

<논문> SAE NO. 2000-03-0079

자동차 충돌해석에 의한 단순화된 차체 강성 방정식의 유도

The Derivation of Simplified Vehicle Body Stiffness Equation Using Collision Analysis

장인식*, 채덕병**
Insik Jang, Deokyoung Chae

ABSTRACT

The deformation characteristics is one of the major factors to resume the crash configuration in collision accident reconstruction. Crash analysis are carried out using finite element method and body stiffness equations representing force-deformation relationship are derived. Two different crash conditions: 1) frontal barrier impact, 2) frontal impact between cars, are given for the derivation of the equations. The stiffness coefficient of equation by method 2) is larger than that by method 1). Crash analysis between two vehicles is accomplished with three crash angles and three velocities for each angle condition. The deformations are measured for six selected points and deformation energies are calculated using the derived equations. Equation by method 2) results in better estimation of deformation energy than that by method 1). for all crush configurations. The estimated energies can be utilized as one of indices to identify the type of the collision accident result.

주요기술용어 : Collision Accident Reconstruction(충돌사고재구성), Body Stiffness Equation(차체강성방정식), Force-Deformation Relationship(힘-변형량 관계), Deformation Energy(변형에너지)

Nomenclature

C : crush, mm

ΔV : velocity variation, mm/s

M : mass, kg

w : width, mm

Subscripts

f : final

C : crash

1. 서론

자동차의 숫자가 증가하여 차량간의 충돌 사고가 빈번해지고 그 형태가 복잡해짐에 따라 사고의 분석은 점점 더 중요한 연구 대상이 되어 가고 있다. 자동차의 충돌 후 상황을 근거로 하여 충돌 전 상황을 재현하는 충돌 사고재구성(collision accident reconstruction)에 관한 대부분의 연구는 지금까지 동역학적 측면에서 자동차가 강체라는 가정 하에서 이루어졌으며 변형을 고려한

* 회원, 홍익대학교 기계설계학과

** 회원, 홍익대학교 대학원

경우에도 단순화된 모델이 많다. 그리고 자동차의 충돌 후 변형 형상을 가지고 충돌 전 차량이 가지고 있던 운동에너지를 이용하여 사고 재구성을 하는 방법도 진행되고 있으나, 이 방법을 사용하기 위해서는 실제 대표적인 충돌 상황에 대한 실험을 통한 차량의 충돌 후 변형데이터를 필요로 한다. 따라서 이 방법은 변형데이터의 신뢰도는 높을지 모르지만, 경제적으로 그 한계가 있어 계산에 의한 방법에 대한 연구가 점점 증가하고 있다.

현재, 사용되고있는 변형에너지를 사고재 구성에 이용한 연구는 Campbell 이 차체를 단순 스프링으로 간주하고 변형에너지를 구하는 방법이 최초로 시도되었으며,¹⁾ Strother 등은 충돌 실험을 통하여 차량의 크기에 따라서 강성계수를 측정하고 변형에너지를 계산하는 방법을 개발하였다.²⁾ Prasad는 이전의 방법을 개선하여 영구변형상태로부터 정면과 후방 충돌시 흡수 에너지를 계산하고 국립 고속도로 교통 안전국(NHTSA)의 실제 차량 데이터와 비교하였다.³⁾ 이를 위해서 먼저 차량의 벽면 정면 충돌에 대한 다양한 속도조건에서의 힘-변형량 관계를 구하였다. Ueyama 등은 실제 차량간의 충돌실험 후 충돌상황에 따라 변형형상을 도시하고 계열화를 시도하였다.⁴⁾ Fonda는 지금까지의 충돌 에너지를 계산하는 자동차 모델을 개선하여 완전하고 보다 논리적인 계산 방법을 고안하였다.⁵⁾ 이와 같이, 차량을 단순화하여 변형에너지를 구하고 변형형상의 형상화는 시도되었으나 수식화 된 경우는 드물다.

