

자동차 시트벨트의 과도응답 특성에 관한 연구

김창희*, 이석순**,#

(유)삼승, **경상대학교 기계공학과

Transient Response Characteristics of Vehicle Seatbelt

Chang-Hee Kim*, Seok-Soon Lee**,#

*Samsung Industries Ltd,

**School of Mechanical and Aerospace Engineering, ERI, Gyeongsang National University

(Received 28 April 2020; received in revised form 04 June 2020; accepted 09 June 2020)

ABSTRACT

In recent years, as a consequence of the technological advancements in the automobile industry and changes in consumer demands, the reduction of noise inside vehicles rather than vehicle performance has increasingly become an important factor of interest. To date, most studies have focused on noise and vibration reduction techniques for the engine and drive system of vehicles. In this research, a comparative analysis for reducing the effect of vehicle seatbelts on the transient response is performed using the test of vehicle conditions and transient response analysis in accordance with seatbelt conditions. After the sensitivity analysis, the specifications for improvement were designed based on the transient response analysis. It was confirmed that the transient response characteristics were improved by the transient response analysis and vehicle conditions test. Through computer-aided engineering, the transient response characteristics of seatbelts were checked with less cost and time.

Key Words : Seatbelt(시트벨트), Vibration(진동), Nature Frequency(고유 진동수), Mode Shape(모드 형상), Transient Response Analysis(과도응답 해석)

1. 서 론

자동차 산업이 발전과 소비자의 요구 수준의 변화로 인하여 자동차의 성능보다는 자동차의 승차감(ride quality)과 실내소음(indoor noise)이 자동차 평가에 중요한 인자로 등장하고 있다^[1]. 이런 중요한 평가는 객관적이고 정량적인 방법과 주관적인 방법 모두 이용되고 있다. 객관적이고 정량적인 평가는 개발단계, 주관적인 평가는 양산단계에서

의 전문 기술자들에 의해 차량 단위에서 평가하고 있다. 실내소음의 근본적인 원인을 개발단계에서 개선하기 위해, 자동차의 진동과 소음에 관한 연구는 계속 진행되고 있으며, 이러한 현상을 평가하기 위한 측정기술과 해석방법의 개발이 요구되고 있다^[2]. 종래의 연구는 엔진과 구동에 관련된 것과 흡배기 계통, 노면과 차량의 주변 부품들에 대한 소음, 진동에 대한 저감기술은 많이 연구^[2-4]되어 있지만, 차량에 순간적인 충격으로 발생하는 소음 또는 진동, 즉 과도응답에 대한 것은 상대적으로 연구 진행이 거의 없는 실정이다^[3-4]. 이런 순간적인 충격으로 발생하는 진동이 차체를 통하

Corresponding Author : leess@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1622

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <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.

여 실내 부품에 전달될 때, 이 실내 부품의 진동 특성이 순간적인 충격에 발생하는 주파수와 일치하지 않도록 하기 위한 연구가 필요하다⁵⁾.

본 연구에서 차량 조건에서의 시트벨트의 과도응답에 대한 영향을 줄이는 것에 대하여 시트벨트 조건에 따라 차량 조건의 시험과 과도응답 해석을 이용하여 비교 분석을 진행하였다. 그리고 과도응답 해석을 이용하여 민감도 분석 후 개선 사양의 설계를 하였다. 이 개선된 사양에 대하여 과도응답 해석과 차량 조건의 시험을 통하여 과도응답 특성이 향상된 것을 확인할 수 있었고 해석을 이용하여 적은 비용과 시간으로 다양한 연구를 진행할 수 있는 것을 확인하였다.

2. 시험과 해석에 대한 정의

2.1 시트벨트의 진동 시험

차량의 개발단계에서 거친 도로 주행 등의 시험 시 주관적인 평가 중, 시트벨트에서 승객이 인지할 정도의 소음이 관찰되었다. 이를 대변하기 위해 시험실에서의 객관적인 측정지표를 Fig. 1과 같은 장비를 통하여 개발하였으며, 시트벨트에 대한 허용기준(노이즈 레벨 외)도 확립하였다. 하지만 도로 주행을 제외한 상황에 대한 평가는 아직 구체적으로 검토되고 있지 않은 실정이다.

