

〈논 문〉 SAE NO. 97370110

사진 측량법을 이용한 버스 차체 전복 시험

Bus Body Rollover Test using Photogrammetry

정 태 은*, 이 용 래*, 김 창 수**
T. E. Chung, Y. R. Lee, C. S. Kim

ABSTRACT

Occupant injuries are always possible in a rollover accident, one of the major accidents in a bus. Thus the structure of body frame should have sufficient strength to protect passengers under accidental loads. ECE(Economic Commission for Europe) regulation No.66 prescribes that residual space shall be preserved in the passenger compartment during and after the structure has been subjected to the prescribed rollover test.

Rollover test on a bus body section was completed according to the regulation. The coordinates of body section before and after rollover were measured, and it was checked that the structure still complied with the requirements of residual space. Direct measurement on a bus is difficult because of its large size. Thus photogrammetry by photographing and 3 dimensional digital modeling was introduced, and the coordinates of each point were measured through this method.

주요기술용어 : Rollover Test(전복 시험), Photogrammetry(사진측량), Bus Body(버스 차체), Regulation(법규), Residual Space(잔여 공간), Strength(강도)

1. 서 론

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

적인 승객 상해를 유발하는 것으로 나타나고 있다. 미국의 자료에 의하면 매년 10,000명이 전복 사고 시 사망하며, 이런 사고 유형의 90% 이상이 1번~1/4번 구름(Roll)에 의한 것으로 보고되어 있다.^{1),2)}

버스 구조물을 설계할 경우에 주행 하중에 대한 강도 계산과 사고 발생시 안전성을 고려한 차체를 구성하여야 한다. 이중 사고 하중을 적용할 때는 기하학적, 재료적 비선형성이 고려되어야 하며, 소성 변형에 의한 대변형을 수반하게

*정회원, 고등기술연구원

**아주대학교 대학원

된다.³⁾

유럽 법규 66번(ECE Regulation No.66)에서는 운전자를 포함한 16인 이상의 승객을 운반하기 위해 개발한 차량에 대하여 전복 시험을 수행하여 잔여 공간(또는 생존 공간)이 확보되어야 인증을 받을 수 있다고 규정하고 있다. 본 연구에서는 이 법규에 근거하여 전복 시험 지그와 버스 차체 단품을 제작하여 전복 시험을 수행하였다. 또한 사진 측정과 3차원 디지털 모델링에 의한 사진측량 시스템을 도입하여 구조물의 각 측정점에 대한 좌표를 산출하여 변형량을 구하였다.

광학 장비와 관련 소프트웨어의 발달로 사진 측량이나 비디오 촬영에 의한 측정 등이 최근 들어 새롭게 시도되고 있다. 사진 측량은 주로 교통 사고 발생시 기록용 또는 문서화와 법적 증거를 위한 자동차, 비행기, 열차 사고의 측정과 증거 기록용으로 이루어졌다. 역사적인 건물과 기념물을 기록함으로써 발견 당시 또는 훼손 이전과 같은 상태의 사진 측량 자료를 제공하며, 복원에 앞서 상세하게 측정된 그림을 그릴 수 있다는 것이 사진 측량 시스템이 가지는 장점이다.⁴⁾ 자동차 충돌에서 승객부의 측정, 승객과 차체간의 접촉 여부 평가에 사진 측량법이나 비디오 촬영에 의한 평가법이 이용되기도 하였다.⁵⁾ 트럭의 정면 충돌 시험에서 사진 측량법을 이용한 변형량 측정이 Rollei사에 의하여 이루어진 적이 있었으나, 버스 전복 시험에는 아직까지 응용된 바가 없었다. 본 연구에서 시도한 사진측량(Photo-grammetry)시스템은 버스와 같은 큰 구조물의 대변형에 대해 효과적으로 측정을 할 수 있었으며, 전복 사고 시 승객 안전성을 평가하는 기구로 사용되었다.