본 연구에서는 국내에서 생산되는 실제 차량을 수치적 모델로 구현하고, 유한요소법을 이용하여 여러 번의 반복 해석을 통하여 실제 차량의 힘-변형량 관계와 유사한 힘-변형량 관계를 유도하고자 한다. 이를 위하여 차량의 변형에너지 계산에 사용되는 강성방정식의 계수를 구하는 방법으로 먼저 기존

Prasad논문에 발표된 방법인 벽면 정면충돌을 이용한다. 강성방정식을 구하는 방법으로는 실험적인 방법이 많이 사용되었는데, Neptune은 차량 간의 부분 충돌의 재현을 위하여 차량의 부분 강성특성을 유도하여 정면 충돌에 의한 결과와 비교하였다.⁶⁾ 여기서는 참고문헌에서 사용한 실차 충돌실험을 대신하여 유한요소 해석을 수행한다. 그리고 벽면충돌해석으로 구한 단순화된 차체의 강성방정식을 이용하여 여러 가지의 다른 조건(충돌 방향과 충돌 속도)에 대한 차량간 충돌에서 차량의 변형에너지를 계산한다. 실제 차량의 변형에너지를 대신하여 유한요소 상용코드로부터 변형체 역학의 복잡한 식을 이용하여 계산되는 에너지 값을 참값으로 가정하고 변형형상과 강성방정식으로부터 구한 변형에너지와 비교한다. 그리고 벽면정면 충돌해석을 차량간 충돌해석에 확장해서 적용함으로써 발생되리라 생각되는 에너지의 오차를 줄이기 위하여 차량간 충돌해석을 통해서 차체의 강성방정식을 다시 구한다. 다시 유도된 강성방정식을 에너지 계산에 이용하고, 벽면 정면 충돌에 의한 결과를 비교하여 보다 나은 단순화된 차체 강성방정식 모델을 구하고자 하였다.

2. 차량의 강성방정식의 유도

2.1 벽면 정면충돌

차체의 강성을 단순한 스프링으로 간주하여 힘-변형량 관계로 표시되는 강성방정식을 구하여, 변형에너지를 계산하기 위해서는 차량의 벽면 정면 충돌 시험 또는 해석이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 실차 충돌시험과 비교하여 경제적으로 효용가치가 높은 유한요소법을 이용한 차량의 벽면 정면 충돌 해석을 수행하였다.

사용된 유한요소 모델은 국산 중형 차량을 기본 모델로 하고, 본 연구의 목적에 부합

할 수 있게 하기 위하여 일반적인 충돌해석에 사용되는 유한요소 모델과 비교하여 많은 부분들이 간략하게 구성되어있다. 충돌시 접촉이 일어나는 차체의 앞 부분은 비교적 작은 크기의 평판 요소로 요소화하고 충돌시 변형이 작거나 비교적 덜 중요하게 여겨지는 부분(엔진룸 내부, 바퀴, 동력전달부, 도어 등)은 단순화된 요소를 사용하였다.

벽면 정면 충돌해석의 조건은 강체의 벽에 각각 20 mph(32.2 km/h), 25 mph(40.2 km/h), 30 mph(48.3 km/h), 35 mph(56.3 km/h), 40 mph(64.4 km/h)의 초기속도를 가지고 충돌하는 것이다. 이렇게 다섯 단계에서 해석을 수행하여 각 속도에 대한 차체의 평균 변형량을 계산하고, 변형에너지를 계산하기 위한 힘-변형량 관계를 구하게 된다. Fig. 1에는 충돌상황을 설정한 유한요소 모델을 나타내었다.

