

〈논 문〉 SAE NO. 97370122

대형 버스의 전복 해석과 측정법

Rollover Analysis and Measurement of a Large-sized Bus

정 태 은*
T. E. Chung

ABSTRACT

The safety problems of buses have been arisen due to the increasing of road traffic. Occupant injuries are always possible in the rollover accident and the frontal impact. Thus the structure of bus should have sufficient strength to protect passengers under accidental loads. ECE(Economic Commission for Europe) regulation No.66 prescribes that the superstructure of the vehicle shall be sufficient strength for passengers' surviving and the residual space shall be preserved in the passenger compartment during and after the standard rollover accident situation.

Rollover test and simulation on a large-sized bus were completed according to the regulation. The coordinates of the points on the bus were measured by photogrammetry system. The rollover situation was revived by structural crashes simulation software, PAM-CRASH, and it was checked that the structure still complied with the requirements of residual space during rollover situation. The residual space was preserved during rollover, so it was proved that the structure of the investigated bus had much probability of survival in rollover accidents.

주요기술용어 : Rollover Analysis(전복해석), Large-Sized Bus(대형버스), Safety(안전도), Strength(강도), Photogrammetry(사진측량), Regulation(법규)

1. 서 론

승객 안전 측면에서 살펴볼 때, 버스에 있어서 가장 중요한 사고 유형은 정면충돌과 전복 사고(Rollover Accident)다. 정면 충돌은 빈번히 발생하는 것이 특징이며, 전복 사고는 발생시 치명

적인 승객 상해를 유발하는 것으로 나타나고 있다. Table 1은 770건의 버스 사고 중 유형별로 사고 건수를 분류한 것이다.¹⁾ 미국의 자료에 의하면 전복 사고 유형의 90% 이상이 1번~1/4번 구름(Roll)에 의한 것으로 보고되어 있다.^{2), 3)}

유럽 법규 66번(ECE Regulation No.66)⁴⁾에서는 운전자를 포함한 16인 이상의 승객을 운반하기 위해 개발한 차량에 대하여 전복 시험을 수

*정회원, 고등기술연구원

Table 1 A General Summary of the Bus Accident Official Statistics¹⁾

forntal collision	57.2%
rear impact	22.1%
side impact	17.8%
rollover	2.9%

행하여 잔여 공간(또는 생존 공간)이 확보되어야 인증을 받을 수 있다고 규정하고 있다. 본 연구에서는 이 법규에 근거하여 실차의 전복 시험을 실시하고 변형량을 사진 측정법에 의해 구하였으며, 충돌 해석 프로그램인 PAM_CRASH를 이용하여 전복 상태를 모사하였다.

2. 전복 시험

2.1 전복 시험 관련 법규

유럽 경제 위원회 법규 66번(ECE Regulation No.66)에서는 버스와 같은 대형 차량의 전복 시험시 차량의 강도에 기여하는 차체 구조가 갖춰야 하는 요구 강도에 대해 다음과 같은 4가지 방법 중 어느 한 방법으로 만족을 해야 한다고 규정하고 있다.

- 1) 완성차(Complete Vehicle)에 대한 전복 시험
- 2) 차체 단품(Body Section)에 대한 전복 시험
- 3) 차체 단품에 대한 진자(Pendulum) 시험
- 4) 계산에 의한 상부 구조(Superstructure)강도의 입증

시험 절차와 요구 조건은 완성차나 차체 단품의 경우에 똑같이 적용된다. 본 연구에서는 완성차에 대해 전복 시험과 전복 시뮬레이션을 수행하였다. 잔여 공간(Residual Space) 또는 생존 공간(Survival Space)은 전복 시험을 한 후나, 하는 중에 승객 객실 속에 보관되는 공간을 말하며, Fig.1에 정의된 바와 같이 차체 바닥과 차체 프레임으로부터 규정한 거리만큼 떨어져 있는 사다리꼴 형태로 이루어진 객실 내의 부피를 말한다. 잔여 공간을 나타내는 사다리꼴의 높이는 750mm 이상이어야 한다.

