

초점탄성재료의 다중 압출에 의한 착륙선 충격완충 해석

이춘우^{1,†} · 김인걸²¹한국항공우주연구원²충남대학교Analysis on Lander Shock Absorbing by
Multi-Stage Extrusion of Hyper-Viscoelastic MaterialChoon Woo Lee^{1,†}, In-Gul Kim²¹Korea Aerospace Research Institute²Chungnam National University

Abstract

As an alternative of the existing honeycomb shock absorbing device, the new approach on shock absorbing design using the extrusion of hyper-viscoelastic material such as silicon rubber is studied in this paper. The strain energy and stress-strain characteristic of viscoelastic material at extrusion process through the metered orifice has a similarity with the honeycomb core for maximizing shock absorbing capability. And in order to evaluate the design feasibility of this device and to understand the shock absorbing mechanism of energy transformation, finite element analysis and quasi-static compression test of the multi-stage extrusion shock absorber are examined in this paper.

초 록

기존 알루미늄 하니콤 코어를 이용한 착륙선 충격완충장치의 대체 방안으로서 실리콘 고무와 같은 초점탄성 재료의 다중압출 특성을 이용한 새로운 개념의 충격 완충장치를 고찰하였다. 초점탄성재료가 오리피스 단면을 통과하며 압출되는 과정에서 재료 변형에너지 및 하중-변위 특성이 기존 하니콤 코어 특성과 유사하여 충격 완충 성능을 극대화 할 수 있는 측면에서 유사성을 가지고 있음을 알 수 있었다. 본 논문에서는 충격완충장치의 설계 구현가능성을 평가하고, 에너지 변환을 통한 충격흡수 매커니즘을 이해하기 위하여 유한요소해석 및 준정적 압축시험 결과를 검토하였다

Key Words : Shock Absorbing Device(충격완충장치), Hyper-Viscoelastic Material(초점탄성 재료), Lander(착륙선), Multi-Stage Extrusion (다중압출)

1. 서 론

우주 행성탐사용 착륙선은 궤도선과 달리 착륙환경에서 발생하는 높은 충격하중으로부터 탑재장비를 보호하고 착륙선 전복방지 및 연착륙(soft-landing)에 필요한 충격완충장치 설계 및 개발이 필수적이다. 일반적으로 자동차, 항공기 등 지상장비에 사용되는 유/공압식 충

격완충장치는 우주환경(저중력, 고진공, 극고/저온, 등) 하에서 오리피스(Orifice) 댐핑기능 저하, 유압오일 아웃가스(Outgass) 및 압축 공기 기밀상실, 극저온/고온 성능저하 등 많은 문제가 있음에 따라 적용이 불가능하다. 따라서 현재까지 대부분의 충격완충장치는 아폴로 착륙선(1969년)에서 사용한 알루미늄 하니콤 크러쉬(Crush) 설계를 그대로 준용하여 사용하였다.

본 연구에서는 착륙선 충격완충장치의 대체설계 방안으로 압출(Extrusion) 특성과 알루미늄 하니콤 크러쉬(Crush) 특성 간의 유사성에 착안하여, 고무, 실리콘

Received: Oct. 18, 2017 Revised: Dec. 28, 2017 Accepted: Dec. 28, 2017

† Corresponding Author

Tel: +82-42-860-2676, E-mail: lcw@kari.re.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

등과 같은 초점탄성(Hyper-Viscoelastic)재료를 다중 압출시켜 충격완충하는 장치를 고안하고, 설계 적용가능성(feasibility)을 검증하기 위하여 LS-Dyna 상용프로그램을 이용한 충격해석 및 실리콘 재료의 준정적압축 시험을 수행하고 그 결과를 검토하였다.

2. 기존 착륙선 충격완충장치 사례

현재까지 달 착륙에 성공한 착륙선은 구소련 Luna, 미국 Surveyor 및 Apollo, 중국 창어 3호가 있으며 모든 착륙장치 구조는 Fig. 1과 같이 Inverted Tripod 형(구소련 Luna, 미국 Surveyor)과 Cantilever형(미국 Apollo) 트러스 구조를 적용하였다.

