수분 함량을 고려한 골판지 포장

Corrugated Fiberboard Cushion in Consideration of Moisture Influence

中川幸臣 / 애지현산업연구소 공업기술부 응용기술부

Ⅰ. 서론

최근 리싸이클성이나 폐기성 양호라는 점에서 국내 수송이나 해외 수송을 막론하고 포장용 완충재에 골판지나 펄프몰드 등의 종이계 완충재가 사용되는 포장설계 사례가 증가하고 있다. 그러나 종이계 완충재의 포장설계 기법에 관해서는 그 기술이 충분히 확립되어 있다고는 말하기 어려워 포장 설계자는 과거 경험이나 시행착오의 반복에 의지하는 소위 트라이 앤드 에러기법으로 작업을 진행하는 경우가 많다. 이와 같은 상황속에서 각 업계에 있어서 금후 종이계 완충재가 환경에 좋고 또 설계하기 쉬운 포장재로 인식되어 이용이 확대되기 위해서는 안전하고 적정한 포장을 실현 할 수 있는 완충설계를 중심으로 하는 포장설계기법 확립이 요구된다.

종이계 재료를 완충재로 사용하는 경우에 제품에 끼치는 영향에서 가장 주의해야 할 특성은 동일한 시료라도 온습도 조건에 따라 강도가 변화하고 완충성도 변해버리는 점이나 한번 찌그러진 후의 복원성이 떨어진다는 점을 들 수 있다.

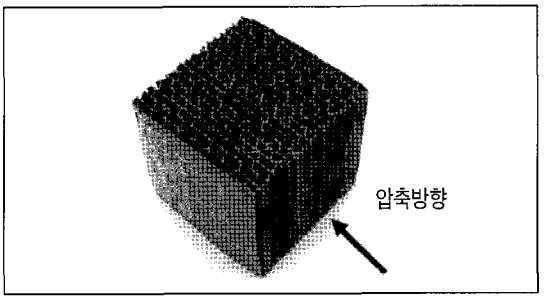
1. 수분 영향 종이계 완충재

종이계 완충재는 소재가 종이라고 하는 점에서 그 물성이 습도에 큰 영향을 받기 때문에 같은 재료라도 외기상태에 따라서는 수송 중에 완충특성이 변화하는 점이 우려된다.

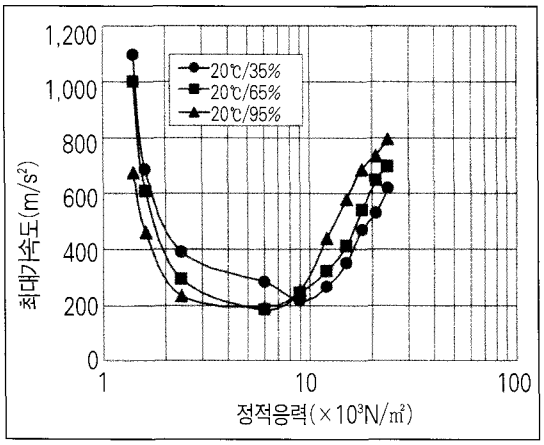
여기서 〔사진 1〕에 나타내는 적층골판지 완충재(치수 80×80×80mm, 평량 115g/m², A골)로 습도조건을 바꾸어 낙하 충격시험을 행한 예를 〔그림 1〕에 나타낸다.

