌장치의 해석모델 개발 사례

노대경 · 강영기 · 지재도 · 박진생 · 장주섭*

Case of Developing Analysis Model for Recoil System for Automatic Gun

Dae-Kyung Noh · Young-Ky Kang · Jae-Do Ji · Jin-Saeng Park · Joo-Sup Jang*

ABSTRACT

Recoil system for 40mm automatic gun is a device developed to absorb the shock of explosion. It is impossible to conduct pinpoint strike due to recoil if very high explosive shock, which is generated when an automatic gun fires shells, can't be absorbed. This study covers development and verification of analysis model for recoil system by utilizing a multi-domain software. The research process is as in the following. First, an analysis model is developed to verify damping characteristics through understanding of design intention. Second, environment which is identical to a field test is set up on analysis tool after putting explosive force that is measured through the test into the analysis model. Finally, the analysis model for recoil system using the multi-domain software is verified if it has effectiveness with a comparison between internal pressure of the recoil system along with displacement of gun barrel and the field test result.

Key words : Recoil system, Explosive force, Force-Stroke curve, Force-Velocity curve, Effectiveness, SimulationX

요약

자동포용 주퇴복좌장치는 사격충격을 흡수하기 위한 목적으로 개발된 장치이다. 만약 자동포에서 탄자가 발사 될 때 발생하는 매우 높은 수준의 사격충격을 흡수하지 못한다면 반동에 의하여 정밀한 타격은 불가능해진다. 본 연구에서는 이러한 역할을 하는 주퇴복좌장치의 해석모델을 멀티도메인 소프트웨어를 활용하여 개발하고 검증하는 것을 다룬다. 연구의 진행과정은 다음과 같다. 우선 설계의도를 파악하여 해석모델을 개발하고 기본적인 감쇠특성을 확인한다. 그리고 필드테스트에서 얻은 사격충격력을 해석모델에 부여하여 필드테스트와 동일한 환경을 해석도구 상에 구축한다. 최종적으로 주퇴복좌장치의 내부압력과 포신의 변위를 필드테스트 결과와 비교하여 멀티도메인 소프트웨어를 활용한 주퇴복좌장치의 해석모델이 유효성을 갖는지를 검증한다.

주요어 : 주퇴복좌장치, 사격충격력, 감쇠력-변위 선도, 감쇠력-속도 선도, 유효성, 시뮬레이션엑스

1. 서론

국방력 증강은 국가적으로 매우 중요한 사안이다. 이러한 국방력 증강의 목적아래 많은 연구진들은 다양한 연구를 수행하고 있으며, 특히 직접적인 전투력과 관련이 있

는 무기에 대한 연구들이 주목받고 있다.

본 논문에서 다루는 주퇴복좌장치는 자동포에 장착되어 사격에 의한 충격을 흡수하는 목적으로 개발된 장치이다. 자동포는 활용도가 매우 높은 대표적인 화기이기 때문에 이에 장착된 주퇴복좌장치의 안정적인 성능이 동반되어야 함은 당연하다고 할 수 있다. 만약 자동포의 포신에서 탄약의 추진제가 점화될 때 발생하는 매우 높은 수준의 사격충격을 흡수하지 못한다면 반동에 의하여 정밀한 타격은 불가능해진다¹⁻³⁾.

자동포용 주퇴복좌장치는 사격충격에 간접적으로 노출

Received: 2 November 2015, **Revised:** 20 November 2015, **Accepted:** 27 November 2015

*Corresponding Author: Joo-Sup Jang

E-mail: jjs1@gachon.ac.kr

Gachon University, Department of Mechanical Engineering

되어 있기 때문에 내구성을 최우선에 두고 개발을 진행해 왔다. 내구성을 염두에 두다보니 전자적인 제어시스템이 배제된 순수기계식을 채택하게 되었다^{4,5)}.

순수기계식 주퇴복좌장치는 일반적인 속업소버의 원리와 같이 오일에 유동저항을 줌으로써 감쇠력을 확보하는 방식으로 설계되어 있다. 과거 이러한 방식의 주퇴복좌장치의 감쇠성능을 검증하고 분석하기 위해서는 필드테스트와 CFD를 활용한 해석기법을 주로 사용해왔다. 실제 필드테스트는 탄약의 추진제 연소압력을 이용하기 때문에 안정성이 검증되지 않은 프로토타입의 주퇴복좌장치를 시험하기에는 너무나도 많은 위험성이 따른다. 그리고 CFD를 활용한 분석방법 역시 오일의 유동형상을 분석하는 것으로는 적합하나 분석시간이 매우 많이 소요되고, 포신의 동적거동과 연동하여 볼 수 없기 때문에 감쇠성능 분석에 한계가 있다⁶⁾.