벽면 정면 충돌해석에서 얻은 평균 변형량과 충돌속도와의 관계를 선형방정식의 형태로 가정하고 나타내면 식(1)과 같이 표시할 수 있다.

$$\Delta V_c = b_0 + b_1 C_f \quad (1)$$

여기서, ΔV_c 는 충돌이 일어나는 동안의 속도변화이고, b_0 , b_1 은 각각 속도변화 그래프에서의 절편과 기울기를 나타내며, C_f 는 영구변형량(residual crush)의 평균치를 나타낸다. 그리고 힘과 변형량의 관계를 선형적이라고 가정하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F/w = A + BC_f \quad (2)$$

여기서, F 는 변형저항력이고, w 는 접촉 폭을 의미하며, A 는 변형이 시작되는 힘의

크기를 나타내는 절편이며, B 는 차체의 강성계수를 의미하는 기울기이다. 충돌이 일어나는 동안 초기 운동에너지가 모두 변형에너지로 전환되었다면 충돌로 인한 흡수에너지의 관계로부터 다음의 식을 구할 수 있다.

$$A = Mb_0 b_1 / w \quad (3)$$

$$B = Mb_1^2 / w \quad (4)$$

여기서, M (1233 kg)은 차량의 질량을 나타낸다.

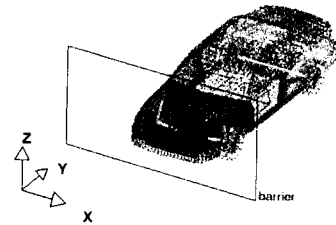


Fig. 1 Finite element model of a car for frontal barrier impact

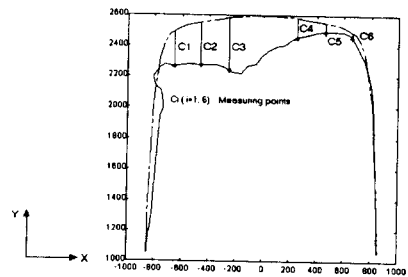


Fig. 2 Measuring location of deformation (solid-dot : Undeformed shape, solid : deformed shape)

Fig. 2에 영구변형량을 계산하기 위하여 변형량을 측정하는 부분과, 측정하는 방법이 나타나 있다. 변형된 차량중심에서 좌우로 각각 3개의 위치에서 변형 전 차량의 형상과

변형 후 차량의 변형 형상 사이의 차체의 y-방향 변형량을 취하여 총 6개의 변형량을 평균한 값을 각각의 속도에서 영구변형량으로 간주하고, 속도에 따른 5개의 영구변형량(32 kph : 246 mm, 40 kph : 325 mm, 48 kph : 402 mm, 56 kph : 482 mm, 64 kph : 582 mm)을 이용하여 수치적으로 적합(fitting)하면 다음과 같은 선형방정식을 얻을 수 있다.

$$\Delta V_c = 8.88 + 0.0967C_f \text{ [km/h]} \quad (5)$$

식(5)에서 구해진 b_0 , b_1 값을 식(3), (4)를 이용하여 힘-변형량 관계를 구하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$F/w = 57.82 + 0.63C_f \text{ [N/mm]} \quad (6)$$

Table 1 에서 보듯이 벽면 정면 충돌의 경우 유한요소해석에 의한 결과를 정확한 변형에너지라고 하면 단순화된 강성방정식을 이용한 결과와 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 결과가 속도에 따라서 차이는 있으나 약 2~11%의 오차를 가지고 있다. 이것으로 벽면 정면 충돌해석 시 복잡한 역학적 계산에 의한 에너지 계산을 간단한 스프링으로 대체할 수 있음을 알았다.