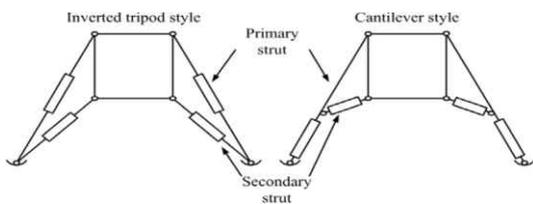


Fig. 1 Typical Truss Type for Lunar Lander

대표적인 트러스형 달착륙선 충격완충장치는 Fig.2와 같은 아폴로 착륙선 충격완충장치로서 주 지주 및 보조 지주 내부 카트리지에 알루미늄 하니콤 코어를 장착하여 충격하중을 하니콤 크러쉬(Crush) 소성변형 에너지로 흡수하는 방식으로 현재까지도 착륙선 설계에 준용하여 적용하고 있다[1].

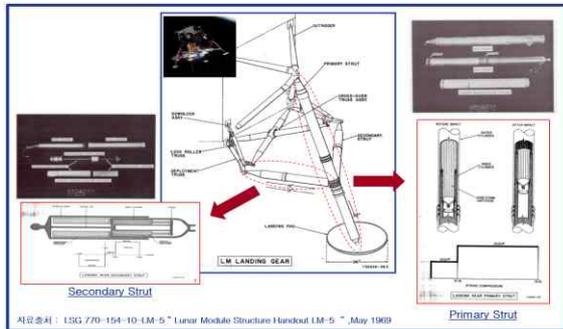
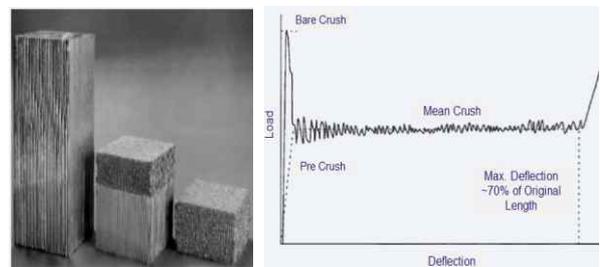


Fig. 2 Apollo Lander Shock Absorber[1]

착륙선 충격하중 흡수장치로 알루미늄 하니콤의 크러쉬 특성을 많이 적용하는 이유는 Fig. 3과 같이 알루미늄 하니콤은 길이의 최대 70%까지 일정한 크러쉬 하중으로 소성 변형됨에 따라 충격완충효율을 극대화할 수 있으며, 초기에 발생하는 Peak Load를 사전 크러쉬(Pre-Crush) 처리를 통해 제거할 수 있기 때문이다[2]. 또한, 구조가 간단하고 경량화 할 수 있음에 따라 중량대비 충격 완충효율 측면에서 가장 우수한 특성을 보이기 때문이다[3].



(a) Al Honeycomb (b) Crush Load vs Stroke
Fig. 3 Crush Strength of Al Honeycomb[4]

3. 압출 공정과의 유사성

압출(Extrusion)공정은 Fig. 4와 같이 수십~백톤의 압출장비를 이용하여 금속 블럭을 고온/고압하에서 작은 다이 공(hole)을 통하여 압출하여 봉이나 관, 일정단면을 가진 제품을 성형하는 기계가공 공정중의 하나이다.

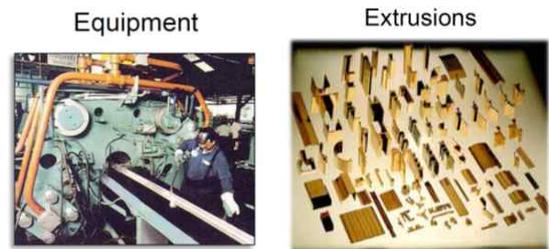
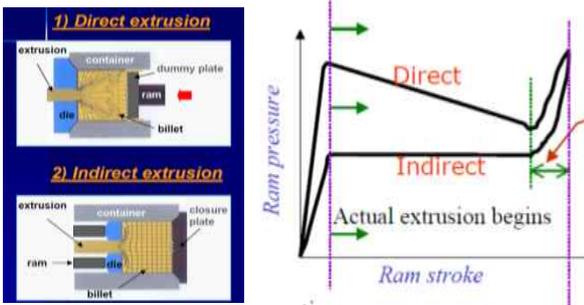


