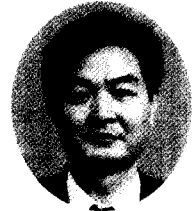


LMS를 이용한 자동차 안전도 해석



한 병 기*

1. 배 경

자동차의 안전에 대한 일반인의 인식이 확산되고, 안전법규가 강화됨에 따라 자동차의 성능향상에 대한 새로운 조건들이 요구되고 있다. 이에 따라 각국은 신차 개발 비용의 절감을 위하여 설계 초기단계에서부터 차체의 충돌안전성을 고려하지 않을 수 없게 되었다. 충돌시 승객의 안전을 확보하는 방법 및 예측하는 방법 등이 주된 관심이 되고 있다. 이전부터 많은 노력들을 기울여 왔으나 충돌현상에 대한 이해부족, 차량감속도와 승객의 거동 및 상호관계, 적절한 설계기법 등에 대한 이해부족으로 별로 진전되지 못하고, 충돌시험 등이 주된 설계 방법으로 되어 왔다. 이후 여러 연구들이 발전되어 왔는데 그중 비선형 FEM기법은 많은 주목을 받아왔다. 이들 code 들은 차량구조를 실제와 같이 표현할 수 있다는 점과 사용자의 기술이나 경험 없이도 모델링과 해석 단계에서 mass와 force의 분포가 자동으로

이루어지는 장점들로 인해 설계자 및 해석자들에게 매우 매력적인 대상이 되어 왔다. 그러나 이러한 비선형 FEM기법에서는 모델구성이나 해석에 지나치게 많은 비용과 시간이 소요되며 차량에 대한 정보가 거의 없는 설계 초기에서는 적합하지 않은 방법이다. 따라서 설계 초기단계에서는 차량 충돌거동해석과 설계변경을 위해 모델이 간단하고 비용과 시간이 적게 소모되는 LMS (Lumped Mass Spring) 방법이 효과적이다. LMS 모델에 의한 변형해석은 자동차의 질량을 주요한 부위의 집중 질량으로 분산하여 나타내며 그 질점간의 변형 특성은 비선형스프링과 clearance로 모델화한 것이다. 이 모델의 운동방정식으로부터 각 질점의 감속도, 속도, 변위 및 질점에 작용하는 하중 등을 수치 적분에 의해 구할 수가 있다. 이 방법은 전반적인 감속도 특성에 각 구조요소가 어떠한 영향을 주는지를 파악함으로써 설계에서 단계적인 구조변경을 가능하게 한다.

* 성희원·홍익대학교 광과대학 기계공학과, 교수

2. 연구초기의 역사 및 방법

1970년대에 Kamal¹⁾은 차량의 전방 충돌거동을 해석할 수 있는 간단한 LMS 모델을 제시하였다. 이 모델은 Fig. 1과같이 3개의 집중질량(lumped mass)과 8개의 비선형 스프링요소로서 차체를 모델링하였다. 이 모델은 단순성 및 비교적 좋은 정확도를 갖는 장점 때문에 현재도 널리 사용되고 있다.

Kamal의 모델은 차량의 충돌현상을 1차원으로 모델링하였다. 과도하게 과장된 면이 없지 않으나 전방충돌에 대한 모델링으로는 적합하다. 충돌현상을 극도로 단순하게 표현하므로, LMS 모델을 사용하는 사용자는 충돌현상을 매우 잘 이해하고 있어야 하고, 변수해석(parameter study)의 결과를 설계 가능한 자료로 활용할 수 있는 능력이 있어야 한다.

한편, 각 부재의 비선형스프링특성은 준정적압축시험기(static crusher)에서 얻을 수 있다. Fig. 2와 같이 준정적압축시험기는 full vehicle, test

