

# 탄성력을 이용한 반영구적 시트벨트 프리텐서너

이현은, 이용수, 박세윤, 김상현\*  
한성대학교 기계시스템공학과  
e-mail:phanny990@naver.com

## Semi-Permanent Seat Belt Pretensioner using Elastic Force

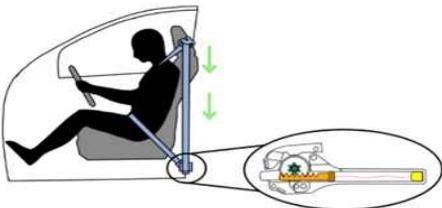
Hyun-Eun Lee, Yong-Su Lee, Se-Yun Park, Sang-Hyun Kim  
Dept. of Mechanical's system Engineering, HANSUNG University

### 요약

프리텐서너는 사고 직전 ECU로부터 전기적 신호를 받아 안전띠가 인입되어 탑승자를 시트에 고정시키는 안전장치이다. 파이로 타입 프리텐서너는 화약의 폭발력으로 안전띠가 일정시간 내에 인입되는 방식으로 일회성으로 작동한다. 따라서 사고 발생 시 교체가 필요하므로 경제적, 환경적 측면에서 악영향을 미칠 수 있다. 이에 본 논문에서는 파이로 타입 프리텐서너의 화약폭발력을 탄성력으로 대체하는 구조를 제안한다. 기존 화약 폭발에너지를 동역학적, 열역학적 관점으로 나눠서 잔류에너지 공식을 사용해 구하였으며 이를 통해 스프링 강성을 선정하였다. 또한 스프링은 비감쇠 1자유도 진자 운동을 하므로 변위-시간 관계식을 사용해 시간 내에 프리텐서너가 작동하는지 확인하였다. 프리텐서너는 차량 벽면에 부착되므로 벽면 규격을 제한조건으로 두어 앞선 강성을 만족하는 스프링 형상 및 고정부를 설계하였으며 실제 제작을 통해 성능 작동 여부를 확인하였다.

### 1. 서론

시트벨트 프리텐서너(seat belt pretensioner)는 차량 사고 발생 시 탑승자의 상해 가능성을 최소화하기 위해 사고 바로 직전 탑승자의 신체를 시트에 확실히 고정시키는 안전장치 중 하나이다. 통상적으로 사용되는 프리텐서너는 화약이 폭발하는 에너지로 작동하는 파이로 타입이며 그림 1과 같이 차량의 벽면 내부에 설치된다. 하지만 화약 폭발이 비정상적으로 전개될 경우 금속 파편이 좌석으로 튕겨져 나오거나 화약 폭발로 자체로 인해 발생하는 2차 사고 등의 위험이 있다. 또한, 재사용이 불가능하므로 사고 발생 후 사용되었던 프리텐서너는 폐기된다는 점에서 환경적, 경제적으로 악영향을 미치고 있다.



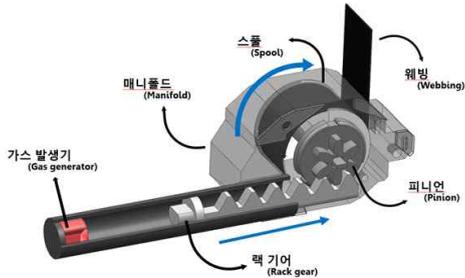
[그림 1] 파이로 타입 프리텐서너 부착 위치

따라서 본 논문에서는 화약 폭발 방식의 기존 프리텐서너의 문제점을 해결하기 위해 안전하고 반영구적으로 사용이 가능한 탄성력 기반 시트벨트 프리텐서너 구조를 제안한다. 기존 파이로 타입 프리텐서너의 작동 메커니즘을 열역학적 관점과 동역학적 관점으로 분석하였으며 가스 폭발 에너지를 운동량 기반 에너지로 변환한 후 이에 부합하는 스프링 강성을 선정하였다. 또한 자동차 시트의 옆면에 내장되어야 하는 구속조건을 고려하여 코일스프링 형상을 설계하였으며 압축된 스프링의 고정 및 해체가 용이하도록 하는 적절한 고정부를 설계하였다. 1자유도 비감쇠 진동 개념을 사용해서 기존 프리텐서너와 동일 시간 내에 작동하는지 확인하였으며 제작을 통해 새로운 시트벨트 프리텐서너의 성능 검증을 수행하였다.

