

## 모터구동형 안전벨트 리트랙터의 구동 메커니즘 설계

### Driving Mechanism Design of a Motorized Seat Belt Retractor

탁 태 오\*    박 재 순\*\*    국 민 구\*\*\*    김 대 희\*\*\*    신 승 언\*\*\*    최 석\*\*\*  
Tak, Tae-oh   Park, Jae-Soon   Kuk, Min-Gu   Kim, Dae-Hee   Sin, Seong-Eon   Choi, Seok

#### Abstract

Motorized retractors enhance the safety of passengers by removing the slack of webbing and by holding upright driving position. Reliability of a driving mechanism that includes one-way clutch between the driving motor and webbing is directly linked to the safety of passenger. In this research, conditions for locking one-way clutch, and also conditions for sustaining locking are theoretically investigated. The operation of a motorized retractor under realistic conditions is simulated in order to validate the proposed retractor design.

키워드 : 안전벨트, 일방향 클러치, 모터구동형 리트랙터  
Keywords : *Seat Belt, One-way Clutch, Motorized Retractor*

#### 1. 서론

안전벨트는 충돌 시 승객을 상해로부터 보호하는 가장 중요한 안전장치이다. 근래에 안전벨트의 승객보호 성능을 향상시키기 위한 연구가 많이 진행되고 있는데, 리트랙터에 모터를 장착하여 상황에 따라 벨트의 장력을 조절할 수 있는 모터 구동형 리트랙터(Motorized Retractor)를 개발하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 충돌 시 화약의 폭발작용으로 벨트의 느슨함을 제거하는 프리텐셔너(Pre-tensioner)가 장착된 안전벨트는 널리 자동차에 적용되고 있지만, 모터 구동형 리트랙터는 아직 장착이 일반화 되어 있지 않다. 그러나 일본 등의

자동차 선진국에서는 이미 프리텐셔너 뿐 아니라 모터 구동형 리트랙터가 장착된 안전벨트가 고급 차종에 활발하게 적용되고 있다. 그림 1은 일본의 자동차 부품회사인 Tokai-Rika에서 2005년 동경모터쇼에 출품한 모터 구동형 리트랙터를 보여주고 있다. 우리나라에서도 모터 구동형 리트랙터 개발의 필요성을 인식하고 기존의 외국 제품과 차별화되면서 성능이 우수한 모터 구동형 리트랙터를 개발하기 위해 많은 노력을 하고 있다. 본 연구에서는 모터 구동형 리트랙터에서 가장 중요한 부분인 구동 메커니즘의 해석 및 설계를 다루고자 한다.

모터 구동형 리트랙터는 충돌이 발생하기 직전에 느슨해져 있는 웨빙을 잡아당겨 운전자가 바른 자세를 유지하기 위해 모터를 구동시켜 웨빙을 감게 된다. 모터가 작동할 때는 웨빙이 감겨있는 샤프트는 운전자를 압박하는 방향으로만 회전해야 하고, 모터가 작동하지 않을 때는 운전자의 움직임에 따라서 웨빙이 자유롭게 인출이 되어야 하므로, 샤프트의 회전을 한쪽 방향으로만 구속할 수 있는

\* 강원대학교 기계공학과 교수, 공학박사  
\*\* 강원대학교 기계공학과 석사과정  
\*\*\* 강원대학교 기계공학과 학사과정

일방향 클러치가 필요하다. 모터 구동형 리트랙터에서 일방향 클러치의 정확한 작동은 운전자의 안전과 직결되므로 신뢰성 높은 구동 메커니즘을 설계하고 이를 검증하는 작업은 리트랙터 설계에 있어서 필수적인 과정이다.

