산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제26권 A호, 2006.
Journal of Industrial Technology, Kangwon Natl. Univ., Korea, No. 26 A, 2006

프리텐셔너가 장착된 시트벨트 시스템의 관성잠김 안전버클 개발

Development of Inertial Locking Anti-G Buckle of A Seatbelt System With Pre-tensioner

탁 태 오* 국 민 구** 김 대 희*** 박 재 순*** 신 승 언*** 최 석***
Tak, Tea-Oh Kuk, Min-Gu Kim, Dae-Hee Park, Jae-Soon Shin, Seung-Eon Choi, Seok

Abstract

To improve passenger safety, seat belt systems with pre-tensioner that tightens seat belt webbing using explosive just before collision are widely used these days.
Even though seatbelt must not unlatched without passengers' operation. explosive power of pre-tensioner can cause unlocking of a buckle. To prevent the unlocking, an anti-g mass that blocks displacement of the release button has been attached to the buckle. In this study, the dynamics and statics of locking mechanism associated with operation of anti-g buckle has been theoretically investigated, and important design variables that affect the operation of anti-g buckle have been identified. Through the total seat belt system's dynamic simulation using force and displacement inputs obtained from seat belt sled test, design of the proposed anti-g buckle has been validated.

키워드 : *시트벨트, 프리텐셔너, 관성해리, 다물체 동역학, 버클 메카니즘*
Keywords : *seatbelt, pre-tensioner, inertia release, multibody dynamics, buckle mechanism*

1. 서론

안전벨트는 그림 1과 같이 웨빙(Webbing), 리트랙터(Retrector), 앵커리지(Anchorage), 버클(Buckle), 프리텐셔너(Pretensioner)로 구성되어 있다. 웨빙(Webbing)은 스트랩(Strap) 또는 벨트(Belt)라고도 하며, 자동차의 탑승자를 구속하는 띠로 충돌 에너지를 흡수한다. 리트랙터(Retrector)는 벨트 길이를 탑승자가 앉은 자세나 체격에 따라 조절하고 사용하지 않을 때 벨트의 격납을 목적으로 하는 장치이다.

앵커리지(Anchorage)는 웨빙의 한쪽 끝을 차체에 고정시키고 탑승자의 체격에 맞추어서 어깨벨트의 위치를 상하로 조절하여 장착시의 쾌적성을 향상시킨다. 프리텐셔너(Pre-tensioner)는 리트랙터 혹은 버클에 장착되어 차량의 충돌 시 에어백이 작동하기 전에 내부에 들어 있는 화약이 폭발하여 안전벨트의 느슨한 부분을 되감아 승객을 시트에 고정시켜 에어백 전개 시 올바른 자세를 유지할 수 있게 한다. 버클(Buckle)은 안전벨트를 장착 또는 해리하기 위한 장치이다.

이러한 안전벨트는 탑승자의 조작을 통하지 않고 해리되어서는 안된다. 그러나 버클에 장착된 프리텐셔너의 폭발로 발생하는 관성력에 의해 안전벨트의 버클은 탑승자에 의한 조작을 통하지 않고 해리가 될 수 있고 이러한 현상을 관성해리라고 한다. 프리텐셔너의 폭발 에너지는 버클의 릴리스

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

버튼을 지지하는 스프링에 전달되고 이는 스프링에 의한 래치(Latch)의 압축력을 상쇄시켜 래치를 열리게 한다. 이러한 관성해리의 발생은 탑승자로 하여금 예상치 못한 위험한 상황을 초래하게 되어 사고 시 상해를 가중시킨다.

민석기 등[1]은 레이더 센서를 이용하여 전방의 차량들에 대한 상대거리와 상대속도 등의 정보를 검출하고, 이를 통해 충돌 상황을 미리 예측하여 사전에 운전자에게 경보를 하는 것은 물론, 충돌 위험도에 따라 리트랙터에 DC모터를 구동하여 안전벨트를 자동으로 조절해주는 장치를 개발하였다. 또한 박두연 등[2]은 자동차 충돌에 의해 발생되는 관성력이 버클에 전달되어 충돌 관성의 반대로 작용하는 반발력을 일으켜서 관성해리가 발생함에 따라 충돌 관성을 소산시키기 위해 충격 가속도 방향으로만 반응하는 펜듈럼을 추가하여 Anti-G 기능이 작동하는 버클을 개발하였다.