Fig. 4 Extrusion Equipment & Products

압출방향에 따라 직접(Direct) 압출법과 간접(Indirect) 압출법이 있으며 직접압출법은 금속 빌릿을

램(ram)하중 방향으로 압출하는 방식이며, 간접압출법은 램(ram)하중 반대방향으로 압출하여 금속 빌릿과 컨테이너 마찰이 발생하지 않아 직접압출에 비해 낮은 램 압력(Ram Pressure)를 가진다. 압출방식에 따른 전형적인 압출하중 선도는 Fig. 5 와 같다



(a) Direct/Indirect Extrusion (b) Ram Pressure vs Stroke

Fig. 5 Direct/Indirect Extrusion & Ram Pressure

직접압출시, 램 압력(p)에 의한 압출 Power는 압출 챔버 내외부 마찰(Friction)와 압출재 소성변형 Power로 변환되어 Fig. 6과 같이 표현된다.

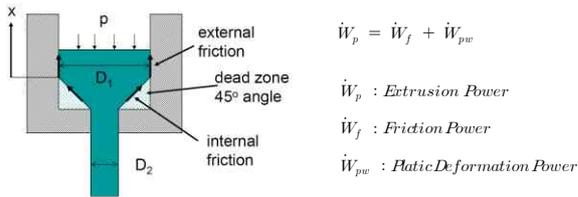


Fig. 6 Direct Extrusion & Ram Power

직접압출의 경우, 에너지평형 관계식을 이용하여 압출 압력(p)을 재료 유동응력(τ_{flow}), 압출비(D_1/D_2)함수로 다음 식(1)과 같이 간략화 할 수 있다.

$$\frac{p}{2\tau_{flow}} = 3.414 \ln \frac{D_1}{D_2} \quad (1)$$

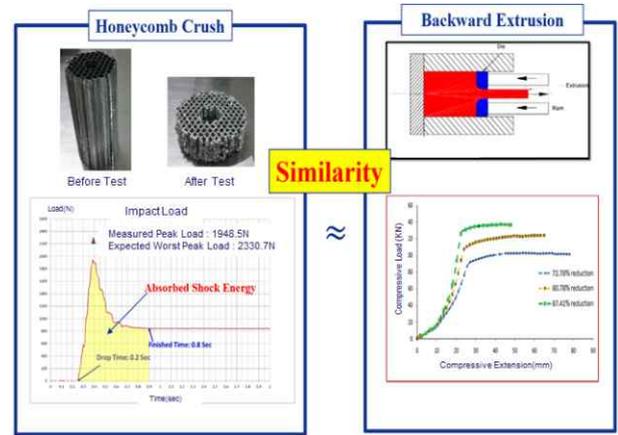
그러나, 압출 압력은 다이형상(다이각도, 곡률), 압출속도, 접촉면 마찰계수, 압출재료 특성, 압출재 온도, 압출 길이, 재료의 불균질 변형 등을 모두 고려할 경우, 해석적으로 정확히 예측하기 어려움에 따라 식(2)와 같이 간단한 경험식으로 일반화하여 적용한다.

$$p = \bar{Y} (a + b \ln R) \quad (2)$$

여기서, \bar{Y} 는 재료의 평균 유동응력(Average Flow Stress)를 의미하며, 압출 전후 소재 및 제품의 단면

적 압출비 $R = A_1/A_2 = D_1^2/D_2^2$ 이라고 하며, a와 b는 실험적으로 결정되는 재료상수로, 대략적인 값은 각각 0.8 및 1.2 ~1.5으로 주어진다.

압출하중을 해석적으로 구하는 기법으로는 1) 에너지법, 2) 자유물체 평형법(Slab Analysis), 3) 슬립선장 법(Slip-Line Field Theory), 5) 상계법 및 하계법(Upper Bound & Lower Bound Analysis) 등이 있다. 이와 같이 압출하중에 대한 해석적 검토결과 Fig. 7과 같이 알루미늄 하니콤 크러쉬 하중 특성과 간접압출 하중선도가 Heaviside Step 함수 형태로 매우 유사한 특성을 보임을 알 수 있었다[5-8].



