

충돌 예상 시나리오에 따른 모터 구동형 리트랙터의 잠김 작용 평가

박재순[†] · 국민구^{*} · 김대희^{*} · 탁태오^{*}

Evaluation of Motorized retractor locking mechanism based on predetermined collision scenarios

Park Jae-Soon, Kuk Min-Gu, kim Dae-Hee and Tak Tae-Oh

Key Words : Motorized retractor(모터 구동형 리트랙터), One-way clutch(일방향 클러치),
Predetermined collision scenarios(충돌 예상 시나리오)

Abstract

A retractor is the major component of a seatbelt system that restrains passengers by locking the movement of webbing. Recently, in order to increase the effectiveness of seatbelt systems, motorized retractors that remove slack and correct passenger posture just before airbag expansion when collision is predicted are widely used. Key component of motorized retractors is the one-way clutch that engages and disengages the winding action of webbing according to the direction of motor revolution. Analytical investigation of action of the one-way clutch mechanism has been carried out to figure out conditions for one-way locking, and to study the effect of various kinematic and dynamic design variables of one-way clutch. Using combination of ADAMS and LifeMOD soft-wares, dynamic simulation of operation of motorized retractors including Hybrid-III dummy model has been carried out to evaluate the performance of the motorized retractors in various crash scenarios.

1. 서 론

안전벨트는 차량 충돌, 전복, 급브레이크 상황과 같은 위험한 상태에서부터 차량 탑승자를 보호해주는 중요한 장치이다. 이러한 안전벨트는 리트랙터, 버클, 웨빙, 앵커리지 등으로 구성되어 있다. 지금까지 차량에 장착된 대부분의 안전벨트 리트랙터는 차량 선회시의 발생하는 Yaw 각과 Roll 각 및 감가속에 따라 변화되는 Pitch 각으로부터 웨빙의 풀림 작용을 막아 탑승자의 움직임을 구속하는 ELR(Emergency Locking Retractor) 기능과 차량의 충돌이나 전복 사고시 화약을 터뜨려서 리트랙터

축으로 웨빙을 감아 탑승자의 움직임을 막는 프리텐션(Pretension) 기능을 장착하고 있다. 현재의 리트랙터는 ELR 과 프리텐션 기능뿐 아니라, 리트랙터에 모터를 장착하여 차량의 사고 전에 적극적으로 안전을 유지시켜주는 모터 구동형 리트랙터에 대한 연구가 진행 중이다.

모터 구동형 리트랙터는 충돌이 발생하기 전, 탑승자의 움직임으로 인해 느슨해져 있는 웨빙을 감아, 탑승자와 시트를 밀착하여 에어백이 터지기 전에 충돌 전 탑승자의 자세를 가장 이상적인 자세로 만들어 준다. 모터 구동형 리트랙터는 사고 전·후 상황에서는 웨빙을 감아 탑승자를 구속시키지만, 평상시 상황에서는 웨빙의 움직임이 자유로워야 한다. 이러한 상황을 구현하기 위해서 위해서 모터 구동형 리트랙터에는 일방향 클러치가 사용되었고 있는데, 일방향 클러치는 모터가 구동될 때에는 웨빙을 감아주고, 구동되지 않으면 웨빙이 자유로이 인출되도록 하는 기구로서, 모터 구동형 리트랙터의 핵심적인 부품이다.

