

〈논 문〉 SAE NO. 97370103

단순 보모델을 이용한 측면충돌 해석기술 연구

A Study on Side Impact Simulation Technique using Simple Beam Model

강 성 종*
S. J. Kang

ABSTRACT

In this study, an analysis technique using simple beam model for predicting structure crashworthiness of the passenger car side impacted with an angle by another passenger car was investigated. The simple model was composed of major beam-like side structure which carry almost all side impact load. A procedure of component collapse test, calculation of load carrying capability and dynamic simulation was carried out sequentially. Transient dynamic algorithms and a computer program to simulate deformations and motions of the impacted car was developed. The developed procedure was applied to a 3 door passenger car side impacted with an angle of 75 degree and the analysis results show good agreements with the actual test results.

주요기술용어 : Side Impact(측면충돌), Local Buckling(국부좌굴), Load Carrying Capability(하중전달특성), Collapse Mode(붕괴형태), Dynamic Simulation(동적 모사)

1. 서 론

최근 승용차의 측면충돌 안전성에 대한 관심이 고조되면서 미국, 유럽공동체 등에서 새롭게 강화된 법규를 제정 실시 혹은 수년내 제정 실시 예정중에 있다. 이러한 움직임에 대응하기 위해 소성대변형에 의해 충돌하중을 충분히 흡수할 수 있도록 차체의 충돌안전성(Crashworthiness)를 조기에 확보하는 것은 중요한 설계목표가 되고있다.

그러한 목표를 달성하기 위해 실차를 쉘요소로 그대로 형상화한 대규모 모델에 소성대변형 유한요소법을 이용한 동적 해석기술이 활발히 개발 적용되어 왔으나, 여러개의 박판이 서로 스폿용접(Spot Weld)된 복잡한 구조물인 차체구조를 수만개의 상세한 요소로 나누어 소성대변형 동적 해석을 수행하는 것은 고기능 대용량의 컴퓨터를 필요로할 뿐만아니라 설계변경에 따른 모델변경, 해석, 결과분석과 대안 제시에 많은 시간이 소요된다. 따라서, 완전한 상세설계개념이 확정되지 않은 개념설계단계는 물론, 시험의 완벽한 피이드백(Feedback)에 의한 최적화 설계 결정이 신

*정회원, 대구효성가톨릭대학교 기계자동차공학부

속히 이루어져야 하는 초기설계단계에 효과적으로 적용하는데 한계가 있다. 신차 개발기간은 점점 짧아지고 있는 반면에 다양한 안전법규가 계속 제정 강화됨에 따라 설계단계에서 검토하여야 할 항목 수가 늘어나고 있어 실차 형상을 그대로 묘사한 복잡한 상세모델의 탄소성대변형 동적해석기술에 의해서 모든 안전법규를 만족하는 자동차를 설계하는 것은 거의 불가능하며 최종 설계의 충돌성능 확인 혹은 중간 부품의 충돌성능 검토 등에 제한적으로 사용될 수 밖에 없다.

따라서 설계초기단계부터 신속하고 효과적으로 각종 측면충돌 법규에 대응하면서 최적의 차체구조를 확보할 수 있는 해석기술이 필요하여 본 연구에서는 단순한 보요소로 구성된 모델을 이용하여 임의의 각도로 측면충돌되는 승용차의 측면충돌 해석기술을 개발하였다(그림1). 75도의 각도를 갖고 40km/h의 속도로 측면충돌되는 3도어(Door) 승용차의 충돌해석에 적용, 그 결과를 시험결과와 비교 검토하였다.

