

Solution Proposal for Protective Packaging Evaluation

완충 포장 설계 평가 과제와 해결 제안

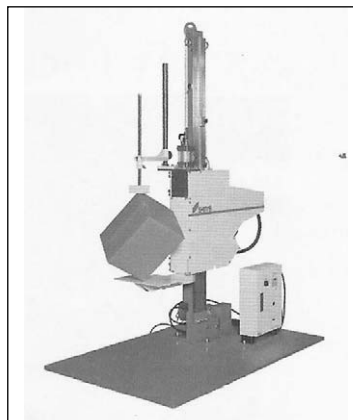
카와구치 카즈아키 / 신에이테크놀로지(주) 계측·시험기기 사업부

1. 서론

포장 화물은 그 유통과정에서 진동, 낙하, 압축 등 다양한 위험상황을 만나게 됨으로써 내용품의 파손이나 외장박스의 변형 등의 문제에 이르게 된다. 완충 포장 설계란 주로 낙하 충격에 대해 제품을 보호하기 위해 실시되는 포장을 말하며, 그 타당성은 낙하 시험에 의해 검증된다.

낙하 시험에서는 낙하 시험기[사진 1]를 이용하여 규정된 낙하 높이에서 포장 화물을 지정 횟수 낙하시킨 후 제품 및 내용품에 파손이나 불량인지를 확인한다. 여기서 어떤 문제가 발생하면 그것이 해소될 때까지 완충 포장 설계 재검토와 재시험이 반복된다. 나아가 낙하 시험에서는 완충 포장 설계의 정량 평가를 위해 충격 가속도 계측 시스템(사진 2)을 이용해 포장 내 제품에 발생하는 충격 가속도를 계측하는 경우도 있다.

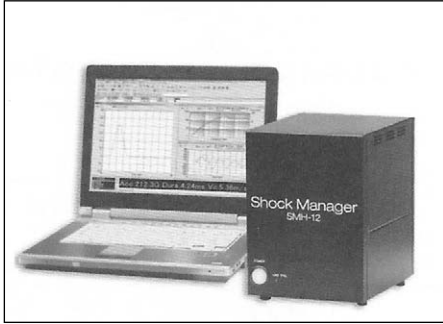
[사진 1] 포장 화물 낙하 시험기 DTS 시리즈



이때 제품이 올바르게 보호되고 있는지의 합격 여부 판정 지표에는 제품의 허용 가속도가 사용된다. 즉, 낙하시험에서 발생한 충격 펄스(pulse)의 최대값이 허용 가속도 미만이면 포장 설계는 합격으로 판정된다.

그러나 허용 가속도만을 지표로 한 합격 여부 판정 기법은 반드시 최적이라고는 할 수 없다. 실측 충격 펄스의 최대치는 충격 가속도 계측의 설정에 따라 수치가 변화하기 때문에 적절한 판단이 어려운데다 발생한 충격 펄스의 충격 전달 특성을 무시하고 있으므로 합격으로 판단해도 되는 완충 포장 설계에서도 불

[사진 2] 가속도 측정 시스템 쇼크 매니저



합격으로 판단하게 될 가능성이 있기 때문이다. 이 경우 본래는 불필요해야 할 재설계를 하게 되어 노동력과 시간이 낭비된다.

기타 낙하 시험 시의 과제로 낙하 시험 중의 실제품 파손을 들 수 있다. 낙하 시험으로 제품이 파손될 경우 수리나 부품 교체를 위해 여분의 비용과 시간이 소요되므로 낙하 시험에서의 제품 파손은 최대한 회피하고 싶다.

본 보고에서는 이러한 낙하 시험에 의한 완충 포장 설계 평가 과제를 제시하면서 보다 효율화하기 위한 방법에 대해 당사의 지금까지의 대응을 소개한다.

