

자동차용 프리텐셔너의 성능향상을 위한 실험적 연구

정 성 필¹⁾ · 박 태 원^{*2)} · 송 택 림³⁾

아주대학교 기계공학부 대학원¹⁾ · 아주대학교 기계공학부²⁾ · (주) 디비아이³⁾

Experimental Study to Improve the Performance of the Pretensioner for a Passenger Vehicle

Sung Pil Jung¹⁾ · Tae Won Park^{*2)} · Taeck Rim Song³⁾

¹⁾Graduate School of Mechanical Engineering, Ajou University, Gyeonggi 443-749, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Ajou University, Gyeonggi 443-749, Korea

³⁾R&D Team, Technology & Quality Department, DBI Inc., 198-1 Baeko-ri, Hyangnam-eup, Hwasung-si, Gyeonggi 445-924, Korea

(Received 17 February 2009 / Accepted 17 July 2009)

Abstract : This study presents the practical design modification to improve the retracting performance of the pyro-typed high power pretensioner. 3 components of the pretensioner are redesigned and the usefulness of the design modification is verified by the experiment. During the pretensioning process, the gas blast generated from the gunpowder is transferred to the rack-pinion gear through the manifold. The rack-pinion gear is connected with the spool where the webbing is rolled up. According to the rotation of the pinion, the spool is turned and the webbing is winded. To help the gas blast flow well, the shape of the inner cross section of the manifold is changed. The spur gear design program is developed and used to find the best combination of the rack-pinion gear pair to increase the power transmission efficiency. The pinion guide is installed on the spool to prevent the vibration of the pinion. As a result of the experiment, the amount of the web retraction length is increased when every single design modification is applied. Therefore, the retracting performance of the pretensioner is considered to be improved if the presented design modifications are applied.

Key words : Pyro-typed high power pretensioner(파이로 타입 하이 파워 프리텐셔너), Design modification(설계 변경), Gas blast(가스 폭발파), Spur gear design program(평기어 설계 프로그램), Rack-pinion gear(랙-피니언 기어), Power transmission efficiency(동력 전달 효율)

1. 서 론

시트벨트는 차량 탑승객의 안전을 보장하는 가장 효율적이면서 효과적인 기구 장치이다. 차량 충돌 또는 급정거시 승객의 몸체가 관성에 의해 앞으로 쏠리는 현상이 발생한다. 이때 시트벨트를 풀어주거나 감아들이는 장치인 리트랙터가 벨트의 인출을

막고 승객의 몸체를 좌석에 고정시켜 줌으로써, 승객이 전면부의 윈드실드나 에어백등과의 충돌로 인해 상해를 입을 가능성을 저감시킨다. 그러나 시트벨트의 특성상 탑승객이 아무리 시트벨트를 잘 착용하였다 하더라도, 벨트에는 어느정도 슬랙(벨트의 늘어짐 현상)이 존재하게 된다. 이러한 슬랙은 시트벨트 구성품들과 탑승자간의 어셈블리 오차와 웨빙의 재질적 특성으로부터 기인한다. 벨트의 슬랙

*Corresponding author, E-mail: park@ajou.ac.kr

이 많이 존재할 경우 차량충돌 또는 급정거시 리트랙터가 벨트의 추가 인출을 막는다 하더라도, 탑승자가 전면부의 에어백(air-bag) 또는 스티어링 휠(steering wheel)과의 충돌로 인해 부상을 입을 위험이 있다. 이러한 슬랙에 의한 승객의 상해 가능성을 최소화 시키시키기 위해 프리텐서너(pretensioner)가 개발되었다. 프리텐서너는 차량 충돌 직후 리트랙터를 구동시켜 늘어진 웨빙을 되감아들임으로써 탑승자를 의자에 구속시키고, 탑승자의 안전성을 향상시킨다. 한편, 프리텐서너는 승객의 안전을 위해 고안된 장치지만, 과도한 벨트 인입 또는 벨트 하중은 탑승자의 흉부에 압박을 가하게 되어 오히려 승객에게 상해를 입힐 수 있다. 때문에 대부분의 자동차회사에서는 벨트 인입량은 120mm 이상이 되면서도, 벨트에 걸리는 최대 장력은 2.5 ~ 3kN 이하가 되도록 제한을 두고 있다.