모터 구동형 리트랙터에 대한 연구로는 민석기(2004) 등이 모터 구동형 리트랙터를 차량의 전체적인 승객보호 시스템의 일부로 보고 상황에 따라서 어떤 방식으로 리트랙터가 작동해야 하는가에 대한 연구를 수행하였다[1]. 일본에서는 히데오(2004) 등이 충돌 전에 브레이크를 밟는 신호를 이용하여 모터 구동형 리트랙터가 어떤 작용을 하는지를 연구하였고[2], 미국에서는 맥코이(2005) 등이 전복과 관련하여 모터 구동형 리트랙터가 프리텐서너와 같이 작용하여 측면 자동차 사고에서 어떤 효과를 나타내는지 연구한 것[3]과 마이클(2005) 등이 전복으로 인한 충돌시 안전벨트 리트랙터의 작용을 평가한 연구 등이 있다[4].

본 연구에서는 일방향 클러치에서 확실한 잠김 작용이 발생하는 조건에 대한 이론적 해석을 수행하였다. 또한 실제상황과 유사한 조건에서 모터의 구동에 의해서 리트랙터가 작동하는 상황에 대한 동역학 해석을 통하여 리트랙터의 성능을 검증하였다.



그림 1 Tokai-rika사의 모터 구동형 리트랙터

## 2. 모터 구동형 리트랙터의 구조

그림 2는 현재 국내 D사에서 개발 중인 모터 구동형 리트랙터를 보여주고 있다. 그림 2(a)의 오른쪽 순서대로 동력이 전달되고 클러치의 작동에 따라 리트랙터 축의 웨빙이 감기게 되어 에어백이 터지기 전에 승객을 시트에 밀착시켜 충돌에 의한 2차 피해를 줄이게 된다. 그림 2(b)는 설계된 리트랙터의 감속운동 순서를 나타낸 것이다. 이때, 기어의 감속비는 1차 기어 감속이 6.4 : 1, 2차 기어 감속이 6 : 1, 3차 기어 감속이 1.21 : 1로 총 기어 감속비는 46.45 : 1이 된다.

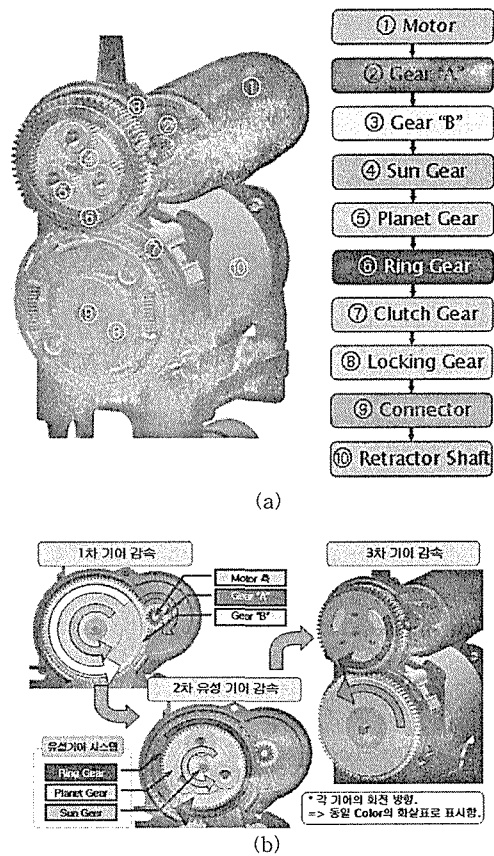


그림 2 리트랙터의 구조 및 명칭과 감속 운동 순서

구동 메커니즘은 총 3단계에 걸쳐 감속을 하게 되는데, 2차 감속에서 3차 감속(클러치)으로 이어지는 것은 유성기어 시스템이다. 이것은 그림 2(b)에서 보는 것처럼 1차 감속인 모터에서 태양기어로 이어져서 3개의 위성기어를 거쳐 링기어로 이어지는 구조로 이루어져 있다. 이와 같은 감속을

통해 모터의 구동력이 클러치 기어로 전달되고 리트랙터 축에 연결된 웨빙을 감아서 운전자 및 승객을 보호하게 되는 것이다.

직거리,  $l_{Px}$ 는 폴의 무게중심점에서 피봇점까지의 수평거리이다. 충돌이 발생하였을 경우, 가속도의 크기는  $ng$ 이다.