주퇴복좌장치의 감쇠성능을 다양한 케이스에서 분석하려면 두 가지 조건을 만족시켜야 한다. 우선 해석속도가 빨라야하고, 두 번째로는 동적거동과 유동저항에 의한 감쇠효과를 동시에 볼 수 있어야 한다⁷⁾. 본 연구에서는 이러한 두 가지 조건을 충족시킬 수 있게 멀티도메인 해석 도구를 활용하여 해석모델을 개발하고 필드테스트 결과와의 상대오차를 비교하여, 멀티도메인 소프트웨어를 활용한 주퇴복좌장치의 해석모델이 유효성을 갖는지를 검증할 것이다.

과거 주퇴복좌장치의 연구사례에서는 실제 필드테스트의 결과와 해석결과를 비교하고 정량화하여 해석모델의 신뢰성을 판단한 연구는 없었으므로 타 연구와의 차별성을 갖는다.

해석모델 개발에 사용된 소프트웨어는 독일 ITI사에서 개발된 SimulationX이다. 이 소프트웨어는 대표적인 멀티도메인 해석도구이며 유압, 기계뿐만 아니라 전기, 전자, 열전달 등 다양한 분야를 융합하여 솔루션을 도출할 수 있다⁸⁾.

2. 주퇴복좌장치의 해석모델 개발

Fig. 1과 같이 포신은 격발할 때 주퇴행정을 하게 되고 그 후 복좌스프링에 의해서 복귀하게 된다. 주퇴행정을 할 때는 주퇴장치(shock absorber)에 의하여 감쇠력이 발생하여 반동을 완화시켜준다. 즉, 주퇴복좌장치는 대표적인 기계시스템인 MCK(질량, 댐퍼, 스프링)로 이루어져 있는 것이다. 스프링은 멀티도메인 해석도구에서는 강성만

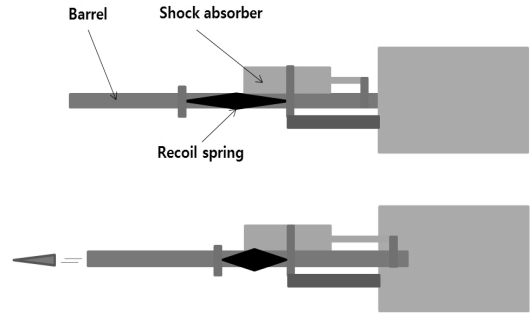


Fig. 1. Operation of recoil system by percussion

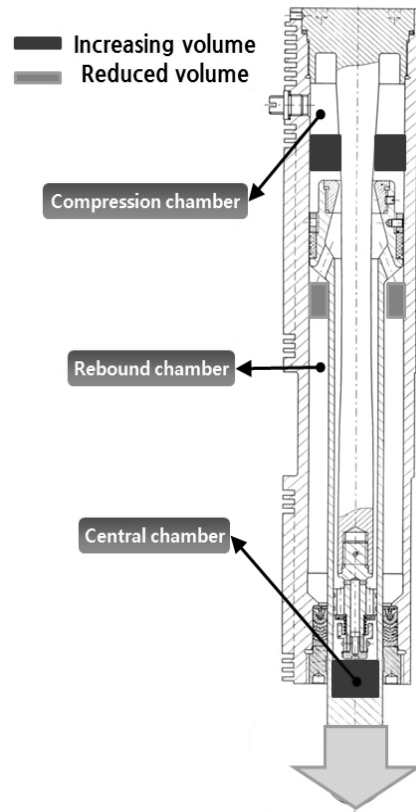


Fig. 2. Oil distribution (rebound) in shock absorber

입력하면 되므로 주요 거론요소에서는 제외하고, 모델링이 까다로운 주퇴장치에 대해서 포커스를 맞추고 연구를 진행하였다.