프리텐서너의 주 기능이 벨트를 인입하는 것이기 때문에 벨트의 인입량은 프리텐서너의 성능을 확인하는 가장 중요한 척도이다. 그러나, Breed의 여러 가지 종류의 프리텐서너의 성능 확인 실험에 기초해 보았을 때, 120mm의 인입량은 매우 달성하기 어려운 목표이다.¹⁾ 프리텐서너의 인입 성능을 향상시키기 위해서 Lee²⁾ 등은 프리텐서너에 대한 동역학 및 구조 해석을 수행하였고, 그 결과를 설계에 반영하였다. Park³⁾ 등은 프리텐서너에 대한 동역학 모델을 생성하고, 120mm 인입을 위한 화약 폭발압을 제안하였다. Lee⁴⁾ 등은 측면 충돌 해석 모델을 이용하여 프리텐서너가 승객의 상해에 미치는 영향을 여러 가지 모드에서 분석하였다. 이상의 연구들은 CAE를 활용하여 프리텐서너에 대한 해석 모델을 생성하고, 성능을 예측하였는데, 구동 부품간 마찰, 더미 바디의 반력등에 의한 에너지 손실등을 고려하지 못했기 때문에 벨트의 인입량을 정확하게 예측하기에는 한계가 있다. 또한 Simon¹⁾ 등은 실험 데이터를 이용하여 벨트에 걸리는 장력과 벨트 인입량의 관계를 간단한 비선형 방정식으로 유추했다. 그러나 이 방정식은 벨트 인입량에 영향을 주는 더미의 반력, 시스템의 조립오차등 여러 가지 주요한 요인들의 효과를 반영하지 못하고 있다.

본 연구에서는 프리텐서너의 인입량을 향상시키

기 위하여 프리텐서너를 구성하는 부속품들을 재설계 하였고, 직접 실험해 봄으로써 각 부속품들이 프리텐서너의 성능에 미치는 영향을 확인하였다. 프리텐서너의 성능을 확인 할 수 있는 실험 장치를 제작하였고, 승객이 정지해 있는 상태에서 프리텐서너를 작동시켰을 때의 인입량과 벨트에 걸리는 최대 장력을 측정하였다. 총 3가지의 프리텐서너 구성 부품에 대한 설계 수정 및 실험을 수행하였고, 실험 결과를 바탕으로 인입량 120mm를 위한 프리텐서너 구성품들의 최적 설계 조합을 제시하였다.

2. 프리텐서닝 시스템

본 연구에서 대상으로 하는 프리텐서너는 리트랙터를 구동시키는 동력원으로서 화약 폭발압을 이용하는데 이를 파이로 타입 하이 파워 프리텐서너(pyro-typed high power pretensioner)라 부른다. 즉, 충돌 직후 화약을 터트려서 가스압을 발생시키고, 이 가스압은 기어 요소를 통해 리트랙터로 전달되어 벨트를 되감아 들인다.

Fig. 1은 프리텐서너의 구동 메커니즘을 보여준다. ECU로부터 프리텐서너에 충돌 신호가 들어오면 가스발생기(gas generator)가 활성화 되면서 내부에 장착된 화약을 폭발 시킨다. 이 화약 폭발압은 매니폴드(manifold)를 통해 랙(rack)으로 전달된다. 랙은 직선운동을 하고 피니언(pinion)을 회전시킨다. 피니언 뒤쪽에는 클러치 하우징(clutch housing) 있어서 클러치가 내부에 삽입되어있고, 피니언의 회전속도가 일정속도 이상이 되면 클러치가 피니언 밖으로 돌출하여 피니언을 스펴(spool)에 결합시킨다. 스펴에는 벨트가 감겨져 있고 피니언의 회전과