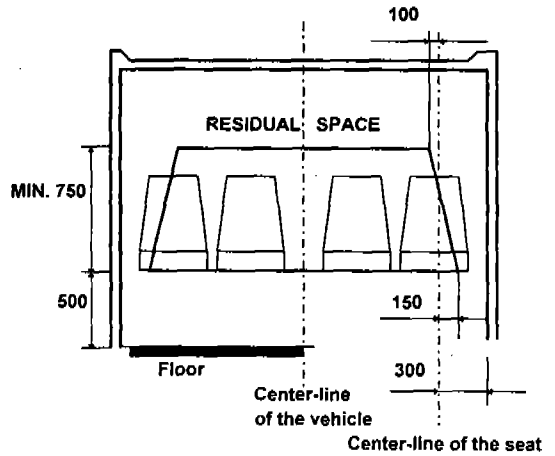


Fig.1 Definition of Residual Space (Unit : mm)

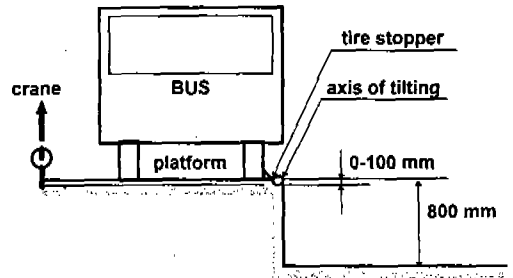


Fig.2 Rollover Test Apparatus

2.2 시험 개요

규정에 의한 버스의 전복 시험은 Fig.2에 나온 바와 같이 버스를 지면에서 800mm 떨어진 시험대 위에 설치하고 한쪽 끝을 기중기로 서서히 들어올려 버스의 자중에 의해 시험 차량이 전복되도록 하는 것이다.

2.3 완성차의 전복 시험 및 측정

완성차에 대한 전복 시험은 생존 공간의 침범 여부를 살펴보기 위하여 차체의 외부에 표식을 부착하고 Rollei사의 광학 장비를 이용하여 변형 전후의 좌표를 측정하였다.

Rollei사의 장비를 이용한 측정은 대상 버스의 전면, 좌측면, 우측면, 후면에서 이루어졌다. 공간상의 3차원 좌표를 정확하게 구하기 위해서는 지

봉면에 대해 측정해야 하나 촬영 상의 어려움으로 이 부분의 측정은 수행되지 못했다. 따라서 전복 전후의 사진 측량에 의한 계산은 이러한 오차 원인을 내포하고 수행되었다. Fig.3에는 측정을 위한 좌표계의 정의 및 각 면에서의 측정점의 번호에 대한 정의가 표시되어있다. 좌측면의 측정점들의 번호는 100번대, 정면의 번호는 200번대, 우측면의 번호는 300번대, 후면의 번호는 400번대로 정하였다. 전체 좌표계는 X, Y, Z축으로 이루어진 직교 좌표계이며, Fig.4에 있는 점 325의 좌표는(6400, 3000, 1500)이다. Fig.4에는 우측면에서의 측정점의 번호와, 사진상의 점들의 거리를 측정할 때 기준이 되는 두 측정점들에 대한 위치가 나와있다. 기준이 되는 두 점 324, 345간의 거리는 3048mm로 측정되었다. Fig.5의 (a), (b)에는 각각 전면부, 후면부의 측정점들의 위치와 번호를 표시하였다.

전복 후의 좌표 계산은 3가지 방법으로 진행하였다. 첫번째(Test 1)방법은 전복 후의 변형 상태를 촬영하여 그대로 3차원 좌표를 구한 것이다. 두번째(Test 2)방법은 비교를 위한 변환 기준점으로 사후 좌표(Test 1의 값)를 변환 이동시킨 것이다. 변환 이동을 한 이유는 지붕면의 자료가 없기 때문에 발생한 차량폭 방향의 오차를 보정하기 위해 비교적 변화가 적거나 없으리라고 예상되는 차량 하단부의 점들(Fig4, Fig.5의 점 221, 224, 306, 327, 406, 446 등)을 변환 기준점으로 택하여 수정 계산한 것이다. 세번째(Test 3)방법은 첫번째 방법의 결과에서 좌측 차체부의 측정점들을 실제 차체의 변형 상태에 맞도록 보정한 것이다. 즉 버스 차체에서 바닥(Floor)의 폭방향(Y방향)의 길이 변화는 없기

