

자동차 가상충돌시험을 위한 고려사항

김경진* · 신재호*,† · 한경희*

Considerations for Virtual Vehicle Crash Test

Kyungjin Kim*, Jaeho Shin*,†, Kyeonghee Han*

Key Words: Virtual crash test(가상충돌시험), Finite element analysis(유한요소해석), Verification(검증), Validation(검정), Hourglass mode(체로 에너지 모드), Model trustworthy(모델 신뢰도)

ABSTRACT

Computer simulation significantly reduces the high costs associated with actual crash tests and is expanding due to its ability to analyze various test results quantitatively that are difficult to measure in real tests. Research on evaluation technologies is limited according to the finite element analysis, which aims to replace structural verification testing. In this study, considerations for virtual crash tests were derived, and the validity of the zero-energy mode (hourglass mode) was analyzed as part of the considerations for validating the results of vehicle crash simulations. The study reflects on the considerations for virtual crash tests and the variation in hourglass coefficient values affects the occurrence of the hourglass mode. As the hourglass coefficient changes, the maximum hourglass energy reaches over 5% of the maximum internal energy, necessitating a conservative review. A comprehensive study of the maximum hourglass energy is required, considering additional analysis results for various models and collision conditions.

1. 서론

컴퓨터 성능의 발전과 더불어 유한요소법 등의 수치 해석적 방법을 활용한 가상 시뮬레이션 기법이 항공, 원자력, 방위, 자동차 산업 등에 폭넓게 적용되고 있다. 특히 자동차 산업에서는 유한요소해석을 통한 차량의 시뮬레이션 결과를 새로운 자동차 부품 설계 및 신차 개발에 반영하는데 많은 노력을 집중해왔다.⁽¹⁻⁵⁾ 최근에는 산업계뿐만 아니라 여러 기관에서도 컴퓨터를 이용한 가상 시뮬레이션 방법을 통해 실제 자동차 성능평가 시험을 대체하여 충돌시험 및 안전도 평가에 적용하려는 연구가 다수 진행되고 있다.

컴퓨터를 이용한 가상 시뮬레이션은 실제 성능평가 시험에서 요구되는 고비용의 소요를 크게 감소시킬 수 있으

며, 실제 성능평가 시험에서 측정하기에 제한적인 자동차 충돌 시 발생하는 다양한 현상을 정량적으로 분석할 수 있다는 장점이 있다. 컴퓨터 시뮬레이션의 사용이 매우 광범위해지면서 최근에는 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 검증하기 위한 방법에 대한 연구가 수행되고 있다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 얻어진 결과의 유효성과 신뢰성을 검증하기 위해서는 시뮬레이션에 사용된 수치적인 모델의 타당성을 검증하는 것이 필수적이며, 특히 시뮬레이션 결과의 객관적인 절차에 따른 모델 검증과 유효성 확인(V&V, Verification and Validation)을 수행하는 것이 필요하다.⁽⁶⁾ V&V 과정에서 측정 가능한 정량화된 지표를 사용하여 시뮬레이션 모델을 평가한다면 산업 분야에서 뿐만 아니라 안전기준 인증을 담당하는 기관에서도 시뮬레이션 결과를 활용할 수 있다.⁽⁶⁾ 미국 기계공학회(ASME, American Society of Mechanical Engineers)는 ASME V&V 10-2006에서 컴퓨터 시뮬레이션의 결과를 검증하

* 경일대학교 스마트디자인공학부, 교수

†교신저자, E-mail: jhshin@kiu.kr

기 위한 “Verification”과 “Validation”의 의미를 정의하고 특정 산업 분야에서 적용된 컴퓨터 시뮬레이션 결과의 검증 절차에 대한 배경을 설정하였다.⁽⁷⁾ ASME V&V 10-2006에 따르면 Verification은 수치 모델이 기본적인 수학적 모델에 대한 솔루션(solution)을 정확하게 표현할 수 있는지 확인하는 프로세스이며, Validation은 수치 모델이 적용되는 분야에서 의도된 실제 현상을 얼마나 정확하게 표현하는지를 결정하는 프로세스로 정의된다.⁽⁷⁾