### 2. 작동 메커니즘

그림 2는 일반적으로 사용되고 있는 파이로 타입 프리텐서너의 형상 및 각 부품의 명칭을 나타낸다. 차량 충돌 시 센서에 의해서 충돌을 감지하고 ECU로부터 전기적 신호를 받으면 가스 발생기가 점화되며 내부에 장착된 화약이 폭발한다. 가스 발생기의 점화에 의한 폭발 압력이 매니폴드(manifold)

를 통해 랙 기어를 밖으로 밀어내면서 직선운동을 하고 맞물린 피니언(pinion)을 회전시킨다. 그 후 연결된 스푼이 역회전하여 안전띠가 인입된다. 가스 발생기가 점화되면서 화약이 폭발하므로 기존 파이로 타입 프리텐서너의 부품들 중에서 작동 기반이 되는 랙 기어, 피니언 및 스푼 등은 동일하게 사용하고 가스 발생기와 매니폴드만 교체된다.



[그림 2] 파이로 타입 프리텐서너 부품 명칭

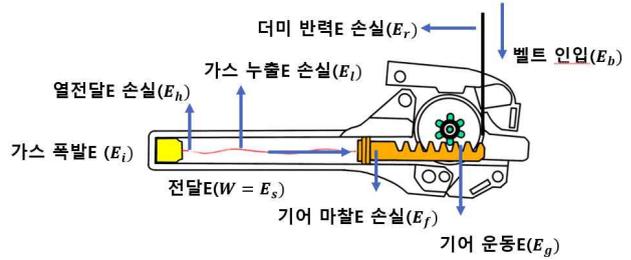
프리텐서너는 사고 시 인명피해를 최소화하기 위한 제품이고 작동까지의 시간, 벨트의 인입량이나 장력에 따라서 사고의 정도가 크게 달라지므로 기존 프리텐서너와 동일한 성능을 유지해야 한다. 차량용 좌석 안전띠 성능기준에 의하면 차량 충돌 시 탑승객 보호를 위해 시트벨트는 0.05s 이내에 최소 80mm가 인입되어야 하며 이 때 벨트에 걸리는 장력은 통상 2kN 정도로 제한하고 있다. 또한 스프링 고정장치 해제를 위해 ECU로부터 전기적 신호를 받은 후 벨트 인입을 위한 스프링 전개 시간은 0.038s를 만족해야 한다.

### 3. 스프링 강성 선정

그림 3은 프리텐서너 작동 시 내부의 에너지를 나타낸 것이며 식 (1)과 같이 표현된다. 화약이 폭발하면 가스누출 에너지 손실( $E_i$ ), 열 전달 에너지 손실( $E_h$ )이 발생하게 되지만 매니폴드를 밀폐계로 두면  $E_i$ 과  $E_h=0$ 으로 가정한다. 따라서 가스 폭발( $E$ )가 기어에 전달된 에너지가 되고 랙 기어가 매니폴드와 마찰이 생겼을 때 기어 마찰에너지 손실( $E_f$ )가 발생하고 랙 기어와 피니언이 기어 운동할 때 발생하는 기어 운동 에너지( $E_g$ )가 발생한다. 또한, 벨트가 인입될 때 더미 반력 에너지 손실( $E_r$ )이 발생하고 벨트 인입에너지( $E_b$ )가 생긴다. 그러나  $E_f$ ,  $E_g$ ,  $E_r$ 은 전달 에너지에 비해 미소한 값이기 때문에 생략한다.

