

중형버스의 전복 강도해석

An Analysis for Rollover Strength of a Medium Bus

민 한 기*, 김 택**
Hanki Min, Taeg Kim

ABSTRACT

In rollover crashes, the development of bus structure to ensure the maintenance of survival space for passengers is very important. So, this paper focuses on understanding the possibility of efficient structural development considering rollover strength through computer simulation using the commercial code, LS-DYNA3D at the initial stage of vehicle development.

For this study, medium bus structure was modeled using beam elements to represent major structural members, and impact boundary conditions required by ADR59(Australian Design Rule 59) were applied.

In order to confirm the validity of the computational results, they were compared with the test results. After the usefulness of this method of analysis was confirmed, we have proposed the effective structural modification for rollover strength.

주요기술용어 : Rollover Strength(전복 강도), Bus Structure(버스 구조), Survival Space(생존 공간), LS-DYNA3D, ADR59(Australian Design Rule 59)

1. 서 론

근래 들어 자동차의 안전성에 대한 관심이 높아지고 있는 것과 동시에 해외에서의 법규 또한

매우 엄격하여 각 자동차사 뿐만 아니라 관련 연구기관에서는 여러 형태의 연구 및 개발이 진행되고 있다. 그 중에서도 충돌시의 안전성에 대해서는 승용차를 대상으로한 다양한 형태의 충돌에 대해 활발하게 연구가 이루어지고 있으며 해석 및 실험을 위한 과감한 투자도 병행되어 왔다. 그러나 버스 등과 같은 상용차에 있어서는 충돌 성능과 같은 안전성에 대한 연구가 활발하지 않은데 버스의 경우 한번의 사고가 많은 사상자를 낼 수도 있다는 점에서 볼 때 향후 개발단계에서

* 정회원, 기아자동차 공업(주)

** 정회원, 전남과학대 자동차과

의 고려가 필요할 것이다.

해외의 경우를 보면 호주에서는 92년부터 ADR59(Australian Design Rule 59)에 의해 전복(Rollover)시의 차체 변형량을 규제하기 시작했고 유럽 또한 동일내용의 ECE66(Economic Commission for Europe 66)에 의한 규제실시를 검토하고 있다.

이상으로부터, 전복시의 생존공간(Survival Space) 확보가 가능한 버스 구조의 개발은 우선적으로 연구되어야 함을 알 수 있다. 그러나 개발 초기 단계에 실험에 의한 전복 강도(Rollover Strength)를 개선하는 것은 비용과 시간측면에서 매우 힘든 일이다. 따라서 컴퓨터 시뮬레이션(Simulation)에 의한 개선작업이 가능하다면 개발기간의 단축뿐만 아니라 비용절감 측면에서도 매우 효율적인 방법이 될 것이다.

본 연구에서는, 중형버스를 대상으로 하여 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 전복 해석의 기술을 확립하기 위해 개발초기의 모델링 및 계산시간을 단축시킬 수 있는 보 요소(Beam Element)를 주로 사용하여 해석을 수행하였다. 해석의 결과는 실차실험의 결과와 비교하여 본 해석방법의 유효성을 확인한 후, 개선안도 제시하였다.

2. 전복 실험

2.1 실험장치 및 방법

실차에 의한 전복 실험은 호주의 안전규제 항목인 ADR59¹⁾의 조건을 만족하는 방법(Fig. 1)으로 실시하였다. Photo. 1은 실험대상 차종인 중형버스를 800mm 높이의 회전식 플랫폼 위에 위치시킨 후 버스 밑바닥을 받치고 있는 거상용 지그(Lift Jig)를 들어올림에 의해 우측의 힌지점을 중심으로 하여 올려지게 되며 차량의 무게중심이 거상힌지 중심선 바깥쪽으로 이동되는 시점부터는 회전가속도와 함께 자유낙하가 되도록 하였다.