또한, 해외 정부 기관들에서는 엔지니어링 분야에서 새로운 디자인의 평가를 위해 가상 시뮬레이션을 적극적으로 도입하고 있다. 미국 연방항공청(Federal Aviation Administration, FAA)은 유한요소해석의 결과만으로 항공기 좌석의 설계와 안전기준의 승인을 할 수 있도록 허용하고 있고, 엔진터빈과 조류의 충돌을 컴퓨터 시뮬레이션하기 위해 FAA의 해석방법이 연구되었다.⁽⁸⁾

한편 유럽 철도차량의 충돌안전도 표준은 새로운 철도 차량의 승인 과정에서 컴퓨터 시뮬레이션을 사용할 수 있도록 허용하고 있다.⁽⁹⁾ NCHRP(National Cooperative Highway Research Program)는 도로변 안전 구조물의 설계와 인증에 대해 차량과 도로변 안전 구조물의 충돌 시뮬레이션을 적용하는 구체적인 절차를 개발하였다.⁽¹⁰⁾ NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration)는 EDAG사와 협력하여 자동차 내부와 탑승자 안전 시스템을 포함한 전체 차량의 유한요소모델을 개발하여 안전성을 평가하였다.⁽¹¹⁾ 또한 미국 해군(U.S. Navy)에서는 폭발 하중을 받는 선박을 설계하기 위해 LS-DYNA를 사용한 유한요소해석을 통해 수중폭발에서의 선박 구조의 반응을 측정하였다.⁽¹²⁾

유한요소 해석기술 기반의 구조물 검증평가 연구 및 성능평가시험을 대체하는 평가기술연구가 진행되고 있으나 유한요소 모델 및 해석결과의 유효성과 신뢰성 분석의 연구는 제한적으로 수행되고 있어 본 논문에서는 가상충돌시험의 고려사항을 도출하고 자동차 충돌 시뮬레이션의 결과를 검증하기 위한 고려사항 중 제로 에너지 모드(zero energy mode, hourglass mode)의 타당성을 분석하고 가상충돌시험의 고려사항을 고찰하였다.

2. 가상충돌시험의 고려사항

최근에는 다양한 수치 해석기법의 발달로 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션에 다양한 수학적 시뮬레이션 방법이 도입되고 있지만, 본 연구에서는 현재까지 자동차 충돌 시뮬레이션에 가장 널리 적용되고 있는 유한요소법 기반의 가상충돌시험법에 대해서 고려하였다. 보다 정확하고 신뢰

할 수 있는 유한요소해석의 결과를 얻기 위해서는 유한요소모델에 사용되는 요소의 특성, 소재의 모델, 에너지 및 운동량 보존과 같은 기본 물리적 법칙의 만족 여부, 최소 시간 증분, 최대 요소 크기, 구성 요소들의 연결 등의 유한요소 모델의 특성을 검토해야 한다.⁽¹³⁾

컴퓨터 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 검증하기 위해서는 객관적이고 정량적인 평가지표가 요구된다. 시뮬레이션 모델에 적용되는 요소의 특성, 물성 모델, 구성 요소의 연결 방법 등은 유한요소모델을 구성하는 방법에 따라 무한하게 확장될 수 있으므로 재료 또는 구성 요소의 연결 방법 등에 대한 평가 지표를 개발하는 것은 효과적인 방법이 될 수 없다.⁽¹³⁾ 따라서 다양한 문헌 등의 검토로 시뮬레이션 결과의 정량적인 평가 지표를 개발할 수 있는 파라미터는 다음과 같이 정리될 수 있다.

- (1) 요소망의 품질(Quality of Mesh)
- (2) 에너지 밸런스(Energy Balance)
- (3) 질량 스케일링(Mass Scaling)

2.1. 요소망의 품질(Quality of Mesh)

유한요소법에 기반을 둔 가상 시뮬레이션의 정확도는 요소망의 품질에 좌우되며 시뮬레이션 결과의 수렴과도 연관된다. 일반적으로 요소의 크기가 작을수록, 요소의 차수가 높을수록 시뮬레이션 모델의 형상이 정확히 표현된다. 요소망 밀도의 변화가 충분하지 않거나 뒤뜰린 요소가 존재한다면 결과의 오류를 초래할 수 있다.⁽¹⁴⁾ 시뮬레이션에 사용된 유한요소망의 품질을 검증하기 위해 요소 왜곡(Warpage), 요소 종횡비(Aspect ratio), 요소 비틀림(Twist) 등을 평가 지표로서 설정할 수 있다. 대부분의 유

