

전자제품의 충격 설계

정완진 · 부성운 · 전삼표 · 김동철

Impact Analysis of Eletronic Products

Wan-Jin Chung · Sung-Woon Boo · Sam-Pyo Chun · Dong-Chul Kim



- 정완진 (삼성종합기술원)
- 1960년생
- 소성역학 및 가공을 전공하였으며, 비선형구조해석, 특히 박판급속성형 및 충격해석에 관심을 가지고 있다.



- 부성운 (삼성종합기술원)
- 1962년생
- 구조해석을 전공하고 있으며, 전자제품의 충격해석에 관심을 가지고 있다.



- 전삼표 (삼성전자)
- 1958년생
- 동역학 및 제어를 전공하였으며, 생체역학 동역학 및 최적설계, 충격해석 등에 관심을 가지고 있다.



- 김동철 (삼성전자)
- 1967년생
- 구조해석을 전공하였으며, 접촉해석 및 비선형구조해석에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

현재 전자제품이 생산된 후 사용자에게 전달되기까지 유통단계에서 입는 손상을 방지하기 위하여 포장을 실시하고 있다. 이러한 손상을 사전에 평가예방하기 위하여 각 제품마다 생산자 또는 판매자에 의해서 포장 시험기준이 부과되고 있다.⁽¹⁾ 포장설계에는 보통 ASTM에 따른 5단계 포장설계법⁽²⁾이 사용되는데 이 방법에 이하면 먼저 충격시험에 의한 제품의 허용충격치를 산출하고 이 값에 의한 포장설계를 하도록 되어 있다. 이러한 시험을 통과하여야 출고가 가능하며, 이러한 시험은 제품개발과정에서 남기지연을 발생시키는 주 요인중의 한 가지로 등장하고

있다. 현재 가장 널리 쓰이고 있는 5단계 완충설계기법은 다음과 같다.

- 1단계 유통환경파악 : 유통시 예상되는 환경규정
- 2단계 제품 물리적 파손성 결정 : 충격시험을 실시하여 제품의 충격강도평가
- 3단계 완충재료 평가 및 선택 : 포장재에 충격 및 진동에 대한 특성평가
- 4단계 포장설계 및 시작품제작 : 제품의 예상낙하높이 허용충격치, 중량, 완충특성곡선에 따라 포장설계 및 시작품 제작
- 5단계 시작품 평가 : 낙하시험 실시, 포장 상태에서의 충격강도 평가

먼저 포장제품의 충격방지설계를 위해서는 허용 충격치가 설정되어야 하는데 이를 위해

서는 금형제작이 끝난 후 시제품에 의해서 충격시험이 이루어지게 된다. 따라서 시간상의 제약으로 충격시험을 실시하기 전에 포장설계를 하는 경우가 대부분이므로 적정 포장설계가 이루어지지 않고 있다. 또한 제품허용충격치가 낮은 경우 금형을 수정하여야 하며 이는 금형수명단축 및 납기 지연의 원인이 된다. 그러므로 위의 2단계에서 충격시험을 시뮬레이션하여 제품의 충격허용치를 산출하게 되면, 이 같은 손실을 대폭 줄일 수 있게 된다. 또한 4단계에서 수행되는 포장설계는 단순한 형상의 포장재 시험에 의한 완충재 특성곡선에 의하여 개략적인 접촉면적이나 포장재 두께만 제공하는 정도이고 나머지는 제품의 형상에 따라 설계자의 경험에 의존하여 처리하고 있다. 따라서 실제제품의 복잡한 형상을 고려하지 못하고 5단계의 낙하시험에서의 제품과 포장재의 상호작용에 의한 실제적인 상황을 고려하지 못하고 있어 오차를 일으키게 된다. 제품과 포장재 그리고 포장박스를 함께 고려하여 낙하시험을 효과적으로 시뮬레이션하게 되면 제품의 내충격설계 및 포장재설계를 종합적으로 실현할 수 있게 되어 많은 시행착오를 줄일 수 있게 된다.

이러한 충격예방 방지설계는 저치형 제품에 대하여 유통과정에서의 파손을 방지하는 것이 목적이었으나 최근에는 고가 휴대용 전자제품의 급격한 보급에 따라 사용중에 떨어질 때의 손상에 대한 대책도 요구되고 있다. 이러한 상황은 시작품의 실험에 의존할 수밖에 없고 축적된 경험지식의 부재로 시뮬레이션의 필요성은 더욱 크다고 할 수 있다.

최근에 컴퓨터의 급속한 성능향상과 충격해석기술의 발달에 따라 이러한 시뮬레이션에 의한 설계적용 가능성은 매우 높아졌다. 충격해석기술을 제품설계 및 포장재 설계에 적용함으로써 납기단축 및 재료절감 그리고 최근 대두되고 있는 환경문제에 따른 대체포장재 사용시 포장설계기법 개발에 기여할 수

있을 것으로 예측된다. 삼성종합기술원과 삼성전자는 전자제품의 낙하충격해석 기술에 대한 연구⁽³⁻⁵⁾를 지속적으로 수행하여 왔다. 다음에서 이러한 해석기법의 전자제품에 대한 적용현황 및 문제점에 대하여 기술하였다.

2. 현재 적용되고 있는 해석 방법

현재까지 전자제품의 충격해석이 적용되고 있는 사례는 대체로 다음 세 가지로 분류할 수 있다.

- (1) 제품 충격시험 해석에 의한 충격허용치 산출
- (2) 포장된 제품의 낙하해석에 의한 제품 및 포장장재 설계 평가
- (3) 휴대용 전자제품의 낙하시 충격해석에 의한 파손 평가

충격해석에는 동적천이해석(dynamic transient analysis)이 사용되는데 시작적분법의 종류에 따라 내연적(implicit) 시간적분법과 외연적(explicit) 시간적분법이 있다.⁽⁶⁾ 일반적으로 외연적 시간적분법이 접촉처리가 안정적이고 짧은 시간 동안의 해석에는 해석시간이 적당하고 비선형재료의 처리가 쉬워 충격해석에 널리 쓰인다. (1)~(3)의 해석에 모두 외연적 시간적분법에 의한 해석이 무난히 적용될 수 있다고 본다. 내연적 시간적분법에 의한 해석은 (1)의 경우는 경제조건이 해석시간 동안 잘 정의되어 있어 해석에 문제가 없으나 (2), (3)의 경우는 접촉처리 및 비선형재료의 처리에 어려움이 많고 해석시간이 많이 걸려 적용이 어렵다.