Table 1 Comparison of deformation energy for barrier impact

Velocity (mph)	LS-DYNA3D (N-mm)	force-deform (N-mm)	Error (%)
20	4.2595E+07	4.3592E+07	2.3
25	6.5173E+07	6.8072E+07	4.3
30	9.4403E+07	9.6939E+07	2.6
35	1.2805E+08	1.3224E+08	3.2
40	1.6482E+08	1.8383E+08	10.3

2.2 차량간 정면충돌

2.1 과정에서의와 같이 차량의 벽면 정면충돌 해석으로부터 구한 강성계수를 이용하여 차량간의 충돌 시 변형에너지를 계산할 경우에는 유한요소 상용코드로부터 산출되는 에너지값과 비교해 보았을 때 부분적으로 오차가 크게 나타났다. 따라서 차량간 충돌에서

의 차체 변형에너지를 계산하기 위하여 차량간 정면 충돌해석에 의한 강성방정식의 도출이 선행되어야 한다고 판단된다. 차량간 정면 충돌해석에 사용된 충돌상황은 Fig. 3에 나타나 있는 것처럼 두 차량이 같은 충돌속도(20, 30, 40 km/h)를 가지고 충돌하는 것이다. 벽면충돌해석과 동일한 방법으로 각각의 충돌속도 단계에서 차량의 평균 변형량(20 kph : 100 mm, 30 kph : 210 mm, 40 kph : 298 mm)을 측정하여 속도-변형량 관계를 계산하고, 변형에너지를 계산하기 위한 힘-변형량 관계를 구하게 된다. 벽면 충돌해석에서 구한 속도-변형량 관계, 힘-변형량 관계와 동일한 방법으로 구한, 차량 간의 정면충돌해석에 의한 중형차량의 속도-변형량 관계와 힘-변형량 관계가 식 (7)과 식 (8)에 나타나 있다.

$$\Delta V_c = 2.77 + 0.0273C_f \text{ [km/h]} \quad (7)$$

$$F/w = 65.81 + 0.65C_f \text{ [N/mm]} \quad (8)$$

식(7)의 속도-변형량 관계를 벽면충돌해석에 기인한 것과 비교해 보면 b_0 와 b_1 모두 차량간 충돌해석으로 구한 값이 더 작음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 4에 나타난 두 그래프를 통해서 변형에너지를 구하기 위한 힘-변형량 관계인 식(8)에서는 차량간 충돌해석으로부터 구한 A 와 B 값이 벽면 충돌해석으로 구한 값보다 더 크게 나타나는 것을

쉽게 확인할 수 있다. 이와 같이 구해진 두 종류의 강성방정식은 충돌사고 재구성에 필요한 여러 가지 충돌 상황에서의 차량간 충돌변형에너지의 계산에 이용된다. 차량간 충돌시 차체의 변형에너지를 계산하는데 어떤 강성방정식이 더 효과적인지는 다음에 비교한다.

Table 2 에는 벽면 정면 충돌의 경우에서와 마찬가지로 변형에너지에 있어서 유한요소해석에 의한 결과와 차량간의 충돌에 의하여 구한 단순화된 강성방정식을 이용한 결과를 비교하였다. 저속에서는 에너지의 오차가 꽤 크게 나타났으나 30 km/h 이상에서는 5% 이하의 오차를 가지고 있다.

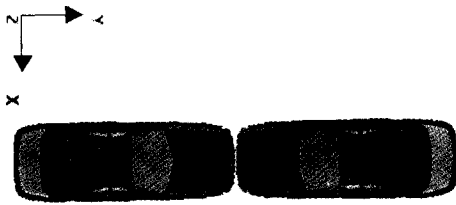


Fig. 3 Head on collision configuration between two cars

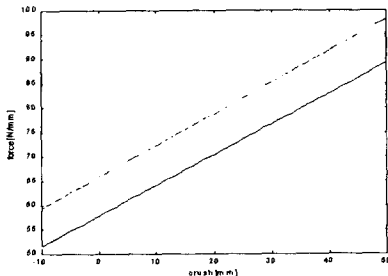


Fig. 4 Force-Deformation relationship(solid : barrier impact, solid-dot : collision between two cars)

