

자동차 범퍼의 누적 충격 평가

김 현 영^{*1)} · 최 종 길¹⁾ · 김 정 민¹⁾ · 이 강 옥²⁾ · 여 태 정²⁾

강원대학교 기계메카트로닉스 공학부¹⁾ · 현대모비스(주)²⁾

Numerical Modeling for Cumulative Impact of Automotive Bumper

Heonyoung Kim^{*1)} · Jonggil Choi¹⁾ · Jungmin Kim¹⁾ · Kangwook Lee²⁾ · Taejung Yeo²⁾

¹⁾Division of Mechanical and Mechatronics Engineering, Kangwon National University, Gangwon 200-701, Korea

²⁾Hyundai Mobis, 80-10 Mabook-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi 449-910, Korea

(Received 2 June 2006 / Accepted 25 July 2006)

Abstract : Numerical analyses are carried out to evaluate the cumulative impact damage of an automotive front end bumper under the low speed crash events(CMVSS215) by using explicit code. Results of first impact simulation, which are deformed shape, thickness, stress tensors and strain tensors, are used as the initial conditions for a next impact simulation. Between the events, the residual vibration is damped out by using nodal damping, and then recovery after each event is evaluated by several methods, one of which is a springback analysis with implicate finite element analysis code. The coupled analysis scheme for the evaluation of cumulative impact damage is verified through the comparison with test results.

Key words : Automotive bumper(자동차 범퍼), Low speed crash simulation(저속 충돌 해석), Springback(탄성회복), Cumulative impact(누적 충격)

1. 서 론

범퍼는 차체의 전·후방에 각각 장착되어 차량의 저속 충돌 시 차체, 차체 부속 및 승객을 보호해 주는 역할을 하는 자동차용 부품이다. 범퍼는 크게 백빔(back beam), 스테이(stay), 폼(foam)구조의 충격흡수재, 커버(cover)로 구성되며, 이 중 범퍼 백빔은 스테이를 통해 차체 사이드 멤버(side member)에 장착되어 충돌 시 대부분의 충돌에너지를 흡수하게 된다.¹⁻³⁾

범퍼의 충돌성능은 자동차의 각종 충돌로부터 승객을 보호하기 위하여 제정된 각국의 법규를 만족하여야 하며, 범퍼 관련 법규로 국내의 경우 자동차 안전기준 93조, 해외의 경우 북미의 FMVSS 581,

CMVSS 215, 유럽의 ECE. No 42등이 있다. 현재 많은 자동차 회사들에서는 각종 자동차용 부품의 충돌성능 평가를 위해 유한요소해석(FEA)을 적용하여 설계에 이용하고 있으며, 그 범위는 점차 넓어지고 있다.^{4,6)}

CMVSS 215를 비롯한 각종 범퍼 충돌 법규에서는 Fig. 1과 같이 단일품에 대하여 정면진자충격시험(center pendulum impact test), 코너진자충격시험(corner pendulum impact test), 300L 이격진자충격시험(300L offset pendulum impact test), 고정벽 충돌시험(center barrier crash)등을 순차적으로 진행하도록 규정하고 있어 변형이 누적되어 발생하므로 유한요소해석을 이용한 범퍼충돌 해석 시 누적 변형을 고려할 필요가 있다.

본 논문에서는 CMVSS 215 법규시험을 대상으로

*Corresponding author, E-mail: khy@kangwon.ac.kr

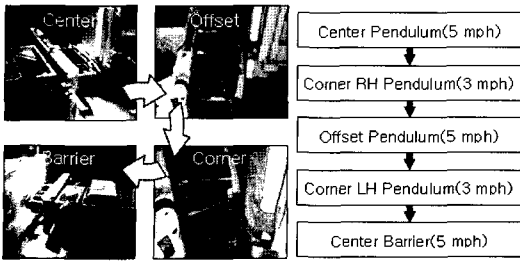


Fig. 1 CMVSS215 test regulation

범퍼 백빔의 누적 변형을 고려하기 위한 충돌해석 방안을 고찰하였으며, 누적변형을 고려한 충돌해석을 수행하여 그 유용성을 검증하였다. 충돌해석 방안은 해석 단계간 변형형상(deformed shape), 두께(thickness), 응력 및 변형률 텐서(stress & strain tensor)를 연계하여 누적 변형을 고려하였고, 이전 해석단계에서 발생하는 백빔의 잔류 진동(residual vibration)을 제거하기 위하여 절점 댐핑(nodal damping)을 사용하였다. 또한 범퍼 백빔의 회복 고려를 위한 추가적인 스프링백 해석의 필요 여부를 검토하였다. 최종적으로 연계해석(coupled analysis) 진후의 해석결과와 시험결과와의 비교를 통해 연계해석의 유용성을 검증하였으며, 충돌 해석과 스프링백 해석을 위하여 상용유한요소해석 프로그램인 PAM-CRASH와 PAM-STAMP를 사용하였다.

