



<응용 논문>

자동차 시트벨트 앵커리지 강도 해석의 신뢰성 향상을 위한 해석 기법 연구

이 광 섭* · 김 정 수 · 유 병 훈

광명산업(주) 중앙연구소

Study on Analysis Method of Vehicle Seatbelt Anchorage Analysis for Reliability Improvement

Kwangseop Lee* · Jeongsoo Kim · Byunghoon Yoo

R&D Center, Kwangmyung Industry Company, 155 2Gongdan 1-ro, Seobuk-gu, Cheonan-si, Chungnam 31075, Korea

(Received 15 April 2025 / Revised 9 June 2025 / Accepted 18 June 2025)

Abstract : A seatbelt anchorage strength test was conducted to evaluate the strength and stiffness performance of the seatbelt system in vehicle collisions to ensure occupant safety. In such tests, deformation of the upper anchorage plays a critical role in influencing finite element analysis (FEA) results. This study investigated various FEA conditions applicable between the upper anchorage and the seatbelt webbing to minimize the discrepancy between test and simulation results. Among the influencing factors, the damping coefficient was identified as a key parameter, and additional FEA was performed to assess its effect on reducing the error rate.

Key words : Seatbelt anchorage(시트벨트 앵커리지), Vehicle seat(자동차 시트), Damping(댐핑), Upper anchorage (어퍼 앵커리지), Quasi-static analysis(준정적 해석), Modal analysis(모달 해석), FEA(유한요소해석)

1. 서론

차량 충돌시 승객의 안전성을 확보하기 위한 장치인 시트벨트 시스템(Seatbelt system)은 리트랙터(Retractor), D링(D-ring), 버클(Buckle) 및 앵커리지(Anchorage)로 구성되어 있다. 일반적으로 후석 센터 시트(Rear center seat)의 경우 좌측과 우측에 위치한 사이드(Side) 시트로 인해 구조상 필러(Pillar)가 존재하지 않으며, 이로 인하여 D링을 차량에 장착할 수 없게 된다. 따라서 리트랙터에서 인출된 웨빙(Webbing)은 D링의 역할을 대신하는 어퍼 앵커리지(Upper anchorage)를 통해 텅(Tongue)과 버클이 체결될 수 있도록 웨빙의 경로를 전환해준다.

본 논문에서는 이러한 차량 시트벨트 시스템 장착부의 강도 및 강성 성능을 검증하기 위한 시트벨트 앵커리지 강도 시험과 유한 요소 해석 결과의 상대 비교를 통해 해석 결과의 신뢰성 향상을 위한 해석 기법 연구를 주제로 선정하였다. 특히 본 논문에서는 시트벨트 앵커리지 강도 해석 결과에 많은 영향을 미치는 어퍼 앵커리지부

와 웨빙 두 파트간 적용할 수 있는 다양한 해석 조건을 제시하였고, 이에 따른 해석 결과의 변위량 차이 및 시험 결과와의 상대 비교를 통해 해석 결과의 신뢰성을 검증하였다. 또한 해석 결과의 오차를 감소시키기 위해 댐핑 계수(Damping coefficient)를 보정 해석(Correlation analysis)의 주요 인자로 선정하여 추가 해석을 진행하였다. 최종 해석 결과 최초 진행한 현수준 해석 대비 -28.57%의 변위량 개선 효과를 도출하였으며, 이는 시험 결과와 대비 오차율 -0.88%을 나타내었다.

2. 모델 소개 및 주요 인자 선정

2.1 시험 모델

본 논문의 핵심 주제인 자동차 시트벨트 앵커리지 강도 시험은 차량이 충돌(Crash)이나 급제동(Emergency braking) 등으로 급격한 감속이 발생하는 상황에서 탑승자의 신체가 과도하게 이동하는 것을 효과적으로 제한함으로써, 부상의 정도를 최소화(Minimize injury severity)

*Corresponding author, E-mail: kslee02@kmin.co.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

하는데 기여한다. 특히 시트벨트 어셈블리 장착부(Seatbelt assembly anchorage)의 구조적 강성을 평가하고, 실제 조건에서 하중을 견딜 수 있는지를 검증하는데 주된 목적을 가지고 있다.¹⁾

