

FE 해석을 통한 충격흡수시설의 개발

강영호* · 김홍주* · 박동화** · 김계수** · 강범수***

Development for Shock Absorption System by Using FE Analysis

Y. H. Kang*, H. J. Kim*, D. H. Park**, K. S. Kim** and B. S. Kang***

Key Words: Crashworthiness, Energy Absorption, Safety

Abstract

This paper describe a finite element computer simulation of a absorption system using full scale car crash test. The full scale test selected for this study is a 80kmh frontal, side and 25% offset impact of a 1993 Ford Taurus vehicle into a absorption system. This absorption system has external rubber and internal steel pannel. This simulation has completed for decision of these components' energy absorption performance. Dynamical performance of this system and movement are obtained from this simulation. and then We can appreciate the safety of passenger from measure the vehicle C.G's acceleration.

1. 서 론

본 연구의 충돌해석 목적은 주어진 충돌 조건에서 차량이 받는 동적인 충격력을 정확히 산정하고 충격흡수시설이 주어진 성능조건을 만족하는지의 여부를 검토하여 이 결과를 충격흡수시설의 설계에 반영하는데 있다. 일반적인 충돌해석의 경우 실물실험방법, 하이브리드방법 및 수치실험방법으로 나눌 수 있다.

① 실물실험방법

실제 자동차나 축소 모델의 자동차에 의한 충돌 실험

② 수치실험방법

유한요소법을 이용한 해석법으로 각 부재를 유한개의 요소들로 나누어 수학적으로 해석하는 방법

③ 하이브리드방법

①과 ②를 혼합하는 방법으로 구조물의 부재중

물성치를 정확히 알 수 없거나 전체 거동에 현저한 영향을 미치는 부재를 선택하여 실물실험 후 이 부재들의 거동을 반영하는 수치요소(보, 트러스, 마찰감쇠요소)를 사용하여 수치해석하는 방법

위의 방법 중 가장 신뢰할 수 있는 방법은 실험방법이지만 경제적인 이유로 여러 충돌조건에서 실물실험을 실시한다는 것은 거의 불가능한 일이다. 그러나 하이브리드 방법을 사용할 경우 실물실험의 횟수를 현저히 줄일 수 있을 뿐 아니라 실물 실험이 갖는 장점을 최대한 활용할 수 있다.^[1,2]

2. 재료 비선형 및 기하학적 비선형^[1,2]

구조물의 선형, 탄성거동을 해석하는 경우에는 변위와 하중은 서로 선형적 관계에 있다. 이러한 선형관계로 가정할 수 있는 경우는 재료의 응력-변형을 관계가 선형일 때와 하중이 상대적으로 작거나 구조물의 강성이 상대적으로 강함으로 인해 하중작용 후에도 원래의 기하학적 형태가 변하지 않은 경우라 할 수 있다.

* 부산대학교 대학원
** 동일교부벨트(주)
*** 부산대학교 항공우주공학과

구조물의 정확한 거동을 해석하기 위해서는 소성영역을 고려할 수 있는 비선형 해석이 요구된다. 변형도와 변위 사이의 관계식에서 미소 변형 해석에서 무시했던 고차항을 포함시켜야 하는 경우는 기하학적 비선형해석이 필요하게 된다.

재료의 비선형과 기하학적 비선형을 독립적으로 고려하는 경우보다는 두 비선형 조건을 함께 고려해야 하는 경우가 더 일반적이다. 즉, 하중이 증가함에 따라 구조물의 변형이 구조물의 크기에 비해 무시할 수 없을 만큼 커지면서 구조물내 한 부분의 응력이 탄성 범위를 넘어서게 되는 경우 탄·소성 대변형 해석을 수행하게 되며 본 연구의 경우도 이에 해당하게 된다. 차량이 충격흡수 시설에 충돌하였을 경우 충격흡수시설은 차량의 운동에너지를 점차적으로 흡수하게 설계되어야 하므로 충격흡수시설은 필수적으로 소성거동과 대변형을 나타낸다. 이러한 충격흡수시설의 동역학적 특징은 강한 비선형성을 내포하고 있으며 비선형 해석이 필수적이라 할 수 있다.