3. 충격시험해석에 의한 충격 허용치 산출

실제 충격시험에서는 그림 1과 같은 제품 파손한계 곡선을 구하게 된다. 속도변화는 가속도와 시간의 곱으로 정의되는데 제품에 포장을 가하지 않고 직접낙하할 경우처럼 충

격의 지속시간이 짧은 경우에는 제품의 파손은 이 속도변화량으로 규정된다. 유통시 취급높이가 한계속도변화 좌측에 있다면 포장 필요없게 된다. 휴대용 전자제품의 경우는 이 조건을 만족해야 한다.

그러나 대부분의 제품은 포장이 필요하고 이 때에는 제품이 손상되지 않고 견디는 최대 가속도를 구해야 하고 이 값이 포장설계시 이용된다. 따라서 그림 1에서 빗금친 영역에서는 제품이 파손되게 된다.

한계충격곡선은 충격시험기를 이용하여 구할 수 있는데 한계속도변화는 낙하높이에 따라서 속도 변화값이 비례하여 변화하는 반사인 충격파를 이용하여 구하고, 임계가속도는 같은 속도변화에서 제품이 받는 충격이 가장 큰 사다리꼴 충격파를 이용하여 구한다. 충격시험은 그림 2와 같이 제품을 올려 놓을 수 있는 테이블과 충격파의 형태 및 크기를 조절할 수 있는 프로그래머, 그리고 테이블을 상하로 이동시키는 호이스트 등으로 구성되어 있다. 시험은 ASTM D3332에 의하여 실시되는데 그 방법은 다음과 같다. 프로그래머의 실린더 압력을 낮게 설정하여 가속도가 낮은 반사인파의 충격이 발생되도록 한 후 제품을 낙하시킨다. 제품에 이상이 없을 경우에는 프로그래머의 압력을 높여 가속도를 증가시키면서 실험을 계속한다. 제품에 이상이 발생하면 이 때의 속도변화를 한계속도변화로 결정한다. 새로운 제품을 테이블에 고정시키고 앞서 구한 한계속도변화보다 더 큰 속도변화를 갖는 사다리꼴과 충격이 가해지도록 하고 낙하시킨다. 제품이 파손될 때까지 시험을 반복하여 임계가속도를 결정한다. 위의 결과로부터 파손한계곡선을 결정한다.

1992년 삼성전자에서는 충격시험을 범용구조해석 S/W인 NASTRAN을 이용한 칼라텔레비전의 충격시험을 시뮬레이션하여 한계충격곡선을 산출하였다.

해석에는 MSC/NASTRAN의 선형천이해

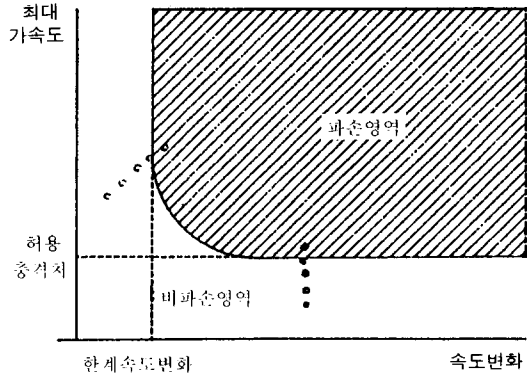


그림 1 파손한계곡선

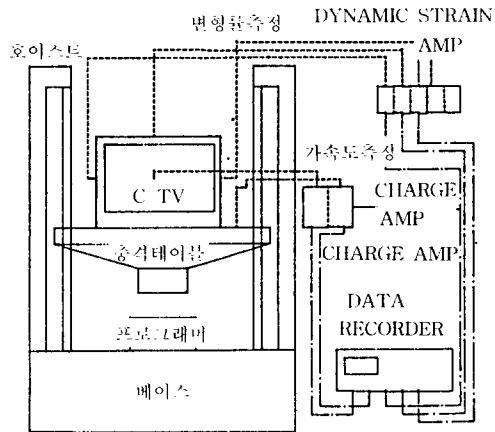


그림 2 충격시험기 구조 및 측정장치

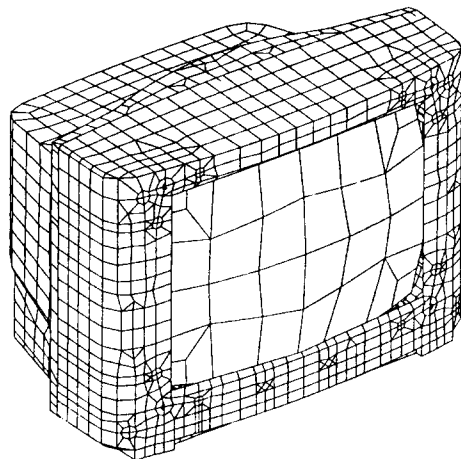


그림 3 칼라텔레비전 세트의 유한요소 모델

석(linear transient analysis)방법⁽⁷⁾을 이용하고 시간적분시 테이블에서 측정된 가속도 형태로 제품이 테이블과 접촉하고 있는 부위에 가하였다.

어떤 구조물이 동적하중 및 충격하중을 받을 경우 변형률은 시간에 따라 변화하는데 높은 변형률 속도하에서는 탄성 에너지와의 전파효과가 커지므로 재질특성치를 변형률에 따라 다르게 해야 한다. 충격해석결과 제품 내에서 변형률속도가 0.2~0.7/sec 정도이므로 제품에 대해서는 변형률을 고려한 재료물성치를 사용하지 않았으며⁽⁸⁾ 파손이 발생하지 않는 대부분의 영역에서 변형량이 적어서 선형물성치를 사용하였다.

칼라텔레비전의 유한요소모델은 프론트 캐비닛, 백 캐비닛, PCB 및 CRT부분으로 나누어서 모델링하였다. 각 단품의 모델을 완성한 후 연결부를 모델링하여 결합하여 그림

3과 같은 전체 모델을 완성하였다.

