

3차원 충돌해석 정보를 이용한 측면 충돌 사고 재구성

장인식^{*1)} · 김일동²⁾

홍익대학교 기계정보공학과¹⁾ · 홍익대학교 대학원 기계정보공학과²⁾

A Study on the Side Collision Accident Reconstruction Using 3-Dimensional Crash Analysis

Insik Jang^{*1)} · Ildong Kim²⁾

¹⁾Department of Mechanoinformatics & Design Engineering, Hongik University, Chungnam 339-701, Korea

²⁾Graduate School, Department of Mechanoinformatics & Design Engineering, Hongik University, Chungnam 339-701, Korea,

(Received 16 April 2007 / Accepted 27 August 2007)

Abstract : The side collision reconstruction algorithm is developed using three dimensional car crash analysis. Medium size passenger car is modeled for finite element analysis. Total 24 side collision configurations, four different speed and six different angle, are set up for making side collision database. Deformation index and degree index are built up for each collision case. Deformation index is a kind of deformation estimate averaging displacement of side door of crashed car from finite element analysis result. Angle index is constructed measuring deformed angle of crashing car. There are two kinds of angle index, one is measured at driver's side and the other is measured at passenger's side. Also a collision analysis information in side of cars is used for giving a basis for scientific and practical reason in a reconstruction of the car accident. The analysis program, LS-DYNA3D is utilized for finite element analysis program for a collision analysis. Those database are used for side collision reconstruction. Side collision reconstruction algorithm is developed, and applied to find the collision conditions before the accident occurs. Three example collision cases are tried to check the effectiveness of the algorithm. Deformation index and angle index is extracted for the case from the analysis result. Deformation index is compared to the established database, and estimated collision speed and angle are introduced by interpolation function. Angle index is used to select a specific collision condition from the several available conditions. The collision condition found by reconstruction algorithm shows good match with original condition within 10% error for speed and angle. As a result, the calculation from the reconstruction of the situation is reproducing the situation well. The performance in this study can be used in many ways for practical field using deformation index and degree index. Other different collision situations may be set up for extending the scope of this study in the future.

Key words : Side collision accident reconstruction(측면충돌사고재구성), Deformation index(변형지수), Angle index(각도지수), Crash analysis(충돌해석), Collision configuration(충돌상황)

Nomenclature

I_d : deformation index

X : collision angle

Y : 운전석 α 의 angle index

W : 보조석 β 의 angle index

Z : 편차

*Corresponding author, E-mail: isjang@hongik.ac.kr

1. 서론

경제규모의 증대와 더불어 자동차의 숫자가 증가함에 따라 차량 간의 충돌사고가 빈번해지고 그 형태가 복잡해짐에 따라 사고의 분석은 점점 더 중요한 연구대상이 되어 가고 있다. 차량의 충돌 사고에 대한 연구는 아직까지 정면충돌이 주류를 이루고 있으나, 최근 도시 지역을 중심으로 측면 충돌에 의한 사고의 빈도가 증가하고 있다.¹⁾ 특히 측면 충돌 사고의 경우 승객과 차량 간에 공간이 협소하여 외부로부터 들어오는 충격을 승객이 직접 받게 되어 치명적인 상해 또는 사망을 유발할 가능성이 크다. 실제로 미국도로 교통안전국의 통계에 따르면 1978년부터 1987년까지 10년간 전체 교통사고 사망자의 30.6%가 측면 충돌 사고에 의한 것이며, 1982년부터 1987년 사이에 발생한 중상 이상의 사고, 즉 약식 상해 등급(Abbreviated Injury Scale, AIS) 3-5인 부상자의 35.6%가 측면 충돌 사고에 의한 것으로 조사되었다.²⁾

미국에서는 80년대 말부터 측면 충돌 시 차량이 만족해야 하는 안전 법규의 제정에 대한 논의가 활발히 제기되어, 1993년 9월부터 측면 충돌 관련 법규인 FMVSS(Federal Motor Vehicle Safety Standard) 214를 개정하여 시행에 들어갔으며, 유럽에서도 80년대 말부터 측면 충돌에 대한 법규가 활발히 진행되어, 서유럽 국가군(European Economic Community, EEC)과 북·동유럽 국가군(Economic Commission For Europe, ECE)도 1998년 10월 적용 예정의 법규를 공시하였다.²⁻⁴⁾ 국내에서도 측면 충돌 사고의 중요성을 인식하여 2003년 충돌에 관한 법규(K102)에 측면 충돌 항목을 추가 제정하여 시행해 오고 있다.

최근 컴퓨터 계산 속도가 매우 빨라지고 계산 비용이 낮아졌으며 이와 함께 수치 해석 기법의 발달로 정적 구조 거동 뿐 아니라 충돌 현상과 같은 동적 비선형 구조 거동도 해석이 가능하게 되었다. 이러한 구조 해석 방법은 해의 정밀도에 대한 검증만 되면 많은 유용한 정보를 경제적으로 얻어낼 수 있으며, 이를 이용하여 효과적으로 설계 안을 평가 및 보완할 수 있기 때문에 많은 연구가 진행되고 있다. 차량의 충돌해석에 있어서 설계 단계의 차량의 강도를 알아보기 위한 측면 충돌에 관한 연구도 많이 있

지만,^{5,8-10)} 차량 간의 충돌을 데이터베이스화 하여 충돌 재구성에 대한 연구도 진행되어 왔다. 차량 간의 충돌 재구성에 대한 연구는 주로 정면 충돌과 그와 유사한 경우의 충돌 상황에 대하여 수행되었다.^{6,7)}

본 연구에서는 자동차의 충돌 후 상황을 근거로 하여 구조 역학적 측면에서 교통사고 재구성을 하는데 보다 과학적이고 실제적인 근거를 부여하기 위하여 여러 가지 측면 충돌 상황에서 차량의 변형 형태와 변형 정도에 따른 피충돌 차량의 변형지수와 충돌 차량의 각도지수를 구축하여 차량의 측면 충돌 사고의 재구성에 대한 연구를 수행하였다.

2. 충돌 모델의 구성

2.1 충돌 차량의 구조

Fig. 1은 현재 미국에서 시판중인 중형차량(TAURUS)을 모델링 한 것으로 National Crash Analysis Center에서 제공하는 기하학적인 모델이다. 본래의 모델은 수만 개의 부품과 복잡한 자유 곡면으로 이루어져 있지만 구조 역학적 측면에서 볼 때 해석 시 결과에 영향을 크게 미치지 않는 부품들도 많이 있다. 따라서 본 논문에서는 차량을 크게 3부분(차체부, 엔진부, 기타 등)으로 나누고 각 부분에 대하여 본래의 모델을 단순화 하였다. 차체부로는 외형 Body, 조향장치, 현가장치, 도어, Trunk 등이 구성되어 있으며, 엔진부에는 엔진, 라디에이터, 배터리, Both Side Wheel housing 등이 구성되어 있다. 또한 기타 부분으로 좌석, 유리창, Wheel 등으로 구성되어 있다. 단, 충돌 후 차량의 변형상태에 큰 영향을 미치지 않는 부분에 대해서는 해석시간을 단축하기

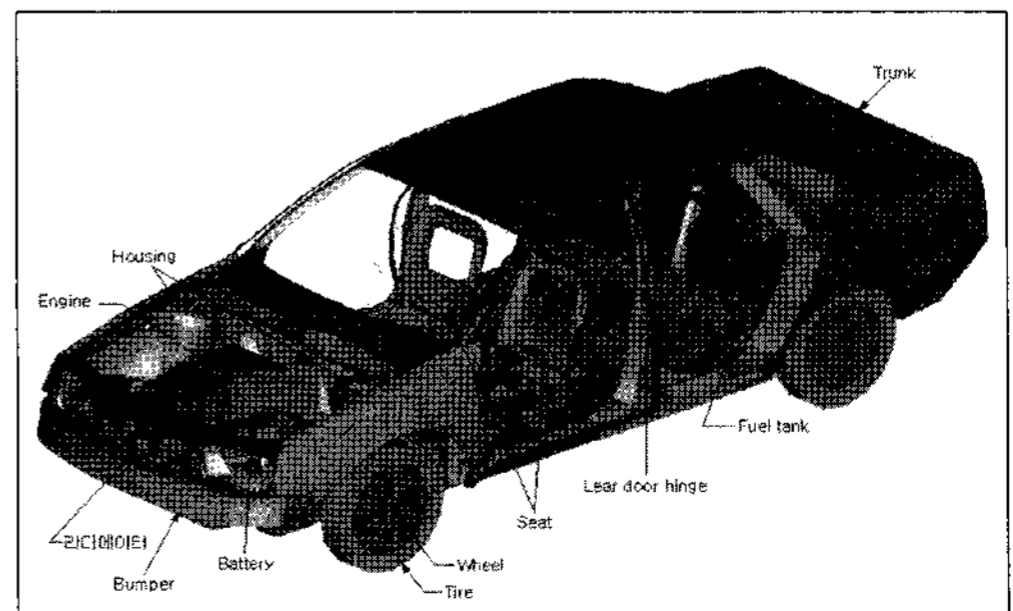


Fig. 1 충돌 차량의 구조

위하여 모델링에서 제외시켰다. 차량의 기하학적인 모델링으로 엔진부 및 라디에이터, 배터리 등의 복잡한 기하학적 형상은 간단한 육면체 형상으로 대체하였고, 차체의 뼈대를 이루고 있는 부분들은 빔으로 모델링 하였다. 또한 차체부는 한 겹의 판으로 구성하였으며 두께는 1mm인 강판으로 간주하였다.

2.2 유한요소 모델링

차량의 충돌해석을 수행하기 위하여 전·후처리 프로그램인 HYPERMESH¹¹⁾를 이용한 유한요소 모델링의 내용을 요약하면 다음과 같다.

- ① Node : 26793개
- ② Element Type :
 - (1) Shell Element : 27875개 (Part 106개)
 - (2) Solid Element : 348개 (Part 9개)
 - (3) Beam Element : 142개 (Part 20개)
- ③ Element Size : 10mm

본 연구에서는 해석패키지인 LS-DYNA3D¹²⁾에서 제공하는 2가지의 재질타입(material Type)을 사용하였다. 빔요소(Beam element)는 탄성체(elastic)로 간주하여 재질타입(Material Type) 1번을 사용하였는데 주로 선형 해석에 사용된다. 셸요소(Shell element)와 육면체요소(Solid element)는 탄성체(elastic)와 부분선형 소성체(piecewise linear plasticity)로 간주하여 비선형 해석에 사용되며 응력-변형률 관계가 필요하다.

충돌 차량의 유한요소 모델에서 물성치 정의에 있어서는 크게 7가지로 정의하였다. 차량의 조향장치와 현가장치, 차량의 Frame 역할을 하고 있는 부분으로 빔요소(Beam element)로 하였으며, 재질타입(Material Type) 1번을 사용하였다.

Fig. 2는 충돌 차량의 대부분을 이루는 차체부로 외형 Body, 도어와 후드, Trunk 등으로 구성하였으며, 셸요소(shell element)를 적용하였다. 재질타입(Material Type)은 24번을 사용하였고, Fig. 3은 응력-변형률(Stress-Strain) 관계 그래프이며, Table 1은 차체부에 적용시킨 물성치이다.

라디에이터, 엔진, 타이어 등의 모델링으로 육면체요소(Solid element)를 적용하였으며, 각각에 적합한 물성치를 사용하였다.