국가 및 지역에 따라 시험을 규정하는 법규는 상이하지만, 본 논문에서는 북미지역에서 적용되는 FMVSS 210²⁾을 기준으로 Fig. 1과 같이 시트벨트 앵커리지 강도 시험을 진행하였고, 시험 방법은 시트벨트에 숄더 벨트용 바디 블록(Shoulder belt body block)과 랩 벨트용 바디 블록(Lap belt body block)을 장착한 후, 시트벨트 앵커 강도 시험기와 시트 사이를 체인(Chain)으로 연결하여 구성하였다. 이때 체인은 수평 기준선 대비 $10 \pm 5^\circ$ 로 배치되며, 해당 조건에서 13,345N의 인장 하중을 점진적으로 부과하여 시트벨트 앵커리지의 구조적 반응을 평가하였다.



Fig. 1 Initial model prior to seatbelt anchorage strength evaluation

시트 프레임(Seat frame)을 구성하고 있는 여러 부품들 중 본 논문의 주요 관심 부품인 어퍼 앵커리지는 Fig. 2와 같으며 3점식 자동차 시트벨트(Three-point seatbelt)에 장착되는 3개의 시트벨트 앵커리지(Seatbelt anchorage) 중 승객의 어깨 위쪽에 장착되는 앵커리지를 정의한다.

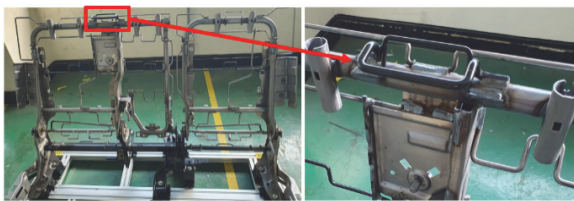


Fig. 2 Detailed view of the upper anchorage in the test model

또한 어퍼 앵커리지는 자동차 2열 센터 시트 백프레임에 장착된 리트랙터로부터 인출된 자동차 시트벨트 웨빙의 경로를 승객의 어깨 위쪽으로부터 탑승자의 상체를 감싸주며 텅과 버클이 연결될 수 있도록 전환해주는 가이드(Guide) 역할을 하는 파트이다.

2.2 해석 모델

유한요소 모델링은 Hypermesh,³⁾ LS-Prepost⁴⁾ 소프트웨어를 사용하여 Figs. 3, 4와 같이 시트벨트 앵커리지 강도 해석 모델을 생성하였다.

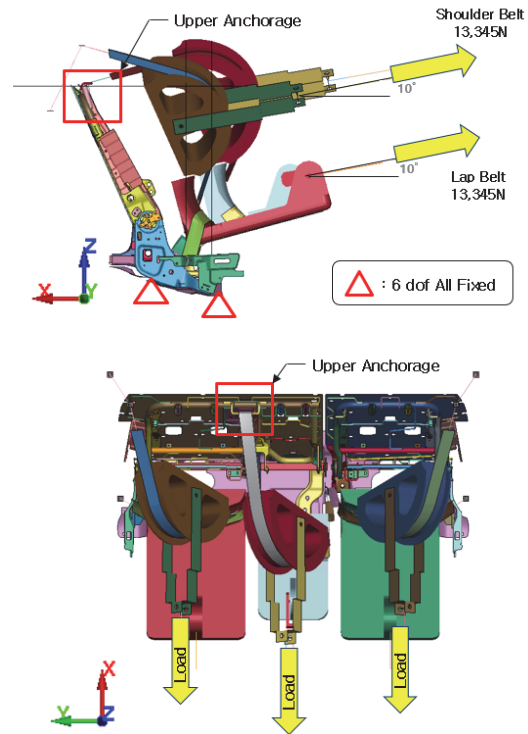


Fig. 3 FEA model and boundary conditions for seatbelt anchorage strength analysis strength

해석 모델의 하중 조건은 각각의 Shoulder belt와 Lap belt에 연결된 총 6개의 체인 끝단부에 대해 0부터 13.345 kN까지 선형적으로 증가하는 인장 하중을 부여하는 방식으로 설정하였다. 해당 하중은 시험 조건과 동일하게, 수평 기준선 대비 $10 \pm 5^\circ$ 의 각도로 체인이 배치된 상태에서 점진적으로 작용하며, 시트벨트 시스템 전반에 걸쳐 하중이 균일하게 전달되도록 구성되었다. 이러한 하중 조건은 FMVSS 210 규격을 기반으로 적용되었으며, 해석 모델이 실제 시험 환경을 정밀하게 묘사할 수 있도록 설계되었다. 구속 조건은 시트 백프레임이 차체와 고정되는 총 9개의 지점에 대해 모든 자유도를 제한하는 방