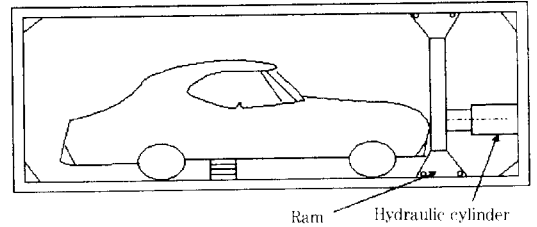


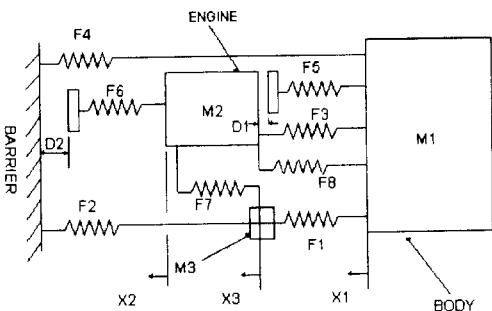
Fig. 2 Vehicle static crusher

buck, structural component 등을 올려놓고 mass spring 모델을 위한 반력을 구하는 장비이다. 또한 동적 시험에서는 정적하중특성보다 증가된 강성을 갖고 있으므로, 동적효과는 Dynamic Amplification Factor에 의하여 고려된다. LMS 모델에서 사용되는 Dynamic Amplification Factor에 대한 연구는 후에 Prasad와 Padgankar²⁾에 의해 좀더 자세하게 이루어졌다. 이러한 Kamal의 해석은 승객거동해석과 아울러 부품이나 구조전체의 전반적인 충돌특성 목표를 설정하는 데에 사용될 수 있다.

GM의 Lin³⁾은 Kamal의 연구 이후 LMS 모델을 후방 충돌의 경우로 확장하였다. 이 모델은 Fig. 3과 같이 4개의 집중질량과 7개의 비선형 스프링으로 이루어졌다. 시뮬레이션의 결과는 실험 결과와 잘 일치함을 보였을 뿐만 아니라, parametric study를 통하여 연료탱크와 후방 쿼터패널의 보강효과 및 배리어의 중량 및 종류가 충돌시 차체거동에 미치는 영향을 고찰하였다.

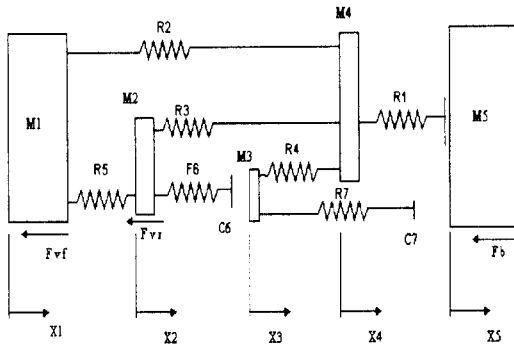
I.A.D Ltd(U.K)의 Hall⁴⁾은 충돌해석시 FEM 기법을 이용했을 때의 계산 비용과 시간에 있어서의 어려움을 해결하기 위한 대안으로 Fig. 4와 같은 LMS 모델을 미분방정식 solver package인 A.C.S.L을 이용하여 해석하는 방법을 개발하였다. 충돌거동해석에 이러한 해석기법을 적용하여 최적화된 차체구조를 얻으려 하였다.

Hashimoto⁵⁾ 등은 차량을 Fig. 6과 같이 4개의 집중질량과 10개의 비선형스프링으로 구성하였으며 비선형스프링의 특성은 정적실험을 통하여 구하였다. 구성된 모델의 시뮬레이션으로부터 차체의 압괴거동특성을 포함한 여러 종류의 인자가



M1	body mass
M2	engine & T/M mass
M3	x/member & suspension
F1	torque box
F2	front frame
F3	drive line
F4	sheet metal
F5	firewall
F6	radiator, fan and grille
F7	engine mount
F8	transmission mount

Fig. 1 Kamal's barrier impact simulation model



M1	body
M2	rear axle & wheel
M3	small mass attached to rear quarter panel
M4	lumped mass at rear spring shackles
M5	barrier
R1	rear sheet metal
R2	main sheet metal
R3	fuel tank
R4	lower part of rear quarter panels
R5	rockerpanels, driveshaft, front spring leaves, front face of rear tires
R6	rear faces of rear tires
R7	rear quarter-panel reinforcements

Fig. 3 Lin's rear-end barrier impact simulation model for unibody vehicle

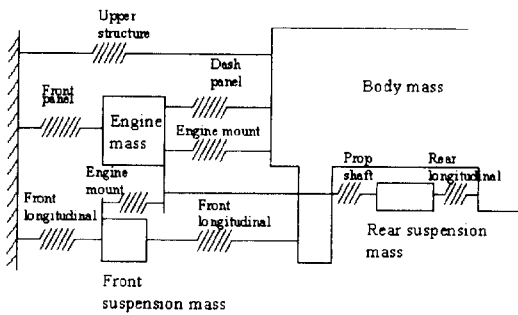
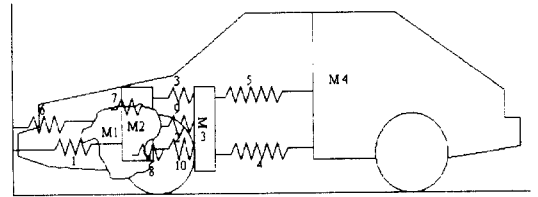


