

성형효과를 고려한 ULSAB-AVC 모델의 측면 충돌해석

윤중현¹⁾ · 바오이동¹⁾ · 허 훈^{*1)} · 김세호²⁾ · 김홍기³⁾ · 박성호³⁾

한국과학기술원 기계공학과¹⁾ · 대구대학교 자동차 산업 기계공학부²⁾ · POSCO 기술연구소³⁾

Side Impact Analysis of the ULSAB-AVC model with considering the forming effect

Johnheon Yoon¹⁾ · Hoon Huh^{*1)} · Seho Kim²⁾ · Hongkee Kim³⁾ · Seungho Park³⁾

¹⁾ Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Science town, Daejeon, 305-701, Korea

^{*2)} School of Automotive, Industrial and Mechanical Engineering, Daegu University, 15 Naeri, Jillyang, Gyeongsan, Gyeonbuk, 712-714, Korea

³⁾ POSCO Technical Research Laboratories, 699, Cumho-dong, Gwangyang, Jeonnam, 545-090, Korea

Abstract : Most of auto-body members are composed of stamping parts. These parts have the non-uniform thickness and plastic work hardening distribution during the forming process. This paper is concerned with the side impact analysis of ULSAB-AVC model according to the US-SINCAP in order to compare the crashworthiness between the model with and without considering the forming effect. The forming effect is calculated by one-step forming analysis for several members. The crashworthiness is investigated by comparing the deformed shape of the cabin room, the energy absorption characteristics and the intrusion velocity of a car. The result of the crash analysis demonstrates that the crash mode, the load-carrying capacity and energy absorption can be affected by the forming effect. It is noted that the design of an auto-body should be carried out considering the forming effect for accurate assessment of crashworthiness.

Key words : Crashworthiness, Side impact analysis, ULSAB-AVC(Ultra Light Steel Auto Body Advanced Vehicle Concepts), AHSS(Advance High Strength Steel), US-SINCAP(U. S. Side Impact test for New Car Assessment Program) , Forming effect

1. 서론

자동차 업계는 지속적인 유가 상승 및 세계적으로 강화되고 있는 배기가스 규제 등에 대응하기 위하여 차량 경량화와 대체 에너지 개발을 추진하고 있다. 특히 차량 경량화는 고강도 강판의 적용과 자동차 구조부재의 최적 설계와 등을 통하여 실현하고 있다. 대표적인 예로 ULSAB-AVC(Ultra Light Steel Auto Body - Advanced Vehicle Concepts)¹⁾ 프로젝트는 국제철강협회(IISI) 주도하에 차량 경량화 및 에너지 절감의 요구를 실현시키기 위하여 차체용 강판의 85% 이상을 고강도

강판으로 대체하는 시도를 통하여 충돌 성능 및 급격한 에너지 절감 효과를 입증하였다. 또한 최근 자동차 구조부재는 하이드로포밍(Hydroforming)과 테일러 용접 블랭크(Tailor Welded Blanks) 등의 성형기법을 적용하여 부재의 강도 확보 및 부품 수를 최소화하는 경량화를 달성하였다. 이러한 자동차의 구조 부재는 충돌 사고시에 적절한 변형에 의하여 충돌에너지를 흡수하여 운전자의 상해치가 최소화 되도록 설계되어야 한다. 그러므로 차량 경량화는 충돌 안전성을 확보한 상태에서 이루어져야 하며 동시에 충돌 안전성에 관한 해석의 신뢰도를 높이는 것이 매우 중요하다. 복잡한 형상의 자동차 구조용 박판 부재들은 대부분 박판 성형 공정에 의하여 생산된다. 이러한 성형공정 중에 부재는

* To whom correspondence should be addressed.
hhuh@kaist.ac.kr

형상과 성형 조건에 따라 두께 및 변형률 등의 분포가 불균일해 진다. 따라서 신뢰도가 높은 자동차 충돌해석을 수행하기 위하여는 자동차 구조부재들의 정확한 기하학적 형상이나 재료의 동적 물성 특성뿐만 아니라 성형 공정에서 유발되는 부재의 잔류응력, 두께의 변화 및 변형경화의 영향 등을 고려하여야 한다. 최근에 들어서는 자동차의 충돌특성을 파악하고 성형 이력의 효과를 검증하기 위하여 프런트사이드 멤버와 같은 자동차 구조부재의 단품에 성형효과를 적용하여 충돌해석을 수행하는 연구가 진행되고 있으며²⁾ 성형 이력을 고려한 자동차 구조부재의 충돌해석에 관한 연구도 꾸준히 수행되고 있다.³⁻⁶⁾