[†] 강원대학교 기계·메카트로닉스공학과

E-mail : jjoi0816@hotmail.com

TEL : (033)242-5564 FAX : (033)242-6013

^{*} 강원대학교 기계·메카트로닉스공학과

모터 구동형 리트랙터의 작동 효과를 바탕으로 충돌 및 전복에 대하여 탑승자를 안전하게 구속하기 위한 연구가 많이 진행되었다. 민석기(2004) 등은 전동 안전벨트를 이용한 충돌 예방안전 장치의 개발이란 주제로, 충돌 예방 및 경고 알고리즘을 구성하여 ECU 및 전동 안전벨트와 결합하였다. 이 실험의 결과로 실차 실험 결과를 분석하여 충돌 경고 알고리즘의 변수를 속도 및 시간으로 판단하여 다양한 척도에 대한 경고 알고리즘을 구현하였다. 그리하여 운전자의 주행 특성에 맞는 경보를 조절하고 위험 정도를 판단하여 단계별 경보가 가능한 충돌 경고 알고리즘을 제안하였다. 히데오(2004) 등은 브레이크의 작동으로 충돌 전 상황을 모사하여 차량과의 충돌 전에 모터 리트랙터 시스템의 효율성을 평가하였다. 충돌 중 탑승자의 전면 이동의 결과로 상해 정도를 가늠한 연구를 하였는데, 본 논문에서도 이와 유사한 방법으로 연구를 진행 중이다. 맥코이(2005) 등은 프로토타입의 전기적 리트랙터를 해석하여 안전벨트의 프리텐션 장치를 적용시켰다. 더미가 차량의 전복이 일어나기 이전에 측면으로 움직임을 가지는 것을 실험을 통하여 비교 분석 하였다. 이와 유사한 연구로 마이클(2005) 등은 전복으로 인한 충돌 상황에서 모터 리트랙터의 작용에 대한 평가를 연구하였다.

본 논문은 앞서 언급한 일방향 클러치에 대한 연구를 바탕으로 모터 구동형 리트랙터의 정적 상황에서의 실험 및 동역학 해석을 검증하고, 다양한 충돌 시나리오에 따라 모터의 토크를 변화시켜 탑승자의 구속 정도를 판단하고, 모터 구동형 리트랙터가 탑승자를 충돌에 이상적인 자세로 만드는 지를 평가해보기로 한다.

2. 모터 구동형 리트랙터의 작동 원리

모터 구동형 리트랙터는 Fig.1 과 같은 부품들로 이루어져 있다. 이것은 크게 모터부와 기어부, 클러치부의 세 부분으로 나눌 수 있다. 모터부는 차량의 배터리로부터 전기를 생성하여 모터 토크를 만들어서 기어부에 전달한다. 기어부에서는 모터로부터 전달된 토크를 감속시켜 클러치부로 전달한다. 기어부는 위성기어와 링기어, 선기어로 구성된 유성기어 시스템을 사용하였고, 클러치부는 Fig. 1에서 보는 것과 같이 클러치 기어, 마찰스프링, 가이드 패널, 폴 2개, 클러치로 구성되어 일방향 클러치를 만들어낸다. 이 부품들의 상호 작용으로 클러치를 회전시켜 웨빙이 잠기게 된다.