본 논문에서는 프리텐셔너가 장착된 전면부 프레스 버튼에 Anti-G 기능을 추가한 Anti-G 버클의 역할과 특징을 분석하고 프리텐셔너의 폭발력에 의해 Anti-G 버클에 관성해리가 발생할 때 Anti-G 버클의 잠김과 해리방지 조건을 분석하였다. 그리고 동역학 해석 프로그램인 ADAMS로 Anti-G 버클을 모델링하고 해석을 수행하여 버클의 Anti-G 기능을 검증하였다.

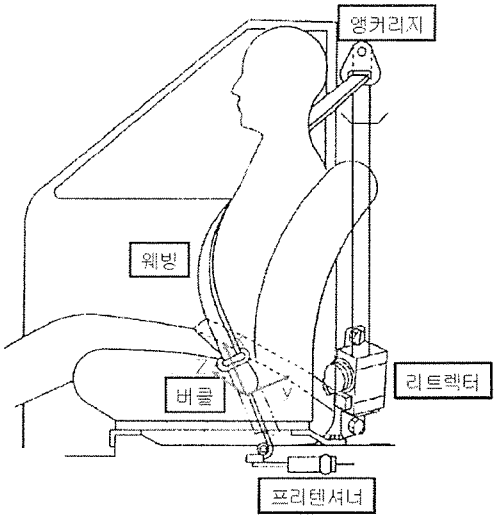

그림 1 안전벨트 구조와 구성품

2. Anti-G 버클의 구조와 작동원리

그림 2에는 Anti-G 버클의 구조와 명칭이 나타나 있다.

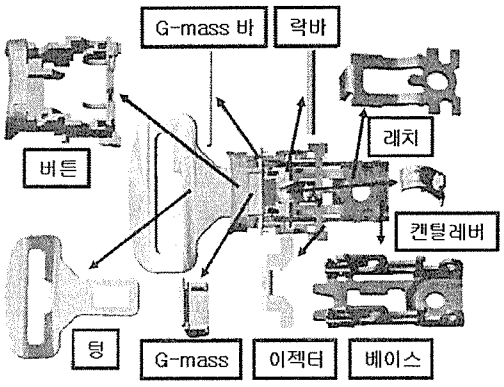

그림 2 Anti-G 버클의 구조와 명칭

그림 3에서 텅은 웨빙의 한 쪽 끝과 연결되어 있고 버클과 결합되어 탑승자를 구속하는 부분이다. 버튼은 탑승자가 버클을 해리하고자 할 때 누르는 부분으로 G-mass, G-mass 바, 락바와 연결되어 있다. G-mass는 버튼에 피벗되어 있고 회전운동을 통해 Anti-G 기능을 한다. G-mass 바는 G-mass와 연결되어 있고 G-mass와 함께 Anti-G 기능을 한다. 캔틸레버는 래치와 스프링으로 연결되어 있고 스프링의 인장력으로 락바를 아래로 움직여 버클의 잠김을 유지한다. 락바는 버튼과 연결되어 베이스의 홈을 따라 움직이고 캔틸레버하고 래치와 닿아 있어 버클에서 잠김을 발생한다. 이젝터는 캔틸레버와 연결되어 있고 텅에 의해 뒤로 움직이면 래치와 락바가 아래로 움직여서 잠김이 발생한다. 래치는 베이스에 피벗되어 스프링에 의해 회전운동을 하고 텅과 결합되는 부분이다. 베이스는 버클의 부품들이 결합되어 있고 부품들의 동작을 위해 홈이 파여 있다.

Anti-G 버클에는 프리텐셔너가 장착되어 있어 충돌 시 충돌 방향과 반대 방향으로 프리텐셔너의 폭발력이 작용한다. 프리텐셔너에 의해 버클에 작용하는 충격가속도는 그림 4와 같이 약 1000G 정도이다. 일반적으로 56km/h의 속도로 충돌하는 상황에서 성인의 가슴에 충돌 가속도의 반작용으로 발생되는 가속도의 상한치가 60G 정도임을 감안할 때 1000G의 가속도는 매우 큰 수치이다. 1000G의 충격 가속도가 버클에 작용하면 스프링에 의한 래치의 인장력이 상쇄되고 버튼과 캔틸레버, 이젝터, 락바 등이 충격 가속도 방향으로 병진운동을 하여 관성해리가 발생하는데 충격 가속도 방향으로의 버튼 등의 병진운동으로 인한 관성해리가 발생하기 이전에 G-mass와 G-mass 바가 회전운동을 하고 G-mass 바가 베이스에 닿아 버튼의 병진운동을 막아 관성해리를 방지한다.