2.1 작동원리 및 설계의도 분석

Fig. 2는 주퇴장치의 모습을 나타낸다. 주퇴장치의 내부에는 오일이 가득 차 있으며 포신이 후퇴할 때 신장행

정을 하게 된다. 신장실에 가득 차있는 오일은 신장행정이 이루어짐에 따라 압축실과 중앙실로 나뉘어 이동하게 된다. 그림에서도 볼 수 있듯 줄어드는 체적은 작는데 늘어나는 체적은 크다. 즉, 줄어드는 체적에서부터 빠져나가는 오일의 양에 비해 늘어나는 체적이 크므로 빈 공간이 생긴다는 것이다. 이 빈 공간에서는 진공압력이 형성되게 된다. 압축실과 중앙실에는 진공압력이 형성된 상태에서 복좌가 이루어지는데, 진공압력이 제거될 때까지는 감쇠력이 발생하지 않는다. 감쇠력은 오일의 유동저항에 의하여 발생하는 것인데 진공압력이 형성된 빈 공간에서는 오일의 유동이 이루어질 수 없으므로 당연히 감쇠력이 발생하지 않는다. 자동차업체에서는 이러한 속업소버의 체적의 불균형에 의한 감쇠력 상실을 랙 현상이라고 부르며, 감쇠기의 성능에 치명적인 현상으로 간주한다⁹⁾. 자동차의 경우 주행 중에 쉽 없이 진동이 일어나기 때문에 이러한 구간이 존재하면 안 되지만 주퇴복좌장치는 상황이 다르다. 포신이 후퇴하고 나서 복좌할 때 랙현상이 일어나는 구간에서는 감쇠력이 발생하지 않기 때문에 오히려 복좌에 소요되는 시간을 단축시켜주는 역할을 한다. 즉 포신이 빨리 제자리로 돌아올 수 있게 해주는 설계이다.

2.2 해석모델 개발

앞 절에서 언급한 내용을 반영하여 개발한 주퇴장치의 해석모델은 Fig. 3이다. 이는 오일의 유동저항과 오일의 체적변화, 진공발생 체적 등을 반영한 모델이며, 진공체적이 압축될 때 오일과 공기의 혼입현상은 없는 것으로 가정하였다. 또한 운동방정식을 풀기위하여 오일과 공기 사이에 미소질량을 부여하였다. 만약 오일과 공기층 사이에 미소질량을 부여하지 않으면 뉴턴의 운동법칙(제2법칙: $F=Ma$)에 의하여 운동방정식이 성립되지 않기 때문에 신

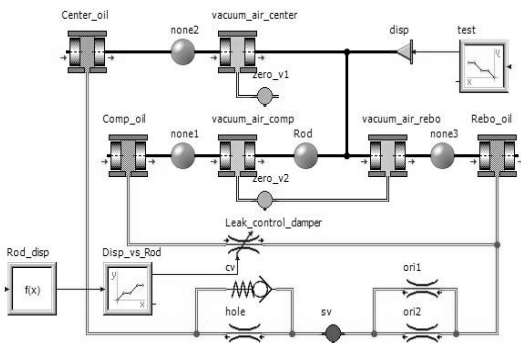


Fig. 3. Completed analysis model

장실의 오일이 압축실과 중앙실에 어떠한 비율로 유동되는지 볼 수 없다. 본 해석모델에서는 신장 시 체적의 불균형 변화로 형성된 공기층(수압면적)에 진공압력이 작용하여 신장실의 오일을 빨아들이는 원리를 반영하여 개발되었다.

3. 해석모델 유효성 검토

완성된 해석모델의 유효성을 확인하기 위해서는 먼저 주퇴장치가 감쇠기의 역할을 제대로 수행하는지에 대한 확인이 필요하다. 2장에서 언급하였던 설계의도에 맞게 랙 현상이 일어나는지에 대한 확인이 필요하며, 감쇠력선도를 도출하여 주퇴장치의 감쇠특성을 정의해야한다.

감쇠특성을 나타내는 그래프는 일반적으로 자동차업체에서 속업소버의 특성을 정의하고자 할 때 보편적으로 사용하는 F-S(Force-Stroke)선도와 F-V(Force-Velocity)선도의 작도법을 활용한다. 이렇게 주퇴장치의 감쇠특성을 확인한 후 필드테스트에서 측정한 탄약의 추진제 연소압력에 의한 사격충격을 그대로 해석모델에 부여하여 주퇴장치의 내부압력거동과 포신의 변위를 시험결과와 비교하고 정량화시켜서 유효성을 판별할 것이다. 유효성 판단 기준은 주퇴장치의 최대 감쇠력 수준을 나타내는 내부압력의 피크가 상대오차 10%에 들어와야 하며, 격발 후 포신이 후퇴하고 복귀하는 시간 역시 상대오차 10%에 들어오는 것을 목표로 한다⁷⁾.

