

# 인체의 연계작용을 고려한 프리텐셔너를 가진 시트벨트 시스템의 동역학 해석 및 실험적 검증

국민구<sup>†</sup> · 탁태오 · 박재순 · 김대희\*

## Dynamics Analysis and experiment verification of seatbelt system with pre-tensioner considering connection action of a human body

Min-Gu Kuk, Tea-Oh Tak, Jae-Soon Park, Dae-Hee Kim

**Key Words:** seatbelt(안전벨트), pre-tensioner(프리텐셔너), inertial release(관성 해리), Multibody dynamics(다물체 동역학)

### Abstract

To improve passenger safety, seatbelt systems with pre-tensioner that tightens seatbelt webbing using explosives just before collision are widely adopted. Even though seatbelt must not be unlatched without passenger's operation, release of a buckle due to explosion of pre-tensioner takes place in some situations resulting in serious injury to passengers. To prevent the unintended unlocking, a pendulum like part called anti-g mass is attached to the buckle to block displacement of release button. In this study, the unlocking conditions of anti-g buckle when pre-tensioner explodes has been theoretically investigated. Through multibody model of the seatbelt system incorporating every detailed part of the buckle, dynamic analysis of the seatbelt system with pre-tensioner has been performed including the driver's body model that interacts with seatbelt system. The simulations results has been validated through actual sled test with driver dummy and the seatbelt system.

### 1. 서 론

안전벨트는 자동차의 충돌 시 탑승자를 안전하게 보호해 주는 장치로서 벨트 길이를 탑승자가 앉은 자세나 체격에 따라 조절하고 사용하지 않을 때 벨트를 격납하는 리트렉터(Retractor), 리트렉터 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

유지시켜 주는 프리텐셔너(Pretensioner), 안전벨트를 장착 또는 해리하기 위한 버클(Buckle), 웨빙을 탑승자의 체격에 맞추어서 위치를 상하로 조절하는 앵커리지(Anchorage), 자동차의 탑승자를 구속하는 웨빙(Webbing) 등으로 구성되어 있다.

이러한 안전벨트는 탑승자의 조작을 통하지 않고 해리되어서는 안되지만 자동차의 충돌 시 버클에 작용하는 가속도의 크기와 웨빙의 장력, 진동 기간 등의 여러 요소에 따라 버클의 해리가 발생할 수 있다.

Daniel Davee 등<sup>(1)</sup>은 일반적인 버클을 이용하여 충격 테이블 테스트와 등가속도 테스트를 통해 버클의 반응 특징을 관찰하여 버클의 가속도가 증폭 효과에 의해 자동차의 가속도보다 커져서 스트랩이나 와이어를 통해 전달됨을 증명하였다.

Jon Bready 등<sup>(2)</sup>은 자동차의 충돌 시 안전벨트에 의해 구속된 탑승자가 엉덩이나 다리로 버클

---

† 책임저자, 강원대학교 기계메카트로닉스공학과  
E-mail : scv6710@naver.com  
TEL : (033)242-5564 FAX : (033)242-6013  
\* 강원대학교 기계메카트로닉스공학과

---

의 하단 면에 충격을 가하면 버클의 해리 메커니즘이 유발될 수 있음을 나타내었다.

Sances JR 등<sup>(3)</sup>과 Herbst B. 등<sup>(4)</sup>은 휠이 제거된 Chevrolet Suburban을 이용한 낙하 테스트를 수행하여 자동차의 무게중심과 버클에서 가속도를 측정하였다. 자동차의 무게중심에서 측정된 가속도와 비교했을 때 버클에서 측정된 가속도가 상당히 높음이 관찰되었다.

Stanley B. 등<sup>(5)</sup>은 버클에 장착된 프리텐서너에 의해 매우 큰 힘이 버클에 전달되면 버클에 관성력이 발생하여 해리가 발생함을 증명하였다. 이러한 버클의 해리 현상을 관성해리라고 하고 박두연 등<sup>(6)</sup>은 이러한 관성해리를 방지하기 위해 충격 가속도 방향으로만 반응하는 펜듈럼을 추가하여 관성력을 소산시키는 버클을 개발하였다.