### 3. 일방향 클러치의 잠김 작용 해석

모터 구동형 리트랙터는 일방향 클러치의 원리를 이용하여 작동한다. 그림 3은 클러치 기어의 각 부품 명칭을 나타낸 것이다.

클러치의 작동은 평상시에 해리 상태를 유지하는 클러치에 일정한 토크 이상이 가해지면 클러치 기어의 회전에 의해 클러치 기어 패널이 회전한다. 이때 잠김 스프링이 작동하여 폴 가이드(Pawl Guide)를 회전시키고, 폴(Pawl)이 가이드 패널을 따라 움직이면서 클러치에 잠기게 된다. 마찰스프링과 복합적인 작용을 하는데, 고정되어 있는 마찰스프링이 기어의 회전에 의해 작동하면, 폴이 가이드의 구멍을 따라 클러치와 맞물리는 잠김 위치로 이동하게 된다. 폴이 잠김 위치에 도달하면 클러치와 폴이 맞물려 클러치가 잠기고 마찰스프링에 의해 약간의 시간을 지체한 후, 맞물린 상태 그대로 클러치가 돌면서 웨빙이 감기게 된다.

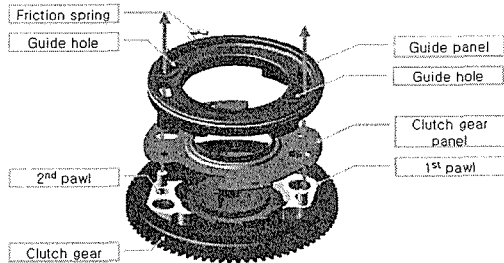


그림 3 클러치 기어의 각 부품 명칭

일방향 클러치의 잠김 작용에 대한 해석을 위해서 클러치 기어에 작용하는 힘과 모멘트를 알아야 한다. 그림 4에서와 같이 잠김 스프링에 의해 폴에 작용하는 힘은 접촉면에 수직인 힘과 마찰 스프링에 의한 토크, 잠김 스프링에서 폴에 수직인 힘만 작용한다. 여기서  $T_S$ 는 마찰 스프링에 의한 토크,  $F_{P1}$ 과  $F_{P2}$ 는 폴 접촉면에 수직인 힘,  $\alpha$ 는 폴과 잠김 스프링의 접촉점에 수직방향과 클러치 원점이 이루는 각도,  $r_P$ 는 원점과 접촉점 사이의 거리이다. 여기서  $l_P$ 는 피봇점에서 잠김 스프링과 폴의 접촉점까지의 거리,  $M_P$ 는 폴의 회전 모멘트,  $l_{Py}$ 는 폴의 무게중심점에서 피봇점까지의 수

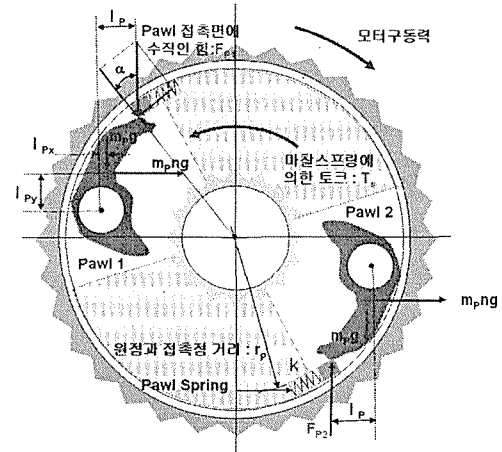


그림 4 클러치 기어의 잠김 작용

폴1에 작용하는 모멘트는 식(1)과 같다.

$$F_{P1}l_P + nl_{Py}m_Pg + l_{Px}m_Pg = 0 \quad (1)$$

식(1)을 정리하면 식(2)과 같다.

$$F_{P1} = -\frac{nl_{Py} + l_{Px}}{l_P}(m_Pg) \quad (2)$$

폴1과 같이, 폴2에 작용하는 모멘트를 정리하면 식(3)과 같다.

$$F_{P2} = \frac{nl_{Py} + l_{Px}}{l_P}(m_Pg) \quad (3)$$

따라서  $l_{Px} = l_{Py} = 0$ 이면  $F_{P1} = F_{P2} = 0$ 이다. 즉, 질량 중심이 폴이 도는 축에 가까울수록 작은 힘으로 폴을 제어할 수 있다는 것이다.