본 논문에서는 ULSAB-AVC 모델의 주요 부재에 대하여 성형해석을 수행하고 계산된 성형해석 결과들을 충돌해석에 적용하였다. 성형효과가 충돌 성능에 미치는 영향을 검증하기 위하여 성형효과를 고려하지 않은 충돌해석 모델과 변형형상, 변형속도, 에너지 흡수량 등을 비교하였다.

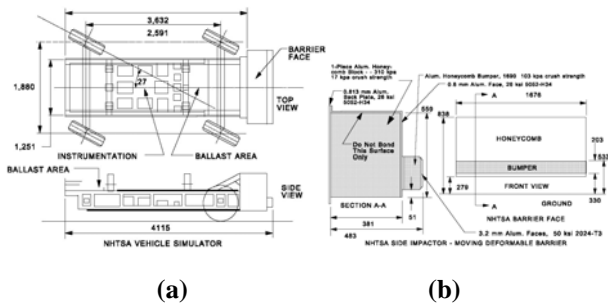


Figure 1. Facility and equipment for Side-NCAP test procedure : (a) vehicle simulator; (b) side impactor-movable deformable barrier

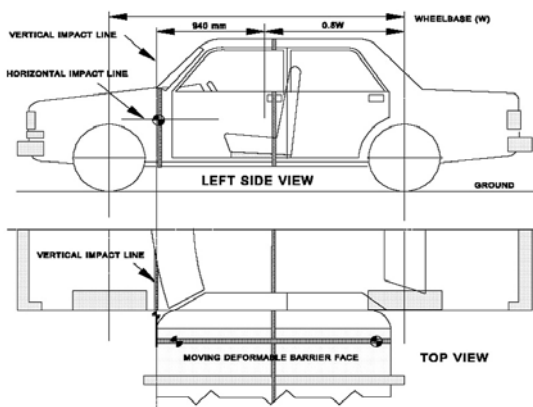


Figure 2. Schematic diagram of impact line for side-NCAP test procedure

2. 측면충돌 시험법

해석에 적용된 시험법은 미교통부(US DOT) 산하의 도로교통안전청(NHTSA)의 FMVSS No.214D에 기초한 측면충돌 신차평가 프로그램인 Side-NCAP(New Car Assessment Program side impact test)을 이용하였다. 이 시험법은 Figure 1(a)와 같이 규정된 이동대차 (MDB: Moving Deformable Barrier)가 27°의 경사를 유지하여 38.5mph의 속도로 차체와 충돌하게 된다. 대차의 총 중량은 1,361kg이며, 차체와의 충돌 시 Figure 2와 같이 규정화된 수직, 수평 충돌선상에 정렬시킨 후 충돌시험을 수행하게 된다. 해석에 사용된 ULSAB-AVC 차체 모델의 경우 윤거 (wheelbase)가 3,041mm인 PNGV-Class(Partnership New Generation Vehicle)이므로 Figure 2의 그림에서 전방 차축을 기준으로 후방으로 508±5mm 인 지점에 충돌선이 있어야 한다. 시험 차량의 총 중량은 유체 만체 상태의 중량과 최대적재 중량, 운전석과 뒷 자석에 놓이게 되는 더미 2개의 중량을 더한 값으로 계산된다.

