

(論 文)

복합적층판의 저속충격시험 및 거동에 대한 실험적 연구

최익현* · 홍창선**

(1993년 9월 28일 접수)

An Experimental Study on Low-Velocity Impact Test and Response of Composite Laminates

I. H. Choi and C. S. Hong

Key Words : Drop Weight Type Impact Test System(중량낙하식 충격시험기), Measurement(측정), Correction(보정), Fixed Boundary Condition(고정지지 경계조건), Low-Velocity Impact Response(저속충격거동), Composite Laminate(복합적층판)

Abstract

A drop weight type impact test system is designed and set up to experimentally investigate impact responses of composite laminates subjected to the low-velocity impact. Using the test system, the impact velocity and the rebound velocity of the impactor as well as the impact force history are measured. An error of the measured data due to a difference in measuring position of the sensor is corrected and, for the estimation of real contact force history, a method of correcting an error due to friction forces is developed. Experimental methods to fix the boundary edge of laminate specimens in impact testing are investigated and the impact tests on the specimens fixed by those methods are performed. Impact force histories and dynamic strains measured from the tests are compared with numerical results from the finite element analysis using the contact law. Consequently, the nonlinear numerical results considering the large deflection effects are agreed with the experimental results better than the linear ones.

기 호 설 명

- | | |
|--|---|
| <p>a : 충격체의 가속도</p> <p>a_f : 충격체와 유도봉 사이의 마찰에 의하여 충격체가 받는 가속도</p> <p>c : 충격량-운동량 보존의 법칙을 사용한 경우의 보정을 위한 상수</p> <p>d_1, d_2 : 2단 플래그에서의 두 간격</p> <p>f : 시편과의 접촉 중에 발생하는 충격체와 유도봉 사이의 마찰력</p> <p>F : 실제 시편과의 접촉하중이력으로 보정된 충격하중이력</p> | <p>F_m : 하중센서에 의해 측정된 충격하중이력</p> <p>g : 중력가속도</p> <p>h : 충격체에서 시편까지의 낙하높이</p> <p>h_0 : 시편에서 속도센서까지의 상대적인 높이차이</p> <p>m : 충격체의 질량</p> <p>m_v, m_L : 충격체의 하중변환기내 압전센서 상, 하부의 질량</p> <p>t_1, t_2 : 2단 플래그에 의하여 발생한 신호의 두 개의 시간간격</p> <p>v_1, v_2 : 2단 플래그신호로부터 계산된 두 개의 속도</p> <p>v_i : 시편위치로 보정된 충격체의 충격속도</p> <p>v_{im} : 속도센서에서 측정된 충격체의 충격속도</p> <p>v_r : 시편위치로 보정된 충격체의 반발속도</p> |
|--|---|

*한국항공우주연구소 우주비행시험연구그룹
 **정희원, 한국과학기술원 항공우주공학과

v_{rm} : 속도센서에서 측정된 충격체의 반발속도

1. 서 론

항공기나 우주비행체 등의 경량화 구조물에 널리 사용하고 있는 복합적층구조재는 외부의 물체에 의하여 저속의 충격을 받는 경우에 외부에서는 육안으로 식별이 곤란한 손상이 구조물의 내부나 후면에 발생한다. 이러한 손상은 구조물의 압축강도 등의 기계적 성질을 저하시키므로 이에 대하여 손상 허용설계를 적용하기 위한 연구가 필요하다. 최근 복합적층구조물의 저속충격문제에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다.⁽¹⁾

복합적층구조물의 저속충격문제를 해결하기 위해서는 먼저 충격시 외부물체와 충격체와의 사이에서 발생하는 충격하중이력과 구조물의 응력상태 등에 대하여 정확한 규명이 필요하다. 이에 대하여 국내 외에서 많은 연구가 수행되고 있으며,^(2~13) 최근 최익현 등^(7,8)은 복합적층판의 저속충격거동을 정확히 해석하기 위해서는 충격시 발생하는 적층판의 대처점효과를 고려하여 비선형 해석을 수행하여야 한다고 발표하였다. 이러한 해석적인 연구결과를 실험결과와 비교 검토하기 위해서는 저속충격시험을 위한 장치가 필요하다.

복합적층구조물의 저속충격시험을 위한 장치는 실제 구조물이 저속충격을 받는 경우를 모사(simulation)하기에 적당하도록 설계된다. 항공기 등에 사용된 복합적층구조물이 비행중이나 이착륙중에 우박이나 작은 돌 등에 의하여 받는 충격을 모사하기에 적당한 공기총식(air gun type) 시험기가 있고, 제작과정이나 보수과정에서 공구나 공구상자 등이 낙하하여 가해지는 충격을 모사하기에 적당한 중량낙하식(drop weight type) 시험기가 있으며, 최근에는 중량낙하식에서 충격체의 충격방향을 변형한 진자식(pendulum type) 시험기가 제작되고 있다. 이상의 여러 방식의 시험기들은 제작과 시험 및 데이터 측정방법에 있어서 각각 다른 특성을 가지고 있다.⁽⁹⁾

본 연구에서는 중량낙하식 충격시험기를 설계하고 제작하였다. 제작된 시험기는 가속도계(accelerometer) 센서와 압전식 하중변환기(piezo-electric type force transducer) 센서를 이용하여 충격하중이력을 측정할 수 있고 포토인터럽트(photo-interrupt)

센서를 이용하여 충격체의 충격속도 및 반발속도를 측정할 수 있다. 이들 센서로부터 측정된 데이터는 센서의 측정위치에 따른 오차를 보정하여야 한다. 충격시험기를 제작하고 측정된 데이터를 보정하는 방법에 대해서는 Tan 등⁽¹⁰⁾과 Sjoblom 등⁽¹¹⁾의 연구를 참고할 수 있다.

Tan 등⁽¹⁰⁾은 진자식 충격시험기를 제작하고 압전식 하중변환기 센서를 사용하여 충격하중이력을 측정하였다. 측정된 충격하중이력에 대하여 가속도계 센서를 이용하여 실험적으로 검증하였으며, 이 과정에서 간단한 해석적 방법을 적용하여 하중변환기 센서는 충격체내에서의 조립위치에 따라 측정되는 값이 달라지므로 실제 충격체와 구조물과의 접촉되는 지점에서의 충격접촉하중을 구하기 위해서는 이에 대한 보정이 필요하다고 하였다. 이 연구에서 사용된 충격체의 경우에는 센서로부터 측정된 하중이 실제 접촉지점에서의 충격접촉하중의 약 50% 정도의 크기로 측정되어 그 오차가 매우 크게 나타났다.

Sjoblom 등⁽¹¹⁾도 진자식 충격시험기를 제작하고 스트레인지어를 이용하는 로드셀(load cell)을 사용하여 충격하중이력을 측정하였다. 이 때 로드셀로부터 측정된 하중이력을 보정하기 위하여 충격량-운동량 보존의 법칙을 적용하였다. 그러나 이 연구에서는 하중이력을 보정하는 이유에 대하여 로드셀의 동적 특성에 대한 눈금조정(calibration)이 필요하기 때문이라고 하였는데, 이는 앞의 Tan 등⁽¹⁰⁾의 연구결과와 같이 로드셀의 측정값이 충격체내에서의 조립위치에 따라 달라지므로 보정하여야 하는 것이라고 설명되어야 한다.