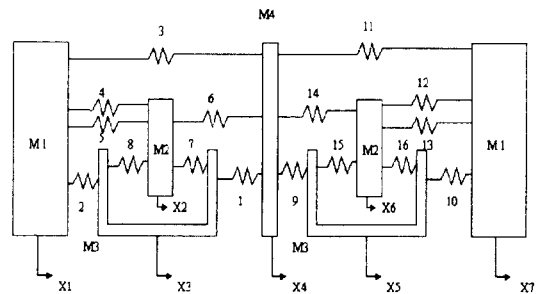
Fig. 4 Hall's mass/spring crash simulation model

승객상해치에 미치는 영향을 살펴보았다. 이 결과에 의하면 front side member부의 강성증대는 충돌초기의 객실감속도를 증가시키고 전체 흡수 에너지중 차량의 변형에 의해 흡수되는 에너지를



M1	engine, T/M
M2	front suspension
M3	cowl, dashpanel, front pillar
M4	車室後部
1	bumper, front s/mbr前部
2	front s/mbr 後部
3	upper mbr 後部
4	floor side sill
5	door, side structure上部
6	radiator
7	engine mount
8	transmission mount
9	dash panel
10	engine front chassis

Fig. 5 Hashimoto's LMS model



M1	total car less M2 and M3
M2	engine, T/M
M3	frontx/mbr, tires, suspension, wheel
M4	combined front bumper facebars
1	front of rails
2	rear of rails
3	front sheetmetal
4	driveline
5	dash
6	radiator
7	engine mount 前部
8	engine mount 後部

Fig. 6 Greene's front to front model (a mirror-image representation)

나타내는 ride-down 에너지를 증대시켜 상해치를 감소시키고 객실부 강도의 강화는 오히려 ride-down 에너지를 감소시켜 상해치의 증가를 가져온다.

Calspan의 Greene⁶⁾은 1977년 Kamal의 모델을 발전시켜 car-to-car 충돌에 적용하였다. 단순히 barrier 충돌에서 벗어나 front-to-front model, front-to-side model, front-to-rear model (Fig. 6, 7, 8)의 경우에 대한 모델링 각각 달리하여 각 경우에 대하여 시험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였으며, 여러 요소를 바꾸어가며 충돌성능에의 영향을 분석하였다. 그는 다양한 종류의 차종에

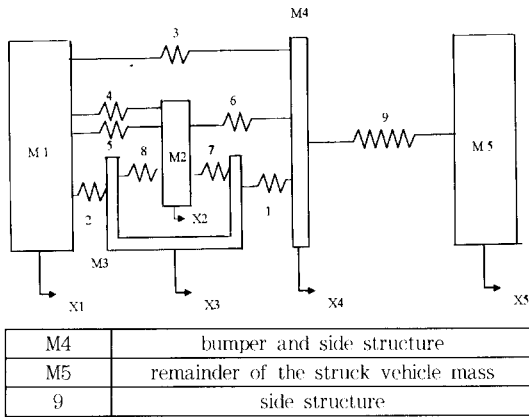


Fig. 7 Greene's front to side model

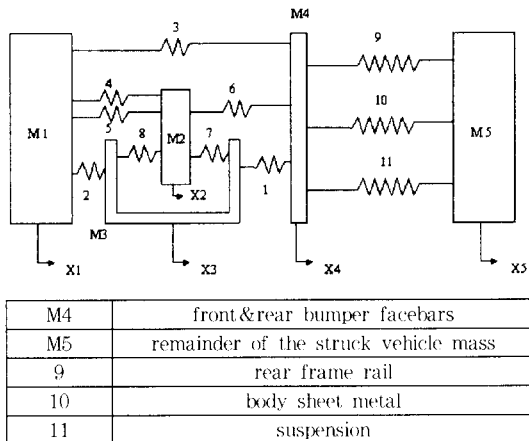


Fig. 8 Greene's front to rear model

대해 위의 3가지 type의 충돌해석을 위한 실제 충돌시험은 너무나 많은 조합의 수를 가지게 되므로 이를 해결하기 위한 방법으로 LMS 모델을 제안하였고 실험시험결과와 잘 일치함을 보였다.

