

완충포장의 기초이론(5)

이명훈/한국포장시스템연구소 소장

목 차

- 5. 감소진동, 유통중의 진동, 진동시험 및 자유 진동
- 5-0. 감소진동
- 5-1. 진동 감응성
- 5-2. 포장제품의 진동

5. 감소진동 (Damped Vibration), 유통중의 진동, 진동시험 및 자유진동

5-0. 감소진동

가만히 놔두면 진동하는 물체는 결국 진동을 멈추게 된다.

소리굽쇠가 좋은 예로서 세계 치면 처음 몇 초간은 힘차게 진동하지만 일본 이내에 모든 진동이 멈추게 될 것이다. 시스템에 유입된 에너지로 인해 진동이 일어나지만 마찰을 통해, 즉 감폭이라고 하는 현상을 통해 결국 소멸되고 만다.

스프링-무게추 시스템은 '진동에 너지의 시스템 마찰손실'로 표현되는 감폭계수(damping coefficient) C로 나타낼 수 있다. 이 계수는 한계감폭계수(critical damping coefficient) Cc와 관련지어 측정할 수 있다.

$$C_c = 2\sqrt{\frac{Kw}{g}} \quad (5 \cdot 1)$$

한계감폭계수치에 대한 시스템의 실제 감폭계수의 비(比)는 ζ 로 표시된다.

$$\zeta = \frac{c}{C_c} \text{ (임계감폭분율)}$$

스프링 무게추 시스템이 한계치까지 감폭될 때($\zeta=1$), 무게추의 변위는 시스템을 진동시키지 않는다는 의미가 된다. 그대신 무게추는 [그림 5·1]에 나타난 것처럼 더 이상의 운동을 하지 않고 평형 상태로 재빨리 환원한다는 뜻이다. 과대 감폭 상태 하에서는($\zeta > 1$) 무게추는 역시 "상향 조정(overshooting)"을 하지 않고도 평형위치로 돌아가지만 보다 천천히 돌아가게 된다.

한계 감폭 계수는 감폭이 더 이상의 진동없이 가장 빠르게 평형으로 돌아가게 만든다는 상황을 염두에 둔 개념이다.

과소감폭은 적어도 우리 일상 생활에서 만큼은 늘 겪는 진동을 나타낸다.

과소 감폭된 스프링 무게추 시스템($\zeta < 1$)은 운동을 시작하면 일정주파수로 진동되나 [그림 5·2]와 같이 감소되는 진폭을 나타낸다.

이 자유 진동의 자연주파수는 다음 식과 같이 표시된다.

$$f_n' = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Kg}{W} (1 - \zeta^2)} \quad (5 \cdot 2)$$

감폭 진동 주파수는 감폭되지 않은 시스템의 자연주파수와 매우 유사하게 나타나고 있다.

$$f_n' = f_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

이 두 주파수의 차이는 대부분의 과소 감폭된 시스템에서는 매우 적으며 때로는 f_n 이 과소감폭된 시스템의 공명주파수로 사용되기도 한다.

감폭에 의한 에너지의 소멸로 인하여 한 사이클로부터 다음 사이클에 이르는 변위 진폭의 감소는 공식 5·3a 및 5·3b로부터 산출된다.

$$\ln = \left(\frac{A_1}{A_2} \right) = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (5 \cdot 3a)$$

혹은

$$\frac{A_1}{A_2} = e^{\left(\frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \right)} \quad (5 \cdot 3b)$$

감폭계수를 알고 있으면 공식(5·1)과 (5·3)에 의해 진동이 소멸되는 율을 계산할 수 있다. 예를 들어 공식 5·1로부터 한계감폭분율은 $\zeta = 0.1$ 로 계산된다.

공식 5·3a로부터 어떤 2개의 연속된 진동에 대한 변위 진폭의 비율은

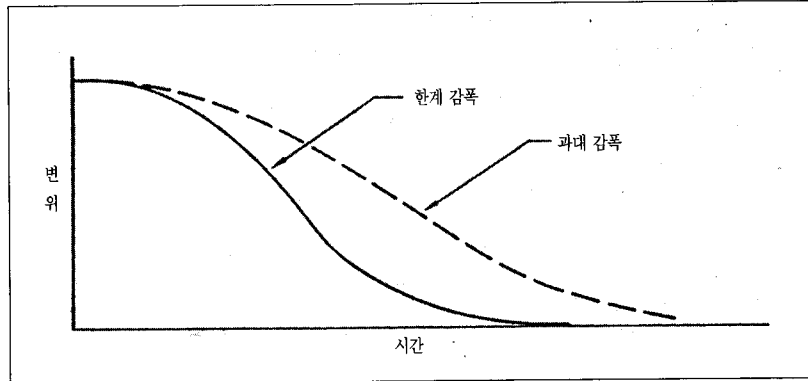
$$\ln = \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \frac{2\pi(0.1)}{\sqrt{1-(0.1)^2}} = 0.63$$