2. 전복 관련 법규

유럽경제위원회 법규 66번(ECE Regulation No.66)⁶⁾에서는 버스와 같은 대형 차량의 전복 사고 시에 차량의 강도에 기여하는 차체 구조가 갖춰야 하는 요구 강도에 대해 다음과 같은 4가지 방법 중 어느 한 방법으로 만족을 해야 한다

고 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. 계산에 의한 상부 구조 강도의 입증 방법의 경우에는 먼저 기존의 시험 결과와 계산 방법이 일치함을 입증하여야 하고, 입증된 계산 방법에 의해 다른 구조의 상부 구조에 대한 계산할 경우에 이 방법이 유효하다. 여기서 상부 구조라는 것은 전복 사고시에 차량의 강도에 기여하는 차체 구조를 말한다. 따라서 계산에 의한 강도 입증은 반드시 완성차만을 대상으로 하는 것은 아니나, 상부 구조는 완성차를 대변할 수 있도록 무게 중심 등의 부수 조건들이 완성차와 일치하여야 한다. 따라서 계산에 의한 방법은 주로 실제 완성차를 대상으로 하여 유한요소 모델을 만들고 비선형 충돌 해석을 수행하여 결과를 얻는다. 본 연구에서는 차체 단품에 대해 전복 시험을 수행하였다. 차체 단품은 차체 구조의 한 부분 또는 측면 부분 중 적어도 2개 이상의 기둥(Pillar)을 포함한 단면으로

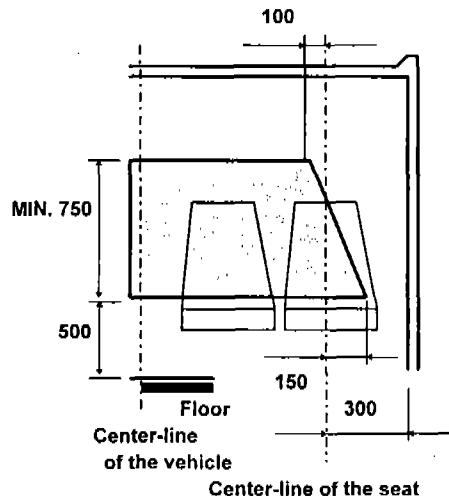


Fig.1 Definition of Residual Space (Unit : mm)

정의한다. 잔여 공간(Residual Space) 또는 생존 공간(Survival Space)은 전복 시험을 한 후나, 하는 중에 승객 객실 속에 보관되는 공간을 말하며, 다음과 같이 정의된다. 잔여 공간은 Fig. 1에 정의된 바와 같이 차체 바닥과 차체 프레임으로부터 규정한 거리만큼 떨어져있는 사다리꼴 형태로 이루어진 객실 내의 부피를 말한다. 잔여 공간을 나타내는 사다리꼴의 높이는 750mm 이상이어야 한다.

3. 전복 시험 방법

3.1 시험 개요

시험 목적은 버스 전복시 차체가 승객을 보호하기 위해 요구되는 충분한 강도를 갖고 있는지를 살펴보기 위하여, 전복시 변형 상태를 파악하고 객실 내 생존 공간을 확보하는지를 확인하는데 있다. 차체 단품을 법규에서 규정한 전복 시험 장치에 올려놓고 시험 절차에 의해 전복시킨다.

버스 차체 단품의 전복 시험을 위한 지그 제작 및 시험은 자동차 성능 시험 연구소(KATRI)에서 수행되었으며, 변형 상태를 파악하기 위한 측정기는 자동차 성능 시험 연구소의 3차원 측정기와, 광학 측정 전문계기를 취급하는 Rollei사의 장비를 사용하였다. 3차원 치수 측정기는 측정 범위가 길이 5.5m, 폭 2.5m, 높이 2.5m이며, 판독치가 0.05mm이다. 전복을 위한 시험 장치는 버스 차체를 올려놓고 경사지게 할 수 있도록 Fig.2와 같이 구성되어 있다. 차체 프레임의 무게는 330kg이고, 기타 구조물의 무게를 보상하기 위하여 125kg의 추(Weight) 4개를 부착하여 시험 차체의 총중량은 880kg이었다.

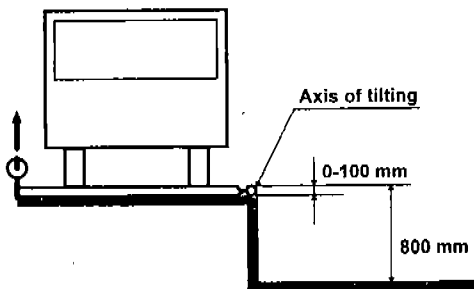


Fig.2 Rollover Test Apparatus

계는 330kg이고, 기타 구조물의 무게를 보상하기 위하여 125kg의 추(Weight) 4개를 부착하여 시험 차체의 총중량은 880kg이었다.

