Transactions of KSAE, Vol. 33, No. 4, pp.291-296 (April, 2025)

Check for updates

Copyright © 2025 KSAE / 233-05
pISSN 1225-6382 / eISSN 2234-0149
DOI http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2025.33.4.291

〈응용논문〉

AHP 통계 기법을 이용한 자동차 시트벨트 앵커리지 강도 해석과 시험 상관성 개선

이광섭*·김정수·유병훈·김동수

광명산업㈜ 중앙연구소

Improvement of the Correlation between FEA and Test of Vehicle Seatbelt Anchorage Strength Using the AHP Statistics Technique

Kwangseop Lee* · Jeongsoo Kim · Byunghoon Yoo · Dongsu Kim

R&D Center, Kwangmyung Industry Company, 155 2Gongdan 1-ro, Seobuk-gu, Cheonan-si, Chungnam 31075, Korea
(Received 1 November 2024 / Revised 28 November 2024 / Accepted 30 December 2024)

Abstract : This study makes a relative comparison of a vehicle seatbelt anchorage strength test and a quasi-static analysis by using an LS-Dyna, and attempts to propose a method to reduce the error rate of the FEA(Finite Element Analysis) results by using statistical techniques effectively. This study selects 7 main factors that affect the result of the FEA, and evaluates the relative importance of potential causes by applying the AHP(Analytic Hierarchy Process) technique to improve the reliability of the result of the FEA and the optimization to reduce the error rate in the FEA through the design of the experiments.

Key words : Seatbelt anchorage(시트벨트 앵커리지), Vehicle seat(자동차 시트), AHP(Analytic Hierarchy Process, 계층화 분석법), Statistics technique (통계 기법), Quasi-static analysis(준정적 해석), Design of experiments(실험 계획법), FEA(유한요소해석)

1. 서 론

AHP(Analytic Hierarchy Process) 기법은 1970년 대 미국의 전략 연구학 학자 토마스 L. 사티(Thomas L. Saaty)에 의해 제안되었고, 의사 결정의 평가 기준이 복합적인 경우 계층화(Hierarchy)하여 주요 요인을 세분화하고, 상대 비교(Pairwise comparison)를 통해 그 중요도를 산출하여 가중치(Weight)를 평가한 후 최적의 대안을 선정하는 통계 분석 기법 중 하나이다. 일반적으로 계층화 분석법은 정량적, 정성적 기준을 고려해 합리적이고, 현실적인 의사 결정이 필요한 의료, 공학 등 다양한 분야에서 광범위하게 사용되고 있으며, 정부 예비 타당성 조사와 같은 평가에 대표적으로 활용되고 있다.

본 논문에서는 자동차 시트벨트 앵커리지 강도(Seatbelt anchorage strength) 해석 결과에 영향을 미치는 7가지 주요 인자를 선정하여 AHP 기법을 통해 중요도 평가를 수행하였고, 일관성 지수를 평가하여 일관성을 확보하였다.[1] 또한 주요 인자를 2수준 7인자 L12 직교표로 구성하여 실험 계획법(Design of experiments)을 수행하였고, 평균에 대한 반응표를 통해 주요 인자에 대한 주효과도를 분석하여 2가지 주요 인자의 최적 수준을 선정하였다. 최적화 과정에서는 3수준 2인자 L9 직교표를 생성하여 추가 해석을 진행하였고, 목표치인 시험 결과 대비 해석 오차율 3 % 이내 수준을 만족하는 결론을 얻게 되었다. 해석 결과의 신뢰성 향상을 위해 본 논문에서는 6시그마 방법론 중 하나인 DMAIC(Define, Measure, Analysis, Improve, Control) 프로세스를 활용하였다.

2. 해석 모델 및 잠재 요인 선정

2.1 해석 모델

본 논문에서는 Fig. 1과 같이 자동차 시트벨트 앵커리지 강도 시험 모델을 논문 주제로 선정하였다. 시험 법규는 북미 지역 FMVSS 210[2]을 기준으로 시트벨트에 Shoulder와 Lap 벨트 바디 블록을 장착하고, 수평 기준 10±5°로 조정후 각각 13,345 N 하중을 부하하여 시험을

*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.