본 논문에서는 버클과 g-mass가 추가된 anti-g 버클의 구조와 작동 원리를 분석하였고 동역학 해석 프로그램을 이용해 충격 가속도에 따른 두 개의 버클의 잠김 발생 여부를 비교하여 버클의 잠김 조건을 분석하였다. 이를 통해 인체 모델과 연계한 시뮬레이션과 실험을 비교하여 시뮬레이션의 타당성을 입증하고 시뮬레이션을 통한 anti-g 버클의 잠김 유지를 관찰하였다.

## 2. Anti-G 버클의 구조와 작동원리

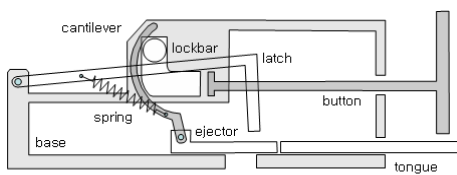


Fig. 1 The concept of the front press buckle

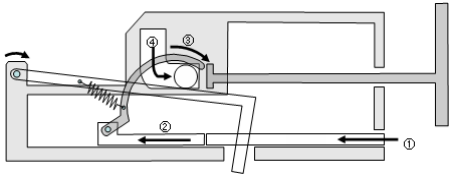


Fig. 2 The locking operation of the buckle

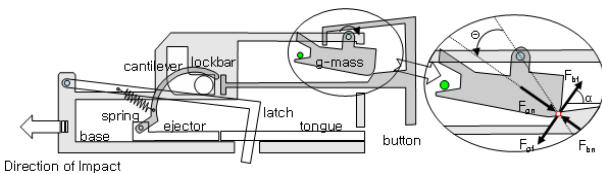


Fig. 3 The concept of the buckle with the g-mass

Fig. 1은 자동차에 가장 많이 사용되는 버클의 개념도이다. 텅은 버클에 삽입되어 래치와 결합되고 이때 탑승자를 구속할 수 있는 잠김이 발생된다. 버튼은 탑승자가 버클을 해리하고자 할 때 누르는 부분으로 락바와 연결되어 있다. 캔틸레버는 래치와 스프링으로 연결되어 있고 스프링 힘에 의해서 회전운동을 하여 락바와 래치를 아래로 움직여 버클의 잠김을 유지한다. 이젝터는 캔틸레버와 연결되어 있고 베이스를 따라서 병진 운동을 한다. 래치는 베이스에 피벗되어 있고 스프링에 의해 회전운동을 하며 텅과 결합되는 부분이다. 락바는 버튼에 연결되고 베이스의 홈을 따라 움직이며 캔틸레버, 래치 등을 움직이게 한다. 베이스는 버클의 부품들이 결합될 수 있는 틀을 제공한다.

Fig. 2는 텅이 버클에 삽입되어 래치와 결합되는 과정을 나타내고 있다. 텅이 화살표와 같은 방향으로 삽입되면 이젝터가 텅에 의해서 뒤로 밀려난다. 그러면 이젝터와 연결되어 있는 캔틸레버는 스프링에 의해 시계방향으로 회전하고 락바를 베이스의 홈을 따라 아래로 움직이게 한다. 이 때 베이스에 피벗되어 있는 래치는 락바에 의해 시계방향으로 회전하여 텅과의 결합이 발생한다.

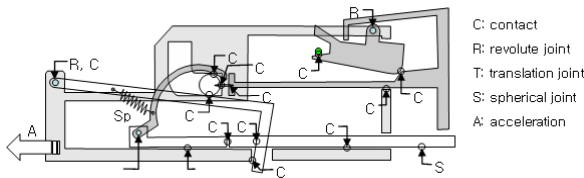
텅을 해리하기 위해서 버튼을 누르면 버튼과 연결되어 있는 락바가 베이스의 홈을 따라서 위로 움직이게 한다. 그러면 캔틸레버가 락바에 의해 반시계 방향으로 회전하게 되고 이젝터는 스프링의 힘에 의해서 앞으로 병진 운동을 하게 된다. 그와 동시에 래치도 스프링에 의해서 반시계 방향으로 회전하면 텅은 버클과 해리가 된다.