3. 차체의 측면충돌 해석

3.1 측면충돌 모델

측면충돌 해석은 ULSAB-AVC 모델을 사용하여 수행하였으며 구성된 유한요소 모델은 Figure 3과같이 약 205,000개의 쉘과 솔리드 요소를 사용하였다. 해석은 외연적 유한요소 프로그램인 LS-DYNA3D v970을 사용하였다. ULSAB-AVC 모델에 적용된 강판의 경우 Table 1에 제시된 바와 같이 85% 이상이 인장강도 60kg급 이상의 고강도 강판으로 이루어져 있다. 따라서 고속 변형시 발생하는 고강도 강판의 동적물성을 고려하기 위하여 정적 및 동적 물성 데이터를 piecewise linear 형태로 적용하여 해석을 수행하였다. 해석의 단순화를 위하여 승객 상해치를 고려하기 위한 더미 모델은 사용하지 않았으며, 시트 크로스 멤버 부분에 더미에 해당하는 질량을 집중질량으로 부과하였다. 또한 충돌 성능 향상 및 해석의 안정성을 위하여 기존의 ULSAB-AVC 모델에 루프 보강재 2개를 추가하고 충돌해석을 수행하였다.

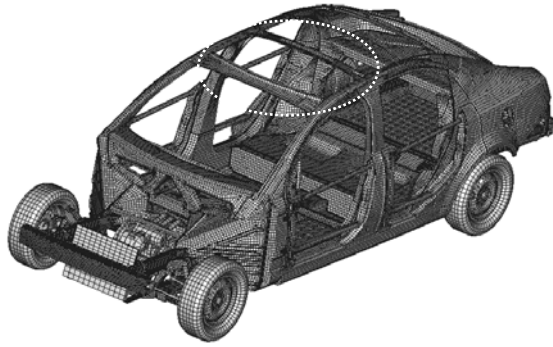


Figure 3. ULSAB-AVC model with roof crossmember

Table 1 Mechanical properties used in ULSAB-AVC model [11, 12]

Steel Grade	YS (MPa)	UTS (MPa)	Total EL (%)	n-value (5-15%)	r-bar	K-value (MPa)
BH 210/340	210	340	34-39	0.18	1.8	582
BH 260/370	260	370	29-34	0.13	1.6	550
DP 280/600	280	600	30-34	0.21	1.0	1082
IF 300/420	300	420	29-36	0.20	1.6	759
DP 300/500	300	500	30-34	0.16	1.0	762
HSLA 350/450	350	450	23-27	0.14	1.1	807
DP 350/600	350	600	24-30	0.14	1.0	976
DP 400/700	400	700	19-25	0.14	1.0	1028
TRIP 450/800	450	800	26-32	0.24	0.9	1690
DP 500/800	500	800	14-20	0.14	1.0	1303
CP 700/800	700	800	10-15	0.13	1.0	1380
DP 700/1000	700	1000	12-17	0.09	0.9	1521
Mart 950/1200	950	1200	5-7	0.07	0.9	1678
Mart 1250/1520	1250	1520	4-6	0.065	0.9	2021

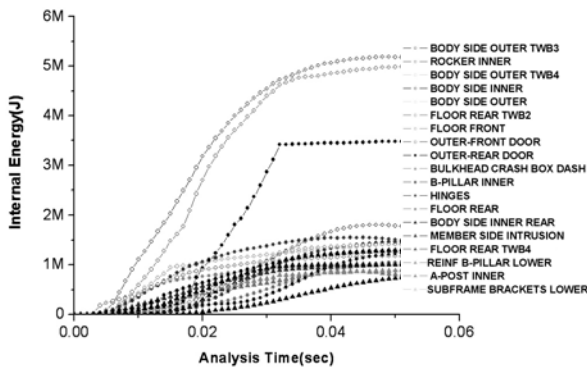


Figure 4. Energy absorption characteristics of important members during the side impact test

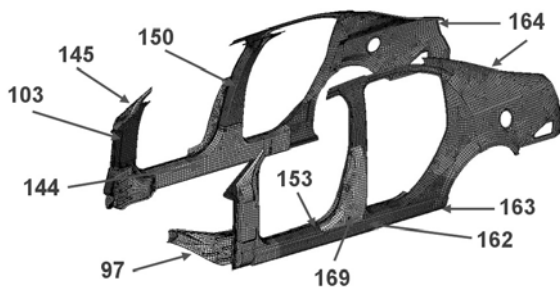


Figure 5. Critical members for energy absorption during the side impact analysis

Table 2 Mechanical properties for critical members for energy absorption

Part #	Name	Thickness (mm)	Material
97	Bulkhead Crash Box Dash RH	1.2	DP700/1000
103	A-Post Inner	0.9	DP700/1000
144	Rocker Inner	1.5	DP700/1000
145	Body Side Outer TWB1	1.5	DP700/1000
150	B-Pillar Inner	0.7	Mart950/1200
153	Reinf B-Pillar Lower	1.0	DP700/1000
162	Body Side Outer TWB3	1.8	DP700/1000
163	Body Side Outer TWB4	1.2	DP700/1000
164	Body Side Outer TWB5	0.7	BH260/370
169	Inner Rear - Front Door	0.6	Mild140/270