Table 2 Comparison of deformation energy for head on collision

Velocity (mph)	LS-DYNA3D (N-mm)	force-deform (N-mm)	Error (%)
20	3.4546E+07	2.5591E+07	25.9
25	5.3581E+07	4.5512E+07	15.1
30	7.6241E+07	7.3959E+07	3.0
35	1.0333E+08	1.0228E+08	1.0
40	1.3349E+08	1.2687E+08	5.0

3. 여러 충돌상황에서 변형에너지계산

3.1 벽면충돌에 의한 강성방정식을 이용한 경우

위에서 구한 단순화된 강성방정식을 이용하여 차량간 충돌시의 변형에너지를 계산하기 위하여 각 차량이 동일한 초기속도를 가지는 Fig. 5와 같은 세 가지의 충돌 상황을 설정하였다. Fig. 5(a)의 경우(Crash config. #1)는 50% 오프셋 정면충돌이며, Fig. 5(b)에는(Crash config. #2) 두 차량의 충돌각도가 150° 이면서 #1 차량의 좌측 모서리 부위와 #2 차량의 중앙부가 접촉하는 충돌형상이 나타나 있다. Fig. 5(c)에는(Crash config. #3) 두 차량의 충돌각도가 135° 로 기울어진 경우의 충돌상황으로 #1 차량의 좌측 모서리 부위와 #2 차량의 우측 모서리가 접촉하는 충돌상황을 나타내었다. 각 충돌상황에 대하여 충돌속도가 20 km/h, 30 km/h, 40 km/h 의 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 차량간의 충돌에서 차체의 변형형태는 아주 복잡하지만 본 연구에서 고려한 변형의 형상은 사고 재구성 시에 간편하게 측정할 수 있는 범위로 한정하였다. 해석을 수행한 충돌 모델은 3 차원이지만 높이 방향의 변형을 무시하고 차체의 평면도를 기준으로 한 평면상의 변형

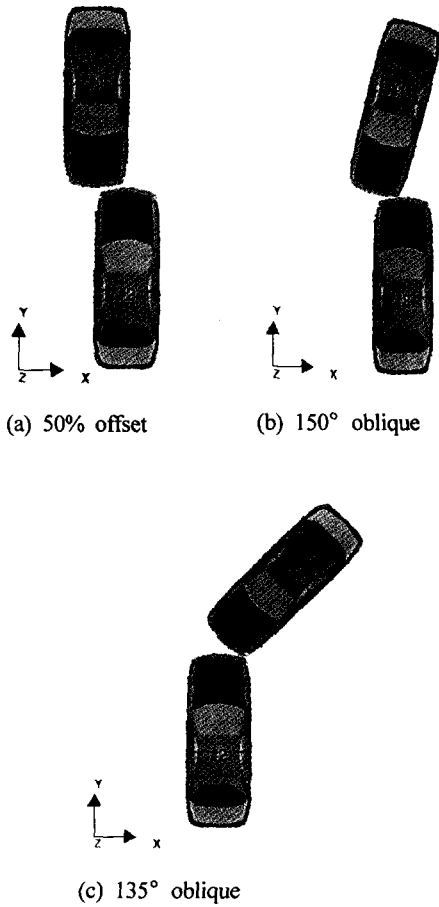


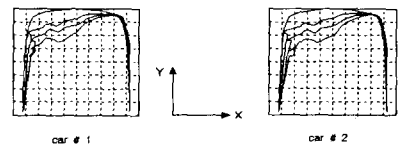
Fig. 5 Three kinds of crash configurations

만을 고려하였다.