선형-탄성영역에서 구조물의 강성행렬은 일반적으로 다음과 같이 나타낸다.

$$K = \int_{\Omega} B^T E B d\Omega \quad (1)$$

그러나 비선형 해석의 경우에는 응력-변형을 관계와 변형률-변위관계에서 비선형성을 고려해야 하므로 변형률 행렬 [B]에는 기하학적 비선형 변위장의 상태를, 재료행렬 [E]는 재료의 비선형 상태를 표현할 수 있어야 한다. 따라서 [B]와 [E]는 일정한 값이 아닌 비선형 함수의 형태로 나타나게 된다. 이러한 비선형성 때문에 동역학적 문제의 경우 각 시간 간격마다 강성행렬을 반복적으로 다시 구성해야 되며 이 때문에 선형 탄성 문제의 경우보다 계산량이 기하급수적으로 늘어난다.

2.1 재료 비선형 강성 행렬의 계산

비선형 강성행렬은 응력상태에 따라 구성되는데 일반적으로 소성이론을 따른다. 소성이론은 항복조건(Yield Criterion), Flow Rule, 경화법칙(Hardening Rule)의 3가지 부분으로 이루어진다.

① 항복조건(Yield Criterion)

항복조건은 소성변형이 일어나기 시작하는 응력 상태를 나타내는데 항복 함수는 식 (2)와 같다.

$$F(\sigma, \alpha, W_p) = 0 \quad (2)$$

여기서 $\alpha = \int C d\epsilon^p$, $W_p = \int \sigma^T d\epsilon^p$, $d\epsilon = d\epsilon^e + d\epsilon^p$ 로 정의되고 F는 소성이론에 따른 항복함수이고 C는 소성경화계수(Hardening Parameter)이다. 여기서 F가 0보다 작으면 탄성영역, 같으면 항복이며 큰 경우는 물리적으로 존재하지 않는다.

② Flow Rule

Flow Rule은 소성상태에서 소성변형률의 변화량을 정의하는 법칙이다. 응력의 단위를 가지는 소성 포텐셜을 정의하면 식 (3)과 같다.

$$Q = Q(\sigma, \alpha, W_p) \quad (3)$$

이때, $d\lambda$ 가 비례상수라면, 소성변형률의 증분은 $d\epsilon^p = \left(\frac{\partial Q}{\partial \sigma}\right) d\lambda$ 로 표현된다. 만약 Q와 F가 같으면 그 재료의 소성거동은 Associate Flow Rule을 따른다고 하며 연성 재료가 이에 해당하며 같지 않으면 Non-Associate Flow Rule을 따른다고 하고 흠과 같은 재료가 이에 해당한다.

③ 경화 법칙(Hardening Rule)

항복 조건(Yield Criterion)에서 정의한 α 와 소성 변형에너지 W_p 에 의해서 경화법칙이 정해진다. 항복함수 F를 미분하고 위의 관계를 다음 식 (4)에 대입하면

$$d\sigma = E d\epsilon^e = E(d\epsilon - d\epsilon^p) = E_{ep} d\epsilon \quad (4)$$

와 같이 표현되고, 여기서 $E_{ep} = E - E\left(\frac{\partial Q}{\partial \sigma}\right) C^T$,

$$(C_i)^T = \frac{\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right)^T E}{\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right)^T E\left(\frac{\partial Q}{\partial \sigma}\right) + C\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right)^T\left(\frac{\partial Q}{\partial \sigma}\right) - \frac{\partial F}{\partial W_p} \sigma^T\left(\frac{\partial Q}{\partial \sigma}\right)}$$

따라서 절점하중의 증가량에 대한 절점변위의 증가분은 다음과 같은 접선강성행렬이 된다.

$$K_i = \int_{V_e} B^T E_{ep} B dV \quad (5)$$

2.2 기하학적 비선형 강성 행렬

보통 공학적 구조물은 그 크기에 비해 변형 및 변위가 매우 작으므로 변형후의 형상은 거의 변화가 없으므로 변형률을 나타낼 때 2차 미분항을 무시하였으나 본 연구에서의 대상 구조물의 해석에서는 각 부재자체의 변형과 전체적인 변형이 크므로 다음과 같이 변형률을 정의하여야 한다.

