

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.1.545
JCCT 2023-1-66

탄성력 기반 안전벨트 프리텐셔너 설계

Design of Seat Belt Pretensioner driven by Elastic Force

이용수*, 박세윤*, 이현은*, 김상현**

Yongsu Lee*, Seyun Park*, Hyuneun Lee*, Sang-Hyun Kim**

요약 차량 충돌 시 벨트를 잡아당겨 탑승자의 상해 가능성을 최소화하기 위한 안전장치인 프리텐셔너는 화약 폭발 방식으로 구동되므로 화재나 파편이 튀는 2차 사고의 위험이 있으며 사고 발생 후 프리텐셔너 내부의 가스 발생기 뿐만 아니라 매니폴더를 포함한 연결 부품 모두를 교체해야 하는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 안전하고 반영구적으로 사용이 가능한 탄성력 기반 프리텐셔너를 제안한다. 기존 프리텐셔너의 작동 원리를 열역학적/동역학적 관점으로 분석한 후 프리텐셔너 전개를 위해 필요한 가스 폭발에너지를 탄성에너지로 변환하였다. 또한 비감쇠 진동해석을 통해 프리텐셔너 작동시간을 확인하였으며 폭발 압력과 전개 시간 조건을 모두 만족하는 스프링 강성을 선정하였다. 스프링 부착 위치에 따른 차량 내부 설치 규격을 고려하여 코일 스프링 형상 및 고정부를 설계하였으며 제작을 통해 탄성력 기반 프리텐셔너의 성능 검증을 수행하였다.

주요어 : 코일 스프링, 탄성력, 가스 폭발, 프리텐셔너, 차량 충돌

Abstract A pretensioner is a safety device that protects occupants by pulling the seat belt in the event of a vehicle collision. However, since the pretensioner is driven by a explosive method, it is necessary to replace not only the gas generator but also all connecting parts including the manifold after an accident. Therefore, in this paper, we propose an elastic force-based pretensioner that can be used safely and semi-permanently. After analyzing the operating mechanism of the existing pretensioner from a thermodynamic/dynamic point of view, the spring stiffness that can be deployed within an appropriate operating time was determined by converting the gas explosion energy into elastic energy. In addition, the coil spring shape that satisfies the elastic stiffness was designed in consideration of the vehicle interior installation standard. Finally, the operating performance of the pretensioner driven by elastic force was verified through fabrication.

Key words : Coil Spring, Elastic Force, Gas Explosion, Pretensioner, Vehicle Collision

1. 서론

시트벨트(seat belt)는 차량 사고 발생 시 탑승자를 보호하기 위해 좌석에 고정시키는 안전장치이다. 평상시에는 탑승자를 느슨하게 감싸고 있지만 차량이 급제동

하거나 충돌이 발생하면 탑승자를 잡아주어 차량 외부로 이탈하거나 전면부나 내부 구조물에 충돌하는 피해를 방지하는 역할을 한다[1]. 하지만 시트벨트만으로는 차량 충돌로 인한 충격에서 탑승자의 안전을 보장하기 어렵다. 시트벨트가 오래되어 늘어져 있거나 탑승자가

*학생회원, 한성대학교 기계시스템공학과 학부생 (공동저자)
**정회원, 한성대학교 기계시스템공학과 교수 (교신저자)
접수일: 2022년 11월 30일, 수정완료일: 2023년 1월 5일
게재확정일: 2023년 1월 9일

Received: November 30, 2022 / Revised: January 5, 2023
Accepted: January 9, 2023
**Corresponding Author: shkim@hansung.ac.kr
Dept. of Mechanical Systems Eng., Hansung Univ, Korea

