



CAE 곤포용기 완충성능 평가

Evaluation of Cushioning Properties Using CAE

野口 哲 司 / (주)일본종합연구소 엔지니어링 사업본부

1. 서론

곤포(梱包)상태인 제품에 대해 사고는 여러가지 형태가 예상되는데 특히, 수송 중의 사고형태는 해결하기 가장 어려운 조건으로 추측된다. 또 국내 기업의 대다수는 제품의 수출 의존도가 높고, 해외에서 국내로 반송되는 경우에는 국내에서 예상하지 못한 심각한 상황이 발생할 수도 있어 수송과정의 사고에 대한 곤포용기의 완충설계는 매우 중요하다.

최근에는 단순히 제품안전성을 고려해 판매를 규제하는 경우도 있어 곤포용기도 대상에 포함된다. 이 경우 고려하지 않으면 안 되는 것이 리사이클이나 쓰레기의 감량에 있다. 이런 관점에서 최적성을 고려한 설계가 요구된다.

본 기고에서는 이러한 곤포용기와 관련된 설계 환경 중에서 최근 많이 이용되고 있는 CAE 기법에 대해 살펴보고자 한다.

CAE는 많은 분야에서 이용되는 일반적인 설계·개발상의 툴로 툴 자체를 약속하는 것은 그다지 의미가 없다. 그래서 여기에서는 대표적인

곤포용기에 대해 CAE를 적용하는 경우, 현상이나 동향을 열거하고 서술하고자 한다.

서술하고자 하는 곤포용기로는 완충성능이 높고 널리 이용되고 있는 발포제와 리사이클 등 경보호의 관점에서 이용이 증가하고 있는 골판지를 거론하고자 한다.

1. 완충용 곤포용기설계 CAE

완충을 목적으로 한 곤포용기 평가에서 수송시 발생하는 대부분의 사고 형태는 낙하와 충격에 있다.

낙하는 운송시에 사람의 손이 개입하는 과정에서 많이 발생하고 충격은 차량에 의해 노면상태에 대응한 진동에 의해 발생한다. 상황으로는 낙하의 경우가 충격보다 심각한 상태를 불러오는 경우가 많다. 설계상의 곤포는 제품성능이 정해진 후에 검토되는 경우가 많다.

이 경우의 곤포상태로는 앞서 말한 것과 같은 사고 상황에 대해 대책이 필요한 경우에는 제품에 대한 대응이 거의 불가능하며 곤포용기면에서도 이

에 대응에 있어 개발기간의 단축과 충분한 대책을 수립하는 시간이 없다는 것이 현 상황이다.

이러한 상황에 제품 시작에 앞서 반송 상황까지 고려한 규정(상태)를 검토하는 툴로 CAE가 활용되고 있다.

CAE의 강점으로는 곤포한 상태에서도 내용물의 상태를 알 수 있고 또는 낙하와 같은 ms 단위의 현상도 자세히 관측 가능한 기능도 가치가 있다. 이러한 현상을 예상하고 완충을 목적으로 하는 곤포용기에 적용되는 CAE 틀에는 다음과 같은 기능이 요구된다.

- (1) 높은 비선형성을 가진 완충재료 특성을 취급하다.
- (2) 낙하 등으로 완충재에 발생하는 큰 변형을 취급하다.
- (3) 제품을 곤포한 상태로 시뮬레이트하기 위해 접촉 등 동적 변화에 경계조건을 취급하다.
- (4) 제품의 안전성 평가도 함께하며 제품 혹은 그 평가항목에 따라 큰 데이터를 취급하다.

이러한 목적에 적당한 것이 충돌이나 낙하문제에서 결과가 많은 양해법에 기초한 코드가 있다.

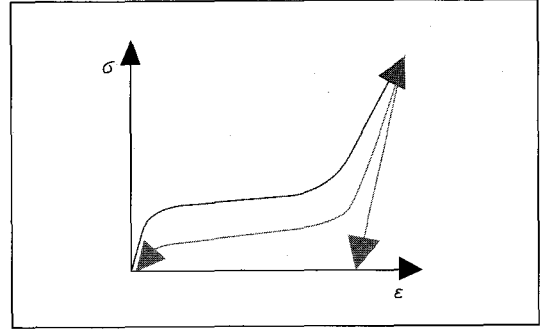
대표적인 범용 양해법 코드는 상당히 숙련되어 있어 상기의 기능을 가지고 있지 않는 것이 없다.