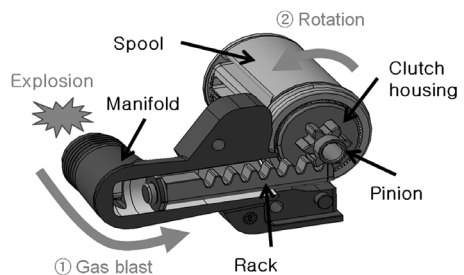


Fig. 1 Operating mechanism of a pyro-typed high power pretensioner



Fig. 2 Experimental set-up of the pretensioning system

함께 스펀이 회전함으로써 벨트가 권입된다. Fig. 2는 프리텐서너의 성능 확인을 위한 실험 장치를 보여준다. 벨트의 인입량을 확인하기 위해 표식을 설치한 후 고속카메라로 표식의 이동거리를 측정하였다. 벨트에 걸리는 하중을 측정하기 위해 벨트에 로드셀을 설치한 후 로드셀에 부과되는 하중을 측정하였다.

3. 프리텐서너 구성부품의 설계 변경

2절에서 설명한 프리텐서너의 구동 과정은 크게 두가지로 나누어 진다. 먼저 화약이 폭발하여 랙에 힘을 가함으로써 운동 에너지를 발생 시키는 열동역학 과정(thermodynamic process)이 일어나고, 랙이 피니언을 회전시키고 피니언 내부의 클러치가 스펀에 결합되어 스펀이 회전되면서 벨트가 권입되는 다물체 동역학 과정(multibody dynamic process)이 일어난다.

이에 본 연구에서는 프리텐서너의 인입성능 향상을 위해 프리텐서너를 구성하는 여러 가지 부품중에서 에너지의 전달에 큰 영향을 끼치는 4가지 내부 구성 부품에 대한 재설계를 실시하였고 실험을 통해 제안된 설계안을 검증하였다. 첫째, 화약 폭발압의 진행에 큰 영향을 끼치는 매니폴드의 내부 형상을 수정 하였다. 둘째, 화약 폭발에너지를 리트랙터의 기계 구동 에너지로 변환시켜주는 랙-피니언 기

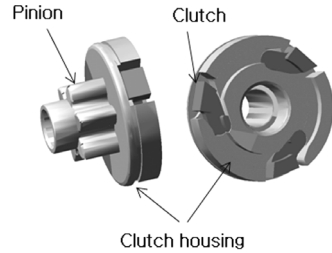


Fig. 3 Clutch housing & clutch assembly

어의 최적 설계를 실시 하였다. 셋째, 피니언의 회전시 떨림현상을 방지하기 위해 피니언 가이드(pinion guide)를 설치하였다. Fig. 3은 클러치 하우징 내부에 클러치가 삽입되어 있는 모습을 보여준다. 평상시에 스펀은 피니언과 결합되어있지 않고 벨트의 움직임에 따라 자유롭게 회전한다. 그러나 프리텐서너가 작동하게 되면 피니언 내부에 있는 클러치가 돌출하여 피니언과 스펀을 연결시키고, 피니언의 회전과 함께 스펀이 회전함으로써 벨트가 강제 인입된다. 피니언은 단지 클러치를 통해서만 스펀과 구속되기 때문에, 랙으로부터 전달되는 강한 전달력을 회전력으로 변환시키는 과정에서 좌우 떨림 현상이 발생한다. 이러한 떨림 현상 때문에 랙의 길이 방향 운동에너지가 모두 피니언의 회전 운동에너지로 전달되지 못하고 일부의 에너지가 유실된다. 이러한 손실을 감소시키기 위해 스펀에 피니언의 좌우 떨림을 막고, 피니언이 순수하게 회전만 할 수 있도록 도와주는 피니언 가이드(pinion guide)를 설치하였다.

3.1 매니폴드 내부 형상 수정

Fig. 4는 매니폴드의 단면 형상을 보여준다. 초기 설계시 프리텐서너의 전체 크기를 감소시키기 위해 그림과 같이 매니폴드 내부에 턱을 설치하여 랙을 그만큼 뒤로 이동시켰다. 턱 바로 밑에는 가스 발생기(gas generator)가 장착되어있다. 이와 같은 턱은 노즐 효과를 일으킬 수 있기 때문에 가스 발생기로부터 발생하는 압력이 감소되면서 랙에 전달될 우려가 있다. 따라서 개선된 설계안에서는 턱을 제거하였고, 랙의 장착 공간을 확보하기 위해 제거된 턱의 길이만큼 매니폴드의 길이를 7mm 늘린 후 랙을 장착하였다.