단품의 모델링이 제대로 되어 있다라도 연결부의 모델링이 잘못 되면 제품전체의 강성이 달라져 해석결과에 영향을 미친다. 작성된 유한요소 모델에 대하여 모드해석을 하는 동시에 실험을 실시하여 고유치를 비교한 결과 결합된 모델에서 큰 오차 없이 일치하였

표 1 전체 모델 고유치(단위 : Hz)

MODE	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
해석	69	86	95	97	104	113
시험	65	88	96	105	113	119
오차(%)	6	2	1	8	8	5

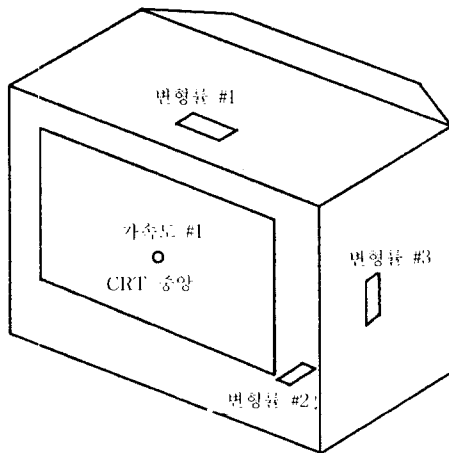


그림 4 변형률 및 가속도 측정위치

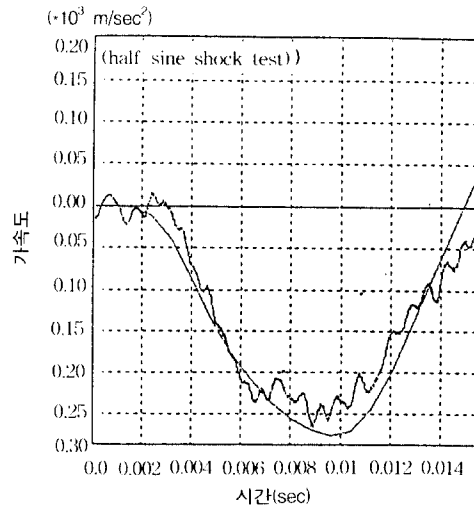


그림 5(a) 반사인과 충격시 CRT가속도변화

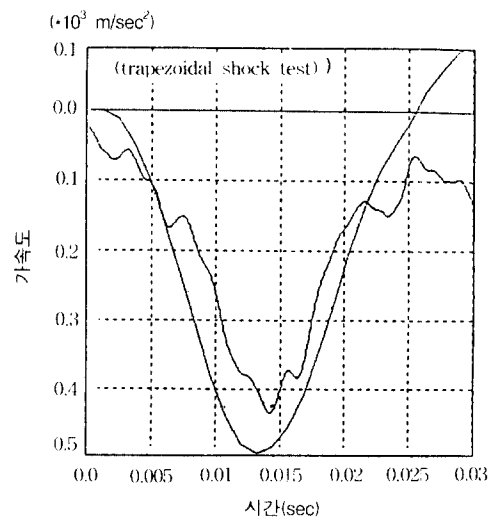


그림 5(b) 사다리꼴과 충격시 CRT가속도변화

다(표 1). 모델링시 연결부위에서 경계조건을 잘못 부여하면 상당히 다른 결과가 나올 수 있음을 유념해야 한다.

그림 4는 실험에서 가속도 및 변형률을 측정할 위치를 나타낸다. 해석결과와 시험결과를 비교하여 반사인과 충격 및 사다리꼴과

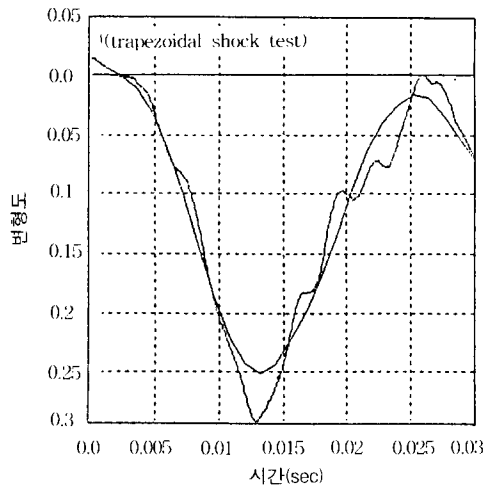


그림 6(a) 반사인과 충격시 케비넷 상단의 변형률

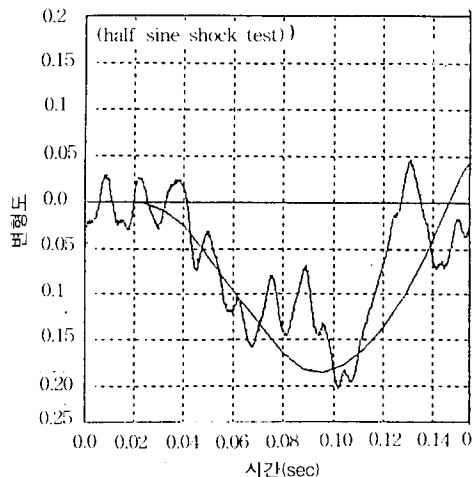


그림 6(b) 사다리꼴과 충격시 케비넷 상단의 변형률

충격시 CRT의 가속도 및 케비넷 상단 중앙부에서의 변형률이력을 나타내면 각각 그림 5, 그림 6과 같다. 각 그래프에서 심하게 변화하는 것이 시험결과이며 완만하게 변화하는 곡선이 해석결과를 나타낸다. 가속도 피크치와 지속시간이 모두 큰 오차 없이 정확한 결과를 보이고 있어 이 방법이 유효함을 알 수 있다.

각 하중충격 시험시 TV세트의 파손여부를 관찰하여 파손한계곡선을 작성하였다. 반사인과 충격과 및 사다리꼴 충격과에 의한 시험에서의 파손여부 관측 및 해석결과 항복응력을 초과하는 부분을 함께 도시하였다(그림 7, 그림 8). 이 때 항복여부 판정 기준은 플라스틱수지의 경우 인장강도와 굴곡강도가 다른 점을 감안하여 응력상태에 따라 적절한 기준을 사용하여야 한다.⁽⁹⁾

선형재료를 가정하였으므로 항복응력을 초과하는 부분이 발생한 후 응력값은 오차가

하중 조건	해석결과		시험 결과
1회 낙하 높이 -38			이상 없음
2회 낙하 높이 108			이상 없음
3회 낙하 높이 212			좌우측 RIB 휘어짐
4회 낙하 높이 240			좌우측 RIB 파손
	좌측 RIB	우측 RIB	

그림 7 반사인과 충격시 리브파손

하중 조건	해석결과		시험 결과
1회 22G			이상 없음
2회 26G			이상 없음
3회 30G			좌측 RIB 휘어짐
4회 35G			좌측 RIB 파손 우측 RIB 휘어짐
	좌측 RIB	우측 RIB	