가스 폭발 에너지와 전달 에너지, 벨트 인입 에너지가 같다고 볼 수 있으므로 전달에너지에서 잔류에너지 공식을 이용하여 폭발 압력 6.27MPa과 폭발력 1.1kN을 구한다. 또한 벨트 인입 에너지는 인입량과 어깨에 걸리는 힘으로 계산할 수

있으므로 폭발력과 작동시간 0.038s를 이용하여 운동량 42.18Ns 및 스프링 강성 24.67kN/m를 정하였다. [2]



[그림 3] 가스 폭발 에너지 과정

$$E_s (= W) - E_f - E_g - E_r = E_b \quad (1)$$

$$E_i = E_s = \frac{3}{2} VP$$

압축된 스프링이 해제되면 스프링과 연결된 시스템은 비강쇠 1자유도 시스템 자유 진동을 하게 되며 이 때의 움직임은 식 (2)와 같이 표현된다[6]. 여기서  $\omega_n$ 은 고유진동수를 나타내며  $(k/m)^{1/2}$ 로 표현된다. 또한  $A$ 는 진폭,  $t$ 는 시간 및  $\phi$ 는 위상(rad)을 나타낸다.

$$x(t) = A \sin(\omega_n t + \phi) \quad (2)$$

식 (2)에 연결부의 질량 0.266kg과 시간-변위 조건인  $x(0)=-2.25\text{cm}$ ,  $x(t_0/2)=0$ ,  $x(t_0)=2.25\text{cm}$ 를 대입하면 고유진동수(304.54rad/s), 위상차(-1.4rad) 및 진폭(2.28cm)을 구할 수 있으며 강성이 24.67kN/m인 스프링이 전개되기 위한 소요시간( $t_0$ )은 0.00926s로 계산된다. 이는 프리텐서너 작동 요구시간인 0.038s를 만족하므로 폭발 압력으로 구한 스프링 강성이 타당함을 확인하였다.

### 4. 스프링 형상 설계

본 논문에서 제시한 반영구적 시트벨트 프리텐서너는 차량 좌석의 벽면에 부착되는 부품으로 차량 좌석 벽면 규격에 제한된다. 또한 기존 파이로 타입 프리텐서너와 동일한 성능으로 작동해야 하므로 랙 기어가 45mm 직선운동 하도록 식 (3)을 사용해서 스프링 형상을 설계해야 한다. 스프링을 결정하기 위해선 피치와 총 감은 수를 알아야 한다. 피치는 자유길이, 밀착높이, 유효감김수와 선경으로 구할 수 있다. 자유길이는 유효감김수, 선경, 변형량으로 구하고 밀착 높이는 유효감김수, 선경의 허용차의 최대치로 계산할 수 있다. 앞선 제한조건을 압축 코일 스프링 관련 식에 대입한 결과를 표 1에 나타

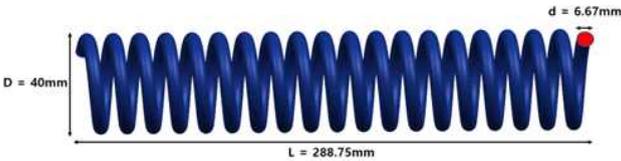
내었으며 이를 통한 스프링 최종 형상은 그림 4와 같다.

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

$$L = (n + 2) \times d + \delta, HS = (n + 1) \times d_{max}$$

[표 1] 설계한 스프링의 상세표

스프링강성 (k) [N/mm]	밀착높이 (HS) [mm]	압축가능한 높이 (L-HS) [mm]	유효감김수 (n) [개]
24.44	133.4	155.35	19

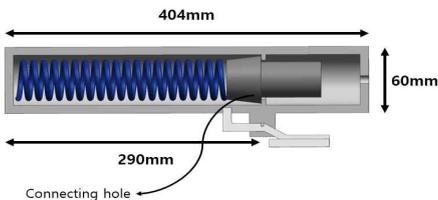


[그림 4] 설계한 코일 스프링

### 5. 제작 및 작동 검증

기존의 프리텐셔너는 화약 폭발에 의해서 전개되지만 본 논문에서 고안한 프리텐셔너는 탄성력을 기반으로 전개되므로 사고 시 압축된 스프링이 해제가 되면서 랙 기어가 일정 시간 내에 직선운동을 하여 프리텐셔너가 전개되어야 한다. 따라서 평상시 스프링을 압축하고 있어야 하고 사고 시 압축 해제가 용이한 고정 장치가 필요하다.