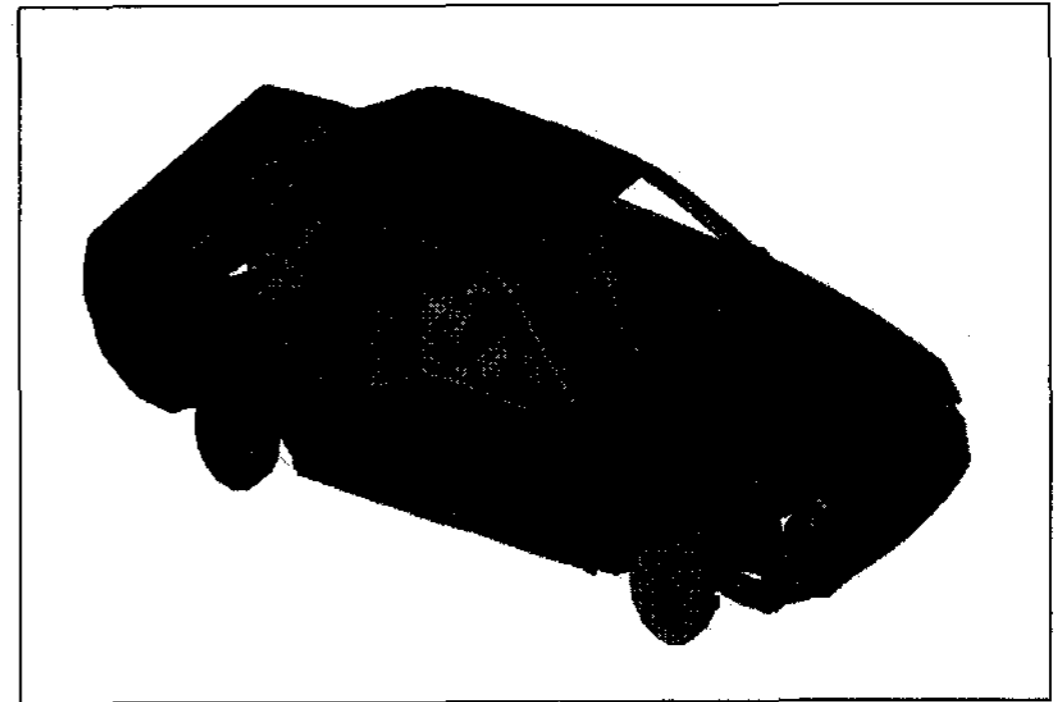


Fig. 2 차체부 모델링

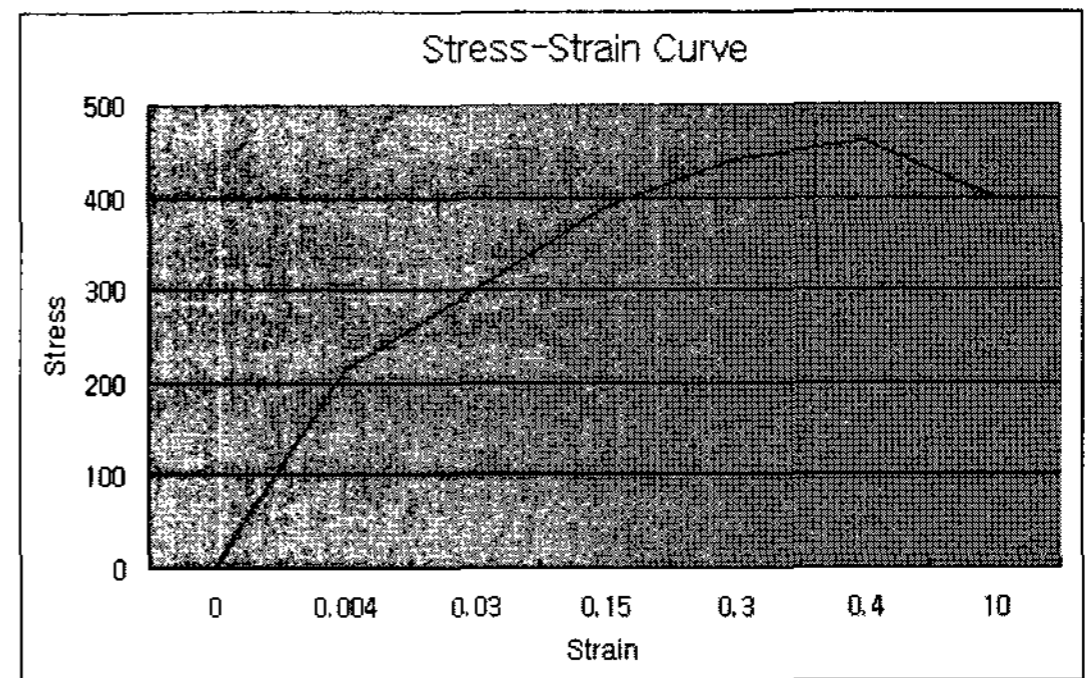


Fig. 3 응력-변형률 관계

Table 1 Material properties of linear plasticity(1)

Material	Mass density (g/mm ³)	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio	Yield stress (MPa)
STEEL	7.8E-09	200000.0	0.3	215

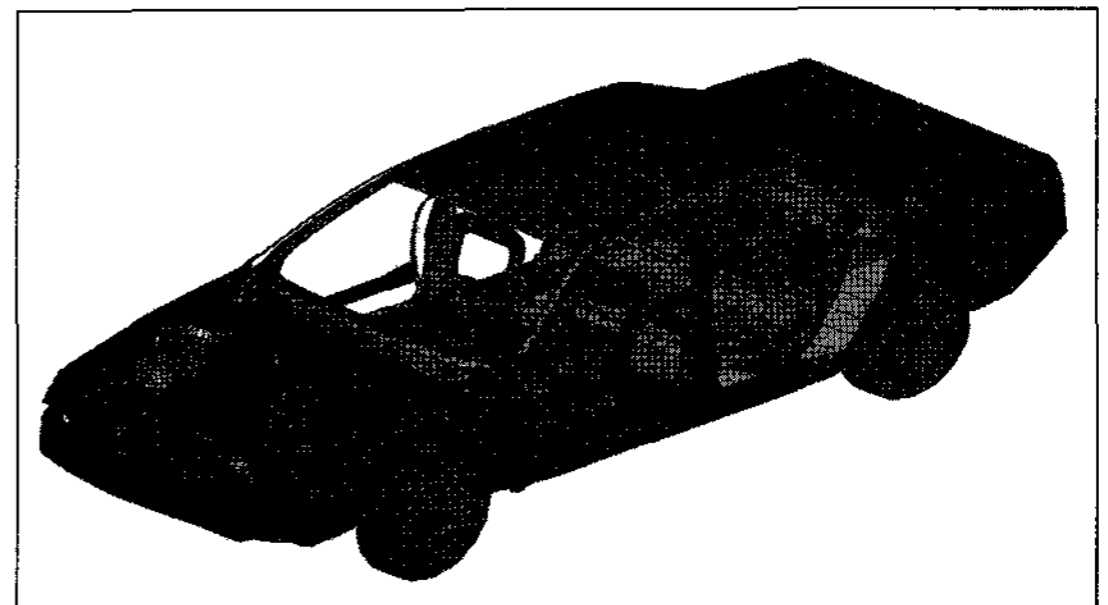


Fig. 4 유한요소 내부 모델링

Fig. 4는 충돌 차량의 전체적인 유한 요소 모델링을 도시한 것으로 엔진룸과 Fuel tank 부분에는 structure mass를 적용하여 무게 효과를 낼 수 있게 하였으며, 충돌 차량과 피충돌 차량에는 중력이 존

재하고 있다.

충돌 차량은 피충돌 차량의 좌측 측면 도어부분에 충돌하는 형상을 이루게 되며 충돌시 접촉이 예상되는 부분은 마찰계수 0.1인 점접촉 및 면접촉으로 설정하여 충돌시 발생할 수 있는 차량 내부의 부분체 간의 간섭(intersection)을 방지하였다.

3. 충돌 해석

3.1 충돌 상황의 구성

Fig. 5는 각도별 충돌 상황을 살펴본 것으로 일정 속도로 전진하는 차량에 측면으로 충돌하는 경우의 데이터베이스를 형성하기 위하여 차량의 측면 각도를 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°의 6가지로 구성하였다.

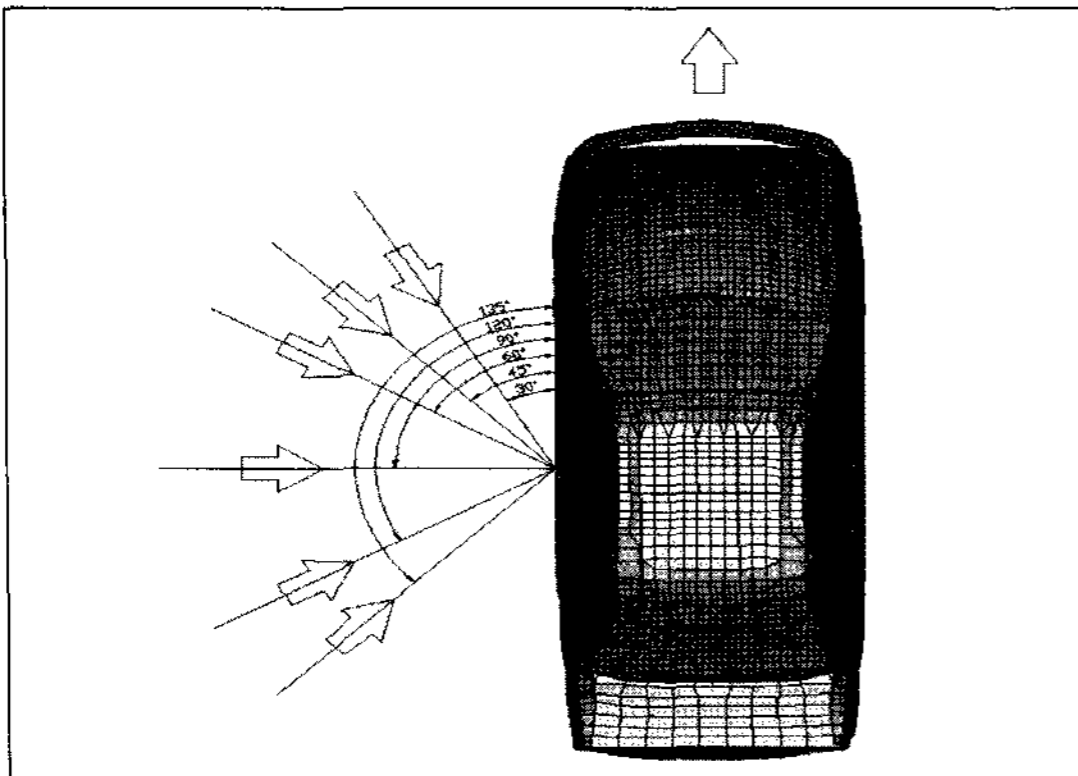


Fig. 5 각도별 충돌 상황 구성

Table 2는 해석하고자 하는 충돌 상황의 충돌 속도에 대한 요약으로 4가지의 속도 단계로 구성되어 있다.