$$\beta = \beta(\alpha) \quad (1)$$

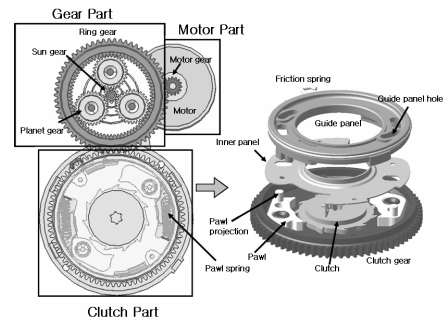


Fig. 1 Structures and names of motorized retractor

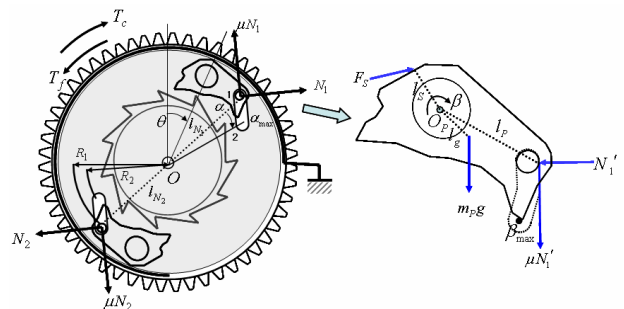


Fig. 2 Acted forces of parts for locking one-way clutch

이렇게 구성된 일방향 클러치는 클러치 기어에 토크가 전달되면서 작동이 시작된다. Fig.2와 같이 클러치 기어가 θ (가이드 패널이 고정되어 있다고 가정하였을 때의 수직으로부터 폴이 잠길 때까지 클러치 기어의 회전각)만큼 회전하게 되면, 폴의 회전 중심도 O 점으로부터 θ 만큼 회전하게 된다. 이때 마찰스프링으로 인해 움직임의 제한을 받는 가이드 패널의 홈을 따라 폴의 돌기가 이동하게 된다. 이 같은 상황에서 가이드 패널은 폴이 잠기기까지 α (클러치 기어의 회전에 따른 가이드 패널의 회전각)만큼의 회전이 발생하고, 폴의 회전 중심을 따라 폴의 돌기는 β (가이드 패널의 홈에 따라 발생하는 폴의 회전각)만큼 회전하면서 폴 끝이 클러치의 이와 맞닿아 잠기게 되면서 θ 각 이후부터는 클러치부 전체가 같이 회전을 하게 된다. Fig.2와 같이, 이 상황에서 마찰 스프링의 역할은 일방향 클러치가 잠기기 위해서 클러치 기어의 구동토크(T_c)로부터 마찰 토크(T_f)를 발생시켜 클러치 기어와 가이드 패널 간의 상대 회전 운동을 만드는 것이다. 이러한 상대 회전 운동은 α 의 회전 속도가 균일하면 β 의 회전 속도는 α 의 크기가 작을수록 빠르고, β 의 회전 변위의 크기는 α 의 변위가 1에서 2로 움직일 때 폴의 돌기가 작동되는 거리인 $R_1 - R_2$ 에 의하여 결정된다. 그러나 β 의 구체적인 회전 변위는 가이드 패널의 홈 형상에 의해서 결정되고, 식(1)과 같은 비선형 관계식을 가진다고 정의하겠다. 그렇지만, 폴이 완전히 잠겼을 때의 $\alpha_{max}, \beta_{max}$ 은 상수 값을 가지게 된다.

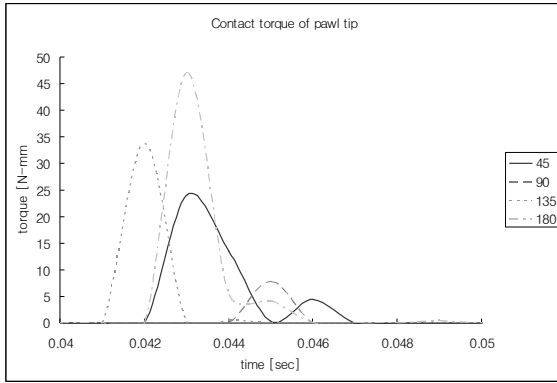


Fig. 3 Acted forces of parts for locking one-way clutch

상대 회전 운동은 Fig.2 와 같이 가이드 패널의 관점(좌)과 폴의 관점(우)에서 모멘트 평형식을 만들어 설명할 수 있다. 이 모멘트 식에서 α, β 에 대한 관계식은 식(1)을 사용하겠다. 먼저 가이드 패널의 관점에서는 가이드 패널의 회전 중심 O 에 대한 모멘트 식(2)을 만들 수 있다. Fig.2 에서 N_1, N_2 는 폴이 잠기는 움직임에 따른 가이드 패널의 홈을 따라 발생하는 수직력이고, $\mu N_1, \mu N_2$ 는 수직력에 따라 발생하는 폴의 돌기와의 마찰력이다. 이러한 수직력과 마찰력이 작용하는 거리는 l_{N_1}, l_{N_2} 이고, 이 거리는 구동토크에 따라 회전하는 θ 각의 영향을 받는다. 그리고 가이드 패널에는 클러치 기어와의 상대 회전 운동으로 인하여 마찰스프링의 마찰 토크 T_f 가 작용한다. 클러치 기어를 회전시키는 구동 토크는 T_c 이다. 식(2)에서 클러치 기어의 회전에 따라 발생하는 가이드 패널의 수직력과 마찰력, 작용하는 거리가 두 개의 폴이 같은 값을 가지면 식(3)로 정리할 수 있다.

$$\sum M_o = \beta(\alpha) \cdot [T_f - T_c + (l_{N_1} \cdot \cos\theta) \times \mu N_1 - (l_{N_1} \cdot \sin\theta) \times N_1 + (l_{N_2} \cdot \cos\theta) \times \mu N_2 - (l_{N_2} \cdot \sin\theta) \times N_2] = 0 \quad (2)$$

$$\sum M_o = \beta(\alpha) \cdot [T_f - T_c + 2(l_N \cdot \cos\theta) \times \mu N - 2(l_N \cdot \sin\theta) \times N] = 0 \quad (3)$$