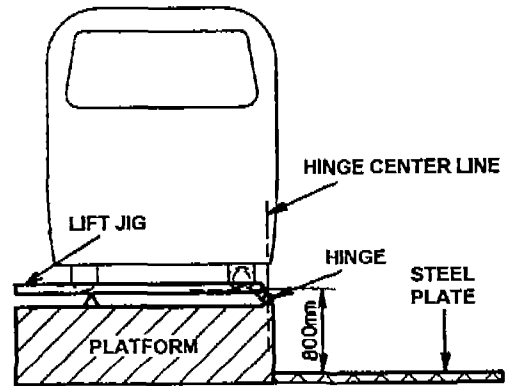


Fig. 1 Test apparatus of ADR59 regulation

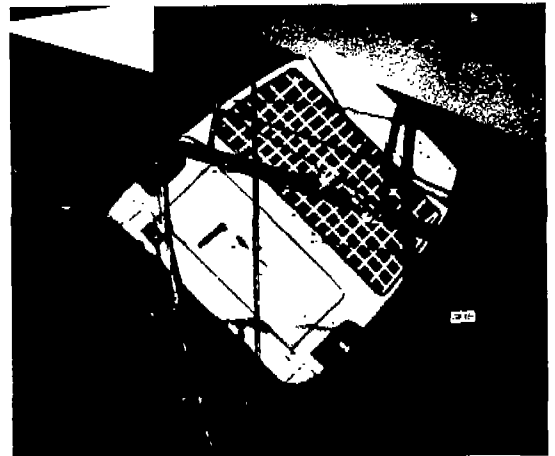


Photo. 1 Rollover test of medium bus

2.2 실험결과²⁾

차량의 변형양상은 Photo. 2에서와 같이 윈도우 필라(Window Pillar) 하단부에서 소성 힌지(Plastic Hinge)가 발생하면서 전체적인 변형을 유도하였다. 차량의 각 방향별로 살펴보면 폭방향에 있어서는 충돌측이 비충돌측보다 큰 변형을 보였고, 전후 방향에 있어서는 엔진의 영향으로 차량의 전방부(Front)가 후방부(Rear)보다 큰 변형을 보였다.

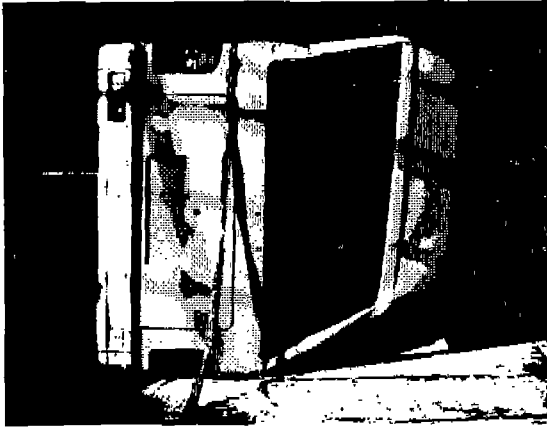


Photo. 2 Rollover test result

3. 전복 해석

3.1 해석모델

버스의 개발초기 단계에서 차량의 전복 해석모델은 차량에 대한 데이터가 충분치 못해 상세한 해석모델에 의한 해석적 평가가 어려울 뿐만 아니라 복수의 개발대상 차량에 대한 평가가 빠른 시간 내에 이루어져야 하므로 빠른 해석으로서 개발차량의 전복특성을 파악하기 위해 필수적인 단순모델에 대한 평가가 이루어져야 한다. 또한 버스구조의 특성은 전복 시 전복특성을 나타내는 흡수에너지가 주로 골조부재에 의해 이루어지므로 상대적으로 적은 에너지를 흡수하는 외부 판넬(Panel)이나 각종 리드(Lid)류는 생략하였다³⁾. 따라서 본 논문에서는 차량의 골조부재를 모델링 시간을 단축하고 컴퓨터 계산시간의 단축까지도 고려할 수 있는 보 요소 모델에 의한 전복해석을 수행하였다.