본 논문의 측면 충돌 해석의 조건은 두 차량의 충돌 속도가 일정하며, 각각 18.5(29.77), 23.5(37.81),

Table 2 충돌 각도와 충돌 속도별 충돌 상황의 구성

충돌각도(°)	충돌 속도 (mph)			
	18.5 VS 18.5	23.5 VS 23.5	28.5 VS 28.5	33.5 VS 33.5
30°	○	○	○	○
45°	○	○	○	○
60°	○	○	○	○
90°	○	○	○	○
120°	○	○	○	○
135°	○	○	○	○

28.5(45.86), 33.5(53.90)mph(km/h)의 속도로 충돌하는 것이다. 4가지 충돌 속도 단계에서 해석을 수행하였으며, 충돌 후의 차체의 변형 형상을 수치적으로 계산하여 피충돌 차량의 변형지수와 충돌 차량의 각도지수를 구축하였다. 따라서 충돌 각도와 충돌 속도에 따른 충돌 상황 변형지수와 각도지수는 총 24가지를 구축하였다.

3.2 충돌 해석

해석은 충돌해석 전용 유한요소 프로그램인 LS-DYNA3D를 사용하였으며, 같은 차량 간의 측면 충돌로서 충돌 각도와 충돌 속도의 변화로 나누어 수행하였다. 측면 충돌 시 동적인 변형의 계산은 시간 적분법(time integration)을 사용하는데 충돌문제와 같이 짧은 시간에 발생하면서, 요소의 수가 많은 경우 양적(explicit) 방법을 사용한다. 이 방법은 요소의 크기와 탄성계수에 관계되는 한계 시간 간격(critical time step)이 있어 시간 간격에 제한 요소가 있다. 본 논문에 사용된 프로그램에서 시간 간격을 요소의 변형에 따라 자동적으로 계산하는 기능을 가지고 있어서 이를 이용하였다.

Fig. 6~7은 충돌 각도 90°, 충돌 속도 33.5mph일 경우의 충돌 상황이다.

충돌 차량이 피충돌 차량의 좌측 측면에 충돌하게 되면 충돌 차량은 감속을 시작하고 피충돌 차량의 측면 Door 부위에 충격이 가해지게 되어 대부분의 충격 에너지는 Center Pillar에 집중되어, Door와 Center Pillar에 큰 변형이 발생한다. 이러한 변형은 매우 짧은 시간에 최고점에 이르게 되므로, 총 해석

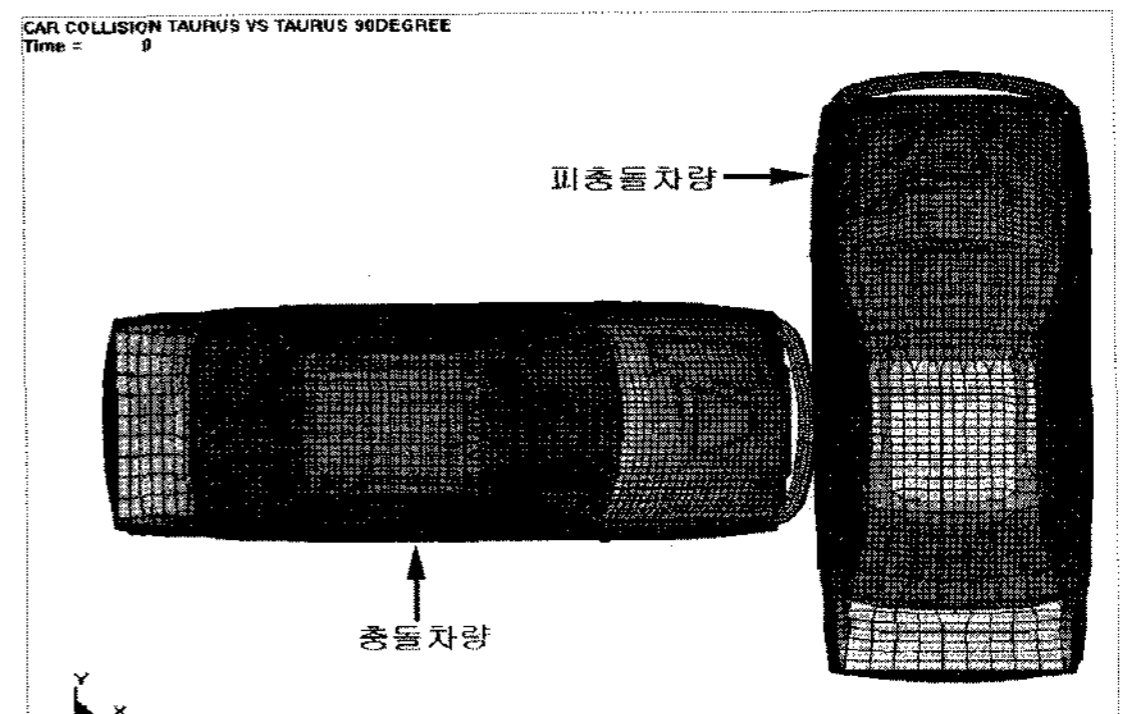


Fig. 6 충돌 전의 모습

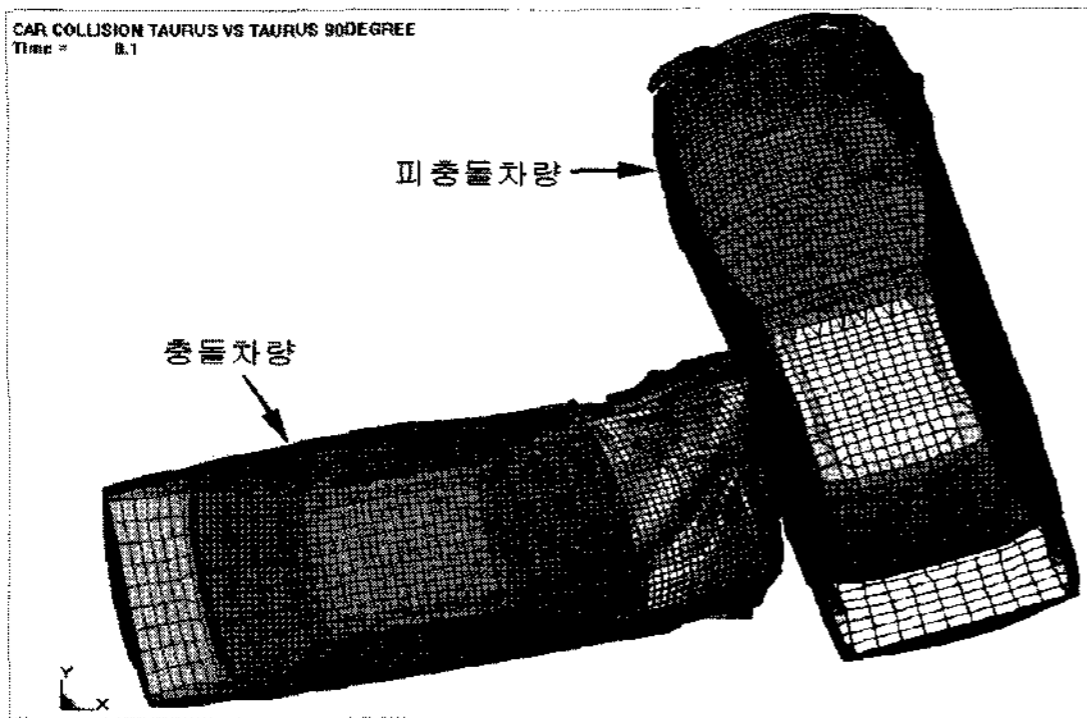


Fig. 7 충돌 후의 변형 모습

시간을 충돌하는 차량의 속도를 고려하여 100ms로 하였다.

4. 변형 형상의 변형지수와 각도지수

Fig. 8에는 피충돌 차량의 충돌 후 가장 큰 변형을 보이는 측면 부위를 변형지수로 형성하기 위하여 Door와 Center Pillar를 중심으로 변형된 단면 부위를 8단계로 나누었다. 맨 밑 부분은 Door의 발판을 기준으로 하여 각각의 단면 사이를 70mm로 하여 총 490mm의 높이로 하였다.

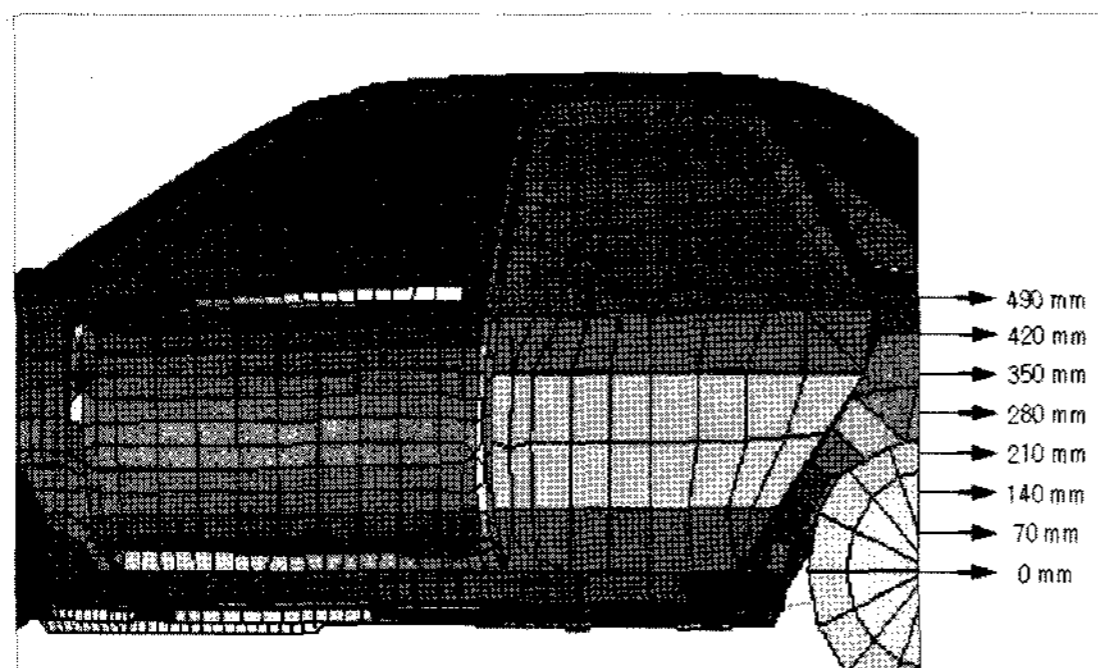


Fig. 8 피충돌 차량의 측면 부위 단면 층

4.1 피충돌 차량의 변형지수 계산

변형지수(I_d)를 계산하기 위하여 변형된 피충돌 차량의 측면을 8개의 단면으로 나누어 각각의 단면들을 충돌 전과 충돌 후의 형상을 비교하였다. 주어진 충돌 각도와 충돌 속도에서 변형된 Section마다의 20개의 node에 대한 변형지수를 계산하기 위한 식은 다음과 같다.

$$((I_d)_i) = \frac{\sum_{j=1}^{20} \Delta x_{ij}}{20} \quad (1)$$

Fig. 9에서 보는 것과 같이 피충돌 차량의 충돌 후의 변형 형상을 20개로 나누었는데, 식에서는 j로 표기하였고, 측면의 변형 모습을 모두 포함시키기 위한 8개의 Section은 i로 표기하였다. 예를 들어 Δx_{ij} 라고 하면 i번째 Section에서 j번째 변형량을 나타내는 것이다.