Table 1 Criteria of element qualities

Parameters	Range
Aspect ratio	< 5.0
Warpage	< 30.0
Max. angle of 4 node element	< 150°
Min. angle of 4 node element	> 30°
Max. angle of 3 node element	< 140°
Min. angle of 3 node element	> 15°
Skew	< 60°
Jacobian	> 0.4
% of 3 node elements	< 5.0

한요소해석 전처리기(Pre-processor)에서는 이러한 요소 품질 항목의 값이 자동으로 계산된다. 저자의 선행 연구에서 도출한 요소 품질의 주요 파라미터와 범위는 Table 1과 같다.⁽¹⁵⁾

2.2. 에너지 밸런스(Energy Balance)

유한요소해석을 수행하면서 시뮬레이션 모델의 총 에너지는 일정하게 유지되어야 한다. 시뮬레이션 모델의 초기의 총 에너지, 운동 에너지 및 내부 에너지의 값과 시뮬레이션이 종료된 후 각각의 에너지의 값을 비교하여 에너지 종류별 변화를 확인하는 것이 필요하다. 이상적으로는 총 에너지의 변화가 없어야 하지만, 실제 시뮬레이션 과정에서는 접촉, 마찰 등의 영향과 수치적인 계산의 특성으로 총 에너지가 달라질 수 있다.

또한 유한요소해석에서 계산되는 적분 점의 개수를 제한하여, 효율적인 계산을 위해 사용되는 Reduced integration element에서는 시뮬레이션이 진행되면서 모든 적분 점에서 변형이 0이 되는 제로 에너지 모드가 발생할 수 있다. 제로 에너지 모드에서는 요소가 저항 없이 변형이 발생하기 때문에 잘못된 결과와 수치적 불안정성을 초래하는 경우가 많다. 이를 방지하기 위해 일반적으로 가상의 힘(hourglass force)을 요소의 절점에 적용하는데, 이는 실제로는 존재하지 않는 비물리적인 힘이므로 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 가상의 힘으로 인한 내부 에너지가 가능한 최소가 되어 총 에너지의 증가를 줄이고 에너지 밸런스가 유지되어야 한다.

2.3. 질량 스케일링(Mass Scaling)

질량 스케일링은 시뮬레이션의 수치적인 안정성을 향상시키거나 과도해석에서 명시적 시간 적분(Explicit time integration)을 사용할 때 해석 시간을 유지하기 위해 적용된다. 명시적 시간 적분 방법은 자동차 충돌해석에 가장 널리 사용되는 방법으로 시뮬레이션 결과의 안전성이 시간 증분(time step)에 따라 달라지기 때문에 효율적인 시뮬레이션을 위해서는 일정한 시간 증분을 유지하는 것이 적절하다. 안정적인 시뮬레이션을 위한 시간 증분을 유지하기 위해 요소의 질량을 증가시키는 질량 스케일링이라는 기법이 주로 사용된다. 하지만 질량 스케일링은 가상적으로 질량을 시뮬레이션 모델에 추가하는 것이기 때문에 적절히 사용되지 않으면 잘못된 시뮬레이션 결과가 계산될 수 있다. 따라서 시뮬레이션의 결과를 검증하기 위해서

는 시뮬레이션이 수행 중 어느 정도의 질량이 추가되는 것을 허용할 것인가에 대한 판단이 필요하다.

3. 해외 가상충돌시험 검증조건

2019년 EURO NCAP은 VTC(Virtual Testing Crashworthiness) 워킹그룹을 조직하고 가상 충돌 테스트 및 평가 절차를 개발하는 연구를 본격화하였다.⁽¹⁶⁾ VTC 워킹 그룹의 첫번째 케이스로 far-side 탑승자 평가를 선정하고, 가상 충돌 시뮬레이션의 신뢰성을 검증하기 위한 절차를 소개하였다.⁽¹⁶⁾ EURO NCAP에서 제안한 가상 충돌 시뮬레이션의 검증 절차를 Fig. 1에 나타내었다.