식으로 적용하였다. 이는 시험 장비에서 설정된 고정부 조건과 동일한 경계 조건을 해석 모델에 반영한 것으로 외력에 대한 시트 전체 구조물의 거동을 물리적으로 신뢰성 있게 재현하는데 중점을 두었다.

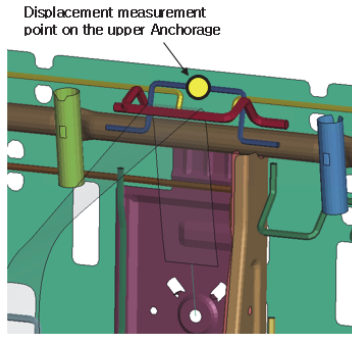


Fig. 4 Upper anchorage detail as the focus area of the analysis

Shoulder, Lap belt body block과 시트벨트를 제외한 순수 시트 해석 모델의 엘리먼트(Element)는 126,770개, 절점(Node)는 137,163개로 구성하였다. 일정 두께를 가진 대부분의 부품은 4-node 쉘(Shell) 요소를 사용하였고, 와이어(Wire)와 리클라이너부는 헥사(Hexa) 형태의 솔리드(Solid) 메쉬(Mesh)를 생성하였다. 또한 하중을 부과하기 위한 체인부는 빔(Beam) 요소를 사용하여 해석 모델을 구성하였다. 솔버(Solver)는 동적 외연적(Dynamic explicit) 유한 요소 해석 프로그램인 LS-Dyna를 사용하여 준정적 해석(Quasi-static analysis)을 수행하였다.⁵⁾

2.3 현수준 평가

평가 방법은 Shoulder belt와 Lap belt에 100 % 하중인 13.345 kN에 도달하는 시점을 기준으로 어퍼 앵커리지부 T좌표(-X 방향) 변위량을 Fig. 5와 같이 측정하여 상대 비교하였다.⁶⁾

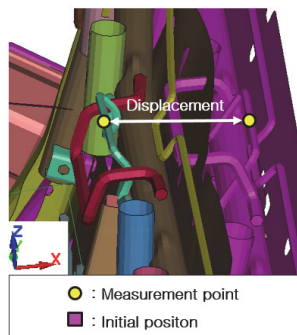


Fig. 5 Displacement measurement method in the T-direction of the upper anchorage under 100 % load

시트벨트 앵커리지 강도 시험 결과는 Fig. 6과 같이 100 % 하중 도달 시점 어퍼 앵커리지 변위량은 35.22 mm로 평가되었고, 해석 결과는 Figs. 7, 8과 같이 48.87 mm로 시험 결과 대비 해석 결과 오차율은 +38.75 %를 나타내었다.

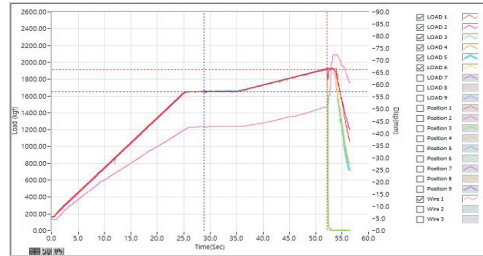


Fig. 6 Graph of test results with post-test deformation shape

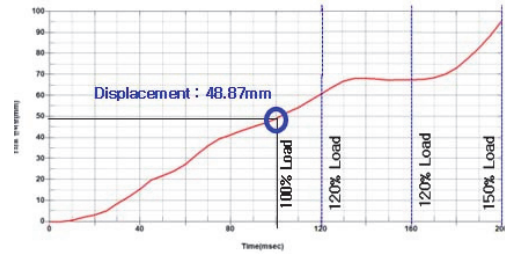


Fig. 7 Graph of T-direction displacement results from seatbelt anchorage strength analysis