프리텐서너가 장착되어 있는 버클은 약 1000g의 충격 가속도가 증폭되어 버클의 베이스에 작용한다.<sup>(7)</sup> 이와 같이 증폭된 충격 가속도가 버클에 작용하면 충격 가속도 방향으로 버튼의 병진 운동이 발생하여 락바와 이젝터가 뒤쪽으로 병진 운동하고 캔틸레버와 래치의 회전운동이 발생하여 버클과 텅의 해리가 발생하지만 anti-g 버클은 이러한 관성해리를 방지하기 위해 Fig. 3과 같이 버클에 g-mass를 추가하여 충격 가속도가 작용하면 g-mass가 시계 방향으로 회전하여 버튼과 맞닿아 버튼의 충격 가속도 방향으로의 병진을 막아 관성 해리를 방지한다.<sup>(8)</sup>

## 3. Anti-G 버클의 다물체 모델

**Table 1** The material property of each part

| 부품     | 질량 [kg] | 관성 모멘트 $I_{xx}$ [ $\text{kg} \cdot \text{mm}^2$ ] | 관성 모멘트 $I_{yy}$ [ $\text{kg} \cdot \text{mm}^2$ ] | 관성 모멘트 $I_{zz}$ [ $\text{kg} \cdot \text{mm}^2$ ] |
|--------|---------|---|---|---|
| 버튼     | 0.0098  | 3.482   | 2.162   | 1.786   |
| G-mass | 0.0087  | 0.445   | 0.428   | 0.119   |
| 캔틸레버   | 0.0006  | 2.055   | 1.719   | 6.574   |
| 래치     | 0.0137  | 2.895   | 2.353   | 0.588   |
| 베이스    | 0.0314  | 13.333  | 11.211  | 4.081   |
| 이젝터    | 0.0008  | 9.840   | 8.818   | 1.123   |
| 락바     | 0.0017  | 0.141   | 0.141   | 1.914   |
| 텅      | 0.0517  | 33.721  | 18.746  | 15.835  |



**Fig. 4** The factor using anti-g buckle modeling

프리텐서너의 작동 시 g-mass의 유무에 따른 버클의 잠김을 확인하기 위해 동역학 해석 프로그램을 이용하여 Fig. 4와 같이 모델링하였고 버클은 anti-g 버클에서 g-mass 만을 제거하였다. 버클의 부품들은 Table 1과 같은 물성치를 입력하였고 모든 부품들 사이의 연결에는 비선형 스프링-댐퍼 요소인 접촉 요소를 사용하였다.

이젝터와 베이스는 병진 조인트를 사용하여 베이스의 홈을 따라 움직이게 하였고 이젝터와 캔틸레버, 베이스와 래치는 회전 조인트를 사용하여 이젝터의 병진과 스프링에 의해서 회전운동을 하게 만들었다. 래치와 캔틸레버는 초기 하중 14.11 N, 스프링 상수 1.473N/mm인 스프링으로 연결하였다. g-mass는 베이스와 회전 조인트로 연결되어 있고 버튼과 접촉으로 연결한다. 프리텐서너의 충격 가속도와 버튼의 접촉에 의한 g-mass의 과도한 회전을 방지하는 stopper를 베이스에 만들고 g-mass와 접촉으로 연결하였다. 텅은 구 조인트로 구속시켰다.

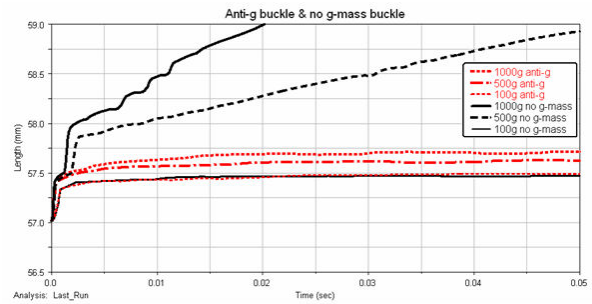
g-mass 유무에 따른 버클의 해리 여부를 확인하기 위해 Fig. 4에서 보는 바와 같은 충격 가속도 방향으로 충격 가속도를 변화시켜 충격 가속도가 증가할 때 버클의 거동을 관찰하였다. 시뮬레이션은 시험 데이터에서 확인된 바와 같이 0.05sec 동

안 실행시켜 텅과 버튼의 이동 거리, 래치의 각도를 충격 가속도에 따라 Fig. 5와 같이 비교하였다.