(a) Honeycomb Crush Load (b) Extrusion Load

Fig. 7 Similarity between Honeycomb & Extrusion

4. 초점탄성(Hyper-Viscoelastic) 재료 모델

재료의 응력 및 변형률의 관계가 변형을 속도의 함수로 표현되는 점탄성(Viscoelastic) 특성과 비선형 대변형 구간에서도 탄성 복원되는 초탄성(Hyperelastic) 특성을 복합적으로 나타내는 재료를 초점탄성재료(Hyper-Viscoelastic Material)라고 한다.

4.1 초탄성 모델(Hyperelastic Model)

초탄성재료의 응력-변형률 구성방정식은 대변형 비선형 특성으로 인하여 후크의 법칙으로 단순히 정의되지 않으며 변형에너지 밀도함수 (Strain Energy Density Function) W를 사용하여 정의하게 된다. 초

탄성(Hyperelastic) 재료는 정적 대변형이 가능하며 일반적으로 비압축성으로 간주하고, 재료 모델은 Neo-Hookean, Moony-Rivlin, Yeoh, Ogden 모델 등 여러가지 모델이 제안되어 있다.

변형에너지 밀도함수 $W = W(I_1, I_2, I_3)$ 는 우측 코쉬 그린-변형률 텐서의 1차 2차 3차 불변량 I_1, I_2, I_3 의 함수로 표현되며, 비압축성($\lambda_1\lambda_2\lambda_3 = 1$, 즉 $I_3 = 1$)일 경우, I_3 항이 제거되어 다음 식(3)과 같은 다항식 형태가 된다.

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij}(I_1 - 3)^i(I_2 - 3)^j \quad (3)$$

여기서, $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$

$$I_2 = \lambda_1^2\lambda_2^2 + \lambda_2^2\lambda_3^2 + \lambda_3^2\lambda_1^2$$

$$I_3 = \lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2 \quad (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 : \text{주변형률}) \text{ 이다.}$$

또한, C_{ij} 는 시험을 통해 구해지는 재료상수이며 $N=1$ 인 경우를 Moony-Rivlin 재료 모델이라고 하며 식(4)와 같이 표현되어 본 연구의 재료해석에 적용된 모델로 사용하였다.

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (4)$$

4.2 점탄성 모델(Viscoelastic Model)

점탄성재료의 중요한 특징은 응력-변형률 관계가 시간의 함수가 포함되어 정의된다는 것이다. 즉, 점탄성재료는 응력완화(Stress Relaxation) 및 크립(Creep) 등과 같은 시간 의존 특성을 보일 뿐만 아니라, 동적 하중시 응력과 변형률간의 위상차(Phase Shift)가 발생하여 에너지를 소산시키는 특성이 있다. 또한 하중 경로상에 히스테리 곡선을 보이며 변형률 시간미분 $d\epsilon/dt$ 에 따라 응력이 증가하는 비례관계를 가진다. 이와 같이, 점탄성재료의 응력-변형률 응답특성을 수학적 모델로 간략화하기 위한 요소로 탄성거동을 위한 스프링(Spring)과 점성거동을 위한 대쉬포트(Dashpot)가 있으며, 이를 적절하게 조합한 기본적인 모델로 1) Maxwell 모델, 2) Kelvin-Voigt 모델, 3) Standard Liner 모델 등이 있다.[9]

실제 점탄성재료와 유사한 크립 및 응력완화 응답특성을 보이는 모델링하기 위해서는 스프링 - 댐퍼 요소

를 여러 가지 형태로 조합하여 모델을 구현하게 되며 다음과 같은 식(5) 및 Fig 8과 같이 근사화하여 표현할 수 있다.

$$a_0\sigma + a_1 \frac{d\sigma}{dt} + a_2 \frac{d^2\sigma}{dt^2} + \dots = b_0\epsilon + b_1 \frac{d\epsilon}{dt} + b_2 \frac{d^2\epsilon}{dt^2} + \dots$$

$$\sum_{k=0}^n a_k \frac{d^k\sigma}{dt^k} = \sum_{k=0}^m b_k \frac{d^k\epsilon}{dt^k} \quad (5)$$