마찰스프링의 작용으로 인해 일정한(매우 짧은) 시간동안 클러치의 작동이 지연되는데 이때 늘어짐(Slack)이 발생한다. 폴 스프링은 늘어짐을 방지시켜준다. 이것은 식(4)로 설명되어진다.

$$\begin{aligned} T_S &= r_P(F_{P1} \sin \alpha + F_{P2} \sin \alpha) \\ &= r_P(F_{P1} + F_{P2}) \sin \alpha \\ &= r_P \cdot 2k_P(l - l_0) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $l$ 은 폴 스프링이 작용할 때 변화하는 길이,  $l_0$ 는 폴 스프링의 초기 길이,  $k$ 는 폴 스프링의 스프링 상수이다. 식(4)은 클러치가 작동하면 좌우 2개의 폴을 밀어내려고 하기 때문에 스프링 길이의 변화가 생겨서 마찰스프링에 의한 토크에 영향을 준다는 것이다.

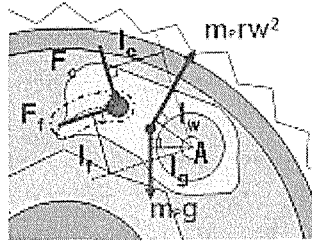


그림 5 잠기려고 하는 풀에 작용하는 힘

실제로 풀이 잠기는 것은 풀에 있는 돌기와 풀 가이드와의 접촉을 통해서이다. 마찰스프링이 작동하면 풀 가이드가 돌게 되는데, 이때 풀에 있는 돌기가 가이드 홀과 접촉하여 가이드를 따라 이동하고 풀 끝과 클러치와 접촉이 생겨 잠기게 된다. 그림 5와 같이 잠기려고 하는 풀에 작용하는 힘 요소는 중력과 원심력, 회전 토크, 수직 반력이고, 각 요소들을 이용하여 풀이 클러치에 잠긴 상태로 회전할 때, 풀과 클러치가 잠긴 상태를 계속 유지하기 위한 조건에 대한 점A의 모멘트 식(5)을 만들 수 있다.

$$m_p r w^2 l_w + F_f l_f = m_p g l_g + F_c l_c \quad (5)$$

마찰력  $F_f = 0.22 F_c$  (풀과 가이드 라인 사이의 마찰계수는 국내 D사에서 제공한 마찰계수  $\mu = 0.22$ 이다.)로, 풀의 돌기에 수직인 힘이 가이드 홀과 접촉하여 마찰을 일으키기 때문이다. 이를 바꾸어 쓰면 식(6)과 같다.

$$m_p r w^2 l_w + 0.22 F_c l_f = m_p g l_g + F_c l_c \quad (6)$$

식(6)을 가이드라인에서 풀의 돌기에 수직인 힘  $F_c$ 에 대한 식으로 정리하면 식(7)과 같다.

$$F_c = - \frac{m_p r w^2 l_w - m_p g l_g}{l_c - 0.22 l_f} \quad (7)$$

여기서  $m_p r w^2$ 은 풀에 발생하는 원심력,  $F_f$ 는 풀과 가이드 사이의 마찰력,  $F_c$ 는 가이드 라인에서 풀의 돌기에 수직인 힘,  $l_f$ 는 피벗점과 풀의 돌기 사이의 수직거리,  $l_c$ 는 피벗점과 풀의 돌기 사이의 수평거리,  $l_w$ 는 피벗점에서 무게중심에 작용하는 원심력에 수직인 거리,  $l_g$ 는 피벗점에서 무게중심에 작용하는 중력에 수직인 거리를 나타낸다.