때문에, 차체의 가장 아래 부분에서 측정된 변형 후의 값 중 Y방향의 값을 원래 좌표의 값과 같도록 보정하였고, 이때 적용한 Y방향의 보정값을 좌측 차체부의 측정점들에 적용하여 보정한 것이다. Table 2는 후면에서 바라보았을 때 Fig.4의 점 311이 있는 선상의 점들 중 좌우측 차체에서, Table 3은 후면에서 바라보았을 때 Fig.4

Table 2 Maximum Deformation at Front Part (단위 : mm)

	Max. deformation at right side body (Point 312)	Max. deformation at left side body (Point 112)
Rollei test 1	461	560
Rollei test 2	368	445
Rollei test 3	461	375

Table 3 Maximum Deformation at Rear Part (단위 : mm)

	Max. deformation at right side body (Point 372)	Max. deformation at left side body (Point 172)
Rollei test 1	363	385
Rollei test 2	268	264
Rollei test 3	363	294

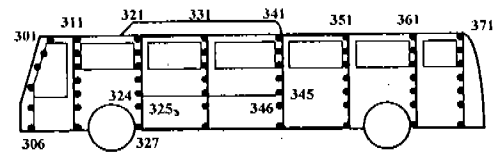


Fig.4 Measuring Points of Right Side

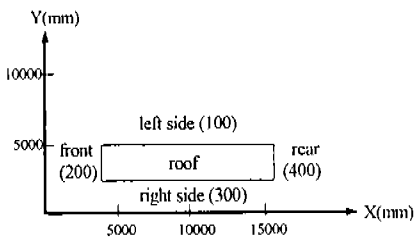
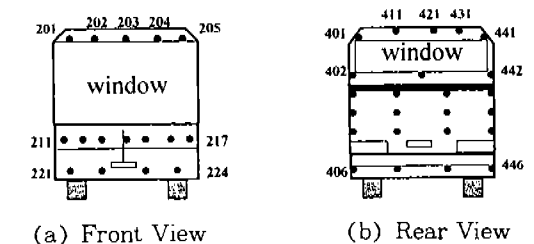


Fig.3 Measuring Coordinates of the Bus



(a) Front View

(b) Rear View

Fig.5 Measuring Points of Front and Rear Part

의 점 371이 있는 선상의 점들 중 좌우측 차체에서 발생한 최대 변위량의 위치와 그 값을 정리한 것이다.

Fig.6에서 전면부의 측정점은 Fig.4의 점 311이 있는 선상의 점들을 택하였다. 이곳의 지붕쪽의 점들을 측정하지 못하였으므로, 이에 해당하는 값들은 Fig.5-(a)의 앞유리 윗부분의 점들인 201, 202, 203, 204, 205의 점들에서의 값들로 표시하였다. Fig.7에서의 후면부의 측정점은 Fig.4의 점 371이 있는 선상의 점들을 택하였다. 마찬가지로 지붕쪽의 값들은 Fig.5-(b)의 뒷유리 윗부분의 점들인 411, 421, 431의 값들로 표시하였다. 전복 후의 시험차의 변형 모습은 Fig.8에 전면부, Fig.9에 후면부의 사진이 나와있다.