2. CMVSS215 법규

북미 캐나다 범퍼 충돌법규인 CMVSS 215에서는 범퍼 시험조건 및 시험방법에 대해 아래와 같이 규정하고 있다.⁷⁾

2.1 시험조건

시험조건은 전륜 조향은 직진, 타이어 공기압은 표준의 상태에 있어야 하며, 주차제동장치는 해제하고 변속기는 중립의 위치에 있어야 한다. 트레일러 연결장치 및 번호판 부착대는 제거해야 하며, 차량은 평평하고 딱딱한 콘크리트 바닥에 놓여져야 한다.

시험 후 충족요건은 모든 램프와 반사장치가 정상작동 되어야 하고 균열이 생기면 안되며, 선명도를 만족하여야 한다. 승강구 및 후드 트렁크는 정상

개폐되어야 하고, 연료/냉각장치 누출과 배관 수축이 없어야 하며, 각 밀봉부위 상태와 뚜껍은 정상작동 되어야 한다. 또한, 배기장치의 가스누출현상 또는 배관계통 수축이 없어야 하며, 동력전달장치, 완충장치, 제동장치는 모두 정상작동 되어야 한다.

2.2 시험방법

시험방법은 정면/후면 진자충격시험, 코너 진자충격시험, 고정벽 충돌시험에 대해 규정하고 있다. 각 시험은 30분 간격으로 순차적으로 수행하며, 진자의 유효충격질량은 차량질량과 동일하여야 한다.

1) 정면/후면 진자충격시험

정면/후면 진자충격시험은 정면 및 후면에 대해서 각 2회 충격하며, 진자의 길이는 3.3 m(11 feet)이며, 진자의 충격높이는 지면에서 400 mm ~ 500 mm(16 ~ 20 inch), 충격속도는 8 km/h(5 mph)이다. 2차 충돌시에는 최초 충돌선에서 좌우 300 mm, 상하 50 mm 이동한 지점을 타격하여야 하며, 2차 충돌을 흔히 300L 이격 진자충격시험이라고 한다.

2) 코너 진자충격시험

코너 진자충격시험은 정면 및 후면에 대해서 각 1회 충격하며, 진자는 길이방향에 30도 경사진 곳의 수직인 면 내에 위치하며, 진자의 길이는 정면/후면 진자충격시험과 동일하게 3.3 m(16 ~ 20 inch)이며, 충격높이는 500 mm(20 inch), 충격속도는 4.8 km/h(3 mph)이다.

3) 고정벽충돌시험

고정벽 충돌시험은 모든 진자충격시험 이후에 실시하며, 정면 및 후면에 대해서 각 1회 고정벽에 8 km/h(5 mph)의 속도로 차량을 충돌시킨다. 이때, 엔진은 공회전 상태에 있어야 한다.

3. 해석 모델

3.1 해석 모델 및 해석 경계조건

전방 범퍼의 해석 모델 및 해석 경계조건을 Fig. 2에 나타내었다. 모든 단계의 해석에서 동일하게 차량의 질량중심(center of gravity; C.O.G)점과 범퍼 스테이의 지지판을 강체(rigid body)로 구속하였고, 차량의 질량중심점에는 범퍼질량을 제외한 차량 질량을 부여하였다. 또한 차량 전륜 조향이 직진이므로