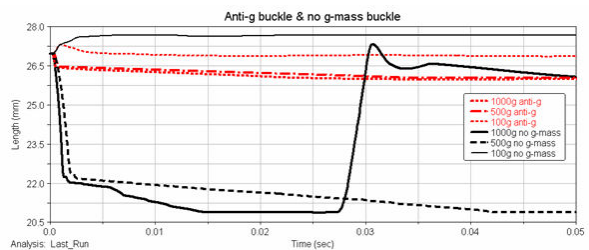
(a)는 충격 가속도를 변화시켰을 때 g-mass의 유무에 따른 텅과 베이스의 질량 중심 사이의 거리 변화 그래프이다. 초기 텅과 베이스의 거리는 57.0152mm로서 이동 거리가 1.984 8mm 보다 커지면 해리가 발생한다. anti-g 버클은 1000g의 충격 가속도에서도 0.6974mm 움직여서 해리가 발생하지 않지만 g-mass가 없는 버클은 1000g에서는 0.0263sec에 2.531mm 이동하여 해리가 발생한다.

(b)는 베이스를 기준으로 버튼의 이동 변위를 나타내고 있다. 초기 베이스와 버튼의 거리는 26.9559mm로서 충격 가속도 방향으로 6.075mm 이동하면 버클은 해리가 발생한다. anti-g 버클은 1000g에서 0.9843mm 움직여서 해리가 발생하지 않지만 g-mass가 없는 버클은 1000g에서 6.0806 mm 이동하여 해리가 발생한다.

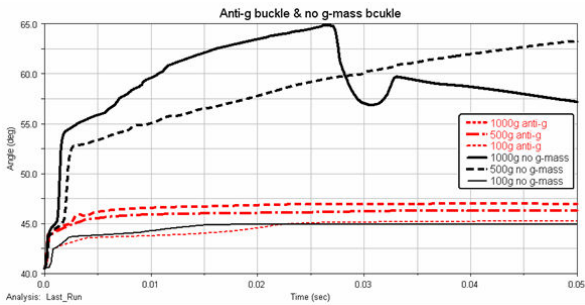
(c)는 충격 가속도에 따른 래치의 각도 변화이다. 래치의 초기 각도는 40.5217deg로서 해리가 되기 위해서는 24.3461deg 이상의 회전이 필요하다. anti-g 버클은 1000g에서도 6.493deg 회전하므로 잠김을 유지하지만 g-mass가 없는 버클은 1000g에서 24.3463deg 회전하여 해리가 발생한다.



(a) The displacement of tongue



(b) The displacement of button



(c) The angle of latch

**Fig. 5** The motion of tongue, button, latch under impact acceleration

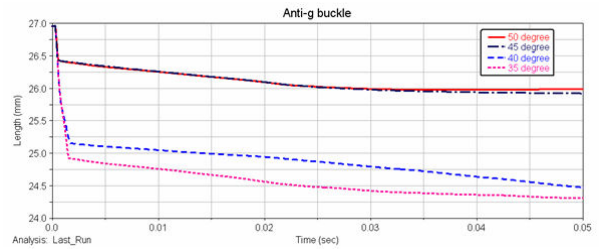
Fig. 5를 통해 anti-g 버클은 1000g의 가속도에서도 해리가 발생하지 않음을 확인하였다. 이러한 anti-g 버클의 잠김 유지 조건은 Fig. 3에서와 같이 g-mass와 버튼의 접촉점에 작용하는  $F_{gn}$ 과  $F_{bn}$ 의 작용선이 g-mass의 피벗점과 접촉점을 연결한 선과 이루는 각도  $\theta$ 가 0보다 커야 된다.  $\theta$ 는 g-mass와 접촉하는 버튼의 경사각  $\alpha$ 에 따라 변하므로 1000g의 가속도에서 경사각  $\alpha$ 에 따른 anti-g 버클의 해리 발생을 관찰하였다.

Fig. 6은 1000g의 가속도에서 경사각  $\alpha$ 를 변화시켜서 anti-g 버클의 버튼의 이동과 래치의 각도 변화를 나타냈다.

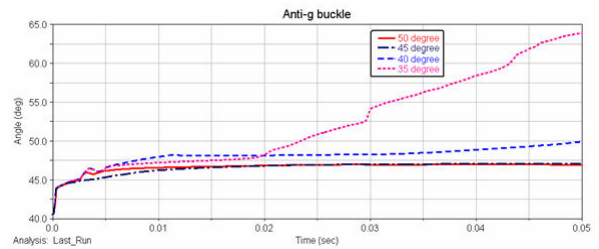
(a)는 경사각에 따른 버튼의 이동 변위를 비교하였다. 경사각 50deg와 45deg에서는 버튼의 이동이 0.984mm와 0.99mm로서 매우 작은 움직임이 나타난다. 40deg에서는 1.706mm 이동하여 해리가 발생하지 않지만 상당한 움직임이 나타났고 35deg에서는 2.56mm 이동하여 해리가 발생하였다.