이상의 두 연구결과로부터 진자식 충격시험기에 대한 측정데이터의 보정방법에 대하여 알 수 있었다. 그러나 중량낙하식 충격시험기의 경우에는 측정데이터의 보정방법에 대하여 연구된 사례를 찾아보기 어렵다. 일반적으로 진자식 충격시험기는 충격체의 속도를 측정함에 있어서 오차의 발생요인이 크지 않고, 또한 충격체의 유도과정에서 마찰력이 거의 발생하지 않기 때문에 이상의 방법으로 충격하중이력을 충분히 보정할 수 있다. 그러나 중량낙하식 충격시험기의 경우에는 충격체의 속도를 측정함에 있어서 센서의 측정위치에 따른 오차가 상대적으로 크게 나타나며, 또한 충격체의 유도과정에서도 마찰력의 발생요인이 크기 때문에 마찰력으로 인한 오차를 고려하지 않은 이상의 보정방법^(10,11)만

으로는 충격하중이력을 보정하기가 곤란하다.

또한 일반적으로 충격시험에서 측정된 충격하중이력으로부터 충격체의 반발속도를 계산하여 충격체의 손실에너지를 계산할 수 있으나 측정된 충격하중이력을 보정하지 않고 충격체의 손실에너지를 계산하는 경우에는 그 오차가 매우 크게 나타날 수 있다. 따라서 Sjoblom 등⁽¹¹⁾과 Lee 등⁽¹²⁾은 충격체의 손실에너지를 정확히 평가하기 위해서는 충격체의 반발속도를 직접 측정하는 것이 필요하다고 보고하였다.

본 연구에서도 충격체의 충격속도 및 반발속도를 속도센서로부터 직접 측정하였으며, 속도센서의 측정위치에 따른 오차를 보정하기 위하여 충격체가 유도봉(guiding column)을 따라 낙하 또는 상승하면서 발생하는 마찰력의 효과를 고려하였고, 여기에 중력-가속도 관계를 적용하여 측정된 속도데이터를 보정하였다. 또한 하중센서를 이용하여 측정된 충격하중이력으로부터 실제 충격접촉하중이력을 정확히 평가하기 위하여 충격체와 유도봉 사이에서 발생하는 마찰력을 고려하여 보정하였다. 이를 위하여 충격체내의 센서 상하부의 질량 및 관성력 관계를 응용하여 보정계수를 이론적으로 계산하는 방법을 개발하였고, 또한 마찰력의 영향을 고려하기 위하여 속도에 대한 보정과정을 거친 정확한 속도값을 사용하여 충격량-운동량 보존의 법칙을 적용하였다.

한편, 충격시험시 시편은 시편 고정장치를 이용하여 고정하게 되는데, 이때 시편에 고정지지 경계조건을 부여하기 위하여 일반적으로 볼트를 이용한 고정방법을 많이 사용하고 있다.⁽¹³⁾ 그러나 볼트를 이용하여 고정하는 경우에 경계부위에서 미끄러짐(slipping)이 발생할 수 있다. 따라서 저속충격거동에 대한 해석에서 적중판의 굽힘변형으로 인한 면내 변형률의 효과, 즉 막막효과(membrane effect)를 고려하여 비선형해석을 수행하는 경우에는 해석결과와 실험결과에서 상당한 차이가 발생할 수 있다. 그러므로 비선형해석에 있어서 이론적인 고정지지 경계조건을 정확하게 만족시키기 위해서는 볼트를 이용한 고정방법만으로는 불완전하므로 본 연구에서는 정착제를 이용하여 시편을 고정함으로써 더욱 확실한 고정효과를 추구하고 있다. 이상의 두 실험적 고정지지 방법에 따른 충격하중이력과 스트레인지 이지를 사용하여 측정된 동적변형률에 대하여 이전의 연구방법⁽⁸⁾에 의한 유한요소해석 결과와 비교

검토하였다.

2. 충격시험기의 제작 및 데이터 측정

2.1 충격시험기의 제작

본 연구에서 설계 제작된 중량낙하시 저속충격시험기에 대한 실제적인 모습을 Fig. 1에서 보여주고 있으며, Fig. 2는 시험기의 대략적인 구성을 각 부

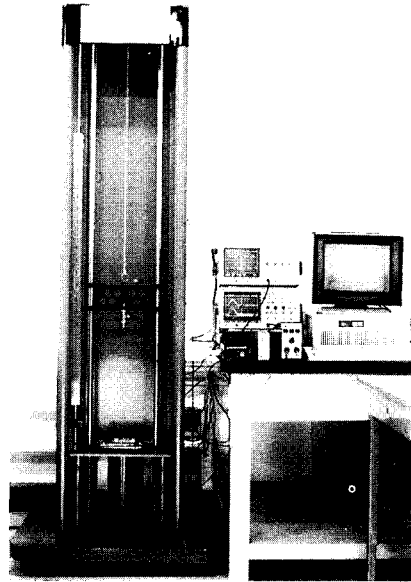


Fig. 1 Overall view of a drop weight type impact test system

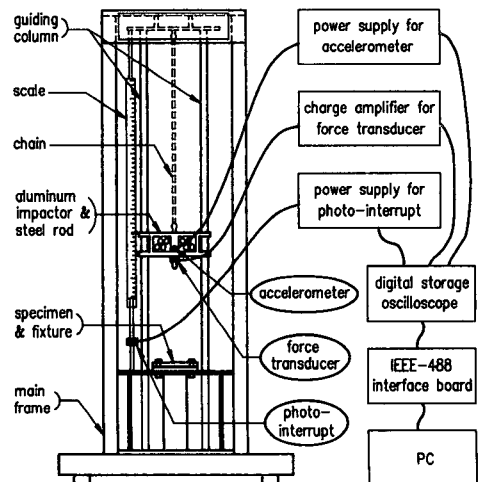


Fig. 2 Schematic diagram of the drop weight type impact test system

분의 명칭과 더불어 보여주고 있다. 본 시험기를 각 부분의 기능별로 크게 분류하면 다음과 같다. 시험기의 프레임과 충격체 및 시편고정장치에 해당하는 기계적인 부분, 충격체의 속도 및 충격하중이력을 측정하기 위한 센서들과 그에 따른 전원공급장치, 그리고 센서로부터의 신호를 저장하고 컴퓨터로 전송하여 처리하기 위한 부분들로 구성된다.

시험기의 기계적인 부분을 설계하고 제작하는 과정에서 시험기의 프레임은 견고하고 안정성을 확보하여야 한다. 이는 충격시험중에 충격체의 충격에너지가 프레임의 진동에너지로 손실되는 것을 방지하기 위하여 필요하다. 충격체를 유도하기 위한 두 개의 유도봉은 평행을 유지하여야 하며, 또한 수직을 유지하여야 하므로 프레임의 바닥에 높이조절장치가 필요하다. 충격체와 두 봉과의 마찰을 줄이기 위하여 본 연구에서는 테프론(teflon)재료를 이용한 미끄럼베어링을 가공하여 충격체내에 조립하여 사용하였다. 충격체는 알루미늄으로 본체를 가공하여 Fig. 3에서와 같이 하중변환기 센서와 가속도계 센서를 장착할 수 있도록 제작하였으며, 속도측정을 위한 2단 플래그(two edged flag)와 충격체의 높이를 알 수 있도록 하는 눈금지시기(scale indicator)용 철판을 충격체의 좌측에 부착하였다. 또한 시편을 고정하기 위한 시편고정장치는 Fig. 4에서와 같이 시험기의 프레임에 볼트로 견고하게 고정된다. Fig. 4의 좌측에는 충격체의 속도를 측정하기 위한 포토인터럽트 센서가 내부에 조립된 상자형 물체가 보이고 있는데, 이는 충격체에 부착된 2단플래그가 통과하면서 신호의 차단을 발생시켜 속도를 측정하기 위한 장치이다.