그림 8 사다리꼴과 충격시 리브파손

있다. 국부적으로 항복이 발생하여도 탄성영역이 많이 남아 있으면 리브가 크게 변형을 일으키지는 않는다. 그러나 소성영역이 탄성

표 2 리브릿수변경에 의한 한계충격치의 향상

	변경내용	한계낙하 높이 (mm)	임계가속도 (G)
기존	1.8×2.0	108	26
Gase-1	2.5×2.5	150	30
Gase-2	3.0×3.0	180	35
Gase-3	가로리브추가	150	30

영역을 가로질러 완전히 분할하여 소성영역만으로 변형이 이루어지는 영역을 형성하면 변형이 크게 발생한다. 따라서 항복응력을 초과하는 요소가 리브를 분할하게 되면 파손이 발생하는 것으로 간주한다. 이러한 기준에 의하면 한계속도변화는 4.25 m/sec, 임계가속도는 26G가 되며 이는 충격시험결과와 거의 일치한다. 이러한 충격해석으로부터 한계충격치를 구할 수 있으며 취약부를 파악할 수 있다. 취약부를 파악하려면 구조변경설계를 하여 한계충격치를 크게 높일 수 있다. 표 2는 구조변경에 의한 한계충격치의 향상을 보여준다.

충격시험 해석에 의하면 한계충격치를 구하게 되면 포장재의 두께 및 접촉면적을 자

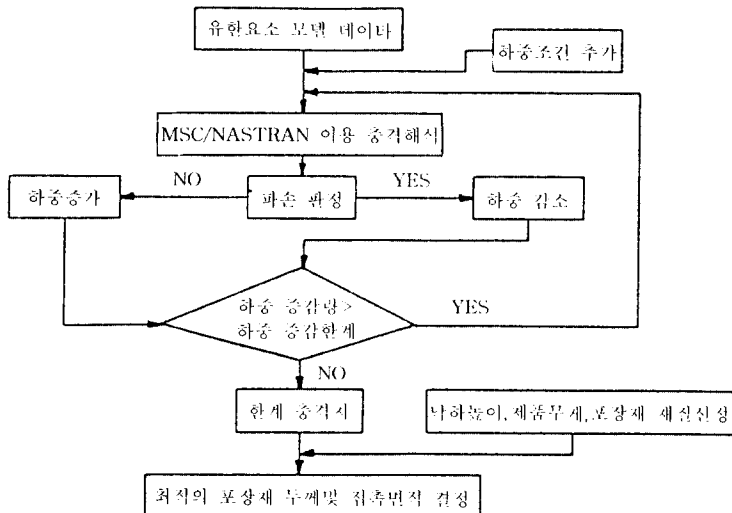


그림 9 충격시험 시뮬레이션에 의한 포장재설계과정

동적으로 계산할 수 있다. 이 과정을 그림 9에 나타내었다. 충격시험에 대하여 해석을 실시하여 금형 제작전에 제품구조변경 및 포장재 설계를 할 경우, 설계시간 및 설계비용의 상당한 절감을 기대할 수 있다.

4. 포장된 제품의 낙하해석에 의한 제품 및 포장재 설계 평가

3절의 충격시험의 해석은 제품의 충격강도를 평가하여 설계에 활용할 수 있으나 실제 낙하시험에서 발생하는 상황과는 다르므로 제품과 포장재의 상호작용 및 복잡한 포장재의 형상 등을 고려할 수 없어 한계가 있다. 또한 비선형 물성치와 접촉현상이 해석에서 고려되지 않았다. 포장된 제품의 낙하해석을 위해서 포장재의 비선형 물성과 접촉을 용이하게 고려할 수 있도록 외연적 시간분법을 사용하는 충격 전용해석 S/W인 LS-Dyna3d⁽¹⁰⁾를 사용하였다. 제품의 물성치는 선형으로 하였고 변형이 많이 일어나는 포장재의 비선형 물성치는 실험으로 구하여 사용하였다. 대상모델은 칼라텔레비전으로써 포장재는 발포 폴리스티렌을 사용하였고 종이 박스 안에 제품이 들어 있다.

포장재의 물성치는 정확한 해석결과를 얻기 위해서 매우 중요한 요소이다. 포움 형태의 포장재 물성치는 비선형성이 매우 강하며 그 모델링이 쉽지 않으며 특히 전자제품의 포장에 쓰이는 발포배율이 큰(보통 30배~60배) 완충용 포움에 대한 연구⁽¹¹⁻¹⁴⁾는 매우 부족한 실정이다. 포움의 재료모델링은 압축 실험 데이터뿐 아니라 정수압 실험 데이터도 요구하는 모델이 많다. 그러나 낙하충격시 대부분의 변형은 압축변형으로 일어난다는 점을 이용하면 압축 실험 데이터만으로도 충격해석 S/W에서 수치적으로 충분히 포움의 거동을 잘 묘사할 수 있다. 압축시험결과를 수행한 결과 다음과 같은 결과를 관측할 수 있었다.

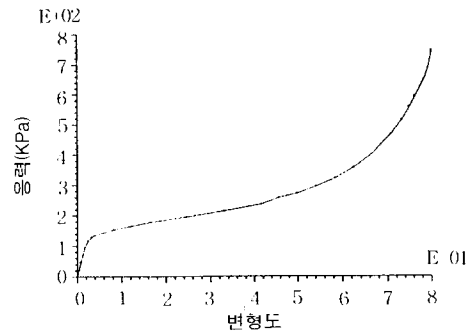


그림 10 포움의 응력-변형도 곡선

응력-변형도 곡선의 형상은 그림 10과 같이 초기에는 응력이 급격하게 증가하다가 응력이 완만하게 증가하여 평평한 부위가 상당한 영역 지속된다.

압축이 많이 진행되면 다시 응력이 급격하게 증가한다. 압축하중을 제거하면 응력-변형도 곡선을 따라 가지 않고 히스테리시스 크게 발생하며 영구변형을 남긴다. 또한 압축에 직각인 방향으로 거의 형상변화가 없어 포아송비가 거의 영임을 알 수 있었다. 실제 포움의 물성치는 변형속도, 밀도, 변형도, 온도의 함수로서 일관된 형태로 표현하기가 쉽지 않다.⁽¹¹⁾ 여기서는 발포 폴리스티렌의 경우 변형속도에 크게 영향을 받지 않는다는 연구결과⁽¹³⁾를 사용하고 온도가 일정하다고 하여 각 발포배율에 대하여 변형도의 함수로만 표현하여 보기로 한다. 실체는 변형속도 및 온도의 영향이 다소 있으며 앞으로 연구되어야 할 사항이다. 또한 실제 인장시의 거동은 압축거동과 차이가 있으며 정수압에 따라서도 실제 거동은 많은 영향을 받는다.