주행 중 편의나 착용감 등의 이유로 시트벨트를 느슨하게 착용하는 경우, 그림 1(a)과 같이 탑승자의 상체가 전방으로 과도하게 쏠리게 되거나 시트 아래쪽으로 내려가는 슬랙(slack) 현상이 발생한다. 이 경우 탑승자의 흉부가 전면부의 에어백 또는 운전대와 충돌하거나 시트벨트가 복부를 압박해 복부 장기의 손상을 입는 등 예상치 못한 사고로 이어질 수 있다. 따라서 탑승자의 상해 가능성을 최소화하기 위해 사고 바로 직전 탑승자의 신체를 시트에 확실히 고정시키는 장치가 필수적으로 차내에 부착되어야 하며 이러한 이유로 시트벨트 프리텐서너(seat belt pretensioner)가 개발되었다[2,3].

프리텐서너는 그림 1(b)과 같이 시트벨트에 부착되어 있으며 차량 사고 시 벨트를 재빨리 되감아 탑승자 몸을 잡아주는 역할을 하는 부품이다. 충격으로 인해 탑승자가 전방으로의 쏠림이 발생되기 전에 어깨 쪽 벨트가 순간적으로 인입되면서 탑승자의 신체를 의자에 고정시켜 충돌로 인한 운전자를 포함한 탑승자의 상해를 최소화한다. 하지만 기존 프리텐서너는 신속한 구동을 위해 화약물질의 폭발력을 이용하여 작동되므로 재사용이 불가능하고 사고 발생 후 화약부 뿐만 아니라 시트벨트와 연결되는 부품 모두를 교체해야 하는 단점이 있다. 또한 의도한 것보다 강한 폭발이 발생할 경우 가스가 실내로 유입되거나 금속 파편이 좌석으로 튕겨져 승객이 상해를 입는 2차 사고가 발생할 위험이 있다. 이런 문제들로 인해 최근 국토교통부 뿐만 아니라 미국 고속도로 교통안전청(NHTSA)에서 국내외 자동차의 프리텐서너 결합에 대한 시정조치(리콜)가 진행되고 있다. 따라서 경제성과 안정성을 고려한 반영구적 프리텐서너 설계가 필수적이다.

본 논문에서는 기존 시트벨트 프리텐서너의 문제를 해결하기 위해 재사용이 가능하면서도 안전하게 사용할 수 있는 탄성력 기반 시트벨트 프리텐서너 구조를 제안한다. 화약 폭발에 의해 전개되는 프리텐서너의 작동 원리를 열역학적/동역학적 관점으로 분석한 후 가스 폭발 에너지를 탄성에너지로 변환하였다. 이를 통해 동일한 작동시간 내에 구현 가능한 스프링 강성을 선정하였으며 자동차 시트 옆면에 내장되어야 하는 구속조건을 고려하여 코일 스프링 형상을 설계하였다. 또한 압축된 스프링을 고정할 수 있는 적절한 고정부 형상도 제시하였으며 실제 제작을 통해 탄성력 기반 프리텐서너의 작동 여부를 확인하였다.

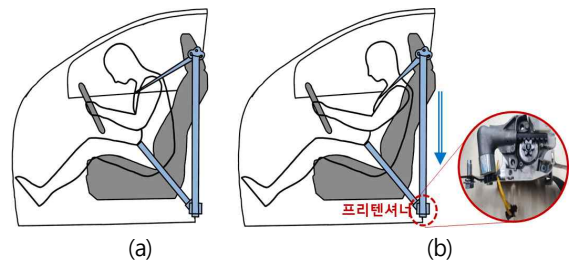


그림 1. 전방 충돌 시 탑승자 거동 (a) 시트벨트만 장착 (b) 프리텐서너 장착
Figure 1. Driver behavior in a forward collision of the vehicle (a) seat belt only (b) seat belt with pretensioner