3.2 측정 방법

버스 차체 단품의 측정하고자 하는 위치에 측정점들을 표시하고 변형 전과 변형 후에 대해 미리 지정한 측정점의 좌표를 사진측량 방법에 의해 계산하였다.

사진 측량의 원리는 다음과 같다. 시험 대상을 여러 각도에서 촬영하여 다중 영상(Multi Image)을 기록하고 공간 교차점에 의한 3차원 좌표를 결정한다. 사진측량에서 필름의 왜곡을 보정하기 위하여 정밀한 구조의 조밀한 격자판(Reseau Mark)이 필름 앞면에 위치하여 카메라 본체에 고정되어 있다. Fig.3은 등간격으로 분포한 격자를 포함하여 대상을 찍은 사진이다. 피사체에 표적 표시(Target Mark)를 부착하여 위치를 식별할 수 있도록 한다. 또한 촬영 후에 식별이 가능한 두 점간의 거리를 측정하여 축척(Scale)을 계산하는 자료로 이용한다. 이러한 사진상의 측정점들을 디지털라이저(Digitizer)로 측정하고, 관련 소프트웨어를 사용하여 자동 좌표 인식 및 보정 작업을 한다. 측정된 좌표들은 3차원 디지털 모델링 작업을 거쳐 변형 전후의 전체 모습으로 표현된다. 사진측량 시스템은 버스와 같은 큰 구조물에 대해서도 측량이 용이하고, 비접촉 측량법이므로 실제 전복 차량에서 유리 파편 등의 위험 요소 등을 피할 수 있다는 장점을

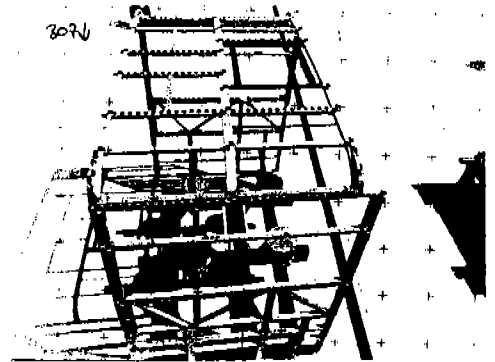


Fig.3 Photograph with Reseau

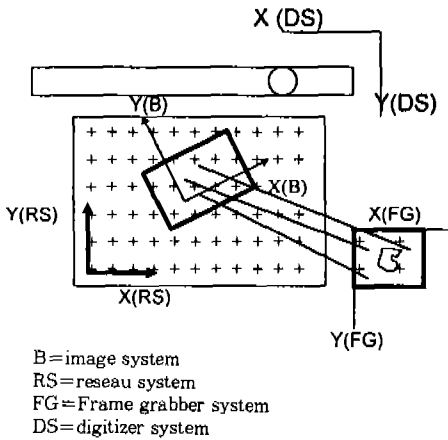


Fig.4 Measuring Process in Photogrammetry

지니고 있다.

격자가 있는 사진으로부터 표적 표시의 점들을 측정하는 과정은 Fig.4와 같은 절차를 따른다. 먼저 사진을 확대 인화하여 디지털타이저 위에 놓고 각 사진들로부터 격자 무늬들을 수치화시킨다. 이때 피사체의 측정점을 포함하는 3장 이상의 사진에서 공통된 7개 이상의 측정점을 디지털타이저로 지정한다. 이들 점중 2점은 축척 거리를 정의하는데 이용되고, 개략적인 카메라의 위치와 촬영 방향을 스케치하여 디지털타이저로 입력한다. 이로써 측정 단계는 완료되고 정리된 데이터는 관련 소프트웨어를 이용하여 다중 영상 3차원 좌표를 계산하게 된다.