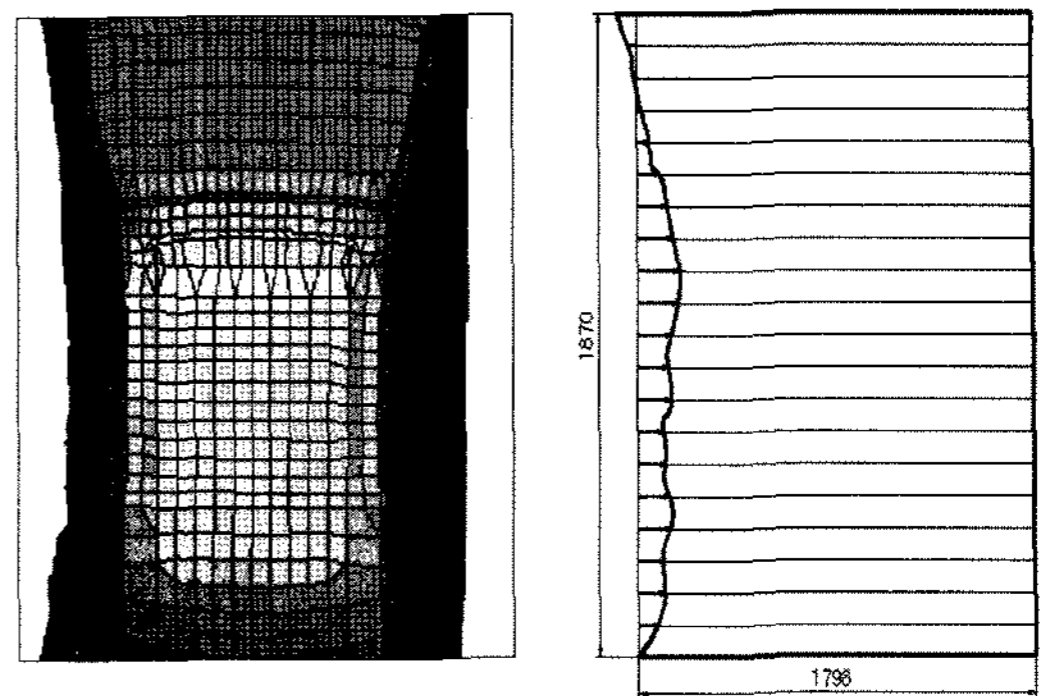


Fig. 9 한 단면에서 충돌 후의 변형 형상

Table 3은 충돌 차량의 충돌 속도가 증가됨에 따라 피충돌 차량의 변형지수 대표 값이 증가되고 있으며, 같은 충돌 속도에서는 충돌 각도 60° 충돌에서 가장 큰 변형지수 값을 나타내고 있다.

Fig. 10은 피충돌 차량의 충돌 각도와 충돌 속도에 따른 변형 형상에 대하여 24개의 변형지수를 그래프로 나타낸 것이다. 충돌 차량이 피충돌 차량의 측면부위에 충돌이 일어날 경우 충돌각도 30°에서 가장 큰 변형지수를 나타낼 것을 예상하였지만, 본 연구에 의하면 충돌 각도 60°에서 가장 큰 변형지수

Table 3 충돌 각도에 따른 피충돌 차량의 단면별 변형지수(I_d)

충돌 속도(mph) \ 충돌각도(°)	18.5	23.5	28.5	33.5
30°	50.21	53.63	56.07	66.37
45°	66.34	85.74	90.73	98.72
60°	86.95	89.97	97.82	116.97
90°	17.19	29.92	37.13	52.73
120°	12.00	15.86	21.38	24.51
135°	9.01	9.64	12.67	15.78

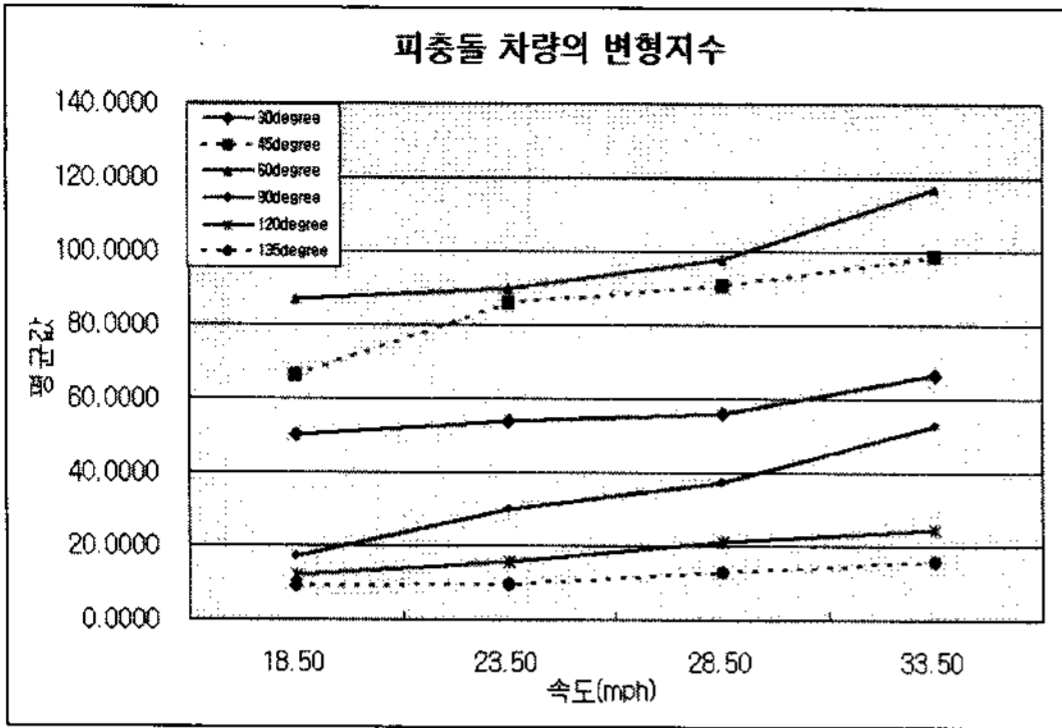


Fig. 10 피충돌 차량의 변형지수

를 나타내었으며, 충돌 각도 45°, 30°, 90°, 120°, 135° 순으로 작은 값들이 나타났다.

4.2 충돌 차량의 각도지수 계산

Fig. 11은 충돌 차량의 충돌 각도와 충돌 속도에 따른 변형 형상에 대한 정보를 획득하기 위하여 충돌 차량의 충돌 후 가장 큰 변형을 일으키는 범퍼의 양 끝 2개의 Point를 지정한 후 차량의 중심을 기점으로 하여 운전석 쪽은 α , 보조석 쪽은 β 로 하여 충돌 후의 변형 각도를 계산하였다. 충돌 차량은 충돌 방향의 힘도 받지만, 측면 방향의 힘에 의한 충돌 조건에 따라 운전석 쪽의 α 와 보조석 쪽의 β 가 상당히 변하게 된다. 충돌 차량은 중심선을 기점으로 범퍼 부분이 서로 대칭이기 때문에 충돌 전의 운전석 쪽의 α 와 보조석 쪽의 β 는 값은 같으며, 각도는 54°이다.

Fig. 12는 충돌 차량의 충돌 후의 변형각도의 예를 나타낸 것으로 충돌 각도 30°, 충돌 속도 33.5mph 일 경우이다. 운전석 쪽의 α 와 보조석 쪽의 β 는 충돌 전에는 같은 각도이지만, 충돌 후에는 피충돌 차

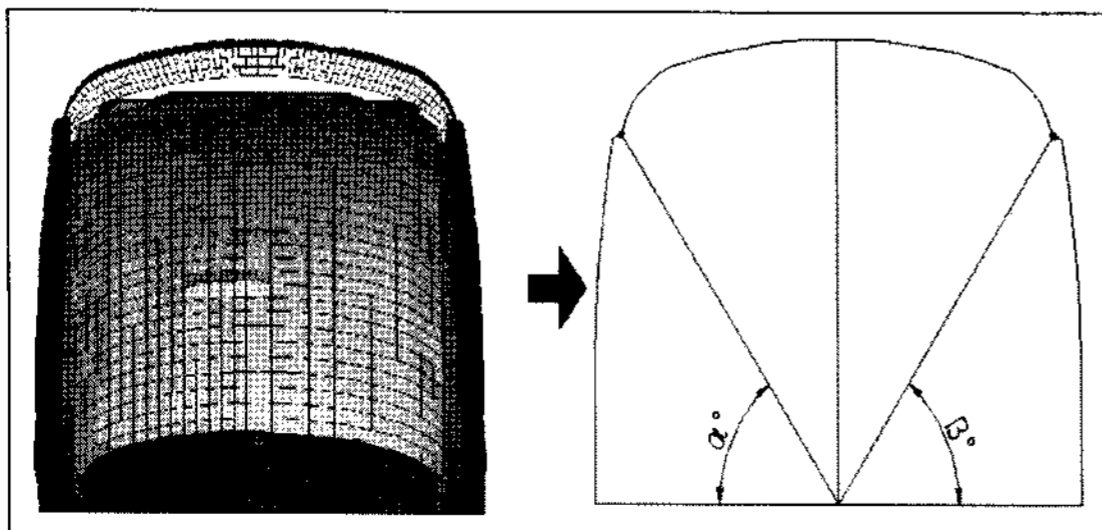


Fig. 11 충돌 차량의 충돌 전 변형 각도 비교

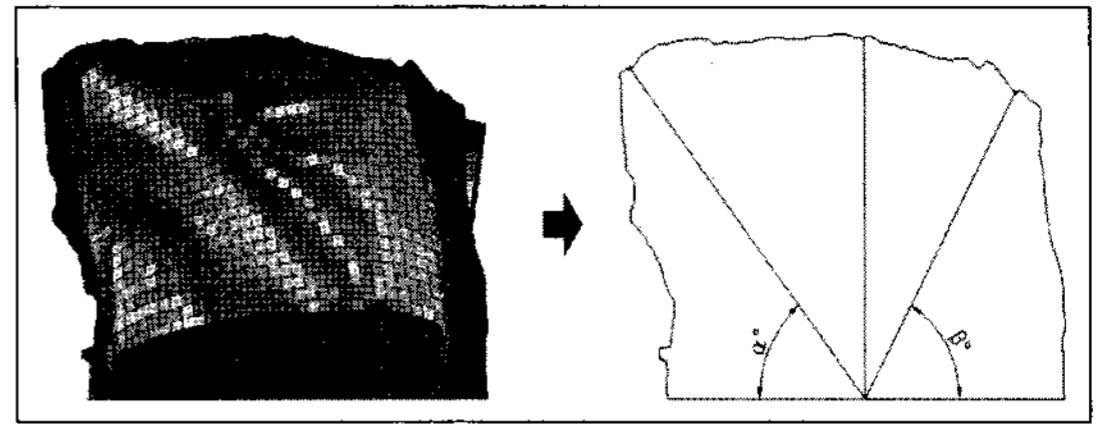


Fig. 12 충돌 차량의 충돌 후 변형 각도 비교 (충돌 각도 90°, 충돌 속도 33.5mph)

량의 좌측면과 충돌이 일어나면서 운전석 쪽의 α 는 감소하고 있으며, 보조석 쪽의 β 는 증가하고 있다.