3.2 충돌해석 결과

해석은 US-SINCAP에 의거하여 해석시간 60msec 동안 수행하였다. Figure 4는 충돌해석 동안 발생하는 부재의 내부에너지를 도시하였으며 이를 바탕으로 Figure 5와 같이 10개의 충돌부재를 선정하였다. 충돌해석 시 주요 에너지 흡수 부재는 바디사이드 아우터(bodyside outer panel), 라커이너(rocker inner), 바디사이드 이너(bodyside inner panel) 등이 있으며 Table 2와 같이 대부분 고강도 강판으로 이루어져 있다. 성형효과가 충돌성능에 미치는 효과를 평가하기 위하여 선정된 10개의 충돌부재를 성형해석 하여 두께변화 및 유효소성 변형률을 계산하고 이를 충돌해석에 적용하였다.

3.3 성형효과

선정된 10개의 주요 충돌부재에 대하여 성형해석을 수행하였다. 성형해석은 인버스(inverse forming analysis) 해석 기법의 코드를 사용하였으며 해석결과는 Figure 6에 도시하였다. 계산된 10개 부재의 두께분포 및 유효소성 변형률 값은 충돌해석 시에 초기값으로 적용하였다. 충돌해석 시에 발생하는 성형효과를 정량적으로 평가하기 위하여 운전석으로의 침입량(intrusion distance)과 침입속도(intrusion velocity)를 비교하