모델에 사용된 보 요소는 충돌전용 해석프로그램인 LS-DYNA3D의 보요소에서 박스 튜브형에 주로 사용하는 Resultant Plasticity의 재료 특성을 갖는 Belytschko-Schwer 보요소를 사용하였으며⁴⁾ 사용된 보 요소는 단면의 면적, 2차 관성모멘트, 비틀림 상수 및 Shear Area의 단면 특성치를 갖는다. 그리고 보요소의 초기방향을

설정하기 위해 참고점(Reference Point)을 적용하였다. 하중에 관련된 엔진, 트랜스미션(Transmission) 및 액슬(Axle)등은 집중질량(Lumped Mass)을 적용하고 프레임(Frame)과의 연결부는 스프링 요소(Spring Element)로 모델링하였다. 개선모델은 Fig. 2와 같으며 ○표 시부(윈도우 필라 하단부) 오메가 형태(Omega Type)의 보 단면 특성치(Beam Section Property)를 초기모델대비 30%증가시켰으며, 보 단면 특성치의 증가에 따른 차량의 중량은 8kgf 증가하였다.(차량 총 중량 5톤) 또한, 출입구(Door)가 있는 측면 구조(Side Structure)를 기준으로 하여 5곳을 루프 보우(Roof Bow), 윈도우 필라(Window Pillar), 측면 포스트(Side Post) 및 후로어 멤버(Floor Member)가 하나의 후프(Hoop)를 이루는 구조로 변경하였다. 해석 모델의 전체규모는 6,000개의 요소와 5,700개의 절점으로 구성되었다.

해석을 위한 경계조건은 ADR59의 조건을 이용한 실차실험조건과 동일하게 적용하였다. 다만 계산시간의 단축을 위해 버스차체의 한쪽이 들어 올려진 후 회전가속도와 함께 자유낙하가 발생하는 시점부터 시뮬레이션이 이루어지도록 하였으며 낙하후 지면에 닿는 순간까지는 강체(Rigid Body)로 계산되어지고 그 이후는 유연체(Flexible Body)로 계산되어지게 함으로써 계산 시간을 대폭 단축시키도록 하였다.