식(7)에서 풀이 클러치와 잠기기 위해  $F_c$ 가 최소가 되어야한다. 따라서  $F_c = 0$ 이 되기 위해서는  $l_w = l_g = 0$ 이어야한다. 이 조건을 만족시키기 위해 풀의 질량중심과 피벗점은 일치되어야 함을 알 수 있다. 그러나 피벗점에서 풀과 클러치 패널 사이에 마찰력과 정지 상태에서 회전시 모멘트 등이 존재하므로  $F_c \neq 0$ 이다.

풀이 풀릴 때는  $F_c, F_f$ 의 방향을 반대로 하여 계산하면 된다.

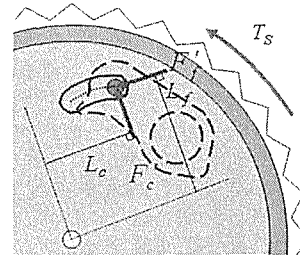


그림 6 잠김 시 마찰 스프링과 풀에 작용하는 힘

그림 6은 풀과 클러치가 잠기고 있는 상태에서 풀과 마찰 스프링 사이에서 잠김을 유지하기 위해 힘이 발생하는데, 여기서 마찰 스프링에 작용하는 토크와 풀에 작용하는 힘 요소를 식(8)으로 나타낼 수 있다.

$$T_s \geq 2(F_f L_f + F_c L_c) \quad (8)$$

여기서  $T_s$ 는 마찰 스프링에 작용하는 토크,  $F_f$ 는 풀의 돌기에 작용하는 마찰력,  $L_f$ 는 클러치 중심으로부터 풀의 돌기까지의 수직거리,  $F_c$ 는 가이드라인에서 풀의 돌기에 수직인 힘,  $L_c$ 는 클러치 중심으로부터 풀의 돌기까지의 수평거리를 나타낸다. 식(8)은 마찰 스프링의 토크  $T_s$ 를 최소화하기 위해  $L_f$ 와  $L_c$ 를 최소화해야 한다는 것을 의미한다.

지금까지 알아본 것은 모터 구동형 리트랙터에서 일방향 클러치의 작동을 통해 웨빙이 잠기기까지의 각 요소들을 수학적으로 검증한 결과이다. 모터로부터 클러치 기어까지 동력이 전달되어 마찰 스프링에 의해 풀 가이드가 움직여서 풀의 이동을 통해 클러치가 잠기어 돌게 되어 웨빙이 잠기는데, 각 부품들의 연관성 있는 작동으로 클러치가 잠기기 위해서  $F_c$ 와 마찰스프링에 의한 토크  $T_s$ 의 중요성을 알아보았다.

#### 4. 리트랙터 작동의 검증

일방향 클러치의 구동 메커니즘을 검증하기 위해 ADAMS를 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 리트랙터 부품의 물성치는 표 1과 같은 값을 사용하였다. 리트랙터에 장착된 모터는 그림 7의 MABUCHI MOTOR의 RS-555VD 모터로서, 정격 전압 12V, 17.4Amp를 사용하고, 최대 토크 500 mN·m, 최대 13,000rpm의 회전 속도로 작동한다.

모델의 각 부품의 연결은 크게 기어 부분과 클러치 부분으로 나뉘어져 있다. 기어 부분은 그림 8(a)과 같이 각 기어의 기어비를 이상적으로 나타내기 위해 회전 조인트와 기어 조인트를 이용하여 모델링 하였는데, 기어 대 기어는 기어조인트를 사용하였고 각 기어의 축은 회전 조인트를 사용하였다. 클러치 부분은 그림 8(b)과 같이 풀의 잠김 작용과 마찰 스프링의 모델링을 위해 접촉 요소를 사용하여 모델링 하였다. 위의 자료를 이용하여 해석한 결과, 그림.9와 같은 그래프를 얻을 수 있다.