II. 설계 배경

그림 2는 화약 폭발 방식으로 작동되는 기존 시트벨트 프리텐서너의 구성 요소 및 작동원리를 나타낸다. 내부 실린더와 매니폴드에 가스 발생기, 랙 기어, 피니언 및 스톱이 설치되어 있으며 랙 기어와 피니언은 서로 맞물려 상호운동을 전달한다. 또한 피니언과 연결된 축에 스톱이 결합되어 있으며 스톱 외부에는 벨트가 감겨 있다. 사고 발생 시 충돌이 감지되면 차량 전자제어 장치(ECU: Electronic Control Unit)로부터 전기적 신호를 받아 가스 발생기가 점화되며 내부에 장착된 화약물질이 폭발하게 되고 이 폭발 압력이 내부 실린더에 위치한 랙 기어를 밖으로 밀어낸다. 이 때 랙 기어의 직선운동(① translation)이 맞물린 피니언을 구동시키면서 스톱이 역방향으로 회전(② rotation)하게 된다. 연결부의 상호작용을 통해 스톱에 감겨있는 시트벨트가 인입(③ belt tightening)되어 탑승자의 신체를 시트에 고정시켜서 차량 전면 유리나 도어 측면과 같은 내부 구조물에 부딪히는 것을 방지한다.

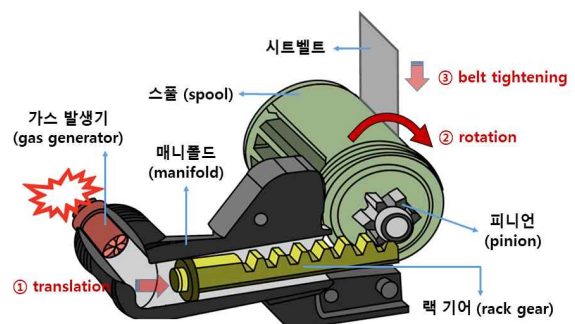


그림 2. 시트벨트 프리텐서너 구성 요소 및 작동 원리
Figure 2. Basic components and working principle of seat belt pretensioner

현재 사용되고 있는 프리텐서너는 화약 폭발 방식으로 작동하므로 사고 발생 시 가스 발생기와 매니폴드 및 연결 부품 모두가 필수적으로 교체되어야 한다. 또한 과도한 폭발 압력으로 인해 프리텐서너가 비정상적으로 전개될 시 차량 시트 교체나 탑승자 2차 사고가 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 고안한 반영구적 프리텐서너의 개념도를 그림 3에 나타내었다. 랙 기어, 피니언 및 스프링과 같은 연결 부품은 동일하게 사용하고 프리텐서너 전개를 위해 필요한 화약 폭발에너지를 탄성력 기반 스프링 에너지로 대체하였다. 평상시 스프링은 압축된 상태로 고정되어 있으며 충돌이 발생하면 압축이 해제되면서 스프링과 연결된 랙 기어와 피니언 및 스프링의 상호작용에 의해 안전띠가 인입되어 탑승자를 보호하게 된다.

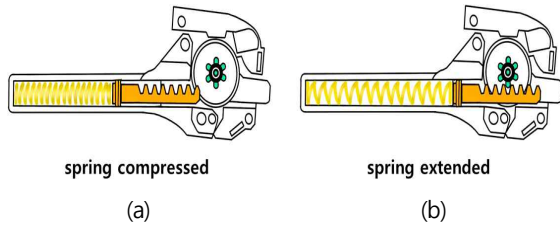


그림 3. 반영구적 프리텐서너 개념도 (a) 작동 전 (b) 작동 후
 Figure 3. Conceptual design of semi-permanent seat belt pretensioner (a) before operation (b) after operation

그림 4는 차량 충돌 시 기존 프리텐서너의 내부 에너지 흐름을 나타내며 가스 발생기에 의한 화약 폭발력이 랙 기어를 밀어주는 열역학 과정과 랙 기어의 움직임에 의해 벨트를 당겨주는 동역학 과정으로 나누어진다[4]. 열역학적 관점에서 가스 발생기에 의한 폭발에너지(E_i)는 식 (1)과 같이 표현된다. 화약이 폭발하게 되면 가스 누출에너지(E_l)와 열을 수반하는 열전달 에너지(E_h)가 손실되고 잔류에너지(E_s)가 남게 된다.