한편 사진 측량에서 측정 오차는 다음 식에서 결정된다.

$$O_A = I_s M_A \quad (1)$$

여기서 O_A : 측정 오차(Object Accuracy)

I_s : 축척(Image Scale)

M_A : 측정기 오차(Measurement Accuracy)

사용한 카메라는 Rollei 6006 Metric 카메라로 6cm 필름을 사용하며, 촬영하는 대상물의 길이가 2400cm이므로 축척은 40이다. 사용한 디지

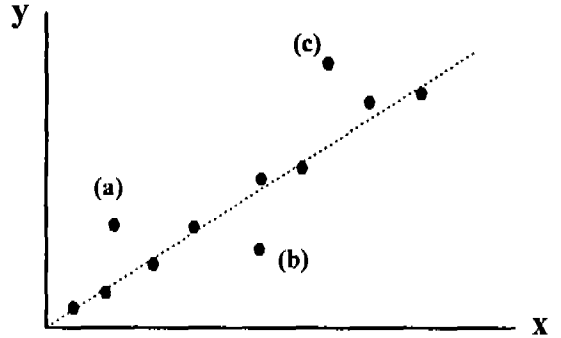


Fig.5 Example of the Robust Estimation Method

타이저의 오차는 0.008cm이다. 따라서 이 경우에 측정 오차는 0.32cm이다.

본 측정에서 사용한 사진측량 알고리즘(Algorithm)⁷⁾에서는 전체적인 대략의 좌표점들을 계산한 후 Robust Estimation Method를 수행하여 잘못 측정된 점들을 검출하고, 이를 제외한 값들에 대해 다시 Least Squares Method로 재계산을 수행한다. Robust Estimation Method는 주어진 데이터 중에서 이단 값(Outlier)을 찾아내서 이들을 잘못된 값들로 간주하여 제외하고 나머지 데이터로 계산을 하는 방법이다. 즉 Fig.5의 경우와 같이 값들이 분포되어 있을 경우에 Robust Estimation Method에서는 점(a), (b), (c)들을 잘못된 값으로 간주하여 전체 계산에서는 고려하지 않게 된다. 이 방법을 이용하면 한 두 측정 점에서 발생한 오차로 인해 전체 값의 오차에 영향을 주게 되는 혼류 현상(Smearing Effect)을 사전에 방지할 수 있다.

한편 차체가 전복되는 각도는 전체 변형 양상과 에너지와도 밀접한 관련이 있다. 따라서 경사계(Clinometer)를 지그의 플랫폼(Platform)에 부착하여 전복되는 각도를 측정하였다.

3.3 시험 결과

차체 단품이 전복되는 모습이 Fig.6에 나와있다. 플랫폼의 끝단을 지게차로 들어 올려서 전복이 되게 하였으며, 이때 차체가 전복되기 전까지 흔들리거나 동적 효과(Dynamic Effect)가