시험기에 사용된 센서 및 전기적인 장치의 구성에 대하여 Fig. 5에서 대략적으로 보여주고 있다. 본 연구에서는 충격하중이력을 측정하기 위하여 두 가지 센서를 이용하였다. 압전식 하중변환기인 B & K 8201과 가속도계인 PCB 305A04를 사용하였다. 또한 충격체의 충격속도 및 반발속도를 측정하기 위하여 광센서인 포토인터럽트 P507A를 사용하였다. 또한 이들 센서와 관련하여 전원을 공급하고 신호를 증폭하는 장치로는 각각 B & K 2635와 PCB 482A 그리고 +5 V(DC) 전원공급장치를 이용하였다. 센서로부터 측정된 신호는 디지털 스토리지 오실로스코프(digital storage oscilloscope) HP 54601A와 IEEE-488 인터페이스보드(interface board)를 이용하여 컴퓨터로 전송하여 처리한다.

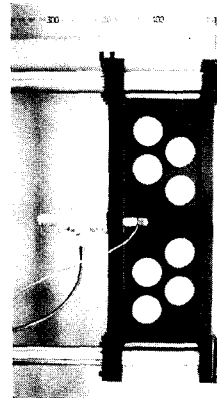


Fig. 3 Impactor assembly

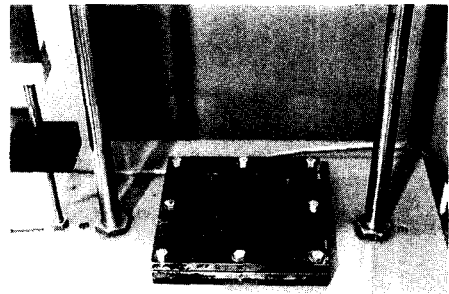


Fig. 4 Specimen fixture and velocity sensor

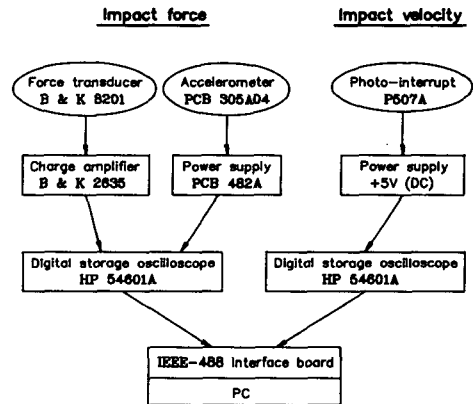


Fig. 5 Sensors and other electric equipments

이상의 센서 및 전기적인 장치들중에서 각 센서의 실제의 모습은 Fig. 3과 4에서 보았으며, Fig. 6은 센서들을 제외한 전기적인 장치에 대하여 실제의 모습을 보여준다.

본 시험기의 제작후 프레임에 가속도계 센서를 부착하고 예비충격시험을 수행하여 충격시험시 발

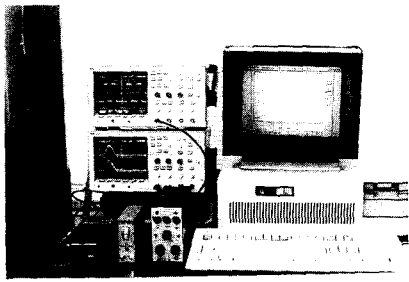


Fig. 6 Power supplies and data acquisition system

생하는 프레임의 진동여부를 검사하였다. 검사결과 프레임에서는 응력파의 전달에 의한 신호만 검출되었고 구조적인 진동현상은 발견되지 않았다. 또한 충격체와 유도봉과의 마찰로 인한 낙하속도의 손실률은 약 2~5% 정도인 것으로 측정되었다.

이상의 과정을 거쳐 제작된 본 시험기를 사용하여 시험가능한 충격시험의 범위를 살펴보면 충격체의 최대 낙하높이가 1.43 m이고 자유낙하시에 최대낙하속도는 약 5.1 m/sec이다. 충격체의 질량은 최소 1.00 kg이며 필요에 의하여 증가시킬 수 있다.

2.2 실험 데이터의 측정

본 시험기를 사용하여 충격체의 충격속도 및 반발속도를 측정하는 방법은 다음과 같다. Fig. 3에서의 2단 플래그가 Fig. 4에서의 포토인터럽트 센서를 통과하면서 Fig. 7에서의와 같은 신호를 발생한다. 따라서 오실로스코프를 이용하여 검출된 신호의 두 간격(Fig. 7에서의 t_1 과 t_2)을 파악하고, 철판의 두 간격(Fig. 7에서의 d_1 과 d_2)을 측정하면 두 번의 속도, 즉 v_1 과 v_2 를 계산할 수 있게 된다. 이와 같이 두 번의 속도를 측정하는 이유는 포토인터럽트 센서에서 신호의 상승반응과 하강반응에서의 반응시간의 차이를 고려하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 두 속도의 평균값을 2단 플래그의 중심이 포토인터럽트 센서의 중심을 통과하는 순간의 속도로 계산하였다.

Fig. 8에서는 하중변환기 센서 및 가속도계 센서를 이용하여 측정된 전형적인 충격하중이력을 보여 준다. 하중변환기 센서를 이용하는 경우에는 앞의 서론에서 언급한 바와 같이 하중이력의 크기에 대한 보정과정이 필요하다. 그러나 가속도계 센서를 이용하는 경우에는 측정된 가속도값에 충격체의 질

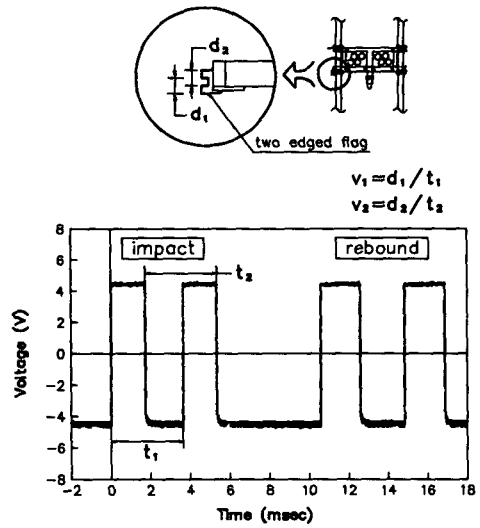


Fig. 7 Velocity calculation from the signal by photo-interrupt and two edged flag

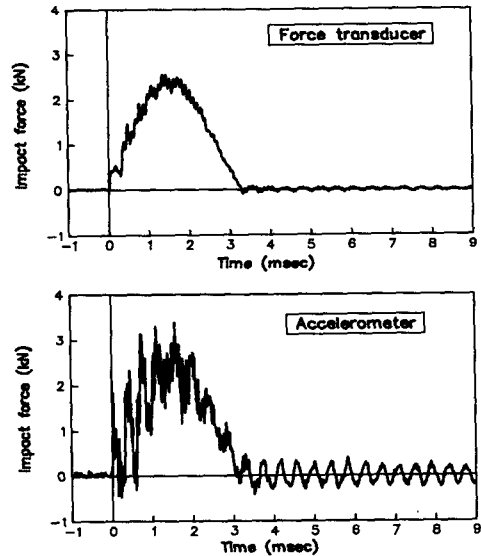


Fig. 8 Typical impact force histories using accelerometer and force transducer

량을 곱하여 바로 충격하중으로 계산할 수 있다. 그렇지만 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 가속도계 센서를 이용하는 경우에는 충격체와 구조물과의 접촉으로 인한 충격하중을 직접 측정하는 것이 아니고 충격으로 인하여 충격체에 발생하는 가속도를 측정하여 충격하중을 계산하므로 충격체 및 가속도계 자

체의 진동효과로 인하여 신호의 변동폭이 매우 크게 나타나고 있다. 따라서 가속도계 센서를 이용하여 충격하중이력을 측정하는 경우 신호의 평균값 개념을 적용하여 측정된 신호를 처리한 연구도 있다.⁽¹²⁾ 그렇지만 가속도계 센서를 이용하는 경우에 일반적으로 하중변환기 센서에 비하여 부정확한 데이터가 측정된다고 보여지며, 따라서 본 연구에서는 충격하중이력의 실험적 평가를 위하여 주로 하중변환기 센서로부터 측정된 값을 다음 장의 방법으로 보정하여 사용하였다.