2. 본 론

2.1 해석과정

먼저, 측면충돌시 대부분의 충돌하중을 지탱하

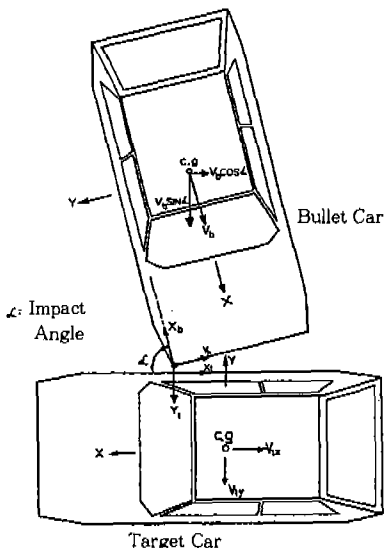


Fig.1 Definitions of Coordinate System and Variables of an Angled Side Impact

는 피충돌차(Impacted Car 혹은 Target Car)의 측면구조를 주요 보형상 부재(Beam-Like Member)로 이루어진 단순 보모델로 구성한다.^{1),2)} 이때 붕괴발생이 예상되는 지점의 붕괴특성을 시험 혹은 해석에 의해 구하여 단순 보모델에 그 특성을 소성힌지(Plastic Hinge)로 나타낸다. 다음, 충돌하는 차(Impacting Car 혹은 Bullet Car)와의 주요 접촉 예상점에서의 하중전달특성을 구하고, 최종적으로 본 연구를 통해 개발된 동적해석프로그램 ANSIMP(Simulation of ANgled Side IMPact)을 이용하여 임의의 각도를 갖고 측면충돌되는 승용차의 중요한 측면차체의 변형과 무게중심의 속도, 요잉(Yawing), 롤링(Rolling)등 강제운동 변화를 산출한다.

2.1.1 차체 보모델 구성

측면충돌 하중을 받는 차체는 주로 측면 주요 부재의 압축,굽힘,비틀림 등 소성대변형 거동에 의해 충돌에너지를 흡수하므로 도어 안전빔(Safety Beam)을 포함한 차체 측면부만을 나타내는 보모델을 구성한다. 충돌과정에서 국부좌굴 발생과 급격한 단면 변화로 인해 붕괴되어 소성힌지 발생이 예상되는 취약부(Weak Area) 혹은 하중이 많이 작용하는 부재의 중간부와 부재간 결합부(Joint Area) 부근에 소성힌지를 도입한다.

본 연구에 적용한 3도어 승용차 해석 모델은 그림 2와 같으며 소성힌지는 다음 부위에 도입하였다.

- 패널간의 용접이 존재하고 단면 특성치가 급격히 변화하는 측면부재간의 조인트(Joint)부
- 플로어 멤버(Floor Member)와 사이드 실(Side Sill) 조인트부
- 센터 필라(Center Pillar)의 중간부인 웨이스트 레일(Waist Rail)과 큰 구멍(Hole)이 존재하는 프론트 필라하단부
- 피충돌차의 앞 모서리 부와 초기 접촉되는 부재 중간부

단단한 지지구조를 갖는 절점 1, 16에는 모든 변위 구속조건을 설정하였고, 상대적으로 약한 지지구조이나 승용차의 측면방향 이동변위에 대

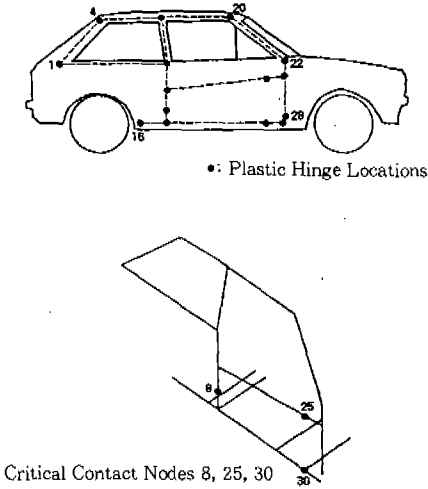


Fig.2 3-Door Side Impact Simulation Model

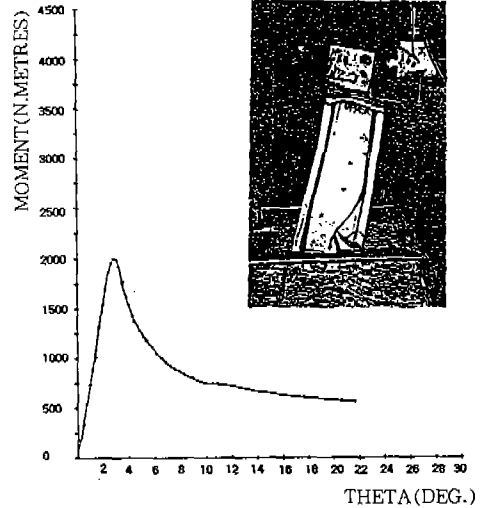


Fig.3 Bending Moment-Rotation Angle of B Pillar Waist-Rail (Longitudinal Load)

해서는 충분한 지지역활을 하는 절점 4, 20, 22, 28에는 측면방향 이동변위만 구속하고 나머지 변위들은 불구속하는 경계조건을 설정하였다.