$$E_i = E_l + E_h + E_s \quad (1)$$

프리텐서너 내부의 잔류에너지는 전달에너지(W_s)로 변환되어 랙 기어를 이동시키며 맞물린 피니언이 회전하고 스프링이 역방향으로 회전하게 된다. 동역학적 관점에서 전달에너지는 기어 마찰에너지(E_f), 더미 반력에너지(E_r), 기어 운동에너지(E_g) 등의 손실과 벨트 인입에너지(E_b)로 사용되며 식 (2)와 같이 표현된다.

$$W_s = E_f + E_r + E_g + E_b \quad (2)$$

탄성력 기반 스프링 강성으로 프리텐서너를 전개하기 위해서는 가스 폭발에 의한 운동량(M_g)과 탄성력에 의한 운동량(M_e)이 같아야 하므로 식 (3)과 (4)와 같이 표현된다. 여기서 F_g 는 폭발력, P_g 는 폭발압력, A 는 폭발면적, F_e 는 탄성력, k 는 스프링 강성, δ 는 스프링 변위 및 t 는 작동시간을 나타낸다. 따라서 식 (1)과 (2)를 통해 폭발압력을 구한 후 운동량 평형조건인 식 (3)과 (4)를 통해 이를 대체할 수 있는 스프링 강성을 선정할 수 있다.

$$M_g = F_g \times t = P_g \times A \times t \quad (3)$$

$$M_e = F_e \times t = k \times \delta \times t \quad (4)$$

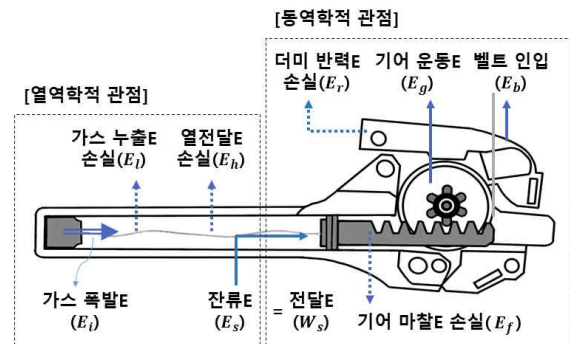


그림 4. 프리텐서너 작동 시 내부 에너지 흐름도
 Figure 4. Energy flow of gas explosive pretensioner

III. 설계과정

1. 스프링 강성 선정

프리텐서너는 사고 시 인명피해를 최소화하기 위한 제품이므로 탄성력 기반 프리텐서너도 기존 제품과 동일한 성능을 유지해야 한다. 차량용 좌석 안전띠 성능 기준(제103조 제1항 및 제112조의3)에 의하면 차량 충돌 시 탑승객 보호를 위해 시트벨트는 0.05s 이내에 최소 80mm가 인입되어야 하며 이 때 벨트에 걸리는 장력은 통상 2kN 정도로 제한하고 있다[5]. 차량에 충격이 감지되는 경우 ECU로부터 프리텐서너로 전기적 신호가 전달되는 시간은 0.012s이므로 압축된 스프링이 전개되어 벨트가 인입되는 시간은 0.038s를 만족해야 한다.