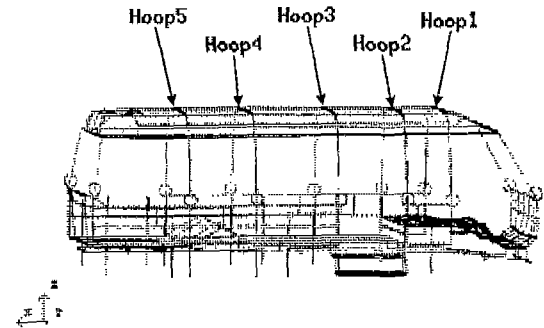


Fig.2 Modified Model

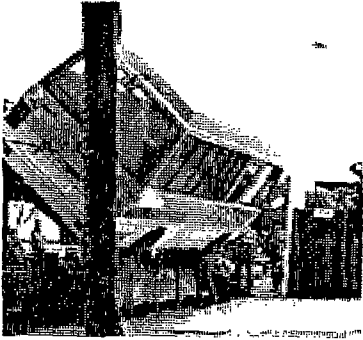
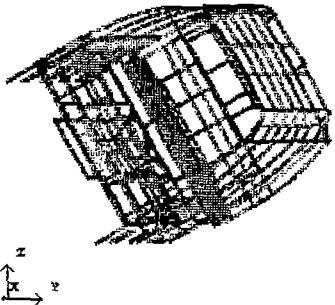
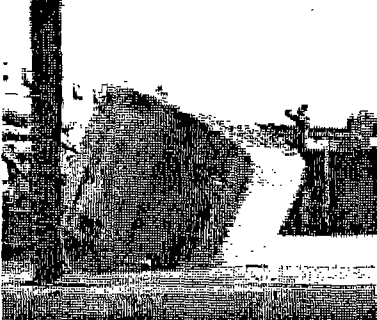
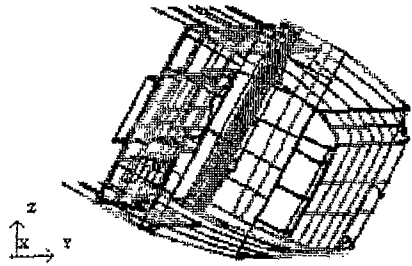
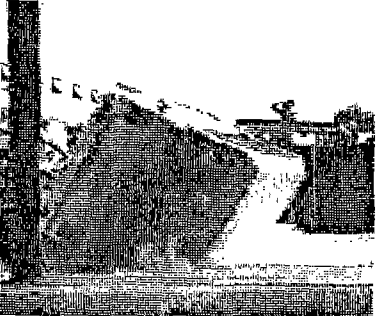
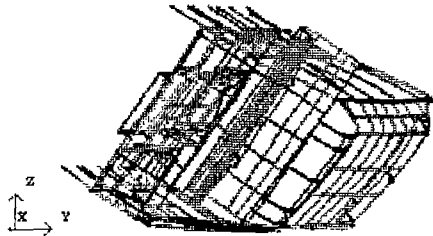
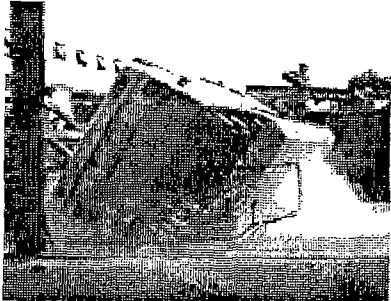
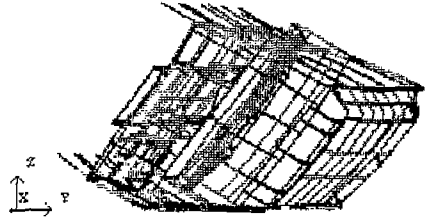
실 험 결 과	시 간	해 석 결 과
	<p>-1390 msec</p>	
	<p>0 msec</p>	
	<p>95 msec</p>	
	<p>190 msec</p>	

Fig.3 Deformed shapes of initial model according to the time step

3.2 해석결과 및 고찰

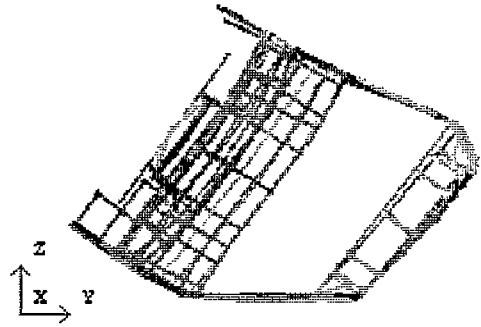
이상과 같이 중형버스의 전복에 대한 해석모델을 완료하고 이를 충돌전용 해석프로그램인 LS-DYNA3D(Ver.930)를 사용하여 해석을 수행하였다.⁴⁾ 충돌전 -1390msec부터 지면과의 충돌이 일어나는 시점인 0msec까지는 강제 운동으로, 그리고 충돌후 190msec까지는 유연체 운동으로 충돌현상을 계산하였는데 소요된 시간(CPU Time)은 IBM SP2기종의 슈퍼컴퓨터를 이용하여 총 10시간 40분이 걸렸다. 여기서 강제 운동부분의 계산시간은 40분에 불과 하였다. 해석결과로부터 얻어진 차량의 전체적인 변형양상과 레인 레일(Rain Rail)의 변위량과 변형각을 실험결과와 비교하여 보았으며, 변형양상에 영향을 주는 주요 접합(Joint)부의 흡수에너지분포에 대해서도 고찰하여 보았다.