또한 EURO NCAP에서 제안하는 가상충돌시험결과와 신뢰성을 확보하기 위한 시뮬레이션 모델과 해석결과와 주요 조건은 다음과 같다.⁽¹⁷⁾

- 시뮬레이션의 종료 후 계산된 Max. Hourglass Energy는 최대 내부에너지의 10% 미만이어야 함.
- 더미모델의 Max. Hourglass Energy는 더미모델의

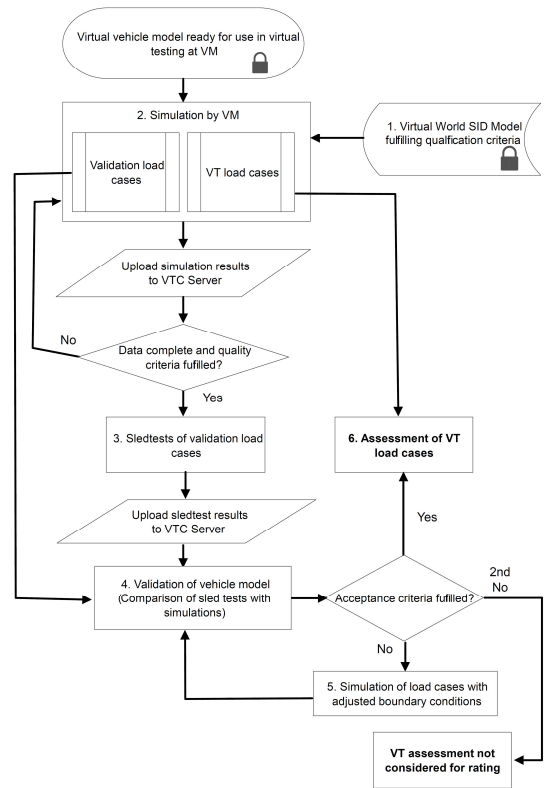


Fig. 1 Overview of the virtual testing procedure⁽¹⁷⁾

최대 내부 에너지의 10% 미만이어야 함.

- 전체 모델에 적용된 질량 스케일링으로 인해 추가된 최대 질량은 시뮬레이션 초기의 전체 모델 질량의 5% 미만이어야 함.
- 시뮬레이션의 첫 5 ms에 기록된 10 mm 미만의 더미 H-포인트 z-변위가 계산되어야 함.
- 시뮬레이션의 총 계산 시간은 최대 머리 y 변위 이후 20%의 시간을 초과해야 함.

C-NCAP에서도 EURO NCAP과 유사하게 위치 이탈 탑승자(Out of position occupant)의 수동/능동 보호에 대한 가상충돌시험의 검증 절차를 개발하였고 가상충돌시험 모델의 신뢰성 검증 조건을 제안하였다.⁽¹⁸⁾ EURO NCAP과 C-NCAP의 시뮬레이션 모델의 검증 항목으로 Hourglass energy와 질량 스케일링을 선정하고 매우 유사한 조건을 제시하고 있다. 본 연구에서는 위의 조건들 중에서 Hourglass energy가 전체적인 해석 결과에 미치는 영향을 분석하고 EURO NCAP과 C-NCAP에서의 Hourglass energy 조건의 타당성에 대해서 검증하였다.

4. Hourglass energy 계산 및 검증

4.1. 해석모델의 구성

본 연구에서는 자동차 충돌시뮬레이션에서 발생하는 제로 에너지 모드로 계산된 Hourglass energy의 크기를 분석하기 위해서 승용자동차 유한요소모델에 정면충돌시험 조건을 적용하여 충돌해석을 수행하고 Hourglass energy 값과 내부 에너지 값을 비교하였다. 승용자동차 유한요소 모델은 미국 도로교통안전국(NHTSA)에서 제공하는 모델로 승용자동차 모델의 형상은 Fig. 2와 같다.⁽¹⁹⁾ 승용자동차 유한요소모델은 주요 차체 및 서스펜션과 조향시스템을 포함하는 새시 모델로 구성되었고 실차의 무게와 무게 중심점 등을 비교하여 모델의 적합성을 확보하였다.⁽¹⁹⁾ 승용자동차 유한요소모델의 절점 및 요소 개수 등의 상세