2.2 과도응답 정의

구조물에 순간적으로 외부 하중이 가해지면 구조물은 심하게 진동하다가 시간이 어느 정도 지나면

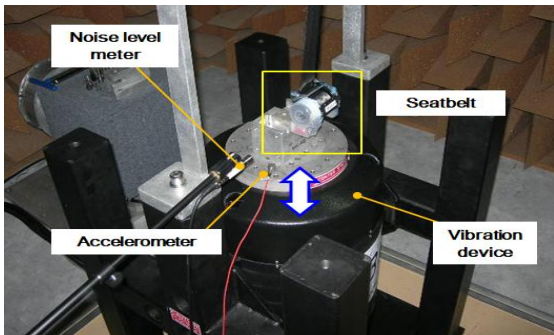


Fig. 1 Test equipment for vibration noise

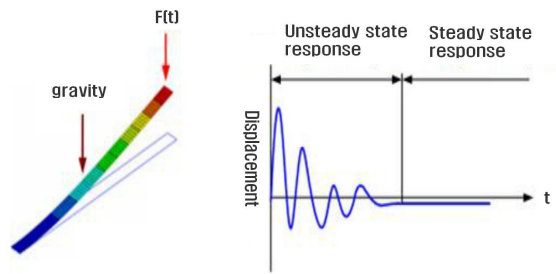


Fig. 2 Transient response of a cantilever beam

안정한 상태가 된다. 이처럼 구조물이 외부로부터 갑작스러운 외부 하중을 받으면 물체는 초기에 진동이 심하게 발생하여 불안정한 상태에 놓인다. 이처럼 짧은 시간 동안에 구조물의 거동이 나타나는 것을 과도응답(transient response)이라고 부른다.

과도응답 이후에 구조물은 안정한 상태에 이르게 되고 어느 값에 수렴하는 상태인 정상상태 응답에 이르게 된다. 반면에 과도응답 상태일 때 이러한 과도응답을 비정상상태 응답이라고 말한다. Fig. 2에서 시간 t의 값이 커지면 전체 해의 첫 번째 항이 영으로 접근하고 두 번째 항에 영향을 받는다. 이러한 불안정한 과도응답의 원인은 갑작스럽게 외부 하중을 받은 구조물이 구조물 내부의 관성력과 복원력이 순간적으로 평형이 되지 않아 불안정한 상태에 놓이게 된 것이다. 과도응답은 외부 하중의 크기, 구조물에 가해지는 시간, 구조물의 형상에 영향을 많이 받는다⁶⁾.

2.3 시험과 해석에 대한 시트벨트 조건

과도응답에 대하여 시트벨트 조건에 따라 응답 특성을 확인하기 위해 현재의 시트벨트 조건(Type A)과 개선된 시트벨트 조건(Type B)으로 구분하였으며, 연결 부착구가 없는 조건과 연결 부착구가

Table 1 Matrix of test and CAE

Test	CAE	Type	Attachment	Damping
T1	C1	A	X	X
T2	C2	A	O	X
T2-1	-	A	O	O
T3	C3	B	X	X
T4	C4	B	O	X

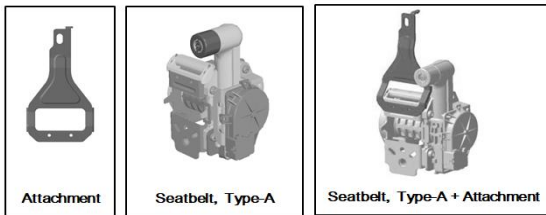
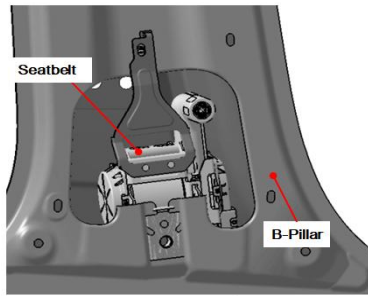


Fig. 3 Definition of specifications for seatbelt

있는 조건, 그리고 댐핑 효과를 추가한 조건으로 Table 1, Fig. 3과 같이 시험, 해석에 대하여 시트벨트 조건을 정의하였다.