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_k}{\partial x_j} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right] \quad (6)$$

이때 2차 미분항에 의해서 나타나는 비선형부분을 강성행렬의 구성시 추가시켜줌으로서 기하학적 비선형성을 고려할 수 있다.

2.3 경계조건의 비선형성

충돌한 자동차가 충격흡수시설의 측면에 접촉한 후 충돌면을 따라서 진행함으로써 초기에는 접촉하지 않아서 상호작용이 없던 부분이 충돌이 진행됨에 따라서 접촉하게 된다. 이러한 접촉문제는 비선형문제의 특수한 범주에 들게 된다. 이러한 접촉문제의 해결방법은 접촉이 예상되는 두 물체상의 절점에 특수한 접촉요소를 사용할 수도 있고 또는 접촉한 두 면 사이에서의 평형조건 및 적합조건을 추가적인 제한 조건으로서 전체구조물의 거동에 추가시켜주는 방법이 있다. 접촉요소를 사용하는 방법은 접촉이 예상되는 두 절점 사이에 초기에는 강성이 없다가 일정한 변위가 생기면 강성이 급격히 증가하는 비선형 요소를 연결하여 접촉 현상을 고려하는 방법이다.

새로운 제한조건을 주는 방법에는 Lagrange Multiplier Method와 Penalty Function Formulation Method 등이 있고 이 중에서 Lagrange Multiplier Method는 보다 정확하지만 추가적인 자유도가 필요하고 해의 수렴성이 문제가 되는 단점이 있다.

3. 충돌해석모델링(LS-DYNA3D)^[3,4]

Pre/Post-Processor : FEMB (Finite Element Model Builder)

Analyzer : LS-DYNA3D Version 940

Post-Processor : LS-TAURUS

3.1 충격흡수시설의 모델링

일반적으로 공학적 구조물의 수치해석에서 가장 많은 오차를 발생시키는 부분은 실제 구조물을 유한요소들의 조합으로 이루어진 수치적 모델로 이상화하는 과정이다. 이 부분은 숙련자의 경험이나 직관에 의해 이루어질 수 밖에 없다. 특히 재료적 비선형성이 내포된 문제의 경우는 재료의 모델링을 어떻게 하느냐에 따라 결과가 많은 차이를 보이게 된다. 각 부재의 비선형거동은 실험을 통하여 결정된 값을 사용하여 정의하면 좋은 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 되도록 실제 구조물의 거동에 최대한 근접하면서도 효율적인 모델링을 위해 노력하였다.

3.1.1 충격 흡수시설의 모델링

충격흡수시설은 실제로 3차원의 모델을 사용하였다. 충격흡수시설이 설치될 때에는 설치 장소의 상황에 따라 8단까지의 셀을 사용할 수 있으나 하드웨어상의 문제로 인하여 2단 셀의 충격흡수시설에 대한 3차원 모델링(Fig.1)을 사용하였다. 충격흡수시설은 3개의 Part로 구성된다. 제품의 외피에 해당하는 부분은 고무로 구성되고 내부에 각 셀을 연결하는 철판 그리고 충돌에너지가 흡수할 수 있는 지그재그형태의 철판으로 구성된다. 모두 8절점 블럭요소를 사용하여 FE 모델을 구성했다. 모델의 경계조건은 끝단은 XYZ 모두 구속, 중간 철판은 YZ 구속, 모델의 개요는 Table. 1과 같다.

제품의 동적거동 특성상에 맞춰 지그재그 철판의 각진 부분의 요소를 많이 잡는 등의 흡수시설의 찌그러지는 방향에 대해 요소의 수를 많이 하여 모델을 완성하였다. 두 단의 셀 중에서 앞단의 셀은 뒤의 셀에 비해 높이가 2/3이고 전체 높이의 가운데에 위치한다. 이는 충격흡수시설의 충돌동안 거동이 앞에서 뒤로 점차 찌그러드는데 1차적으로 작은 셀에서 감속도를 증가시키지 않기 위해서이다. 충격흡수시설의 주로 외곽에 위치하는 고무구성품은 LS-DYNA3D의 Type1인 Elastic Material 물성치를 취했다. 지그재그 철판과 중간에 연결판은 SS400의 물성치를 LS-DYNA3D의 Type 24인 Piecewise Linear Plasticity Material 물성치를 사용하였다. 이것은 응력 대 변형률의 관계를 8개의 데이터 점으로 입력할 수 있다.