시료에 충격을 준 방향은 〔사진 1〕의 화살표 방향으로 골의 흐름 방향이다. 시료의 전처리조

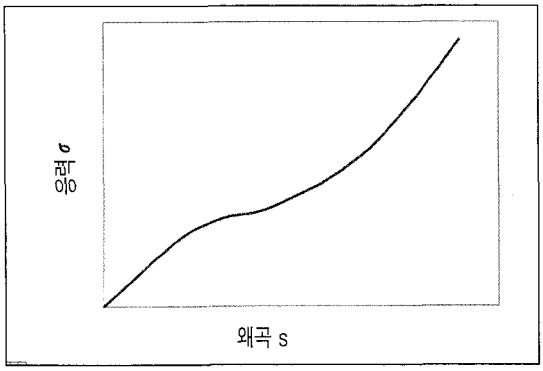
〔사진 1〕 적층 골판지 완충재



〔그림 1〕 각 습도 조건 최대 충격 가속도



〔그림 2〕 왜곡-응력 곡선



건은 온도 20℃(일정), 습도에 관해서는 35, 65, 96%의 3단계로 하였으며 또 시험은 포장완충재용 약기시험기를 사용, 낙하 높이를 60㎝, 사용후의 하중범위는 5.9N~196N으로 하였다. 〔그림 1〕로부터 적층 골판지의 완충성이 습도에 따라 차이가 있다는 것을 알았다. 습도가 낮고 즉 건조 측이 될수록 가속도 선도가 응력이 큰 쪽으로 이동하는 경향이 있다. 습도 65%의 조건을 표준으로 생각하면 가장 충격가속도가 낮아지는 응력점을 최적 응력으로 하면 최적응력보다 낮은 응력 측에서는 습도 35%의 건조상태의 가속도가 높아지지만 습도 95%의 다습상태에서는 가속도가 낮아진다는 것을 알 수 있다. 따라서 저응력 측에서는 습도가 높은 쪽이 내용물의 충격에 의한 데미지는 작다고 할 수 있다. 그러나 실제의 종이계 완충재 설계에 있어서는 완충재의 바닥속상이 발생하지 않는 안전한 변형량의 허영범위도 고려해야 한다. 그림속의 가장 충격가속도가 낮아지는 응력점보다 조금이라도 응력조건이 커지면 바닥손상 발생범위에 들어가버리므로 실제 설계에서는 안전을 보고 설계포인트를 저응력 측에 둘 필요가 생긴다. 그래서 이와 같은 결과를 근거로 한 안전한 완충설계 기법에 관하여 고찰해 보기로 한다.

2. 에너지 밀도와 최대 응력

일반적으로 블록상 완충재는 동일 소재라도 두께나 면적이 변화하면 재료의 강성도 변화하기 때문에 그대로는 재료 고유의 특성을 나타낼 수가 없다. 따라서 완충재의 두께와 면적의 영향을 뺀 단위 체적당의 특성을 구하면 재료간의 비교를 할 수 있다.

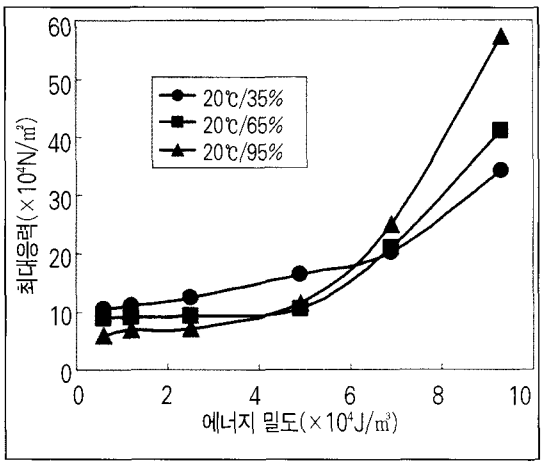
완충재를 압축하는 힘을 면적으로 나눈 응력 σ과 완충재 변형량을 완충재 두께로 나눈 왜곡 s의 관계에 관해서 어느 발포플라스틱계 완충재의 경우를 예로 들면 〔그림 2〕와 같이 된다.

그림의 곡선밑의 면적은 완충재 단위 체적당의 흡수에서지 ε이므로 이것에 완충재의 체적 V를 곱하면 완충재 전체의 흡수에너지 양 E가 되므로 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$E=\varepsilon \cdot V \quad \text{———(1)}$$

따라서 적층골판지와 같은 블럭형상 완충재는 시료의 체적과 흡수에너지 양이 비례한다고 볼

〔그림 3〕 에너지 밀도-최대응력 선도



수 있다. 그래서 시료의 단위체적당의 흡수에너지 양의 크기와 충격 가속도와의 상관관계를 조사 하는 것에 의해 완충성 판단의 기준으로 한다.

여기에서 실험시 후(실제 포장설계에서는 내용물로 간주)의 위치 에너지를 시료의 체적으로 나눈 값을 에너지 밀도 E_d로 정의하고 다음 식으로 나타낸다.

$$E_d = \frac{WH}{V} \quad \text{———(2)}$$

E_d : 에너지 밀도(J/m³)
W : 추의 하중(N)
H : 낙하높이(m)
V : 완충재 체적(m³)

또 추의 질량과 충격 가속도와의 적을 최대 충격력으로 하고 그 시료 단위 지지 면적당의 값을 최대 응력 Ds로 정의하며 다음식에 의한다

$$Ds = \frac{ma_c}{A} \quad \text{———(3)}$$

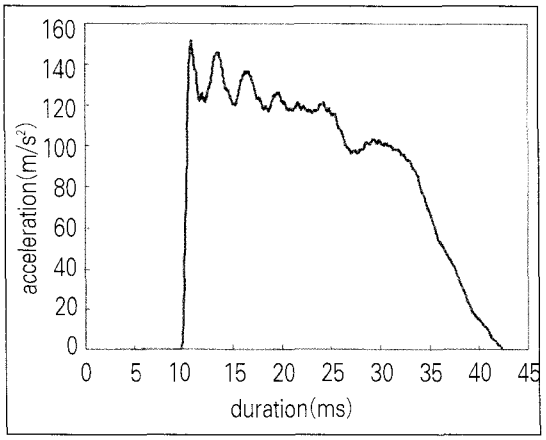
Ds : 최대응력(N/m²)
m : 추의 질량(kg)
a_c : 충격가속도(m/s²)
A : 시료의 지지면적(m²)