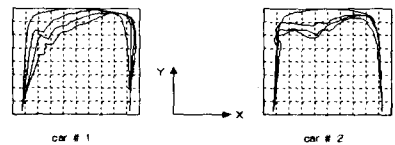
위에서 설정된 충돌상황에서 각기 다른 속도에 대한 충돌해석을 수행하여 180 ms 까지 계산하였을 때의 변형모습을 Fig. 6에 나타내었다. 각 그림에서 가장 바깥쪽의 차체 형상은 변형전의 모습이며 속도가 증가함에 따라 변형량이 증가함을 보이고있으며, 각 그래프에서의 치수는 Fig. 2와 동일하다. 실제의 변형형상을 보면 동일한 충돌속도에서 50% 오프셋 충돌시의 변형량이 다른 두 충돌상황에서의 결과보다 크다는 것을 알 수 있다. 50% 오프셋 과 135° 경사각 충돌에서

는 두 차량의 변형이 거의 대칭 형태로 발생하였다. 경사각 충돌에서는 150° 와 135° 에서 좌측 모서리를 접촉하는 #1 차량은 변형형상이 비슷하고 변형량도 유사하지만 #2 차량의 변형형상이 완전히 다르게 나타났다. 같은 충돌 각도에서 충돌 속도가 증가한 경우, 동일한 변형형상이 접촉방향의 법선을 따라 평행 이동한 모습이다.

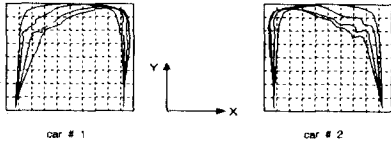
Table 3 에는 위에서 설정된 각 경우에 대한 변형에너지의 계산 값이 나타나 있다. 처음 계산된 에너지는 유한요소해석에 의한 전체 충돌변형에너지(Energy by F.E.M)를 나타내고 두 번째 에너지(Energy by force-deform)는 위에서 유도된 벽면 정면충돌에 의한 강성방정식 (6)을 이용하여 각각의 차량에 대하여 계산한 에너지의 합이다. 오차는 각기 다른 방법으로 계산된 두 에너지의 차이를 상대적인 수치로 표시한 값이다. 50% 오프셋 충돌에서는 유한요소해석에 의한 에너지 값이 힘-변형량 관계에 의한 에너지의 계산치 보다 크며 에너지 계산 오차가 다른 충돌 형상에 비하여 가장 크게 나타났다.



(a) 50 % offset frontal collision



(b) 150° oblique collision



(c) 135° oblique collision

Fig. 6 Deformation shapes for different crash configurations (dimension : mm)

전체적으로는 150° 경사각 충돌에서의 오차가 가장 작게 나타났다. 50% 오프셋충돌에서 속도 20 km/h의 경우와 150° 에서 속도 20 km/h, 30 km/h 그리고, 135° 에서 충돌속도 40 km/h의 경우에는 유한요소법에 의해 계산된 에너지와 변형량으로부터 계산된 에너지와의 오차가 10% 미만으로 상당히 유사함을 보인다.

Table 3 Comparison of deformation energy for different crash configurations using barrier impact equation

Crash config.	Velocity (km/h)	Energy by F.E.M (N-mm)	Energy by force-deform (N-mm)	Error (%)
1	20	3.1118E+07	2.899E+07	+6.8
	30	7.1062E+07	5.6881E+07	+19.9
	40	1.2817E+08	1.0092E+08	+21.3
2	20	2.6785E+07	2.5493E+07	+4.8
	30	5.9362E+07	6.3993E+07	-7.8
	40	1.0995E+08	9.8607E+07	+10.3
3	20	2.6315E+07	2.3247E+07	+11.6
	30	6.0939E+07	7.6124E+07	-24.9
	40	1.1000E+08	1.2039E+08	-9.4

3.2 차량 간 정면충돌에 의한 강성방정식을 이용한 경우

3.1에서 설정한 여러 가지 충돌상황에서, 유한요소해석에 의한 변형에너지와 차량간

정면충돌에서 유도된 강성방정식 (8)을 이용하여 계산한 변형에너지의 비교가 Table 4에 나타나 있다.