3.1 주퇴장치의 감쇠특성 확인

Fig. 4는 주퇴장치의 로드를 사인파형으로 왕복하였을 때의 감쇠력을 나타낸다. 가진변위를 유지하고 주파수를

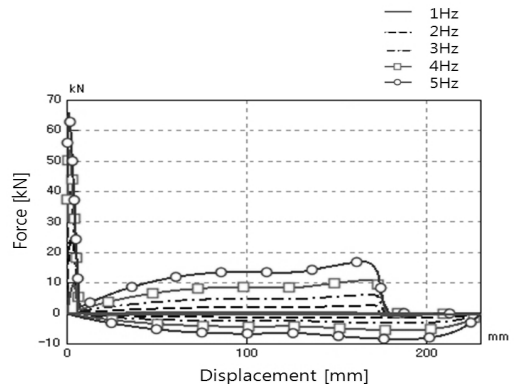


Fig. 4. Force-Stroke curve

1~5Hz로 높여가며 특성을 확인하였으며, 이를 F-S선도라고 한다. 변위를 고정하고 주파수를 높였다는 것은 최대 가진속도를 증가 시켰다는 의미를 가진다. 가진속도가 증가할수록 감쇠력도 증가하는 감쇠기의 특성을 잘 보여준다. 이 선도는 변위 0mm에서 시작되어 반시계방향으로 그려지며, 최대변위에 도달 후 돌아올 때 감쇠력이 상실되는 랙 현상이 일어나는 것을 볼 수 있다. 이 구간은 복좌 시 가속구간이 되며, 해석모델에 설계의도가 잘 반영된 것을 알 수 있다. 그리고 변위 0지점으로 복귀할 때 감쇠력이 대단히 높은 수준까지 올라가는 것을 볼 수 있다. 이는 신장실에 있던 오일이 중앙실로 이동하였다가 다시 신장실로 복귀할 때 나타나는 현상이다. 중앙실은 Fig. 5와 같이 체크밸브가 달려있기 때문에 신장할 때는 중앙실로 오일이 쉽게 이동할 수 있지만, 복귀할 때는 1.4mm의 직경을 갖는 아주 작은 오리피스로만 유동이 허용된다. 복좌스프링에 의해 발생할 수 있는 포신에 가해지는 충격을 잡아주고자 하는 설계자의 의도가 잘 반영된 해석결과이다. 이 구간에서는 감쇠력의 특성이 많이 바뀌기 때문에 ‘부 감쇠영역’이라 따로 지칭하였다. F-S선도로부터 나오는 각 주파수별 최대감쇠력으로 F-V선도를 작도하는데, 부 감쇠영역을 지정하지 않으면 부 감쇠영역의 특성만 반영된 F-V선도가 작도된다. 그러한 오류를 범하지 않기 위하여 F-V선도에는 주 감쇠영역과 부 감쇠영역을 구분하여 Fig. 6에 나타내었다.

3.2 시험결과와의 비교

앞에서 주퇴장치가 감쇠의 기능을 함을 규명하였다. 하지만 실제 시험과의 비교분석이 없으면 본 해석모델은 추후 활용여부가 불분명해진다. 이에 주퇴복좌장치의 필드

