

컴퓨터 시뮬레이션을 통한 충격흡수시설의 개발

Development of Crash Cushion by Computer Simulation

김동성* · 김기동** · 고만기***

Kim, Dong Sung · Kim, Kee Dong · Ko, Man Gi

Abstract

The development of crash cushions is finally completed by full-scale vehicle crash tests. Since the current development of crash cushions is achieved by numerous repeated full-scale vehicle crash tests based on empirical and irrational methods, it requires a great amount of costs. In this research, the more rational procedure based on prototype design by static tests and computer simulation is suggested and it can minimize the number of full-scale vehicle crash tests.

key words : Crash Cushion, Computer Simulation, Impact, Occupant Risk Indices, Crash Tests.

1. 서 론

교통사고 통계(경찰청, 2007)를 살펴보면 2006년의 경우 총 6,327명의 교통사고 사망자중 차량단독사고에 의한 사망자가 1,311명으로 전체의 20.7%를 차지하였으며 이중 공작물 충돌에 의한 사고가 46.8%로 가장 높게 나타났다. 차량의 공작물 충돌 사고로 인한 피해를 줄이기 위해 충격흡수시설이 설치되고 있으나, 기존의 충격흡수시설의 개발은 반복적으로 실물차량 충돌시험을 실시하는 경험에 의한 비합리적인 방법을 사용하기 때문에 막대한 개발 비용이 소요되고 이로 인한 제품 단가의 상승으로 충격흡수시설이 필요한 장소에 충분히 설치되지 못하는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 기존의 정형화되어 있지 않은 충격흡수시설의 개발 과정을 개선할 수 있도록 요소부재의 실험에 근거한 prototype의 설계와 3D 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 보다 합리적이고 경제적인 절차를 이용한 충격흡수시설의 개발 과정을 제시하고자 한다.

2. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 충격흡수시설의 개발

충격흡수시설은 설계단계에서 구조물의 역학적 특성과 탑승자의 안전도 확보라는 두 가지 상반된 기능을 만족시켜야 하며 차량이 충격흡수시설에 충돌하는 거동을 해석적 방법으로 명확히 파악하는 것은 상당히 어렵기 때문에 각 국의 관련기준(건설교통부, 2002; Ross 등, 1993; CEN, 1998)을 살펴보면 충격흡수시설의 최종적인 성능평가는 실물차량 충돌 시험결과를 이용하도록 되어있다. “도로안전시설 설치 및 관리지침”(이하 “지침”)에는 충격흡수시설에 대한 거동수준(performance level: CC1, CC2, CC3) 및 성능기준(THIV, PHD, 충격흡수시설의 거동, 충돌 후 차량거동)에 대하여 명시되어 있으나 설계방법, 사용재료, 에너지소산 메커니즘 등에 관한 세부적인 절차에 대해서는 언급되어 있지 않다. 따라서 일반적인 충격흡수시설의 개발과정은 거동수준을 결정하고 경험에 의해서 차량충돌에너지 소산 메커니즘을 결정하여 설계한 후 “지침”에서 요구하는 충돌시험 조건(정면, 정면1/4offset, 정면15°, 측면165°, 측면15°)에 대하여 성능기준을 만족할 때 까지 반복적인 실물차량 충돌시험을 실시하는 방법으로 이루어지기 때문에 초기 개발비용이 크게 소요된다.

본 연구에서는 그림 1에 나타나 있는 9단계의 개발 체계를 통하여 충격흡수시설 개발에 필요한 반복적인 실물차량 충돌시험을 최소한으로 줄일 수 있는 합리적인 개발 방법을 제시하고자 한다. CC2 등급의 충격흡수시설의 개발 과정을 순차적으로 살펴보면 다음과 같다. 충돌에너지는 1,300kgf의 차량이 80km/h의 속도로 정면충돌할 경

* 정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 · 박사과정 · E-mail : dskim93@kongju.ac.kr