3. 시험을 통한 문제 원인 분석

3.1 차량 조건에서의 시험 정의

차량 조건에서의 시험은 Fig. 4와 같이 크게 구조물(차량), 컴퓨터 및 분석 프로그램, 가속도계로 구성되어 진다. 그리고 가속도계는 도어 닫힘 시 가속이 발생하는 방향, 즉 측정하고자 하는 방

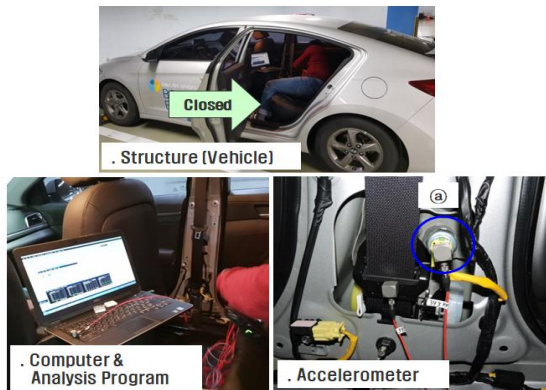


Fig. 4 Test equipment of vibration

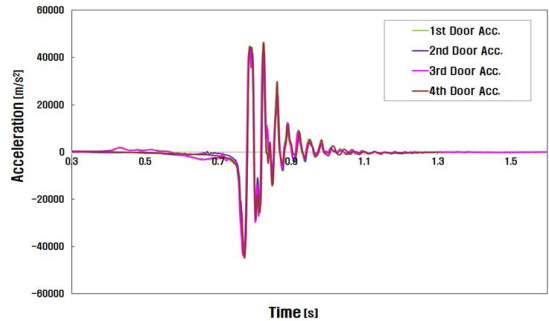


Fig. 5 Result of door impact (frequency domain)

향과 가속도계의 주 감도축이 일치하도록 부착하고 가속도를 측정하고자 하는 좌석의 도어를 일정한 힘으로 닫은 후 시간 변화에 따른 가속도 데이터 취득하였다. 데이터 취득 위치는 가속도 변화가 가장 큰, 상단(㉔)으로 하였다.

차량 조건의 시험에서 순간적인 외부 하중은 도어 닫음에 의한 충격으로 정의하였고 이 시험에서 취득한 가속도를 반복 측정하여 FFT (Fast Fourier Transform)를 통하여 주파수 도메인으로 변환하여 분석한 결과, 최대 크기가 같은 주파수 영역에서 발생하는 것을 Fig. 5와 같이 확인하였다.

3.2 차량 조건에서의 재현 시험결과

Fig. 6은 연결 부착구가 없는 T1과 연결 부착구가 있는 T2에 대한 시험결과를 시간 도메인으로 비교한 것이다. 연결 부착구가 있는 T2의 경우, 1s 이후 점차 진폭이 작아지면서 1.5s 이후부터는 완전히 감쇠되는 것을 확인할 수 있었다. 댐핑 효과를 추가한 T2-1의 경우, 전체적인 진폭이 작으며 1s 이후 점차 진폭이 작아지면서 1.2s 이후부터는 완전히 감쇠되는 것을 확인할 수 있었다.