Fig. 1 Test model of seatbelt anchorage strength

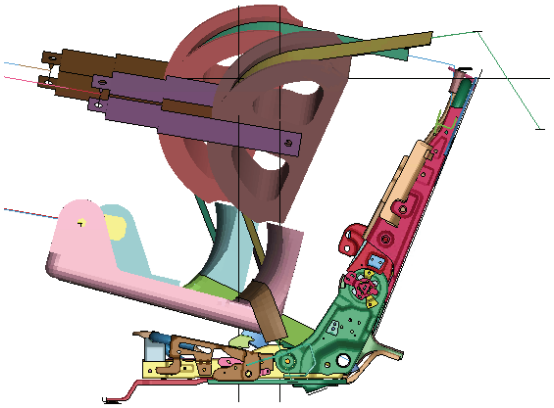

Fig. 2 FEA model of seatbelt anchorage strength

진행하였다.

시트벨트 앵커리지 강도 시험의 유한요소 모델링은 Hypermesh[3]와 LS-Prepost[4]를 사용하여 Fig. 2와 같이 시험과 동일한 형상의 해석 모델을 생성하였고, 하중 블록(Block)과 시트벨트를 제외한 시트 해석 모델의 엘리먼트(Element)는 210,987개, 절점(Node)은 228,364개로 구성하였다.[5]

해석 프로그램은 동적 외연적(Dynamic explicit) 유한요소 해석 소프트웨어인 LS-Dyna[6]를 솔버(Solver)로 사용하여 준정적 해석(Quasi-static analysis)을 수행을 하였다.

2.2 현수준 평가

본 논문에서는 Shoulder와 Lap 벨트에 각각 100 % 하중인 13,345N에 도달하는 시점을 기준으로 해석과 시험의 어퍼 앵커리지(Upper anchorage) T좌표(-X방향) 변위량을 Fig. 3과 같이 측정하였고, 이를 상대 비교 평가 대상으로 선정하였다.

100 % 하중 도달 시점 어퍼 앵커리지 T좌표 변위량 시험 결과는 67 mm, 해석 결과는 104.22 mm로 오차율

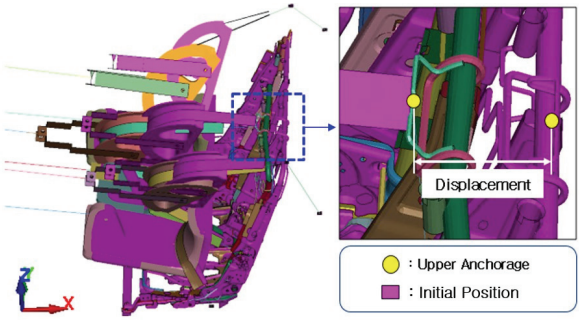

Fig. 3 T-coordinate displacement of seatbelt anchorage strength

+55.6 % 수준으로 평가되었다.

2.3 잠재 원인 변수 발굴 및 AHP 중요도 평가

해석 결과에 영향을 미칠 것으로 예상되는 잠재 원인 14가지를 선정하였고, 이 중 재료 물성치와 같이 시험을 통해 확보 가능한 인자들과 Damping 계수와 같이 수식을 통해 계산이 가능한 인자들을 제외한 나머지 7가지 인자들을 주요 잠재 원인으로 Table 1과 같이 선정하였다. 또한 통계 분석 기법 중 하나인 AHP 기법을 사용하여 Table 2와 같이 인자별 중요도를 산출하여 가중치를 평가한 후 일관성 지수(Consistency index)를 식 (1)과 같이 계산하여 일관성 확보를 검증하였다.

$$C.I = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \tag{1}$$

λ는 상대 비교 행렬에서의 고유값 최대치를 정의하며, n은 요인수를 뜻한다. 일반적으로 일관성 지수가 0.1 이상인 경우에는 일관성이 없는 무의미한 응답으로 판단하며, 본 논문 결과에서는 λ 7.1812 일관성 지수는 0.03으로 산출되어 중요도 평가의 일관성을 확보하였다.