** 정회원 · 공주대학교 건설환경공학부 · 교수

*** 비회원 · 공주대학교 건설환경공학부 · 교수

우에 320kJ로 산정된다. 충돌에너지 소산은 마찰, 변형, 파괴 등의 에너지 소산 메커니즘을 고려하여 이루어 질 수 있는데, 본 연구에서는 그림 2와 같은 측면충돌 시 가이드레일로 거동하는 중첩된 보의 마찰을 에너지 소산 메커니즘으로 결정하였다. 보 부재로는 가이드레일과 중앙분리대에 사용되고 있는 W형 과 Thrie형 단면 부재를 사용하였다. 중첩된 보 사이에 마찰을 발생시키기 위하여 볼트에 초기 인장력이 생기도록 너트에 일정한 크기의 토크를 가하였다. W형 단면 부재에는 20mm 직경의 고장력 볼트 2개 1조가 사용되었고 Thrie형 단면 부재에는 고장력 볼트 2개 2조가 사용되었다. 중첩된 보의 마찰을 이용하는 에너지 소산 시스템의 에너지 소산능력을 결정하기 위하여 정적실험을 수행한 결과가 그림 3에 나타나있다. 그림 3으로부터 토크별 Slip길이 0.1m에 대한 에너지를 산정하여 표 1에 나타내었다. 표 1로부터 에너지 소산에는 비효율적이지만 마찰력이 작기 때문에 탑승자 안전도에 유리하다고 여겨지는 토크 10kgf·m의 경우에 대하여, 그림 4(a)와 같이 충격흡수시설 좌·우측 상단에 Thrie형 단면 보를, 하단에 W형 단면 보를 설치하였을 경우 CC2급의 충돌에너지 320kJ를 소산시키기 위한 Slip길이는 2.35m이다. 산정된 2.35m의 Slip길이를 갖는 보를 사용하면 정면 충돌시 좌굴되거나 측면 충돌시 제 기능을 발휘하기 힘들기 때문에 그림 4(b)와 같이 Slip길이 0.6m를 갖는 4개의 모듈이 순차적으로 중첩되며 작동하는 모델을 Prototype으로 결정하였다. 이 시스템의 Slip길이가 2.4m이기 때문에 토크 10kgf·m에 대하여 에너지 소산능력이 326kJ이다. 이 값은 차량충돌 에너지 320kJ보다 크기 때문에 이 Prototype을 충격흡수시설 예비설계모델로 선정하였다.