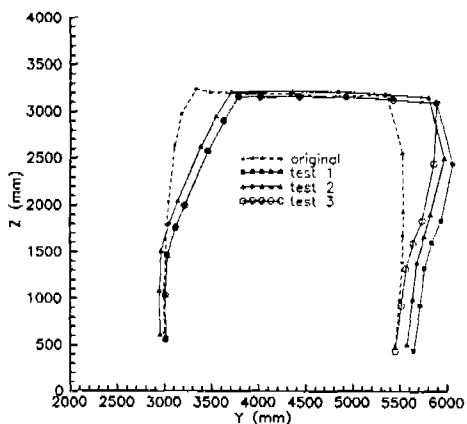


Fig.6 Deformation of Front Vehicle Part

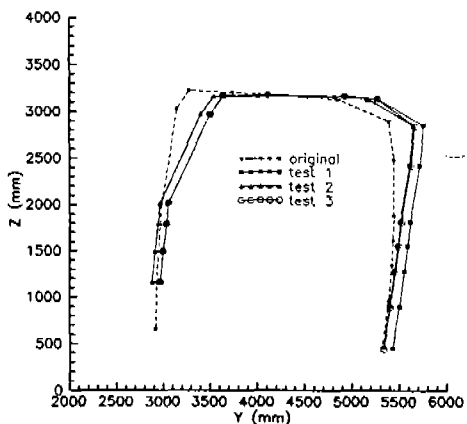


Fig.7 Deformation of Rear Vehicle Part



Fig.8 Photograph of Front Vehicle Part

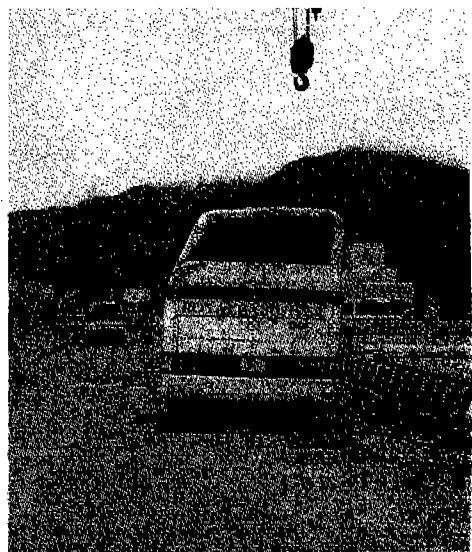


Fig.9 Photograph of Rear Vehicle Part

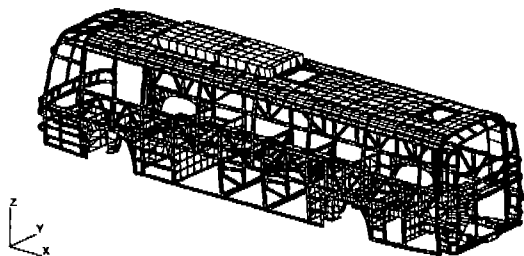


Fig.10 Finite Element Model of the Bus Structure

Fig.8에서 보는 바와 같이 전복 후 앞유리판 전체가 떨어져 나갔으며, 옆유리는 일부는 붙어 있었고, 나머지 일부는 떨어져 나갔다.

3. 전복 시뮬레이션

대상 차량은 길이 12m, 무게 12.3ton의 대형 버스이다. Fig.10에는 버스의 유한 요소 모델이 나와있으며, 28000여개의 쉘 요소로 모델화되었다.

전복 모사(Rollover Simulation)는 버스가 기울어진 시험대(Platform)에서 자중에 의해 낙하하면서 지면에 부딪히기 직전까지는 강제 운동으로 모사하고, 지면에 부딪힌 후에는 일반적인 충돌 해석 방법으로 계산을 수행하였다.⁵⁾ Fig.11-(a)는 초기 상태의 차량을 뒤에서 본 모습이다. Fig.11-(b)는 이로부터 버스 차량이 받침대(Stopper)를 중심으로 순회전(Pure Rotation)하여 지면에 부딪히는 순간으로 초기 상태에서