2.1.2 하중전달특성 (Load Carrying Capability) 산출

측면충돌의 경우 측면차체 구조물이 자동차의 실제질량에 비해 그 질량이 상대적으로 매우 작고, 소성대변형되면서 충격하중에 저항하는 저항력과 에너지흡수가 발생하므로 구조강성효과 (Structural Stiffness Effect)에 비해 관성효과 (Inertia Effect)는 상대적으로 작아 무시할 수 있다고 가정하였다. 따라서, 측면부재의 하중전달 특성을 구하는 모든 소성대변형 거동의 예측 과정은 준정적 (Quasi-Static) 상태에서 수행된다.

1) 소성힌지 붕괴특성 (Collapse Characteristics of Plastic Hinge)

측면충돌시 소성힌지로서 충돌에너지 흡수에 중요한 역할을 하리라 예상되는 부재중간의 취약부와 부재간 결합부 부근의 취약부에 대해 비틀림, 2개 주축 (Principal Axis) 방향으로의 굽힘붕괴특성을 파악한다.³⁾ 설계초기단계에서는 소성힌지 발생 예상지점에 대해 그 단면을 단순단면으로 이상화하여 굽힘특성을 산출할 수 있으며, 상세설계 단계에서는 상세모델을 이용한 소성대변

형 해석을 수행하여 필요한 소성힌지의 붕괴특성을 얻을 수 있다.^{3), 4)} 또한 실차가 있는 경우는 보다 정확한 값을 얻기위해 소성힌지 발생 예상부위들이 충분히 포함되도록 차체를 적당히 잘라내 콘크리트 블럭에 심어 프레임에 고정된 후 유압 하중장치에 의해 변위하중을 가하면서 소성힌지 발생 거동과 모우멘트-회전각 관계의 붕괴특성을 산출한다 (그림3).

2) 하중전달특성 (Load Carrying Capability)

피충돌차의 중요 하중전달점 (충돌차와의 접촉점)을 선정하고 산출된 소성힌지 예상지점의 모우멘트-회전각 붕괴특성을 입력데이터로하여 비선형대변형 상용프로그램을 이용하여 준정적상태에서 각 접촉예상 지점에 하중을 가하면서 하중전달 특성을 산출한다 (그림4).

2.1.3 동적 시뮬레이션 해석 (Dynamic Simulation Analysis)

본 연구에서 개발된 각도를 갖고 측면충돌되는 승용차의 동적해석 프로그램 ANSIMP를 이용하여 측면차체의 변형과 피충돌차의 강체운동 변화를 산출한다.

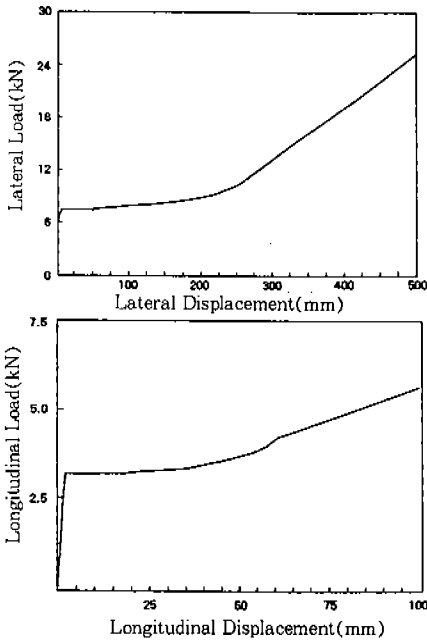


Fig.4 Load Carrying Capabilities at Node 8 of Fig.2

2.2 측면 충돌 동적 시뮬레이션 프로그램 개발

2.2.1 적용가정

프로그램 개발이론 전개에 적용된 주요 가정들은 다음과 같다.

- 측면구조의 질량은 작아서 그 구조물의 관성 효과는 무시할 수 있다.
- 충돌하는 동안에 요 각도(Yaw Angle)는 작아서 충돌차와 피충돌차 사이에 미끄러짐이 발생하지 않는다.
- 충돌 각도는 충돌하는 동안에 변화하지 않는다.
- 피충돌차의 수직방향 이동과 피칭(Pitching)은 무시할 만큼 작다.
- 피충돌차에 가해지는 주요 외력은 충돌차로부터의 충돌력과 타이어의 미끄러짐으로 인한 타이어 저항력이다.
- 충돌차에 전면부 변형은 상대적으로 작으므로 충돌차의 전면부 강성은 충돌하는 동안 일정하다(정적실험 혹은 해석으로부터 산출).