열역학적 관점에서 0.038s에 발생하는 가스 누출에너지와 열전달 손실은 무시할 수 있다. 따라서 식 (1)에서 가스 폭발에너지는 잔류에너지와 같게 되며 부피변화가 거의 없는 정적 과정이므로 잔류에너지 $E_s=3VP_g/2$ 로 표현된다. 여기서 V 는 매니폴드 내부 부피(10.7ml)를 나타낸다. 또한 동역학 과정에서 위치에너지와 운동에너지의 변화량이 없으며 마찰에 의한 에너지 손실을 무시하면 잔류에너지는 식 (5)와 같이 벨트 인입에너지와 같게 된다.

$$\frac{3}{2} VP_g = F_b \times \Delta b \quad (5)$$

따라서 벨트 인장력(F_b) 2kN과 벨트 인입량(Δb) 80mm를 고려하면 폭발압력은 6.27MPa이 된다. 또한 피니언과 스플의 반지름 비율(1:1.78)을 고려하면 벨트 인입을 위한 랙 기어 이동거리(Δx)는 45mm이므로 필요한 스프링 압축 변위는 22.5mm가 된다. 따라서 식 (3)과 (4)에 스프링 변위 및 폭발면적($1.77 \times 10^{-4} m^2$)을 대입하면 탄성력 기반 프리텐서너 전개를 위해 필요한 스프링 강성은 48.88kN/m로 계산된다.

평상시 스프링은 압축된 상태로 고정되어 있으며 충돌 발생 시 압축이 해제되면서 스프링은 그림 5와 같이 1자유도 비감쇠 시스템 자유 진동운동을 하게 된다. 이때 스프링과 연결된 질량(m)의 움직임(x)은 식 (6)과 같이 표현되며 여기서 A 는 진폭, ω_n 은 고유진동수, t 는 시간 및 ϕ 는 위상(rad), k 는 스프링 강성을 나타낸다[6]. 동역학적 관점에서 기어 운동이나 마찰에 의한 에너지 손실을 무시하였으므로 연결부 질량은 랙 기어와 피니언 및 스플 모두를 포함해야 한다.

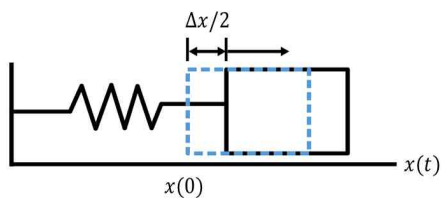


그림 5. 비감쇠 1 자유도 시스템
Figure 5. Undamped 1 degree of freedom system

$$x(t) = A \sin(\omega_n t + \phi) \quad (6)$$

$$\omega_n = \sqrt{k/m}$$

차량 충돌 시 압축된 스프링은 기존 프리텐서너와 동일한 시간인 0.038s 이내에 랙 기어 이동거리인 Δx 만큼 펼쳐져야 한다. 따라서 식 (6)에 연결부 질량 0.266kg과 시간-변위 조건인 $x(0)=-22.5mm$, $x(t_0/2)=0$, $x(t_0)=22.5mm$ 를 대입하면 고유진동수(428.32rad/s), 위상차(-1.45rad) 및 진폭(22.7mm)을 구할 수 있다. 이를 통해 강성이 48.88kN/m인 스프링이 전개되기 위한 소요시간(t_0)은 0.00677s로 계산되며 이는 작동 요구 시간인 0.038s를 만족하므로 폭발압력으로 구한 스프링 강성이 타당함을 알 수 있다.

2. 스프링 형상 설계

프리텐서너는 차량 좌석 벽면에 내장되는 부품으로 시트벨트에서부터 벽면까지의 길이 100mm를 넘지 않아야 한다. 스프링 형상을 결정하기 위해선 피치(p)와 총 감은 수(n)를 알아야 하며 이는 식 (7)을 통해 구할 수 있다[7]. 여기서 d 는 선경, D_1 은 중심경, C 는 스프링 지수, K 는 응력수정계수를 나타낸다. 차량 벽면 규격과 스플 길이(60mm)를 포함한 스프링 제한 조건을 식 (7)에 대입해서 구한 결과를 표 1에 나타내었으며 이를 통해 설계된 스프링의 최종 형상은 그림 6과 같다.