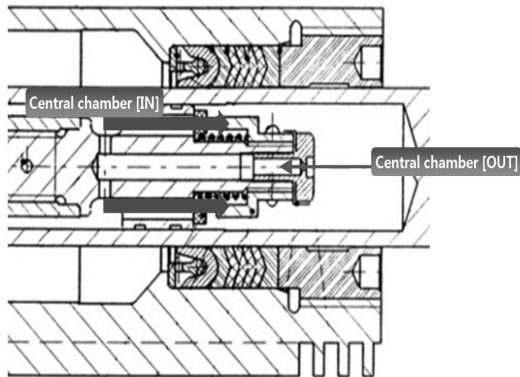


Fig. 5. Oil flow in central chamber by check valve

테스트를 수행하여 해석모델과 결과를 정량적으로 비교하여야 한다. 시험에서 계측한 데이터는 포신의 변위와 주퇴장치 내부(신장실, 압축실)의 압력, 탄약의 추진제 연소압력을 계측하였다. 탄약의 추진제 연소압력으로 포신에 가해지는 힘을 산출하였고, 이를 해석모델에 부여하여 시험과 동등한 사격충격조건을 구현하였다. Fig. 7은 이러한 포신(주퇴질량)에 가해지는 사격충격력을 보여준다. 사격충격력이 포신에 가해지면 포신은 후퇴하며 복좌스프링은 압축이 된다. 포신의 후퇴와 함께 주퇴장치는 신장되며 내부 오일은 신장실로부터 압축실과 중앙실로 나누어 들어간다. 오일이 채워지지 않는 공간에는 진공이 형성되며 후퇴가 끝나고 포신이 원래 위치로 복귀할 때 진공으로 인한 감쇠력 상실구간이 나타나게 된다. 즉, 주퇴장치의 신장실의 내부압력은 포신이 움직인 직후부터 압력이 형성되지만 압축실의 압력은 진공 때문에 일정한 지연시간을 가지고 압력이 형성된다. 그리고 포신이 거의 원위치로 되돌아왔을 때 부 감쇠구간에 의하여 급격한 감속이 이루어진다.

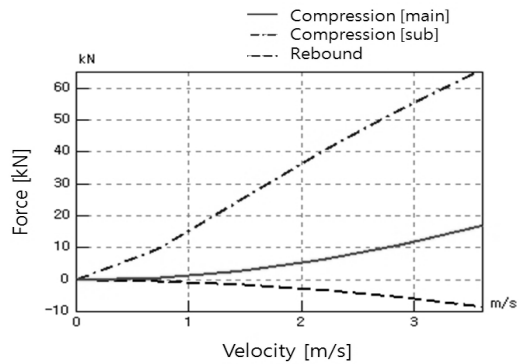


Fig. 6. Force-Velocity curve

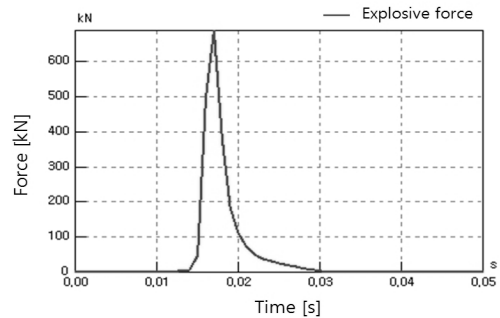


Fig. 7. Explosive force that is measured through field test

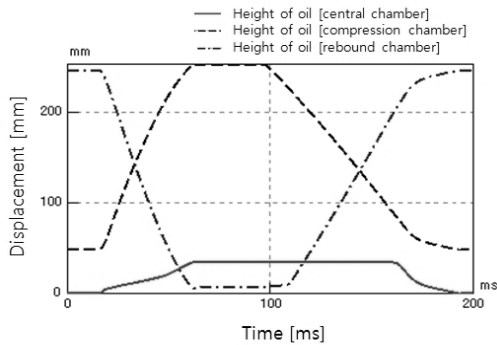


Fig. 8. Change of height of oil in each chamber

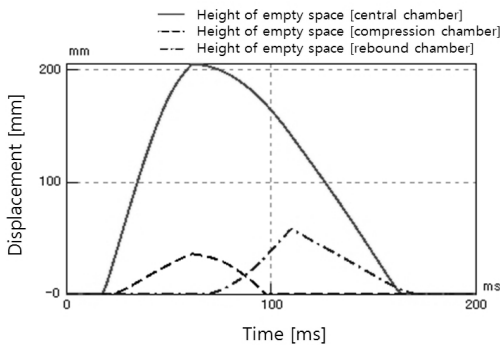
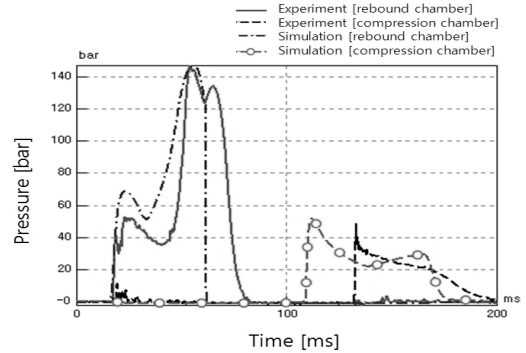