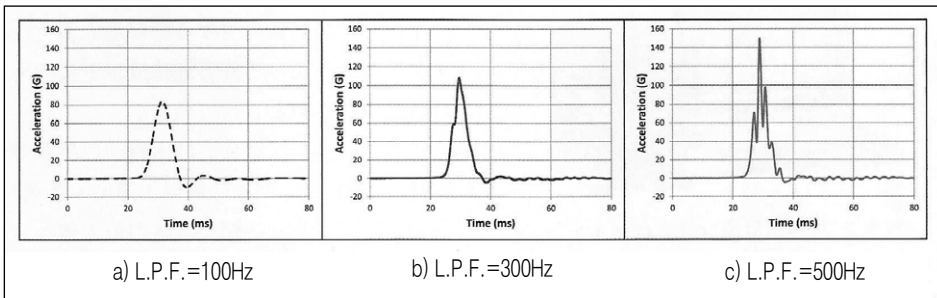
II. 완충 포장 설계의 합리적 평가방법

1. 허용 가속도에 따른 합격 여부 판정 과제

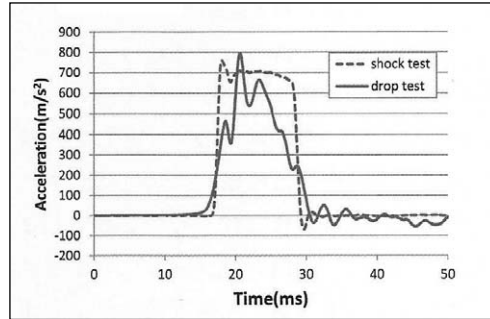
완충 포장 설계의 요건으로서 제품의 허용 가속도가 설정된다. 허용 가속도란 제품의 손상경계곡선(JIS Z 0119에서 도출 가능)으로부터 특정되는 제품의 충격한계를 나타낸 수치로서, 이 수치 이상의 충격 가속도가 제품에 입력되었을 경우 제품은 파손된다. 따라서 낙하 시험에서 제품에 발생하는 충격 최대치는 완충 포장 설계에 의해 허용 가속도 이하로 억제해야 한다고 되어 있다.

여기서 낙하 시험에서의 완충 포장 설계의 정량 평가를 위해 제품의 충격 가속도를 계측하고 낙하 시험에서 생긴 충격 펄스의 최대치와 허용 가속도가 비교되는 경우가 있다.

[그림 1] 포장 화물 낙하 시험 시 내용품에 발생하는 충격 루스 적응되는 로우 패스 필터의 영향



[그림 2] 낙하 시험과 충격 시험 충격 펄스 차이



낙하 시험으로 생긴 최대값이 허용 가속도보다 조금이라도 크면 제품은 파손되는 것으로 간주돼 완충포장 설계가 수정된다.

그러나 허용 가속도만을 이용한 합격 여부 판정으로는 적절한 판단이 어려운 것으로 알려져 있다. 그 이유 중 하나로 낙하 시험에서 제품에 생기는 충격 펄스에는 다양한 주파수 성분이 함

유된 복잡한 파형이 되기 때문에 가속도 계측기기의 로우 패스필터 설정에 따라 그 최대 가속도는 용이하게 변화하기 때문이다.

[그림 1]은 낙하 시험에서 제품에 생긴 동일한 충격 펄스에 대하여 차단 주파수 100Hz, 300Hz, 500Hz의 로우 패스 필터를 적용한 파형의 예이다. 이와 같이 동일한 파형일지라도 그 최대치는 차단 주파수에 따라 크게 변화하기 때문에 단순히 최대 속도만으로는 적절한 합격 여부 판정이 곤란하다고 할 수 있다.

차단 주파수의 설정기준은 JIS Z 0235에 기재되어 있으나 차단 주파수의 상한에 대해서는 명언이 없어 최종적으로는 사용자가 제품의 특성을 파악한 후에 설정할 수밖에 없다.

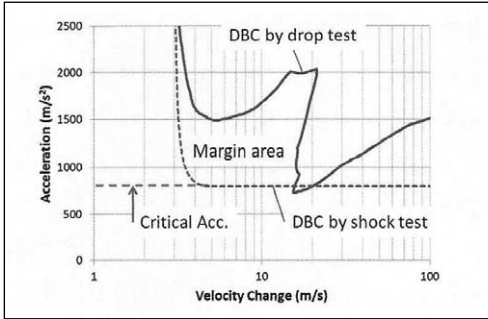
더욱이 최대 가속도와 허용 가속도의 비교에 의한 합격 여부 판정은 완충 포장 설계에 대해 지나치게 엄격한 평가가 되는 것도 적절한 합격 여부 판정을 할 수 없는 요인 중 하나이다.

이는 허용 가속도가 도출될 때 이용되는 충격 펄스(JIS Z 0119에서는 사다리꼴파)와 낙하 시험에서 제품에 생기는 충격 펄스의 형상이 다른 것에 의한다. 사다리꼴파는 모든 충격 펄스 중에서 가장 엄격한(제품 파손을 유발하기 쉬운) 충격 전달 특성을 가지고 있지만 낙하 시험에서 생기는 충격 펄스의 대부분은 사다리꼴파가 되지 않기 때문에 낙하 시험에서 발생한 최대 가속도가 허용 가속도를 초과한 것이 곧 제품 파손으로 이어진다고는 단정할 수 없다.

[그림 2]는 낙하 시험과 충격 시험에서 발생한 충격 펄스의 한 예로서, 두 시험에서 발생한 충격 펄스 형상에 차이가 인정된다.