Table 1 Potential cause main effects analysis results

CTQ Y's		Critical X's [Potential Cause]
Value Error Rate	01	Chain Length
	02	Chain Properties
	03	Initial Position of Shoulder Block
	04	Lap Block
	05	Boundary Condition of UPR Anchorage
	06	Coefficient of Friction of UPR Anchorage
	07	1-d Webbing Loading Curve
	08	1-d Webbing Un-Loading Curve
	09	Coefficient of Friction of Buckle
	10	Coefficient of Friction of Webbing
	11	Damping Coefficient
	12	Loading Curve Slope
	13	Coefficient of Friction of D-Ring
	14	Coefficient of Friction of Retractor

	Critical X's [Main Cause]
01	Chain Length
02	Boundary Condition of UPR Anchorage
03	Lap Block
04	Coefficient of Friction of Buckle
05	Coefficient of Friction of UPR Anchorage
06	Coefficient of Friction of Webbing
07	Initial Position of Shoulder Block

Table 2 Potential cause relative importance evaluation applied AHP method

No.	Main Cause	Chain Length	Boundary Condition of UPR Anchorage	Lap Block	Coefficient of Friction of Buckle	Coefficient of Friction of UPR Anchorage	Coefficient of Friction of Webbing	Initial Position of Shoulder Block	Weight [%]	Rank.
1	Chain Length	1	0.50	0.11	0.20	0.17	0.25	0.50	3.09	7
2	Boundary Condition of UPR Anchorage	2	1	0.20	0.33	0.25	0.50	2	6.29	5
3	Lap Block	9	5	1	3	2	4	6	35.84	1
4	Coefficient of Friction of Buckle	5	3	0.33	1	0.5	2	4	15.70	3
5	Coefficient of Friction of UPR Anchorage	6	4	0.50	2	1	4	5	24.71	2
6	Coefficient of Friction of Webbing	4	2	0.25	0.50	0.25	1	3	9.82	4
7	Initial Position of Shoulder Block	2	0.50	0.17	0.25	0.20	0.33	1	4.41	6

3. 근본 원인 분석

3.1 실험 계획법

주요 인자들의 교호작용은 고려하지 않고 해석 결과에 영향을 미치는 주효과를 파악하기 위해 Table 3과 같이 2수준 7인자 L12 직교표를 구성하였고, AHP 기법을 통해 해석 결과에 영향을 미치는 주요 인자로 선정된 3가지는 Table 4와 같이 직교표 1, 2, 4열에 배치하였다.

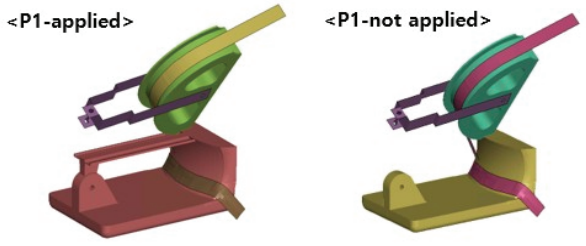

Fig. 4 P1 factor information

주요 인자 중 Lap block(P1)은 Fig. 4와 같이 Lap block 상단에 레일(Rail) 형상을 추가하여 하중 부하시 Shoulder block의 -H방향 자유도(Degree of freedom)에 대한 해석 결과 영향도를 검증하기 위해 주요 인자로 선정하였다.

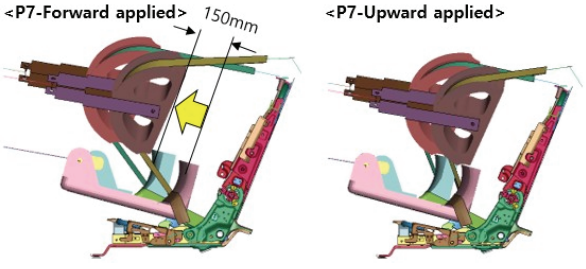

Fig. 5 P7 factor information

Shoulder block 초기 위치(P7) 인자는 시험 초기 시점 기준 시트 벨트의 프리텐션(Pre-tension)이 해석 결과에 미치는 영향도를 검증하기 위해 Fig. 5와 같이 주요 인자로 선정하였고, 전방 적용 모델은 상방 적용 모델을 기준으로 Shoulder block을 10도 방향으로 150 mm 이동하여 생성하였다.