따라서 기본적인 기능으로 시뮬레이션이 되지 않을 것이라는 것은 생각하지 않았지만 재료나 각각의 시물형태에 있어 연구가 필요하다.

2. 발포재 곤포용기

발포재는 완충성능이 높고 성형성이 유연하며 중량이 작아 제조비용도 적어 완충재로는 우수한 재료로 넓게 이용되고 있다. 그러나 쓰레기 감량

(그림 1) 발포재의 대표적 응력 비틀림 곡선



이라는 관점에서 저장비용의 문제와 함께 완충성능을 보존하고, 체적을 최소화하는 요구가 높다.

2-1. 재료 특성

발포재의 골격으로는 고분 자재료로 에어블로 (air blow) 공정을 거쳐 형상으로 형성되기 위해 내부에 많은 기포를 포함한다. 이를 위해 저밀도, 높은 압축성, 높은 가공성, 단열·방음성과 같은 성질을 가진다.

이 중 완충성에 큰 기여를 하는 것이 압축성이다. 발포재는 압축과정에서

- (1) 초기의 10% 이하의 저변형 영역에서의 탄성과정
- (2) 기포의 변형에 의한 압괴(壓壞) 과정
- (3) 기포가 변형후 높은 변형영역에서 골격재료의 성질을 나타내기 위해 발생하는 재경화 과정을 거친다.

이중 (2)의 압괴과정은 80~90%라 하는 높은 압축 변형을 표 시중에서 80% 정도의 변형영역을 커버한다.

이 과정에 있어서는 응력이 크게 상승하는 것뿐만 아니라 압축을 진행시키기 위해 반력을 억



제하면서 에너지를 흡수한다.

이것이 완충성의 요점이다. 또 이외에 축변형의 연성이 없는 점(푸아송의 비 재료), 점성(히스테리시스:hysteresis-이력현상), 변형속도 의존성, 온도 의존성, 인장영역에 있어 부서짐(파편) 등을 고려해야 한다.

LS-DYNA도 이들 특징을 준비한 몇 개의 재료 모델이 존재하며 이와 같은 재료(일반적으로 폼(FORM:거품, 기포)제로 불리우고 있다)가 많이 사용되고 있다. 이들 재료모델을 사용하는 것은 정확한 데이터의 취득이 중요하기 때문이다.

물성데이터는 일축압축시험에 의해 취득할 수 있지만, 이 경우의 주의점은 다음과 같다.

① 재료의 종류 : 골격재료와 발포율, 특히 발포율이 서로 틀리면 물성 거동은 완전히 틀리다.

② 예상되는 변형 영역 : 발포재의 완충특성은 앞서 말한 것처럼 높은 압축성에 있다. 시뮬레이션을 하고자 하는 현상에 있어서 예상되는 변형 결과를 취득하고도, 반력 거동이 합치하지 않는 것만으로도 시뮬레이션이 정상으로 종료하지 않는 것도 있을 수 있다.

③ 예상되는 변형 속도 : 변형속도 의존성이 높은 재료의 경우, 변형속도에 의해 경화하기 위해서는 에너지 흡수량이 다르다.

실제 현상에서는 장소에 의해서도, 시각에 의해서도, 변형속도는 변하므로 대(對)수 레벨에서 몇 개의 변형속도에 대응한 데이터를 취득하고, 현상에 추종하고 의존성을 고려할 수 있는 모델을 사용한다.

④ 사용온도 환경 : 환경온도에 의해 기포, 골격재료의 거동이 영향을 받으며, 사용온도로 데이터를 취득하고 있다.

2-2. 시뮬레이션상 유의점

1) 응력 변형곡선

앞서 서술한 것처럼 압축과정에 있어서 응력 변형곡선은 커다란 비선형성을 나타낸다. 이 중 시뮬레이션실행에 있어서 많은 문제가 되는 것이 높은 변형영역에 있어서의 재경화 과정이다.

시뮬레이션상 이 영역의 데이터 결과에 영향을 미치는 경우는 2가지가 있다.

첫 번째는 낙하 등의 현상에 대해 평가 지표로 한 가속도를 사용하고 있는 경우에 있다.

재경화 과정은 응력이 급격히 상승하는 과정으로, 가속도 최고의 수치는 이 영역거동에 큰 영향을 미친다.