3.2.1 변형양상의 비교

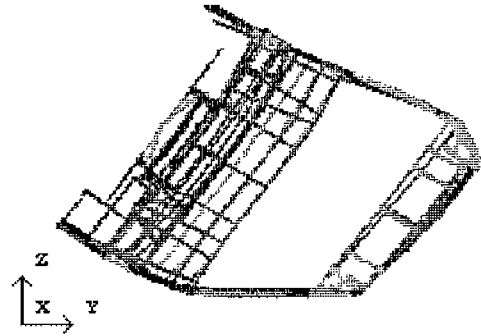
초기모델에 대한 해석결과를 살펴보면 충돌축이 비충돌축보다 큰 변형을 보였으며 전후 방향에 있어서는 출입구의 큰 강성에도 불구하고 엔진 중량의 영향으로 차량의 전방부가 후방부보다 큰 변형 양상을 보였다. 그리고 충돌후 190msec 이후의 변형은 차량의 상부 구조(Super Structure)가 이미 심한 변형을 일으켜 더 이상의 에너지 흡수는 일어나지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 3은 이러한 초기모델의 해석결과를 실험결과와 시간(Time Step)별로 비교하여 나타내었는데 그 결과 전체적인 변형양상은 유사하였으나 본 해석모델이 차체 외부의 판넬 강성을 고려하지 않은 관계로 해석결과가 실험결과보다 다소 큰 변형을 보였다.

Fig. 4는 충돌후 190msec에서의 초기모델과 개선모델의 해석결과에 대한 변형양상을 비교하여 나타낸 것으로 변형양상에는 큰 변화를 보이지 않았다.



(a) Initial model



(b) Modified model

Fig. 4 Deformed shapes at 190msec

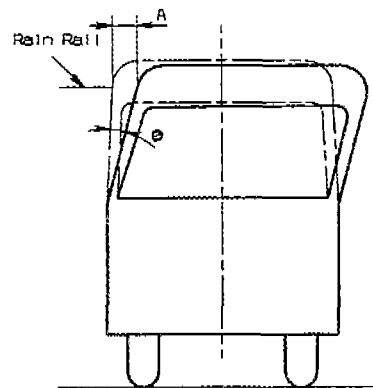
3.2.2 윈도우필라 변위량 및 변형각도

충돌후 가장 변형이 두드러진 윈도우 필라(Window Pillar)에 대해서 레인 레일(Rain Rail)에서의 변위량과 웨이스트 레일(Waist Rail)을 기준으로 하여 측정된 변형각도를 실험결과와 비교하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1에서와 같이 개선모델(Modified Model)이 초기모델(Initial Model)보다 윈도우 필라 변위량(A)에서 43mm~53mm, 변형각도(θ)에서 2.8° ~ 3.6° 적게 나타났는데 이는 실험에서 나타난 심한 소성부위의 윈도우 필라(기하학적 변곡부)에 대한 단면 특성치의 30% 증가가 가장 큰 영향이었으며, 둘째는 사이드(Side),

Table 1 Comparison of displacements and deformed angles measured at window pillar

Measurement Position		First Seat	Third Seat	Fifth Seat	
Displacement Amount (A) (mm)	Test	365	357	352	
	Simulation	Initial Model	488	453	419
		Modified Model	435	405	376
Deformation Angle (θ) ($^{\circ}$)	Test	21.5	20.8	20.5	
	Simulation	Initial Model	30.8	28.4	26.1
		Modified Model	27.2	25.1	23.3



루프(Roof) 및 플로어(Floor) 구조의 후프(Hoop) 구조화에 따른 영향이었다. 모든 경우에 서 전체적인 변형 양상은 차량의 전방부가 가장 크게 나타났는데 이는 출입구의 큰 강성에도 불구하고 엔진의 중량이 영향을 미친 것으로 판단되며 이러한 현상을 없애기 위해서는 차량 전방부의 구조적인 변화가 있어야 할 것이다.