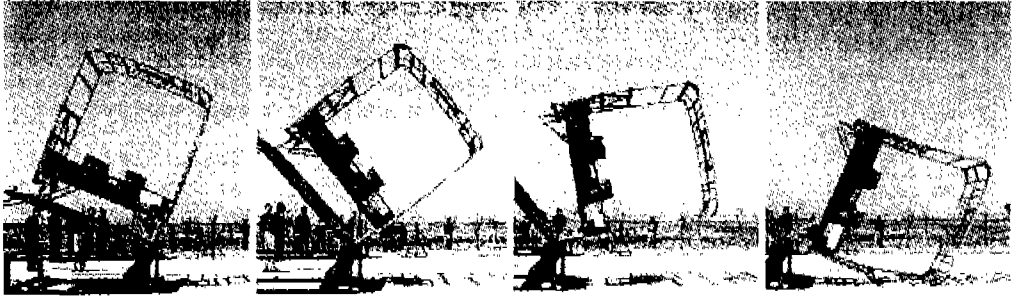


Fig.6 Rollover State

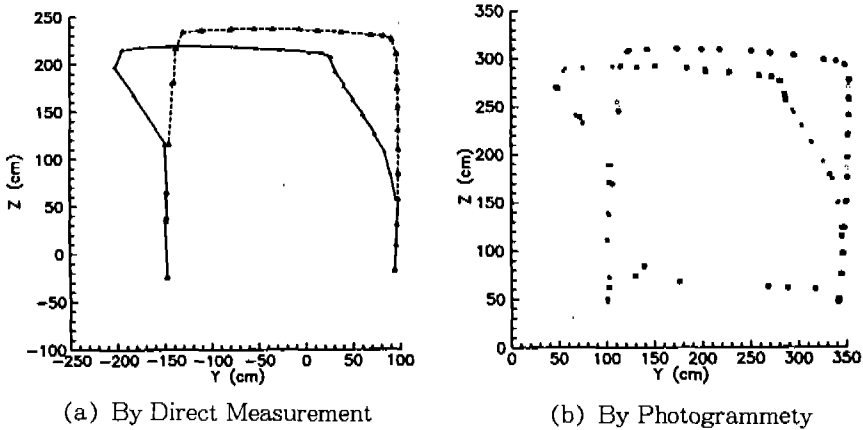


Fig.7 Measured Shape of Body Section

없어야 한다. 규정에 의하면 차체가 기울어지는 것은 자중에 의해 기울어져야 하며, 외부 하중에 의해 초기 속도를 갖고 전복이 시작되어서는 안 된다. 따라서 기울어지는 각속도는 5degree/sec를 넘지 않도록 요구되고 있으며, 본 시험에서도 이 규정을 준수하였다. 한편 차체의 다리가 플랫폼 포움에서 떨어지기 시작하는 각도를 측정하여 전복 경사각이 47°로 측정하였다.

3차원 측정기에 의한 측정은 프레임상의 미리 표시된 88개의 측정 점에 대해 이루어졌다. 사진 측량은 차체 단품의 전, 후, 좌, 우, 뒷면의 5개 방향에서 이루어졌다. 3차원 측정기에 의해 직접 측정된 변형 전후의 모습이 Fig.7-(a)에 나와있으며, 사진측량에 의한 결과는 Fig.7-(b)에 나와 있다. 두 가지 측정 방법에 의한 결과는 잘 일치 하였으며, 각 방법의 측정 점들 중에서 최대 변

형이 있는 곳은 Fig.7에서 볼 때 우측 모서리 부분으로 이곳에서의 변형량은 3차원 측정기의 경우에 67.8cm, 사진 측정의 경우에 69.5cm의 값을 나타냈다.

전체적인 변형 양상은 측면 부재의 용접 결합부 근처의 부위가 소성 변형하여, 전복시 전형적인 붕괴 양상을 보였으며, 부재의 개단면(Open Section)에서는 국부적인 붕괴도 나타났다. 차체의 측면 부재가 하단 창틀 프레임과 만나는 부분에서 측면 부재에 대해 Fig.8에서 보는 바와 같이 굽힘 붕괴(Bending Collapse)양상을 보였으며, 이 부분의 강도는 전체적인 변형 양상을 좌우하므로 잔여 공간의 확보 측면에서 가장 중요한 부위임이 판명되었다.