두 번째는 폴에 대한 모멘트 식을 유도해 보기로 한다. 폴은 2 개중 Fig.2 에서 보여지는 위쪽의 폴을 선택하겠다. 폴의 회전 중심은 O_p 점이고, 가이드 패널과 반대 방향의 수직력 N'_1 과 마찰력 $\mu N'_1$ 이 작용한다. 이 작용거리는 l_p 이다. 폴은 위치에 따라 중력에 영향을 받는데 이때 중력의 크기는 $m_p g$ 이고, 그 작용거리는 l_g 이다. 그리고 클러치 기어와 가이드 패널의 상대 회전 운동에 의하여 폴 스프링력(가이드 패널과 클러치 기어 사이에서 폴에 힘을 가하는 스프링)을 받는다(폴 스프링의 역할은 일방향 클러치가 잠길 필요가 없는 상황에서 폴이 클러치 쪽으로 이동하는 것을 막는

것이다.). 이 폴 스프링력의 크기는 F_s 이고, 그 작용거리는 l_s 이다. 여기서 각 힘들에 따라 작용되는 거리는 힘들의 수직 방향으로 모멘트 팔길이가 만들어지기 때문에 θ 와 β 의 상호 작용에 따라 달라진다.

$$\sum M_{O_p} = \beta(\alpha) \cdot [l_p \cdot \sin(\theta, \beta) \times N'_1 - l_p \cdot \cos(\theta, \beta) \times \mu N'_1 - l_g \cdot \cos(\theta, \beta) \times m_p g - l_s \cdot \sin(\theta, \beta) \times F_s] = 0 \quad (4)$$

위의 식들과 같이 일방향 클러치의 작동에는 여러 힘들이 조합된다. 이 힘들로부터 일방향 클러치가 잠기는 것을 다시 정리하자면, 기어부를 통해 클러치 기어에 구동토크(T_c)가 작용하여 회전을 시작하면, 마찰스프링의 토크(T_f)가 작용하여 클러치 기어와 가이드 패널의 상대 회전 운동이 발생한다. 여기서 마찰스프링의 토크로 인해 가이드 패널은 잠시 동안 정지 상태가 되고, 클러치 기어의 회전으로 2 개의 폴이 가이드 패널의 홈을 따라 이동한다. 폴의 돌기가 가이드 패널의 홈 끝(2 번위치)에 도달하면 클러치의 이와 맞닿는데, 그 순간부터는 일방향 클러치 전체가 같이 작동한다. 따라서, 일방향 클러치가 작동하는 것은 폴의 회전각이 변화하는 것으로 확인할 수 있다. 이러한 잠김을 만족하는 범위 내에서 작용된 힘들에는 여러 가지 변수가 생긴다. 그 중 일방향 클러치의 폴 2 개의 초기 회전 위치에 따라 작용하는 폴에 작용하는 힘이 달라진다. 폴 2 개가 서로 O 점을 중심으로 대칭하기 때문에 $0^\circ \sim 180^\circ$ 중 폴 1 의 질량 중심 위치가 θ 각으로부터 $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ 회전하였을 때를 비교하였다.

구동 조건은 클러치 기어의 회전 속도를 360 deg/sec 일 때, 0.1 초 동안의 결과 중, 폴 끝이 클러치와 맞닿기 시작하는 구간인 0.04 초에서 0.05 초 사이를 비교하였다. 이 결과 Fig.3 에서와 같이 폴이 서로 수평하게 있을 때인 90° 에서 최대 $10N \cdot mm$ 로 가장 작은 접촉 토크로써 일방향 클러치가 잠기는 것을 확인할 수 있다. 45° 와 135° 에서는 각각 최대 $25N \cdot mm, 35N \cdot mm$ 가 작용한다. 180° 에서는 $48N \cdot mm$ 로 가장 큰 토크를 필요하게 되는데, 폴이 잠기기 위해서는 식(4)에서 보는 바와 같이 중력이 작용하기 때문에 이러한 결과가 나타남을 알 수 있다. Fig.3 에서 나온 결과들로 일방향 클러치가 잠기기 위한 초기 조건에서, 폴과 클러치의 접촉 토크가 최소 $48N \cdot mm$ 이상이면 폴이 해리되지 않고 잠김을 유지할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

3. 동역학 시뮬레이션

모터 구동형 리트랙터 및 더미 모델을 가상 모델링을 위하여 ADAMS/View 와 LifeMOD 를 사용

하였다. 모터 구동형 리트랙터는 Fig. 4(좌)와 같이, 각 부품의 회전 중심에 회전 조인트를 부착하였다. 위에서 확인한 일방향 클러치의 작동을 구현하기 위하여 Fig.4(우)에서 보는 것과 같이 마찰스프링과 가이드 패널(CT-1), 가이드 패널의 홈과 폴의 돌기(CT-2), 폴과 클러치(CT-3)간의 접촉 요소를 사용하였다.