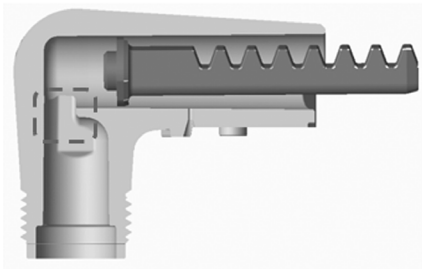


Fig. 4 Cross section of the manifold

3.2 기어 형상 설계

프리텐셔너에 사용되는 랙-피니언 기어는 화약의 폭발에너지를 리트랙터의 회전 운동에너지로 전환시키는 중요한 기계요소이다. 랙-피니언 기어의 최적 조합을 찾기 위해 Fig. 5와 같은 설계프로그램을 개발하였다. 기어의 동력 전달 성능을 확인하기 위해 Fig. 6과 같이 ADAMS를 이용하여 프리텐셔너에 대한 동역학 모델을 생성하였고, 실험데이터와 이 비교를 통해 생성된 모델의 신뢰성을 검증하였다.³⁾ 기어 설계를 위해 Table 1과 같이 설계변수를 선정하였다. 랙-피니언 기어와 다른 부품들과의 조립성을 고려하여 기어의 잇수와 모듈을 표와 같이 선정하였고, 압력각과 공구 날뜯 등글기 계수는 산업에서 많이 활용되고 있는 값으로 선정하였다.⁵⁻⁷⁾ 기어의 잇수가 작기 때문에 기어의 언더컷(undercut)현상이 발생할 우려가 있으므로 이를 방지하기 위해 각 설계변수들의 값에 따라 전위계수를 적절히 입력하였다. 생성된 기어는 3차원 CAD 프로그램인 Pro/Engineer를 이용하여 솔리드 모델로 변환

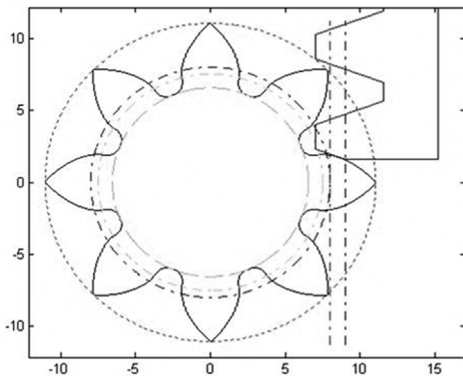


Fig. 5 Rack - Pinion gear design program

Table 1 Design variables for gear design

No	잇수*모듈	압력각	공구 날뜯 등글기 계수
수준	8*1.75	20	0.25
	8*2		
	9*1.75	25	
10*1.5			

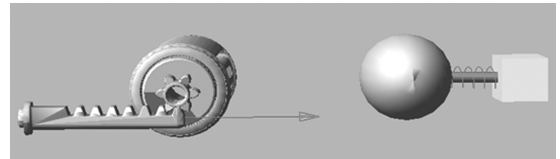


Fig. 6 Dynamic model of the pretensioner

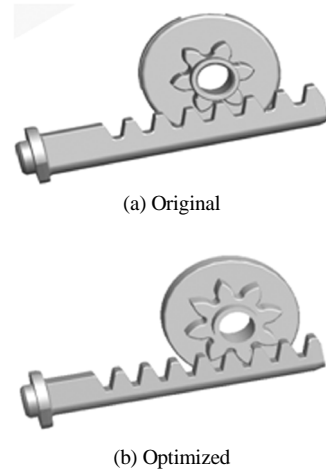


Fig. 7 Design change of the rack & pinion gear

하였으며, 변환된 모델을 Fig. 6의 동역학 모델에 적용시켜 기어의 변화에 따른 프리텐셔너의 성능 변화를 확인하였다. Table 1에서 선정된 설계변수의 개수와 수준에 따라 4×2×2 직교배열표를 생성하여 총 8회의 시뮬레이션을 실시하였고, 결과를 바탕으로 동력 전달 성능이 가장 좋을때의 기어의 최적 조합을 찾아내었다.⁸⁾ Fig. 7은 기존의 기어와 최적화된 기어를 보여준다. 최적화된 기어의 경우 잇수는 8개, 모듈은 2, 압력각은 25°, 공구날뜯 등글기 계수는 0.25이다. 이때 언더컷을 방지하기 위해 전위계수는 0.39로 설정하였다.