1984년 نيسان자동차의 Nakamura와 Wakasa⁷⁾는 LMS 모델이 FEM에 의한 충돌해석에 비해 시간과 비용 면에서의 이점이 있으나 스프링의 특성이 실험적으로 결정되므로 설계 초기계획단계에서 차체변형을 해석하는 데는 부적합하다고 생각하였다. 그래서 스프링특성을 결정하기 위한 해석적인 기술을 첨가시켜 LMS 모델의 단점을 보완하였다. Fig. 9과 같이 CRAFT라는 프로그램으로써 차체 각 요소를 구성하는 스프링의 특성을 해석하고, 이를 LMS 모델에 입력 데이터로 사용하여 충돌시 차체구조의 응답을 구하여 시험결과와 비교하였다.

더욱이 최근에는 새로운 Spring-Mass 해석방법이 NHTSA의 Hollowell과 Radwan⁸⁾에 의해 개발되어 많은 주목을 받고 있다. 이들의 방법은 현재까지도 개선되고 있는 과정에 있으며 일단 만들어지면 LMS 모델의 정확성과 효율성을 증진시킬 것이다.

우선 1992년 Hollwell⁸⁾ 등은 충돌시험중 가속도계에서 얻어진 가속도 값으로부터 비선형스프링의 유효하중특성을 직접 구할 수 있는 SISA-ME (Structural Impact Simulation And Model Extraction) 라는 프로그램을 개발하였고, 이를 위한 모델을 Fig. 10에 나타내었다. 1978년부터

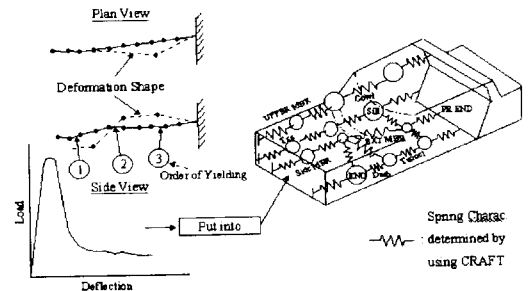


Fig. 9 Nakamura's lumped-mass method in conjunction with CRAFT

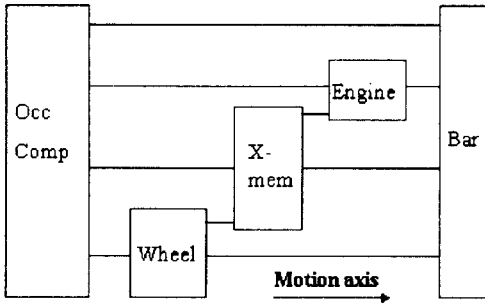


Fig. 10 Hollowell's frontal simulation model

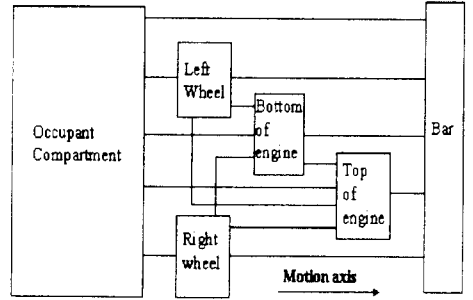


Fig. 11 Carrera's offset simulation model

NHTSA의 원조 하에 행해진 차량 충돌시험과 생체역학 시험의 데이터가 NHTSA의 충돌연구부에 의해 수집되어왔고, 이러한 데이터들을 기반으로 차량충돌을 재구성할 수 있도록 해주는 비선형스프링의 이상적인 하중경로특성을 얻을 수 있었다. 이는 앞에서 언급한 바있는 Quasi-Static Test로부터 얻어진 하중-변위특성에 동적 효과를 적절히 가미해야한다는 Kamal의 기법을 보완한 것이다. 이로써 차체부재의 정확한 하중특성을 구하기 위해 구조해석이나 정적시험 또는 유한요소모델을 이용해야 하는 어려움을 극복할 수 있게 된 것이다.

1995년 Carrera, Menzer와 Samaha¹⁰⁾은 이를 offset 충돌 시에 적용하려는 시도를 하였다. 실제 대차정면충돌에 있어 offset 충돌이 대부분을 차지하므로 이들의 연구는 큰 의미를 지닌다. 여기서는 50% offset 충돌을 구현하려 하였는데, 이를 위해 Fig. 11와 같이 2차원으로 LMS 모델을 구성하였다. 이는 엔진의 위와 아랫부분, 왼쪽 휠, 오른쪽 휠 객실부 등 4~6개의 질량요소와 15~20개의 비선형 스프링으로 구성되어 있다. 각 스프링들의 하중특성은 정면충돌에서의 방법과 마찬가지로 실제 충돌시험으로부터 데이터가 얻어지며, 이를 이용한 시뮬레이션 결과를 시험결과와 비교하였다. 이 결과는 MADYMO와 같은 승객거동해석 프로그램의 입력데이터로 사용될 수 있었다. 50% offset 충돌연구는 그 외의 경우로 확장하기 위한 것이므로 개선되어야 할 점들에 대하여 연구가 진행 중이다. 다양한 offset

경우에 대한 해석, 대차 offset 충돌해석, 임의의 각의 이동벽 충돌해석의 모델링에 대한 연구가 진행 중이며 최근 NHTSA에서는 이러한 향후 연구과제를 위해 다양한 충돌시험을 행하고 있다.