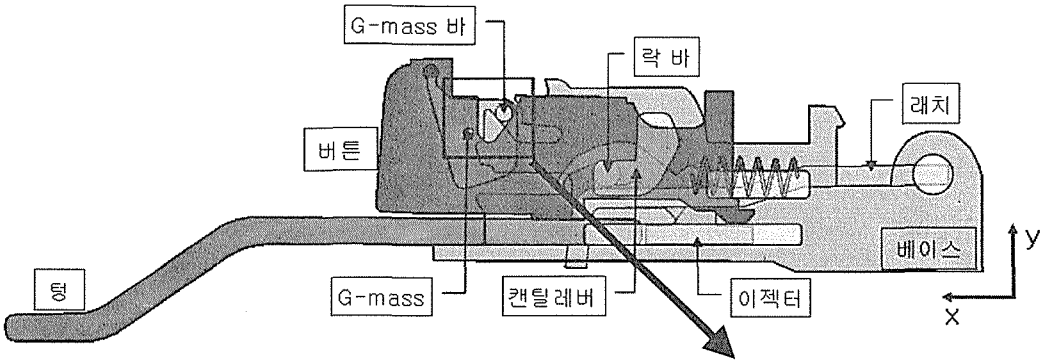

그림 3 Anti-G 버클의 개념도

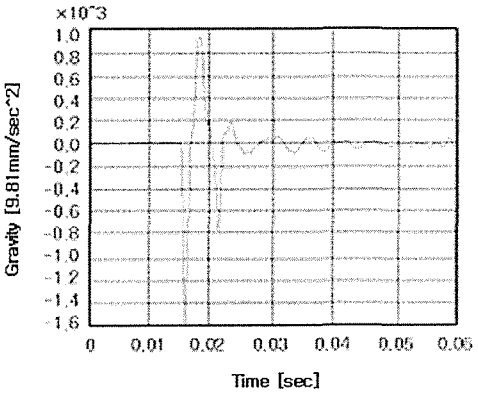

그림 4 프리텐셔너에 의한 버클의 가속도

3. Anti-G 버클의 잠김 조건

프리텐셔너에 의한 가속도 발생 시 관성력에 의해 G-mass는 회전운동을 하게 된다. 이때의 회전 운동은 그림 5와 같이 버튼과 G-mass 바에 연결된 스프링에 의해서 회전운동을 구속하고 이때의 스프링에 의한 구속력은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = F_G + k_G \cdot (R \cdot \theta) \qquad (1)$$

여기서 F는 G-mass 바와 버튼에 연결된 스프링 구속력, F_G는 버튼과 G-mass 바를 연결한 스프링의 초기 압축하중, k_G는 스프링 상수, R는 G-mass의 피벗 O점에서 G-mass 바와 버튼에 연결된 스프링까지의 거리, θ는 G-mass의 회전각도이다.

G-mass는 O점에 피벗되어 있고 충격 가속도는 G-mass의 질량중심에 작용하여 G-mass는 O점을 중심으로 회전운동을 하는데 G-mass 바와 버튼

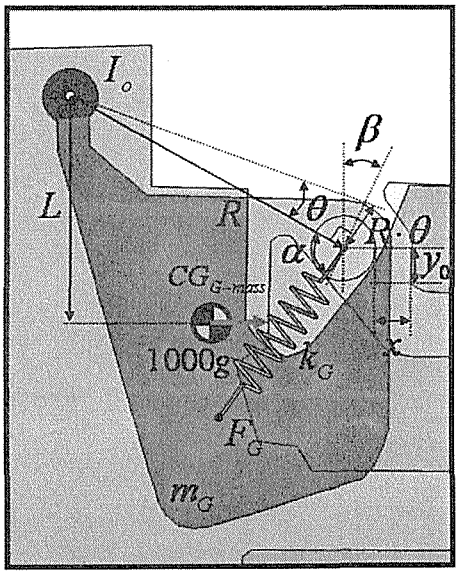

그림 5 G-mass의 형상과 변수

사이에 연결된 스프링에 의해 회전 구속력이 발생한다. 이러한 G-mass의 회전운동을 O점에 대한 모멘트 식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_o\ddot{\theta} = 1000g \cdot m_G \cdot L - 2R\sin\alpha \cdot F \qquad (2)$$

여기서 I_o는 O점에 관한 G-mass의 관성모멘트, g는 중력가속도, m_G는 G-mass의 질량, L은 O점에서 질량중심까지 높이, α는 버튼과 G-mass 바 사이에 연결된 스프링의 구속 방향과 직선 R이 이루는 각도이다.