Fig. 13-14는 충돌 각도와 충돌 속도에 따른 각도 지수를 그래프로 나타낸 것으로 운전석 쪽의 α 는 충돌 각도 30°와 60°에서 피충돌 차량의 측면부와 직접적인 충돌 현상이 일어나 큰 변형 각도를 보이고 있으며, 보조석 쪽의 β 는 약한 변형 각도를 보이고 있다. 이는 범퍼가 하나의 부품으로 이루어져 있기 때문에 범퍼의 일부분이 피충돌 차량의 측면 부분과 충돌이 일어나 범퍼의 변형에 의한 각도 변화가 생긴 것으로 짐작할 수 있다. 운전석 쪽의 α 인 경

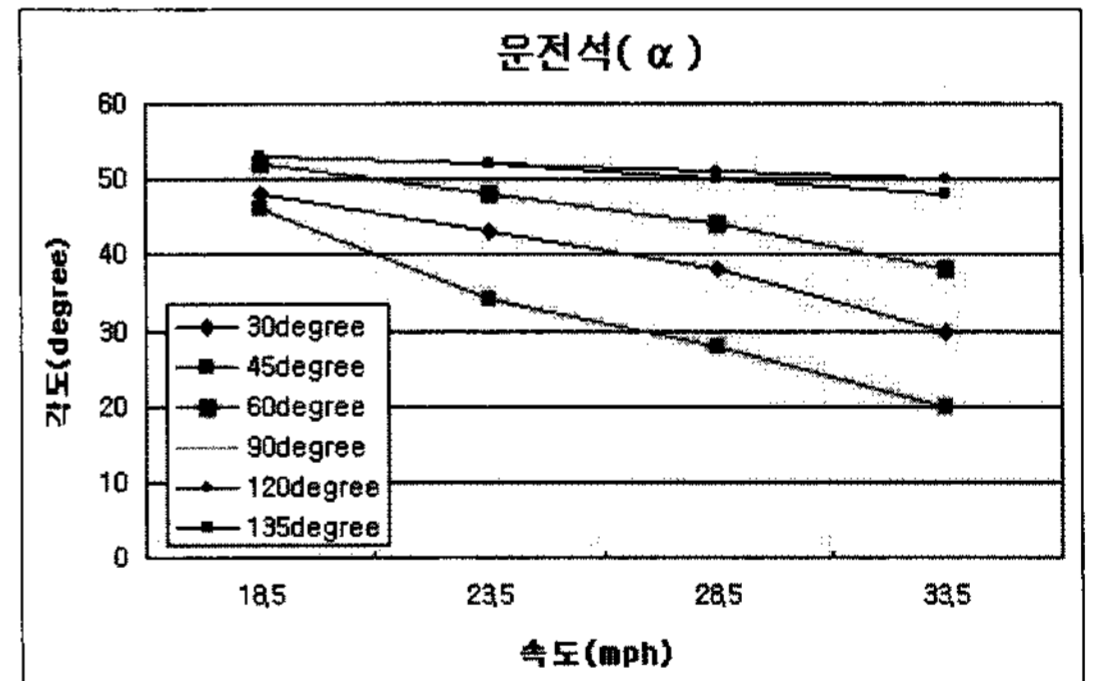


Fig. 13 충돌 차량의 충돌 후의 각도지수(운전석)

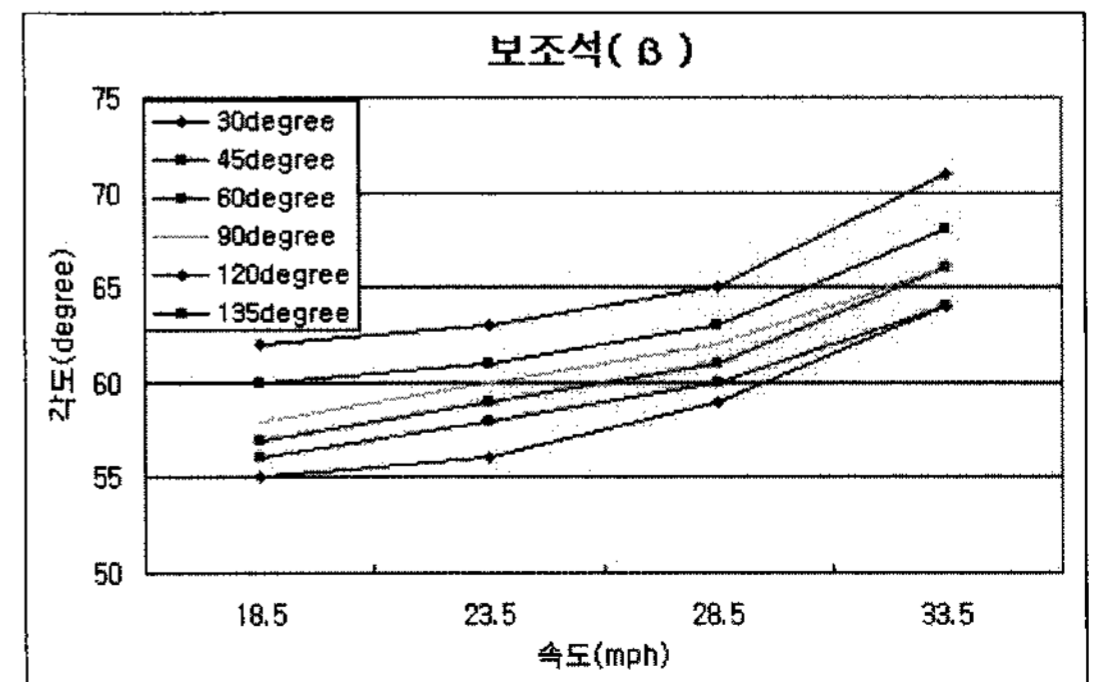


Fig. 14 충돌 차량의 충돌 후의 각도지수(보조석)

우는 충돌 각도 45°에서 가장 큰 변화 각도를 보이고 있으며, 보조석 쪽의 β는 충돌 각도 120°에서 가장 큰 변화 각도를 보이고 있다.

5. 충돌 사고 재구성의 예제

충돌 사고 재구성을 구현하기 위해 충돌 차량과 피충돌 차량의 충돌 후의 변형 형상을 유한요소 해석에 의한 결과에서 변형 측정점을 선택한 후 Matlab을 이용하여 3차원으로 재구성하였으며, 변형지수와 각도지수를 계산하였다. 변형지수와 각도지수를 유도한 후 임의로 설정한 충돌 상황에서 나온 변형 형상에 대한 대표 값을 피충돌 차량의 변형지수와 충돌 차량의 각도지수를 비교하여 충돌 전의 충돌 각도와 충돌 속도에 대하여 미리 예측함으로써 충돌 사고 재구성을 구현하였다.

충돌 각도와 충돌 속도를 알고 있지만, 변형지수와 각도지수의 활용을 위해 충돌 각도와 충돌 속도를 모른다는 가정 하에 충돌 후의 변형 정보만을 가지고 충돌 전의 충돌 각도와 충돌 속도를 역 추적하는 Algorithm을 개발하였다. 알고리즘의 과정을 Fig. 15에 나타내었다.

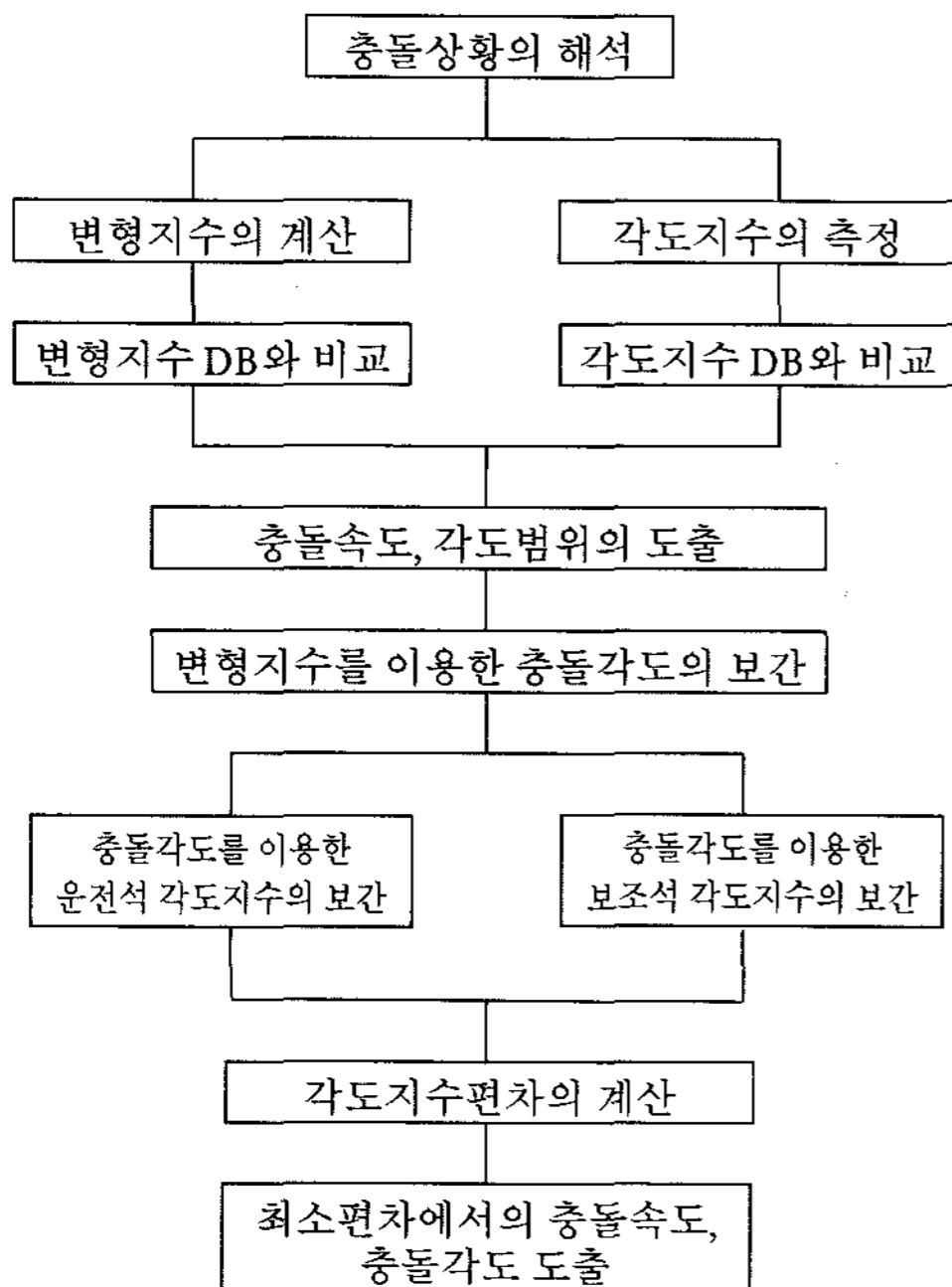


Fig. 15 충돌사고 재구성 알고리즘

5.1 충돌 상황 1에 대한 사고 재구성

5.1.1 임의의 충돌 상황 1에 대한 변형지수, 각도지수 계산

임의의 충돌 상황 1을 설정하고 충돌 각도와 충돌 속도를 모른다는 가정 하에 충돌 전의 상황을 역 추적하였다. 충돌 상황 1은 충돌 각도 37°와 충돌 속도 25mph로 측면 충돌이 일어난 경우로 설정하였다. 측면 충돌 후의 피충돌 차량에 대한 변형 형상을 Matlab을 이용하여 3차원으로 재구성하고 측정된 값을 이용하여 변형지수를 계산한다.