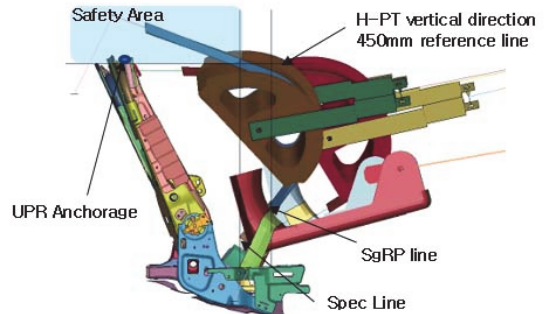


Fig. 8 FEA result of seatbelt anchorage strength at 100 % load

2.4 오차 발생 원인 검토 및 변수 발굴

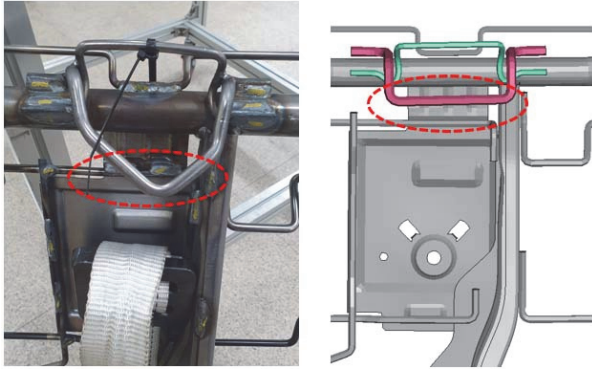


Fig. 9 Comparison between test and FEA results for the upper anchorage wire section

시험 결과 Shoulder belt 하중에 의해 Fig. 9와 같이 어퍼 앵커리지 와이어부의 변형이 발생하였으나 현 수준 해석 결과에서는 와이어부 변형을 재현하지 못하는 문제가 발생하였다. 일반적으로 페브릭(Fabric) 소재의 시트벨트를 모델링하는 경우 Fig. 10과 같이 상대 파트와 접촉이 발생하는 부분은 2d 셀 요소를 사용하여 구성하고, 접촉이 발생하지 않거나 시트벨트의 경로가 바뀌는 부분은 1d 선 요소를 사용하여 시트벨트 시스템을 구성한다.

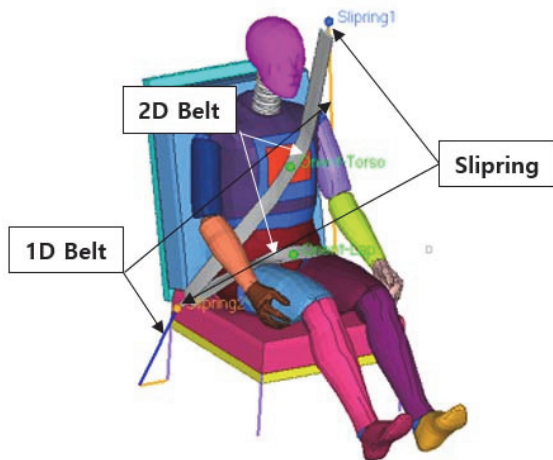


Fig. 10 Configuration of the seatbelt system in the FEA model

특이 경로가 바뀌는 부분은 슬립링(Slipping) 요소를 사용하여 시트벨트의 원활한 이동을 해석적으로 구현한다.

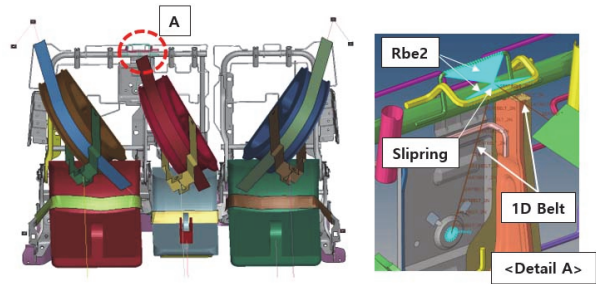


Fig. 11 Element assignment details in the FEA model

Fig. 11과 같이 1d belt의 경로가 바뀌는 지점에 슬립링 요소를 구성하기 위해 일반적으로 주변 파트에 Rbe2 요소를 사용하여 슬립링을 고정시킨다. 이 과정에서 강체(Rigid) 요소를 어퍼 앵커리지부에 사용하기 때문에 시험 결과와 달리 해석 결과에서는 어퍼 앵커리지 와이어부의 변형이 재현되지 않았던 것으로 예상되었다.