여기에서 〔그림 1〕에 나타내는 실험결과에 근거 적층골판지 시료의 각 방향에 관해서 습도 조건별의 에너지 밀도와 최대 응력과의 관계를 나타낸 것을 〔그림 3〕에 나타낸다. 이 선도를 이용하면 내용물의 위치에너지(제품질량, 상정낙하높이)와 완충재 치수를 알고 있는 경우는 발생하는 가속도의 크기를 미리 추측하는 것이 가능하다. 그리고 실제 완충포장 설계에 있어서 과잉포장을 피하기 위해서 적정한 완충재 사용량을 구할 필요가 있지만 그 경우에는 내용물의 허용가속도를 실험으로 측정되는 가속도로 치환, 식(2), 식(3)으로부터 최적치수(완충재의 체적과 지지면적)을 이끌어 낼 수 있다.

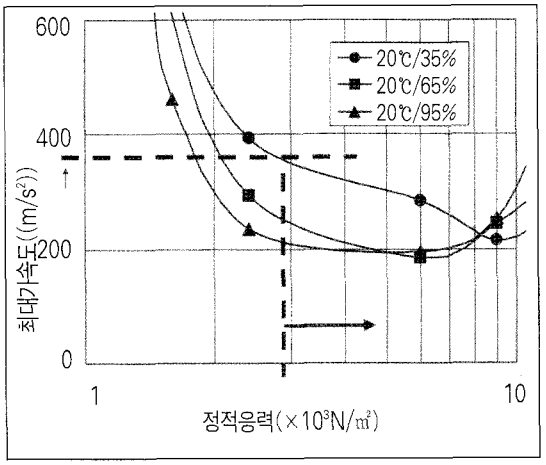
예를 들면 20도, 65% 온습도 조건에서 질량 3kg, 허용가속도 490m/s²의 제품을 낙하높이 60㎝에서 완충설계를 하는 경우 그림에서 에너지 밀도 4×10^4J/m³, 최대응력 9.5×10^4N/m² 포인트를 선정해 식(2), 식(3)으로 산출하면 완충재 체적이 441㎤, 지지면적이 155㎠이므로 완충재 두께는 약 2.8㎝로 된다.

적층골판지 완충재에게는 일반적인 경향으로 낙하높이에 관계없이 가속도가 일정 즉 가속도의 크기에 대해 낙하높이의 의존성이 거의 없이 임의의 설계조건에서 완충재 치수를 간이도 구할 수가 있다. 따라서 발포플라스틱계 완충재와 같이 낙하높이나 완충재 두께별로 '응력-가속도선도'를 갖출 필요는 없고 간이적인 방법으로 완충설계에 응용할 수가 있다.

〔그림 4〕 낙하 충격시험 결과



〔그림 5〕 적정응력 범위 설정



3. 가속도 추정치와 실험치 비교

전술한 방법에 의한 시료의 충격가속도의 추정치와 낙하 충격시험에 의한 실험치와의 비교를 하였다.

습도조건은 65%로 시료치수를 120×80×80mm로 하였으며 또 이때의 낙하시키는 추의 질량은 5.8kg, 낙하높이를 30㎝로 하였다.

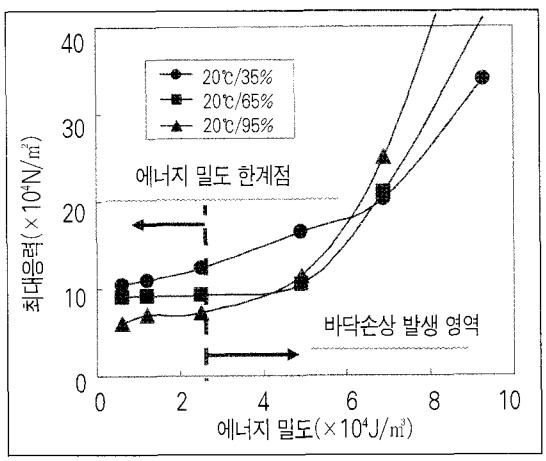
앞에 나온 식(2)를 사용하면 에너지 밀도 E_d는 2.2×10^4J/m³이 되고 〔그림 3〕으로부터 최대응력 D_s는 9.5×10^4J/m²이 구해진다. 따라서 이것을 식(3)에 대입하면 추정되는 충격가속도는 157m/s²으로 된다. 한편 실험에 의해 측정된 충격가속도 파형을 〔그림 4〕에 나타내지만 그림으로부터 가속도의 최대치는 약 151m/s²로 추정치에 근사한 값이다. 그리고 다른 완충재 치수나 낙하높이 등 다른 조건에서도 실험치와 추정치 비교를 하였는데 〔표 1〕에 나타내는 바와 같이 각각 근사한 결과가 얻어졌다.