위의 리트랙터 모델을 포함한 더미, 시트, 웨빙의 모델링은 Fig.5 와 같다. 더미는 LifeMOD 를 이용한 Hybrid-III 더미로 95% Male, 키 180cm, 몸무게 70kg, 나이는 30 세이다. 더미의 각 관절에는 인체와 움직임이 비슷하게 조인트를 만들었고, 허벅지, 몸통 등의 더미 구성성분은 강체와 같이 구성성분 자체가 깨지거나 부러지지 않는다. 더미와 시트, 더미와 웨빙, 웨빙과 버클, 웨빙과 리트랙터는 일방향 클러치와 같이 접촉 요소를 사용하였다.

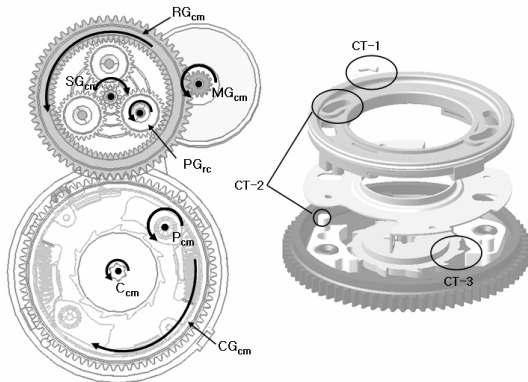


Fig. 4 Setting up joints and contacts of retractor

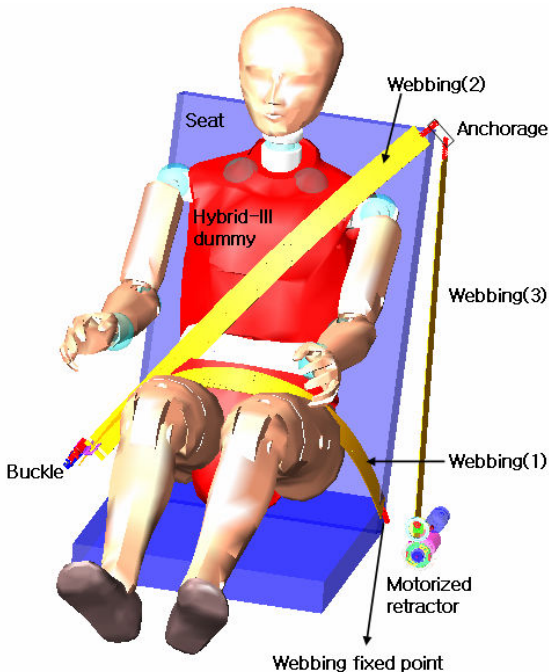


Fig. 5 Total model contained dummy, Seat, webbing, buckle and retractor

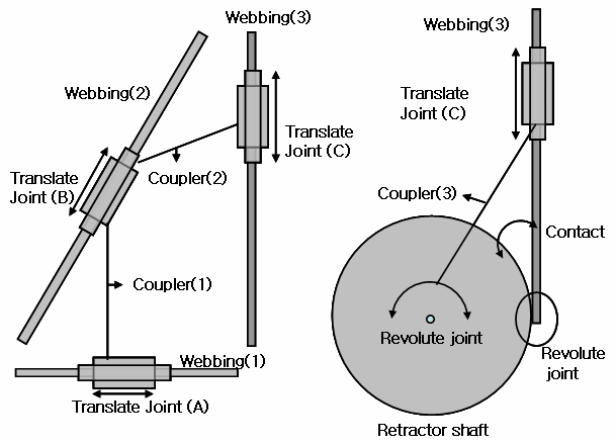


Fig. 6 Setting up couplers

웨빙은 3 부분에 나누어 설정하였다. Fig.5 의 웨빙(1)은 버클과 버클 반대편의 웨빙 고정점, 웨빙(2)는 버클과 앵커리지, 웨빙(3)은 앵커리지와 리트랙터 축으로 연결된다. 3 개로 나누어진 웨빙은 Fig.6 과 같은 원리의 커플러를 사용하여 움직임을 나타내었다. Fig. 6(좌)에서 보는 것과 같이 커플러(1)은 웨빙(1)의 병진조인트(A)와 웨빙(2)의 병진조인트(B)가 변위비를 1:1 로 하여 일방향 클러치의 잠김과 풀림에 따라 전체 웨빙이 움직인다. 커플러(2)도 커플러(1)과 같은 원리이다. Fig. 6(우)의 커플러(3)은 일방향 클러치의 잠김과 풀림에 따라 리트랙터 축이 감기는 회전 조인트와 웨빙(3)의 병진조인트(C)를 $360^\circ : 141.4\text{mm}$ (리트랙터 축의 원주)로서 회전:병진 비의 움직임을 나타내었다. 리트랙터 축과 웨빙(3)과는 회전 조인트를 만들고 접촉 요소를 첨가하여 웨빙이 감기는 효과를 나타내었다.