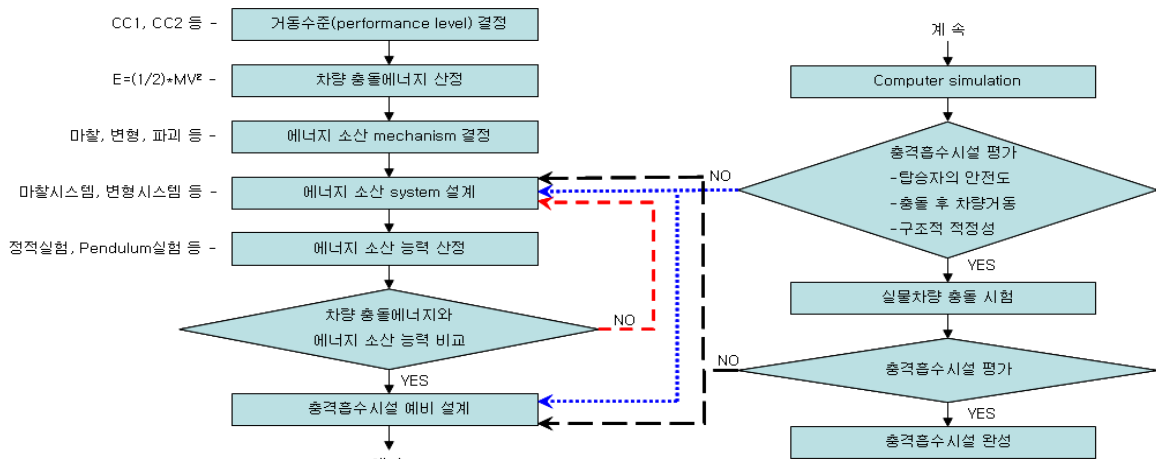


그림 1. 충격흡수시설 개발 체계도

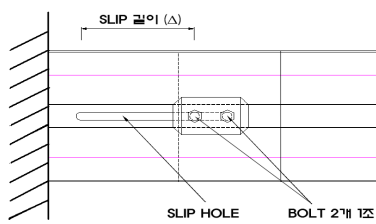


그림 2. 보의 마찰을 이용한 에너지 소산 메커니즘

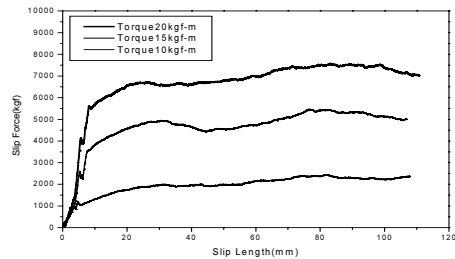


그림 3. W형 보의 마찰실험 결과

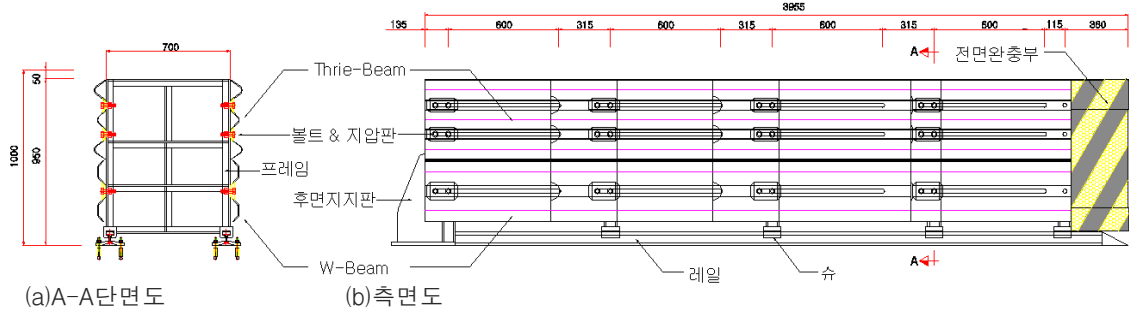


그림 4. Prototype 충격흡수시설

표 1. 토크별 마찰 소산 에너지

Torque 변위100mm	10kgf · m		15kgf · m		20kgf · m	
	W-Beam	Thrie-Beam	W-Beam	Thrie-Beam	W-Beam	Thrie-Beam
일 때 소산 Energy(kJ)	1.9	4.9	4.4	5.8	6.4	-

충격흡수 시설의 예비설계과정은 일반적으로 교량의 설계과정(등급결정, 하중산정, 형식비교, 단면가정, 구조해석, 설계기준 만족검토)과 비슷하다. 그러나 충격흡수시설의 경우 “지침”에 사용재료나 에너지 소산 메커니즘에 관한 구체적인 설계기준이 언급되어 있지 않기 때문에 예비설계과정에서도 실험에 의한 에너지 소산 성능 파악이 필요하게 된다. 또한 충격흡수시설은 여러 가지 충돌조건에 대한 성능기준까지 만족하여야 하기 때문에 부가적인 실물차량 충돌시험이 더 필요하게 된다. 실물차량 충돌시험에 앞서 여러 가지 충돌 조건에 대한 성능기준을 만족하는 충격흡수시설을 해석적인 방법으로 설계하기 위해서는 해석모델이 차량과 충격흡수시설간의 contact에 의한 상호작용 및 구조물의 대 변형과 복잡한 에너지 소산 메커니즘을 고려할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 3D 비선형 동적 해석 프로그램인 LS-DYNA를 이용한 시뮬레이션을 통하여 예비설계모델의 성능을 평가 하였다. 중첩된 보 사이의 마찰에 의한 에너지 소산 메커니즘을 모델하기 위하여 그림 5에 나타나 있는 스프링 요소에 초기 인장력을 가하였다. 스프링 초기 인장력의 크기는 그림 5의 해석모델의 에너지 소산능력이 그림 3의 정적실험 결과와 같도록 calibration하여 결정되었다. 보는 Shell요소, 볼트와 너트 그리고 프레임은 Solid요소로 모델하였고 전체해석모델은 그림 6과 같다. 차량모델은 ford taurus 모델 (NCAC, 2000)을 사용하였다.