지금까지 실무에서는 낙하시의 포장재 특성을 포장재설계에 고려하기 위하여 낙하충격곡선을 포장재설계에 활용하여 왔다. 각 발포배율의 포움에 대하여 낙하높이, 두께 등에 대하여 낙하중량을 변경시켜 낙하중량에 발생하는 최대가속도를 기록하여 시험을 수행한다. 그림 11은 낙하횟수가 1회, 2회인

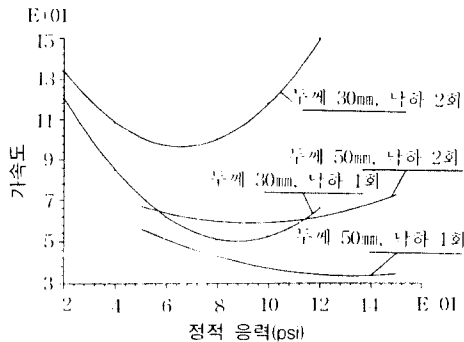


그림 11 포장재의 낙하횟수에 따른 완충특성곡선

경우에 대하여 구한 완충특성곡선을 보여준다. 여기서 정적응력은 낙하중량을 포음의 면적으로 나눈 것이고 가속도값은 이 때 발생하는 충격곡선에서 피크치를 나타낸다.

최근 포음의 응력-변형도 곡선에서 낙하충격시험을 수행하지 않고 낙하충격곡선을 구하기 위한 연구^(13,14)가 발표되었다. 이 연구에 의하면 낙하중량의 위치에너지가 모두 포음의 변형에너지로 전환되는 변형도에서 포음은 최대 압축되며 이 때 포음이 낙하중량에 가하는 힘이 최대가속도로 나타나게 된다. 이 때 포음이 낙하중량에 가하는 힘은 응력-변형도 곡선으로부터 구한 응력에 면적을 곱한 것이 된다. 이러한 방법으로 낙하충격곡선을 작성하면 실제 완충특성시험에서 구한 완충특성곡선과 매우 유사한 결과를 얻을 수 있다. 따라서 정적 압축시험에 의해 구한 응력-변형도 곡선을 이용할 경우 1차 낙하시에는 실험과 근접할 결과를 얻을 수 있다.

그러나 2차 이상 낙하시험을 요구할 경우 완충특성곡선이 1차 낙하시와 여러번 낙하시가 현저히 다르므로 오차가 발생한다(그림 11). 2회 이상 낙하시험을 수행할 경우 이에 해당하는 완충특성곡선과 같은 결과를 얻을 수 있는 응력-변형도 곡선을 사용하여야 정확한 낙하충격해석결과를 얻을 수 있다. 1차 낙하와 2회 이상 낙하의 경우에 모두 만족할

만한 결과를 주기 위해서는 응력변형도곡선은 1차 낙하시 및 그후에 제하중시에 거동이 정확하게 묘사되어야 한다. 그러나 아직까지 제하중 후의 정확한 잔류변형 및 응력을 구하기 위한 재료모델링은 곤란하다. 따라서 실용적인 방법으로 다음과 같은 2차 이상의 낙하충격해석을 위한 가정을 사용하였다.

- (1) 시험에서 구한 완충 특성곡선을 유효하게 사용하는 부분을 선정한다. 즉 정적응력의 최소값과 최대값을 설정한다.
- (2) 정적응력의 최소값에서 낙하중량이 가지고 있는 위치에너지와 등가의 변형에너지를 가지면서 최대가속도 값을 내기 위한 포음의 곡선을 구한다. 이 때 여러가지 곡선이 가능하나 압축응력곡선을 변형하여 사용한다.
- (3) 곡선의 나머지 부분은 에너지등가에 의하여 완충특성곡선으로부터 쉽게 구할 수 있다.

이러한 방법을 통하여 구한 응력-변형도 곡선을 사용하여 포음전부가 동일한 진변형으로 받은 것으로 하여 해석을 수행한다.

다음의 칼라텔레비전해석결과는 1차 낙하에 대한 것이며 시험도 1차 낙하시 결과이다.

칼라텔레비전의 유한요소 모델링은 크게 제품, 포장재, 그리고 종이상자 등으로 나누어진다. 포장재는 상하좌우의 4개로 되어 있고 좌우대칭으로 되어 있다. 포장재의 강성이 제품의 강성보다 매우 작아 변형이 크므로 포장재의 유한요소크기를 제품보다 작게 하여 입방체 요소(solid element)로 만들었다. 제품과 포장재가 결합된 유한요소모델은 그림 12와 같다. 종이상자는 완충작용의 역할보다는 포장재가 미끌어져 빠져나가지 않고 계속 완충역할을 할 수 있도록 형태를 유지하는 역할을 하므로 포장재보다 요소크기를 크게 하여 셸요소(shell element)로 만들었다.

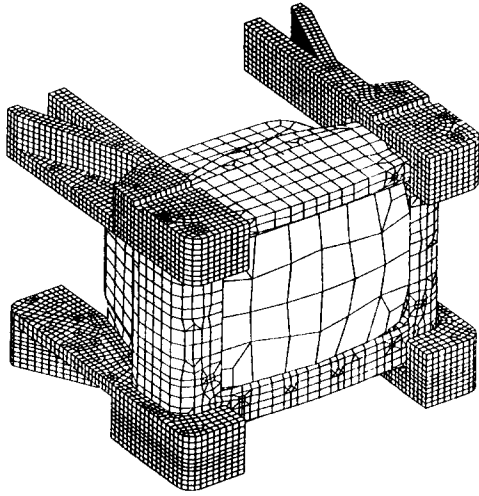


그림 12 포장재 및 제품의 유한요소 모델

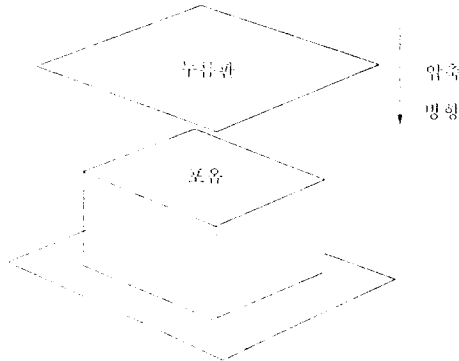


그림 13 포움의 압축시험 시뮬레이션

제품과 포움은 강성차이가 매우 크다. 따라서 통상적인 충격해석과 달리 정확한 해석 결과를 얻기 위하여 주의해야 할 사항이 있다. 첫째는 접촉조건을 처리하기 위한 방법의 선택이고 둘째는 hourglass 에너지모드 억제방법(hourglass control method)⁽¹⁵⁾의 선택이다.