2.2.2 기본식 전개 및 연산과정

변형과 충돌력

충돌시간 t 에서 각각의 접촉점에 대해 아래의 식과 연산과정을 적용함으로써 다음 충돌시간 단계 $t + \Delta t$ 에서의 각 접촉점의 변형과 충돌력을 산출한다.

그림1에서 두 자동차간 힘의 평형을 피충돌차의 X -, Y -방향에 대하여 나타내면 다음과 같다.

X -방향 :

$$K_{bx}X_b \cos \alpha - K_{by}Y_b \sin \alpha - K_{ix}X_i = 0 \quad (1)$$

Y -방향 :

$$K_{bx}X_b \sin \alpha + K_{by}Y_b \cos \alpha - K_{iy}Y_i = 0 \quad (2)$$

X_i, K_{ix} : 피충돌차 접촉점의 종방향 변위와 강성

Y_i, K_{iy} : 피충돌차 접촉점의 횡방향 변위와 강성

X_b, K_{bx} : 충돌차 접촉점의 종방향 변위와 강성

Y_b, K_{by} : 충돌차 접촉점의 횡방향 변위와 강성

α : 충돌각(Impact Angle)

윗식을 X_i, Y_i 에 관해 정리하고 시간에 대해 한번 미분하면 \dot{X}_i, \dot{Y}_i 는

$$\dot{X}_i = (K_{bx}\dot{X}_b \cos \alpha - K_{by}\dot{Y}_b \sin \alpha) / K_{ix} \quad (3)$$

$$\dot{Y}_i = (K_{bx}\dot{X}_b \sin \alpha + K_{by}\dot{Y}_b \cos \alpha) / K_{iy} \quad (4)$$

로 구해진다.

다음으로 충돌차와 피충돌차 간의 접촉점에서의 미끄러움이 발생하지 않는다는 가정으로부터 피충돌차의 X -, Y - 방향에 대해서 다음과 같은 식이 성립한다.

X-방향 :

$$V_{ix} + \dot{X}_i = V_b \cos\alpha + \dot{Y}_b \sin\alpha - \dot{X}_b \cos\alpha \quad (5)$$

Y-방향 :

$$V_{iy} + \dot{Y}_i = V_b \sin\alpha - \dot{X}_b \sin\alpha - \dot{Y}_b \cos\alpha \quad (6)$$

V_{ix} : 피충돌차 무게중심의 종방향 속도

V_{iy} : 피충돌차 무게중심의 횡방향 속도

V_b : 충돌차의 충돌속도

다음으로 식(3)의 \dot{X}_i 를 식(5)에 대입 정리하면,

$$\begin{aligned} \dot{X}_b(K_{ix} \cos\alpha + K_{bx} \cos\alpha) - \dot{Y}_b(K_{ix} \sin\alpha + K_{by} \sin\alpha) \\ = K_{ix}(V_b \cos\alpha - V_{ix}) \end{aligned} \quad (7)$$

마찬가지로 식(4)의 \dot{Y}_i 를 식(6)에 대입 정리하면,

$$\begin{aligned} \dot{X}_b(K_{iy} \sin\alpha + K_{bx} \sin\alpha) + \dot{Y}_b(K_{iy} \cos\alpha + K_{by} \cos\alpha) \\ = K_{iy}(V_b \sin\alpha - V_{iy}) \end{aligned} \quad (8)$$

를 각각 얻게된다.

여기서 $C_1 = K_{ix} \cos\alpha + K_{bx} \cos\alpha$
 $C_2 = -(K_{ix} \sin\alpha + K_{by} \sin\alpha)$
 $C_3 = K_{ix}(V_b \cos\alpha - V_{ix})$
 $C_4 = K_{iy} \sin\alpha + K_{bx} \sin\alpha$
 $C_5 = K_{iy} \cos\alpha + K_{by} \cos\alpha$
 $C_6 = K_{iy}(V_b \sin\alpha - V_{iy})$ 라 놓으면,

식 (7), (8)은 각각 다음과 같이 표현되고

$$C_1 \dot{X}_b + C_2 \dot{Y}_b = C_3 \quad (9)$$

$$C_4 \dot{X}_b + C_5 \dot{Y}_b = C_6 \quad (10)$$

\dot{X}_b, \dot{Y}_b 에 관해서 풀면

$$\dot{X}_b = \frac{C_3 C_5 - C_2 C_6}{C_1 C_5 - C_2 C_4} \quad (11)$$

$$\dot{Y}_b = \frac{C_3 - C_1 \dot{X}_b}{C_2} \quad (12)$$

가 구해진다.