LMS 모델은 정면과 후방충돌뿐만 아니라 측면충돌에도 적용되었다. 측면충돌은 정면 및 후방 충돌연구와는 달리 불과 0.02초 내지 0.04초 사이의 극히 짧은 순간에 모든 현상들이 일어난다. 그리고 차체와 인체모형이 서로 근접하고 있어 서로 분리해서 해석할 수 없고, 충돌시험에서 차체 및 인체모형 거동의 데이터 측정 및 관찰이 제한되어 있다¹¹⁾.

Tomassoni¹¹⁾는 가장 단순화된 측면해석 LMS 모델을 개발하였다. 시험차는 도어, 사이드실과 실내의 3개의 질량으로 나누었고, 승객과 대차는 Fig. 12과 같이 각각 1개의 질량으로 모델링 되어있다. 이 모델에서 나온 결과는 주로 승객의 상해치중 골반부 상해를 예측하는데 이용되었다.

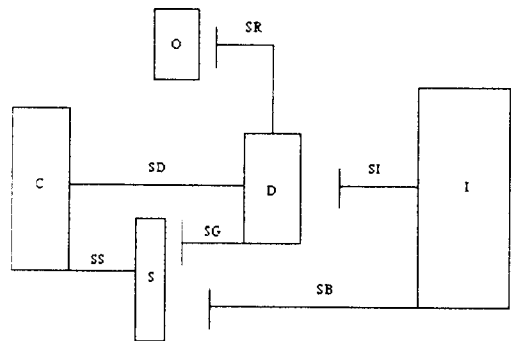


Fig. 12 Tomassoni's side impact model

다음으로 개발된 것이 Fig. 13와 같은 Segal¹²⁾의 모델이다. 이 모델에서는 사이드실이 대차의 범퍼와 직접적인 접촉이 없다고 가정하여, 사이드실을 모델에서 제외하는 대신 승객모델을 확장하여 4개의 질량(두부, 가슴뼈, 척추, 골반부)으로 구성시켰다. 주목할 점은 가슴뼈와 척추 사이에 선형댐퍼를 삽입하였다.

미국 NHTSA의 Trella와 Kianianthra¹³⁾는 Segal의 모델에 척추와 골반부 사이에 스프링을 첨가하였다. Fig. 14와 같이 모델에서는 도어상부와 하부를 분리하였으나 1개의 질량을 나타낸다. 여기서 각 스프링의 입력데이터는 실제 차량의 측면충돌시험에서 측정되는 가속도-시간 곡선에서 유도하였다.

일본 Toyota의 Hasewaga¹⁴⁾ 등은 Trella 등의 모델중 승객의 일차원적인 모델을 발전시켜서 척추의 회전을 고려하여 도어변형 형태에 따라서 가슴부위와 골반부위의 초기속도와 가슴의 상단, 하단부위의 속도를 다르게 고려할 수 있

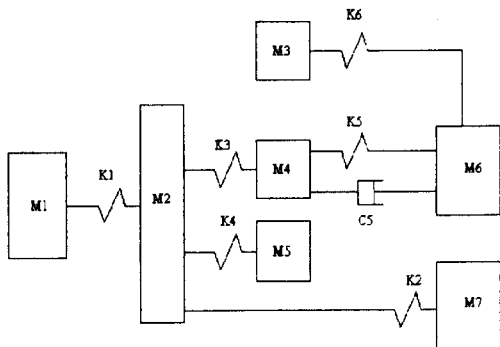


Fig. 13 Segal's side impact model

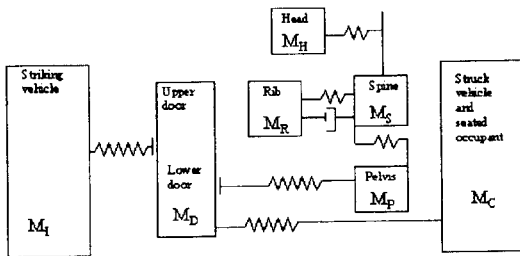


Fig. 14 Trella's side impact model

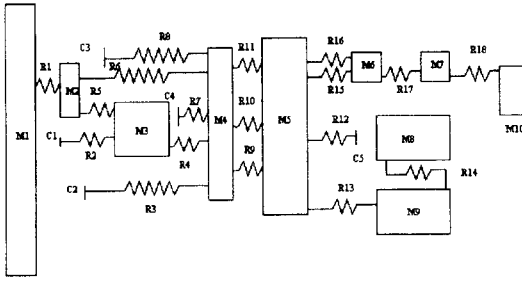
도록 하였다.