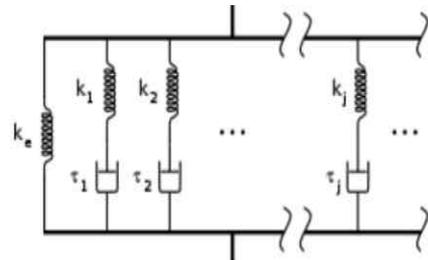
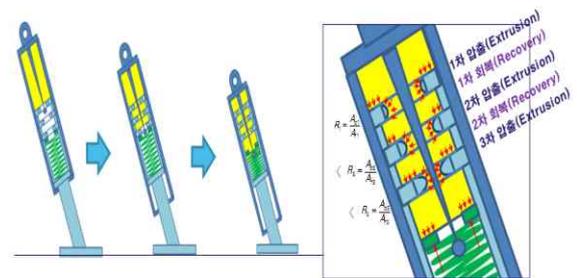


Fig. 8 Generalized Model for Viscoelasticity

5. 충격완충 장치 구성 및 해석

5.1 충격완충장치 구성

고안된 착륙선 충격완충장치 구성은 Fig. 9와 같이 초점탄성재료를 상단부에 충전하고 중앙부위에 압출 단면적을 조절하기 위한 메터링 핀을 삽입하여 간접압출 방식으로 점진적으로 다중 압출되도록 하였다.



(a) Shock Absorber Operation b) Multi Extrusion

Fig. 9 Multi-extrusion Shock Absorber

즉, 충격하중시, 초점탄성재료가 다중압출 단면을 점진적으로 통과함에 따라 1차 압출 => 1차 회복 => 2차 압출 => 2차 회복 ...등을 반복함에 따라 변형에너지로 전환되어 충격을 흡수하도록 하였으며, 스트럿

하단부에 장착된 스프링에 의한 역압력을 발생시켜 충격완충효율을 극대화하도록 고안하였다

5.2 유한요소모델 및 해석

고안된 다중압출 충격완충장치에 대한 충격해석을 위하여 LS-Dyna Preprocessor를 이용하여 Fig. 10 과 같이 2차원 단면 Shell 및 스프링 요소를 이용하여 충격해석에 필요한 유한요소모델을 구성하였다.[10]

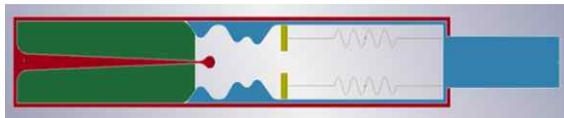
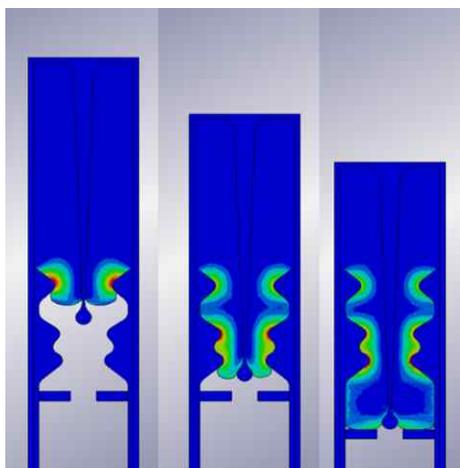


Fig. 10 2D FE Model of Shock Absorber

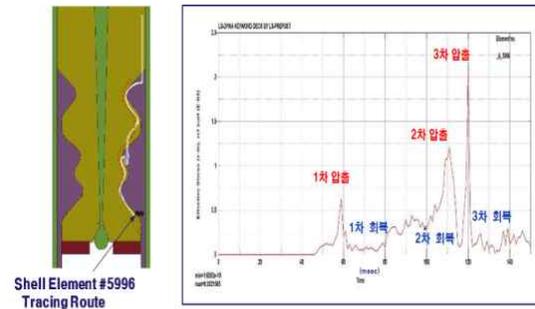
다중 압출재로 적용된 초점탄성재료 모델은 비압축성 Mooney-Rivlin 모델을 적용하였으며 해석에 적용된 압출재 입력값은 Table 1과 같다. 초기 충격속도 및 충격중량을 각각 2.5m/sec, 20kg으로 정의하고 초탄성재료 이외의 요소는 강체로 가정하였다.