전체적으로 볼 때 계산된 변형에너지가 벽면 충돌해석에서의 결과와 비교하여 상당히 개선된 결과를 보여준다. 그러나 벽면충돌해석에서와 마찬가지로 Crash config. 3의 30km/h의 속도에서는 오차가 20%이상이었다. 이와 같이 충돌각도가 상대적으로 큰 경우에 어느 한 부분에서 평균변형량으로 계산되는 에너지량에 오차가 크게 나타나는데, 그 이유는 충돌시 접촉이 일어나지 않았음에도 불구하고 경사충돌로 인하여 차체의 X-방향 변형이 크게 발생하기 때문이다. 따라서, 변형량을 측정할 때 측정하는 처음 점 (C₁), 또는 마지막 점(C₆)에서 변형량이 과다하게 측정되어 에너지가 크게 계산되었다고 본다.

Table 4 Comparison of deformation energy for different crash configurations using head on collision equation

Crash config.	Velocity (km/h)	Energy by F.E.M (N-mm)	Energy by force-deform (N-mm)	Error (%)
1	20	3.1118E+07	3.1815E+07	-2.2
	30	7.1062E+07	6.1718E+07	+13.1
	40	1.2817E+08	1.0848E+08	+15.4
2	20	2.6785E+07	2.6897E+07	-0.4
	30	5.9362E+07	6.2654E+07	-5.5
	40	1.0995E+08	9.8381E+07	+16.6
3	20	2.6315E+07	2.4828E+07	+5.7
	30	6.0939E+07	7.4158E+07	-21.6
	40	1.1000E+08	1.0721E+08	+2.5

그리고, Crash config. #3의 20 km/h와 40 km/h에서 30 km/h일 때와 비교해서 오차가 작게 나타나는 이유는, 20 km/h에서는 경사충돌 입에도 불구하고 충돌속도가 높지 않아

서 차체의 X-방향 변형이 비교적 작게 나타나기 때문이고, 40 km/h일 때는 차체의 X-방향 변형이 크게 나타났음에도 불구하고 차량의 초기 운동에너지가 크기 때문에 결과적으로 유한요소법에 의해서 크게 계산되어지는 변형에너지와의 오차가 적게 나타난 것으로 판단된다. 또한 Crush config. #1 과 #2에서 속도가 증가할수록 유한요소법에 의한 변형에너지와 힘-변형량 관계에 의한 변형에너지의 오차가 크게 나타나는 이유는 정면충돌에 비하여 오프셋 충돌일 때 차체의 변형이 크기 때문에 유한요소법에 의한 변형에너지는 크게 계산된 반면, 정면충돌해석으로부터 구한 힘-변형량 관계를 가지고 계산한 변형에너지는 보다 작게 계산된 것으로 추론할 수 있다.

4. 결론

자동차의 충돌 후 상황을 근거로 하여 충돌 전 상황을 유추하는 충돌사고재구성(collision accident reconstruction)에서 충돌 후 변형 형상을 근거로 충돌 전 각 차량이 가지고 있던 운동에너지를 계산해야 할 필요성이 점점 많아지고 있다. 본 연구에서는 대표적인 충돌 상황에 대하여 실제 충돌 실험을 대체하고 간단한 방법으로 차량의 변형에너지를 계산하는 방법을 제시하였다. 변형체역학적인 관점에서 보면 아주 복잡한 차체의 구조를 단순한 스프링으로 간주하고 평균변형량과 힘의 관계를 선형 함수의 형태로 유도하였다. 이 관계식은 두 가지의 경우에 대하여 유도되었는데, 차량을 강체 벽에 정면으로 충돌시키는 경우와 같은 종류의 차량을 정면으로 충돌시키는 경우이다. 각 충돌의 경우에 대하여 단순화된 강성방정식에 의한 차량의 변형에너지와 유한요소 해석에 의하여 산출된 변형에너지를 비교하면 차량간의 저속 충돌을 제외하고 약 10%의 오차 범위

에 있어서, 복잡한 역학적 변형 모델의 단순화의 가능성을 확인하였다.