자동차 범퍼의 누적 충격 평가

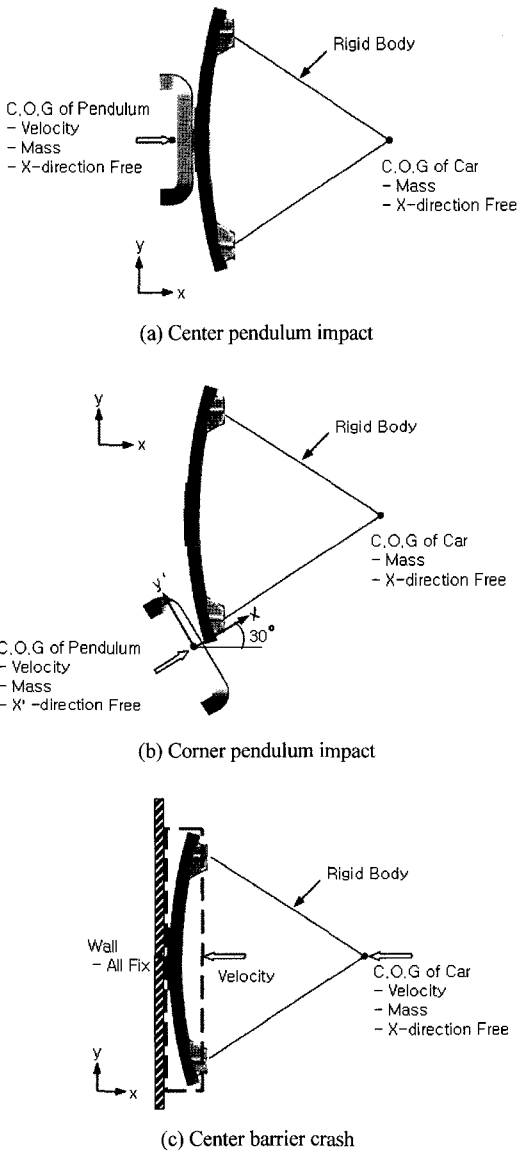


Fig. 2 Boundary conditions in the analyses of CMVSS 215

질량중심의 변위경계조건은 길이방향의 자유도만 부여하였다.

진자의 경우 충격 돌출부(impact ridge)만 모델링하여 강체로 표현하였다. 진자의 질량중심에는 차량 질량과 동일한 질량조건을 부여하고 각 시험조건에 대한 속도 조건을 부여하였다. 변위경계조건은 진자의 충격방향으로만 움직이도록 하였는데, 이를 위해 코너진자충격해석의 경우는 Fig. 2(b)와 같이 국부좌표계(local frame)를 사용하였다.

고정벽 충돌해석의 경우 고정벽을 강체로 모델링하여 완전 구속한 후 차량의 질량중심점, 백빔, 스테이에 속도 조건을 부여하여 고정벽에 충돌하도록 하였다.

3.2 폼 사용 고찰

실제 자동차용 범퍼에는 충격 에너지 흡수를 위한 폼이 사용되고 있으나 본 논문에서는 폼을 제외하고 연계충돌해석을 진행하였다. 폼을 제외한 연계충돌해석 전·후의 최종 충돌 단계에 대한 결과 비교를 통하여 연계충돌해석의 유용성을 고찰하였다.

그러나 해석경계조건의 검증과 폼 적용 유무에 따른 결과차이를 확인하기 위하여 연계충돌해석의 최초 단계인 정면진자충격해석에 대하여 폼을 적용한 해석을 수행하였으며, 폼 사용 유무에 따른 밀림량(intrusion) 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 폼의 사용 유무에 따라 약 20mm의 결과 차이가 있으며, 폼을 적용한 경우 시험결과에 더욱 접근하였다.

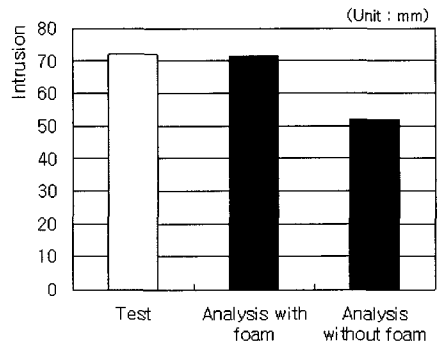


Fig. 3 Comparison of Intrusion in the test, analysis with foam and analysis without foam

4. 연계충돌해석

4.1 연계충돌해석 방안

누적변형을 고려하기 위하여 각 단계 해석 결과의 변형형상, 두께, 응력 및 변형률 텐서를 다음 단계해석의 초기상태로 하여 연계충돌해석을 진행하였다. 범퍼의 진자충격해석 시 진자는 백빔에 충격을 가한 후 충격방향의 반대방향으로 반발되고 범퍼는 진자가 충격을 가한 방향으로 이동을 하며, 이때 백빔은 최대변형을 하였다가 일정량 회복된 후

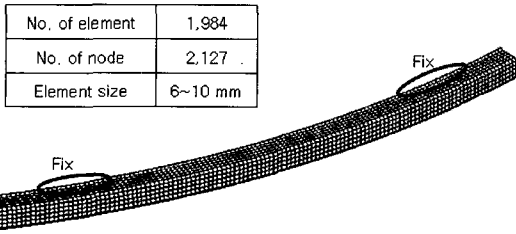


Fig. 4 Simple bumper model and boundary condition for springback analysis

잔류 진동이 발생하게 된다. 연계충돌해석을 위해서는 이와 같은 백빔의 잔류 진동이 제거된 후의 변형형상, 두께, 응력 및 변형률 텐서를 연계하여야 한다.