Table 4는 충돌 상황 1에서 피충돌 차량의 충돌 후의 변형지수를 나타낸 것이며, Fig. 16은 피충돌 차량의 변형지수를 분석하기 위하여 충돌 상황 1에서 나온 변형지수를 Fig. 10의 데이터베이스 변형지수에 나타내어 비교한 것이다.

Table 4 충돌 상황 1에서 피충돌 차량의 변형지수(I_d)(1)

충돌각도(°)	충돌속도(mph)	임의의 충돌 속도1
임의의 충돌 각도1		65.15

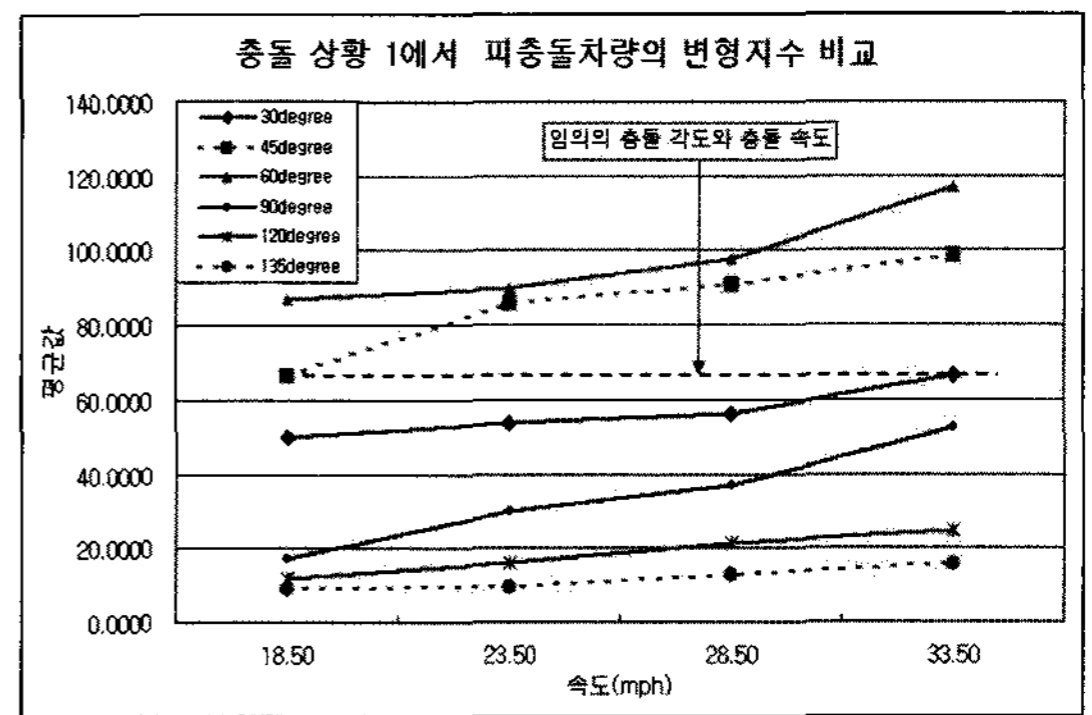


Fig. 16 충돌 상황 1에서 피충돌 차량의 변형지수 비교(1)

Table 5는 충돌 상황 1에서 충돌 차량의 각도지수를 나타낸 것이며, Fig. 17-18은 충돌 상황 1에서 운전석과 보조석에서의 각도지수를 데이터베이스 각도지수 그래프에 나타내어 비교한 것이다.

Table 5 충돌 상황 1에서 충돌 차량의 각도지수(1)

충돌각도(°)	충돌속도(mph)	임의의 충돌 속도1	
		운전석(α)	보조석(β)
임의의 충돌 각도1		38	57

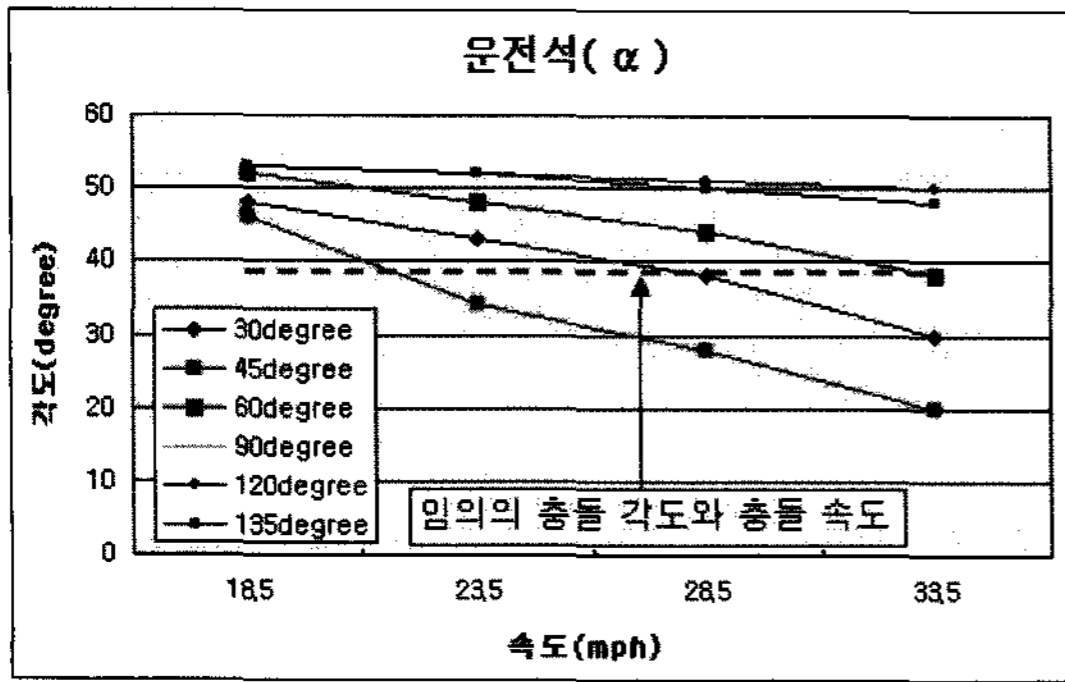


Fig. 17 충돌 상황 1에서 각도지수 비교(1)(운전석)

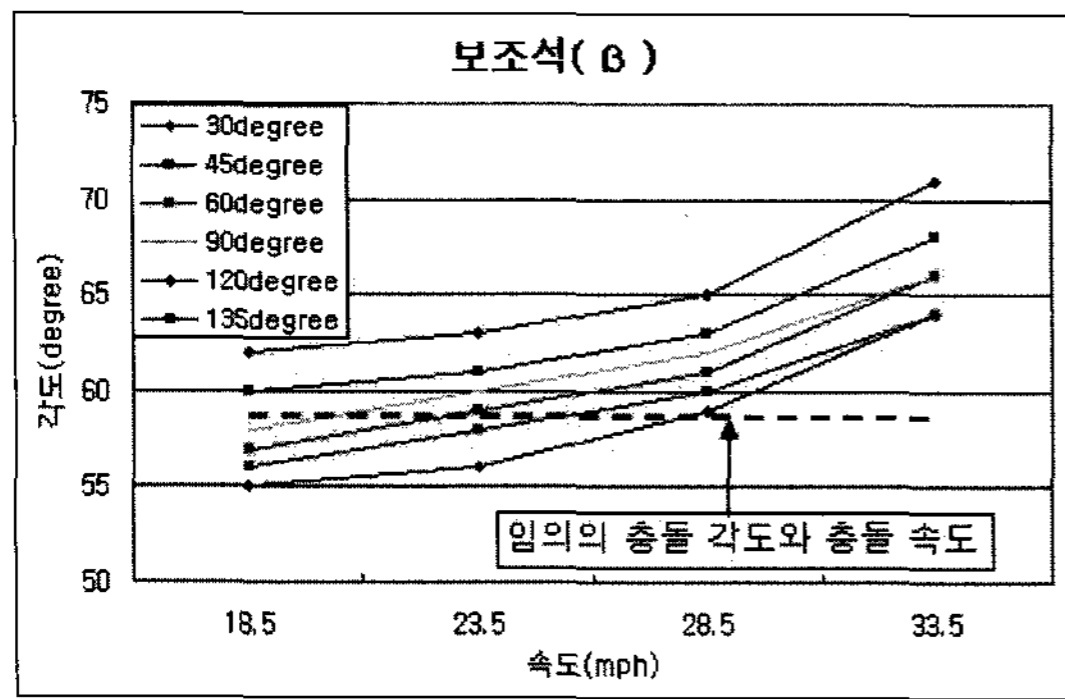


Fig. 18 충돌 상황 1에서 각도지수 비교(1)(보조석)

충돌 상황 1에서 도출한 피충돌 차량의 변형지수와 충돌 차량의 각도지수에서 공통된 충돌 각도와 충돌 속도의 범위를 살펴본 결과 충돌 각도 30°와 45° 사이의 값과 충돌 속도 23.5mph와 28.5mph 사이

의 범위로 좁혀짐을 알 수 있었다.

Table 6은 충돌 상황 1에서 도출된 변형지수와 각도지수에 대하여 충돌 속도를 0.5mph 사이로 세분화할 경우 피충돌 차량의 변형지수를 알아보기 위하여 두 점 사이의 보간 직선방정식을 이용하였다.

Table 7은 충돌 속도를 0.5mph 사이로 세분화할 경우 세분화된 충돌 속도에서 충돌 차량의 각도지수를 알아보기 위하여 좀 전과 같은 두 점 사이의 보간 직선방정식을 이용함으로써 운전석 쪽의 α와 보조석 쪽의 β에 대한 세분화된 충돌 속도에서 각도지수를 계산하였다.

5.1.2 충돌 상황 1에 대한 충돌 조건의 역 계산

Table 8은 Table 7을 이용하여 충돌 각도 30°와 45° 사이에서 충돌 후의 피충돌 차량의 변형지수가 65.15일 경우 보간법을 이용하여 충돌 속도를 0.5mph 사이로 세분화할 경우 각 충돌 속도에서 충돌 각도를 정리한 것이다.

Table 9는 Table 8에서 구한 피충돌 차량의 충돌 각도와 Table 7에서 구한 충돌 차량의 운전석 α의 충돌 각도와 보간하여 운전석 쪽의 α의 충돌 각도 30°와 45° 사이의 각도지수를 구한 것이다.

Table 10은 Table 8에서 구한 피충돌 차량의 충돌 각도와 Table 7에서 구한 충돌 차량의 보조석 β의 충돌 각도와 보간하여 보조석 쪽의 β의 충돌 각도 30°와 45° 사이의 각도지수를 구한 것이다.