4.2 충돌해석의 실차 모델링

실차의 모델은 미국의 NCAC (www.ncac.gwu.edu)을 통해 입수하였다. 본 시뮬레이션에 사용된 실차 FE Model은 Ford Taurus 1991 에 근거하고 있다. 그림은 Ford Taurus의 FE 모델이다. 이 모델은 "Flat Rigid Wall Frontal Impact"를 위해서 개발된 모델이다.^[5,6] 그러므로 이 모델의 앞부분은 세밀하게 모델링 되었고 중간과 뒷부분은 덜 세밀하게 또는 범요소를 사용하였다. 본 시뮬레이션과 같이 모델의 중간과 뒷부분은 별로 큰 변형이 없고 전체적인 질량의 분포와 모델의 관성은 덜 세밀한 요소 또는 범요소가 결과의 정확성에 특별히 중요한 역할을 하지는 않는다. 실차의 모델은 세부적으로 123개의

Part로 되어 있다. 각 Part는 자동차의 부품으로 표현된다. 이중 104개의 Part는 셸요소를 사용하였고 18개의 Part는 Sheet Metal Component사이의 연결에 사용되는 Steel Bar를 표현하기 위해 빔요소를 사용하였다. 한 Part는 라디에이터를 표현하기 위해 블럭요소를 사용하였다.^[6]

셸요소는 삼각과 사각평면요소의 두 가지가 사용되었고 모두 LS-DYNA3D 셸공식의 기본이 되는 Belytscho-Tsay Shell Theory에 근거한 수식을 사용한다. 여기에 사용된 물성치 모델은 일반적인 Isotropic Elastic-Plastic 재료이다. 빔요소는 Hughes-Liu Beam 공식에 근거한 Isotropic Elastic 물성치 모델이다(Type.1). 블럭요소는 Constant Solid Element 수식을 사용한 Metallic Honeycomb (Type.26)이다. 실차 모델의 각 Part들 사이의 접촉문제는 Single Surface Interface (Type.13)를 사용하였다.

Fig.2는 시뮬레이션을 위해 앞의 충격흡수시설의 모델과 실차의 모델을 결합시켜 놓은 것이다. 실차의 초기 속도를 80km/h(22,222mm/s)로 주고 시뮬레이션을 하고 자동차의 C.G.인 사이드 브레이크 근방의 절점에 대한 정보를 해석해서 필요한 속도 및 가속도 등의 데이터를 획득하게 된다.

충격흡수시설의 안전 기준인 정면 충돌, 25% offset, 15° 측면 충돌의 세 가지 유형에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다.

4. 결론

시뮬레이션 결과는 승객의 안전도를 확인하는 작업으로 앞에서 언급했듯이 실차 모델의 C.G. 근방의 절점 데이터를 분석해서 안전 기준에 마련된 C.G.의 속도와 가속도를 비교함으로써^[7,8] 충격흡수시설의 안정성 등을 확인한다. 세 가지 경우중의 정면 충돌 시뮬레이션 그림을 Fig.3에 나타냈다.

세 가지 경우 SAE-60 필터를 사용하여 각각의 속도·감속도 그래프 및 그 값을 표(Table 3~Table 8)로 나타낸 것이다.^[5]

정면 충돌 해석의 시뮬레이션 결과(Fig.3~Fig.5)에서 보면 충격흡수시설의 전면에서부터 차례대로 찌그러드는 경향을 보인다. 이는 25% offset 충돌 해석 결과(Fig.6~Fig.7)에서도 같은 경향을