각 경우에 대한 선형 강성방정식의 결과를 비교해보면 차량간 충돌해석으로부터 구한 A와 B 값이 벽면 충돌해석으로 구한 값보다 더 크게 나타나는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 즉, 변형이 시작되는 힘의 크기(A)와 스프링계수와 같은 강성의 세기(B)가 차량간의 충돌해석으로부터 얻은 결과가 큰 것으로 나타났다. 이렇게 구한 단순화된 강성방정식을 이용하여 총 9 가지의 다른 조건(세 가지의 충돌 방향과 세 가지의 충돌 속도)에 대한 차량간 충돌에서 차량의 변형에너지를 계산하였다. 세 가지의 충돌방향은 1) 50% 오프셋 정면충돌이며, 2) 두 차량의 충돌각도가 150° 이면서 #1 차량의 좌측 모서리 부위와 #2 차량의 중앙부가 접촉하는 충돌형상이며, 3) 두 차량의 충돌각도가 135° 로 기울어진 경우의 충돌상황으로 #1 차량의 좌측 모서리 부위와 #2 차량의 우측 모서리가 접촉하는 충돌상황이다. 실제 차량의 변형에너지를 대신하여 유한요소 상용코드로부터 변형체역학의 복잡한 식을 이용하여 계산되는 에너지 값을 참값으로 가정하고 변형형상과 강성방정식으로부터 구한 변형에너지와 비교하였다. Table 4에서 보듯이 50% 오프셋 충돌에서 속도 20 km/h의 경우와 150° 에서 속도 20 km/h, 30 km/h 그리고, 135° 에서 충돌속도 20 km/h, 40 km/h의 경우에는 유한요소법에 의해 계산된 에너지와 변형량으로부터 계산된 에너지와의 오차가 10% 미만으로 상당히 유사함을 보였다.

전체적으로 볼 때 차량간의 정면충돌에서 유도된 강성방정식을 이용하여 계산된 변형에너지가 벽면 충돌해석에서의 그것과 비교하여 상당히 개선된 결과를 보여준다. 결론적으로, 복잡한 차체의 변형 모델은 단순화된 힘-변형량 관계의 강성방정식으로 나타낼 수 있으며, 이를 이용하여 여러 충돌 조건

에서 계산한 변형에너지 값이 유한요소 해석에 의한 결과와 유사하며, 유도된 강성방적식은 충돌사고 시 사고차량에 대하여 몇 부분의 변형량을 측정하고 에너지를 계산함으로써 충돌 속도를 유추할 수 있는 데이터베이스를 구축하는데 사용될 수 있다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 연구비지원(96-0200-13-01-3)에 의해 수행되었다.

참 고 문 헌

- 1) K. L. Campbell, "Energy Basis for Collision Severity," SAE No.740565, 1974.
- 2) C. E. Strother, R. L. Woolley, M. B. James and C. Y. Warner, "Crush Energy in Accident Reconstruction," SAE No.860371, 1986.
- 3) A. K. Prasad, "CRASH3 Damage Algorithm Reformulation for Front and Rear Collision," SAE No.900098, 1990.
- 4) M. Ueyama, H. Makishita. and S. Saito, "Determination of Collision Configurations from Vehicle Deformation Patterns," SAE No. 910127, 1991.
- 5) A. G. Fonda, "Principles of Crush Energy Determination," SAE No. 1999-01-0106, 1999.
- 6) J. A. Neptune, "A Comparison of Crush Stiffness Characteristics from Partial-Overlap and Full-Overlap Frontal Crash Tests," SAE No. 1999-01-0105, 1999.
- 7) 장인식, 이상목, "차체간의 충돌상황에 따른 변형상태와 변형에너지의 관계," 한국자동차공학회 논문집 제 7 권, 제 3 호, pp. 225-233, 1999.