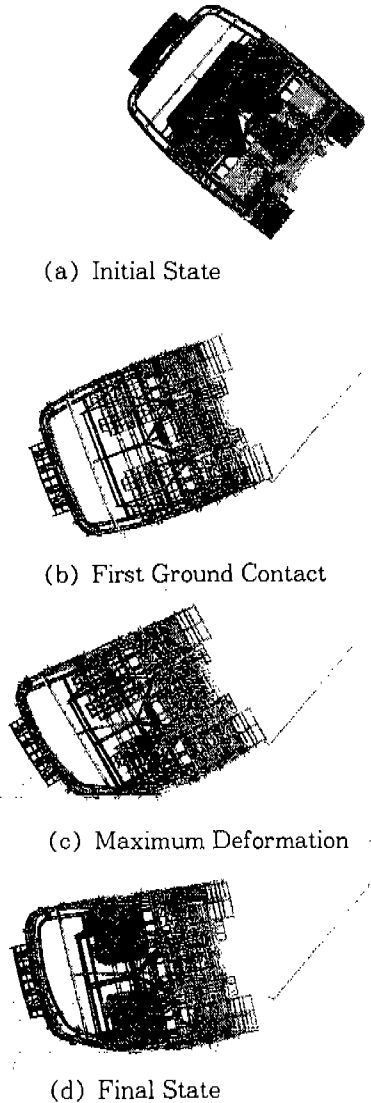


Fig.11 Rollover State at Each Step

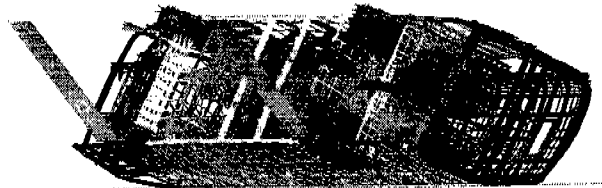
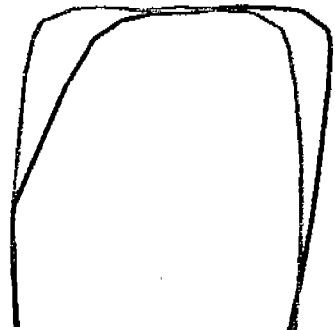
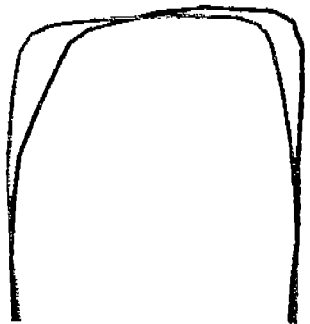


Fig.12 Oblique View at Maximum Deformation



(a) Front Part



(b) Rear Part

Fig.13 Final Deformation of Bus Structure

1400msec가 경과한 상태이다. Fig.11-(c)는 변형이 가장 심하게 일어난 상태로 1480msec가 경과하였을 때이다. Fig.11-(d)는 최종 변형이 끝난 상태로 3400msec에서의 변형 양상을 나타낸다. Fig.11의 일련의 그림들은 버스가 전복되는 동적 상태에서 잔여 공간이 확보되는지 여부를 손쉽게 판단할 수 있도록 측면에서 잔여 공간을 포함한 버스 차체의 변형 상태를 보여준다. 전복 모사 과정을 통하여 본 차량의 경우에는 전복 과정과 최종 변형 상태에서 잔여 공간이 확보됨을 확인할 수 있었다. Fig.12는 최종 변형 상태를 버스 길이 방향의 경사각도에서 바라본 것이다.

버스 전복의 수치 시뮬레이션 결과도 시험 결과와 마찬가지로 차량의 변형 양상은 버스의 앞부분이 뒷부분보다 조금 더 심하게 변형을 한 것으로 나타났다. Fig.13-(a)는 차량 앞부분, Fig.13-(b)는 차량 뒷부분의 최종 변형 양상을 보여주고 있다.

잔여 공간(또는 생존 공간)의 확보 여부를 살펴보기 위해 가장 변형이 심한 차체 전면부의 최대 변형량을 시뮬레이션 결과와 시험 결과를 비교한 것이 Table 4에 나와있다. 사진 측정법의 정확성 및 오차의 한계는 버스 차체 단품의 전복 시험에서 3차원 측정기와와의 비교를 통하여 입증된 바 있다.⁶⁾ 측정점들이 충분한 상태일 경우에, 60mm 필름을 사용하였고 하나의 사진에 찍히는 대상물의 길이가 6000mm 이하이므로 축적은 100이며, 사용한 디지털라이저(Digitizer)의 오차는 0.08mm이므로 이 경우에 측정 오차는 8mm가 된다.⁶⁾ 다만 본 시험의 경우에는 버스 지붕부의 측량이 이루어지지 못하였으므로 이러한 측정 오차를 그대로 적용할 수 없다. 측정값들로부터 보다 정확한 변형 결과를 얻기 위해서는 적절한 보정 방법이 뒤따라야 한다. 시험 1의 경우는 각 사진 자료만으로 결과를 정리한 것이며, 이 경우에 바닥부의 Y방향의 길이가 변한 것을 알 수 있다. 시험 2의 경우는 몇 개의 변환 기준점들을 선택하여 좌표 변환을 한 것으로, 시험 1의 경우보다 바닥부의 변화를 줄일 수 있었으나 어떠한 점들이 기준점으로 선택되었느냐에 따라 오차가