Table 3 Potential cause variable and level selection

No.	Critical X's [Correlation Factors]	Level	
		#01	#02
P1	Lap Block (A Constrained of Degree of Freedom in H-Direction)	applied	Not Applied
P2	Coefficient of Friction of UPR Anchorage	0.0	0.2
P3	Chain Length	5,000mm	2,500mm
P4	Coefficient of Friction of Buckle	0.0	0.2
P5	Boundary Condition of UPR Anchorage	Partially Applied	All Applied
P6	Coefficient of Friction of Webbing	0.1	0.3
P7	Initial Position of Shoulder Block	Forward Applied	Upward Applied

Table 4 L12 model FEA results of seatbelt anchorage strength

L12	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	FEA Results (Displacement of T-Coordinate)
Case 01	1	1	1	1	1	1	1	35.34mm
Case 02	1	1	1	1	1	2	2	34.17mm
Case 03	1	1	2	2	2	1	1	57.09mm
Case 04	1	2	1	2	2	1	2	54.91mm
Case 05	1	2	2	1	2	2	1	51.99mm
Case 06	1	2	2	2	1	2	2	32.11mm
Case 07	2	1	2	2	1	1	2	38.62mm
Case 08	2	1	2	1	2	2	2	74.93mm
Case 09	2	1	1	2	2	2	1	69.19mm
Case 10	2	2	2	1	1	1	1	33.14mm
Case 11	2	2	1	2	1	2	1	35.46mm
Case 12	2	2	1	1	2	1	2	75.29mm

3.2 잠재 원인 주효과도 분석

Fig. 6과 같이 L12 model을 통해 도출한 해석 결과를 바탕으로 Table 5, Table 6과 같이 평균에 대한 주효과도 분석을 하였고, 주효과가 상대적으로 큰 Lap block(P1), 어퍼 앵커리지 경계 조건(P5) 2가지 요인의 최적 수준을 선정하였다.

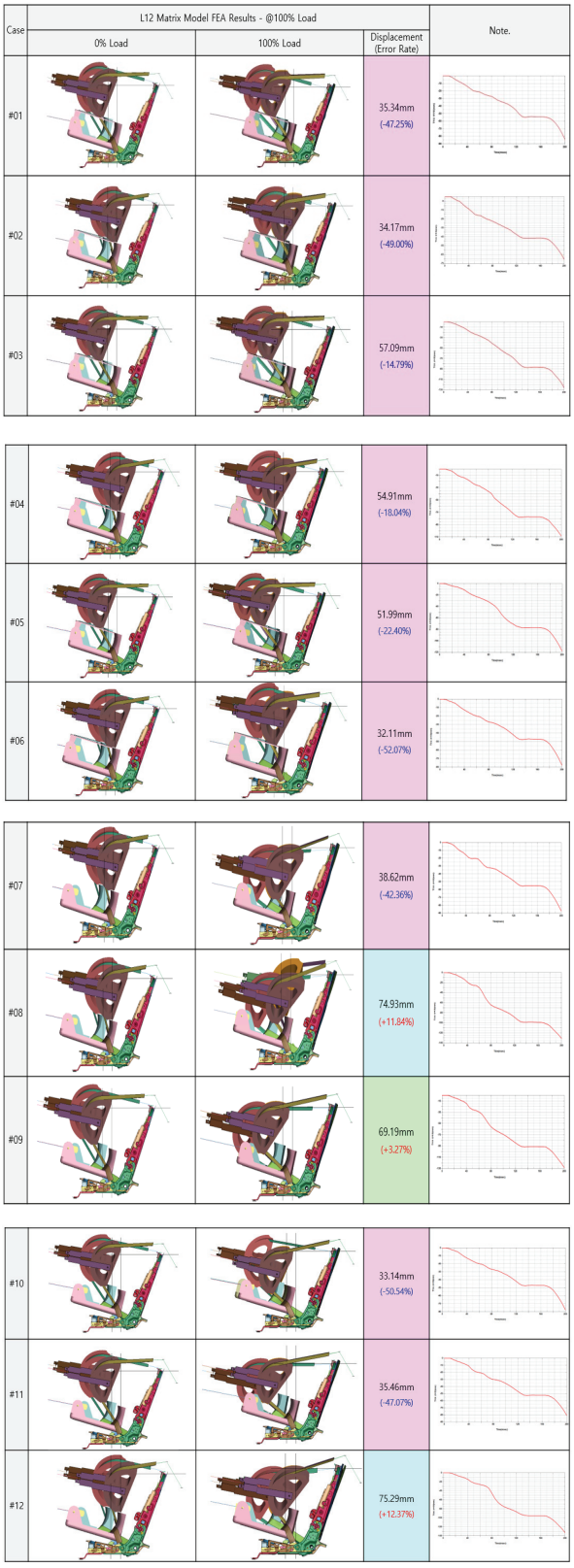

Fig. 6 L12 model FEA results of seatbelt anchorage strength

Table 5 Main effects of seatbelt anchorage strength

Item		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Level	#01	44.27	51.56	50.73	50.81	34.81	49.07	47.04
	#02	54.44	47.15	47.98	47.90	63.90	49.64	51.67
Delta		10.17	4.41	2.75	2.91	29.09	0.57	4.63
Rank		2	4	6	5	1	7	3