표 1 각 부품의 질량 및 관성 모멘트

부품명	질량 [g]	관성모멘트 ( $I_{xx}$ ) [kg·mm <sup>2</sup> ]	관성모멘트 ( $I_{yy}$ ) [kg·mm <sup>2</sup> ]	관성모멘트 ( $I_{zz}$ ) [kg·mm <sup>2</sup> ]
기어A	3.18	0.32	0.32	0.23
기어B(태양기어)	88.8	12.93	12.93	25.21
위성기어	8.81	0.14	0.14	0.22
링기어	49.2	11.51	11.51	22.68
풀	3.60	0.16	0.14	0.36
클러치 기어	65.5	42.54	21.63	21.63
잠김 기어	34.0	1.67	1.67	3.00
풀 가이드	53.2	10.8	13.73	23.95
클러치기어 패널	6.91	1.18	0.90	2.09
마찰 스프링	2.56	0.91	0.91	1.82

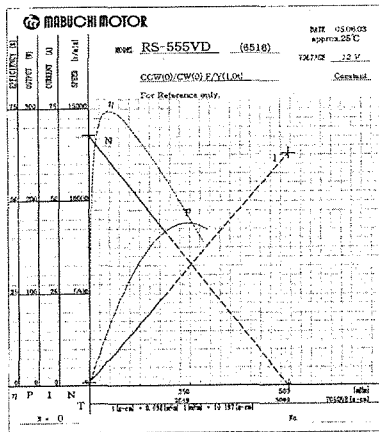
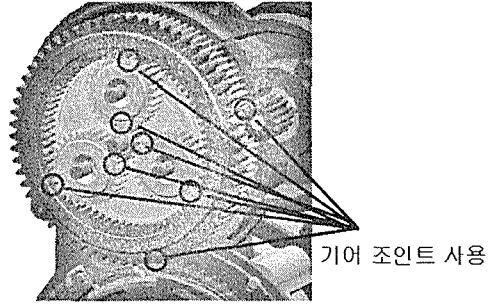
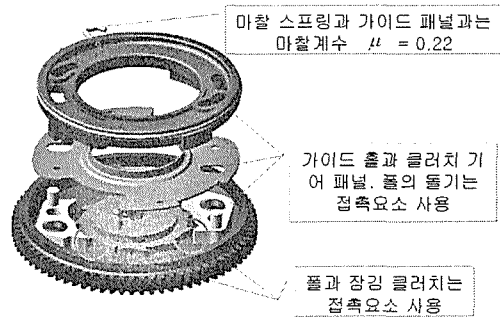


그림 7 구동 모터의 특성 선도



(a) 기어 부분의 모델링



(b) 클러치 부분의 모델링

그림 8 ADAMS 모델링에 이용된 요소들

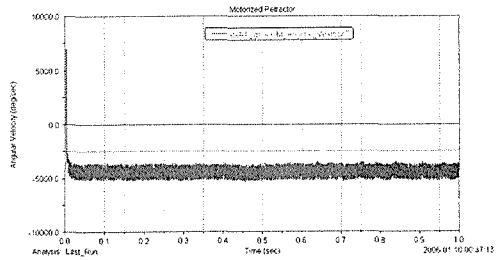


그림 9 클러치 기어의 각속도

실제 모터 구동형 리트랙터가 작동하는 것에서 0.4~0.5초 구간의 값이 중요하다. 여기서 해석된 결과는 평균 4500deg/sec(CCW)로서 모터 구동형 리트랙터가 작동할 때 1초에 12.5바퀴(=4500/360)가 돌고, 웨빙이 감기는 축의 반지름이 22.5mm이면 외력이 작용하지 않는다고 가정할 때, 22.5mm\*2π가 되어 한 바퀴당 636mm의 웨빙이 감기고 1초에 7960mm가 감긴다. 하지만, 웨빙이 풀에 밀착되고 나면 일정량의 변위가 생기고 그 이후로는 그

상태가 유지되기 때문에 실제로는 약 65mm 정도 웨빙이 감긴다. 이것은 그림 9의 그래프에서 보듯이, 처음 0.008초 동안 갑자기 웨빙이 당겨지고, 그 이후로는 그 상태가 유지되기 때문이다.