두 번째는 해석모델의 로바스트성의 영향이 있다.

재경화 과정은 압축변형이 80, 90%라는 상당히 높은 변형영역에서 발생한다. 이 상태에는 메시(MESH)의 요소는 거의 찢어져버린 상태에 있어, 경화가 충분하지 못한 경우 아주 쉽게 발산할 가능성도 있다.

2가지 모두 기본적으로는 정확한 응력 변형곡선의 입수(入手)가 필요하지만, 두 번째에 대해서는 시뮬레이션의 수 되돌리는 작업을 줄이기 위해, 접촉처리의 연구로 회피하는 경우나, 요소모델 타입의 변경에 의해 회피하는 경우가 있다.

2) 접촉처리

제품을 포함한 시뮬레이션은 발포재와 제품과의 강성차가 시뮬레이션을 불안정하게 한다. 또 곧포상태에 있으면 제품의 코너부분 등 접촉 판정상 곤란한 조건하에 놓이는 부위가 존재한다.

이들의 문제는 어디까지나 시뮬레이션상에 존재하는 문제로 접촉반력의 조정, 접촉면의 분할 가능한 한 형태에 충실한 모델화를 회피한다.

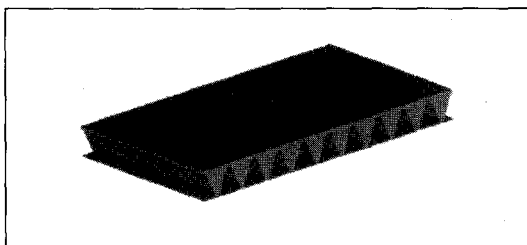
또 일반적으로 제품의 메시의 크기는 제품형태에 의존해 섬세하고 곤포는 조잡하게 되는 경향이 있다. 제품측에 존재하는 리브(RIB:보강 또는 장식)를 위해 늑골처럼 돌출한 부분) 등 징소부재(徵小部材)가 곤포재로 접촉하는 경우에는 곤포에 국소적인 영향을 유발해 시뮬레이션 이상을 초래하는 경우가 있다. 이러한 경우 리브는 제품의 로드 패스(ROAD PASS)가 되어 모델화를 간략화 할 수 없지만 그 접촉면적을 시뮬레이션 상 크게 해 회피한다. '이러한 처리가 어느정도 허용되는가?' 는 메시의 크기 등 해석모델의 근이도와 실제현상과의 비교로 판단한다.

3. 골판지 곤포용기

골판지는 종래보다 외장 곤포용기로 다양하게 이용되어 왔다. 최근에는 종이재질로, 비용면에서 리사이클성이 좋은 것, 환경에 대해 저부하에 있는 것 등 완충재로 이용이 증가해 왔다.

그러나 골판지는 제품의 날개가 크고, 완충 메카니즘의 파악이나 정량 평가가 어렵다. 이를 위해 CAE에 의한 평가기술이 요구되고 있다. 당연히 곤포 완충재라고 하는 기능요청으로 발포재와 같은 수요가 있다.

[그림 2] 골판지 시트



3-1. 재료 특성

골판지 시트는 라이너 및 골심지라 불리는 원지를 접착제로 붙이는 것으로 구성되어 있다. 라이너는 골판지 시트의 표면을 구성하고 골심지는 내부의 파형부재로 있는 골판지의 3차원 구조의 중심에 있다.

원지는 두께 0.2mm 정도의 얇은 종이제품으로 기본적으로 비선형 특성을 나타낸다. 인장력에 대해서는 항복(降伏)을 표시하는 것 없이 파단(破斷)에 이르고 압축에 대해서는 좌굴(坐屈)현상을 나타낸다. 또 종이 섬유 배향이 제조공정의 영향을 받기 위해 면내축 방향에 대해서 이방성을 가지는 것도 특징이다.

3-2. 구조 특성

상기와 같은 3종의 원지에 의해 골판지 단구조 일단위(골단지시트)가 구성되었다.

완충재로 비교할 경우 발포재와 크게 다른 것이 단구조에 의존한 이방성이 있다는 것이다.

골판지 곤포재, 완충재로 한 역학적 거동은 골판지 제품의 전체구조와 단구조에 대한 하중조건에 의해, 변형모드를 유기하는 요인은 다르게 되어왔다.