시험결과를 효과적으로 분석하기 위하여 FFT를 이용하여 충격에 대한 주파수 응답을 확인할 수 있었다. 시간 도메인에서 시간에 따른 감쇠 효과는 확인할 수 있었지만, 주파수 도메인에서는 주파수 응답의 크기를 통하여 효과를 분석할 수 있었다. Fig. 7은 도어의 닫힘에 의한 충격이 30Hz, 연결 부착구가 없는 T1이 36Hz, 연결 부착구가 있는 T2이 54Hz에 응답하는 것을 확인할 수 있었다. 댐핑 효과를 추가한 T2-1은 51Hz로 연결 부

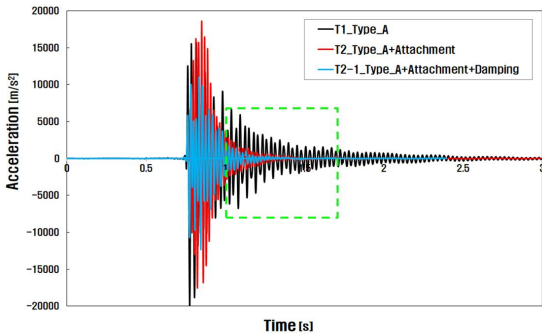


Fig. 6 Test result of type-A (time domain)

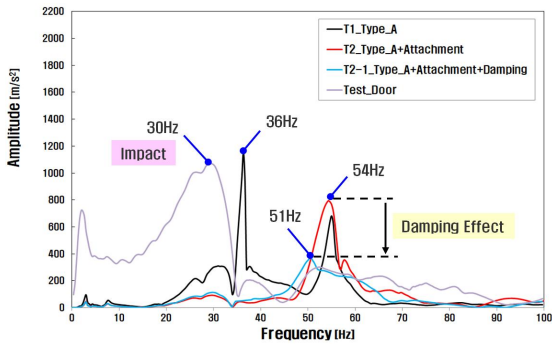


Fig. 7 Test result of type-A (frequency domain)

구가 있는 T2와 거의 같은 주파수 응답이지만 진폭이 0.5배 수준인 것을 확인할 수 있었다. 이 결과로 댐핑 효과를 추가한 T2-1은 연결 부착구가 있는 T1 대비 응답하는 주파수 값은 거의 같지만 진폭이 작아, 도어의 닫힘에 의한 충격으로부터 영향이 작은 것으로 확인되었다.

4. 고찰

4.1 과도응답해석

과도응답해석(Transient Response Analysis)을 위해 시트벨트는 40여 개의 부품을 유한요소모델로 구성하였고 차체는 해석의 간소화를 위해 필라부의 일부만 사용하였고 Fig. 8과 같이 해석 조건을 구성하였다. 외력은 시험의 도어 충격 가속도를 사용하였고 시험과 해석의 상관성 비교 분석을 Fig. 9와 같이 진행하여 해석 신뢰성을 확보하였다.

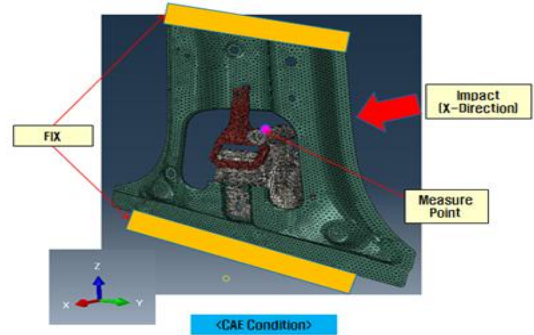


Fig. 8 Boundary condition for CAE

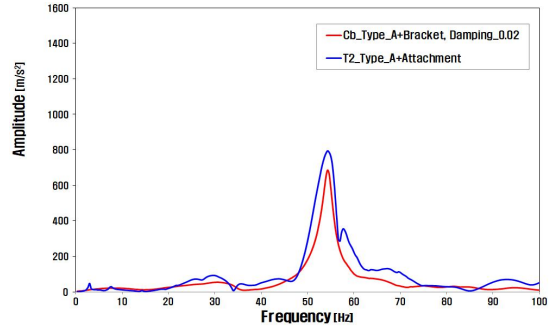


Fig. 9 Comparison of result between test and CAE

4.2 고유 진동수에 대한 영향도 고찰

모달 해석(Modal Analysis)를 통하여 연결 부착구가 없는 조건, 연결 부착구가 있는 조건의 고유 진동수를 Fig. 10과 같이 확인하였다. 1차 고유 진동수는 연결 부착구가 없는 조건이 60Hz, 연결 부착구가 있는 조건이 80Hz로 20Hz가 상승한 것을