G-mass의 모멘트 식(2)에 버튼과 G-mass 바의 연결 스프링의 구속력 식(1)을 대입하여 정리하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$I_o\ddot{\theta} + 2R^2 sin\alpha \cdot k_G \cdot \theta = 1000g \cdot m_G \cdot L - 2Rsin\alpha \cdot F_G \quad (3)$$

식(3)은 θ에 대한 2차 선형미분 방정식이며, 일반해는 식(4)와 같다.

$$\theta = Asin\omega_{nG}t + Bcos\omega_{nG}t + \frac{1000g \cdot m_G \cdot L - 2Rsin\alpha \cdot F_G}{2k_G \cdot R^2 sin\alpha} \quad (4)$$

여기서 ω_{nG}는 각진동수로서,

$$\omega_{nG} = \sqrt{\frac{2k_G \cdot R^2 sin\alpha}{I_o}} \quad (5)$$

을 의미한다.

식(4)에서 A와 B는 상수로서 초기 조건 $\theta(0) = 0$과 $\dot{\theta}(0) = 0$로부터 상수를 구하여 식(4)에 대입하면 식(6)와 같다.

$$\theta = \frac{1000g \cdot m_G \cdot L - 2Rsin\alpha \cdot F_G}{2k_G \cdot R^2 sin\alpha} \cdot (1 - cos\omega_{nG}t) \quad (6)$$

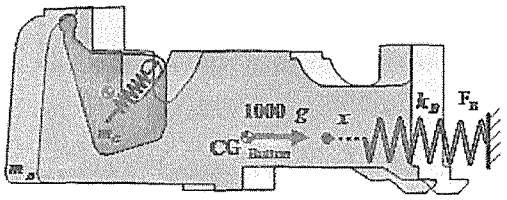

그림 6 버튼의 형상과 변수

그림 6은 프리텐셔너에 의한 버튼의 병진운동 발생과 스프링에 의한 반발력을 나타냈고 변위 x에 대한 2차 선형미분 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$M \cdot \ddot{x} + k_B \cdot x = 1000g \cdot M - F_B \quad (7)$$

여기서 x 는 관성에 의한 스프링의 길이 변화, k_B는 스프링 상수, F_B는 스프링의 초기 압축하중, M은 G-mass 질량(m_G)과 버튼 질량(m_B)의 합이다.

식(7)은 x에 대한 2차 선형미분 방정식으로 일반해는 식(8)과 같다.

$$x = Asin\omega_{nB}t + Bcos\omega_{nB}t + \frac{1000g \cdot M - F_B}{k_B} \quad (8)$$

여기서 ω_{nB}는 버튼의 각진동수로

$$\omega_{nB} = \sqrt{\frac{k_B}{M}} \quad (9)$$

을 의미한다.

식(8)에서 A와 B는 상수로서 초기 조건 $x(0) = 0$과 $\dot{x}(0) = 0$로부터 이 상수를 구하여 식(8)에 대입하면 식(10)과 같다.

$$x = \frac{1000g \cdot M - F_B}{k_B}(1 - cos\omega_{nB}t) \quad (10)$$

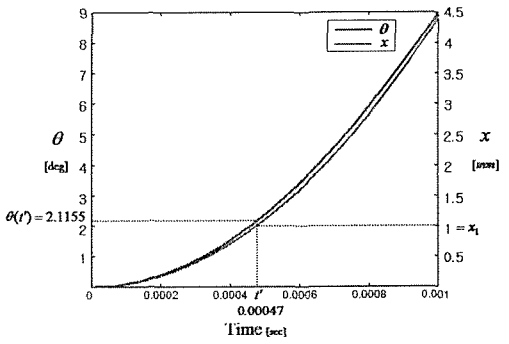

그림 7 시간에 따른 θ와 x의 변화

그림 7은 시간에 따른 G-mass의 회전각 변화와 버튼의 병진 이동 거리이다. G-mass 바와 베이스의 거리(x_1)는 1mm로서 버튼이 병진운동으로 움직일 수 있는 거리이다. 버튼이 병진운동으로 1mm 움직이는데 걸리는 시간(t)을 식(10)에 표 2를 대입하여 계산하면 0.00047 초가 걸린다. 이 시간동안 G-mass는 회전운동을 하며 회전각($\theta(t')$)은 식(6)에 표 1을 대입하여 계산하면 2.1155° 움직인다.