0.008초 정도부터 웨빙이 감긴 상태가 유지된다는 의미는 클러치가 0.008초부터 잠기기 시작한다는 것이다. 이것은 그림 10의 폴이 잠기는 각도 변화를 통해 확인할 수 있다. 폴이 그만큼 빠른 시간 안에 잠겨야 한다는 것을 의미한다. 신속한 반응 일수록 승객을 안전하게 보호할 수 있다는 의미이다. 그래프에서 보듯이 0.03초부터는 폴이 완전하게 잠겨서 변화가 없다는 것은 클러치가 해리가 없다는 것을 의미하기도 한다. 이 그래프의 측정 조건은 앞서 제시한 모터 선도와 모델링을 이용하여 리트랙터가 외부의 힘에 의해 어느 방향으로도 움직이지 않고 정지상태에 있다는 가정 아래에서 측정된 것이다.

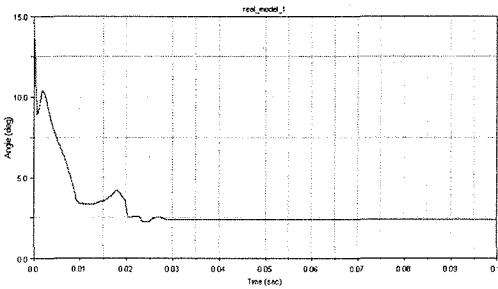


그림 10 잠김 시 폴의 각도 변화

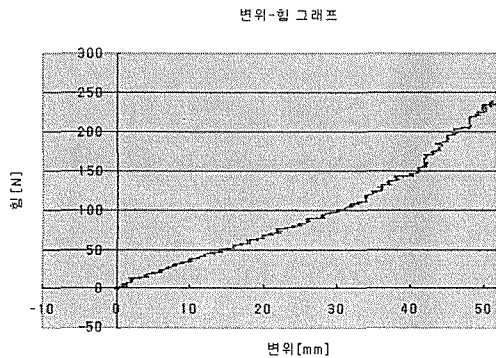


그림 11 Tokai-Rika사의 리트랙터 시험 결과

그림 11은 일본에서 상용화된 모터 구동형 리트랙터의 시험 결과 값으로 승객이 안전벨트를 착용한 후 모터가 구동 되었을 때 웨빙에 작용하는 최대 장력이 250N 정도임을 보여 주고 있다. 이 값을 바탕으로 클러치의 최종 출력토크를 구하기 위

해 그림 2(a)에서 보이는 커넥터(connector)부분에 스프링 상수  $500N \cdot mm/deg$ , 댐핑 상수  $500 N \cdot mm \cdot sec/deg$ 의 임의로 충분히 강한 토션 스프링을 설치하여 해석을 실시하였다.