Fig. 9. Change of height of empty space in each chamber

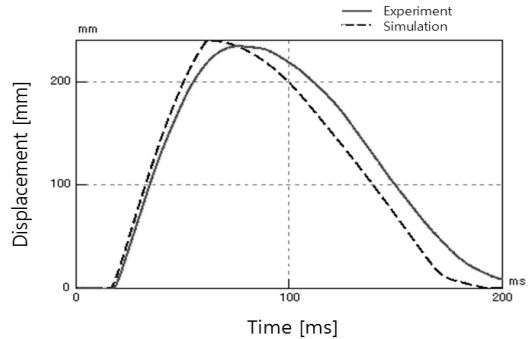
Fig. 8은 격발 후 주퇴장치에서의 오일의 거동을 나타내는 그래프이다. 각 실에 오일의 높이를 보여주며, 신장실에 있던 오일의 대부분은 압축실로 이동하고 중앙실에는 약간의 오일이 채워지는 것을 볼 수 있다. 그리고 오일은 복좌동작에서 원위치로 돌아가게 된다.

Fig. 9는 각 실에 오일이 채워져 있지 않은 빈 공간의 높이로 보여주는 그래프이다. 격발 후 중앙실의 대부분은 오일이 채워져 있지 않은 상태를 볼 수 있다. 중앙실에 많은 오일이 채워진다면 그것은 복좌를 크게 지연시키는 요소가 되기 때문에 이는 올바른 결과라고 볼 수 있다.

Fig. 10은 필드테스트에서 센서로 계속하였던 주퇴장치의 내부 압력과 포신의 변위에 대하여 해석결과와 비교한 것이다. 감쇠력의 수준을 나타내는 압력의 피크는 해석과 시험결과가 거의 동일한 모습을 보여준다. 매우 짧은 시간의 거동에서 이정도로 최고압력의 수준이 잘 일치한다는 것은 해석모델의 구형이 잘되었다는 것을 의미한다고 할 수 있다. 다만 압력이 형성되고 소진되는 시점에서 차이가 있는데, 이는 시험에서는 오일에 공기가 혼입되어 응답지연이 일어나지만 해석에서는 혼입현상을 구



(a) Pressure behavior in shock absorber



(b) Displacement of gun barrel

Fig. 10. Comparison with test and analysis

Table 1. Relative tolerance table

	Rebound chamber pressure [bar]	Compression chamber pressure [bar]	Return time [ms]
Experiment	147.12	48.46	185
Simulation	146.70	51.69	172
Relative tolerance [%]	0.29	6.67	7.03

현하지 못한 결과로 판단된다. 포신의 변위를 살펴봐도 상당히 해석과 시험결과가 유사함을 알 수 있다. 이러한 시험과 해석결과를 정량적으로 비교하여 Table 1에 나타내었다. 포신의 복귀시간은 부 감쇠영역에 진입하기 전까지의 시간을 기준으로 삼았다. 본 주퇴복좌장치가 적용되는 자동포는 연속사격 시 대부분 주 감쇠영역에서만 스트로크가 발생한다. 그렇기 때문에 부 감쇠영역의 시작점이 포신의 복귀시간의 기준점이 된다.

해석모델의 유효성을 판단하기 위한 기준으로 삼았던 조건인 상대오차 10%안에 해석결과가 들어오므로 본 해

석모델은 유효성을 갖는다.

4. 결 론

본 연구는 40mm 자동포에 사격충격을 완화시키기 위한 목적으로 장착된 주퇴복좌장치의 해석모델을 개발하고 유효성을 검토하는 내용을 다룬다. 성과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 멀티도메인 해석도구를 활용하여 주퇴복좌장치의 모델링을 수행하였다.
- (2) 주퇴복좌장치가 정상적으로 감쇠역할을 할 수 있는지 해석도구를 활용하여 검증하였다.
- (3) 격발 필드테스트를 수행하였고 탄약의 추진제 연소압력을 해석모델에 반영하여 필드테스트의 결과와 비교 분석하였다.
- (4) 감쇠력의 수준을 나타내는 신장실과 압축실 압력의 피크는 평균상대오차 3.48%로 잘 일치하였으나, 압력이 형성되고 소진되는 시점에서 차이를 보였다.
- (5) 사격충격에 노출된 포신의 변위는 시험결과와의 상대 오차 7.03%로 잘 일치하는 모습을 보여줬다.