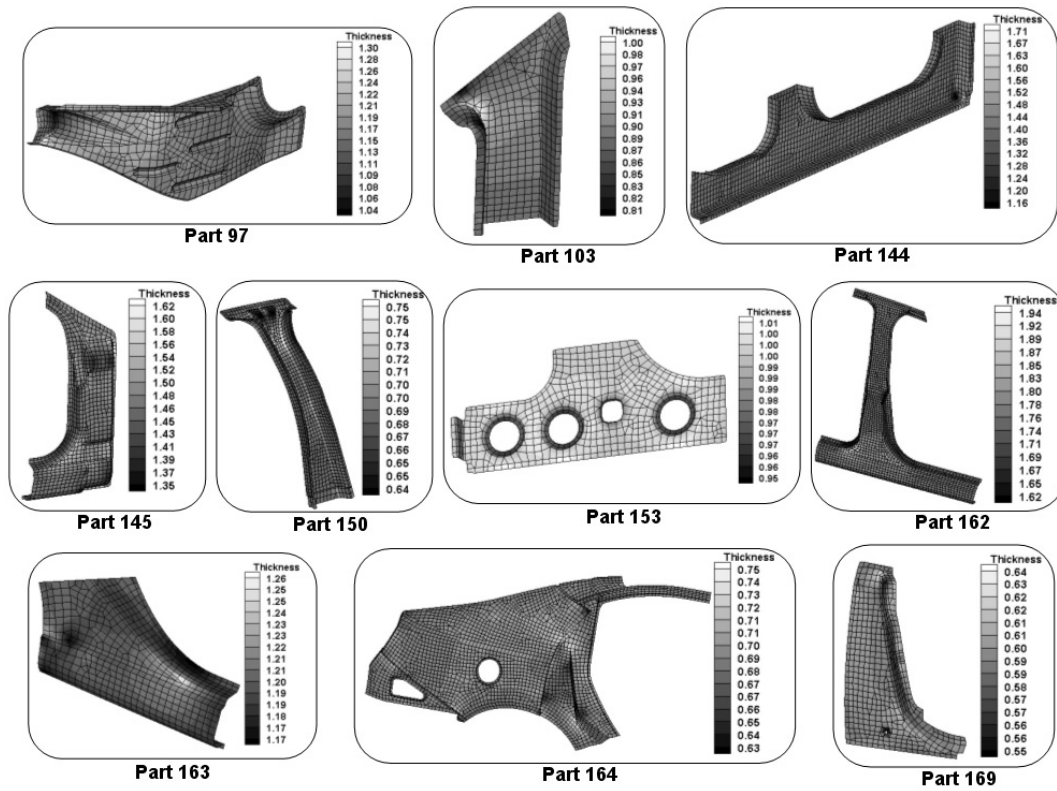


Figure 6. Thickness distribution after the one-step forming analysis

였으며 해석 중에 부재가 흡수하는 내부에너지를 비교하였다. Figure 7, 8은 충돌 후에 전체적인 변형 형상을 도시한 그림이다. 루프 크로스멤버와 B-필라가 만나는 부분의 변형이 성형효과를 고려하였을 경우 줄어드는 것을 확인할 수 있으며 Figure 8을 살펴보면 B-필라가 운전석 쪽으로 밀려들어가는 침입량이 감소하여 임팩트 범이 적게 변형하는 것을 확인할 수 있다. 충돌 시 운전석 방향으로 밀려들어오는 침입량은 실제 충돌사고 시에 운전자에게 치명적인 상해를 줄 수 있으며 개발된 신차의 상품성 평가에서 상품 가치를 결정짓는 중요한 변수가 될 수 있다.

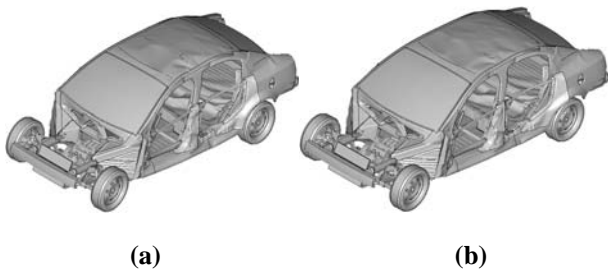


Figure 7. Deformed shapes of the vehicle for the crash analysis at time 0.06sec (iso-view): (a) w/o forming effect; (b) w/ forming effect

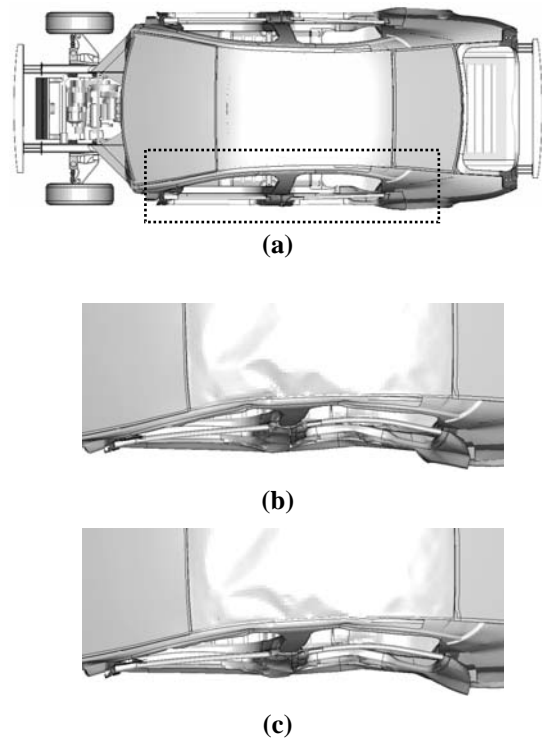


Figure 8. Deformed shapes of the vehicle for the crash analysis at time 0.06sec (top-view): (a) initial shape (b) w/o forming effect; (c) w/ forming effect