또한, 잔류진동이 제거된 후 추가적인 스프링백 해석을 통한 백빔의 회복 고려가 필요한지 확인할 필요가 있으며, 해석 모델에 부품간의 연결조건이 필요한 경우 PAM-STAMP를 이용한 스프링백 해석 시 연결부위의 조건부여에 제한이 있으므로, 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 연결부분이 없는 단순모델을 구성하여 연계충돌해석 방안을 고찰하였다.

4.2 백빔 잔류 진동의 제거

백빔의 잔류 진동 제거를 위하여 본 연구에서는 절점 댐핑을 사용하였다. 절점 댐핑은 주로 준정적(quasi-static) 문제에서 잔류 진동을 제거하여 최종적인 변형 형상을 얻기 위한 방법으로 사용되며, 범퍼 진자충격해석시 진자의 반발 이후 절점댐핑을 적용하였다. 절점 댐핑을 사용할 경우 각 절점의 운동 방정식에 질량 비례 댐핑 항(mass prortional damping term)이 추가되어 잔류 진동이 제거되며, 1자유도 진동계의 경우 식 (1)의 임계(critical) 댐핑 값을 계산하여 해석에 적용할 수 있다.^{8,9)}

$$q_{crit} = 2\omega = \frac{4\pi}{T} \quad (1)$$

where ω : Circular frequency (1/s)
 T : Period of vibration (s)

질량 비례 댐핑 항에는 댐핑 상대속도가 포함되어 있으며 전체 계의 절대속도(absolute velocity)를 사용하는 방법과 특정한 기준 절점의 속도를 사용하는 방법이 있다. 댐핑 상대속도의 선택은 절점의 진동량 계산 방법에 따라 달리 적용하며 본 논문에서

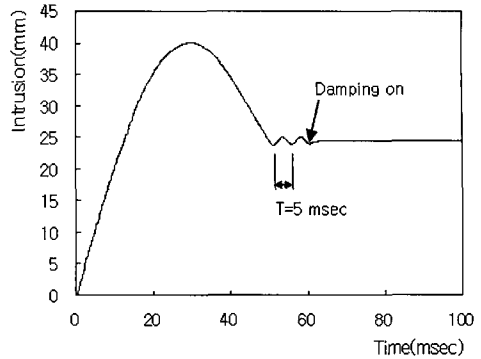


Fig. 5 Intrusion in the center pendulum impact analysis of simple bumper model

서는 백빔의 잔류진동량 계산 시 스테이의 절점을 기준으로 하였으므로 후자의 방법을 택하였다.

Fig. 4의 단순모델에 대하여 절점 댐핑을 사용하여 정면진자충격해석을 수행하였을 때의 밀림량 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 절점 댐핑 적용 진 주기 T는 5 msec이며 식 (1)을 이용한 계산 결과, 2.5의 댐핑값을 60 msec 이후부터 적용하였다. 진자 충격 후 범퍼 백빔에 발생한 잔류진동이 절점 댐핑 적용 후 동적이완(dynamic relaxaton)에 의해 제거되었음을 확인할 수 있다.

4.3 스프링백 해석

백빔의 잔류 진동 제거 이후 스프링백 해석을 통한 백빔의 회복 고려가 필요한지 확인하기 위하여 스프링백 해석을 수행하였다. 스프링백 해석의 조건을 Table 1에 나타내었으며, 스프링백 해석을 포함한 Table 2의 3 가지 경우에 대하여 응력과 밀림량을 비교하였다. Case 1은 최대 변형 이후 동적 이완의 경우, Case 2는 최대 변형 상태에서 스프링백 해석을 수행하였을 경우, Case 3은 동적 이완 후 추가적인 스프링백 해석을 수행하였을 경우이며, Case 0는 백빔의 최대 변형 상태를 나타낸다.