Table 1 Main parameters influencing the FEA results

Case #01 (Current model)	Case #02	Case #03	Case #04



해석 결과에 영향을 미칠 것으로 예상되는 주요 인자를 Table 1과 같이 4가지 경우로 나누어 선정하였다. Case #01의 경우 현 수준 해석 모델의 경계 조건을 나타내며, Case #02와 #03은 Rbe2 요소의 면적과 길이가 해석 결과에 미치는 영향도를 검증하기 위해 선정하였고, Case #04는 Rbe2 요소의 자체 영향도를 검증하기 위해 기존 해석 모델에서 사용하였던 1d belt와 슬립링 요소를 모두 제거한 후 실제 시험 모델과 동일한 조건인 2d belt로만 시트벨트 시스템을 구성하였다.

3. 1차 해석 결과 및 최종 보정 인자 선정

3.1 1차 해석 결과

주요 인자로 선정된 4개 모델의 해석 결과는 Table 2와 같으며, Case #02의 경우 Rbe2 요소의 면적을 감소시킨 모델로 변위량은 Case #01 대비 4.69 mm 감소하는 효과가 있으나 어퍼 앵커리지 와이어의 변형은 재현하지 못하는 결과가 나타났다.

Table 2 Comparison of displacement results for four major influencing factors in the analysis

Category	Case #01 (Current model)	Case #02	Case #03	Case #04
FEA Results				
Displacement of T-coordinate	48.87mm (+38.75%)	44.18mm (+25.44%)	38.48mm (+9.26%)	37.74mm (+7.16%)
Displacement Graph				
	Ideal Error Rate : 0~3%	Good Error Rate : 3~5%		
	Normal Error Rate : 5~10%	Bad Error Rate : 10%~		

Case #03은 Rbe2 요소의 면적과 길이를 모두 감소시킨 모델로 변위량은 Case #02 대비 5.70 mm 감소하였고, 어퍼 앵커리지 와이어부의 Rbe2 요소 길이가 적용된 부분을 제외한 나머지 부분에서 소폭 변형이 발생하는 경향을 도출하게 되었다.

Case #04의 경우 실제 모델과 동일한 2d belt로 구성된 모델로 Fig. 12와 같이 어퍼 앵커리지 와이어부의 변형도 시험 결과와 유사하게 재현이 되었고, 100 % 하중 부하시점 기준 T좌표 변위량 또한 37.74 mm로 시험과 오차율 +7.16 %로 Case #02, 03 대비 오차율 개선 효과를 가져 오게 되었다.

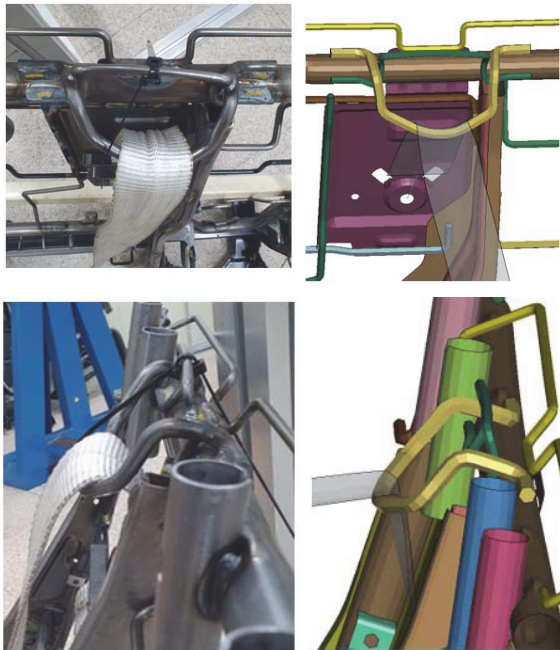


Fig. 12 Relative comparison between test results and FEA results under case #04 condition for the upper anchorage

3.2 보정 해석 인자 선정

본 연구의 목표인 시험 대비 해석 결과 오차율을 3 % 이내로 보정하기 위해 댐핑 계수를 보정 인자로 선정하였다. 댐핑 계수는 짧은 시간에 이벤트(Event)가 발생하는 충돌 해석과 같은 경우에는 사용하지 않으며, 시트벨트 앵커리지와 같은 준정적 해석에서는 0.05 ~ 0.1 수준의 값을 적용하는 것이 일반적이다. LS-Dyna에서는 최적의 질량 비례 댐핑 계수(Mass-proportional damping coefficient)를 다음과 같은 식 (1)로 정의하고 있다.