보다 정량적인 비교를 위하여 Figure 9에 도시한 B-필라 중심부의 폭 방향 침입량과 침입속도를 비교하였다. 선정된 데이터 측정 지점 (A)는 Figure 10의 원점으로 부터 (2306mm, -700mm, 756mm), (b)는 (2306mm, 700mm, 756mm) 위치로 정하였다. 또한 강체 운동의 효과를 제거하기 위하여 대차가 충돌하는 지점의 변위와 반대편 지점의 변위를 측정하여 두 변위의 차로 침입량과 침입속도를 계산하였다. 침입량의 경우 Figure 11에서와 같이 성형효과를 고려할 경우 최대 30mm 까지 감소하는 것을 볼 수 있어 충돌성능에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 침입속도를 비교하면 초기 피크 값이 성형효과를 고려하지 않을 경우에 대하여 대략 8%(0.5m/sec) 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 또한 성형효과를 고려하지 않을 경우 두 번째 피크가 발생하고 약 10msec 동안 피크 값이 유지되는데 반하여 성형효과를 고려할 경우, 두 번째 피크 후에 침입속도가 바로 하강하는 것을 볼 수 있다. 최대 침입속도의 차이는 해석시간 24msec에서 발생하며 약 29%(1.76m/sec) 까지 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 성형효과를 고려한 충돌의 경우 그렇지 않은 충돌에 서보다 높은 충돌성능을 보인다고 할 수 있다.

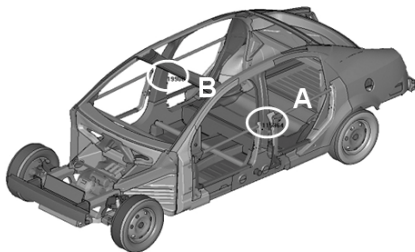


Figure 9. Geometric information for the measurement of deformation amount, the intrusion displacement and the intrusion velocity

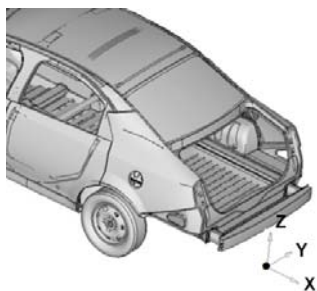


Figure 10. Reference point

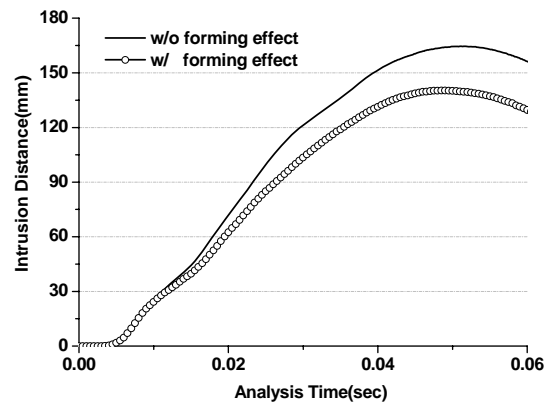


Figure 11. Amount of intrusion distance of the B-pillar with respect to the analysis time

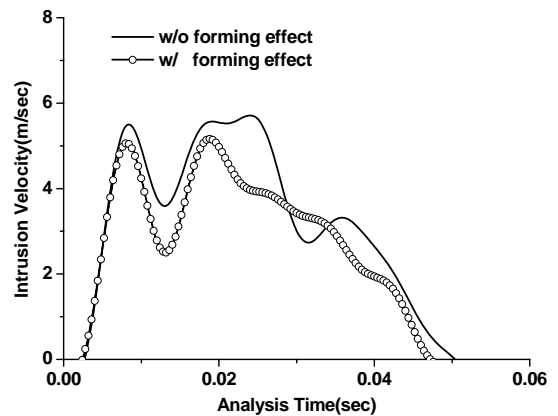


Figure 12. Variation of intrusion velocity of the B-pillar with respect to the analysis time

4. 결론

본 논문에서는 차량 경량화 및 충돌성능의 고 정도 평가를 위하여 시도되고 있는 성형효과를 고려한 측면충돌 해석을 수행하였다. 충돌해석 모델은 ULSAB-AVC 모델을 사용하였으며 측면 충돌 시 에너지 흡수율이 높고 변형량이 많은 10개의 부재를 선정하여 성형해석을 수행하였다. 해석의 효율을 높이기 위하여 인버스 해석을 수행하여 각 부재의 두께분포 및 소성변형률을 계산하였다. 이러한 성형이력을 충돌해석 시 초기 조건으로 적용하여 측면충돌 해석을 수행하였다. 충돌해석 시 충돌성능에 미치는 성형이력의 효과를 정량화 하기 위하여 B-필라 중심부의 측정 점을 선정하여 운전석으로 밀려 들어오는 침입량과 침입속도를 측정하였다. 성형이력을 고려