4. 충돌 예상 시나리오에 따른 리트랙터 작용의 평가

Table 1 Motor torques by predetermined collision scenarios

| 모드 | 충돌 예상 시나리오에 따른 모터 토크 |
|----|-------------------------|
| 1 | 위험 순간에 빠르게 조여주는 모드(17A) |
| 2 | 커브길에서 자세를 잡아주는 모드(13A) |
| 3 | 천천히 조여주는 모드(8A) |
| 4 | 진동 모드(4A) |

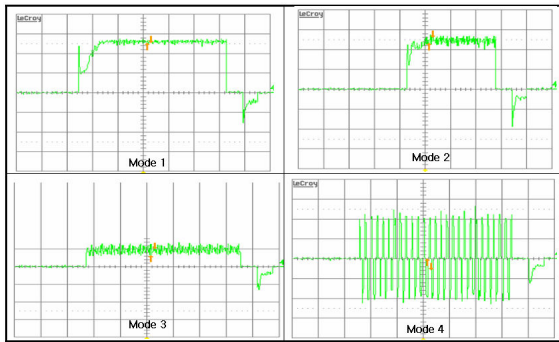


Fig. 7 Motor's inputs driving wave types based on modes, respectively

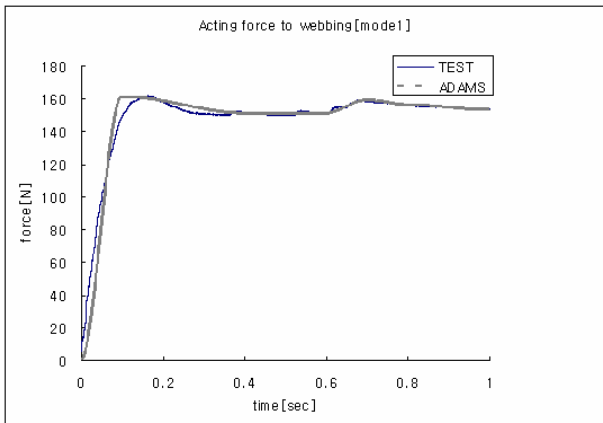


Fig. 8 Acting force to webbing[mode-1]

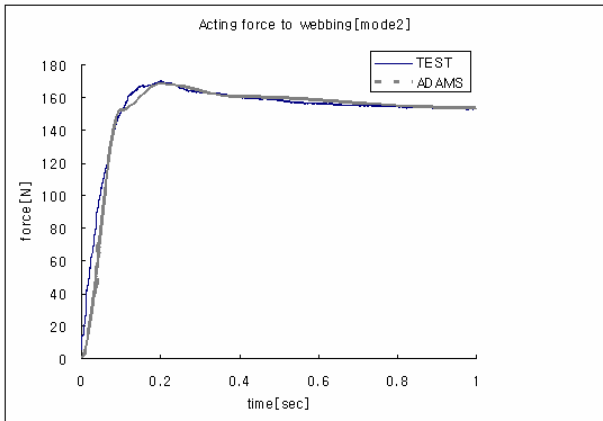


Fig. 9 Acting force to webbing[mode-2]

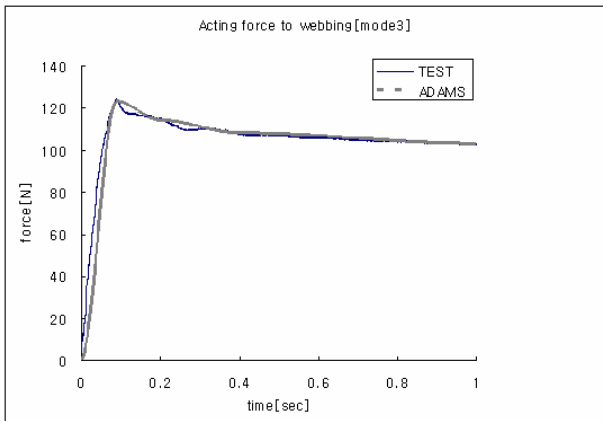


Fig. 10 Acting force to webbing[mode-3]