Table 1 FE Analysis Input Data

구분	해석 입력값	
압출재	Material	Mooney-Rivlin Rubber
	A 재료상수	4.75E-5
	B 재료상수	5.40E-4
	포아송비	0.49
충격 속도	2.5m/sec	
충격 중량	20.0 kg	



(a) Multi-Extrusion FE Element Flow



(b) FE Element Flow Trace & Load Curve

Fig. 11 Multi-Extrusion Element Flow Trace

초점탄성재료의 다중 압출 공정시, 압출에 의한 내부 변형에너지 변환과정과 압출후 원형 복원되는 Unloading 과정을 반복적으로 거쳐 재료의 히스테리 루프 (Hysteric Loop) 통한 충격에너지 소산과정을 거치게 된다.

Figure 11은 다중 압출시 초점탄성재료의 압출변형 형상과 압출재 Shell요소 #5996에 대한 응력 추적 결과를 나타낸 것으로, 다중압출 1차, 2차, 3차 단면통과 시, 압출변형 및 회복을 반복하게 되며 압출비가 증가함에 따라 압출응력이 급격히 증가함을 알 수 있다.

Figure 12는 LS-Dyna 971/Preprocessor를 이용하여 2차원 형상의 유한요소모델의 충격해석 결과를 운동에너지 및 내부변형에너지 선도로 나타낸 것으로 약 150 msec 시간 안에 운동에너지가 내부변형에너지로 전환되고, 이후에 리바운싱(Re-bouncing) 현상이 일부 발생하며, 점진적으로 감쇄되어 안정화됨을 알 수 있었다.

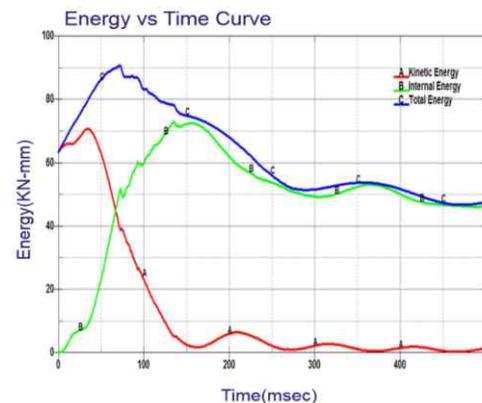


Fig. 12 Energy vs Time of Multi-Extrusion

또한, 충격이후에 속도 및 가속도 변화를 나타낸 것으로 초기속도 2.5m/sec가 감속된 이후에 리바운싱에 의한 진동 감쇄 거동을 나타내며, 충격 가속도값은 최대 약 3g 이내로 완충됨을 알 수 있었다

초점탄성재료의 압출에 의한 충격운동에너지 흡수 특성을 분석하기 위하여 3차원 유한요소 모델을 Fig. 13과 같이 1/4 형상으로 모델링하고, 압출재 변위벡터 및 Von-Mise 응력분포를 도식하였다.

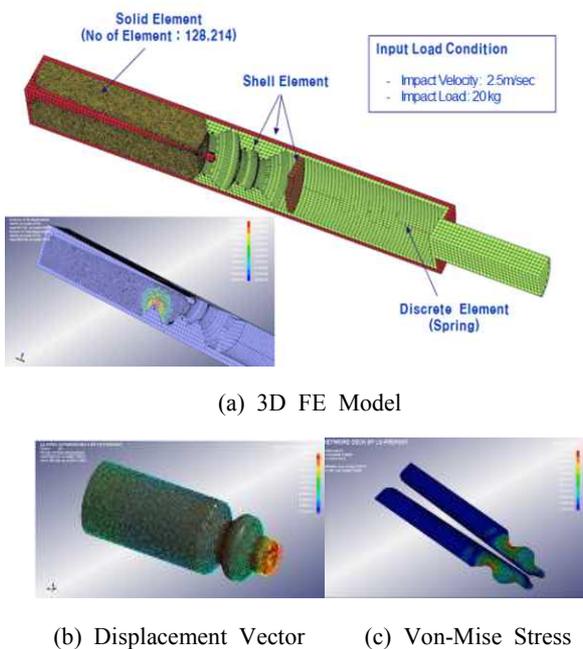


Fig. 13 3D FE Model of Multi-Extrusion

6. 초점탄성 재료 압축시험

초점탄성재료의 압출특성을 실험적으로 검증하기 위하여 다중압출장치를 제작하여 준정적 압축 시험(Quasi-Static Compression Test)을 수행하고 그 결과를 기존 알루미늄 하니콤 충격완충장치 하중-행정 선도와 비교하였다.