그림 13은 8절점 입방체요소로 모델링된 간단한 직사각형 형상의 포움재료를 강도가 폼보다 매우 큰 강성을 가진 판을 이용하여 수치적으로 압축시험을 모사하는 수치실험을 보여준다. 표 3에 해석에 사용된 접촉처리방

표 3 포움의 압축시험해석상

CASE	접촉처리방법	Hourglass에너지 Control
I	Penalty	Viscous Control
II	Constraint	Viscous Control
III	Penalty	Stiffness Control
V	Constraint	Stiffness Control
VI	Penalty	Full Integration
VII	Constraint	Full Integration

법과 Hourglass에너지 모두억제방법(1점적분 사용시)의 쌍들을 나타내었다.

1점적분을 사용하였을 때 hourglass에너지 모드 억제방법으로 인위점성(artificial viscosity)에 의한 억제방법(경우 I, II)⁽¹⁵⁾은 모두 성공하지 못하는 해석시간이 비교적 긴 것 그리고 포움의 재료모델링과 관련이 있다고 판단된다. 인위강성(artificial stiffness)에 의한 방법⁽¹⁵⁾은 벌칙함수방법(penalty function method)⁽¹⁶⁾과 같이 사용하였을 때(경우 III) 어느 정도 만족할 만한 결과를 얻었다. 이 때 통상의 충격해석에서 사용하는 벌칙상수(penalty factor) 계산방법으로는 침투량이 과다하게 되므로 적절히 벌칙상수를 크게 보정하여 침투량을 줄이도록 한다. 지나치게 침투량을 크게 하면 hourglass에너지가 크게 증가하여 해가 신뢰성이 없어지거나 해가 발산할 수 있다. Constraint법⁽¹⁷⁾을 사용하였을 때(경우 IV)는 판의 강성이 어느 정도 값 이하에서는 해를 얻을 수가 있으나 판의 강성이 그 이상 커지면 이 때 계산되는 힘이 포움의 hourglass 에너지를 매우 크게하여 계산이 곤란하게 된다. 8절점적분을 사용하였을 때에는 두 방법(경우 V, VI) 모두 해를 얻는 데 문제가 없었다. 그러나 계산시간이 약 3.5배 정도 증가하여 전자제품의 낙하충격해석과 같이 포움요소수가 많은 경우는 곤란하게 된다. 이와 같은 결과로부터 1점 적분에 인위강성(artificial stiffness)에

의한 hourglass에너지모드 억제방법을 사용하고 벌칙함수법과 constraint법을 적절히 혼용하였다. 포움과 제품의 강성차이가 매우 크므로 해가 발산하지 않는 한 constraint법이 편리하다. 벌칙함수법은 모든 경우에 적용될 수 있으나 침투량을 줄이기 위해 벌칙함수를 조절해야 하는 어려움이 있다. Constraint법을 사용하는 경우 자유도를 소거하기 때문에 같은 자유도에 따른 구속조건을 줄 수 없다는 점을 유념해야 한다.

낙하충격시험은 면낙하, 능낙하, 각낙하 등으로 수행되는데 조사결과⁽¹⁾에 의하면 대부분의 파손이 면낙하에 의한 것으로 보고되고 있다. 낙하충격 시험을 시뮬레이션하기 위하여 포장세트가 충돌하는 바닥은 강체 벽(rigid wall)으로 모델링하여 절점이 강체 벽을 통과할 경우 경계조건을 부여하여 벽표면에 머물게 한다. 계산시간을 절약하기 위하여 그 해당높이에서 자유낙하였을 때의 속도를 제품에 초기속도로 부여하였다. 면낙하시 직접 충격을 흡수하는 포장재만 포함하여도 계산결과에 큰 영향을 미치지 않으므로 해당되는 포장재만 해석에 포함시켰다. 밀면낙하시험 및 해석을 수행하여 비교하였다. 그림 14는 밀면낙하시 CRT전면 중심에서의 가속도를 비교한 것이다. 그림 15는 캐비넷 외면 상단중앙에서의 변형을 이력을 비교한 것이다. 두 결과 모두 시간에 따른 변이 형태가 매우 유사하며 오차가 적음을 알 수 있다.

제품이 낙하하면 위치에너지가 운동에너지로 변환되고 충돌후 변형에너지로 바뀐다. 다시 튀어 오르게 되면 변형에너지의 일부는 운동에너지로 다시 바뀌고 나머지는 포장재에 잔류변형에너지로 남게 된다. 그림 16에서 이러한 에너지 변환과정을 알수 있으며 전체에너지는 중력에 의한 외부일에 의해 다소 증가하였다가 원래 값으로 돌아온다. 그림 17은 부위별 변형에너지를 나타내고 있다. 전체 변형에너지의 73%를 포장재가 차지하고 있음을 알 수 있으며 이 비율로 포장