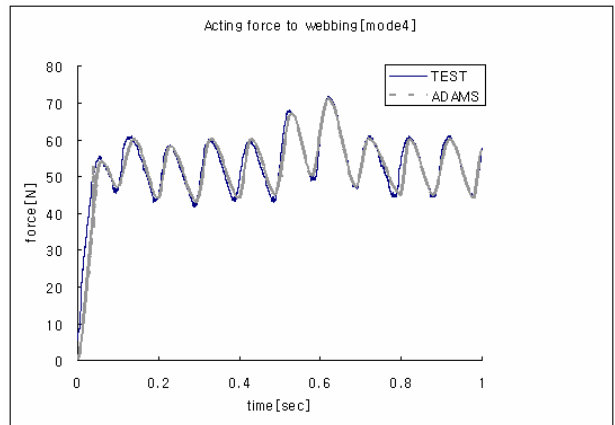


Fig. 11 Acting force to webbing[mode-4]

충돌 예상 시나리오에 따라 예측할 수 있는 모터의 구동은 크게 4 가지로 구분하였다. 그것은 Table.1 과 같고, 그 모터의 입력 구동 파형은 Fig.7 과 같다. 입력 모드에 따라 웨빙에 작용하는 힘은 Fig.8~Fig.11 과 같다. 모드 1 번과 2 번은 급박한 상황에서의 작동이기 때문에 순간적으로 최대 160~170N 의 힘이 웨빙에 작용한다. 모드 3 번과 4 번은 평상시 상황이나 주행중에 자세를 제어하는 모드이기 때문에 상대적으로 작은 모터 구동력으로 탑승자의 자세를 제어한다.

Fig.12 의 충돌 예상 시나리오에 따라 웨빙에 작용하는 장력과 변위는 Fig.13~Fig.14 와 같은 결과를 나타낸다.