3.2.3 충격에너지 흡수분포의 비교

전복시 차체의 변형양상에 영향을 주는 주요 접합부의 흡수에너지는 모든 경우에서 레인 레일과 윈도우 필라의 접합부, 웨이스트 레일과 윈도우 필라의 접합부, 플로어 멤버와 측면 포스트(Side Post)의 접합부 순으로 나타났다. 그리고 초기모델과 개선모델의 에너지흡수율을 해석결과로부터 평가하여 보면, Table2에서와 같이 개선모델의 에너지흡수율이 레인 레일과 윈도우 필라의 접합부 그리고 웨이스트 레일과 윈도우 필라의 접합부에서는 초기모델보다 감소하였으나 플로어 멤버와 측면 포스트의 접합부에서는 반대로 증가됨을 알 수 있었다. 이는 소성부위의 단면 특성치를 증가시키고 구조를 후프 구조화함에 따라 에너지흡수의 분산효과가 발생한 것으로 판단된다. 따라서 전복사고를 대비하기 위해서는 후프

구조와 함께 후프 구조를 이루는 단면들의 단면특성치를 효율적으로 설정하는 작업이 필요할 것이다.

참고로, 에너지흡수측면에서 후프구조와 직각을 이루는 부재들은 레인 레일을 제외하고는 에너지흡수측면에서 기여도가 적은 것으로 나타났다.

Table2 Comparison of absorbing energy distribution

Measurement Position		Joint of Rain Rail & Window Pillar	Joint of Waist Rail & Window Pillar	Joint of Floor Member & Side Post	Other Members
Absorption Energy (%)	Initial Model	38.3	16.3	6.5	38.9
	Modified Model	37.2	13.7	7.6	41.5

4. 결론

보 요소를 기본으로 한 중형버스 구조의 전복 시뮬레이션을 수행하여 각 시간별 변형양상, 변위량 및 주요 접합부위들에 대한 흡수에너지를 평가해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 보 요소를 기본으로한 중형버스 구조의 전복시물레이션 결과를 실험결과와 비교해 보고, 개선모델도 만들어 봄으로써 보 요소 모델에 의한 개발초기 단계에서의 짧은 기간 내에 전복강도의 개선작업 가능성을 확인하였다.

2) 변위량과 주요 접합부위들에 대한 흡수에너지 평가로부터, 전복사고에 대비하기 위해서는 후프 구조와 함께 후프 구조를 이루는 단면들의 단면특성치를 효율적으로 설정하여 전복사고시 국부적인 곳에서 흡수에너지가 집중되지 않도록 해야함을 알 수 있었다.(특히, 윈도우 필라와 웨이스트 레일의 접합부가 상대적으로 취약)

3) 개발초기에 본 논문에서의 보 요소 모델에 의해서 확인된 대변형에 의한 소성 힌지(Plastic Hinge)부에 대해서는 기본 골격구조가 확정된 개발중기에 접합강성^{5,6)} 또는 상세모델⁷⁾에 의해 추가적인 해석이 이루어 질 것이다.

참 고 문 헌

1. ADR59, "Australian Design Rule 59/00 - Omnibus Rollover Strength"

2. 중형버스 Rollover 실험결과, 아시아자동차 공업(주), 1992.10.20.
 3. F. F. MONASA, PhD, FASCE, "Evaluation of the Structure Integrity of Intermediate Buses" IMechE, 1984, C185/84.
 4. J. O. Hallquist, LS-DYNA Theoretical Manual, LSTC. 1994. 4.
 5. D. Kecman and M. Djokic, "The Effect and Modeling of 'Finite Stiffness Hinges' in the Collapse Analysis of Rollover Safety Rings in Buses and Coaches", Int. J. of Vehicle Design, Vol. 11, nos4/5, 1990.
 6. J. C. Brown, "The Design and Type Approval of Coach Structures for Rollover Using the CRASH-D Program", Int. J. of Vehicle Design, Vol. 11, nos4/5, 1990.
 7. K. Kumagai, Y. Kabeshita, H. Enomoto and S. Shimojima, "An Analysis Method for Rollover Strength of Bus Structures", 日野技報, No.48, Mar. 1995.