(b)는 경사각에 따른 래치의 각도 변화를 비교하였다. 50deg와 45deg에서는 6.6895deg 회전하고 40deg에서는 9.4602deg 회전하여 잠김을 유지하지만 35deg에서는 23.1816deg 회전하여 텅과의 잠김이 풀리게 된다.

Fig. 6의 결과와 같이 g-mass와 접촉하는 버튼의 경사각은 g-mass의 잠김 작용을 유지하는데 중요한 변수로서 45deg의 경사각까지는  $\theta$ 가 0보다 크지만 40deg와 35deg는  $\theta$ 가 0보다 작으므로 해리가 발생한다. 40deg는 0.05sec의 시간 동안에는 해리가 발생하지 않았지만 0.082sec에 해리가 발생하였다.



(a) The displacement of button



(b) The angle change of latch

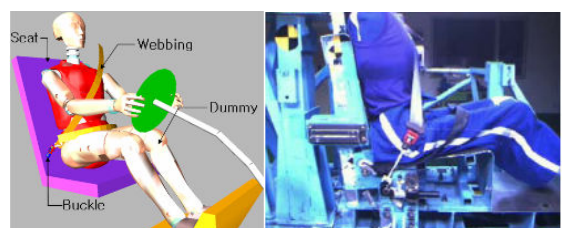
**Fig. 6** The displacement of anti-g buckle element as a function of contact angle of button

### 3. 인체 모델을 이용한 anti-g 버클의 시뮬레이션

프리텐서너의 작동 시 인체 모델과 연계한 anti-g 버클의 해리 여부를 확인하기 위해서 Fig. 7의 왼쪽과 같이 더미 모델, 웨빙, 시트, anti-g 버클을 모델링하여 시뮬레이션을 수행 하였다.

William Lai 등<sup>(9)</sup>은 롤오버 상황에서 탑승자 움직임의 예측을 위해 실제 더미와 Hybrid-III ATD의 몸통과 몸의 각도, 머리와 몸통의 변위를 비교한 인간 대응 모델의 적합도 평가에 따라 인체 모델링 프로그램을 이용하여 Hybrid-III ATD를 운전자의 운전하는 모습으로 모델링 하였다.

D. song 등<sup>(10)</sup>은 탑승자와 웨빙의 상호 작용을 분석하기 위해 웨빙을 Shell요소로 나누고 각각의 Shell요소는 스프링으로 연결하여 모델링을 하였다. 웨빙의 3점 굽힘 시험 결과를 탄-소성 법칙을 이용하여 영률과 탄성 한계 등을 구하였다.



**Fig. 7** Simulation and test with a human body

이 논문에서 웨빙은 작은 강체로 나누고 빔 요소로 연결하였다. 그리고 웨빙의 모델링에 사용된 영률과 포이손 비는 D. song 등의 연구에서 사용된 웨빙의 물성치를 사용하였다. 두 개의 강체 연결에 사용한 빔 요소를 만들기 위한 빔의 길이는 두 강체의 질량 중심 간의 거리이며 영률과 전단계수는 웨빙의 물성치로 입력하였다. 그리고 댐핑 비율은 여러 번의 시뮬레이션을 통해 찾았고 빔의 횡단면 크기는 기본 값으로 입력하였다.

더미 모델과 시트, 더미 모델과 웨빙의 연결에는 William Newbery 등<sup>(11)</sup>이 롤오버 시 프리텐서너가 장착된 안전벨트에 의해서 인체에 미치는 영향의 연구에서 사용한 인체 모델과 안전벨트의 마찰계수 0.4와 인체 모델과 시트의 마찰계수 0.6을 사용하여 접촉 요소로 연결하였다.

인체 모델을 이용한 anti-g 버클의 시뮬레이션의 타당성을 검증하기 위해 Fig. 7의 오른쪽 그림과 같은 테스트 장치를 이용하여 프리텐서너의 폭발 시험을 수행하였다. 이 실험을 통해 프리텐서너에 의해 버클에 작용하는 충격력을 Fig. 8과 같이 시간에 따른 버클의 변위로 측정하여 동역학 해석 프로그램을 이용한 시뮬레이션의 경계 조건으로 사용하였다.