3.3 피니언 가이드 설치

피니언 회전 시 좌우 떨림 현상을 방지하기 위해

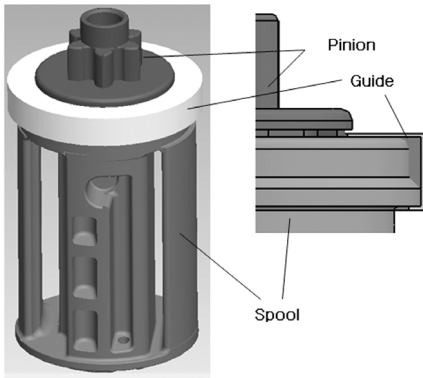


Fig. 8 Pinion guide assembly

여 Fig. 8과 같이 피니언 가이드를 설치하였다. 피니언 가이드가 피니언의 회전을 방해하지 않으면서 피니언의 떨림을 잡아주도록 하기 위해 얇은 철판을 이용하여 가이드를 제작하였다. 스펴과의 장착의 용이성을 위해 실제 실험에서는 원형의 가이드가 아닌, 원형에서 약 1/3가량을 잘라낸 후 스펴에 장착하였다.

4. 실험 결과

Table 2는 3절에서 제시한 설계안을 적용시킨 후 얻은 인입량 결과를 보여준다. 각 조건에 대하여 총 3회의 반복 실험을 실시하였고, 표에는 나타나있는 인입량 결과는 실험결과의 평균치이다.

표에서 실험 1은 기존 모델에 대한 결과를 보여주고, 실험 2,3,4는 3절에서 제시한 설계안을 기존 모델에 한 개씩만 적용하였을 때의 결과를 보여준다.

실험 2의 경우 매니폴드의 턱만을 제거한 실험이다. 이때 인입량이 103.6mm로 기존의 인입량보다 약 6mm 정도 상승 했음을 알 수 있다. 실험 3은 최적화된 기어를 설치한 후 실시한 실험의 결과이다. 인입량 결과가 기존의 실험과 거의 같았다. 이것의 원인은 크게 두 가지로 결론 내려진다. 우선 기어의 가공 오차이다. 기어의 잇수를 늘리면서도 다른 부품들과의 결합을 위해 기어의 전체 크기는 기존의 기어와 비슷한 수준을 유지하였다. 때문에 기어 이의 크기가 작아졌고, 이는 곧 가공 오차로 연결되었다. 또한 피니언의 뒤쪽에 클러치가 삽입 될 클러치 하우스가 있는 관계로 가공하는데 있어서 많은 어려

Table 2 Experimental results

No	턱제거	기어	가이드 설치	인입량 (mm)
1	No	Original	No	95~98
2	Yes	Original	N0	103.6
3	No	Optimized	No	96
4	No	Original	Yes	101.9
5	No	Revised	No	102
6	yes	Revised	No	105
7	No	Revised	Yes	106.6
8	Yes	Revised	Yes	104.3

움을 겪었다. 두 번째 원인은 랙의 잇수가 8개가 되면서 피니언이 그만큼 회전을 못했기 때문이다. 스펴이 1회전할때 벨트가 120mm 인입되도록 리트랙터가 설계되어 있다. 8개의 이를 가진 피니언이 1회전을 하기 위해서는 랙의 이가 9개가 필요하다. 그러나 실제 실험에서는 매니폴드와의 결합을 위해 랙의 길이를 그대로 유지했고, 이 때문에 랙의 잇수가 피니언과 같은 8개가 되면서 피니언이 1회전을 하지 못한 걸림돌이 된 것이다. 피니언의 1회전을 위해 랙의 잇수를 9개로 증대시키고자 하면 랙의 전체 길이를 늘려야하고, 이에 맞춰 매니폴드의 길이가 더 늘어나야 한다. 그러나 이렇게 되면 매니폴드의 내부 공간이 늘어나기 때문에 랙에 전달되는 화약 폭발압이 감소된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 랙-피니언 기어의 잇수는 그대로 유지하고 압력각과 전위계수와 전위 계수만을 수정하여 약간 다른 형태의 기어를 창성한 후 실험을 실시하였다. 그 결과가 실험 5이다. 실험 결과 인입량이 증대되었으므로 재설계한 랙-피니언 기어가 유효하다고 판단된다.