$$k = P/\delta, \delta = \frac{8nPD_1^3}{Gd^4}, C = D_1/d \quad (7)$$

$$K = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C}$$

표 1. 스프링 규격

Table 1. Size specification of redesigned spring

스프링 강성(k) [kN/m]	스프링 변위(δ) [mm]	피치(p) [mm]	유효감김수(n) [회수]
48.88	22.5	12	14
외경(D) [mm]	선경(d) [mm]	중심경(D_1) [mm]	자유길이(L) [mm]
40	7	33	134.5

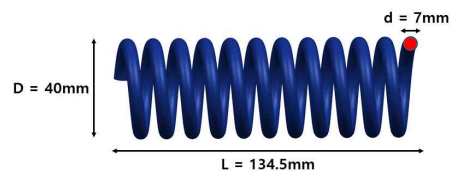


그림 6. 코일 스프링 최종 형상 및 치수
Figure 6. Configuration and dimensions of the designed coil spring

3. 고정부 및 프리텐서너 최종 형상

본 논문에서 고안한 탄성력 기반 프리텐서너는 차량 충돌 전 스프링이 압축한 상태로 고정되어 있고 충돌 시 압축된 스프링이 해제되어야 하므로 이를 구현하기 위한 고정부 형상을 그림 7(a)에 나타내었다. 프리텐서너 작동 전까지 스프링이 고정부(holding part)의 걸쇠(latch)에 의해 압축한 상태로 유지되며 ECU로부터 전기적 신호를 받으면 고정장치가 해제되어 압축이 풀리게 하였다. 스프링 강성이 크기 때문에 압축 해제된 스프링이 직선운동을 하지 않고 휨 수 있으므로 이를 방지하기 위해 스프링과 랙 기어가 접촉되는 부분에 연결홀(connecting hole)을 추가하였다. 스프링과 고정부 및 랙 기어는 매니폴드 내부에 위치하며 스프링 규격과 랙 기어 연결부 길이(120mm) 및 스프링 최대 변위를 고려하여 매니폴드 전체 길이(193mm)와 내부 실린더 직경(64mm)을 정하였다. 또한 스프링 자유길이를 고려하여 고정부의 회전 중심을 134.5mm에 위치시켰다. 그림 7(b)는 설계된 스프링과 고정부 및 연결부를 포함한 탄성력 기반 프리텐서너의 최종 형상을 나타낸다. 고정부 걸쇠(latch)에 의해 스프링이 압축된 상태로 유지되며 고정 해제 시 스프링의 직선운동에 의해 랙 기어와 피니언이 움직이고 스프링이 역회전하여 벨트가 인입된다.

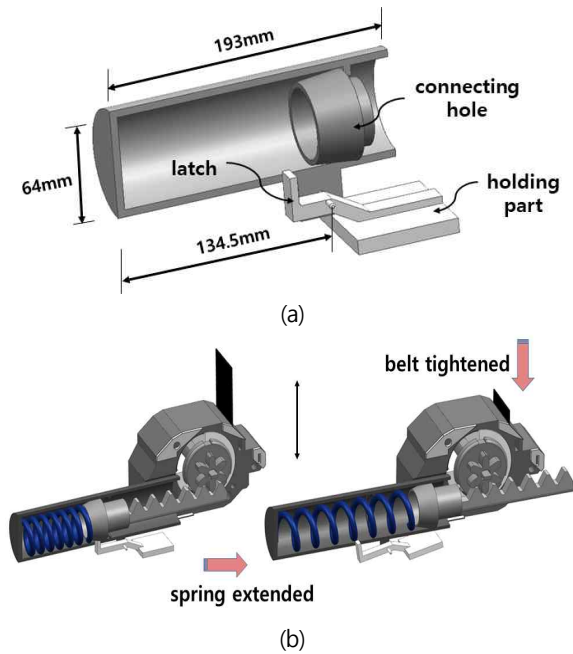


그림 7. (a) 개별 부품 (b) 최종 결합 형상
 Figure 7. (a) spring holding parts (b) final assembled product