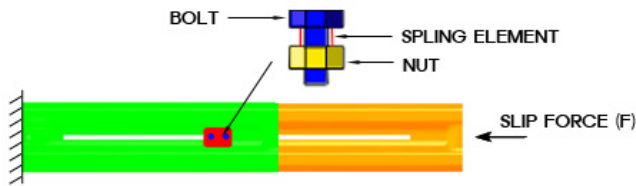


그림 5. 요소부재의 해석모델

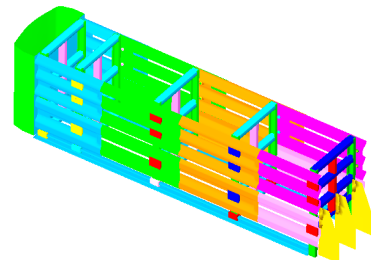


그림 6. 충격흡수시설 full model

시뮬레이션을 이용하여 “지침”에서 제시하는 6가지의 충돌조건에 대한 성능기준 만족여부를 살펴보았다. 충돌조건 중에서 THIV(Theoretical Head Impact Velocity)에 가장 불리한 900kgf 차량의 정면충돌에 대한 해석을 수행하고 ORI(김기동 등, 2006)프로그램을 이용하여 THIV를 계산하였다. 계산된 THIV는 12.3m/s로 기준치인 12.0m/s를 초과 하였다. THIV는 충돌 시 탑승자의 머리를 자유비행하는 물체로 보고 머리가 차량 내부공간의 가상면에 부딪칠 때의 속도를 나타낸다. 그러므로 충돌초기에 차량의 속도가 급격하게 감소하지 않도록 첫 번째 모듈의 마찰력을 감소시키면 THIV를 저감시킬 수 있다. 마찰력을 감소시키기 위해 첫 번째 모듈의 고장력 볼트의 토크 10kgf · m에 상응하는 스프링요소의 초기인장력을 토크 8kgf · m에 상응하는 값으로 감소시켜 해석모델을 구성하고 재해석한 결과 THIV는 9.2m/s로 나타나 기준을 만족하였다. 수정된 모델을 이용하여 PHD(Post-impact Head Deceleration)에 가장 불리한 1,300kgf 차량의 정면충돌에 대한 해석을 수행한 결과 PHD는 22.3g로 기준치인 20.0g를 초과하였다. PHD는 탑승자 머리가 차량내부공간에 부딪친 후 머리가 받는 가속도중 가장 큰 값을 의미한다. PHD가 측정된 시간은 0.27sec로 충돌거동이 거의 끝나는 시점에서 발생하였기 때문에 PHD가 기준치를 초과한 이유는 전 단계에서 THIV를 줄이기 위하여 감소시킨 토크로 인하여 전체적인 에너지 소산능력이 저감된 탓으로 판단된다. 따라서 에너지 소산능력을 증가시키기 위하여 충격흡수시설 상부에 그림 8에 보이는 것과 같은 W형 단면부재를 추가하여 해석모델을 수정하였다. 이 모델은 900kgf, 1,300kgf 정면충돌에 대하여 “지침”의 성능기준을 모두 만족하였다. 그러나 정면15°충돌해석의 경우에는 큰 편심하중 때문에 프레임이 좌굴되면서 마찰에 의한 에너지 소산 메커니즘이 제대로 작동하지 못하였다. 좌굴방지를 위하여 기존의 프레임 단면 C75x40x5x7을 C75x40x10x10으로 교체시킨 해석모델의 경우에는 에너지 소산메커니즘이 적절하게 작용하였다. 이렇게 결정된 최종해석 모델에 대하여 “지침”의 6가지 충돌조건을 적용한 해석결과가 표 2에 나타나 있다. 표 2로부터 모든 충돌조건에 대하여 이 모델이 성

능기준을 만족한다는 것을 알 수 있다. 그림 8에는 최종모델의 대표적인 시물레이션형상이 나타나 있다. 요소부재의 에너지 소산성능실험에 근거하여 prototype을 설계하고, 다양한 충돌조건에 대하여 3D 컴퓨터 시물레이션을 수행하여 충격흡수시설의 성능을 평가하고 수정하는 과정을 통하여 실물차량 충돌시험의 횡수를 감소시킬 수 있는 절차를 제시하였다. 컴퓨터 시물레이션은 검증과정과 정밀한 해석을 통하여 이루어졌으나 실물차량 충돌시험시의 모든 조건을 모델하는 데는 한계가 있기 때문에 최소한 가장 결정적인 충돌조건(900kgf차량, 정면충돌)에 대한 실물차량 충돌시험결과와 Calibration하여 해석모델의 신뢰성이 증진된다면 최소한의 실물차량 충돌시험으로 모든 충돌조건들에 대해서 성능기준을 만족시킬 수 있는 보다 효율적인 충격흡수시설 개발이 가능할 것으로 판단된다.