잔여 공간에 해당하는 영역을 살펴보기 위하여 변형 전의 차체에서 정의된 공간을 미리 나무 판

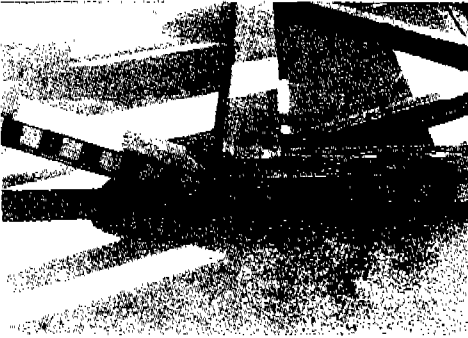


Fig.8 Side Pillar Frame Under Bending Collapses

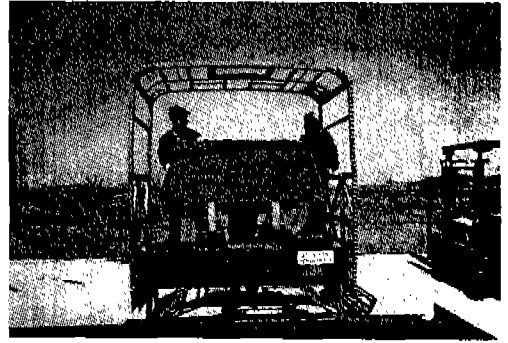


Fig.10 Residual Space View Before Rollover Test

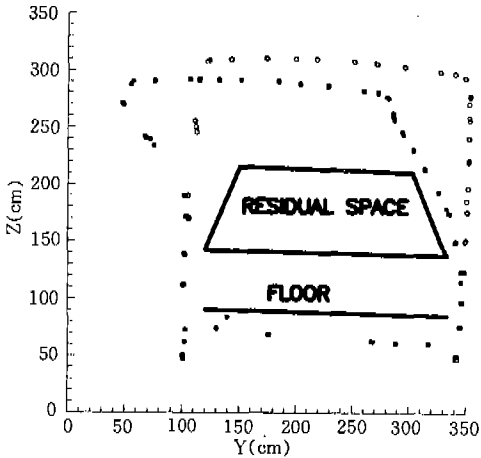


Fig.9 Verification of Residual Space

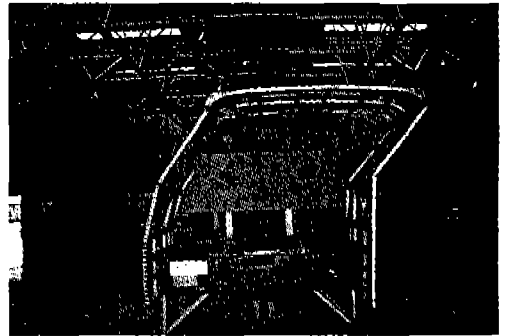


Fig.11 Residual Space View After Rollover Test

(Template)으로 만든 후, 전복된 차체 내에 설치하여 침범 여부를 조사하였다. Fig.9에는 최종 변형된 차체 모습과 이때 잔여 공간의 침범 여부를 조사한 모습이 나와있다. 조사 결과, 전복 후에도 잔여 공간이 확보되었음을 확인할 수 있었다.

Fig.10과 Fig.11에는 각각 전복 전후의 잔여 공간의 모습을 찍은 사진이 나와있다. Fig.11에서 볼 수 있는 바와 같이 전복 후 변형된 차체 프레임이 잔여 공간을 침범하지 않았음을 알 수 있다.

4. 수치 해석 결과 및 시험과의 비교

차체 단품은 구조가 주로 프레임으로 구성된 골격 구조이므로 유한 요소법을 이용한 계산 방법으로 전복 후의 변형을 구할 수 있다. 해석 프로그램은 대변형 해석을 수행할 수 있는 일반 상용 패키지인 PAMCRASH[®]를 사용하였다. 차체 프레임 및 샤시 프레임은 쉘 요소로 모델화되었으며 무게 보상을 위해 장착한 추는 집중 질량으로 고려되었다. 유한 요소 해석으로 전복 후 변형을 구할 때, 정확한 해를 구하기 위해서는 먼저 소성 영역에서의 거동을 포함한 재료의 물성값이 정확히 제공되어야 한다. 또한 전복의 경우에는 프레임의 힌지점(Hinge Point)에서 국부 변형이 발생하기 때문에 이 부분에 대한 유한 요