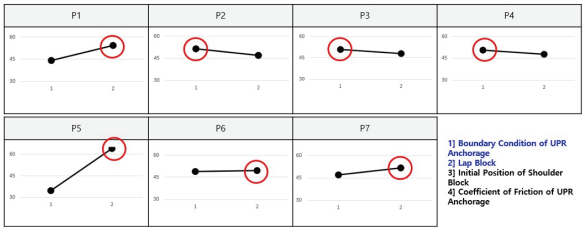

Table 6 Potential cause main effects analysis results

No.	Critical X's [Correlation Factors]	Level #01	Level #02	Selection Results
P1	Lap Block (A Constrained of Degree of Freedom in H-Direction)	applied	Not Applied	#02 Selected
P2	Coefficient of Friction of UPR Anchorage	0.0	0.2	Not Selected (1 or 2)
P3	Chain Length	5,000mm	2,500mm	Not Selected (1 or 2)
P4	Coefficient of Friction of Buckle	0.0	0.2	Not Selected (1 or 2)
P5	Boundary Condition of UPR Anchorage	Partially Applied	All Applied	#02 Selection
P6	Coefficient of Friction of Webbing	0.1	0.3	Not Selected (1 or 2)
P7	Initial Position of Shoulder Block	Forward Applied	Upward Applied	Not Selected (1 or 2)

No.	Vital Few X's
X1	Coefficient of Friction of UPR Anchorage
X2	Chain Length
X3	Coefficient of Friction of Buckle
X4	Coefficient of Friction of Webbing
X5	Initial Position of Shoulder Block

4. 해석 결과 최적화

4.1 1차 최적화

실험 계획법을 이용한 잠재 원인 주효과도 분석을 통해 선정된 2개의 인자를 제외한 5개의 인자는 Table 7과 같으며, 웨빙(Webbing) 마찰계수(P6)와 Shoulder block 초기 위치(P7) 2가지 인자는 해석 경험치를 반영하여 수준을 최종 선정하였다. 또한 하중 부하 체인 길이(P3)는 당사 시험기 실측치인 2,500 mm로 선정하였고, 시트벨트 앵커리지 강도 해석 결과에 미치는 영향도가 높을 것으로 예상되는 어퍼 앵커리지 마찰계수(P2)와 버클(Buckle)

Table 7 Main factor level subdivision for primary optimization

: Vital Few X's

No.	Critical X's [Correlation Factors]	Level #01	Level #02	Level #03
P1	Lap Block (A Constrained of Degree of Freedom in H-Direction)	Not Applied		
P2	Coefficient of Friction of UPR Anchorage	0.0	0.15	0.3
P3	Chain Length	2,500mm		
P4	Coefficient of Friction of Buckle	0.0	0.15	0.3
P5	Boundary Condition of UPR Anchorage	All Applied		
P6	Coefficient of Friction of Webbing	0.3		
P7	Initial Position of Shoulder Block	Upward Applied		

L9	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Case 01	2	1	2	1	2	2	2
Case 02	2	1	2	2	2	2	2
Case 03	2	1	2	3	2	2	2
Case 04	2	2	2	1	2	2	2
Case 05	2	2	2	2	2	2	2
Case 06	2	2	2	3	2	2	2
Case 07	2	3	2	1	2	2	2
Case 08	2	3	2	2	2	2	2
Case 09	2	3	2	3	2	2	2

마찰계수(P4) 2가지 인자는 3수준으로 구성하여, L9 matrix의 1차 최적화 해석을 수행하였다.

1차 최적화 해석 결과는 Table 8, Fig. 7과 같으며, 어퍼 앵커리지 T좌표 최대 변위량은 63.03 ~ 74.93 mm의 분포를 보였고, 시험 결과 대비 오차율은 -5.93 % ~ +11.84 %를 나타내었다.