최근 1992년 Struble과 Piganelli¹⁵⁾의 모델은 9개의 질량과 18개의 스프링으로 구성하여 측면충돌해석을 시도하였다.

Kamal의 LMS 모델을 향상 시켜 최적설계기법과의 연계를 통해 구체적인 설계방안을 제시하려는 시도가 GM사의 연구자들에 의해 행하여졌다. 우선 1977년 Bennett, Lin 그리고 Nelson¹⁶⁾은 기존의 Kamal의 모델에 의한 설계변경과정은 시간 소모적인 과정이며, 설계자의 설계변경에 대한 직관과 경험에 지나치게 의존하는 단점을 지니고 있다고 판단하여 자동으로 설계변경과정을 수행할 수 있는 대안적인 방법을 제시하였다. 최적화 문제를 정의하기 위한 제약조건으로는 FMVSS 204, FMVSS 208을 만족시키기 위해 steering column environment의 변위 제한(4 in 이내)과 승객 상해치를 대신하여 VCSI (Vehicle Crash Severity Index)에 대한 제한(400 이내)을 채택하였다. 또한 단일 목적함수에 제한된 종래의 최적화 문제가 아니라 다목적함수 (multi objectives)의 문제를 사용하였다.

1986년에는 J. Song¹⁷⁾은 이전의 Bennett 등의 연구가 안전기준을 만족하기 위한 스프링요소들의 강성을 선택하는 데에 제한이 되어있어서 각 요소들의 치수가 최적화하는 동안 직접적으로 다루어질 수 없다는 단점을 가지고 있다고 지적하고, 안전기준을 만족시키는 동시에 차체구조요소들의 치수를 결정할 수 있는 새로운 최적화 기법을 발전시켰다. 최적화기법을 적용시키기 위하여 Fig. 15과 같이 10개의 mass와 18개의 스프링으로 이루어진 LMS 모델을 선택하였다. 설계의 목표는 조향계축의 변위와 최대충돌거리같은 설계기준들을 만족시킴과 동시에 빙형 부재들의 질량을 최소화하는 것이며, 빙형 부재들을 제외한 스프링요소들의 하중특성은 알 수 있다고 가정한다.

또한 'Hybrid' 모델이 LMS 방법의 몇 가지 제한을 극복하기 위하여 1974년 Melvor¹⁸⁾에 의하여 개념화되어 새롭게 제기되고 있다. Hybrid 모델은 LMS 방법의 단순성에 FEM의 유연성 및



Component masses	
M1	barrier
M2	front bumper
M3	front suspension, tire & wheel
M4	body at A-pillar
M5	passenger compartment
M6	shock tower
M7	engine tower
M8	engine/TM
M9	rear suspension cradle
M10	rear bumper
Crush space parameters	
C1	barrier/wheel
C2	bumper overhang
C3	barrier/windshield
C4	dashboard/front axle
C5	engine/passenger comp

Compliances	
R1	barrier/bumper interface
R2	front wheel & tire
R3	skin
R4	windshield beam
R5	front lower rail
R6	front upper rail
R7	front tunnel
R8	front lower rail at kickdown
R9	rocker
R10	door belt
R11	tunnel
R12	compartment wall
R13	engine cradle
R14	engine mount
R15	rear lower rail at kickdown
R16	rear upper rail
R17	shock tower
R18	aft lower rail

Fig. 15 Song's front barrier simulation model

반복 편의성을 결합한 것으로 초기단계의 설계에서 매우 유용하다. 이 모델에서 LMS 모델은 유한요소모델에 의해 해석적으로 하중특성이 결정된 스프링으로 구성된다. 이 방법도 하중-변형특성을 미리 예측하여 사용하였기 때문에 하중변위 특성에 의존하며, 따라서 이러한 tool을 설계에 사용할 때, 사용자의 입장에서 많은 경험과 차량 충돌에 대한 이해가 요구된다.