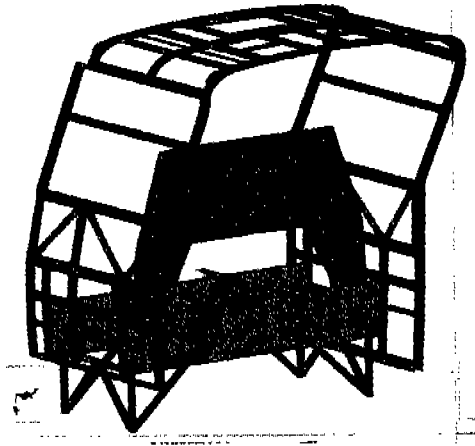


Fig.12 Finite Element Model of the Body Section After Rollover

소 모델이 세밀하게 이루어져야 한다. 국부 변형점에서 유한 요소 모델이 세밀하지 않을 경우에는 해석 결과가 실제 경우보다 강성이 큰 결과로 나오게 된다. Fig.12에는 전복 후 변형 상태에서의 유한 요소 모델이 나와있다. Fig.12에서 내부의 사다리꼴 형태는 잔여 공간을 나타내기 위해 모델화된 것이며, 실제 강도나 무게는 무시될 수 있는 요소이다. Fig.13은 유한 요소 해석 결과로 구한 전복 후 변형 상태를 정면에서 바라본 것이다. Fig.13의 결과를 보면 수치 해석에서 구한 변형이 시험에서 구한 값보다 변형이 적은 것을 알 수 있다. 먼저 기술하였듯이 정확한 재료의 물성값과 보다 세밀한 유한 요소 모델화가 이루어지면 수치 해석 결과가 보다 시험값에 근접하리라고 생각한다. 본 단원에서는 시험 방법과 유한 요소법에 의한 계산 방법의 차이점, 장단점 등을 비교하기 위하여 수치 해석 결과를 수록하였으며, 수치 해석과 관련한 자세한 내용은 생략하였다.

5. 결 론

전복 사고시 버스 내의 승객을 보호하기 위한 최소한의 공간인 잔여 공간(또는 생존 공간)을

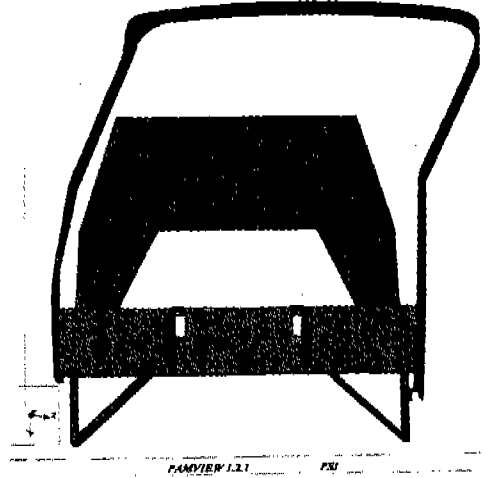


Fig.13 Deformation of the Body Section From Finite Element Method

확보하기 위해서는 차체 구조가 충분한 강도를 유지해야 한다. 법규에서 규정한 전복 시험은 버스 구조물의 안전성을 실증적으로 시험함으로써 관련 인증을 부여함과 아울러 문제점 발견시 어떤 부분을 보강해야 하는지에 대한 설계 지침을 제시해준다.

본 연구는 유럽 법규에서 규정한 전복시 구조물의 강도 요구 규정에 따라 차체 단품에 대한 전복 시험을 수행하였고, 이에 필요한 절차, 장비, 측정 방법에 대한 제반 사항을 정립하였다. 전복을 시키기 위하여 만들어진 지그는 규정대로 작동함을 확인하였으며, 계원을 늘릴 경우에 완성차에 대해서 전복 시험을 할 수 있게 되었다. 소개된 전복 시험 방법은 앞으로 버스 구조물을 보다 안전하게 설계할 수 있는 지침을 제시할 것이다.

사진측량에 의해 각 측정 점의 위치를 파악함으로써 변형량을 정확히 구할 수 있으며, 승객 안전도와 관련한 잔여 공간의 확보 여부를 판단하는데 이용되었다. 대형 구조물에 대해 사진측량 시스템에 의한 비접촉 측정법은 국내에서 처음 시도된 것으로 생각되며, 이 방법은 특히 전복, 충돌과 같은 대변형 문제를 수반하는 현상에 대해 정확하고 손쉬운 좌표 측정값을 제공하리라고 본다.

참 고 문 헌

1. K. Diggs, A. C. Malliaris, and A. Ommays, "The Mechanics and Biomechanics of Rollover Casualties," Wayne State Biomechanics Symposium, March 1991.
2. G. M. Mackay, I. D., Tapen, "Field Studies of Rollover Performance," SAE 700417, 1970.
3. M. Csaba, "Roll-over Resistance of Bus Superstructures," SAE 925210, 1992.
4. Rollei Fototechnic, RolleiMetric 근거리 사진 측량 시스템 설명서, 1991.
5. A. Kullgren, A. Lie, and C. Tingvall, "The Use of Photogrammetry and Video Films in the Evaluation of Passenger Compartment Measurement and Occupant-Vehicle Contacts," SAE 950239, 1995.
6. 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.
7. Rollei Fototechnic, RolleiMetric Software Product Information Manual. 1991.
8. PAMCRASH User's Manual, Engineering Systems International, 1996.