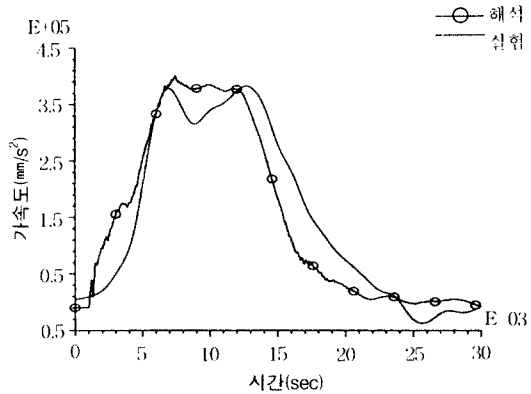


그림 14 밀면낙하시 CRT전면중심에서의 가속도 변화

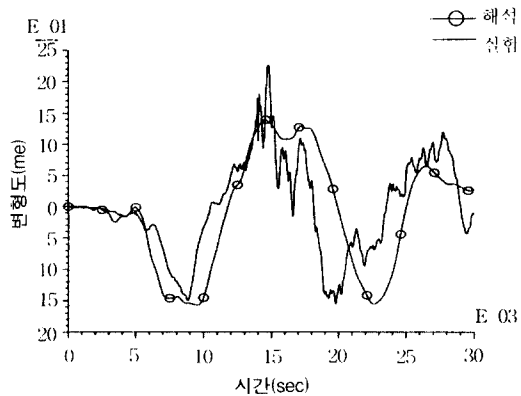


그림 15 밀면낙하시 캐비넷 상단에서의 변형률 변화

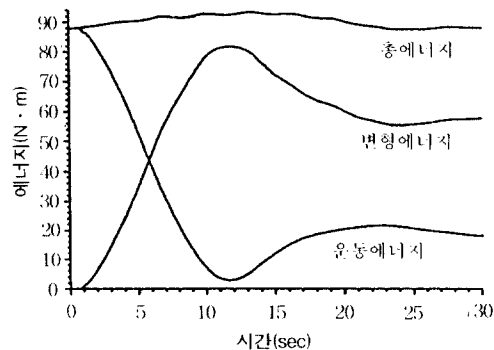


그림 16 밀면낙하시 에너지 변화

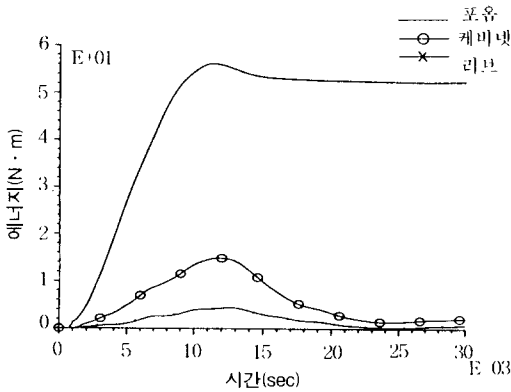


그림 17 부품별 변형에너지 변화

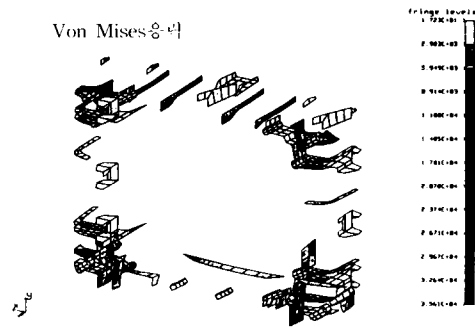


그림 18 밀면낙하시 리브에서의 응력분포(t=11msec)

설계의 효율성을 판단할 수 있다. 그림 18은 응력이 크게 걸리는 칼라텔레비전을 지지하고 있는 리브의 응력분포를 보인 것이다. 그림에서 응력이 크게 걸리는 부위는 CRT와 체결된 연결부위이다. 이 부분은 실제 낙하시험에서 파단이 잘 일어나는 부위로 경험적인 결과와 일치한다. 그림 19는 가장 변형이 심한 시점에서 포장재의 변형 및 응력을 보여주고 있으며 전면 캐비넷 하단과 만나는 부위 앞쪽에서 많은 변형이 일어나 충격을 가장 많이 흡수함을 알 수 있다. 해석시간은 요소총수 13,000개 모델의 경우 CRAY-YMP(1 CPU)에서 약 6시간 정도 소요되었다.

능낙하 및 각낙하에 대해서도 해석과 실험이 수행되었다. 능낙하시나 각낙하시는 전체 구조물이 회전하므로 직접 충격을 흡수하는 포장재도 결합성을 유지하기 위하여 해석에 포함하여야 한다. 이 때 결합성을 유지할 수 있는 강성을 가지는 간단한 구조요소 등으로 대체하여 계산시간을 줄이는 것이 효율적인 방법이 될 수 있다. 이 때에는 중력에 의한 위치에너지변화가 커지며 발생하는 가속도가 작아 해석시간이 매우 길어진다. 특히 각낙하의 경우는 해석시간이 크게 증가한다. 이 때 포장재의 변형상태는 면낙하시보다 더 복잡하여 압축인장 데이터만으로 재료의 거동

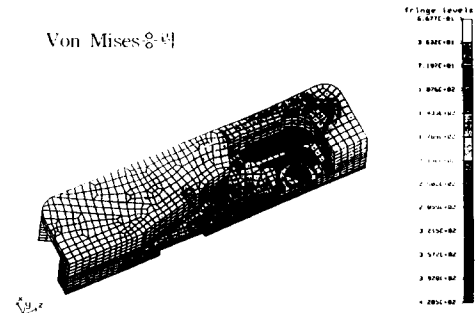


그림 19 밀면낙하시 포장재의 응력분포(t=11msec)

을 나타내기 힘들다고 판단된다. 해석결과는 면낙하시보다 정확도는 다소 떨어지지만 대체로 시험과 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 실제 낙하시험에서 능낙하나 각낙하는 포장재의 결합상태 등에만 영향을 받을 뿐 제품의 파손을 일으킬 가능성이 매우 적다.⁽¹⁾

따라서 실용적인 관점에서 볼 때 여러 방향의 면낙하해석을 수행하는 이 때의 파손을 예측하여 방지하는 것이 현 단계에서 추천할 만한 방법이라고 판단된다. 위의 결과로부터 포장된 상태에서의 전자제품의 낙하시험을 유한요소해석을 이용하여 유효하게 시뮬레이션할 수 있음을 보였다. 또한 해석상 주의할

사항에 대해 고찰해보았다.