3. 장단점과 모델의 발전

앞에서 보았던 것처럼 숙련된 해석자라면 LMS 모델과 같은 단순한 모델로도 신차의 설계

를 수행할 때, 초기의 개념설계 단계를 전개하는 면에서 혹은 충돌특성을 개선하기 위한 설계변경에 매우 효과적인 도움을 줄 수 있다. 모델이 단순하고 turn-around time이 빠르기 때문에 통상 초기 단계에서 자주 수행하는 parametric study 및 preliminary design parameter 설정에 편리하게 사용될 수 있다. 그러나, 초기구조 개념을 설계할 때에 LMS 모델에도 어려움이 있음을 주의해야 한다. 사실 이는 어떠한 형태의 mass-spring 모델이나 단순모델에도 존재하는 것인데, 충돌시험을 수행하든지 아니면 기존의 data에서 참고하든지 하여 스프링의 특성을 미리 알아야 한다는 것이다. 이는 LMS 모델을 이용한 해석에 있어서 매우 큰 장애물이 되고 있다.

한편, 지금까지의 단순한 1차원 LMS 모델을 2, 3차원 모델로 발전시키려는 노력이 시도되고 있다¹⁹⁾. 예를들어 경차의 현재의 경향은 overhang이 작아지고 space를 효과적으로 활용하는 방향으로 가고 있으므로 요구되는 충돌특성, 중량 및 원가측면에서 목표치를 맞추기 위하여 어떻게 충돌에너지를 조절할 것인가에 대한 새로운 개념이 강구되고 있다. 따라서, 초기 설계단계에서 차량 및 주요 부품들에서의 kinematics와 승객에 미치는 영향들에 대한 평가능력이 중요하게 거론되고 있다. 단순한 1차원 모델로는 더 이상 불충분하다. 특별한 충돌특성목표치를 만족시키기 위해서는 더 진보된 2, 3차원 해석모델이 요구된다. 현재 개발되고 있는 것들 중 대표적인 것으로는 상용 동력학 프로그램 ADAMS를 이용 spring-mass 모델을 3차원으로까지 확장 해석하는 방법이다. 또다른 것으로는 승객거동해석에 적용하는 것인데 기본적으로 승객을 3차원 다원체나 joint로 연결된 강체로 구성된 tree 구조의 spring-mass로 모델링하는 것이다. LMS 모델과 유사하게 이러한 기법은 사전에 충돌특성에 대한 데이터가 요구된다는 점 때문에 아직까지 제한을 받고 있다.

4. 결 론

이상에서 LMS 모델에 대한 기존의 연구들과 장단점들에 대하여 설명하였다. 비록 LMS 모델

이 복잡한 차체구조를 단순화시키고 주로 일차원적 해석에 제한되며 부재의 특성이 미리 구해져야 된다는 단점을 가지고 있으나 차체의 외형, 중량 및 승차정원 등과 같이 기본적인 사항 외에 확정된 자료가 없는 개발 초기단계에서는 FEM 기법을 대신하여 큰 역할을 담당할 수 있을 것이다. 이는 개발 초기단계에서부터 비교적 정밀하고 신속한 설계를 가능하게 하여 차후 설계변경의 폭이 최소가 되게 할 수 있으며 이에 따라 신차개발에 있어서의 개발기간을 단축시키게 된다.

본 연구자는 이와 같은 LMS 모델의 장점을 최대한화시키면서 PC에서 구동가능한 프로그램을 개발하였다. 이는 여러 형태의 단면을 가진 차량 주요 에너지흡수부재들의 하중-변형특성을 예측할 수 있도록 이미 개발된 E-Crush 프로그램 (Fig. 16)의 하중-변위선도 계산루틴을 LMS 모델 해석 프로그램에 결합시켜 각 스프링으로 치환된 부재의 치수를 입력받아 스프링의 하중변위 특성을 구하여 Fig. 17과 같은 LMS 모델 해석 프로그램의 입력데이터로 사용하게 하였다. 이러한 시뮬레이션에 의한 결과를 NHTSA에서 인터넷에 공개한 실제 차량 충돌시험 데이터와 비교하여 프로그램을 검증하였다.