Type	Without Attachment	With Attachment
Mode		
Shape		
Frequency	60.1Hz	80Hz
Direction Of Shape	X-axis (Rotation of Y-axis)	X-axis (Rotation of Y-axis)

Fig. 10 Result of natural frequency by type A

확인하였다. 이 결과, 연결 부착구가 있는 조건이 고유 진동수가 더 높으므로 구조적으로 강성이 증대되었다는 것을 추정할 수 있었고 모드 형상은 X축 방향으로 두 조건 모두 같은 것을 확인하였다. X축 방향은 제3장에서 도어 닫힘 시 충격 방향과 같으므로 공진이 발생할 수 있으며, 리트랙터의 고유 진동수는 도어 닫힘 시 충격에 의한 입력 주파수(30Hz)이므로 공진을 회피하기 위해 이의 3배인 90Hz 정도가 되어야 한다⁷⁾. 공진을 회피하기 위해 리트랙터 및 연결 부착구의 고유 진동수를 증대하는 방안을 연구해야 한다.

4.3 과도응답에 대한 민감도 고찰

리트랙터 설계인자 변화에 따른 과도응답의 민감도를 고찰하기 위해 Fig. 11과 같이 간소화하여 과도응답 해석을 진행하였다. 설계 인자는 질량, 질량 중심 X, Y, Z값이며, 해석 결과를 통하여 설계 인자에 대한 민감도 분석을 진행하였다. 그 결과, Fig 11, Fig 12와 같이 과도응답에 대하여 질량 중심의 Z값이 가장 민감도가 높았고 질량 중심의 Z값(2.57) > 질량 중심 X값(0.28) > 질량(0.24) > 질량 중심 Y값(0.16) 순으로 확인하였다. 질량 중심의 Z값이 클수록 질량 관성 모멘트(Mass moment of Inertia)가 커지는 것을 Fig. 13과 식(1)에 의해 알 수 있으며 이로 인하여 고유 진동수가 낮아지는 것도 추정할 수 있었고 이를 근거로 개선 설계를 진행하였다.

$$I_{yy} = I_{cm,yy} + md^2 \quad (1)$$

	Factor-1	Factor-2	Factor-3	Factor-4
Design Factors	Mass	X Value about Center of mass	Y Value about Center of mass	Z Value about Center of mass
Image				
Change Point	Mass Density	Mass Shape		Mass Position
Sensitivity	0.24	0.28	0.16	2.57