Case05, 06, 07은 논문 목표치인 오차율 3 % 이내 수준을 만족하였고, 특히 Case05의 경우 시험 결과 대비 오차율 +0.64 %로 시험 결과와 동등 수준의 결과를 도출하였다.

Table 8 L9 matrix model FEA results

L9	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	FEA Results (Displacement of T-Coordinate)	Error Rate
Case 01	2	1	2	1	2	2	2	74.93mm	+11.84%
Case 02	2	1	2	2	2	2	2	71.84mm	+7.22%
Case 03	2	1	2	3	2	2	2	72.31mm	+7.93%
Case 04	2	2	2	1	2	2	2	71.83mm	+7.21%
Case 05	2	2	2	2	2	2	2	67.43mm	+0.64%
Case 06	2	2	2	3	2	2	2	67.56mm	+0.84%
Case 07	2	3	2	1	2	2	2	68.54mm	+2.30%
Case 08	2	3	2	2	2	2	2	63.03mm	-5.93%
Case 09	2	3	2	3	2	2	2	63.49mm	-5.24%

ideal Error Rate : 0~3% good Error Rate : 3~5% normal Error Rate : 5~10% bad Error Rate : 10%~

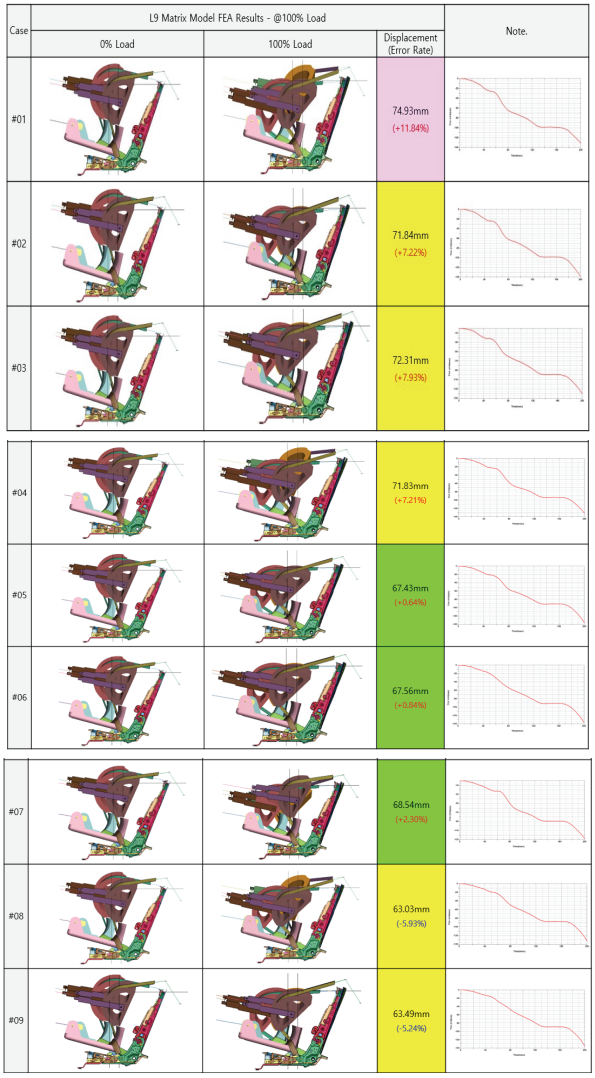

Fig. 7 L9 matrix model FEA results

4.2 2차 최적화

2차 최적화 해석은 1차 최적화 해석의 Case05 모델에서 선정된 최종 인자를 기준으로 경험치를 반영하여 각 인자들의 미세 조정을 통해 추가 해석을 진행하였다.

2차 최적화 해석 결과 100 % 하중 부하 시점 T좌표 변위량은 Figs. 8, 9와 같이 67.11 mm이고, 이는 시험 결과 67 mm 대비 오차율 +0.16 %로 시험 결과와 상대 비교시 동등 수준의 결과를 나타내었다.