6.1 압축시험 형상

준정적압축 시험을 위해 제작된 충격완충장치는 Fig. 14와 같은 형상으로 실린더 상단부에 실리콘 재료를 삽입하고, 압출 단면을 단계적(1단계 ~ 4단계)으

로 조정하여 다중 후방압출 되도록 하고, 하단부에 스프링 및 격벽을 설치하였다

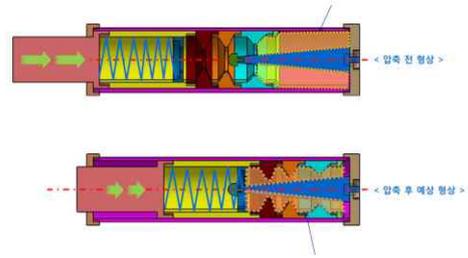


Fig. 14 Multi-Extrusion Shock Absorber

실제로 제작된 충격완충 시험장치의 조립 전후의 형상은 Fig. 15와 같으며, 실리콘 압출재를 초기 45mm 직경에서 1단계(35mm) ~ 4단계(15mm)까지 단계적으로 압출단면비를 증가시켜 다중 압출되도록 하였다



Fig. 15 Shock Absorber Components & Multi-Extrusion Ratio

선정된 초점탄성재료 실리콘은 연한 재질(Shore 경도 5)의 몰드 제작용 자재 Xinus SH0189로서 액상형태의 A(주제) 및 B(경화제)를 혼합하여 제작하였으며 재료의 주요 물성치 및 형상은 Table 2와 같다.

Table 2 Silicon(Xinus SH0189) Material Data

색상	반투명	실리콘 시편 형상
점도	3000±200 mPa.s	
밀도	1.0 g/cm ³	
경화	24 시간	
경도	5±2 Shore A	
인열강도	10 kgf/cm 이상	
인장강도	30 kgf/cm ² 이상	
신율	400 % 이상	

6.2 압축 시험 결과

먼저, 압출단계를 2단계로 하여 압출 초기직경 45mm => 1단계 35mm => 2단계 25mm로 구성된 압축시험을 Fig. 16과 같은 형상으로 압축률 10mm/min 속도로 수행하였다.

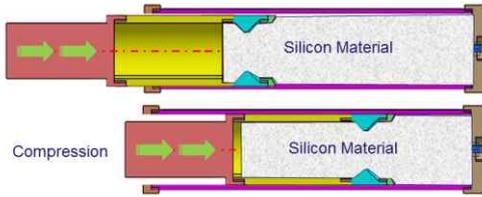


Fig. 16 2-Stage Extrusion Test

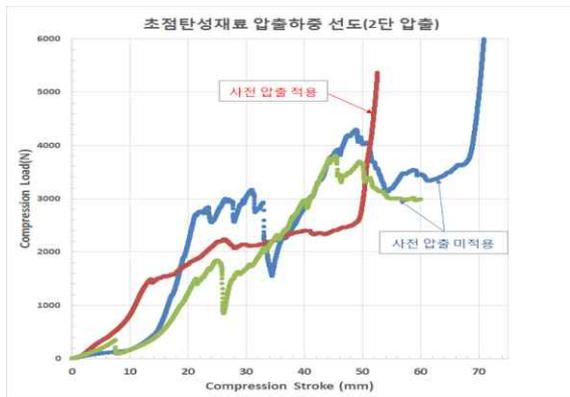


Fig. 17 Load-Stroke Curve(2 Stage Extrusion)

Figure 17에서 알 수 있듯이, 실리콘 재료 사전 압출 미적용한 경우에는 각 압출단계별 압축하중이 급격하게 증가할 뿐 아니라 압축하중이 일정하지 않고 불안정성을 나타내고 있으나, 사전 압출 적용한 경우에는 하중-변위선도의 불안정성이 제거된 Step 함수 형태를 유지하고, 알루미늄 하니콤 사전 크러쉬 적용시의 특성과 매우 유사한 특성을 보임을 알 수 있었다.