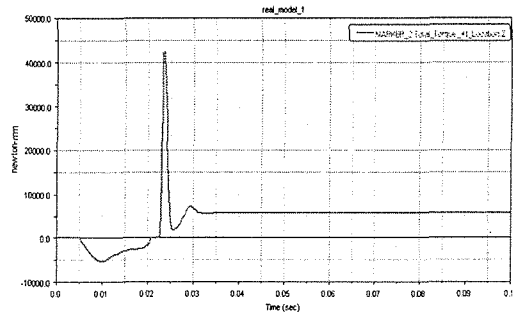


그림 12 클러치의 최종 출력 토크

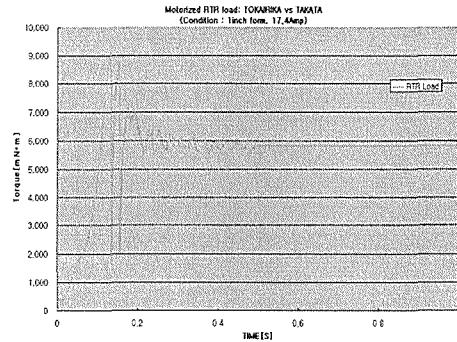


그림 13 시험 결과 얻은 토크값

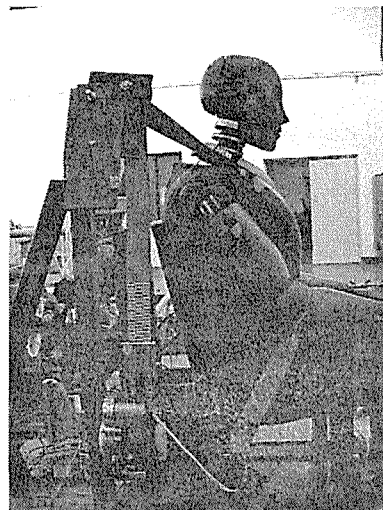


그림 14 리트랙터의 정적 시험

그림 14와 같이 더미에 안전벨트 시스템을 부착

하여, 리트랙터 위에 가속도 센서와 로드셀을 장착하여 모터에 전기를 가해 리트랙터를 작동시켜 하중값을 얻었다. 여기서 얻은 하중값을 이용하여 시뮬레이션 결과와 비교해보았다.

그림 12에서 보는 것과 같이 시뮬레이션 결과는 0.023초에서 강한 토크가 걸렸다가 0.035초 이후 5700mN-m 로 수렴함을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과와 비교하여 그림 14처럼 시험한 실제 리트랙터의 시험 결과는 그림 13에서 보는 것과 같이 리트랙터를 작동시켰을 때 웨빙의 토크값은 작용하는 하중과 클러치에 연결된 커넥터의 반경을 곱하여 얻었다. 시험결과, 0.5초 이후로 5700mN-m로 수렴하는 수렴하므로 해석결과와 비슷함을 알 수 있다.

## 5. 결과 및 고찰

자동차 충돌시에 프리텐서너가 폭발하고 에어백이 터지면서 승객을 보호한다. 이때 에어백으로 인해 2차 피해를 막기 위해 최적의 상태에서 에어백이 터지는 자세를 만들기 위해 모터 구동형 리트랙터가 쓰인다.

본 논문에서는 모터 구동형 리트랙터의 설계에 맞추어 구동 메커니즘 해석을 해보았다. 여기서 얻은 결과를 토대로 실제 제품을 제작할 때, 본 연구에서 해석한 결과를 참고할 수 있다. 본 논문은 정지상태에서의 해석과 테스트를 기반으로 한 연구이기에, 추후 슬래드 테스트 및 해석을 통하여 더 많은 비교 분석이 이루어져야 한다.

향후 발전 과제로 다른 제품들과의 비교를 통하여 개발 제품의 안전의 타당성을 입증해야 한다. 또 다른 과제로 안전벨트 버클(Buckle)과 연결하여 통합적인 안전벨트 시스템을 연구할 수 있다. 그리고 유성기어 시스템의 변화를 통해 모터 구동형 리트랙터의 작동시 결과값을 예측하여 개발 제품보다 안전한 안전벨트가 연구되어야 한다.

## 참고 문헌

- [1] 민석기, 이재관, 김병수, “전동 안전벨트를 이용한 충돌 예방 안전장치의 개발”, 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, pp.1219-1224, 2004
- [2] Hideo Tobata., Chinmoy Pal., Hideo Takagi., Shunichi Fukuda., Hiroshi Liyama. and Robert Yakushi., “Development of a Brake-Operated Pre-Crash Seatbelt System and Performance Evaluation”, *SAE Paper No. 2004-01-0851*, 2004.
- [3] Robert W. McCoy and Karen M. Balavich., “Analysis of Prototype Electric Retractor, a Seat Belt Pre-Tensioning Device and Dummy Lateral Motion Prior to Vehicle Rollover”, *SAE Paper No. 2005-01-0945*, 2005.
- [4] Michael E. Klima, Daniel E. Toomey and Matthew J. Weber, “Seat Belt Retractor Performance Evaluation in Rollover Crashes”, *SAE Paper No. 2005-01-1702*, 2005.