이상의 결과로부터 금회의 '에너지 밀도-최대응력' 선도를 이용하는 방법에 의해 내용물에 가해지는 충격가속도의 크기를 추정하는 것이 가능하다.

〔표 1〕 실험치와 추정치 비교

시료치수 (㎜)	추의 질량 (㎏)	낙하높이 (㎝)	가속도(m/s²)	
			실험치	추정치
80×50×40	5.0	30	295	314
80×80×50	1.8	60	306	338

〔그림 6〕 바닥손상 방지점의 설정



4. 완충설계 수순

마지막으로 이번에 실시한 적층골판지의 완충설계 기법의 수순에 관하여 종합해 본다.

1) 수순 1 : 응력범위의 설정

〔그림 1〕의 가속도 특성을 나타낸 선도에서 적정한 응력 범위를 생각한 경우 외기의 건조시에 가속도치가 커진다. 따라서 제품의 허용가속도를 건조상태의 선도에 적용시켜 적정한 응력 범위를 설정한다〔그림 5〕.

2) 수순 2 : 바닥손상 방지 조건의 설정

다음에 다습 상태 시의 내용물이 안전유지에 관하여 생각한다. 만약, 다습시에도 완충재의 바닥손상이 발생하지 않으면 충격가속도는 표준시보다는 낮아지기 때문에 내용물의 데미지도 작아진다. 그러나 다습시의 완충재의 에너지 흡수량은 상당히 감소하므로 내용물의 위치 에너지가 큰 경우는 주위가 필요하다. 〔그림 3〕으로 보았을 경우 최대 응력이 급격히 상승하기 시작하는 점부터 바닥손상이 발생한다고 생각된다. 그리고 습도 95%의 선도가 다른 선도보다도 낮은 에너지 밀도에서 응력이 상승하므로 이 선도로부터 바닥손상이 발생하지 않는 에너지 밀도의 조건을 선정한다〔그림 6〕.

여기에서의 주의점으로서 선도의 상승포인트에 가까운 점에서 설정할수록 완충재의 사용량을 적게 할수 있지만 수송 중의 반복 낙하에 의한 바닥손상 발생 리스크도 높아진다. 따라서 내용물의 안전을 위해서는 과잉포장이 되지 않는 수준에서 적당한 에너지 밀도를 설정할 필요가 있다.

3) 수순 3 : 완충재 필요 치수의 산출

수순 2에서 결정한 에너지 밀도와 최대응력, 그리고 설계시의 초기조건(제품질량, 제품허용가속도, 상정낙하높이)으로부터 식(2)와 식(3)을 이용하여 완충재의 필요체적과 지지면적을 산출한다.

4) 수순 4 : 완충재의 지지면적 확인

계산으로 구해진 완충재의 지지면적이 실제로 내용물의 지지 가능한 면적보다 커지는 경우도 있다. 그때는 응력 조건을 변경해야 하지만 변경 후의 가속도 레벨을 다시 체크하고 내용물의 허용가속도를 넘지 않는것을 확인한다. 만약 변경 후의 응력 조건으로 허용가속도 이하의 레벨이 구해지지 않는 경우는 완충재의 사용 방향을 변경하든지 혹은 다른 완충특성을 가진 재료로 변경하는 것도 생각해야 한다. 이상의 수순에 의해 적층골판지를 이용한 완충설계를 적정하게 행할 수가 있다. 이 방법은 완충재가 블록 형상이라고 하는 점에서 그 체적이 기준으로 되고 있다. 따라서 임의의 완충재 치수에 있어서 그 체적으로부터 바닥손상 발생의 판단이 가능하며 범용성이 있는 방법으로서 사용할 수가 있다.

5. 마무리

적층골판지를 비롯한 종이계 완충재는 같은 재료라고 해도 습도 조건에 따라 강도 특성이 변하기 때문에 취급하기 어려운 면이 있다. 그러나 습도 조건별로 '에너지 밀도-최대응력' 선도를 구하는 것에 의해 완충설계의 일반화를 도모하는 것이 가능해 진다. 이 선도는 임의의 완충재 치수나 낙하 높이 조건을 설정하여 이용할 수가 있다. 금후 다른 종이계 완충재에도 응용 할 수 있으면 효율적인 완충 설계법으로서 활용범위를 넓혀 나가는 것도 기대할 수 있다. ko