$$\frac{A_1}{A_2} = e^{0.63} = 1.88$$

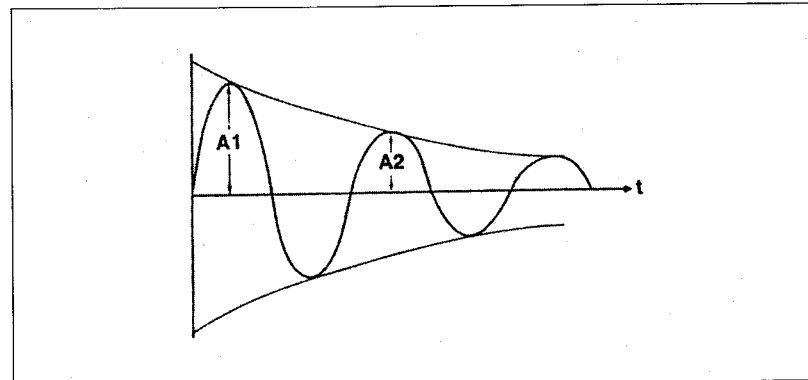
$$A_2 = \frac{A_1}{1.88} = 0.53A_1$$

이 결과로서 어떠한 사이클의 최대 변위는 그 전 사이클의 최대 변위의

(그림 5-1) 감폭 스프링-무게추 시스템의 평형상태로의 복귀



(그림 5-2) 과소 감폭된 스프링-무게추 시스템의 운동



53%라는 것을 알 수 있다. 만약 첫 번째 사이클을 1Unit로 가정하면 계속되는 진동변위는 다음과 같다.

- 사이클 1 1.00 Unit
- 사이클 2 0.53 Unit
- 사이클 3 0.28 Unit
- 사이클 4 0.15 Unit
- 사이클 5 0.08 Unit
- 사이클 6 0.04 Unit
- 사이클 7 0.02 Unit
- 사이클 8 0.01 Unit

만일 위의 예에 대한 진동의 자연 주파수가 1사이클/sec(1Hz)이라고 한다면 운동 진폭이 1.00에서 0.01로 감소하는데는 8초가 걸린다.

감폭은 또한 강제운동의 결과에도 영향을 미친다. [그림 5·3]은 여러

가지의 감폭 스프링 무게추 시스템에 대하여 자연주파수와 강제주파수의 비(比)에 대한 함수로서 증폭계수 혹은 전달성(transmissibility)을 나타낸 것이다.

한계감폭분율이 증가함에 따라 증폭계수는 감소한다는 점을 유의하기 바란다. 포장 실무에서는 앞서 4장에서 언급했던 M값이 쉽게 산출할 수 있기 때문에 사용하고자 하지만 실제로는 감폭이 존재하므로 다소간 실제 값만 차이가 난다는 것을 알 수 있다. 따라서 고전적인 방법에 의존하게 되면 포장제품의 사전 실험을 거치지 않은 경우 과대 포장이 될 가능성이 많아진다.

1개의 자유도(Degree of freedom)

포장 강직

를 가진 선형 스프링 무게추 시스템에 있어서 전달성(transmissibility) T는 다음식과 같이 표현된다.

$$T = \sqrt{\frac{1 + [2\zeta(f_i/f_n)]^2}{[1 - (f_i/f_n)^2]^2 + [2\zeta(f_i/f_n)]^2}}$$

ζ 값을 알고 있는 감폭 시스템에서는 T는 가속도와 변위 결과치를 산출하는데 있어서 M을 대신하여 사용될 수 있다.

감폭은 또한 강제진동과 출운동(output motion)간의 위상 관계를 복잡하게 만드는 요인이다. 4장에서는 설명한 비감폭(非減幅)의 경우 강제진동과 결과진동은 위상각도(phase angle)가 각각 0°에서 180°일 때 f_i/f_n 이 1보다 작을 때는 동일 위상이었으며 1보다 클 때는 반대 위상이었다.

[그림 5·4]는 여러 감폭시스템에 대한 위상각도를 보여주고 있으며 비감폭시스템($\zeta=0$)은 포장실무에 있어서 실제상황을 유추하는데 이용된다.