식(11), (12)로 부터 시간 t에서의 충돌차 접촉지점에서의 속도 \dot{X}_b 와 \dot{Y}_b 를 구한후, 식 (3)과 (4)로 부터 피충돌차의 접촉점 속도 \dot{X}_i 와 \dot{Y}_i 를 각각 산출한다. 이것들을 오일러 적분법(Euler Intergration)에 의해 적분하여 피충돌차의 접촉점의 변형거리가 계산된다.

이렇게 계산된 각 접촉점에서의 변위에 대해 중, 횡강성을 하중전달 특성곡선으로부터 구하여 다음 스텝(t+Δ)에서의 각 접촉점의 접촉점 강성 K_{ix}, K_{iy} 로 사용하며 피충돌차에 가해지는 각 접촉점에서의 종방향 접촉력 F_{cx} 와 횡방향 접촉력 F_{cy} 를 다음 식으로 부터 구하여 충돌차와 피충돌차에 작용되는 강제운동력으로 사용한다.

$$F_{cx} = K_{bx} X_b \cos\alpha - K_{by} Y_b \sin\alpha \quad (13)$$

$$F_{cy} = K_{bx} X_b \sin\alpha + K_{by} Y_b \cos\alpha \quad (14)$$

강체운동(Rigid Body Motion)

(13), (14)식으로부터 구한 각 접촉점에 가해지는 중, 횡 방향 충격접촉력들을 이용하여 다음의 강체운동식으로부터 해당시간 t에서의 충돌차와 피충돌차의 강체운동들을 구한다(단, 피충돌차의 회전과 수직방향 움직임은 무시한다).

횡방향 : $M(\dot{V} + Ur) = \sum F_{cy}$

종방향 : $M(\dot{U} + Vr) = \sum F_{cx}$

요잉(Yawing) : $I_z \dot{r} = \sum H_z$

롤링(Rolling) : $I_x \dot{p} = \sum H_x$

여기서,

M : 자동차질량

F_{cx}, F_{cy} : 각 접촉점에서 가해지는 종방향, 횡방향 충돌력

- V, \dot{V} : 무게중심의 횡방향 속도와 가속도
- U, \dot{U} : 무게중심의 종방향 속도와 가속도
- r, \dot{r} : 요 각속도(Yaw Rate)와 요 각가속도(Yaw Acceleration)
- I_y, H_x : 요 관성질량과 작용 요 모우멘트
- p, \dot{p} : 롤 각속도(Roll Rate)와 롤 각가속도(Roll Acceleration)
- I_x, H_x : 롤 관성질량과 작용 롤 모우멘트

계산과정

(a) 초기화

충돌시작(t=0)에서 상대적 위치검토를 통해 선정된 첫번째 접촉점의 초기 횡, 종 접촉강성을 초기치로 입력하여 그 점의 속도를 산출하고 오일러 적분에 의해 t=Δt에서의 첫째 접촉점의 변위와 종, 횡강성을 산출한 후 강제 방정식으로부터 충돌차와 피충돌차의 충돌초기 강제운동값을 산출한다.

(b) 이후 시간을 Δt씩 증가시키면서 다음 계산을 반복해나간다.

- 전단계(충돌시간 t)에서 계산된 각 접촉점의 종, 횡강성을 이용하여 충돌시간 t+Δt에서의 속도 및 변위를 계산한다.
- 각 접촉점에서의 접촉력을 계산하여 강제운동식으로부터 충돌차와 피충돌차의 강제운동을 산출한다.
- 계산된 각 접촉점의 변위를 고려하여 충돌차와 피충돌차의 상대적 위치로서 새로운 접촉점 발생여부를 검토하고 접촉점을 선정한다.
- 각 접촉점에 대해 하중전달 특성곡선으로부터 충돌시간 t+Δt에서의 종, 횡강성을 산출한다.