웨빙에 작용하는 힘을 측정하여 시뮬레이션의 결과와 Fig. 9와 같이 비교하였다. (a)는 어깨 웨빙에 걸리는 힘을 비교한 그래프로 시뮬레이션의 결과가 실험과 0.025sec 이전에는 주기에 차이가 있지만 웨빙에 작용하는 최고 힘이 실험의 결과 사이에 포함되고 0.05sec에 작용하는 힘이 실험 결과 사이에 포함된다.

(b)는 무릎 웨빙에 작용하는 힘을 비교한 그래프로 실험에 비해 주기가 길게 나타나지만 무릎 웨빙에 작용하는 최대 힘이 실험과 유사하고 0.025sec 이후에는 실험의 결과 사이에 포함된다.

Fig. 9를 바탕으로 인체 모델을 이용한 anti-g 버클의 시뮬레이션이 실험과 유사함을 알 수 있었고 이러한 결과를 바탕으로 인체 모델을 이용한 anti-g 버클의 시뮬레이션을 통해 anti-g 버클의 해리 여부를 확인하였다.

Fig. 10은 g-mass 유무에 따른 버클의 해석 결과로서 시간에 따른 베이스와 텅의 질량 중심 사이의 거리 변화를 나타내고 있다. 초기 베이스와 텅의 질량 중심 사이 거리는 57.0152mm로서 g-mass가 없는 버클은 0.042초에 해리가 되기 시작하였

다. 따라서 프리텐서너의 폭발력에 의한 버클의 해리는 g-mass의 추가를 통해 막을 수 있음을 알 수 있다.

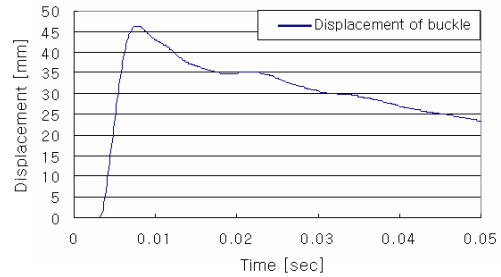
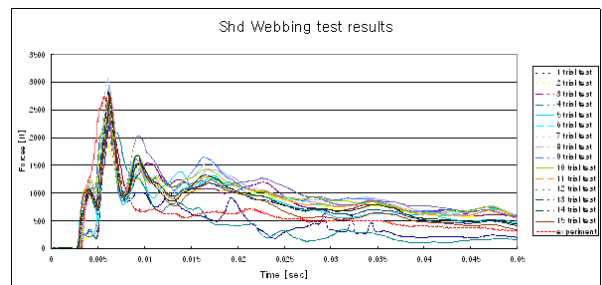
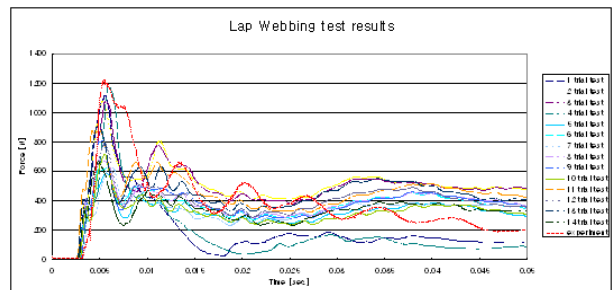


Fig. 8 The base displacement due to pre-tensioner



(a) The operating force of lap webbing



(b) The operating force of shoulder webbing

Fig. 9 The results comparison of webbing force of simulation and test

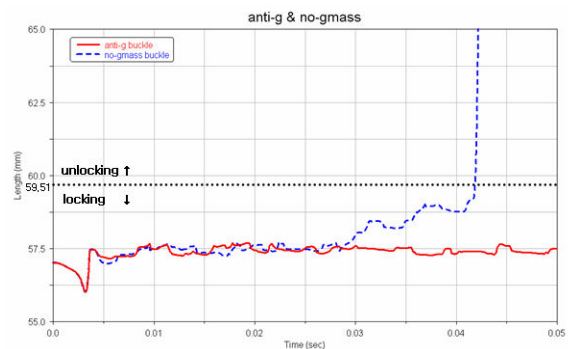


Fig. 10 The comparison of with and without anti-g buckle

## 5. 결 론

자동차 충돌 시 탑승자를 보호하기 위한 안전 벨트가 버클에 연결된 프리텐서너의 폭발력에 의해 관성해리가 발생할 수 있다. 따라서 버클에 전달되는 프리텐서너의 충격 가속도를 별도의 메카니즘을 통해 소산시키기 위해 버클에 충격 가속도에 의해 회전을 하는 g-mass를 추가하였다.