실험 4는 피니언 가이드만을 설치한 후 실시한 실험 결과를 보여준다. 실험결과 벨트의 인입량이 약 3mm 정도 증대됨을 알 수 있었다. 이상의 실험으로부터 기존의 프리텐셔닝 시스템에 매니폴드의 턱을 제거하고, 기어를 수정하고, 피니언 가이드를 설치하는것이 모두 벨트의 인입량을 증대시키는데 효과가 있음이 판명되었다.

실험 6,7은 수정된 기어를 장착한 상태에서 매니폴드의 턱을 제거하고, 피니언 가이드를 설치한후 실시한 후 얻은 실험 결과를 보여준다. 표에서 볼 수 있듯이 모두 기존보다 인입량이 상승하였다. 실

협 8은 수정된 설계안을 모두 적용한 후 실시한 실험 결과이다. 실험 결과 인입량이 104.3mm로 실험 6과 실험 7보다 오히려 감소하였다. 실무자간 협의 결과 이것은 시스템의 조립오차 때문인 것으로 판명되었다.

5. 결론

본 연구에서는 프리텐셔너의 성능향상을 위해 프리텐셔너의 구동에 중요한 영향을 미치는 요소를 찾아 설계 개선을 하였고, 도출된 설계 개선안의 유효성을 실험을 통해 확인하였다.

- 1) 매니폴드의 내부형상, 랙-피니언 기어의 조합, 피니언의 떨림을 방지하는 가이드를 대상으로 설계 개선이 실시되었고, 실험 결과 개선안이 유효하고, 제안된 개선을 적용했을 때 프리텐셔너의 인입성능이 향상됨을 알 수 있었다.
- 2) 그러나 3가지 개선안을 모두 조합하여 적용하였을 경우에는 시스템의 조립오차 때문에 벨트의 인입량의 증대효과가 잘 나타나지 않았다.
- 3) 향후 본 연구에서 제시한 설계 개선안을 모두 적용시킨 경우에 대한 재실험이 필요하고, 아울러 본 연구 성과는 프리텐셔너를 개발하는 단계에서 설계자들이 반드시 고려해야하는 설계 요소를 선정하는데 큰 도움을 주리라 사료된다.

References

- 1) X. H. Simon and D. W. Michael, "A Method to Evaluate the Energy Capability of Seat Belt Pretensioners," SAE 9901008, 1999.
- 2) Y. B. Lee, W. H. Ryu and I. A. Hyun, "Leveraging the Development of the High-Power Pretensioner using CAE and Evaluate the Influences to Injuries," MSC Korea User's Conference, 2007.
- 3) C. S. Park, T. W. Park, S. P. Jung, K. Y. Jung and Y. S. Hong, "Study on the Dynamic Analysis of a High-Power Pretensioner Considering the Clutch Effect," Spring Conference Proceedings, Korean Society for Precision Engineering, pp.223-224, 2008.
- 4) K. S. Lee, S. J. Kim, C. S. Kim and B. R. Cho, "A Study on the Use of Seatbelt Pretensioners for Occupant Injury Improvement in the Vehicle Side Collisions," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.1395-1400, 2007.
- 5) G. M. Marita, Handbook of Gear Design, McGraw-Hill, New Delhi, 1985.
- 6) J. R. Colbourne, The Geometry of Involute Gears, Springer-Verlag, 1987.
- 7) D. W. Dudley, Handbook of Practical Gear Design, CRC Press, 1984.
- 8) S. P. Jung, T. W. Park, C. S. Park, S. M. Park, K. J. Jun and T. R. Song, "The Optimum Design of a Rack and Pinion Gear Using the Taguchi Method," International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2008.
- 1) X. H. Simon and D. W. Michael, "A Method to