2.2.3 주요 입력 및 결과산출 항목

1) 입력

피충돌차 :

- 주요 측면을 구성하는 모델의 좌표 및 구성부재의 단면특성(단면적, 단면관성모우멘트)
- 주요지점의 하중전달특성
- 타이어 마찰특성

- 무게/무게중심/관성질량 특성(Yaw, Roll) 충돌차 :

- 충돌속도
- 전면부의 부위별 횡, 종방향 강성
- 2) 산출결과

피충돌차 :

- 접촉점 들의 횡, 종방향 변형 속도 및 변위
- 무게중심의 횡, 종방향 가속도, 속도 및 이동량
- 요/롤 각속도 및 변위각도

충돌차 :

- 무게중심의 종방향 속도
- 접촉점의 횡, 종방향 변형

2.3 실차 충돌해석 적용

75도의 각도를 갖고 40km/h의 속도로 서로 측면충돌되는 동일한 3도어 해치백 양산차간의 해석에 적용하여 그 결과를 실험치와 분석 비교하였다.

1) 횡방향 가속도(그림5)

80ms 까지는 실험치와 잘 일치하나 그 이후로는 차이를 나타내고 있다. 이는 50ms이후 급격

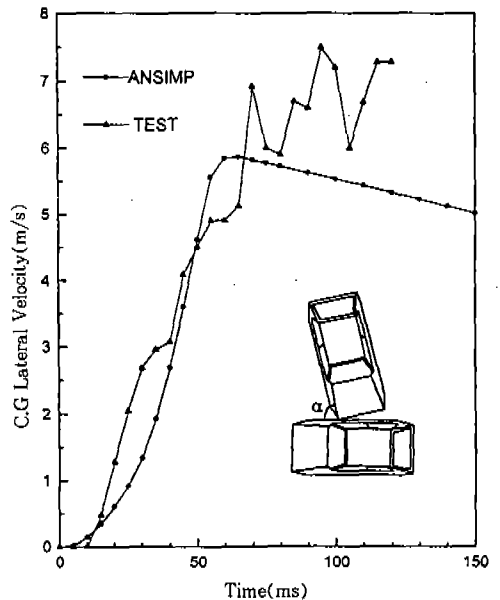


Fig.5 C.G Lateral Velocity

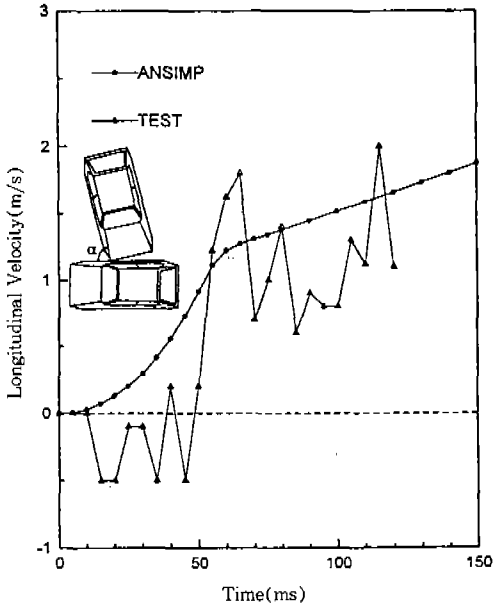


Fig.6 C.G Longitudinal Velocity

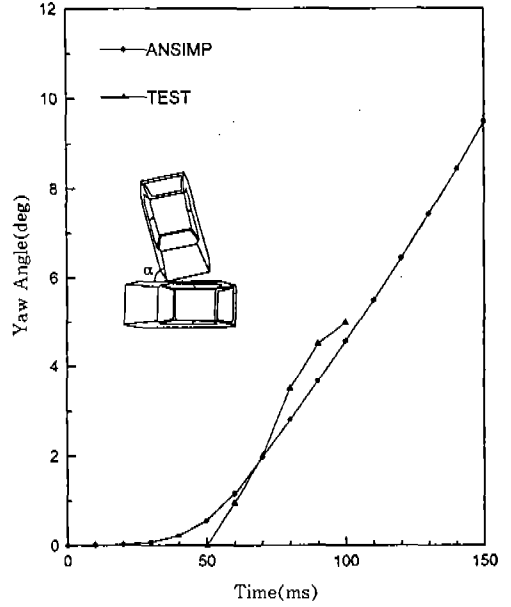
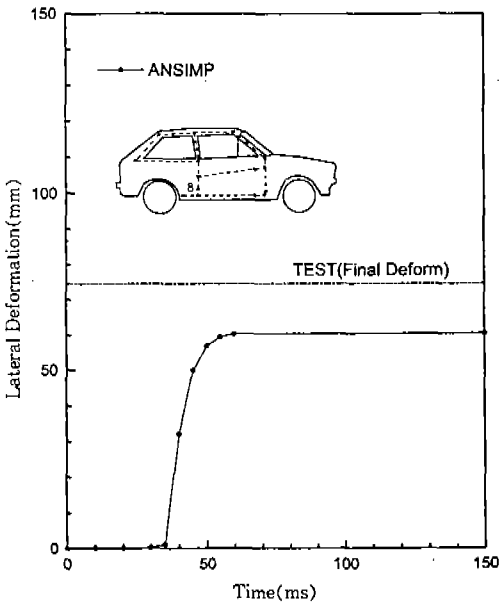
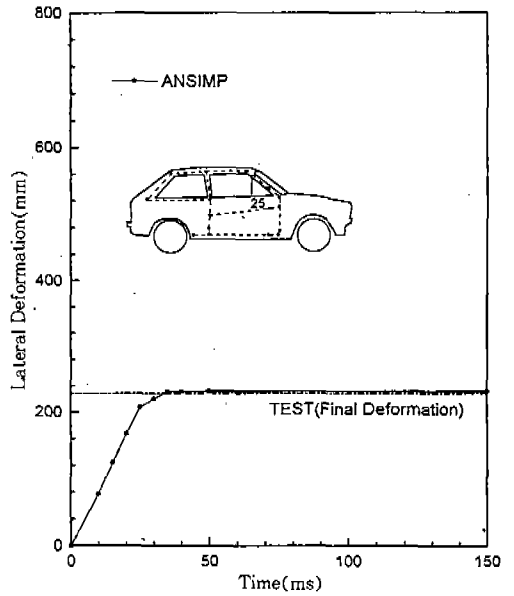


Fig.7 Yaw Angle



(a) Lateral Deformation of Node 8



(b) Lateral Deformation of Node 25

Fig.8 Final Deformation

히 증가하는 피충돌차의 요(Yaw)거동(100ms에서 약 4.5°의 요발생)으로 인해 충돌각의 변화와 접촉부간 미끄럼이 발생하기 때문이라고 생각된다.

2) 종방향 가속도(그림6)