향후 LMS 모델 해석 프로그램을 이용하여 parametric study를 통한 각 부재와 충돌성능과의 관계 및 충돌성능을 향상 시킬 수 있는 최적

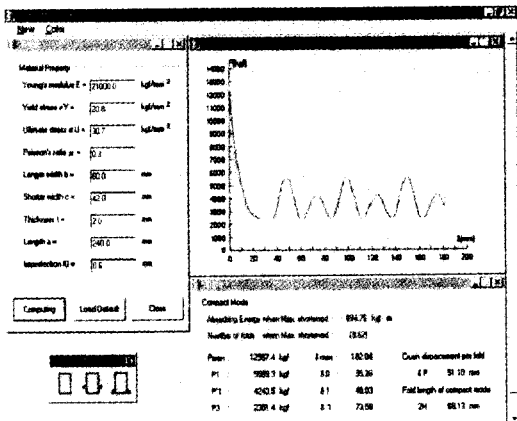


Fig. 16 E-Crush 실행화면

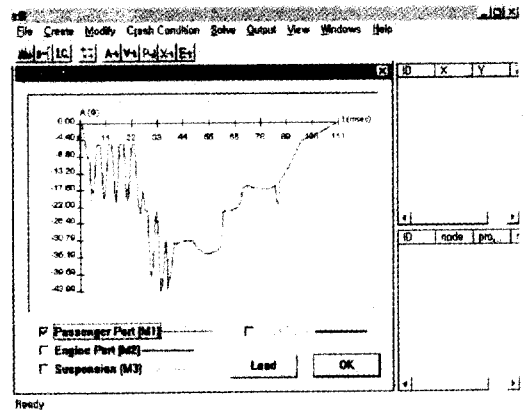


Fig. 17 Stick-Crush 실행화면

의 부재특성에 대한 연구와 LMS 모델의 2차원으로서의 확장을 통하여 offset 충돌해석 뿐만 아니라 정규하중만을 고려하여 설계된 차체구조에 특수하중을 위한 구조를 더하는 새로운 설계방식을 개발하여 기존의 모노코크 구조와 비교를 위한 새로운 프로그램 개발을 계획중이다.

참 고 문 헌

1. M. M. Kamal, "Analysis and Simulation of Vehicle to Barrier Impact." SAE Transactions, Vol. 79, 1970, paper 700414
2. P. Prasad, and A.J. Padagaonkar, "Static to Dynamic Amplification Factors for Use in lumped-Mass Vehicle Crash Models", SAE Paper No. 810475, 1981
3. K. Lin, "A Rear-End Barrier Impact Simulation Model for Unibody Passenger Cars", SAE 730156
4. T. K. S. Murthy and C. A. Brebbia, Structural design and crashworthiness of automobiles, A Computational Mechanics Publication, 1987
5. M. Hashimoto and R. Nakahama "Influence of crash characteristics on occupant injuries", 自動車技術 Vol. 41, No. 4, 1987, pp.

- 488~492
6. J. E. Greene "Computer simulation of car-to-car collisions", SAE 770015
 7. K. Nakamura and Y. Wakasa "Analytical technique for predicting crash response of car body structural components and its application", SAE 840450
 8. R. A. Radwan and W. T. Hollowell, "The SISAME Methodology for Extraction of Optimal lumped Parameter Structural Crash Models", SAE 920358
 9. A. C. Carrera, S. G. Mentzer and R. R. Samaha, "lumped-Parameter Modeling of Frontal Offset Impacts", SAE 950651
 10. 윤영환, "측면 충돌시 승객보호와 차체해석용 모델", 자동차공학회지 Vol. 14, No. 4, 1992, pp.6~12
 11. J. Tomassoni, "Simulation of a two-car oblique side impact using a simple crash analysis model", SAE 840858
 12. D. Segal, "Side impact modeling using lumped mass and CAL 3D CVS simulation", SAE 840859
 13. T. Trella and Kianthra, "Occupant response sensitivity analysis using a lumped mass model in simulation of car-to-car side impact", In Proceedings, Tenth International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Oxford, England, July, 1985
 14. J. Hasegawa, T. Fukatsu and T. Katsumata, "Side impact simulation analysis using an improved occupant model", In Proceedings, Twelfth International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Vol. 2, Goteborg, Sweden, May, 1989
 15. D. Struble and T. Piganell, "An improved integrated simulation model for side impact countermeasure design", SAE 920355
 16. J. A. Bennett, K. H. Lin and M. F. Nelson, "The application of optimization techniques to problems of automotive crashworthiness", SAE 770608
 17. J. Song, "An Optimization Method for Crashworthiness Design", SAE 860804
 18. I. K. McIvor, "Modeling and simulation as applied to vehicle structures and exteriors", Vehicle Safety Research Integration Symposium, U. S. Department of Transportation, May, 1973
 19. 이창건, "차량 충돌 해석기법의 개요", 대우 Technical Review '96, pp.93~111 