IV. 제작 및 검증

본 논문에서 제안한 프리텐서너는 시트벨트 인입을 위해 필요한 화약 폭발력을 탄성력으로 치환한 제품이기에 상대적으로 강한 스프링 강성이 필요하다. 하지만 실제 프리텐서너와 동일한 성능으로 구현하는 것은 사고 발생할 위험이 있으므로 부품 조립의 수월성과 안전성을 위해 스프링 강성을 줄일 필요가 있다. 식 (6)에서 스프링의 움직임은 고유진동수와 관련이 있으므로 제품 성능 검증을 위해 줄어든 강성 비율만큼 연결부 질량도 조정되어야 한다[8]. 본 논문에서는 제작 가능성을 고려하여 3D프린터(GUIDERII)를 이용하였으며 소재는 PLA필라멘트를 사용하였다. 따라서 기존 랙 기어와 피니언 재질인 SM45C와 PLA의 밀도 비율(12.47:1)을 고려하여 스프링 강성을 3.92kN/m로 줄였으며 조정된 스프링 규격을 표 2에 나타내었다.

표 2. 제작용 스프링 규격
 Table 2. Size specification of redesigned spring

스프링 강성(k) [kN/m]	외경(D) [mm]	선경(d) [mm]	중심경(D ₁) [mm]	자유길이(L) [mm]
3.92	14	2	12	80

또한 수정된 스프링과 연결되는 랙 기어 및 피니언을 그림 8의 (a)와 (b)와 같이 3D프린터를 이용하여 추가 제작하였다. 안전하면서도 신뢰성 있는 성능 검증을 위해 기존 부품과 동일 부피로 출력하였으며 압축된 스프링이 휨 없이 직선으로 펼쳐지면서 랙 기어를 밀어줄 수 있는 매니폴드와 연결 홀 제작 형상을 (c)와 (d)에 나타내었다.

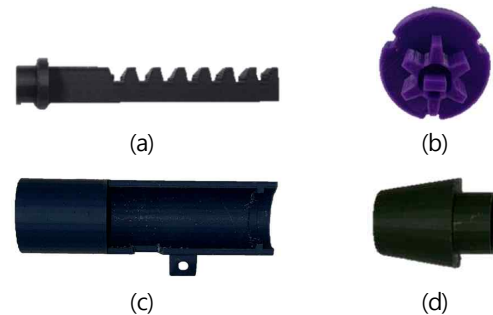


그림 8. (a) 랙 기어 (b) 피니언 (c) 매니폴드 (d) 연결홀
 Figure 8. (a) rack gear (b) pinion (c) manifold (d) connecting hole

위에서 제작된 부품을 조합한 탄성력 기반 반영구적 프리텐서너 최종 형상 및 작동 모습을 그림 9에 나타내었다. 고정장치에 의해 스프링이 압축된 상태를 유지하고 있으며 고정이 풀리면 스프링이 연결된 홀을 통해 힘 없이 직선으로 움직인다. 고정부에 힘이 가해지면 압축된 스프링이 해제되면서 발생하는 탄성력으로 락 기어를 밀어내고 스톱이 감기면서 안전띠가 인입되는 것을 확인하였다.

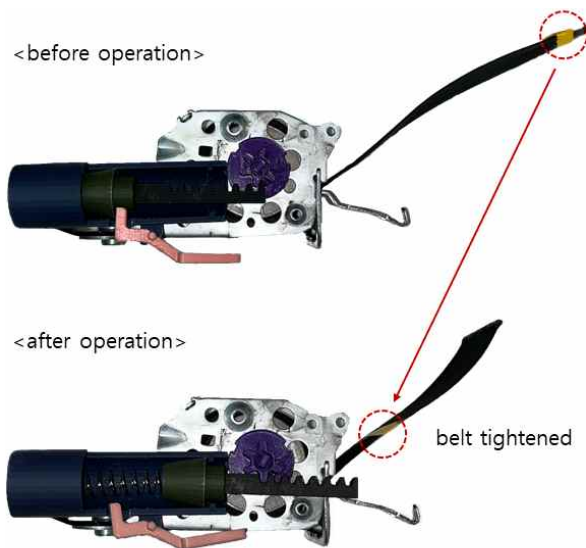


그림 9. 탄성력 기반 반영구적 프리텐서너 최종 형상
Figure 9. Final manufactured semi-permanent pretensioner