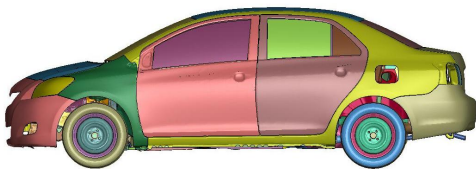


Fig. 2 Vehicle FE model of frontal impact simulation

Table 2 Vehicle FE model information

Specification	Values
No. of nodes	1,480,590
No. of elements	1,514,143
No. of parts	922
Total weight (kg)	1,263
Termination time (sec)	0.2

한 정보는 Table 2와 같다. 승용자동차 유한요소모델은 US-NCAP 정면충돌, Offset 충돌, Centerline Pole 충돌 등의 시험조건을 적용하여 각각의 충돌해석결과는 시험결과와 비교 및 검증되었다.⁽¹⁹⁾ 승용자동차 유한요소모델의 변형 형태와 시간에 따른 주요 차체부위(Left and right seat mounts, engine top and bottom)의 가속도, 고정벽의 반력 등을 검증프로그램(The Roadside Safety Verification and Validation Program, RSVVP)에 적용하여 유한요소 모델이 평가되었다.⁽¹⁹⁾

4.2. 해석결과 분석 및 비교

승용자동차 유한요소모델의 정면충돌해석을 수행하여 총 에너지, 내부 에너지, 운동 에너지, Hourglass energy 등을 추출하여 각각의 에너지 값을 비교하였다. 본 연구의 충돌 시뮬레이션은 LS-DYNA 충돌해석 전용 프로그램이 사용되었고 계산 시간은 약 6시간(8 CPUs)이 소요되었다. US-NCAP 정면충돌조건인 초기 속도가 적용된 승용자동차 모델이 고정벽 모델에 충돌 시 시간에 따른 승용자동차 모델의 변형모습은 Fig. 3과 같다. 승용자동차 엔진룸 부위의 대변형과 차량의 뒷부분이 지면보다 상승하는 차량의 피칭모드가 계산되었고 약 120 msec 까지 차량 전면부의 변형이 진행되는 것으로 나타났다. 승용자동차 모델의 시간에 따른 총 에너지, 내부 에너지, 운동 에너지, Hourglass energy 등의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 시간에 따른 총 에너지의 변화는 1% 미만으로 미비했고 운동 에너지는 감소하고 내부 에너지는 증가하는 경향의 에너지 밸런스가 계산되었다.

충돌해석 시 발생하는 Hourglass mode에 영향을 미치는 Hourglass coefficient를 수정하여 추가 해석을 수행하고 Hourglass energy를 계산하였다. 본 연구에서 사용된 LS-DYNA 충돌해석 전용 프로그램의 Hourglass 제어 변수로 Hourglass coefficient를 선정하여 Hourglass coefficient 값을 0.07 에서 0.12 의 범위 내에서 0.01 씩 증가시킨