볼 수 있다. 어느 정도 일정한 속도로 충격흡수 시설이 찌그러든다. 이것은 그래프상의 속도 변화를 보면 같은 경향임을 알 수 있다. 정면 충돌 해석에서 속도의 변화 정도를 보면 안정되게 감속함을 알 수 있다. 속도 그래프에서 보면 전체적인 속도 감소 정도가 완만하여 안정적임을 알 수 있다. 실제 설치될 제품이 8단셀 정도임을 감안하면 단 수를 증가시킨다면 보다 완만한 속도 감소 효과를 얻을 수 있을 것이다. 정면 충돌에서의 감속도 안전 기준인 12G를 감안하면 해석에서의 감속도는 최고치 17G 정도로 높은 수치 결과가 나왔지만 이는 실제로 설치될 제품인 8단셀에 비해 그 규모가 작은 만큼 단 수를 증가시킨다면 감속도의 크기를 줄일 수 있을 것이다. 25% offset 충돌 해석의 시뮬레이션의 각 step별 그림을 보면 정면 충돌 시뮬레이션의 결과와 거의 유사한 경향을 볼 수 있다. 25% offset 충돌이지만 충격흡수시설의 거동은 정면 충돌에서의 거동과 유사하게 축선상을 기준으로 할 때 양쪽 모두 비슷한 정도의 변위를 가지고 거동하고 있다. 이는 정면 충돌뿐 아니라 offset 충돌에서도 안정된 거동을 하고 있음을 알 수 있다. 속도 변화 그래프를 보면 약간의 급격한 변화를 보이지만 전체적으로 보면 완만한 속도 변화를 보여준다. 또한 감속도도 18G 정도의 높은 수치이지만 실제 설치될 제품은 8단셀 충격흡수시설을 감안하면 이는 셸을 증가하여 배치하면 감속도 수치를 줄일 수 있다. 충격시 차체의 회전에 많은 영향을 미칠 y 방향 가속도는 진동을 보이지만 그 수치가 작다.

측면 충돌 해석 결과(Fig.8~Fig.9)의 경우 시뮬레이션 과정의 그림을 보면 차체가 충격흡수시설의 측면을 따라 거동함을 알 수 있다. 측면 충돌은 차체의 거동이 충격흡수시설과 충돌후 회귀할 수 있는냐가 관건이다. 본 연구의 측면 충돌 해석은 그 거동이 회귀성을 가지고 x, y 방향의 감속도 모두 작은 값을 보였다.

후기

이 논문은 1999년도 두뇌한국21사업 핵심분야에서 지원받아 수행된 연구임

참고문헌

- (1) 한국도로공사 도로연구소, "충격흡수시설개발 연구(I)," 1992년도 연구보고서.
- (2) 한국과학기술원 토목공학과, "충격흡수시설의 Computer Simulation 및 효과 분석," 1993. 12.
- (3) *FEMB User's Manual Version 26.5.*
- (4) *LS-DYNA Keyword User's Manual Version 940.*
- (5) Abdullatif K. Zaouk, Nabih E. Bedewi, Cing-Dao Kan, and Hansjoerg Schinke, "Evaluation of a Multi-Purpose Pick-up Truck Model Using Full Scale Crash Data with Application to Highway Barrier Impacts."
- (6) Dhafer Marzougui, Cing-Dao Kan, and Nabih E. Bedewi, "Development and Validation of NCAP Simulation Using LS-DYNA3D."
- (7) Mr P. S. Ko, Mr N. S. Chung and Mr Y. Y. Lee, Hyundai Motor Company, "Frontal Crash Tests, A Comparison of All Body's Characters(30mph/NCAP/OFFSET)".
- (8) S. H. Park, D. C. Han, S. Y. Kang, H. Y. Kim, and D. K. Min, "Analysis of Frontal Carsh and Side Impact by Using Developed Explicit Program."