단순모델을 이용한 스프링백 해석 결과를 Table 3

Table 1 Numerical condition in springback analysis

Total number of increments	10
Maximum num of non-linear iterations	500
Displacement convergence tolerance	0.01
Energy convergence tolerance	0.01

Table 2 Description for comparison cases

	Description
Case 0	Maximum deflection
Case 1	Maximum deflection -> dynamic relaxation
Case 2	Maximum deflection -> springback analysis
Case 3	Dynamic relaxation -> springback analysis

Table 3 Comparison of springback analysis results

	case 0	case 1	case 2	case 3
Max. equiv. stress (GPa)	1.09	0.979	0.867	0.864
Intrusion (mm)	40.02	24.34	25.04	24.68

에 나타내었으며, Case 1, 2, 3 모두 최대 변형상태와 비교하여 응력이 감소하였으며, 특히 Case 2와 3의 경우는 Case 1에 비하여 작은 응력을 나타내고 있어 스프링백 해석을 통하여 응력이 완화되었음을 확인할 수 있다. 그러나, 전체적인 응력분포는 Case 1의 경우, 약간의 차이를 보이나, 최대응력 부위의 응력 완화가 전체적인 형상변화에 미치는 영향은 미약하여 밀립량의 경우 Case 1,2,3이 서로 1%내의 오차를 나타내어 큰 차이를 보이지 않는다.

따라서 자동차용 범퍼와 같이 길이방향으로 어느 정도 균일한 형상을 가지고 있고 전체적인 변형이 지배적인 경우 스프링백 해석에 의한 형상회복은 미약하며, 복잡한 형상에 국부적인 변형이 발생하였을 경우 스프링백 해석의 형상회복에 대한 영향이 클 수 있으나, 실제 범퍼 모델의 경우는 비교적 균일한 형상을 가지고 있으므로 스프링백 해석을 통한 백빔의 회복 고려 없이 연계해석을 진행하여도 결과에 큰 차이가 나타나지 않는다.

4.4 연계충돌해석

실제 범퍼 모델에 연계충돌해석을 적용하였다. Fig. 1에 나타난 시험 순서와 동일하게 해석을 진행하였으며, 해석방법은 앞 절의 연구 결과와 같이 추가적인 스프링백 해석없이 동적 이완에 의한 방법을 이용하였으며, 연계해석 전후의 변형형상과 변형률 분포, 침입량을 비교하였다.

고정벽 충돌해석에 대하여 변형양상 및 변형률 분포를 연계충돌해석 결과와 비교하였다(Fig. 6).

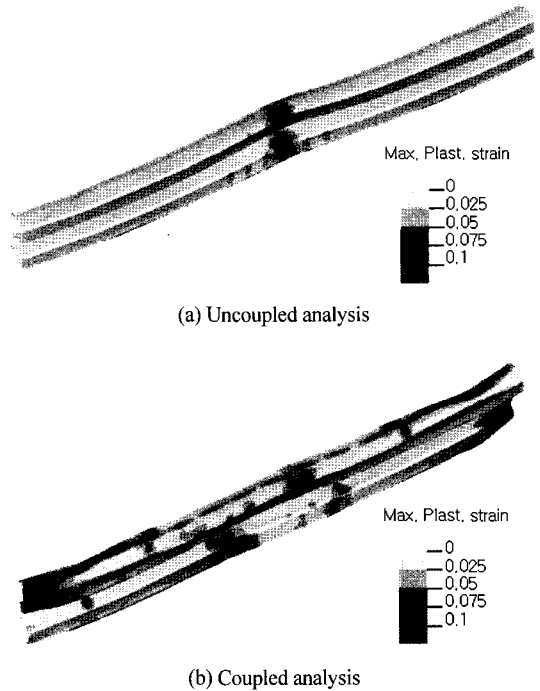


Fig. 6 Comparison of deformed shape and maximum plastic strain distribution

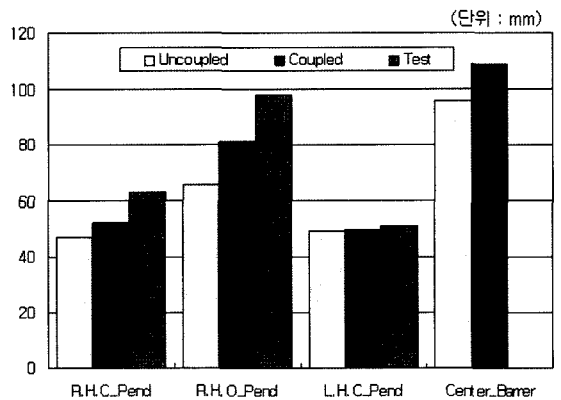


Fig. 7 Comparison of intrusion in each pendulum impact analysis

누적변형을 고려하지 않았을 경우 범퍼 백빔의 중앙에 국부적인 변형이 발생한 반면 누적변형을 고려하였을 경우 이전단계의 변형 및 변형률이 반영되어 누적변형을 고려하지 않았을 때와 비교하여 변형형상과 변형률 분포에 차이를 나타내고 있다.