달라질 수 있다. 시험 3의 경우는 원래의 사진 자료에서 나온 결과 중 바닥부의 Y방향의 변화가 없도록 Y방향에 대해서 보정을 해준 것이다. Table 2와 Table 3의 결과에서 보듯이 시험 3의 경우에는 지면에 부딪히는 면(Right Side)이 지면에 부딪히지 않는 면(Left Side)보다 변형이 컸으며, 이러한 경향은 Fig.8과 Fig.9의 실차 시험 결과와도 일치한다. Table 4와 Table 5의 결과를 보면 전체적으로 시뮬레이션의 결과와 시험 3의 결과가 시험 1이나 시험 2의 경우보다 더 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 전복 시

Table 4 Results of Maximum Deformation from Simulation and Test at Front Part

(단위 : mm)

	Max. deformation at right side body (Point 312)	Max. deformation at left side body (Point 112)
Simulation	473	400
Error with respect to Rolle test 1	2.6%	-28.4%
Error with respect to Rolle test 2	28.9%	-10.1%
Error with respect to Rolle test 3	2.6%	-6.7%

Table 5 Results of Maximum Deformation from Simulation and Test at Rear Part

(단위 : mm)

	Max. deformation at right side body (Point 372)	Max. deformation at left side body (Point 172)
Simulation	364	305
Error with respect to Rolle test 1	-0.3%	-20.8%
Error with respect to Rolle test 2	-35.8%	-15.5%
Error with respect to Rolle test 3	-0.3%	-3.7%

물레이션을 통한 수치 해석 결과는 시험 3의 결과와 비교할 때, 7% 이내의 오차를 보이고 있다.

4. 결 론

전복 사고시 버스 내의 승객을 보호하기 위한 최소한의 공간인 잔여 공간(또는 생존 공간)을 확보하기 위해서는 차체 구조가 충분한 강도를 유지해야 한다. 전복 모사를 수행하여 동적 상태에서 잔여 공간의 침범여부를 확인할 수 있었으며, 이러한 방법은 기존 차량에 대한 전복시의 안전성 판단과 아울러 초기 설계부터 차체 구조상의 문제점 발견시 어떤 부분을 보강해야 하는지에 대한 설계 지침을 제시해준다. 또한 실차 전복시험을 수행할 경우에 소요되는 경비와 시간을 줄일 수 있으며, 전복 모사 방법의 신빙성을 입증할 경우에 인증의 도구로 전복 모사법이 사용될 수 있을 것이다.

대형 버스와 같이 구조물이 커서 직접 측정이 어려운 경우에 사진측량 시스템에 의한 좌표 측정법은 변형량을 손쉽게 구할 수 있는 유용한 방법이다. 특히 버스 전복의 경우와 같이 전복 전후의 차체의 전체적인 변형 양상을 살펴보기 위해서는 가장 효과적인 방법이라고 생각한다.

사진 측량법에 의해 변형량을 정확히 구하기 위해서는 필요한 각 부분의 사진 측량이 이루어져야 한다. 만약 측정상의 어려움 또는 기타 사정에 의해 측량이 이루어지지 않은 부분이 생길

경우에는 변형이 없는 부분의 자료를 입력하여 보정을 함으로써 오차를 줄일 수 있다.

참 고 문 헌

1. M. Matyas, "Carashworthiness of Bus Structures and Rollover Protection," Proceedings of the NATO-ASI, 1996.
2. K. Diggs, A. C. Malliaris, and A. Ommays, "The Mechanics and Biomechanics of Rollover Casualties," Wayne State Biomechanics Symposiu, March 1991.
3. G. M. Mackay and I. D. Tapen, "Field Studies of Rollover Performance," SAE 700417, 1970.
4. United Nations, Addendum 65 : Regulation No. 66, Uniform Provisions Concerning the Approval of Large Passenger Vehicles with regard to the Strength of their Superstructure, 1986.
5. K. Andoh and H. Niizeki, "Present Status of Impact Analysis in Japan," HAN PAM '95, 1995.
6. 정태은, 김기범, 홍승준, 이용래, 김창수, 조용욱, "버스 차체의 전복 시험에 관한 연구," 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, pp.277~282, 1997.