본 논문에서는 g-mass가 추가된 anti-g 버클의 개념과 작동 원리를 분석하였고 동역학 해석 프로그램을 이용해 충격 가속도를 변화시켜 g-mass의 유무에 따른 버클의 해리 여부를 판단하였다. anti-g 버클은 1000g에서도 해리가 발생하지 않았지만 g-mass가 없는 버클은 1000g의 가속도에서 0.026sec만에 해리가 발생하였다. 이러한 anti-g 버클이 잠김을 유지하기 위해서는 g-mass와 만나는 버튼의 경사각이 40deg보다 작으면 anti-g 버클의 잠김 유지 조건을 만족하지 않으므로 해리가 발생하였다.

그리고 인체 모델을 이용한 anti-g 버클의 시뮬레이션을 수행 하였고 시뮬레이션의 타당성을 검증하기 위해 실험을 수행하였다. 어깨와 무릎 웨빙에 작용하는 힘을 비교하여 시뮬레이션의 타당성이 입증되어 시뮬레이션을 이용한 anti-g 버클의 잠김 유지를 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) Daniel Davee, William Van Arsdell and Christine Raasch, "Minimal Effect of Amplified Vehicle Accelerations on Seat Belt Buckle Resistance to Inertial Release," *SAE World Congress Detroit*, No. 2004-01-0854, 2004
- (2) Jon Bready, Michael James, Gregory Smith and Sean Tolman, John J. Gordon, "Issues in Seatbelt Inertial Release," *SAE World Congress Detroit*, No. 2005-01-1706, 2005
- (3) Sances Jr. A., Kumaresan S., Clarke R., Renfroe D., Herbst B., and Pozzi M., "Biomechanical Analysis of Motor Vehicle Seat Belt Buckles," *ISA*, No. 2003-041, 2003
- (4) Herbst B., Meyer S., Forrest S., Sances A., Kumaresan S., "Acceleration Amplification in Safety Belt Buckle Systems," *IMECE*, No. 2003-43159, 2003
- (5) Stanley B. Andrews, H. Alex Roberts, Joseph F. Partain, David A. Renfroe, "Dynamic Characteristics of end Release Seatbelt Buckles," *ESV Paper 97*, 2001
- (6) Park Doo Yeon, Kim Jong Kag, Lee Youn Bock, Kim Dae Sung, "A Study of inertial unlatching phenomena and development of the seat belt buckle with Anti-G effect feature," *2005 ADAMS Korea Users Conference*, 2005
- (7) Clarke R., "An Analysis of the JDC Buckle's Dynamic Response to Inertial Loading Conditions in a Vehicle Rollover," *Clarke Automotive Consultants*, 2001
- (8) Min-Gu Kuk, Tea-Oh Tak, Jae-soon Park, Seung-Eon Shin, Dae-Hee Kim, Jong-Kag Kim, Byoung-Gae You, Chul-Hyun Kim, "Development of Inertial Locking Anti-G Buckle of A Seatbelt System With Pre-tensioner", *Proceedings of the KSME 2006 Spring Annual Meeting*, 2006
- (9) William Lai, Benjamin Ewers III, Darrin Richards, Michael Carhart, William Newberry and Catherine Ford Corrigan, "Evaluation of Human Surrogate Modles for Rollover," *SAE World Congress Detroit*, No. 2005-01-0941, 2005
- (10) Song, D. et. al., "Finite Element Simulation of the Occupant/Belt Interaction : Chest and Pelvis Deformation, Belt Sliding and Submarining," *Presented at the 37th Stapp Car Crash Conference*, No.933108, San Antonio, November 1993
- (11) William Newberry, William Lai, Michael carhart, Darrin Richards, Jeffrey Brown and Christine Raasch, "Modeling the Effects of Seat Belt Pretensioners on Occupant Kinematics During Rollover," *SAE World Congress Detroit*, No. 2006-01-0246, 2006