5. 휴대용 전자제품의 낙하시 충격 해석에 의한 파손평가

휴대용 컴퓨터나 전화기 등 휴대용정보기기 보급이 확대되고 있으며 이러한 장비는 고가이고 저장하고 있는 정보가 손상을 입으면 매우 곤란하므로 내충격성확보가 중요한 문제로 대두되고 있다. 이 경우는 보편적인 충격해석기법을 사용하여 큰 어려움 없이 해석이 가능하다. 따라서 해석에 대한 사례도 많이 보고되고 있으며 삼성종합기술원에서도 1993년 펜컴퓨터에 대하여 낙하시의 충격해석을 실시한 바 있다.⁽⁵⁾ 이 때 제품이 지면에 충돌하기 직전의 형상에서 초기속도를 부여하여 해석을 시작한다. 지면은 강도가 큰 벽으로 처리한다. 전자제품의 낙하충격시 제품내부에서는 부품끼리 충돌현상이 일어나기 쉬우므로 접촉조건을 잘 선정해야 한다. 전자제품에서는 충격에 약한 전자부품이 많은데 그 중에서도 평판액정표시장치, 하드디스크 등은 매우 취약하여 가속도가 작게 발생하도록 주의하여야 한다. 이 때 제품구조 변경, 힘의 전달경로에 고무나 폴리머 등의 충격흡수능력이 큰 재료의 사용, 다른 부분과의 충돌회피 등을 통해 충격을 감소시킬 수 있다. 그러나 휴대성을 좋게 하면서 이러한 내충격성을 만족시키기는 쉬운 일이 아니며 아직 이러한 조건을 만족시키지 못하는 제품이 많다. 3절의 칼라텔레비전의 경우(표 2) 포장없이 떨어뜨렸을 때 10~18 cm에서 파손되는 것을 보면 사용높이(90~120 cm)에서 파손을 일으키지 않는 것이 매우 가혹한 조건임을 알 수 있다. 앞으로 고가의 휴대용 정보기기의 보급이 활발해지면 사용자의 요구에 따라 전자부품의 내충격성 향상 및 제품의 내충격성 개선이 이루어져 사용중에 떨어뜨리더라도 파손되지 않는 제품이 보편화될 것이다.

6. 전자제품 충격해석의 설계적용상 문제점

최근의 급속한 컴퓨터 계산속도의 향상으로 충격해석에 필요한 계산시간은 점차 문제가 되지 않고 있다. 그러나 아직 전자제품의 충격해석을 활용한 내충격설계는 보편화되지 못하고 있다. 그 이유는 여러 가지가 있겠으나 다음과 같은 문제점을 들 수 있을 것이다.

1) CAD데이터의 해석에의 활용의 어려움

현재 우리나라의 전자제품의 설계는 거의 모두 2차원 설계로 하고 있다. 따라서 충격해석을 위해서 유한요소모델을 해석전에 만들어야 하는데 제한된 시간내에 해석결과를 피드백하기가 어렵다. 이 점은 3차원설계가 점차 도입되고 있어 점차 해결되리라 보며 또한 해석모델을 빠른 시간내에 만들기 위한 기법의 개발이 이루어져야 할 것이다.

2) 포장재특성 연구의 부족

전자제품의 포장에 쓰이는 포장재는 그 종류는 폼, 종이, 에어쿠션 등 매우 다양하다. 가장 많이 쓰이는 폼의 경우도 재질이 여러 종류이고 발포배율(통상 30~60배)도 다양하며 변형특성이 심한 비선형성을 보인다. 따라서 정확한 해석을 위해서 재료의 모델링에 대한 연구가 필수적이다. 앞으로 환경문제에 대비한 대체포장재 개발이 활발해지고 있어 이러한 재질에 대한 연구도 요구된다.

3) 현단계에서는 충격해석결과로부터 설계

제시 단시간내에 설계 개선방안을 얻기 힘들므로 실제 설계시에는 간단한 해석방법이나 수식에 의한 설계방법, 또는 축적된 실험이나 해석결과로부터 설계방향을 제시하는 전문가시스템 등을 이용한 설계환경을 개발하여 활용하는 것도 바람직하다.

7. 맺음말

이상에서 전자제품의 충격해석기술의 적용

현황과 문제점에 대해서 살펴보았다. 현재 어느 정도 해석기술이 어느 정도의 정확성은 확보하였다고 보여지나 아직도 충격해석기술을 활용한 제품설계에의 적용은 시험적용의 단계에 머무르고 있어 본격적인 설계과정에서의 활용은 이루어지지 않고 있다. 앞으로 전자제품의 내충격 확보를 위한 충격해석기술로 관련분야에 대한 연구가 좀더 진전되어 신뢰성과 효율성이 제고되면 제품의 내충격 설계 및 포장재설계를 종합적으로 실현할 수 있게 되어 많은 시행착오를 줄일 수 있게 될 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) Baird, T. W., "State-of-the-art Protective Packaging with Plastic Foams Techniques, Applications, and Science," Lansmont Coporation.
- (2) Armstrong, W., 1987, "Cushioning," *Packaging's Encyclopedia*, pp. 135~137.
- (3) 삼성전자, 1992, "CTV 낙하충격해석."
- (4) 삼성종합기술원, 1993, "PenPC의 낙하충격해석."
- (5) 삼성전자, 삼성종합기술원, 1994, "포장재를 포함한 가전제품의 낙하충격해석."
- (6) Zhi-Hua Zhong, 1993, "Finite Element Procedure for Dynamic Analysis," *Oxford Press*.
- (7) MSC/NASTRAN Handbook for Dynamic Analysis, 1992, MSC.
- (8) Macauly, M. A., 1987, "Introduction to Impact Engineering," CHAPMAN and HALL.
- (9) Tsumura, H., 1988, "제품수송강도의 해석 시뮬레이션," 포장기술.
- (10) Hallquist, J. O., 1993, "LS-Dyna3d User's Manual," LSTC.
- (11) Hubbert, H. and Marl, J. D., 1980, "Behaviour of Expanded Polystyrene (EPS) under Compressive Load," *Kunststoffe*, No. 8, pp. 482~487.
- (12) Throne, J. L., 1984, "Closed-cell Foam Behavior under Dynamic Loading-I, Stress-strain Behaviour of Low Density Foams," *J. of Cellular Plastics*, No. 6, pp. 437~442.
- (13) Ramon, O., Mizrahi, S. and Miltz, J., 1990, "Mechanical Properties and Behaviour of Open Cell Foams Used as Cushioning Materials," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 30, No. 4, pp. 197~201.
- (14) Ramon, O. and Miltz, J., 1990, "Prediction of Dynamic Properties of Plastic Foams from Constant-Strain Rate Measurement," *J. of Applied Polymer Science*, Vol. 40, pp. 1683~1692.
- (15) Flanagan D. P. and Belytschko, T., 1981, "A Uniform Strain Hexahedron and Quadrilateral and Orthogonal Hourglass Control," *Int. J. Num Meth. Eng.*, Vol. 17, pp. 679~706.
- (16) Hallquist, J. O., 1978, "A Numerical Treatment of Sliding Interface and Impact," *AMD* Vol. 30, ASME, New York.
- (17) Taylor, L. M. and Flanagan, D. P., 1989, "PRONTO3D, A Three Dimensional Transient Solid Dynamic Program," *Sandia Report* : SAND87-1912, UC-32. 