또한, [그림 3]은 실측 충격 펄스에서 산출한 손상경계곡선의 한 예이다. 이보다 허용 가속도를 초과해도 낙하 시험의 충격 펄스에서는 제품 파손이 발생하지 않는 범위(Margin Area)를 확인할 수 있다. 이는 허용 가속도만을 판정기준으로 했을 경우 실제로는 합격으로 판단해도 되는(제품은 파손되지 않는다) 포장 설계에서도 불합격으로

[그림 3] 충격 펄스별 손상 경계 곡선



판정해 버리는 경우가 있음을 시사하고 있다. 이 오판정에 의해 본래 불필요해야 할 재설계 및 재시험이 이루어지게 되어 여분의 시간과 비용이 발생할 수 있다.

이상에서 최대 가속도만의 평가에서는 로우 패스 필터 설정에 의한 수치의 불안정성과 충격 펄스 형상에 있어서의 충격 전달 특성의 영향을 무시한 결

과로부터 과잉 평가가 되는 과제가 있다.

2. 손상 경계 곡선을 이용한 합격 여부 판정 제안

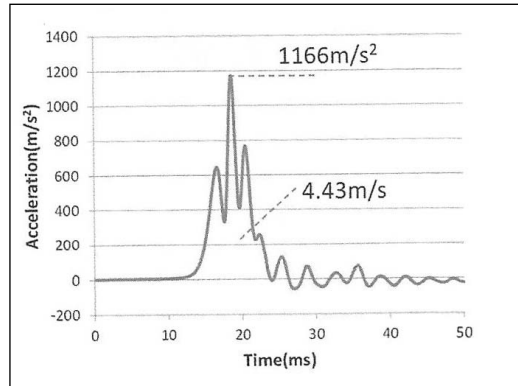
전술한 바와 같은 오판정에 의한 포장 설계의 비효율성을 회피하기 위하여 낙하 시험에서 제품에 생긴 충격 펄스를 바탕으로 손상경계곡선을 도출함으로써 보다 적절한 합격 여부 판정을 할 수 있는 방법을 검토하였다. 여기서는 산출된 손상경계곡선 상에 낙하 시험에서 발생한 충격 펄스의 최대 가속도와 속도 변화를 구상하여 파손 영역 여부를 확인한다. 시험 절차의 개요는 다음과 같다.

- (1) 포장 화물 낙하 시험 시 내용품에 가속도 픽업을 부착해 충격 펄스를 측정한다.
- (2) (1)에서 얻은 충격 펄스에서 SRS 해석을 실시한 후 전달률 $Tr(x)$ 를 구한다.
- (3) 제품 파손 부위의 한계 가속도 ac 와 그 고유 진동수 fc 를 산출한다.
- (4) ac , fc 와 $Tr(x)$ 로부터 낙하 시험에서 발생한 충격 펄스에서의 손상경계곡선을 산출한다.
- (5) (1)의 충격 펄스의 최대 가속도, 속도 변화를 (4)로 산출한 손상경계곡선에 나타내어 비손상 영역임을 확인할 수 있으면 완충 포장 설계는 합격으로 하고 손상 영역에 있으면 완충 포장 설계를 재검토한다. 단, 시험 결과가 경계 영역에 존재하는 경우에는 완충 포장 설계의 재검토를 검토한다.

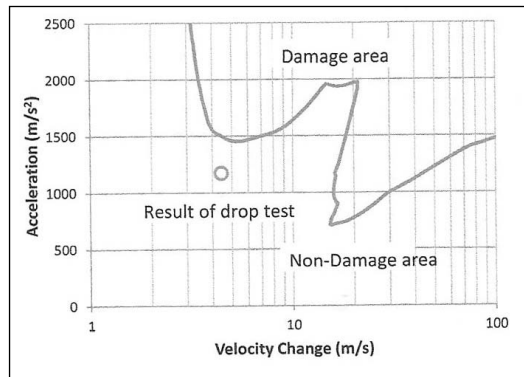
3. 케이스 스터디

종래의 판정 방법과 손상경계곡선을 이용한 평가 방법의 결과의 차이에 대해서 이하의 케이스 스터디를 생각한다. 여기에서는 허용 가속도 이하가 되는 완충 포장 설계를 실시한 후, 낙하 시험으로 제품에 생긴 충격 펄스를 계측한 결과, 이하와 같이 되었다.