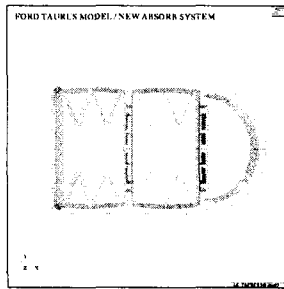


Fig.1 충격흡수시설의 FE모델

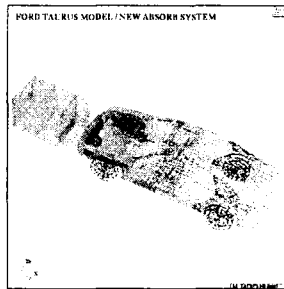


Fig.2 정면 충돌 모델

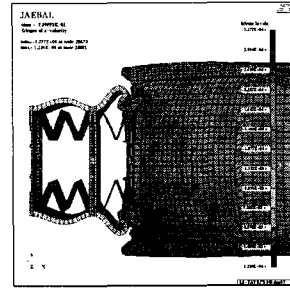


Fig.3 정면충돌 step 13

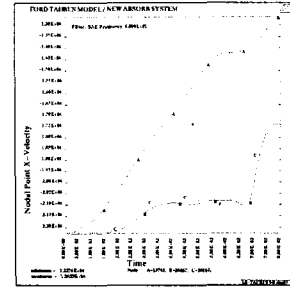


Fig.4 정면충돌 X-속도

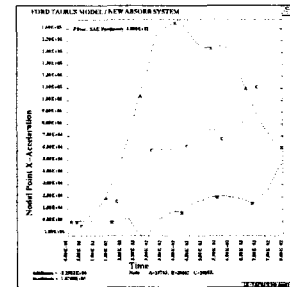


Fig.5 정면충돌 X-가속도

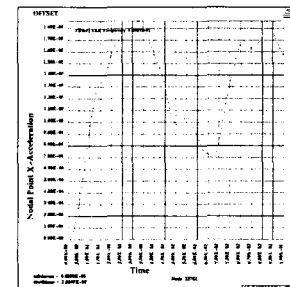


Fig.6 offset X-가속도

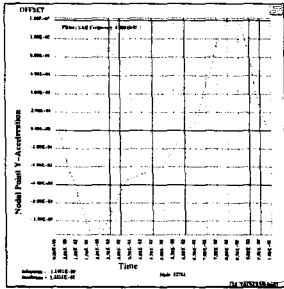


Fig.7 offset Y-가속도

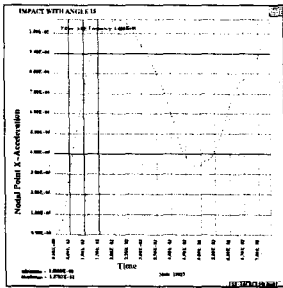


Fig.8 측면충돌 X-가속도

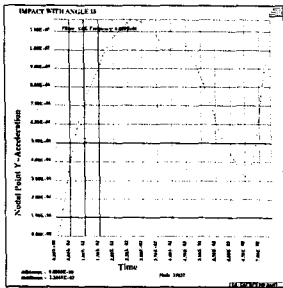


Fig.9 측면충돌의 Y-가속도

Table. 1 충격흡수시설 모델개요

폭	1000mm	
높이	900mm	
지그재그철판	전방셀	600mm
	후방셀	900mm
Part	3	
총절점수	11921	
총요소수	6039	

Table. 2 실차 모델의 개요

Parts	123
총절점수	26,741
총셀요소수	27,847
총블럭요소수	341
총빔요소수	140

Table. 3 정면 충돌의 X속도

시간 (s)	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08
속도 (m/s)	-22.2	-21.8	-21.2	-18.5	-16.9	-15.2	-14.3	-14.1	-12.6

Table. 4 정면 충돌의 X가속도

시간(s)	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08
가속도 (m/s ²)	0	9	51	129	168	145	140	90	60
가속도 (G)	0	0.92	5.20	13.15	17.13	14.78	14.27	9.17	6.12

Table. 5 25% offset 충돌의 X가속도

시간 (s)	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
가속도 (m/s ²)	0	95	158	180	159	98	88	83	167	173	157
가속도 (G)	0	9.68	16.1	18.34	16.2	9.98	8.97	8.46	17.02	17.63	16.0

Table. 6 25% offset 충돌의 Y가속도

시간 (s)	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
가속도 (m/s ²)	0	-70	-115	-69	-48	-35	-5	52	120	80	-2
가속도 (G)	0	-7.14	-11.7	-7.03	-4.89	-3.57	-0.5	5.3	12.23	8.15	-0.2

Table. 7 측면 충돌의 X가속도

시간 (s)	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07
가속도 (m/s ²)	0	70	107	94	60	35	63	90
가속도 (G)	0	7.13	10.9	9.58	6.11	3.56	6.42	9.17

Table. 8 측면 충돌의 Y가속도

시간 (s)	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07
가속도 (m/s ²)	0	72	107	104	100	86	44	65
가속도 (G)	0	7.3	10.9	10.6	10.2	8.7	4.5	6.6