Table 6 세분화된 충돌 속도에서 피충돌 차량의 변형지수(1)

충돌속도 (mph) \ 충돌각도(°)	24	24.5	25	25.5	26	26.5	27	27.5	28
30	53.88	54.12	54.36	54.61	54.85	55.10	55.34	55.58	55.82
45	86.23	86.73	87.23	87.73	88.23	88.73	89.23	89.73	90.23

Table 7 세분화된 충돌 속도에서 충돌 차량의 각도지수(1)

충돌속도 (mph) \ 충돌각도(°)		24	24.5	25	25.5	26	26.5	27	27.5	28
		운전석(α)	30	42.5	42	41.5	41	40.5	40	39.5
운전석(α)	45	33.4	32.8	32.2	31.6	31.0	30.4	29.8	29.2	28.6
	보조석(β)	30	56.3	56.6	56.9	57.2	57.5	57.8	58.1	58.4
보조석(β)	45	59.2	59.4	59.6	59.8	60.0	60.2	60.4	60.6	60.8

Table 8 보간법을 이용한 피충돌 차량의 충돌 각도(변형지수 : 65.15)

충돌속도 (mph)	24	24.5	25	25.5	26	26.5	27	27.5	28
충돌각도 (° = X)	35.22	35.06	34.92	34.77	34.63	34.48	34.34	34.20	34.07

Table 9 보간법을 이용한 충돌 차량의 운전석의 각도지수(각도지수 : 38)

충돌속도(mph)	24	24.5	25	25.5	26	26.5	27	27.5	28
충돌각도(° = X)	35.22	35.06	34.92	34.77	34.63	34.48	34.34	34.20	34.07
각도지수(° = Y)	39.33	38.90	38.45	38.01	37.63	37.13	36.69	36.26	35.81

Table 10 보간법을 이용한 충돌 차량의 보조석의 각도지수(각도지수 : 57)

충돌속도(mph)	24	24.5	25	25.5	26	26.5	27	27.5	28
충돌각도(° = X)	35.22	35.06	34.92	34.77	34.63	34.48	34.34	34.20	34.07
각도지수(° = W)	57.31	57.54	57.79	58.03	58.27	58.52	58.77	59.02	59.27

Table 11 편차를 이용한 충돌 각도와 충돌 속도의 역 추적(1)

충돌속도(mph)	24	24.5	25	25.5	26	26.5	27	27.5	28
충돌 각도(°)	35.22	35.06	34.92	34.77	34.63	34.48	34.34	34.20	34.07
편차(=Z)	1.43	1.19	1.08	1.07	1.98	3.18	4.44	5.82	7.34

Table 11은 Table 9-10에서 구한 세분화된 충돌 속도에서의 운전석 쪽의 α 와 보조석 쪽의 β 의 각도지수를 실제 충돌 후의 충돌 차량의 각도지수와 비교하여 오차자승을 이용한 것이다. 예를 들어 충돌 속도 24mph의 경우에는

$$Z = \sqrt{(Y-38)^2 + ((W-57)^2)} \quad (3)$$

을 이용한 것으로, 오차자승을 이용하여 가장 작은 편차를 보이고 있는 충돌 속도 25.5mph와 충돌 각도 34.77°로 역 추적하였다.

실제 충돌 상황 1의 충돌 조건은 충돌 각도 37°와 충돌 속도 25mph이지만 역 추적한 결과 충돌 각도는 약 2.23°가 낮게 나오고 충돌 속도는 0.5mph가 크게 나왔다. 편차에서 근소한 차이를 가지는 충돌 각도 34.92°와 충돌 속도 25mph이 충돌 상황 1에 더 근접해 있음을 알 수 있었고, 추정된 충돌 조건에서 충돌 각도는 2%, 충돌 속도는 6%의 오차 범위 이내에 있음을 알 수 있었다.

5.2 충돌 상황 2에 대한 사고 재구성

5.2.1 임의의 충돌 상황 2에 대한 변형지수, 각도지수 계산

임의의 충돌 상황 2을 설정하고 충돌 각도와 충돌 속도를 모른다는 가정 하에 충돌 전의 상황으로 역 추적하였다. 충돌 상황 2는 충돌 각도 55°와 충돌 속도 20mph로 측면 충돌이 일어난 경우로 설정하였다.

Table 12는 충돌 상황 2에서 피충돌 차량의 충돌 후의 변형지수를 나타낸 것이며, Fig. 19는 피충돌

차량의 변형지수를 분석하기 위하여 충돌 상황 2에서 나온 변형지수를 Fig. 10의 데이터베이스 변형지수 그래프에 나타내어 비교한 것이다.

Table 12 충돌 상황 2에서 피충돌 차량의 변형지수(I_d)(2)

충돌속도(mph)	임의의 충돌 속도2
충돌각도(°)	임의의 충돌 각도2
임의의 충돌 속도2	81.75

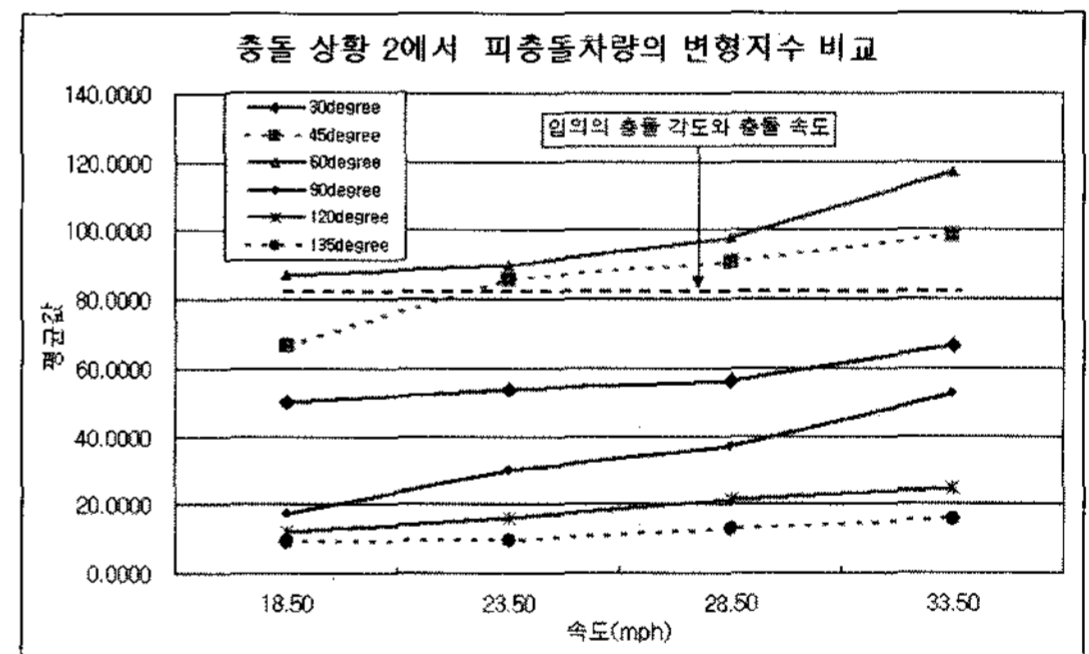


Fig. 19 충돌 상황 2에서 피충돌 차량의 변형지수 비교(2)

Table 13은 충돌 상황 2에서 충돌 차량의 각도지를 나타낸 것이며, Fig. 20-21은 충돌 상황 2에서 운전석과 보조석에서의 각도지수를 데이터베이스 각도지수 그래프에 나타내어 비교한 것이다.

Table 13 충돌 상황 2에서 충돌 차량의 각도지수(2)

충돌속도(mph)	임의의 충돌 속도2	
충돌각도(°)	운전석(α)	보조석(β)
임의의 충돌 각도2	48	58

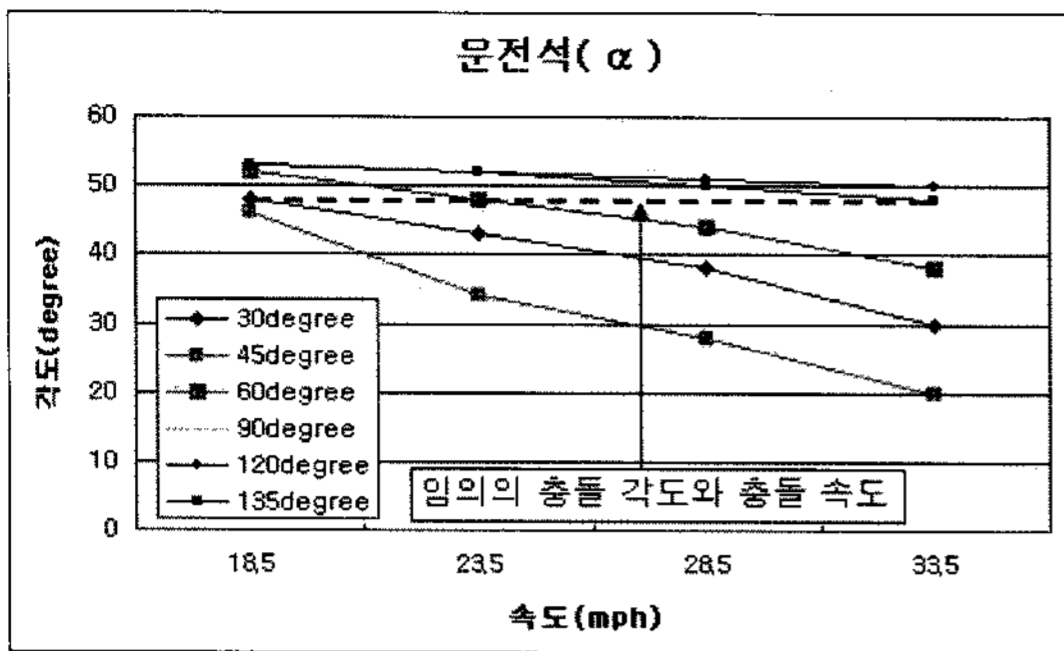


Fig. 20 충돌 상황 2에서 각도지수 비교(2)(운전석)

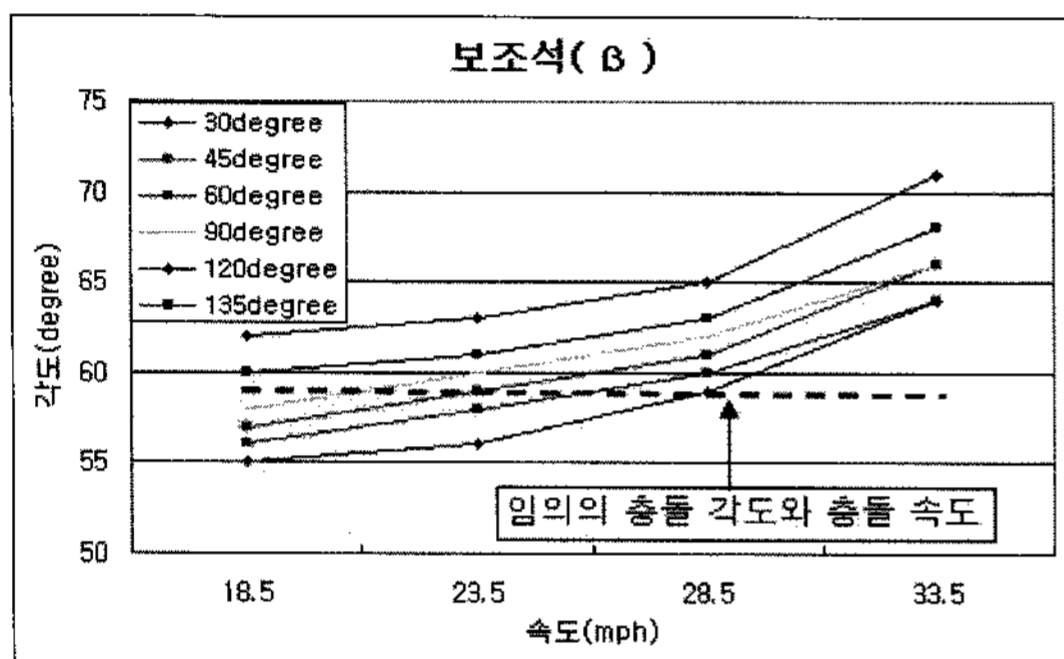


Fig. 21 충돌 상황 2에서 각도지수 비교(2)(보조석)

충돌 상황 2에서 도출한 피충돌 차량의 변형지수와 충돌 차량의 각도지수에서 공통된 충돌 각도와 충돌 속도의 범위를 살펴본 결과 충돌 각도 45°와 60° 사이의 값과 충돌 속도 18.5mph와 23.5mph 사이의 범위로 좁혀짐을 알 수 있었다.