충돌 시 Anti-G 버클에서 잠김이 발생하기 위해서는 버튼의 병진운동으로 G-mass 바가 베이스에 도달하기 전에 G-mass의 회전운동이 발생해야 한

다. 그림 5에서 잠김이 발생하기 위한 조건은 다음과 같다.

$$y_0 + (R \cdot \theta)cos\beta > 0 \tag{11}$$

여기서 y_0는 G-mass 바에서 G-mass 바와 만나는 베이스 면의 최하단까지의 높이, β는 y축과 R에 수직한 직선이 이루는 각도이다.

식(11)에 변수 y_0는 2mm, R은 9.789mm, θ는 2.1155°, β는 18°를 대입하면 우항의 값은 21.69mm로 0보다 크므로 조건식을 만족한다. 따라서 Anti-G 버클은 충돌 시 잠김이 발생한다.

표 1 G-mass의 변수와 값

변수	값
L [mm]	7.132E+000
k_G [mN/mm]	3.000E+002
I_o [kg · mm^2]	4.556E-002
g [mm/sec^2]	9.810E+003
F_G [mN]	1.000E+002
R [mm]	9.789E+000
m_G [kg]	7.953E-003
α_1 [deg]	4.979E+001

표 2 버튼의 변수와 값

변수	값
m_B [kg]	6.452E-003
m_G [kg]	7.953E-003
g [mm/sec^2]	9.810E+003
F_B [mN]	1.411E+004
k_B [mN/mm]	1.473E+003

4. Anti-G 버클의 G-mass 해리 방지 조건

프리텐셔너가 작동한 후 G-mass와 G-mass 바에 의해 Anti-G 기능이 작동할 때의 모습은 그림 8과 같다. G-mass 바가 베이스와 접촉하고 있을 때 두 개의 부품사이에는 최소 마찰력 이상이 작용해야 Anti-G 기능이 작동한 후에 해리가 발생되지 않는다. G-mass의 회전운동을 O점에 대한 모멘트 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &L_1(-cos\gamma + \mu sin\gamma) \\ &\quad = -L_2(sin\gamma + \mu cos\gamma) \end{aligned} \tag{12}$$

여기서 L_1은 O점에서 G-mass와 베이스 만나는 점까지의 높이, L_2는 O점에서 G-mass와 베이스가 만나는 점까지의 거리, γ는 G-mass와 만나는 베이스 면의 경사각, μ는 마찰계수이다.

식(12)을 L_1과 L_2에 대한 식으로 다시 정리하면 식(13)과 같다.

$$\frac{L_1}{L_2} = -\left(\frac{sin\gamma + \mu cos\gamma}{-cos\gamma + \mu sin\gamma}\right) \tag{13}$$

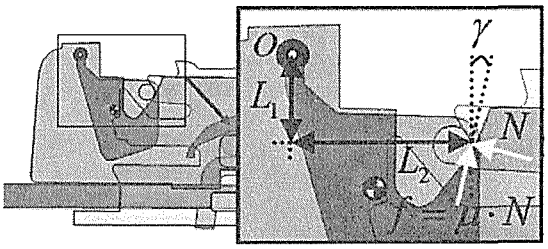

그림 8 G-mass의 해리 방지 조건 변수

표 3 G-mass의 정적 해석 변수 값

변수	값
L_1 [mm]	0.3
L_2 [mm]	0.8
γ [deg]	3

식(13)에 표 3을 대입하여 계산하면 마찰계수(μ)는 0.316으로 만약 G-mass와 Base 사이의 마찰계수가 이보다 작을 때는 해리가 발생한다.