본 연구에서 목표로 삼았던 유효성 판단기준에 대해서 충족하는 결과를 보여줬으므로 연구의 성과물인 주퇴복좌장치의 해석모델은 추후 새로운 주퇴복좌장치의 개발에 활용이 가능할 것으로 사료된다. 그러나 오일과 공기의 혼입현상을 구현하지 못함으로서 발생한 압력형성 및 소진 시기의 불일치현상에 관한 심화연구가 필요하다.

References

1. T.H. Yang, Y.S. Lee, K.S. Lee, S.B. Jun, K.J. Kang (2012), "A Study on Parameters of Soft Recoil Mechanism for Reduction of Recoil Force", Journal of the Korea

- Society of Mechanical Engineers A, Vol. 36, No. 7, pp. 823-828.
2. Y.S. Kim, S.S. Kim, K.U. Cha, M.G. Noh (2011), "Study on Designing Recoil System with Friction Springs", Journal of the Korea Society of Mechanical Engineers A, Vol. 35, No. 4, pp. 367-374.
3. C.B. Shin, J.S. Bae, J.H. Hwang, K.J. Kang, S.T. Ahn, T.H. Han (2008), "Control of a Soft Recoil System for Recoil Force Reduction", Journal of the Korea Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 7, pp. 764-774.
4. D.K. Noh, J.S. Jang (2013), "Shape Design Sensitivity Analysis Case of the Valves installed in the Hydraulic Driving Motor", Journal of the Korea Society for Simulation, Vol. 22, No. 3, pp. 81-87.
5. D.K. Noh, J.S. Jang (2012), "Dynamic Analysis of the Valves installed in the swash plate type of Hydraulic Driving Motor", journal of Korea Society of Fluid Power & Construction Equipments, Vol.9, No.4, pp. 62-69.
6. J.W. Yun (2004), "CFD Analysis on the Continuous and Variable Damping Characteristics of a Semi-Active Shock Absorber", Journal of the Korea Society of Automotive Engineers, Vol. 12, No. 2, pp. 101-108.
7. D.K. Noh, J.S. Jang, W.J. Seo (2014), "Analysis of Design Parameter Characteristics for Automobile Passive Dampers", Journal of the Korea Society of Tribologists & Lubrication Engineers, Vol. 30, No. 1, pp. 46-51.
8. Y.H. Yoon, J.S. Jang (2012), "SimulationX, Multi-domain Simulation and Modeling tool for the Design, Analysis, and Optimization of Complex systems", journal of Korea Society of Fluid Power & Construction Equipments, Vol. 9, No. 1, pp. 56-69.
9. D.K. Noh, W.J. Seo, J.S. Yun, J.S. Jang (2015), "Performance Comparison Analysis of Frequency Sensing Shock Absorber and Passive Shock Absorber", Journal of the Korea Society of Automotive Engineers, Vol. 23, No. 4, pp. 380-387.



노 대 경 (nointown@hanmail.net)

2012 가천대학교 기계자동차공학과 공학사
 2014 가천대학교 기계공학과 공학석사
 2014~현재 가천대학교 기계공학과 박사과정

관심분야 : 건설기계 및 산업기계의 유압계통 동역학 모델링&시뮬레이션



강 영 기 (kyg@soosan.co.kr)

2001 영남대학교 기계공학부 공학사
 2001~2014 (주)수산중공업 기술연구소
 2015~현재 (주)수산중공업 R&D센터 BR개발팀장
 2015~현재 가천대학교 기계공학과 석사과정

관심분야 : 유공압건설기계 설계, 유공압시뮬레이션, 시험/계측, 표준화



지 재 도 (jjjd@hisntd.com)

1983~현재 S&T중공업 연구소 수석연구원

관심분야 : 주퇴복좌장치를 활용한 포신장치 진동/충격 최소화 기술 개발



박 진 생 (parkdu4@dtaq.re.kr)

1984 부산대학교 기계공학과 공학사
 2000 부산대학교 기계공학과 공학석사
 1989~현재 국방기술품질원 선임연구원

관심분야 : 전차 및 장갑차 포신 주퇴복좌장치 모델링&시뮬레이션



장 주 섭 (jjs1@gachon.ac.kr)

1987 경희대학교 기계공학과 공학사
 1989 경희대학교 기계공학과 공학석사
 2000 경희대학교 기계공학과 공학박사
 1988~1996 만도기계 중앙연구소 선임연구원
 1996~현재 가천대학교 기계공학과 교수

관심분야 : 자동차 및 건설기계 부분의 유압장치의 액추에이터 설계와 모델링&시뮬레이션