Fig. 11 Design factors for sensitivity analysis

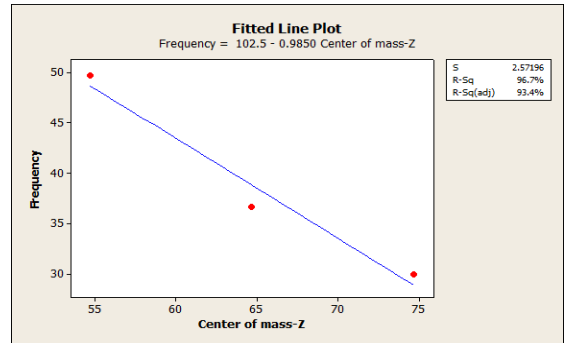


Fig. 12 Sensitivity analysis for design factors

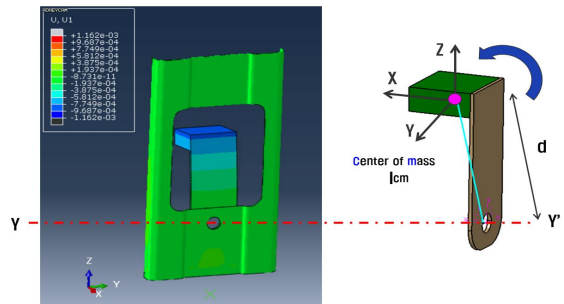


Fig. 13 Result of mode analysis

5. 개선 설계에 대한 검증

5.1 모드 해석을 통한 검증

모달 해석을 통하여 개선 사양인 Type-B에서의 연결 부착구가 없는 조건, 연결 부착구가 있는 조건의 고유 진동수를 Fig. 14와 같이 확인하였다. 1차 고유 진동수는 연결 부착구가 없는 조건이 70Hz, 연결 부착구가 있는 조건이 96Hz로 26Hz가 상승한 것을 확인하였다.

Type-A와 비교하면 1차 고유 진동수는 연결 부착구가 없는 조건에서는 10Hz, 연결 부착구가 있는 조건에서는 16Hz가 상승한 것을 확인하였다. 이 결과, Type-B가 Type-B보다 고유 진동수가 더 높으므로 구조적으로 강성이 증대되었다는 것을 추정할 수 있다. Type-B 조건에서의 연결 부착구가 없는 조건, 연결 부착구가 있는 조건의 모드 형상은 X축 방향, Y축 방향으로 다른 것을 확인하였다. Type-A와 비교하면 연결 부착구가 있는

Type	Without Attachment	
Mode	Type-A	Type-B
Shape		
Frequency	60.1Hz	70Hz
Direction Of Shape	X-axis (Rotation of Y-axis)	X-axis (Rotation of Y-axis)

(a) 1st mode analysis (without attachment)

Type	With Attachment	
Mode	Type-A	Type-B
Shape		
Frequency	80Hz	96Hz
Direction Of Shape	X-axis (Rotation of Y-axis)	Y-axis (Rotation of Z-axis)

(b) 1st mode analysis (with attachment)

Fig. 14 result comparison of natural frequency

조건의 모드 형상이 X축에서 Y축 방향으로 변경된 것을 확인할 수 있다. 이로 인하여 도어 닫힘시 충격 방향(X축)과 입력 주파수(30Hz)에 대하여 모드 형상은 Y축으로 다르며 고유 진동수도 96Hz로 3배 이상으로 공진에 안전하다고 할 수 있다.

5.2 해석 및 차량 조건의 시험 검증

Fig. 15와 같이 Type-A, Type-B의 연결 부착구가 없는 조건(C1, C3)과 연결 부착구가 있는 조건(C2, C4)에 대한 해석 결과를 주파수 도메인으로 모두 비교한 것이다.

Fig. 16은 해석과 동일하게 차량 조건에의 시험 결과이다. 도어의 닫힘에 의한 충격의 주파수 응답 크기는 $T1 < T2 = T2-1 < T3 < T4$ 순이며 진폭의 크기는 $T1 > T2 > T2-1 > T3 > T4$ 순으로 확인되었다.