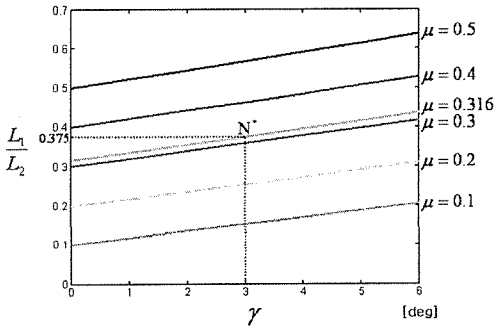

그림 9 γ와 $\frac{L_1}{L_2}$에 따른 최소마찰계수(μ)

그림 9는 G-mass 바와 만나는 베이스 면의 각도와 G-mass의 피벗점에서 G-mass와 베이스가 만나는 점 사이의 수직거리와 수평거리의 비에 따른 G-mass와 베이스 사이에 필요한 최소 마찰계수를 나타냈다.

마찰력 $f = \mu \cdot N$에서 수직항력(N)이 일정할 때, G-mass 바와 베이스 사이의 각도(γ)를 감소시키거나 G-mass의 피벗에서 베이스와의 접촉점까지의 수직거리(L_1)를 감소시켜서 보다 낮은 마찰계수에서도 G-mass의 해리가 발생하지 않을 수 있다.

5. 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 설계 검증

각 부품들의 질량들은 표 4와 같이 실제 부품들과 같은 값을 이용하였고, 관성모멘트는 계산된 값들을 이용하였다.

표 4 각 부품들의 질량과 관성모멘트

부품	질량 [kg]	관성 모멘트 I_{xx} [kg · mm^2]	관성 모멘트 I_{yy} [kg · mm^2]	관성 모멘트 I_{zz} [kg · mm^2]
버튼	0.0065	2.152	1.275	1.179
G-mass	0.0079	0.364	0.286	0.139
G-mass 바	0.0009	0.108	0.108	0.001
캔틸레버	0.0006	0.020	0.017	0.007
래치	0.0113	2.866	2.328	0.585
베이스	0.0314	4.090	11.300	4.090
이젝터	0.0007	1.346	0.065	0.010
락 바	0.0018	0.151	0.151	2.210
텅	0.0518	33.720	1.875	15.830

또한 ADAMS 프로그램의 모델은 실제 모델과 동일하게 기본이 되는 그라운드와 버클을 구성하는 래치, 텅, 이젝터, 베이스, 버튼, 스프링, 락바, G-mass, G-mass 바, 캔틸레버로 구성하였고 각 부품의 연결은 기본적으로 조인트 요소가 아닌 접촉(contact)으로 하였다. 접촉에서 강철과 강철의 동마찰계수는 0.15이고 정마찰계수는 0.16이다. 또한 강철과 플라스틱, 플라스틱과 플라스틱의 동마찰계수는 0.04이고 정마찰계수는 0.04로 두 개 모두 같다.

그림 10에서는 베이스와 래치, 베이스와 텅, 텅과 래치의 접촉(contact)을 통한 ADAMS 모델링을 나타냈고, 베이스와 래치, 베이스와 텅, 텅과 래치는 강철과 강철의 접촉이다.

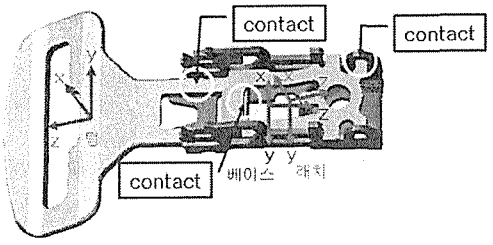

그림 10 베이스, 래치, 텅의 모델링

그림 11은 락 바와 캔틸레버, 캔티레버와 이젝터의 접촉(contact)을 통한 부품들의 연결을 나타냈고 락 바와 캔틸레버는 플라스틱과 강철의 접촉이고 캔틸레버와 이젝터는 플라스틱과 플라스틱의 접촉이다.

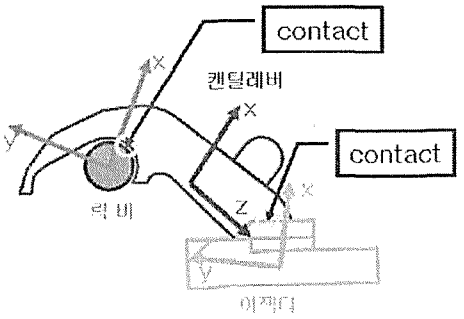

그림 11 락 바, 캔틸레버, 이젝터의 모델링

그림 12에서는 베이스와 버튼, 텅과 버튼의 접촉을 통한 연결을 나타냈다. 베이스와 버튼, 텅과 버튼은 플라스틱과 강철의 접촉이다.