$$(D_s)_{critical} = 2\omega_{min} \quad (1)$$

여기서 $(D_s)_{critical}$ 은 임계 댐핑 계수(Critical damping coefficient)로 시스템의 최소 고유 진동수에 해당하는 각 진동수 ω_{min} 를 기준으로 계산된다. 단위는 각각 1/S이며, 구조물의 진동수에서 도출되는 ω_{min} 은 모달 해석(Modal Analysis)을 통해 결과를 확보할 수 있다.⁷⁾ 위 식은 Rayleigh damping의 한 형태로 질량 비례 댐핑을 통해 저주파수에서 발생할 수 있는 강체 운동(Rigid body motion)이나 구조물의 초기 진동을 효과적으로 감소시키기 위해 사용된다. 따라서 본 논문에서도 LS-Dyna에서 권장하는 방식에 따라 모달 해석 결과 중 가장 낮은 고유 진동수에 대응하는 모드의 각속도 수치를 ω_{min} 으로 사용하여 댐핑 계수를 산정하였다.⁸⁾

모달 해석 결과는 Table 3과 같이 4층 LH seat의 경우 1차 모드인 81.02 Hz, 6층 RH seat의 경우 7차 모드인 160.96 Hz에서 Fig. 13과 같이 관심 모드를 확인할 수 있었다.

Table 3 Data obtained from modal analysis

Mode	Eigenvalue	Radian [rad/ms]	Cycle [ms]
01	2.591324e-01	5.090505e-01	81.01790
02	3.582320e-01	5.985249e-01	95.25819
03	4.086521e-01	6.392590e-01	101.7412
04	4.808660e-01	6.934450e-01	110.3652
05	6.774050e-01	8.230462e-01	130.9919
06	6.784693e-01	8.236925e-01	131.0947
07	1.023939e+00	1.011899e+00	161.0487
08	1.138180e+00	1.066855e+00	169.7953
09	1.188708e+00	1.090279e+00	173.5233
10	1.631860e+00	1.277443e+00	203.3114

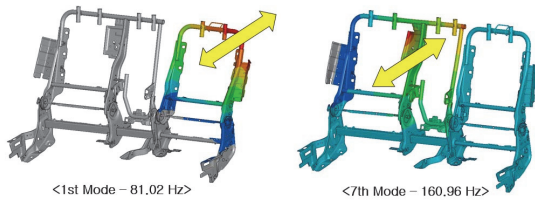


Fig. 13 Modal analysis results of key mode of interest

1차 해석 Case #04 모델을 기준으로 Table 4와 같이 3가지의 댐핑 계수를 보정 인자로 선정하여 해석 모델을 구성하였다.

Table 4 Selection of damping coefficient as a key correlation factor

Category	Case #05	Case #06	Case #07
Damping Coefficient	0.06	0.08	LH Seat : 1.018 RH Seat : 2.024

1차 해석 모델의 경우 모든 Case에서 댐핑 계수를 0.1로 설정하였고, 댐핑 계수가 해석 결과에 미치는 영향도를 파악하기 위해 Case #05, 06과 같이 0.05 ~ 0.1 사이의 수치를 선정하였다. Case #07의 경우 모달 해석 결과 중 관심 모드인 1차와 7차 모드의 각속도 수치에 2배를 적용하였다.

4. 최종 해석 결과

댐핑 계수를 보정 인자로 선정한 해석 결과는 Table 5와 같으며, Case #05, 06, 07 모두 2d belt가 적용되어 어퍼 앵커리지 와이어부가 시험과 유사한 수준의 변형이 발생한 것을 확인할 수 있었다.