3. 측정된 데이터의 보정

3.1 측정된 충격체의 속도에 대한 보정

충격체의 충격속도는 충격체가 구조물과 접촉하는 순간의 속도를 측정하여야 한다. 그러나 실제적으로 속도측정을 위한 2단 플래그는 상하방향의 그 크기로 인하여 충격체가 시편과 접촉이 시작되는 순간의 속도를 측정한다는 것은 불가능하다. 즉 속도센서가 시편과의 접촉위치보다 약간 높은 위치에서 속도를 측정할 수밖에 없다. 따라서 본 연구에서는 시편과의 접촉위치에서의 충격속도 및 반발속도를 평가하고자 다음과 같은 방법으로 측정된 속도값을 보정하였다.

충격체가 낙하하거나 반발되는 경우에 충격체와 유도봉 사이에는 미끄럼베어링에 의한 마찰력이 존재하므로 이를 고려하여야 한다. 본 연구에서는 마찰력이 충격체의 속도에 관계없이 일정하게 작용한다고 가정하였다. 즉, 충격체에 작용하는 중력가속도가 g 일 때, 마찰력에 의하여 감소되는 가속도의 크기를 a_f 라고 하고 수식을 전개하였다.

먼저 충격체의 낙하속도, 즉 충격속도에 대한 보정과정은 다음과 같다. 충격체의 낙하지점에서 시편까지의 낙하높이를 h , 시편에서 속도를 측정하는 센서까지의 상대적인 높이 차이를 h_0 라고 하고, 센서로부터 측정된 낙하속도를 v_{im} , 실제 시편에 접촉하는 순간의 낙하속도를 v_i 라고 하면 중력-가속도 관계로부터 다음과 같은 식이 성립한다.

$$v_i = \sqrt{2(g - a_f)h} \quad (1)$$

$$v_{im} = \sqrt{2(g - a_f)(h - h_0)} \quad (1)$$

위의 식(1)과 (2)로부터 $(g - a_f)$ 를 소거하면 v_i 와 v_{im} 과의 관계를 다음 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{v_i}{v_{im}} = \sqrt{\frac{h}{(h - h_0)}} \quad (3)$$

식(3)으로부터 h_0 가 일정한 경우에는 낙하높이가 낮을수록 센서로부터의 측정값과 실제 시편위치에서의 속도값에서 차이가 크게 나타남을 알 수 있다.

충격체의 반발속도에 대한 보정과정도 낙하속도에 대한 보정과정과 유사하다. 센서로부터 측정된 반발속도를 v_{rm} , 실제 시편과의 접촉위치에서의 반발속도를 v_r 라고 할 때, 충격체가 반발되어 상승하는 경우에도 낙하시와 동등한 크기의 마찰력이 작용한다고 가정하면, 마찰에 의한 가속도, a_f 는 앞의 식(1), (2)에서와 같은 크기를 갖는다. 이때 중력-가속도 관계로부터 다음의 식(4)가 성립한다.

$$v_r^2 = \sqrt{v_{rm}^2 + 2(g + a_f)h_0} \quad (4)$$

위의 식(4)에 식(2)로부터 a_f 를 치환하여 대입하면 v_r 과 v_{rm} 과의 관계는 다음의 식(5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{v_r}{v_{rm}} = \sqrt{1 + \left(\frac{4g(h - h_0) - v_{im}^2}{v_{rm}^2} \right) \left(\frac{h_0}{h - h_0} \right)} \quad (5)$$

본 연구에서 제작된 시험기의 경우에는 충격체가 시편과 접촉하는 지점보다 약 1.0 cm 높은 위치에서 충격체의 속도를 측정하도록 되어있다. 따라서 본 시험기에 대하여 센서로부터 측정된 충격속도를 시편과의 접촉지점에서의 충격속도로 보정해주는 보정계수의 크기를 식(3)으로부터 계산할 수 있으며, 이를 충격체의 낙하높이에 따라 정리하여 Table 1에서 보여주고 있다.

충격체의 낙하높이와 센서와 시편과의 상대적인 높이 차이만으로 결정되는 충격속도에 대한 보정계수와는 달리 반발속도에 대한 보정계수는 충격을 받는 시편의 재료 및 구조특성에 따라 다르게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 동(copper)으로 코팅된 glass/epoxy fabric 복합적층판 시편에 대하여 대표적으로 충격시험을 수행하고, 식(5)를 이용하여 반발속도에 대한 보정계수를 계산하였다. Table 1에서 보여주고 있는 반발속도에 대한 보정계수는 각 높이별로 세 번씩 충격시험을 수행하여 평균한 결과이다.

Table 1의 결과를 살펴보면, 속도센서의 측정위치로 인하여 발생하는 측정된 속도값의 오차는 낙하높이에 따라 약 0.5~8.6% 정도임을 알 수 있

Table 1 Correction coefficients of the measured velocities and constants for the correction of the impact force history

Drop height h(cm)	Velocity correction coeff		Constant for force correction $m(v_r - v_i) / \int F_m dt$
	Impact velocity v_i/v_{im}	Rebound velocity v_r/v_{rm}	
10	1.0541	1.0858	1.0959
20	1.0260	1.0409	1.1050
40	1.0127	1.0203	1.0967
50	1.0102	1.0169	1.0982
60	1.0084	1.0141	1.1030
70	1.0072	1.0122	1.1054
80	1.0063	1.0108	1.1066
90	1.0056	1.0100	1.1005
100	1.0050	1.0092	1.1008
	Average		1.1016 (±0.5% error)

다. 즉, 낙하높이가 작은 경우에는 상대적으로 큰 오차가 나타났으며, 낙하높이가 큰 경우에는 상대적으로 작은 오차를 나타내었다. 충격속도 및 반발속도의 측정에서의 오차는 다음 절에서 살펴볼 충격하중이력의 보정에도 영향을 미치므로 충격체의 정확한 속도를 측정하기 위한 이상의 보정과정은 매우 중요하다.

3.2 측정된 충격하중이력에 대한 보정

서론에서 언급한 바와 같이 충격하중이력을 측정하기 위해서는 하중변환기 센서나 스트레인게이지를 이용한 로드셀을 사용하는 것이 가속도계 센서를 사용하는 것보다 정확한 측정결과를 제공한다. 그러나 하중변환기 센서나 로드셀을 시용하는 경우에는 충격체내에서 센서가 장착된 위치에 따라 측정값이 달라지므로 적절한 보정과정이 필요하다. 즉 하중센서를 충격체의 끝단부에 장착할 수 없기 때문에 실제 충격체의 끝단부위가 받는 충격접촉하중을 평가하기 위해서는 이에 대한 보정과정이 필요하다.

충격체를 유도하는 과정에서 마찰력이 거의 발생

하지 않는 진자식 충격시험기의 경우에는 서론에서 살펴본 Sjoblom 등⁽¹¹⁾의 연구방법과 같이 충격량-운동량 보존의 법칙을 적용하여 충격하중이력을 보정할 수 있다. 그러나 충격체와 유도봉 사이에서 상대적으로 마찰력이 크게 발생하는 중량낙하식 충격시험기의 경우에는 마찰력을 고려하여 충격하중이력을 보정하여야 하기 때문에 충격량-운동량 보존의 법칙만으로 충격하중이력을 보정할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 Tan 등⁽¹⁰⁾의 연구결과로부터 알 수 있는 충격체내의 센서 상하부의 질량과 관성력 관계를 응용하고, 여기에 충격량-운동량 보존의 법칙을 적용함으로써 충격하중이력을 보정하였다.