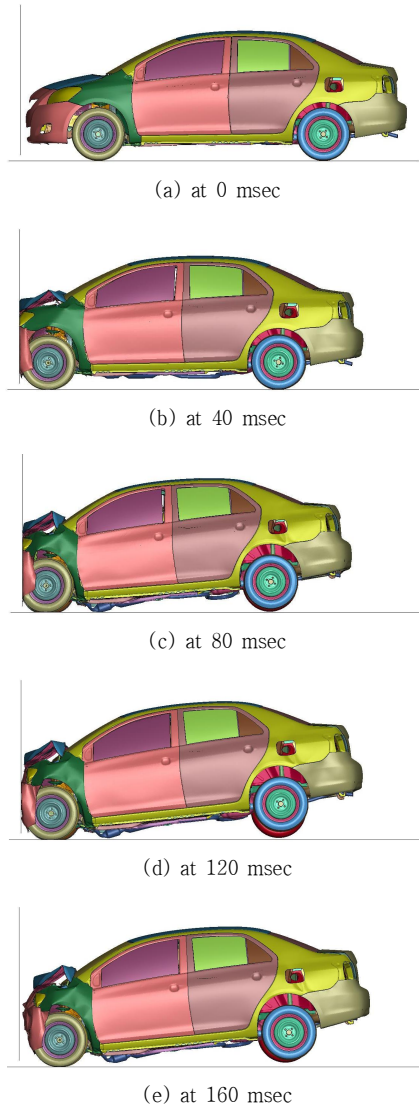


Fig. 3 Deformed shapes of frontal impact simulation

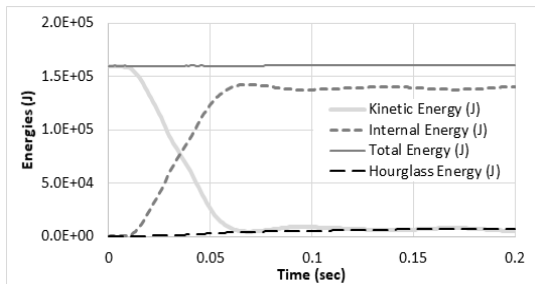


Fig. 4 Energy-time histories

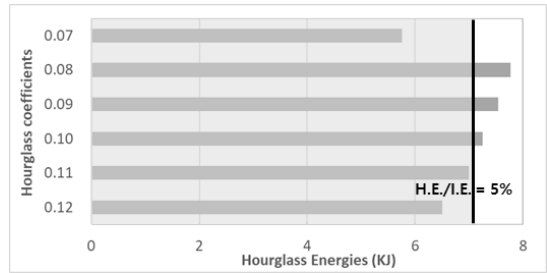


Fig. 5 Hourglass energy calculations according to various hourglass coefficients

coefficient 값을 적용한 총 6회의 정면충돌해석을 수행하였다. Hourglass coefficient 값의 변화에 따른 승용자동차 모델의 변형형태와 주요 차체부위의 가속도, 고정벽의 반력 등의 차이는 미비하였다. 그러나 조건별 Hourglass energy의 유의미한 변화가 계산되었고 Fig. 5에 나타내었다.

Hourglass coefficient, 0.07의 경우 최대 Hourglass energy와 최대 내부 에너지의 비율이 최소가 되었고 Hourglass coefficient에 따라 최대 Hourglass energy가 최대 내부 에너지의 5% 이상 되는 결과도 계산되었다.

5. 결론

컴퓨터 시뮬레이션은 실제 성능평가시험에서 요구되는 고비용의 소요를 크게 감소시킬 수 있으며, 실제 성능평가 시험에서 측정하기에 제한적인 다양한 현상을 정량적으로 분석할 수 있는 장점으로 적용범위가 확대되고 있다. 구조물 검증평가 연구 및 성능평가시험을 대체하는 유한 요소 해석기술 기반의 평가기술연구가 진행되고 있어 본 연구에서는 가상충돌시험의 고려사항을 도출하고 자동차 충돌 시뮬레이션의 결과를 검증하기 위한 고려사항 중 제로 에너지 모드의 타당성을 분석하여 가상충돌시험의 고려사항을 고찰하였다.

충돌해석 시 발생하는 Hourglass mode에 영향을 미치는 Hourglass coefficient 값의 변화에 따른 Hourglass coefficient에 따라 최대 Hourglass Energy가 최대 내부 에너지의 5% 이상 되는 결과가 계산되어 보수적인 검토가 요구되며 본 연구에서 검토된 Hourglass coefficient 중에서 0.07의 값이 적용된 해석결과에서 최대 Hourglass energy와 최대 내부 에너지의 비율이 최소가 되는 결과가 나타났다. 다양한 모델과 충돌조건에 따른 추가 해석결과로 최대 Hourglass energy의 종합적 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 ‘자율주행기술개발혁신사업, 주행 및 충돌상황 대응 안전성 평가기술 개발’의 연구 결과로서 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2021-KA160637).