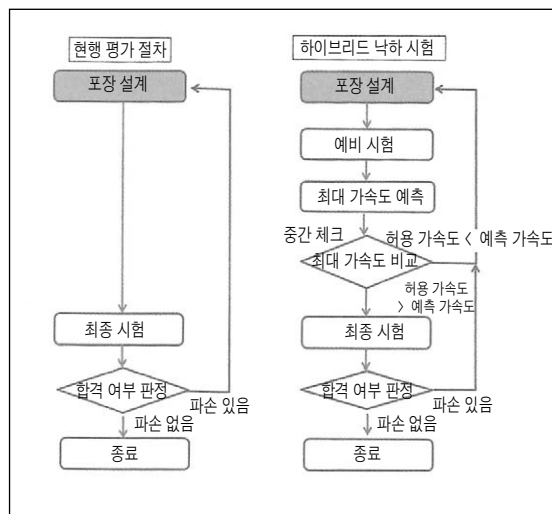
[그림 4] 낙하 시험 시 제품에 생긴 충격 펄스



[그림 5] 충격 펄스에서 도출된 손상경계곡선에 의한 평가



[그림 6] 기존의 평가 절차와 하이브리드 낙하 시험



< 제품 정보와 낙하 시험 결과 >

- 제품의 허용 가속도 800m/s² 및 허용 속도 변화 3m/s
- 낙하 시험에서 제품에 발생한 충격 펄스 : 최대 속도 1,166m/s², 속도 변화 4.43m/s [그림 4]

종래 판정법에 따르면 실측 충격 펄스의 최대치(1,166m/s²)는 허용 가속도(800m/s²)보다 크기 때문에 완충 포장 설계는 불합격으로 판단된다.

제안법에서는 II.2의 절차에 따라 실측 충격 펄스[그림 4]로부터 손상경계곡선을 도출하고 [그림 4]의 최대 가속도와 속도 변화를 손상경계곡선 상에 플롯하면 [그림 5]와 같다. 이에 따라, 발생한 충격 펄스 [그림 4]는 비손상 영역에 있으므로 완충 포장 설계는 합격으로 판단할 수 있다. 종래법에서는 충격 펄스의 충격 전달 영향을 고려하지 않기 때문에 가장 엄격한 평가를 받고 있는 것이 상기 결과의 차이다.

다만 최종적으로 어느 방법으로 합격 여부를 판정할지는 설계사상에 따른다. 예를 들어 보다 안전한 완충 포장 설계를 목표로 할 경우에는 기존 법의 평가를 채택하고 포장 비용을 좁혀 삭감하고자 할 경우에는 제안법을 사용하는 등 설계의 개념에 따라 구분하여 사용하는 것이 바람직하다.

III. 낙하 시험으로 인한 제품 파손을 예방하기 위한 시험 절차

1. 낙하 시험으로 인한 제품 파손

낙하 시험에서는 실물 제품을 포장한 포장 화물을 공시험(供試品)으로 하는 경우가 많은데 완충 포장 설계에 의한 충격 흡수 성능이 충분하지 않을 경우 낙하 시험으로 제품이 파손될 수 있다. 제품이 파손되면 별도의 시료 준비나 제품 수리에 시간과 비용이 들기 때문에 포장 설계상 비효율적이다.

2. 하이브리드 자유 낙하 시험

전항의 과제를 해결하는 방법으로서 하이브리드 자유 낙하 시험을 제안했다. 본 방법에서는 낙하 시험을 2단계로 구분하여 1단계 낙하 시험(예비 시험)에서 완충 포장 설계의 안전성을 사전 확인한 후 2단계에서 최종 시험을 실시한다. 우선 예비 시험에서는 본래 요구되는 낙하 높이보다 낮은 높이에서 시험을 실시하여 포장 화물 내 제품에 생기는 충격 가속도를 기록한다. 그 수치를 바탕으로 원래의 낙하 높이로부터 최종 시험에서 제품에 발생할 것으로 예상되는 충격 가속도 최대값을 계산한다. 이 예상치와 허용 가속도를 비교하여 예측값이 허용 가속도를 하회하면 2단계 시험으로서 본래의 낙하 높이로부터 최종 시험을 실시한다. 만약 예측값이 허용 가속도를 벗어나는 경우에는 사전에 완충 포장 설계를 재검토한 후 다시 예비 시험을 실시한다. 이처럼 최종 시험 전 설계 타당성을 따지는 중간 체크 단계를 뺐음으로써 최종 시험에서의 제품 파손 예방 효과가 기대된다. [그림 6]에 종래의 포장 평가 절차와 하이브리드 낙하 시험에 따른 평가 차이를 나타냈다. 또한, 본 방법에서도 최종 시험으로 이행할지의 여부에 대한 판정에 허용 가속도와 의 비교를 채택하고 있기 때문에 III.1에 나타낸 것과 같은 비효율성은 포함된다. 그래서 현재 손상경계곡선을 판정 기준으로 하는 새로운 평가 방법을 검토하고 있다.

IV. 결론

포장 화물 낙하 시험은 포장 설계 평가의 최종 시험으로 포장 설계 시 중요한 위치에 있다. 여기에서는 완충 포장 설계를 보다 합리적으로 평가하는 방법과 함께 제품이 낙하 시험에서 파손되는 것을 예방하는 방법론에 대해 제안했다. 향후 이들 기법의 주지와 개선 개량에 임함으로써 본 기법이 포장 분야에 널리 이용되어 각 회사의 포장 설계의 합리화에 공헌하면 좋겠다. 