먼저 Tan 등⁽¹⁰⁾의 연구결과를 살펴보면, 자유경계를 갖는 봉의 한쪽 끝단에 충격하중(impulse)을 가하는 경우에 대한 해석적 연구를 통하여 봉의 중심부에서 발생하는 하중은 끝단부 하중의 0.498배 즉, 약 1/2이라고 해석하였다. 이 때 봉의 양 끝단부 및 중심 위치에서 거의 동일한 크기의 가속도가 발생한다고 해석결과를 발표하였다.

따라서 본 연구에서는 Tan 등⁽¹⁰⁾의 해석결과를 응용하여 마찰력을 고려한 충격하중이력 보정방법을 개발하였다. Fig. 9의 상부에는 본 연구에서 제작한 충격조립체를 보여주고 있다. 또한 Fig. 9의 하부에는 충격체에 조립된 하중변환기 내분의 압전센서를 기준으로 충격체를 두 부분으로 나누었을

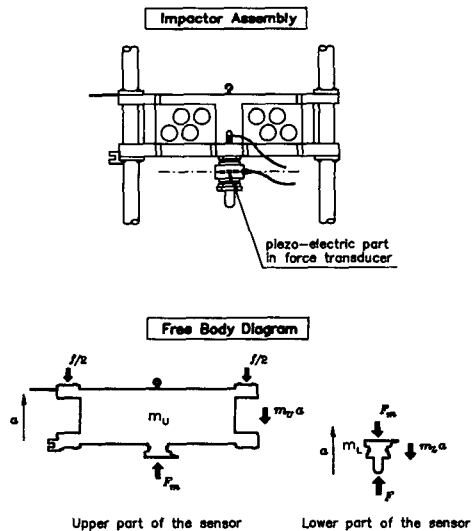


Fig. 9 Impactor assembly and free body diagram

때, 외부로부터 하중 F 를 받아 가속도 a 가 발생하는 경우에 대한 자유물체도(free body diagram)를 보여준다. 여기서 충격체에 발생하는 가속도, a 는 Tan 등⁽¹⁰⁾의 해석결과를 참고하여 충격체의 모든 위치에서 동일하다고 가정하였다. 또한 이 때 충격체와 유도봉 사이에서 발생하는 마찰력 f 를 고려하였으며, F_m 은 센서에 작용하는 하중을 의미한다. 그리고 m_u 와 m_L 은 각각 충격체내 센서의 상부와 하부의 질량을 의미한다. 이 때 충격체내 센서의 상하부에 대한 자유물체도로부터 하중 평형에 관한 다음의 두 식이 성립한다.

$$F_m - f = m_u a \tag{6}$$

$$F - F_m = m_L a \tag{7}$$

위 두 식으로부터 a 를 소거하여 정리하면, 다음의 식(8)과 같이 F 와 F_m 및 f 와의 관계를 구할 수 있다.

$$\frac{F}{F_m} = \frac{m_L + m_u}{m_u} - \frac{m_L}{m_u} \frac{f}{F_m}$$

위의 식(8)을 본 시험기의 경우에 적용하기 위하여 본 연구에서 제작 조립된 충격체에 대하여 압전 센서 상하의 질량분포를 살펴보면 다음과 같다. 먼저 시편과 직접 접촉하는 충격조립체의 끝단부(tub)와 연결볼트의 중량이 32 g이고 본 연구에서 사용된 하중변환기 B & K 8201에서 압전센서 하부의 중량이 69 g이므로,⁽¹⁴⁾ 식(12)에서의 m_L 이 101 g에 해당하며 충격조립체의 전체 중량은 1000g이므로 m_u 는 899 g이 된다. 식(8)에 이상의 데이터를 적용하면 다음의 식(9)가 구해진다.

$$\frac{F}{F_m} = 1.1123 - 0.1123 \frac{f}{F_m} \tag{9}$$

위의 식(9)에서 마찰력에 의한 오차를 무시하는 경우에는 1.1123이 이론적인 보정계수가 되므로 이 값을 하중이력에 대한 보정에 바로 적용할 수 있다. 그러나 마찰력에 의한 오차를 고려하는 경우에는 식(9)에서의 마찰력이 미지수이므로 이의 결정을 위해서 실제로 충격시험을 수행하여 얻은 실험 데이터가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 다음의 과정을 거쳐 마찰력에 의한 실험데이터를 사용하였다.

Fig. 9로부터 충격체의 운동에 실제적으로 작용하는 하중은 충격접촉하중, F 에서 마찰력, f 를 뺀 성분이므로 앞 절의 방법으로 보정된 충격속도, v_i

및 반발속도, v_r 로부터 충격체의 운동량의 변화량을 계산하여 다음의 식(10)과 같이 충격량-운동량 보존의 법칙을 적용하였다.

$$\int (F - f) dt = m(v_r - v_i) \tag{10}$$

여기서, 충격체 끝단부의 충격접촉하중과 마찰력은 센서로부터 측정된 하중에 대하여 다음의 식(11)이 성립한다고 가정하였다.

$$F - f = c F_m \tag{11}$$

즉, 충격체 끝단부의 충격접촉하중, F 와 마찰력, f 는 센서로부터 측정된 하중, F_m 과 시간에 따른 형상은 동일하며 그 크기에 있어서만 차이가 존재한다고 가정하였다.

식(11)을 식(10)에 대입하면 상수 c 는 다음의 식(12)와 같이 되고 이 값은 실제 충격시험을 수행하여 실험적으로 구해진다.

$$c = \frac{m(v_r - v_i)}{\int F_m dt} \tag{12}$$

본 시험기의 경우에 동(copper)으로 코팅된 glass/epoxy fabric 복합적층판 시편에 대하여 대표적으로 충격시험을 수행하였는데, 각 낙하높이별로 세 번씩 시험하여 평균적으로 구해진 c 의 크기를 Table 1에서 보여준다. 이 결과에서 보정계수는 낙하높이에 관계없이 약 1.1016을 식(11)에 대입하면 다음의 식(13)이 구해진다.

$$\frac{F}{F_m} = 1.1016 + \frac{f}{F_m} \tag{13}$$

이와 같이 실제 충격시험을 수행하여 충격량-운동량 보존의 법칙으로부터 구한 식(13)과 충격체내의 센서 상하부의 질량관계로부터 구한 식(9)를 연립하여 풀면 측정된 하중으로부터 실제 충격접촉하중과 마찰력이 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{F}{F_m} = 1.1112 \tag{14}$$

$$\frac{f}{F_m} = 0.0096 \tag{15}$$

이상의 결과로부터 본 시험기의 경우에 실제 충격 접촉하중이력은 센서로부터 측정되는 하중이력 보다 약 11.2% 더 큰 값을 알 수 있다. 또한 충격접촉과정 중에 충격체와 유도봉 사이에서 발생하는 마찰력은 센서로부터 측정되는 하중이력의 약

0.96%로서 실제 충격접촉하중이력의 크기에 비하여 매우 작은 값을 알 수 있다. 또한 센서로부터 측정된 충격하중이력을 보정하기 위하여 마찰력을 고려하지 않고 실험데이터에 충격량-운동량 보존의 법칙을 적용하여 실험적으로 구한 값(1.1016)이나, 충격체내의 센서 상하부에 대한 자유물체도로부터 마찰력을 고려하지 않고 이론적으로 구한 값(1.1123)이 마찰력을 고려하여 이상의 과정을 거쳐 구한 값(1.1112)과 실제적으로 큰 차이(1.0% 이내)가 없음을 알 수 있다.