골판지 시트로 한 대표적인 변형모드는 구부리는 것에 있지만 이 좌굴까지의 반력특성(강성)을 결정하는 제일 큰 요인은 라이너 원지의 강도에 있다. 게다가 구부리는 것으로 부러지는 방향이 골심지의 파형과 수직으로 있는 경우에는 골심지의 영향은 크고 그 선단(절라끊음) 특성을 고려할 필요가 있다. 이들의 검증 예를 [그림3-1], [그림3-2]에 표시하였지만 시험과 시뮬레이션은 좋은 일치를 표시하고 있다.



골판지 시트의 응용으로 한 최고의 제품은 골판지 상자일 것이다.

골판지 상자의 변형으로 전형적인 것이 저장상태 등으로 활용되는 측판의 면좌굴이라 생각되어진다. 이 경우 골판지 시트로 한 압축특성이 지배적으로 있다고 고려 되어진다. 골판지 시트의 압축시험을 참조한 골판지 상자 압축시험에 대한 검증 예를 [그림 4-1], [그림 4-2]에 표시했다.

변형모드와 반력절정기의 수치는 수용하는 것이 가능하나, 좌굴의 타이밍은 시뮬레이션편이 빠르다. 골판지완충재는 여러 가지 형태의 것으로 사용되며 그 하나가 골판지 시트를 구부리는 것으로 상자형태를 형성하고 면좌굴에 의해 에너지를 흡수하는 형태의 것이 있다. 이것은 골판지 상자의 파생 된 것으로 생각되어지며, 그 완충메카니즘은 골판지 상자와 같다.

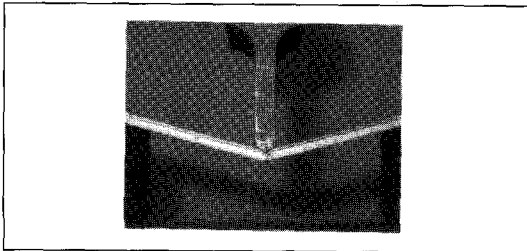
이들의 골판지 시트에 대한 해석모델은 골판지 시트를 시트로 한 거시적인 특성을 가지는 있는 정도(程度) 시뮬레이션이 가능하며 형태로는 라이너·골심지의 단구조를 구성하는 미세구조를 무시한 2차원 또는 3차원 요소가 사용된다.

이 경우 재료모델 레벨로 이방성, 좌굴 등의 재료특성을 고려한다. 따라서 이방성이나 변형모드를 고려한 골판지에 시험 데이터를 수집할 필요가 있다.

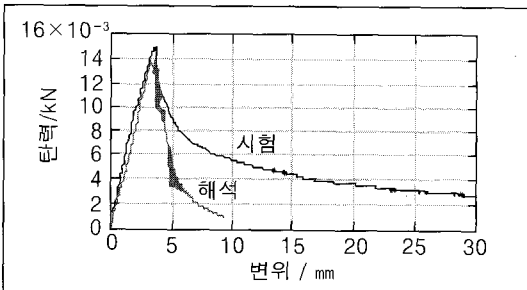
한편, 골판지 완충재로한 골판지 시트를 여러층으로 여러겹 쌓아 블록모양을 형성한 골판지 블록이 있다. 골판지 블록은 곤포상에 있는 정도의 강도를 가지면서 충격에 관련된 완충효과를 발휘하는 부재로 이용하는데 있다. 이 경우에는 골판지 시트의 면좌굴은 다른 메카니즘이 된다.