Figure 18은 다중 압출시, 압출 단면적 변경에 따른 영향성을 검토하기 위하여 메터링 핀(Meter Pin) 적용 유무로 구분하여 만능시험기(Instron)에서 10mm/min 속도로 압축하여 그 결과를 비교한 것이다. 다중압출시험 결과, 각 압출 단계별(1~4단계) 압출하중이 급격하게 증가할 뿐만 아니라, 내부 마찰에 의한 영향으로 추정되는 압출하중 불안정 현상의 전 구간에서 발생하였다. 또한, 메터링 핀을 적용한 경우가 압출에 필요한 하중이 상대적으로 크고, 급격한 하중 변화를 보임을 알

수 있었다.



Fig. 18 Load-Stroke Curve(4 Stage Extrusion)

7. 결 론

본 연구에서는 알루미늄 하니콤 코어를 이용한 착륙선 충격완충장치[11] 또는 전자기식 충격흡수장치[12]의 대체 설계 방안으로 초점탄성 재료의 압출을 이용한 새로운 개념 충격 완충장치를 검토하였다. 먼저, 기계가공법 일종인 압출특성이 알루미늄 하니콤 크러쉬 특성과 유사한 특성을 보임에 따라, 금속 압출재 대신에 실리콘과 고무와 같은 초점탄성재료를 다중 압출시켜 충격을 완충하는 장치를 고안하였다. 초점탄성재료의 압출에 의한 충격완충장치의 설계 구현 가능성을 검증하기 위하여, 압출역학 및 초점탄성재료 모델을 통한 충격흡수 매커니즘을 검토하고, LS Dyna 971 상용프로그램을 이용한 유한요소해석을 수행하였다. 또한, 초점탄성(Hyper-Viscoelastic) 재료의 준정적 압축시험을 수행하여 알루미늄 하니콤 좌굴특성과의 유사성을 확인함으로써 충격완충장치 설계구현 가능성을 검증하였다.

향후, 충격 완충효율을 극대화하기 위해, 초점탄성 재료 모델 선정 및 압출 주요 설계변수(압출속도, 압출비, 압축각도, 스프링 상수, 마찰계수...등)에 대한 최적화 기법에 대한 후속 연구를 지속할 예정이다.

References

[1] William F. Rogers " Apollo Experience Report - Lunar Module Landing Gear Subsystem ", NASA TN

D-6850,1972.

- [2] Karen E. Jackson, " Experimental and Analytical Evaluation of a Composite Honeycomb Deployable Energy Absorber " *NASA/TM-011-217301*, 2011.
- [3] R. K. Mcfarland, Jr " The Development of Metal Honeycomb Energy-Absorbing Elements " *NASA JPL Technical Report No. 32-639*, 1964.
- [4] F. Doengi , " Lander Shock-Alleviation Techniques " *ESA bulletin 93* ,1998.
- [5] M.J. Ribeiro " Extrusion of alumina and cordierite-based tubes containingAl-rich anodising sludge " *Journal of the European Ceramic Society 26 (2006) 817-823*, 2005.
- [6] X.P.Chi " Extrusion Pressure Generated in High Alumina Content Paste Extrusion " *ICMA International Conference* , 2010.
- [7] Amarasinghe " Interpretation of Paste Extrusion Data " *IChemE Vol 76*, 1998.
- [8] E.H. Lee and R.L. Mallett, "Stress and Deformation Analysis of the Metal Extrusion Process ", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1977.
- [9] Stephen L Rosen " Fundamental Principles of Polymeric Materials", *WILEY*, 2012.
- [10] Choon-Woo Lee, Gul-In Kim " Shock Absorbing by Multiple Extrusion of Hyper-Viscoelastic Material " , *KSAS Fall Conference*, 2016
- [11] Shin Kim, " Study of Crush Strength of Aluminum Honeycomb for Shock Absorber of Lunar Lander " , *Journal of Aerospace System Engineering Vol 4*, September. 2010
- [12] Mi-Seon Yi, " Analytical and Experimental Studies on the design of Electromagnetic Shock Absorber " , *Journal of Aerospace System Engineering Vol 6*, March. 2012