따라서 본 시험기의 경우에는 마찰력을 고려하지 않고 실험데이터에 충격량-운동량 보존의 법칙을 적용하여 하중이력에 대한 보정계수를 실험적으로 평가하거나 충격체에 대한 자유물체도로부터 이론적으로 보정계수를 평가하는 방법이 큰 오차를 갖지 않으므로 실용적인 측면에서 모두 가능하다고 하겠다. 또한 식(8)과 식(11)을 비교하여 고찰하면 마찰력을 고려하지 않고 식(8)에 의하여 이론적으로 보정계수를 계산하는 것이 식(11)에 의하여 실험데이터로부터 구하는 것보다 더욱 정확한 결과를 제공하는 것을 알 수 있다.

4. 시편의 고정지지 경계조건에 대한 고찰

4.1 볼트를 이용한 고정방법과 거동해석

일반적으로 고정지지 경계조건을 갖는 시편에 대한 충격시험시에 시편을 고정하기 위한 방법으로 볼트를 이용한 방법이 많이 사용되었다.⁽¹³⁾ 따라서 본 연구에서도 고정지지 경계조건을 갖는 시편에 대한 충격시험을 위하여 먼저 볼트를 이용하여 시편을 고정한 후 충격시험을 수행하고 실험결과에 대하여 유한요소해석을 수행한 결과와 비교하였다. 본 연구에서 사용한 복합적층판 시편은 (주)한국카아본 제품으로 모델번호 CU-125인 graphite/epoxy 프리프레그를 [0/90]_{4s} 적층순서로 적층하여 성형 가공하였다. 적층판의 각 층에 해당하는 한 층의 물성치와 충격체의 물성치 및 기하학적 특성을 Table 2에서 보여준다.

Fig. 10은 시편 및 시편고정장치의 형상과 시편의 상하 표면에 스트레인게이지가 부착된 위치, 그리고 시편 고정장치와 더불어 시편이 시험기의 프레임에 볼트를 이용하여 고정된 형태를 대략적으로 보여주고 있다. 본 연구에서는 충격시 발생하는 동정변형률을 측정하기 위하여 KYOWA 모델 KFG-

Table 2 Material properties of graphite/epoxy lamina and impactor

-Lamina	
Stiffness	$E_1=135.4$ GPa, $E_2=E_3=9.6$ GPa $G_{12}=G_{13}=4.8$ GPa, $G_{23}=3.2$ GPa
Poisson's ratio	$\nu_{12}=0.31$, $\nu_{23}=0.52$
Thickness	$h=0.1125$ mm
Density	$\rho=1580.0$ kg/m ³
-Impactor	
Stiffness	$E=207.0$ GPa
Poisson's ratio	$\nu=0.3$
Local radius In contact	$r=6.0$ mm

2-120-C1-11 스트레인게이지를 사용하였으며, 게이지의 길이는 2 mm이다. 스트레인게이지로부터 나오는 신호를 처리하기 위하여 VISHAY 모델 2100 스트레인조정기 (strain conditioner)를 사용하였다.

이상의 방법으로 구한 실험결과는 이전의 연구⁽⁸⁾를 통하여 구성된 유한요소해석 프로그램을 이용하여 해석한 결과와 비교하였다. 복합적층판의 저속 충격거동에 대한 유한요소해석에서는 적층판에 대하여 고차 전단변형이론과 대처짐이론을 적용하여

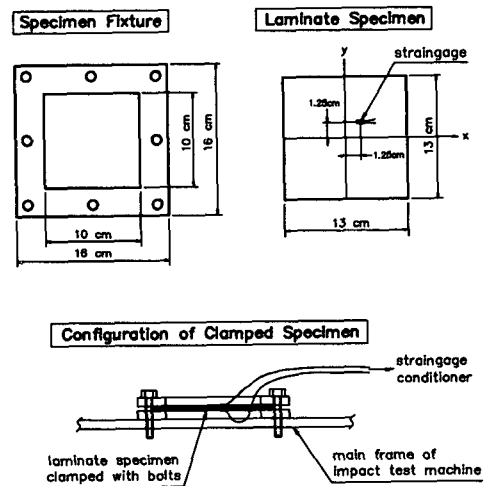


Fig. 10 Configuration of specimen fixture and clamped laminate specimen

비선형 해석을 수행하였고 대처집이론을 적용하지 않은 선형 해석도 수행하여 결과를 비교하였다. 충격체는 강체운동을 하는 것으로 가정하였으며, 접촉하중을 결정하기 위하여 수정된 Hertz의 접촉법칙을 적용하였다. 또한 충격시 발생하는 열 및 음향방출기에 의한 에너지 손실과 손상으로 인한 적층판의 강성저하를 무시하고 동적해석을 수행하였다.⁽⁶⁾

Fig. 11은 볼트를 이용하여 고정된 시편에 대한 충격시험을 통한 충격하중이력과 해석결과를 보여준다. 실험결과와 비선형 해석 결과간에 상당한 차이를 보이고 있는데, 이는 실험상의 시편의 경계조건이 이론적인 해석상의 적층판의 경계조건을 만족시키지 못하기 때문으로 생각된다. 즉, 비선형해석의 경우에는 박막효과(굽힘변형이 면내변형률에 미치는 효과)를 고려하기 때문에 고정지지 경계조건에 경우에 경계단에서의 면내변위의 고정이 중요한 의미를 지니게 되는데, 실제 실험상에서는 볼트를 이용하여 시편을 고정하기 때문에 시편과 시편고정장치 사이의 마찰력만으로 시편의 면내변위를 방지할 수 없기 때문이다.

본 연구에서는 충격하중을 받는 경우에 시편의 경계단에서 발생하는 면내변위의 크기를 파악하고자 다음의 정적해석을 수행하였다. 적층판의 경계단에서 회전방향의 변위는 고정하고, 면내방향의 변위는 자유롭게 하여 충격하중과 유사한 형태의 정적하중을 받는 경우에 대하여 경계단에서 발생하는 면내방향의 변위의 크기를 해석하였다.

Fig. 12는 충격하중과 유사한 형태의 정적하중에 의한 적층판의 최대처짐과 경계단에서의 면내변위를 해석한 결과이다. 본 연구의 충격조건에 의한 적층판의 최대처짐은 적층판 두께의 1.5~2.0배이므로 경계단에서 발생하는 면내변위는 대략적으로 0.1 mm 이내인 것으로 해석되었다. 즉, 볼트를 이용하여 시편을 고정하는 경우에 시편과 시편고정장치 사이에서 작용하는 마찰력만으로 경계단에서 발생하는 약 0.1 mm 정도의 미세한 미끄러짐을 억제하기는 어려운 것으로 생각된다. 따라서 볼트를 이용하여 시편을 고정하는 경우에, 실험결과를 해석결과와 비교하기 위해서는 적층판의 경계조건을 경계단에서 미끄러짐이 가능한 조건으로 하고 비선형 해석을 수행한 결과와 비교하는 것이, 완전 고정지지 경계조건으로 비선형해석을 수행한 결과와 비교하는 것보다 더 타당한 의미를 지니는 것으로 생각

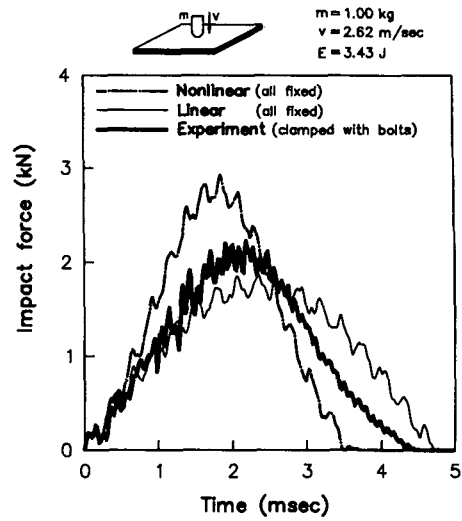


Fig. 11 Analytical and experimental impact force histories by fixed boundary condition.