참고문헌

- (1) Kim, H.Y., Kim, C., Bae, W.B., and Han, S.M., 2007, “Development of optimization technique of warm shrink fitting process for automotive transmission parts (3D FE analysis),” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187~188, pp. 458~462.
- (2) Chen, D. Y., Wang, L. M., Wang, C. Z., Yuan, L. K., Zhang, T. Y., and Zhang, Z. Z., 2015, “Finite element based improvement of a light truck design to optimize crashworthiness,” *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 16, No. 1, pp. 39~49.
- (3) Thacker, J. G., Reagan, S. W., Pelletiere, J. A., Pilkey, W. D., Crandall, J. R., and Sieveka, E. M., 1998, “Experiences During the Development of a Dynamic Crash Response Automobile Model,” *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 30, No. 4, pp. 279~295.
- (4) W. Pawlus, H. R. Karimi, and K. G. Robbersmyr, 2014, “Investigation of vehicle crash modeling techniques: theory and application,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 70, No. 5~8, pp. 965~993.
- (5) K.H., Han, J.H. Shin, K. J. Kim, Y. M. So, and S. W. Kim, 2021, “Study of Restraint System Computational Model and Occupant Behavior for Vehicle Occupant Protection,” *Journal of Automotive Safety Association*, Vol. 13, No. 4, pp. 99~105.
- (6) M. Mongiardini, M. Ray, R. Grzebieta, M. Bambach, 2013, “Verification and validation of models used in computer simulations of roadside barrier crashes,” *Proceedings of the 2013 Australasian Road Safety Research, Policing & Education Conference 28th-30th August, Brisbane, Queensland*.
- (7) American Society of Mechanical Engineers, 2006, “Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics,” <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/v-v-10-standard-verification-validation-computational-solid-mechanics>
- (8) Federal Aviation Administration, 2003, “Methodology for dynamic seat certification by analysis for use in parts 23, 25, 27 and 29 airplanes and rotorcraft,” *Advisory Circular No. 20-146*.
- (9) EN 15227, 2020, “Railway Applications- Crashworthiness Requirements for Railway Vehicles Bodies,” <https://standards.iteh.ai/atalog/standards/cen/f2ed3935-2f1c-496f-9356-0889a8a1f181/en-15227-2020>
- (10) NCHRP Report 179, 2010, “Verification and validation of models used in computer simulations of roadside barrier crashes,” <https://libraryarchives.metro.net/dpctl/benefit-assessment-districts-program/2010-Procedures-for-verification-and-validation-on.pdf>
- (11) NHTSA, Technical Report, 2018, “Vehicle Interior and Restraints Modeling Development of Full Vehicle Finite Element Model Including Vehicle Interior and Occupant Restraints Systems For Occupant Safety Analysis Using THOR Dummies,” https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/documents/812545_edagvehicleinteriorandrestraintsmodelingreport.pdf
- (12) J. M., Didoszak, Y. S., Shin, and D. H., Lewis, 2003, “Shock Trial Simulation for Naval Ships,” *Naval Postgraduate School, Monterey, CA*, <https://roadsafellc.com/NCHRP22-24/Literature/Papers/Metrics/Shock%20Trial%20Simulation%20for%20Naval%20Ships.pdf>
- (13) NCHRP, 2011, “Recommended Procedures for Verification and Validation of Computer Simulations used for Roadside Safety Applications,” *INTERIM REPORT*.
- (14) R. D., Cook, 1995, “Finite Element Modeling for Stress Analysis,” *John Wiley & Sons, Inc., New York*.

- (15) J. Shin, K. Kim, K. Han, J. In, H. Chang, S. Shim, and S. Kim, 2022, "Crashworthiness Evaluation of a Hydrogen Bus Fuel System," *International Journal of Automotive Technology*, 23(5), pp. 1483~1490.
- (16) Euro NCAP, 2023, "Virtual Far Side Simulation & Assessment Protocol Implementation 2024, Version 1.0," <https://cdn.euroncap.com/media/77243/euro-ncap-vtc-simulation-and-assessment-protocol-v10.pdf>.
- (17) C. Kiug, M. Schachner, I. Levallois, A. Eggers, U. Lobenwein, J. Galazka, N. Meissner, S. Gargallo, V. Pardede, C. Jimenez, B. Pipkorn, J. Kirch, J. Ellway, and M. Ratingen, 2023, "Euro NCAP Virtual Testing-Crashworthiness," *ESV 27th Conference*, Yokohama, Japan.
- (18) C-NCAP 管理规则, 2024, "附录 I - 主被动离位乘员保护虚拟测评规程 2024 年版".
- (19) D. Marzougui, R. R. Samaha, C. Cui, C. D. Kan, and K. S. Opiela, 2012, "Extended Validation of the Finite Element Model for the 2010 Toyota Yaris Passenger Sedan," *The National Crash Analysis Center Working Paper*, NCAC 2012-W-005.