Fig. 7에 각 충돌 단계에서 연계해석 전후의 밀립량(intrusion)을 비교하였으며, 누적변형을 고려하였

을 때의 밀림량이 상대적으로 크게 발생하였다. 특히, 300L 이격진자충격해석의 경우 연계충돌해석을 적용하지 않았을 때의 밀림량이 시험결과와 40 mm의 차이가 있었으나, 연계충돌해석 적용 후 20 mm의 차이를 보여 누적변형을 고려하였을 때의 결과가 시험결과에 더 근접함을 알 수 있다. 하지만 누적변형 고려 후의 결과가 시험결과와 일치하지 않는 것은 해석에서는 폼이 사용되지 않았기 때문이며 폼을 사용한 충돌해석 시 시험결과에 근접한 결과를 얻을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 범퍼 누적 충격 시험 시 발생하는 누적변형을 고려하기 위한 충돌해석 방안을 고찰하였으며, 누적변형을 고려한 충돌해석의 유용성을 검증하였다. 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 누적 변형을 고려하기 위하여 이전 해석 단계의 변형형상, 두께, 응력 및 변형률 텐서를 연계하였으며, 절점 댄핑을 사용하여 각 해석 단계간 발생하는 백빔의 잔류 진동을 제거하였다.
- 2) 동적 이완, 최대 변형상태에서 스프링백 해석 수행, 동적 이완 후 스프링백 해석 수행의 3가지 방법에 의해서 각각 백빔의 회복을 고려한 결과, 밀림량의 오차가 1% 내외로 나타났으며, 해석의 간편성과 정확도를 고려할 때 추가적인 스프링백 해석 수행없이 백빔 회복을 고려하여도 무방하다.
- 3) 연계충돌해석 결과 백빔의 변형 형상, 응력의 크기, 소성변형률, 밀림량이 다르게 예측되며, 각 해석 단계의 밀림량 비교 결과 연계충돌해석 시 시험에 가까운 결과예측이 가능하므로 누적변형을 고려하기 위하여는 연계충돌해석을 수행하는 것이 유용하다.
- 4) 본 연구에서 연계충돌해석 결과가 시험결과와 20% 내외의 차이를 보이는 것은 해석에서 폼을 적용하지 않았기 때문이며, 폼을 사용한 연계충돌해석 시 실제 시험결과에 근접한 결과 예측이 가능할 것으로 판단된다.

References

- 1) S. J. Kang, "Optimization of Bumper Section for Crashworthiness," Transactions of KSAE, Vol.6, No.6, pp.276-284, 1998.
- 2) M. H. Kim, S. H. Kim and S. K. Ha, "Structural Analysis and Optimal Design of front Bumper for Automobiles by Using the Beam Theory," Transactions of the KSME, Vol.23, No.12, pp.2309-2319, 1999.
- 3) K.-H. Lee and W.-S. Joo, "Optimum Design of an Automobile Front Bumper Using Orthogonal Array," Transactions of KSAE, Vol.10, No.6, pp.125-132, 2002.
- 4) M. H. Kim, S. S. Cho and S. K. Ha, "Design and Structural Analysis of Aluminum Bumper for Automobiles," Transactions of KSAE, Vol.7, No.4, pp.217-227, 1999.
- 5) S. J. Lee, J. S. Park, D. H. Koo and B. H. Jung, "The Development of Material Technology Applied to Bumper Beam," Transactions of KSAE, Vol.10, No.4, pp.206-215, 2002.
- 6) J. W. Lee, K. H. Yoon, Y. S. Kang, K. T. Park and G. J. Park, "Hood and Bumper Structure Design Methodology for Pedestrian Regulation," Transactions of KSAE, Vol.13, No.3, pp.162-170, 2005.
- 7) Canadian Motor Vehicle Safety Standards 215, Transport Canada, 1991.
- 8) A. K. Pickett and G. Giazitzis, "Quasi-static Nonlinear Large Deformation Analysis Using Conventional Explicit Finite Element Methods And Dynamic Relaxation Techniques," VDI Conference, Numerical Analysis in Automotive Engineering, 1992.
- 9) PAM-CRASH Solver Notes Manual, ESI Group, p.432, 2004.