The Final Results

Category	Test Result	CAE Result	Note.
Displacement of T-Coordinate(@100% Load)	67mm	67.11mm	+0.16%

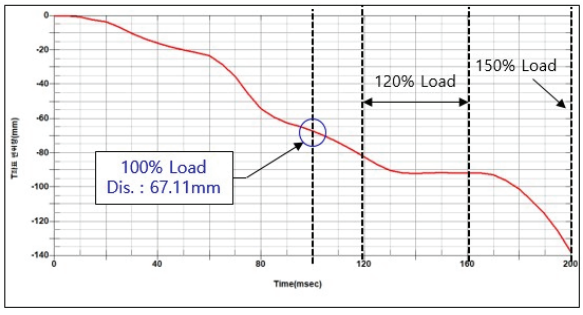

Fig. 8 Secondary optimization FEA results

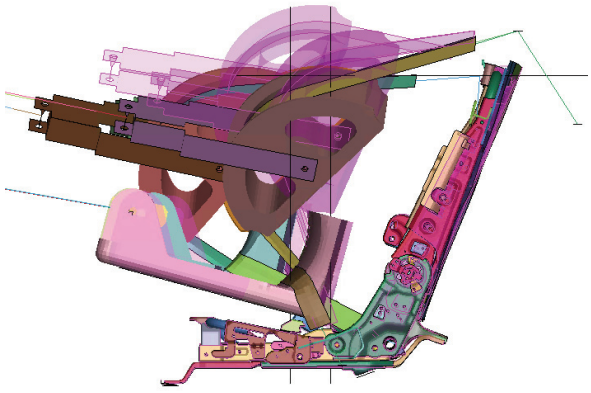

Fig. 9 Secondary optimization FEA results on 100 msec

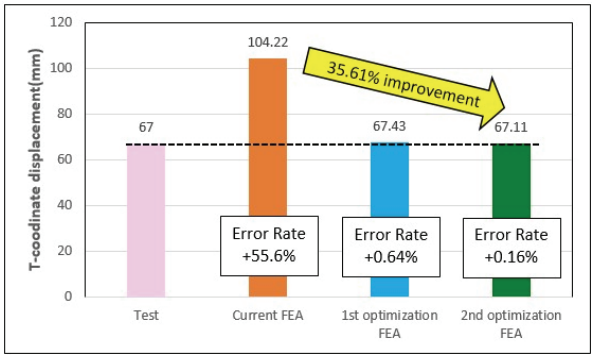

Fig. 10 Test & FEA results of seatbelt anchorage strength

5. 결 론

본 논문에서는 동적 외연적 유한 요소 프로그램인 LS-Dyna를 통해 자동차 시트벨트 앵커리지 강도 해석을 수행하였다.

시험 결과와 해석 결과의 오차율을 효율적으로 감소시키기 위해 다양한 통계 기법들을 활용하였고, 해석 결과에 영향을 미칠 것으로 예상되는 잠재 원인 변수들을 발굴하였다. 선정된 변수들은 AHP 기법을 활용하여 각각의 인자별 중요도를 파악하였고, 최적화 해석 과정에서는 앞서 선정된 인자 수준과 경험치를 바탕으로 실험계획법을 수행하여 최적의 인자 수준을 선정하였다. 해석 결과는 Fig. 10과 같이 최초 현수준 해석 결과 104.22 mm에서 마지막 2차 최적화 해석 67.11 mm로 -35.61 % 개선 효과를 도출하였고, 이는 시험 결과 대비 오차율 +0.16 %로 시험 결과와 동등 수준의 해석 결과를 얻게 되었다.

본 논문을 통해 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

1) 주요 인자들이 해석 결과에 미치는 영향도와 반응 정도를 통계 기법을 활용하여 효율적으로 검증하게 되었고, 최적화 해석을 통해 주요 인자들의 최적 수준을 선정하여 해석 결과의 신뢰성을 향상시켰다.
2) 본 논문을 통해 자동차 시트벨트 앵커리지 해석의 당사 표준화를 적립할 수 있게 되었고, 타차종 수평 전개를 통해 시간 단축 효과 및 향후 차종별 해석 결과의 일관성을 확보하게 되었다.

References

1) 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.
2) National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Seat Belt Assembly Anchorage Test, FMVSS No.210, 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, C. K. Cho, B. Y. Choi and H. J. Kim, “Quasi-Static of Vehicle Seatbelt Anchorage and Improvement of Test Correlation,” KSAE Fall Conference Proceedings, pp.1113-1118, 2017.
6) LSTC Inc., LS-DYNA Keyword User’s Manual, Ver.971 R12.1.0, 2020.