표 2. 충돌조건별 안전지수

실험 종류		THIV		PHD		비 고
차량무게	충돌방법	통과기준	해석값	통과기준	해석값	
900kgf	정면충돌	12m/s	10.79m/s	20g	9.55g	모두 만족
1,300kgf	정면충돌	12m/s	9.67m/s	20g	16.40g	모두 만족
900kgf	정면 1/4 offset충돌	12m/s	10.04m/s	20g	14.26g	모두 만족
1,300kgf	정면 15° 충돌	12m/s	10.65m/s	20g	7.75g	모두 만족
1,300kgf	측면 165° 충돌	9m/s	8.77m/s	20g	9.45g	모두 만족
1,300kgf	측면 15° 충돌	9m/s	7.74m/s	20g	10.08g	모두 만족

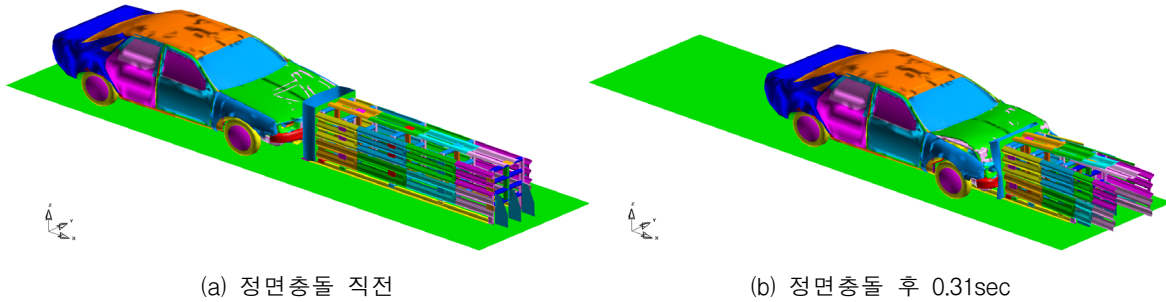


그림 8. 최종모델 1,300kgf 정면충돌 시물레이션

3. 결 론

기존의 반복적인 실물차량 충돌시험만으로 가능하였던 비경제적인 충격흡수시설 개발을 개선시키기 위하여 요소부재의 에너지 소산성능실험에 근거하여 prototype을 설계하고, 다양한 충돌조건에 대하여 3D 컴퓨터 시물레이션을 수행하여 충격흡수시설의 성능을 평가하고 수정하는 실물차량 충돌시험의 횡수를 감소시킬 수 있는 절차를 제시하였다. 컴퓨터 시물레이션은 실물차량 충돌시험시의 모든 조건을 모델하는 데는 한계가 있지만 가장 결정적인 충돌조건(900kgf 차량, 정면충돌)에 대한 실물차량 충돌시험결과와 Calibration 하여 해석모델의 신뢰성이 증진된다면 최소한의 실물차량 충돌시험으로 모든 충돌조건들에 대해서 성능기준을 만족시킬 수 있는 보다 효율적인 충격흡수시설 개발이 가능할 것으로 판단된다. 나아가 다양한 에너지 소산 메커니즘들의 성능이 파악되고 이러한 메커니즘을 사용한 충격흡수시설의 시물레이션결과가 실물차량 충돌시험결과와 Calibration되어 신뢰성 있는 데이터베이스가 갖추어 진다면 궁극적으로 충격흡수시설도 일반적인 구조물과 같이 구조해석을 통하여 성능을 평가하고 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2002). “도로안전시설 설치 및 관리지침(통합편)”.
2. 경찰청 (2007). “2007년판 교통사고 통계”.
3. 김기동, 고만기(2006).“탑승자의 이론적 충돌속도와 충돌 가속도 해석 방안 연구”, 한국방재학회.
4. European Committee for Standardization(CEN) (1998). “Road restraint systems (EN-1317)”.
5. H. E. Ross, JR., D. L. Sicking, and R. A. Zimmer (1993). “NCHRP Report 350”, Recommended Procedures for the Safety Performance evaluation of Highway Features, , TRB, Washington, D.C.
6. NCAC Public Finite Element Model Archive (2000). FHWA/NHTSA National Crash Analysis Center.