Table 5 Comparison of test results and FEA results with the damping coefficient as a correlation factor

Category	Test	Case #05	Case #06	Case #07
Results				
Displacement of T-coordinate	35.22mm (Criteria)	34.91mm (-0.88%)	36.11mm (+2.53%)	42.86mm (+21.69%)
Displacement Graph				
		Ideal Error Rate : 0~3%	Good Error Rate : 3~5%	Bad Error Rate : 10%~
		Normal Error Rate : 5~10%		



Fig. 14 Relative comparison between test results and FEA results under case #05 condition for the upper anchorage

하지만 모달 해석 결과를 바탕으로 댐핑 계수를 선정한 Case #07 모델의 경우 T좌표 변위량이 42.86 mm로 시험 결과와 비교시 오차율은 +21.69%로 상당한 차이가 발생한 것을 확인할 수 있었다.

Case #06의 경우 오차율은 +2.53%를 나타내어 목표치 3% 이내 결과를 만족하는 것으로 나타났으며, Case #05는 T좌표 변위량이 34.91 mm로 시험 결과 35.22 mm 대비 -0.88%의 오차율을 보였다.

Fig. 14는 Case #05의 상세 해석 결과이며, 어퍼 앵커리지 와이어부의 변형 또한 시험과 동등 수준의 결과를 도출하게 되었다.

5. 결론

본 논문에서는 자동차 시트벨트 앵커리지 강도 해석의 신뢰성 향상을 위해 기존에 당사에서 어퍼 앵커리지부의 해석 모델링을 위해 사용하였던 1d seat belt와 슬립링 요소를 제거하였고, 실제 제품과 유사한 2d seat belt를 해석 모델에 적용하였다. 또한 해석 결과와 시험 결과의 오차율 감소를 위해 댐핑 계수를 보정 인자로 선정하여 추가 해석을 진행하였다.

해석 결과는 Fig. 15와 같이 최초 현수준 해석 결과 변형량 48.87 mm에서 최종 2차 해석 변형량 34.91 mm로 -28.57%의 개선 효과가 발생하였고, 이는 시험 결과 변형량 35.22 mm 대비 오차율 -0.88%로 시험 결과와 동등 수준의 해석 결과를 도출하게 되었으며, 향후 시트벨트

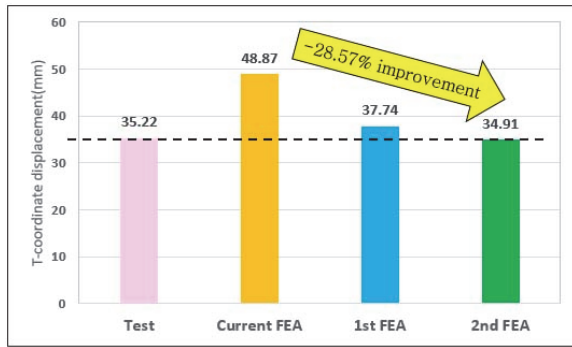


Fig. 15 T-direction displacement graph of test and FEA results for seatbelt anchorage strength analysis

앵커리지 강도 해석의 정밀도 향상을 위한 참고 모델로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

- 1) K. S. Lee, C. K. Cho, B. Y. Choi and H. J. Kim, "Quasi-Static Analysis of Vehicle Seatbelt Anchorage and Improvement of Test Correlation," KSAE Fall Conference Proceeding, pp.1113–1118, 2017.
- 2) Seat Belt Assembly Anchorage Test, FMVSS No.210, NHTSA USA, 2013.
- 3) Altair Engineering, Altair Hypermesh User's Guide ver.2022.3, 2022.
- 4) LSTC Inc., LS-Prepost Training Manual, 2015.
- 5) K. S. Lee, Y. E. Eo, S. S. Kim, D. Y. Kim, T. R. Song and K. S. Lee, "Quasi-Static Analysis of Vehicle Seatbelt Using Analysis of Variance and Improvement of Tensile Test Correlation," Transactions of KSAE, Vol.23, No.4, pp.454–461, 2015.
- 6) K. S. Lee, J. S. Kim, B. H. Yoo and D. S. Kim, "Improvement of the Correlation between FEA and Test of Vehicle Seatbelt Anchorage Strength Using the AHP Statistics Technique," Transactions of KSAE, Vol.33, No.4, pp.291–296, 2025.
- 7) J. K. Kim and M. J. Song, "Quasi-Static Seatbelt Anchorage Simulation Using by Taguchi Method," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.1605–1609, 2005.
- 8) LSTC Inc., LS-Dyna Keyword User's Manual ver.971 R12.1.0, 2020.