Table 14는 충돌 상황 2에서 도출된 변형지수와 각도지수에 대하여 충돌 속도를 0.5mph 사이로 세분화할 경우 피충돌 차량의 변형지수를 알아보기 위하여 두 점 사이의 보간 직선방정식을 이용하였다.

Table 15는 충돌 속도를 0.5mph 사이로 세분화할 경우 세분화된 충돌 속도에서 충돌 차량의 각도지수를 알아보기 위하여 좀 전과 같은 두 점 사이의 보간 직선방정식을 이용함으로써 운전석 쪽의 α 와 보조석 쪽의 β 에 대한 세분화된 충돌 속도에서 각도지수를 계산하였다.

5.2.2 충돌 상황 2에 대한 충돌 조건의 역 계산

Table 16은 Table 14를 이용하여 충돌 각도 45와 60° 사이에서 충돌 후의 피충돌 차량의 변형지수가 81.75일 경우 보간법을 이용하여 충돌 속도를 0.5mph 사이로 세분화할 경우 각 충돌 속도에서 충돌 각도를 정리한 것이다.

Table 17은 Table 16에서 구한 피충돌 차량의 충돌 각도와 Table 15에서 구한 충돌 차량의 운전석 α 의 충돌 각도와 보간하여 운전석 쪽의 α 의 충돌 각도 45°와 60° 사이의 각도지수를 구한 것이다.

Table 18은 Table 16에서 구한 피충돌 차량의 충돌 각도와 Table 15에서 구한 충돌 차량의 보조석 β 의 충돌 각도와 보간하여 보조석 쪽의 β 의 충돌 각도 45°와 60° 사이의 각도지수를 구한 것이다.

Table 19는 Table 17-18에서 구한 세분화된 충돌

Table 14 세분화 된 충돌 속도에서 피충돌 차량의 변형지수(2)

충돌속도(mph)	19	19.5	20	20.5	21	21.5	22	22.5	23
충돌각도(°)									
45	68.27	70.21	72.15	74.04	76.03	77.97	79.81	81.85	83.79
60	87.25	87.55	87.85	88.16	88.46	88.76	89.06	89.37	89.67

Table 15 세분화 된 충돌 속도에서 충돌 각도의 각도지수(2)

충돌속도(mph)	19	19.5	20	20.5	21	21.5	22	22.5	23	
충돌각도(°)										
충돌차량(α)	45	44.8	43.6	42.4	41.2	40	38.8	37.6	36.4	35.2
	60	51.6	51.2	50.8	50.4	50	49.6	49.2	48.8	48.4
충돌차량(β)	45	57.2	57.4	57.6	57.8	58	58.2	58.4	58.6	58.8
	60	56.2	56.4	56.6	56.8	57	57.2	57.4	57.6	57.8

Table 16 보간법을 이용한 피충돌 차량의 충돌 각도(변형지수 : 81.75)

충돌속도(mph)	19	19.5	20	20.5	21	21.5	22	22.5	23
충돌각도(° = X)	55.67	54.98	54.15	53.17	51.88	50.28	48.02	44.83	39.80

Table 17 보간법을 이용한 충돌 차량의 운전석의 각도지수(각도지수 : 48)

충돌속도(mph)	19	19.5	20	20.5	21	21.5	22	22.5	23
충돌각도(° = X)	55.67	54.98	54.15	53.17	51.88	50.28	48.02	44.83	39.80
각도지수(° = Y)	49.64	48.66	47.52	46.21	44.59	42.57	39.94	36.26	30.62

Table 18 보간법을 이용한 충돌 차량의 보조석의 각도지수(각도지수 : 58)

충돌속도(mph)	19	19.5	20	20.5	21	21.5	22	22.5	23
충돌각도(° = X)	55.67	54.98	54.15	53.17	51.88	50.28	48.02	44.83	39.80
각도지수(° = W)	56.49	56.73	56.99	57.26	57.54	57.85	58.20	58.61	59.15

Table 19 편차를 이용한 충돌 각도와 충돌 속도의 역 추적(2)

충돌 속도(mph)	19	19.5	20	20.5	21	21.5	22	22.5	23
충돌 각도(°)	55.67	54.98	54.15	53.17	51.88	50.28	48.02	44.83	39.80
편차(=Z)	2.23	1.43	1.12	1.94	3.44	5.43	8.06	11.76	17.42

속도에서의 운전석 쪽의 α 와 보조석 쪽의 β 의 각도 지수를 실제 충돌 후의 충돌 차량의 각도지수와 비교하여 오차자승을 이용한 것이다. 예를 들어 충돌 속도 19mph의 경우에는

$$Z = \sqrt{(Y-48)^2 + ((W-58)^2)} \quad (4)$$

을 이용한 것으로, 오차자승을 이용하여 가장 작은 편차를 보이고 있는 충돌 속도 20mph와 충돌 각도 54.15°로 역 추적하였다.

실제 충돌 상황 2의 충돌 조건은 충돌 각도 55°와 충돌 속도 20mph이지만 역 추적한 결과 충돌 각도는 0.85°가 작게 나오고 충돌 속도는 차이가 없었다. 편차에서 근소한 차이를 가지는 충돌 각도 54.98°와 충돌 속도 19.5mph이 충돌 상황 3에 더 근접해 있음을 알 수 있었고, 추정된 충돌 조건은 실제 값에 비하여 충돌 각도에서만 1.55%의 오차 범위 이내에 있음을 알 수 있었다.

6. 결론

본 논문에서는 충돌 후의 충돌 차량과 피충돌 차량의 변형 정보만을 가지고 차량의 측면 충돌 전의 상황을 역 추적하는 방법에 대하여 연구하였다. 충돌 각도 6가지와 충돌 속도 4가지에 대하여 각 충돌 상황에 대한 충돌 해석을 수행하고 그 결과를 이용하여 변형지수와 각도지수에 대하여 총 24가지를 유도하였다.

임의로 설정한 충돌 상황에서 충돌 후의 피충돌 차량의 변형지수와 충돌 차량의 각도지수를 계산한

후 변형지수와 각도지수의 데이터베이스와 비교함으로써 충돌 각도와 충돌 속도에 대한 범위를 알아내고, 보간 직선방정식과 보간법을 적절히 활용하여 충돌 각도와 충돌 속도에 대하여 범위가 아닌 세분화된 충돌 각도와 충돌 속도에서의 충돌 전의 상황을 재구성하는 Algorithm을 개발하였다.

충돌 차량의 운전석 쪽의 α 와 보조석 쪽의 β 에 대한 각도지수와 피충돌 차량의 변형지수가 공통으로 포함되는 충돌 각도와 충돌 속도에 대하여 좀 더 세분화된 값을 찾기 위하여 보간 직선방정식을 이용한다. 세분화된 충돌 속도에서 충돌 각도를 계산한 후 피충돌 차량의 충돌 속도를 충돌 차량의 운전석과 보조석에 대해 보간법을 이용하여 각도지수를 구한다. 세분화된 충돌 속도에서 나온 각도지수를 운전석 쪽의 α 와 보조석 쪽의 β 에 대하여 각도지수 대표 값과 비교하여 오차자승을 이용함으로써 임의로 설정한 충돌 상황에서의 충돌 각도와 충돌 속도를 역 추적하는 것이다.

충돌 상황 1에서의 역 추적 결과 충돌 속도 25.5mph와 충돌 각도 34.77°로 실제 충돌 조건과 비교하면 충돌 각도에서는 2%, 충돌 속도에서는 6%의 오차 범위에 있었으며, 충돌 상황 2에서는 역 추적 결과 충돌 속도 20mph와 충돌 각도 54.15°로 실제 충돌 조건과 비교하면 충돌 각도에서만 1.5%의 오차 범위가 나타났다. 2가지의 충돌 상황을 종합해 본 결과 개발한 Algorithm을 이용하면 2가지의 경우에 대하여 실제 충돌 조건과 비교했을 때 10%이내의 오차 범위에 있음을 알 수 있다.

추후 연구과제로 좀 더 다양한 충돌 각도와 충돌 속도에 대하여 변형지수와 각도지수를 구축하고, 본 논문에서는 언급하지 않은 충돌하는 두 차량의 충돌 속도가 다른 경우와 서로 다른 차종 간의 충돌 상황에 대하여 변형지수와 각도지수의 데이터베이스가 구축되게 된다면 실제 임의의 충돌 상황에서 충돌 후의 변형 정보만을 가지고 충돌 전의 충돌 상황을 역 추적하는데 활용도가 상당히 높을 것으로 사료된다.

References

- 1) NHTSA "Side Impact Protection," Federal Motor Vehicle Safety Standards, 49 CFR Part 571, Docket No.88-06, Notice8, 1994.
- 2) R. Bergmann, C. Bremer, X. Wang and A. Enblen, "Requirements of Comprehensive Side Protection and Their Effects on Car Development," 15th Int. Tech. Conf. Enhanced Safety of Vehicles, Paper No.96-S6-W-16, 1996.
- 3) K. Seyer and B. Fildes, "Working towards a Harmonized Dynamic Side Impact Standard and Australian Perspective," 15th Int. Tech. Conf. Enhanced Safety of Vehicles, Paper No. 96-S6-O-5, 1996.
- 4) T. J. Trella, R. R. Samaha and E. J. Smith, "The Use of Advanced Analytical Techniques in Side Impact Crash-worthiness Research," 15th Int. Tech. Conf. Enhanced Safety of Vehicles, Paper No.96-S6-O-10, 1996.
- 5) K. Izumi, A. Okamoto, M. Yoshikawa and H. Ishigure, "Computer Analysis for Side Impact Occupant Protection," 15th Int. Tech. Conf. Enhanced Safety of Vehicles, Paper No. 96-S6-O-8, 1996.
- 6) I. Jang and S. Lee, "The Relationship between Deformation Shape and Energy for Various Crash Configurations of Two Cars," Transactions of KSAE, Vol.7, No.3, pp.225-233, 1999.
- 7) I. Jang and D. Chae, "The Derivation of Simplified Vehicle Body Stiffness Equation Using Collision Analysis," Transactions of KSAE, Vol.8, No.4, pp.177-184, 2000.
- 8) I. Jang and D. Chae, "Collision Configurations Reconstruction Using Deformation Shape and Deformation Severity of Car Body," Transactions of KSAE, Vol.9, No.1, pp.171-180, 2001.
- 9) J. Lim, K. Kim and H. Huh, "Side Impact Analysis of an Auto-body with 60TRIP Steel for Side Members," Transactions of KSAE, Vol.11, No.2, pp.164-171, 2003.
- 10) D. Yoo, J. Kim, H. Beom and O. Kwon, "A Study of Numerical Analysis for Korea NCAP Side Impact," Spring Conference of Proceedings, KSAE, pp.1527-1523, 2005.
- 11) HYPERMESH Manual, Altair, USA, 2004.
- 12) LS-DYNA 3D Keyword User's Manual, LSTC, USA, 1999.