스프링의 탄성력이 랙 기어에 전달되어야 하므로 랙 기어와 스프링은 직접 연결되어있어야 한다. 스프링의 외경은 40mm이고 랙 기어의 하단부 직경은 15mm로 다른 부품없이 직접연결이 어렵다. 따라서 스프링과 랙 기어를 연결시켜주기 위해서 connecting hole을 설계했다. 앞서 설계했던 스프링의 규격과 다른 부품들의 길이를 고려해 connecting hole과 고정부를 설계하였으며 스프링을 포함한 탄성력 기반 프리텐셔너의 최종 형상은 그림 5와 같다.



[그림 5] 반영구적 프리텐셔너의 작동 사진

본 논문에서 고안한 프리텐셔너는 스프링의 탄성력을 견뎌야하고 앞서 설계했던 힘이 랙 기어에 가해져야 하기에 기존 프리텐셔너와 동일한 기계구조용 탄소강 강재의 일종인 SM45C로 제작해야 한다. 하지만 제작기간, 안전성, 비용 문제로 인하여 실제 크기로 구현함에 무리가 있다고 판단되어

3D 프린터로 검증을 진행하였다. 주요 부품인 랙 기어, 매니폴드, 피니언, 스프링을 일정 비율로 소형화해서 작동 테스트를 진행한 결과 그림 6과 같이 고정부의 해제가 풀리면서 압축되어 있는 스프링이 압축 해제가 되고 랙 기어가 직선운동을 하면서 안전띠가 일정량 인입되는 것을 확인할 수 있었다.



[그림 6] 반영구적 프리텐셔너의 작동 사진

### 6. 결론

차량 사고가 발생할 경우 파이로 타입 프리텐셔너가 탑승자의 상해 가능성을 최소화 하지만 화약 폭발 방식이므로 화재나 파편이 튀는 2차 사고의 위험이 있고 재사용이 되지 않아 경제적, 환경적인 측면에서 악영향을 미치고 있다. 따라서 기존 파이로 타입 프리텐셔너의 가스 발생기에서 발생하는 가스 폭발에너지를 탄성력을 기반으로 한 구조로 대체함으로써 프리텐셔너가 비정상적으로 전개되는 것을 방지하고 재사용이 가능하도록 하였다.

동역학적 열역학적 해석을 기반으로 한 가스 폭발 에너지를 통해 폭발력 및 탄성력을 설계했다. 또한 프리텐셔너는 탑승자의 안전을 위해 일정 시간 내에 작동되어야 하므로 비감쇠 1자유도 진자운동을 수행하였으며 압력과 시간 조건을 동시에 만족하는 스프링 강성 값을 선정하였다. 프리텐셔너 부착 위치 규격을 고려해 스프링 형상을 설계하였으며 실제 제작을 통해 벨트 인입 여부를 확인하였다. 본 논문에서 고안한 시트벨트 프리텐셔너는 기존의 프리텐셔너보다 재사용 횟수를 높일 수 있을 것으로 예상되므로 실제 차량에 활용되어 운전자 및 동승자의 안전과 친환경적인 영향에 도움이 되길 기대한다.

### 참고문헌

[1] 옥창국, “접촉식 프리텐셔너 클러치 메커니즘에 관한 연구”, 한국정밀공학회 학술발표대회 논문집, pp. 1355-1356, 2011

[2] Simon Xunnan He and Michael D. Wilkins. “A Method to Evaluate the Energy Capability of Seat Belt Pretensioners” SAE Transactions, Vol. 108, SECTION 6: JOURNAL OF PASSENGER CARS, PART1 (1999), pp. 71~72