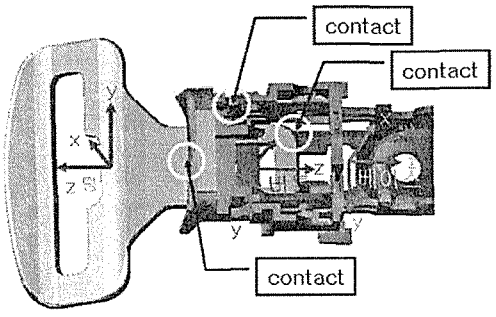

그림 12 텅, 버튼, 베이스의 모델링

그림 13에서는 G-mass와 G-mass 바, 버튼과 G-mass의 접촉을 통한 연결을 하였고 버튼과 G-mass 바는 스프링 요소로 연결을 하였다. G-mass와 G-mass 바는 강철과 강철의 접촉이고,

G-mass와 버튼은 강철과 플라스틱의 접촉이다. G-mass 바와 버튼의 스프링 연결에서 사용한 스프링 상수 k_G와 스프링의 초기 압축하중 F_G는 각 300 mN/mm와 100 mN으로 측정한 값을 사용하였다.

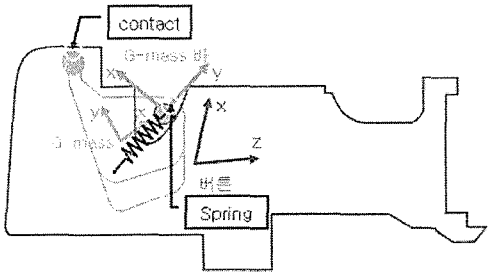

그림 13 G-mass, G-mass 바, 버튼의 모델링

그림 14에서는 베이스와 이젝터의 접촉 연결로서 플라스틱과 강철의 접촉이다.

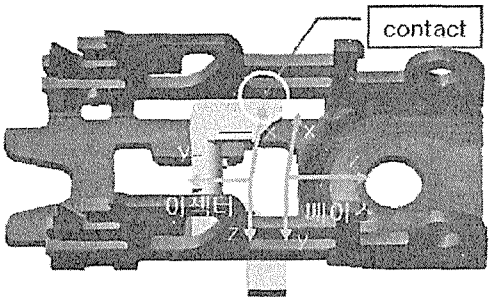

그림 14 베이스와 이젝터 모델링

실제 충돌 시험을 통해 어깨 벨트와 무릎 벨트에 걸리는 장력을 측정하여 모델의 하중 조건으로 그림 15와 그림 16의 그래프를 텅에 적용하였고 버클의 끝에 연결된 프리텐셔너의 폭발에 의한 버클의 변위를 측정하여 모델의 베이스 하단면에 그림 17의 그래프와 같이 적용하였다.