이로써 Type-B의 T4가 도어의 닫힘에 의한 충격

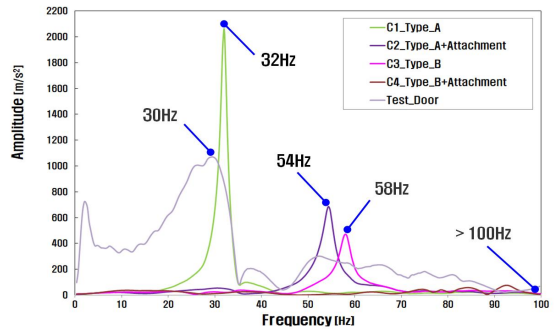


Fig. 15 Result comparison of CAE

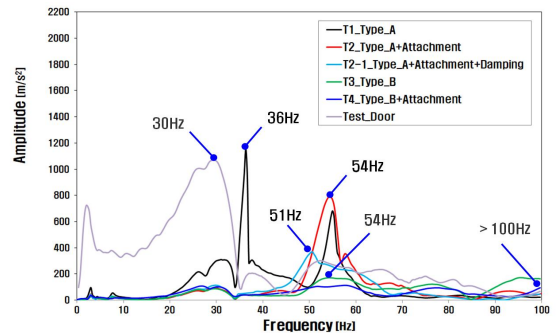


Fig. 16 Result comparison of test

의 과도응답이 가장 둔감하다고 할 수 있다. 그리고 차량 조건에서의 사람의 주관적인 평가에서 $T1 > T2$ 순으로 소음의 인지가 되었으며, $T2-1, T3, T4$ 의 경우에는 소음이 인지되지 않은 것으로 최종적으로 확인할 수 있었다.

결론적으로 Type-B가 Type-A 대비 과도응답 특성이 향상된 것을 확인할 수 있었다.

6. 결론

본 논문에서는 차량의 시트벨트가 외부의 순간적인 충격에 발생하는 진동, 즉 과도응답에 대하여 차량 조건의 시험으로 현 수준을 확인하였고 과도응답 해석과 상관성 분석을 진행하였다. 이를 토대로 과도응답 해석을 통하여 민감도 분석 후 개선 사양을 설계하였고 최종 개선되었음을 확인하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모드 해석을 통하여 개선 전, 후의 리트랙터에 대하여 고유 진동수가 10 Hz 이상 증대되었으며 모드 형상도 변경된 것을 확인하였다.
2. 과도응답 해석을 통하여 민감도 분석 후 개선 방향에 대하여 고찰하였으며 질량 중심의 Z값에 따라 과도응답의 변화가 가장 큰 것을 확인하였다.
3. 과도응답해석과 차량 조건의 시험을 통하여 최종 개선 사양인 T4가 입력 주파수(30 Hz) 대비 주파수 응답이 3배 이상 높아진 것을 확인하였다.
4. 추후 다양한 과도응답에 관한 연구를 통하여 시험실에서의 객관적인 측정지표, 시트벨트에 대한 허용 기준 확립에 노력할 것이다.
5. 또한, 과도응답 해석을 통하여 자동차 시트벨트 뿐만 아니라 다른 부품도 같은 방법으로 설계 개선 방향에 대한 고찰로 적은 비용과 시간으로 다양한 연구를 진행할 수 있을 것으로 예측된다.

- Korea, 2015.
5. Kim, C. H., "A Study on the Design Optimization of a Vehicle Seatbelt and Its Attachment by Considering the Weight and Stiffness," Thesis for a Doctorate, Gyeongsang National University, Republic of Korea, 2020.
6. Kang, G. Y., "FEM Transient Response Analysis of a Control Shaft Attached to a Tip Mass of Manual Transmission and Optimal Design of Variables for Vibration Reduction," Thesis for a master degree, Kyungpook National University, Republic of Korea, 2016.
7. Kim, C. S., Kim, D. I. and Heo, J. D., Hwang, J. D., "Vibration Reduction for a Local Operation Panel Mounted by Wire Rope Isolator," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13 No. 6, pp. 127-133, 2014.

후 기

“이 논문은 (유)삼송의 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. Shin, S. H., Jung, C. C. and Jung, S. S., "Experimental Evaluation of Buzz, Squeak and Rattle Noise of Vehicle Doors and Its Prevention," Transactions of KSNVE, Vol. 17, No. 12, pp. 1217-1222, 2007.
2. Lee, T. K. and Kim, B. S., "Modeling of Automobile Suspension System for Analyzing Automobile Vibration," Transactions of KSNVE, Vol. 15, No. 2, pp. 135-147, 2005.
3. Lee, K. I., Jun, Y. D. and Choi, D. S., "Evaluation of Vehicle Body Stiffness by Measuring Local Vibration," Transactions of KSAE, Vol. 21, No. 6, pp. 195-200, 2013.
4. Lee, W. H., "A Study on Vibration Characteristic of Vehicle Wheel," Thesis for the Degree of Master., Wonkwang University, Republic of