V. 결 론

차량 사고가 발생할 경우 탑승자의 상해 가능성을 최소화하기 위해 장착되어 있는 프리텐서너는 화약 폭발에 의한 구동방식이므로 재사용이 불가능하고 화재나 파편이 튀는 2차 사고의 위험이 있다. 따라서 본 논문에서는 기존 프리텐서너의 화약 폭발에너지를 탄성력을 기반으로 한 구조로 대체하여 비정상적으로 전개되는 것을 방지하고 재사용이 가능한 새로운 방식의 프리텐서너를 제안하였다. 열적/동적 에너지 흐름을 통해 폭발력과 이를 대체하는 탄성력을 계산하였으며 프리텐서너는 탑승자의 안전을 위해 일정 시간 내에 전개되어야 하므로 이를 고려한 비감쇠 1자유도 진동운동 해석을 수행하였다. 압력과 시간 조건을 모두 만족하는 48.88kN/m의 스프링 강성을 선정하였으며 스프링 부착 위치에 따른 제한 조건을 고려한 코일 스프링 형상을

설계하였다. 스프링 압축 및 해제를 구현하기 위한 고정부를 추가하였으며 실제 제작을 통해 탄성력 기반 프리텐서너의 성능 작동 여부를 확인하였다.

본 논문에서 제시한 반영구적 시트벨트 프리텐서너는 기존 프리텐서너의 가스 발생기와 실린더를 압축 스프링으로 대체한 후 락 기어와 스톱에 바로 연결하여 사용 가능하므로 호환성이 뛰어나다. 또한 충돌 후 재사용 횟수를 높일 수 있으므로 실제 차량에 활용되어 안전과 친환경적인 영향에 도움이 될 것으로 판단된다.

References

- [1] J.S. Yoo and M.S. Jang, "Effect of Air Bag and Seat Belt on Driver's Safety," J. of Korean Society of Transportation, Vol. 21, No. 2, pp. 14-19, 2003.
- [2] S.P. Jung, T.W. Park and T.R. Song, "Experimental Study to Improve the Performance of the Pretensioner for a Passenger Vehicle," Transactions of KSAE, Vol. 18, No. 2, pp. 1-6, 2010.
- [3] Y. Eo, Y. Shin, H. Park, K. Kim, K. Lee, M. Hwang and J. Son, "Secure Passenger Safety of seatbelt system Using Passenger Behavior Analysis in Frontal Collision," KSAE 2018 Autumn Conference & Exhibition, 2018.
- [4] S.X. He and M.D. Wilkins, "A Method to Evaluate the Energy Capability of Seat Belt Pretensioners," SAE Transactions, Vol. 108, No. 6, pp. 70-74, 1999.
- [5] Regulation for Performance and Safety Standards of Motor Vehicle and Vehicle Parts MOLIT Ordinance, No. 797, Article 112-3, 2014.
- [6] S.S. Rao, "Mechanical Vibrations, 5/e", Pearson, 2012.
- [7] R.C. Juvinall and K.M. Marshek, "Fundamentals of Machine Component Design, 7/e", Wiley, 2015.
- [8] A.G. Erdman, "Mechanism Design, Analysis and Synthesis", Prentice-Hall, 2017.

※ 이 논문은 한성대학교 교내학술연구비 지원 과제임.
This research was financially supported by Hansung University.