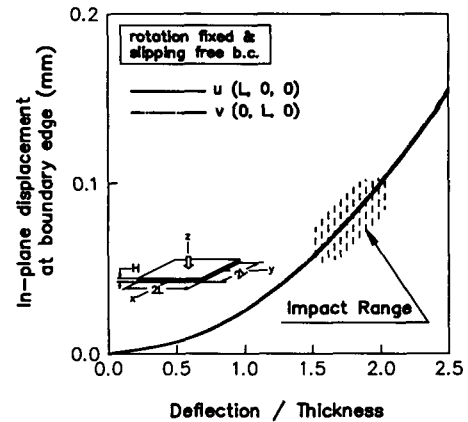


Fig. 12 Numerical in-plane displacements at boundary edges of the laminate specimen by the nonlinear static analysis

된다.

Fig. 13은 시편의 경계단에서 미끄러짐이 가능한 경계조건에 따른 충격하중이력에 대한 해석결과와 볼트를 이용한 실험결과를 비교한 것이다. Fig. 13의 결과와 Fig. 11의 결과에서 실험결과는 동일한 것이고 해석결과는 적층판의 경계조건만을 변경한 결과이다. Fig. 11과 13의 두 결과에서 선형 해석결과는 경계조건의 변경에 관계없이 동일한 결과를 나타내지만, 비선형 해석결과는 경계조건의 변경에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 즉, 대처집

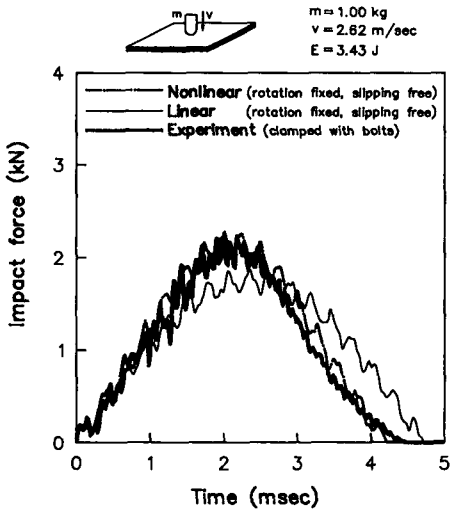


Fig. 13 Analytical and experimental impact force histories in bolt clamped specimen

효과를 고려함에 있어서 경계단의 미끄러짐을 고정하는 경우와 그렇지 않은 경우에 있어서 결과에 큰 차이가 나타나고 있다. 경계단에서의 미끄러짐을 고정하는 경우에는 비선형 해석의 결과와 선형 해석의 결과에 있어서 상대적으로 매우 큰 차이를 보이지만 미끄러짐을 고정하지 않는 경우에는 상대적으로 작은 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 13의 결과를 살펴보면 Fig. 11의 결과에 비하여 전체적으로 실험결과와 비선형 해석결과가 잘 일치하고 있다. 따라서 볼트를 이용하여 시편을 고정하는 경우에 시편고정장치와 시편 사이에서 발생하는 마찰력이 경계단에서의 미끄러짐을 억제하는데 큰 기여를 하지 못하고 경계단에서 미끄러짐이 발생하는 것으로 생각되며, 따라서 이 경우 적층판의 경계조건을 경계단에서 미끄러짐이 가능한 조건으로 하고 비선형해석을 수행한 결과와 실험결과를 비교하는 것이 더욱 타당한 의미가 있다고 보여진다.

Fig. 14는 볼트를 이용하여 고정한 시편에 대한 동적 변형률이력을 보여준다. 먼저 해석결과를 살펴보면 선형 해석에 의한 결과는 적층판 상하에서의 변형률이 대칭을 이루고 있으나 비선형 해석에 의한 결과는 약간의 비대칭을 보이고 있다. 즉, 대칭효과로 인하여 중립면에서 인장방향의 면내변형률이 발생하고 선형 해석에 비하여 처짐이 작게 발생하기 때문에 이러한 비대칭 결과가 나타나게 된다. 또한 실험결과에 있어서도 비선형 해석의 결

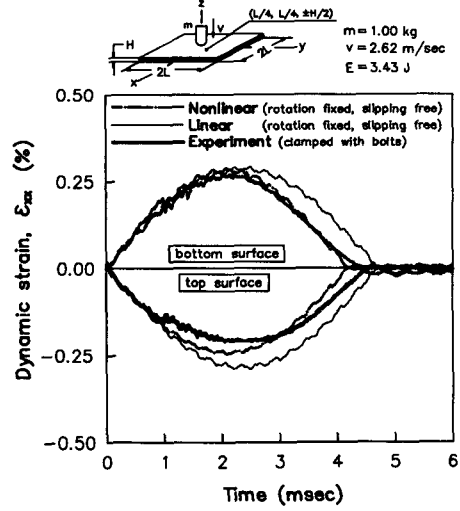


Fig. 14 Analytical and experimental dynamic strain histories in bolt clamped specimen

과와 유사한 비대칭성이 나타나고 있으며, 전체적으로 선형 해석결과에 비하여 비선형 해석결과와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

4.2 접착제를 사용한 고정방법과 거동해석

앞 절의 결과로부터 볼트를 이용하여 시편을 고정하는 경우에 시편의 경계단에서 미끄러짐이 발생하고 있다고 추정된다. 따라서 본 연구에서는 접착제를 사용하여 시편을 시편고정장치에 접촉고정함으로써 시편의 미끄러짐을 억제할 수 있도록 하였다. 사용된 접착제는 CIBA-GEIGY 모델 Araldite Standard이다. 이 접착제를 사용하는 경우에 열을 가함으로써 성형 접착시간을 단축할 수 있으나, 시편과 시편고정장치와의 사이에서 발생하는 열잔류응력의 발생을 방지하기 위하여 상온에서 장시간(약 72시간 이상)의 성형과정을 거쳐 접착하였다.

Fig. 15는 접착제를 사용하여 접촉고정한 시편에 대한 충격시험을 통한 충격하중이력과 해석결과를 보여준다. 앞의 Fig. 11의 경우와는 충격조건이 약간 다르지만 Fig. 11의 결과와 비교할 때 실험결과가 비선형 해석결과에 더욱 접근하고 있음을 알 수 있다. 즉 시편의 고정을 위하여 접착제를 사용하는 경우가 볼트를 이용하는 경우보다 경계단에서의 면내변위를 더욱 확실하게 고정하는 효과가 있다고 보여진다. 그러나 이 결과에서도 실험결과와 비선형 해석결과 사이에 차이가 나타나는 것은 접착제

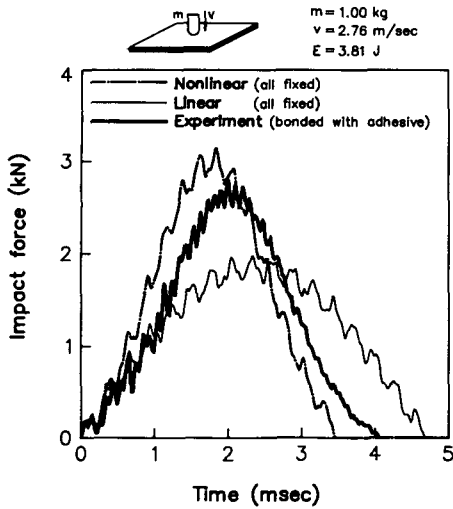


Fig. 15 Analytical and experimental impact force histories in adhesive bonded specimen