골판지 블록의 에너지흡수는 골판지 시트의 평

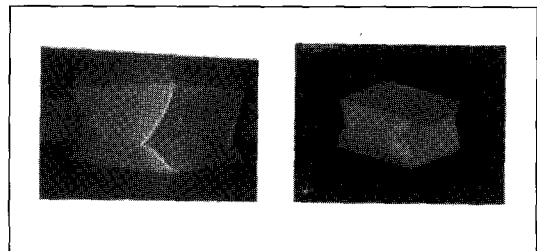
[그림 3-1] 골판지 시트 구부림 시험



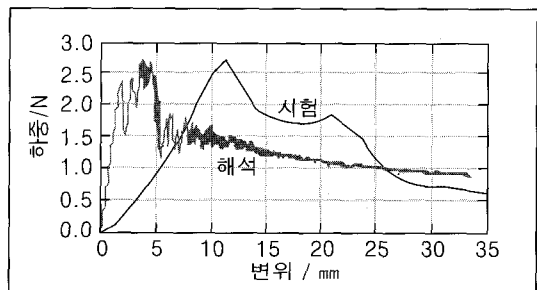
[그림 3-2] 골판지 시트 구부림 변위 반력 곡선



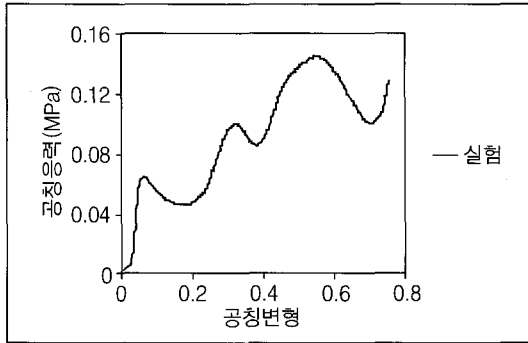
[그림 4-1] 상자압축 변형(시험 시뮬레이션)



[그림 4-2] 상자압축 변위 반력 곡선



[그림 5] 골판지 평면 압축시험



면압축특성, 결국 골심지의 좌굴이나 골판지 시트 면내좌굴이 지배적 요인이 된다. [그림 5]에 평면압축시험결과를 나타냈다.

평면압축의 경우, 골심지의 좌굴, 좌굴후의 라이너·골심지 사이의 접촉에 의해 복잡한 반력거동을 나타낸다. 골판지 블록의 완충성능은 이와 같은 골심지·라이너의 좌굴·접촉이라 하는 높은 비선형성에 지배되어지며 변형모드에 의해 반력특성이 크게 변할 것으로 예상된다. 따라서 골판지 블록 해석모델에는 골심지·라이너로부터 구성되어지는 골판지의 미세구조를 평가 할 필요가 있다고 생각된다.

그러나 어디까지나 곤포상태에 있는 제품의 평가 하는 것부터 골판지의 미세구조까지 전부 충실히 모델화한 해석모델은 작업·계산의 비용이 너무 비싸다. 따라서 골판지의 미세구조특성을 고려하면서, 해석 작업비용을 부여하는 상반되는 요구에 만족하는 방법이 필요로 하게 된다.

이에 대해 가와시마(川島)들은 골판지블록의 주기적 구조에 착안하고 균질화법을 이용한 시뮬레이션 방법을 제안하고 있다.

균질화법은 구조전체가 기본주기구조(유닛 셀)

의 반복되는 배치에 의해 구성된 구조물이 유닛 셀의 역학응답과 유닛 셀의 크기에 의존한 거동을 표시 할 경우에 적용된다. 그리고 균질화의 절차를 통해 유닛 셀내의 마이크로 구조와 유닛 셀의 주기적 집합으로 하는 매크로 구조의 거동을 쌍방향으로 평가하는 특징을 가지고 있다.

골판지에 대해서는 골심지의 파형 1주기의 구조가 유닛 셀에 상당하고 골판지 전체가 이 유닛 셀에 의해 구성된다는 가정이 가능하다.

이 관점에서는 골판지의 역학거동은 골판지의 판구조(미크로 구조)와 골판지 전체(매크로 구조)가 연결되는 문제가 있어, 균질화법의 특징이 적용되는 가능성이 있는가 하는 과제가 남아 있다.

골판지 문제에 관련해 균질화법 적용에 대해서는 스케줄이나 계산시간의 문제, 골판지 마이크로 거동의 비선형성의 고려 등의 문제를 고려한 다음에 적용이 실용적인 의미로 가능할 것으로 기대된다.

4. 결론

곤포용기 완충재의 대표적 또는 주목받는 소재는 발포재와 골판지로, 이들의 재료적, 구조적 특성을 고려한 시뮬레이션이 가능하게 됐다. 최근의 하드웨어 대 비용성능비 업(UP)을 배경으로, 공학분야에서 시뮬레이션이 급속하게 확대되고 있다. 이후 곤포라하는 하류공정의 과제가, 제품 설계공정에서 동시에 검토되는 방법으로 유용하게 증기할 것이라고 생각한다. 아울러, 참조한 검사결과는 기부(岐阜)현 생산정보기술연구소, 산업기술종합연구소 등의 공동연구의 성과의 하나라는 것을 덧붙여 말한다. 