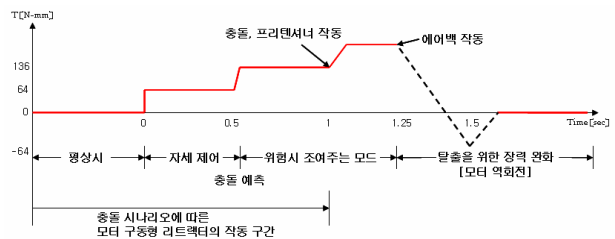


Fig. 12 Predetermined collision scenario

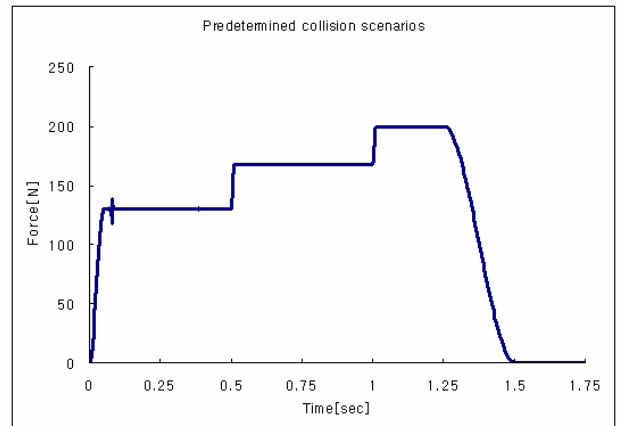


Fig. 13 Acting force to webbing due to Predetermined collision scenario

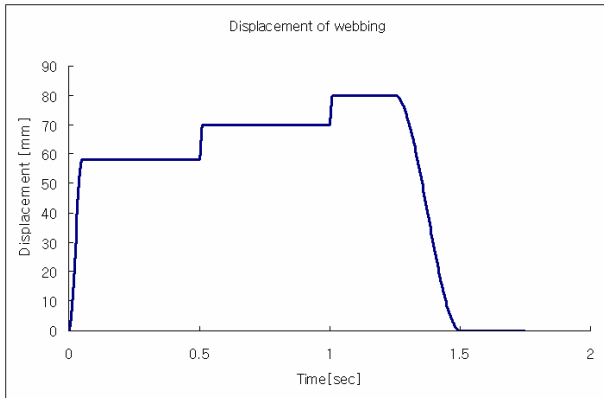


Fig. 14 Displacement of webbing due to Predetermined collision scenario

모터 구동형 리트랙터가 작용하는 구간은 0~1 초 사이로, 웨빙에는 2 단계에 걸쳐 130N, 168N의 힘이 작용하고, 이에 따른 웨빙의 변위는 58mm와 70mm의 발생한다. 1 초 이후에는 리트랙터의 작용보다 더 큰 힘이 발생하는 프리텐서너의 폭발로서 200N의 장력이 발생하고 웨빙은 10mm의 변위가 더 발생하여 탑승자를 더욱 구속하게 된다. 1.25 초 이후에는 에어백이 작동한 후로써, 리트랙터를 역방향 회전시켜 탑승자가 차량으로부터 빠져 나올 수 있도록 한다.

5. 결론

자동차가 충돌할 때는 안전벨트 리트랙터의 프리텐서너가 폭발하고 에어백이 터지면서 승객을 보호한다. 이때 에어백으로 인한 2차 피해를 막기 위하여 최적의 상태에서 에어백이 터지기 전의 이상적인 자세를 만들기 위해 모터 구동형 리트랙터를 사용한다.

본 논문에서는 모터 구동형 리트랙터의 구동 메커니즘의 잠김 작용을 평가하였다. 그 결과를 토대로 충돌 예상 시나리오에 따라서, 웨빙에 작용하는 힘과 변위를 통하여 각 충돌 예상 신호에 따른 리트랙터의 구동을 평가하였다. 본 논문은 정지 상태에서의 해석과 테스트를 기반으로 한 연구이기에, 추후 슬래드 테스트 및 해석을 통하여 더미 모델과 동적 해석에 대해 더 많은 비교 분석이 이루어져야 한다.

향후 발전 과제로는 안전벨트의 버클과 연결하여 버클의 관성해리 등과 같이 통합적인 안전벨트 시스템을 연구할 예정이다. 또 다른 연구로는 리트랙터의 작동 평가를 기본으로 하여

내구 강도 및 FEM 해석을 통하여 통합적인 충돌 시스템의 작동을 평가가 필요할 것이다.

참고문헌

- (1) Steven E. meyer, Davis Hock, Brian Herbst and Stephen Forrest, 2001, "Dynamic Analysis of ELR Retractor Spoolout," *SAE International Messe Düsseldorf*, No. 2001-01-3312
- (2) Christopher D. Morgan, Basavapatna P. Naganarayana and S. Shankar, 2004, "Comparative Evaluation of Seat Belt Retractor Websense Mechanism Rattle Noise," *SAE World Congress Detroit, Michigan*, No. 2004-01-0391
- (3) Suk Ki. Min, Jae Kwan. Lee and Byoung Soo. Kim, 2004, "Development of Pre-Crash Safety System Using Motorized Seat Belt," *KSAE*, No. KSAE04-F0195
- (4) Hideo Tobata, Chinmoy Pal, Hideo Takagi, Shunichi Fukuda, Hiroshi Iiyama and Robert Yakushi, 2004, "Development of a Brake-Operated Pre-Crash Seatbelt System and Performance Evaluation," *SAE World Congress Detroit, Michigan*, No. 2004-01-0851
- (5) Robert W. McCoy and Karen M. Balavich., 2005, "Analysis of Prototype Electric Retractor, a Seat Belt Pre-Tensioning Device and Dummy Lateral Motion Prior to Vehicle Rollover," *SAE World Congress Detroit, Michigan*, No. 2005-01-0945
- (6) Michael E. Klima, Daniel E. Toomey and Matthew J. Weber, 2005, "Seat Belt Retractor Performance Evaluation in Rollover Crashes", *SAE World Congress Detroit, Michigan*, No. 2005-01-1702
- (7) P. E. Hovoenga, H. H. Spit, M. Uijldert and A. M. Dalenoort, 2005, "Improved Prediction of Hybrid-III Injury Values Using Advanced Multibody Techniques and Objective Rating," *SAE World Congress Detroit, Michigan*, No. 2005-01-1307
- (8) Jon Bready, Michael James, Gregory Smith and Sean Tolman, John J. Gordon, 2005, "Issues in Seatbelt Inertial Release," *SAE World Congress Detroit, Michigan*, No. 2005-01-1706