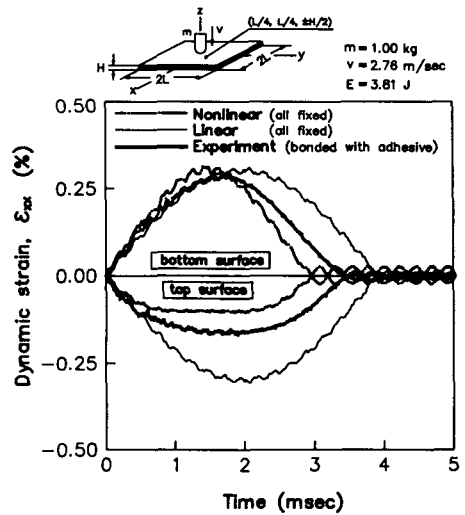


Fig. 16 Analytical and experimental dynamic strain histories in adhesive bonded specimen

를 사용하여 고정된 시편의 경우일지라도 시편의 경계단에서 완전하게 면내변위를 방지하지는 못하기 때문이라고 생각된다. 즉, 시편과의 접착제층에서 전단변형이 발생하는 것으로 생각된다. 그럼에도 불구하고 이 결과로부터 전체적으로 실험결과가 비선형 해석결과와 더욱 잘 일치하며, 선형해석에 의한 해석결과는 실험결과에 비하여 충격하중이력을 상당히 과소평가하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 16은 접착제를 사용하여 고정된 시편에 대한 동적 변형률이력을 보여준다. 먼저 해석결과를 살펴보면 선형해석에 의한 결과는 Fig. 14의 선형 해석결과와 마찬가지로 적층판 상하에서의 변형률이 대칭을 이루고 있으나, 비선형 해석에 의한 결과는 상당한 비대칭을 보이고 있다. 이러한 비대칭 정도는 Fig. 14의 비선형 해석결과와 비교할 때 더욱 증가하였음을 알 수 있다. 또한 실험결과에 있어서도 비선형 해석의 결과보다는 작은 정도이지만 비대칭성이 크게 나타나고 있으며, 이것은 Fig. 14의 실험결과와 비교할 때 비대칭 정도가 더욱 증가한 결과임을 확인할 수 있다.

이상의 두 결과로부터 충격시 발생하는 충격하중 및 응력상태에 대하여 정확한 해석을 수행하고자 하는 경우에는 대치점효과를 고려하여 비선형해석을 수행하여야 하며, 충격시험시 적층판 시편에 고정지지 경계조건을 부여하기 위해서는 볼트를 이용한 고정방법보다는 접착제를 이용한 고정방법이 더

욱 확실한 고정효과를 줄 수 있음을 알 수 있다. 그러나 본 연구의 결과에서는 접착제를 이용한 경우에도 실제적으로 완전한 고정지지 경계조건을 만족하지는 못하고 있음을 알 수 있었다. 또한 만일 시험의 목정상 볼트를 이용하여야만 하는 경우에는 이에 대한 해석에 있어서도 적층판의 경계조건을 변경(회전방향의 변위 고정, 면내방향의 변위 자유)하여 비선형해석을 수행하여야만 실험조건과 보다 유사한 해석조건이 되어 타당한 해석결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 즉, 볼트를 이용하여 시편을 고정된 실험결과를 완전한 고정지지 경계조건을 부여한 비선형 해석결과와 비교하는 경우에 그 오차가 매우 크게 나타난다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

중량낙하식 저속 충격시험기를 제작하고 충격하중이력 및 충격체의 충격속도, 반발속도를 측정하였으며, 측정된 데이터에 대하여 마찰력을 고려하여 보정하였다. 또한 시편에 고정지지 경계조건을 부여하기 위한 두 시편고정방법에 따른 충격시험을 수행하고 실험적으로 구한 충격하중이력 및 동적변형률에 대하여 해석결과와 비교 검토하였다. 이상의 연구과정에서 다음의 사실을 알 수 있었다.

(1) 중량낙하식 충격시험기에 있어서 충격체의 충격속도 및 반발속도를 정확히 평가하기 위해서는

충격체와 유도봉 사이의 마찰력을 고려하여 속도측정용 센서의 위치에 따른 측정값의 오차를 보정하여야 한다.

(2) 정확한 충격하중이력의 평가를 위해서는 하중변환기 센서나 로드셀의 조립위치에 따른 오차를 보정하여야 하며, 본 연구에서는 충격체의 센서 상하부의 질량관계로부터 하중이력의 보정계수를 간단히 계산하는 방법을 개발하였다. 이 때 충격체와 유도봉 사이의 마찰력을 고려한 보정방법도 개발하였다.

(3) 충격시험시 적층판 시편에 고정지지 경계조건을 부여하기 위하여 볼트를 이용하는 방법과 점착제를 사용하는 고정방법에 대하여 실험결과와 해석결과를 비교하였다. 결과적으로 점착제를 사용한 고정방법이 더욱 확실한 고정효과를 보였다. 만일 볼트를 이용하는 경우에 비선형 해석결과와 비교하기 위해서는 경계단에서 미끄러짐이 가능한 경계조건으로 해석을 수행하여야 실제 실험조건과 유사한 해석조건이 되어 보다 타당한 해석결과를 얻을 수 있다.

후 기

본 연구는 1992년도 국방과학연구소의 장기기초연구비 과제번호 ADD-90-5-2의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Abrate, S., 1991, "Impact on Laminated Composite Materials," *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 44, pp. 155~190.
- (2) Tan, T. M. and Sun, C. T., 1985, "Use of Statical Indentation Laws in the Impact Analysis of Laminated Composite Plates," *Trans. of ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 52, pp. 6~12.
- (3) Sun, C. T. and Chen, J. K., 1985, "On the Impact of Initially Stressed Composite Laminates," *Journal of Composite Materials*, Vol. 19, pp. 490~504.
- (4) Wu, H. T. and Springer, G. S., 1988, "Impact Induced Strains, and Delamination in Composite Plates," *Journal of Composite Materials*, Vol. 22, pp. 533~560.
- (5) 이영신, 박 응, 1990, "고차 전단변형이론에 의한 복합재료적층판의 저속충격 응답," 대한기계학회논문집, 제14권, 제6호, pp. 1365~1381.
- (6) 고종인, 홍창선, 이 인, 1991, "저속충격에 의한 복합적층판의 손상해석," 한국항공우주학회지, 제19권, 제1호, pp. 33~42.
- (7) 최익현, 홍창선, 이 인, 1991, "복합적층판의 저속충격거동에 대한 비선형 해석," 대한기계학회논문집, 제15권, 제3호, pp. 757~770.
- (8) 최익현, 홍창선, 1992, "대처짐과 고차 전단변형을 고려한 복합적층판의 저속충격거동 해석," 한국복합재료학회 추계학술발표회초록집, pp. 75~80.
- (9) 홍창선, 최익현 외 5인, 1992, "항공기 복합재료구조의 충격손상에 관한 연구(I)," 과학기술처 특정연구과제 보고서, pp. 17~31.
- (10) Tan, T. M. and Sun, C. T., 1982, "Wave Propagation in Graphite/Epoxy Laminates Due to Impact," *NASA CR 168057*, pp. 80~93.
- (11) Sjoblom, P. O., Hartness, J. T. and Cordell, T. M., 1988, "On Low-Velocity Impact Testing of Composite Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 22, pp. 30~52.
- (12) Lee, S. M. and Zahuta, P., 1991, "Instrumented Impact and Static Indentation of Composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 25, pp. 204~222.
- (13) Choi, H. Y. and Chang, F. K., 1992, "A Model for Predicting Damage in Graphite/Epoxy Laminated Composites Resulting from Low-Velocity Point Impact," *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, pp. 2134~2169.
- (14) *Instruction Manual* : Force Transducers Types 8200 and 8201, Bruel & Kjaer, pp. 4.