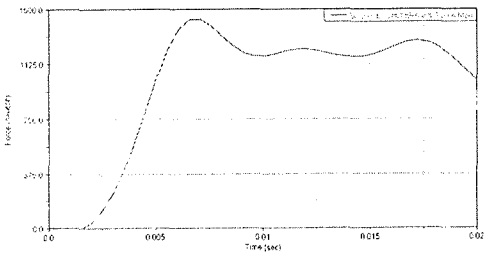

그림 15 어깨에 걸리는 장력

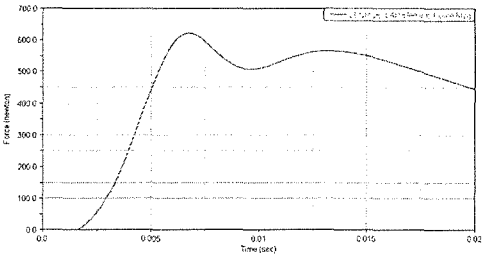

그림 16 무릎에 걸리는 장력

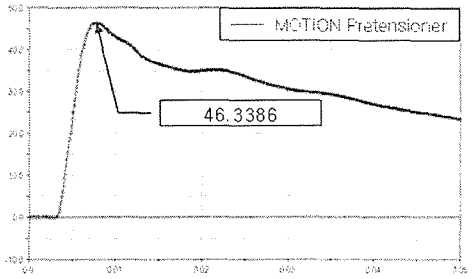

그림 17 프리텐셔너에 의한 버클의 변위

그림 18은 Anti-G 버클에서 G-mass를 제거한 후 0.01초 동안 래치의 각도 변화를 해석한 결과와 Anti-G 버클에서 G-mass가 작동할 때 0.01초 동안 래치의 각도 변화를 해석한 결과를 비교하였다. G-mass를 제거한 Anti-G 버클에서는 0.0084초에 래치가 11.9009° 회전한 이후에 텅이 버클에서 해리되기 시작하였고, 같은 시간 동안 G-mass가 작동한 버클에서는 래치가 0.2754° 만큼 회전하여 텅의 해리는 발생하지 않았다. 0.01초 동안 래치가 회전한 각도는 G-mass를 제거한 버클은 13.8473° 이고 G-mass가 작동한 버클은 0.2875° 만큼 회전하였다. 두 개의 래치의 회전 각도를 비교한 결과 G-mass가 잘 작동함을 알 수 있다.

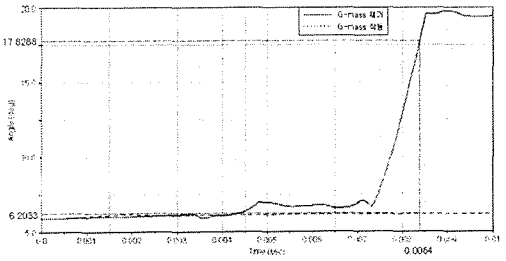

그림 18 버클의 래치 각도 변화 비교

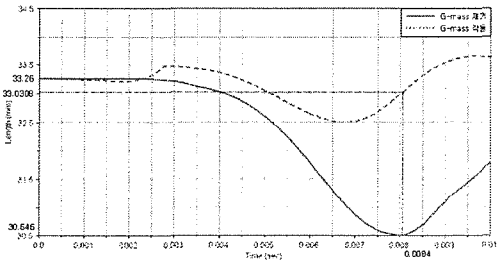

그림 19 텅의 변위 변화 비교

그림 19는 Anti-G 버클에서 G-mass를 제거한 버클과 G-mass가 작동하는 버클의 베이스의 질량 중심을 기준으로 한 텅의 변위 변화가 나타났다. 두 개의 버클에서 프리텐셔너는 0.002초 이후 작동하여 G-mass를 제거한 버클에서 텅은 0.0081초까지 프리텐셔너의 가속도로 인해 베이스의 질량 중심 방향으로 움직이다가 베이스에서 멀어져 해리가 발생한다. G-mass가 작동한 버클은 0.0068초까지 베이스의 질량 중심 방향으로 이동하다가 이후로 멀어지지만 래치의 잠금으로 인해 1.158mm의 범위에서 움직인다.

6. 결론

자동차 충돌 시 안전벨트의 버클에 연결된 프리텐셔너의 폭발로 관성해리가 발생한다. 따라서 버클에 전달되는 프리텐셔너의 폭발력을 버클 내에 존재하는 별도의 메카니즘을 통해 소산시켜야 하는데 이것이 Anti-G 기능이 추가된 Anti-G 버클이다.

본 논문에서는 관성해리가 발생하는 전면부 프레스 버튼에 G-mass와 G-mass 바를 추가하여 Anti-G 버클의 동적 해석을 통한 잠김의 조건을 분석하였고 정적 해석을 통해 G-mass의 해리방지 조건을 분석하였다.

Anti-G 버클의 잠김 조건을 분석한 결과 잠김 조건을 만족하였고 G-mass의 해리 방지 조건도 만족하였다.

또한 동역학 해석 프로그램 ADAMS의 해석을 통해 Anti-G 버클에서 Anti-G 기능이 제대로 작동하여 관성해리가 발생하지 않음을 확인 할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] 민석기, 이재관, 김병수, "전동 안전벨트를 이용한 충돌예방 안전장치의 개발", 한국자동차공학회, *춘계학술대회논문집*, pp.1219~1224, 2004년

[2] 박두연, 김종각, 이연복, 김대성, "충돌 관성에 의한 자동차 안전벨트 버클 해리에 관한 연구 및 대처 방안 개발", 2005 ADAMS Korea Users Conference, pp.1-21, 2005