적은량이라 실험치가 다소 불안정하나 대체적으로 실험치와 크기 및 경향이 일치하고 있다.

3) 요 변화 및 최종 측면 변형량(그림7, 8)

실험치와 매우 잘 일치하고 있으며 절점 8은 충돌 후 35ms에서 피충돌차와 접촉이 시작됨을 알 수 있다.

3. 결 론

단순한 보모델을 이용한 측면충돌해석 과정과 동적시뮬레이션 프로그램을 개발하여 실차에 적용한 결과 충돌차의 변형, 동적거동 등에 있어 실험 결과와 매우 잘 일치하는 결과를 얻었다.

본 연구를 통해 개발된 과정과 프로그램을 이용하면 설계초기단계에서부터 차체의 측면충돌특성을 고려한 구조최적화 설계가 가능하며 모델의 단순함으로 신속히 모델링과 해석 및 결과 분석을 할 수 있어 능률적이다.

또한, 해석모델과 프로그램에 약간의 수정을 가하면서 측면충돌 안전법규의 변화에 따른 해석

기술을 확보할 수 있어 안전법규의 변화에 효과적으로 대응할 수 있다.

후 기

본 연구는 대구효성가톨릭대학교의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Kecman, D. and Miles, J., "Application of the FEM to the Door Intrusion and Door Crush Analysis of a Passenger Car", 1979.
2. Kang, S. J. and Choi, J. H., "Design Sensitivity Analysis of Body Structure Using Skeleton Model", SAE912514, IPC-6 Conference, 1991.
3. 강성종, "소성현지를 갖는 보모델을 이용한 루프 붕괴 해석기술", 한국자동차공학회 논문집, 제4권 제6호, pp.216~222, 1996.
4. 강신유, 김홍수, 이인혁, "단순 차체 모델링을 이용한 충돌특성 및 승객거동해석", 한국자동차공학회 안전부분 학술강연회, pp.18~26, 1996.