한 차체 모델의 경우 충돌 시 침입량과 침입속도의 감소로 인하여 운전석의 공간을 확보할 수 있었으며, 신체 부위에 전달되는 상해치의 감소를 예측할 수 있었다. 따라서 성형이력을 고려한 차체의 충돌성능이 향상되었음을 확인할 수 있었다.

References

- 1) Porsche Engineering Services, ULSAB-AVC Engineering Report, 2001.
- 2) Porsche Engineering Services, ULSAB-AVC Program Technical Transfer Dispatch#1-6, , Inc., 1999.
- 3) H. Huh, K. P. Kim, S. H. Kim, J. H. Song, H. S. Kim and S. K. Hong, "Crashworthiness Assessment of Front Side Members in an Auto-Body Considering the Fabrication Histories", *Int. J. Mech. Sci.*, 45, 1645-1660, 2003.
- 4) H. Huh, J. H. Lim, J. H. Song, K. S. Lee, Y. W. Lee and S. S. Han, "Crashworthiness Assessment of Side Impact of an Auto-Body with 60TRIP Steel for Side Members", *International Journal of Automotive Technology*, 4 (3), 149-156, 2003.
- 5) H. Huh, J. H. Lim, S. B. Kim, S. S. Han, S. H. Park, "Formability of the Steel Sheet at the Intermediate Strain Rate", *Key Engineering Materials*, 274-276, 403-408, 2004.
- 6) H.S. Kim, S.O. Hong, S.K. Hong, H. Huh, "The Evaluation of Crashworthiness of vehicles with Forming Effect", 4th European LS-DYNA Users Conference, Ulm, LSTC, 2003.
- 7) J. Cafolla, R. W. Hall, D. P. Norman, "Forming to Crash Simulation in Full Vehicle Models", 4th European LS-DYNA Users Conference, Ulm, LSTC, 2003.
- 8) J. Cafolla, R. W. Hall, D. P. Norman, I. J. McGregor, " "forming to crash" Simulation in full vehicle models", 4th European LS-DYNA Users Conference, Ulm, LSTC, 2003.
- 9) Kellicut, A., Cowell, B., Kavikondala, K., Dutton, T., Iregbu, S. and Sturt, R., "Application of the Results of Forming Simulation in Crash Models", 1999, *Proc. NUMISHEET'99*, Besancon, BURS, 1999.
- 10) LSTC, LS-DYNA970 Keyword User's Manual, Livermore, 2003.
- 11) S.H. Lee, C.S. Han and S.I. Oh, "Comparative crash simulations incorporating the results of sheet forming analyses", *Engineering Computations*, 18 (5/6), 744-758, 2001.
- 12) S. Simunovic, J. Shaw, G. A. Aramayo, "Steel Processing Effects on Impact Deformation of Ultra Light Steel Auto Body" , SAE Paper, 2001-01-1056, 2001.
- 13) C. H. Lee, H. Huh, "Blank design and strain estimates for sheet metal forming processes by a finite element inverse approach with initial guess of linear deformation", *J Mater Process Tech*, 82, 145-155, 1998.
- 14) Y. Q. Guo, J. L. Batoz, H. Naceur, S. Bouabdallah, "Recent developments on the analysis and optimum design of sheet metal forming parts using the simplified inverse approach", *Computers and Structures*, 78, 133-148, 2000.
- 15) J. L. Batoz, Y. Q. Guo, F. Mercier, "The inverse approach with simple triangular shell elements for large strain predictions of sheet metal forming parts", *Engineering Computations*, 15(7), 864-892, 1998.
- 16) Y. Bao, S. Hu , Z. Lang , P. Hu, "Fast Simulation of 3-D Surface Flanging and Prediction of the Flanging Lines Based On One-Step Inverse Forming Algorithm", *Proc. NUMISHEET2005*, Detroit, AIP, 2005.