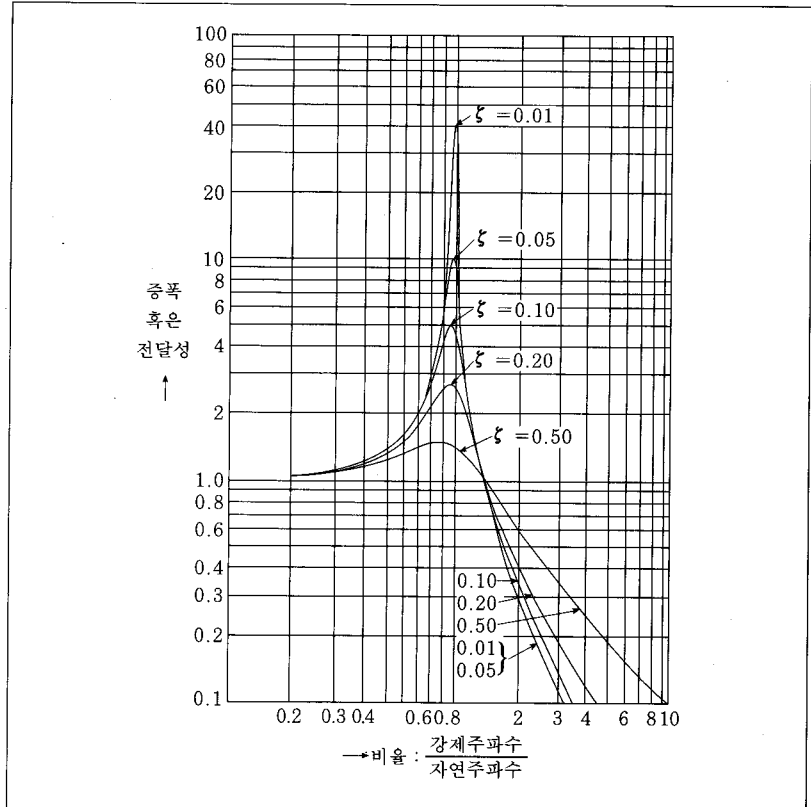
5-1. 진동 감응성(Vibration Sensivity)

어떤 제품의 진동 감응성은 제품 내의 요소나 제품의 공명 혹은 비공명(즉, 파손)을 일으키는 유통환경에서 영향을 받아 이에 상응하여 일어나는 진폭의 입진동 주파수로 규정할 수 있다.

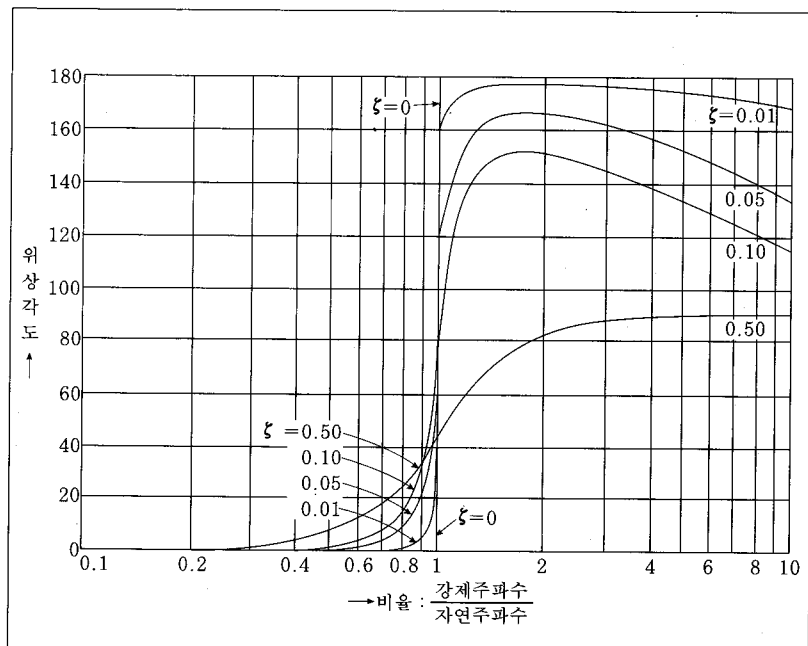
진동 감응성은 유통중의 입진동에 대해 제품의 반응을 최소화하는 포장설계를 하는데 효과적으로 이용할 수 있다.

다음 3단계는 진동 감응성을 결정

(그림 5-3) 감폭시스템의 증폭 혹은 전달성



(그림 5-4) 감폭시스템에 대한 위상각도



하는데 이용하는 방법이다.

1. 제품의 자연주파수를 파악한다.
2. 유통과정에서 일어나는 자연주파수를 파악한다.
3. 유통과정에서 일어나는 진폭 때문에 제품이 진동할 경우 파손이 일어나는지 여부를 파악한다.

한 제품의 자연주파수는 일반적으로 사인곡선운동(Sinusoidal motion)을 보이는 진동 테이블을 이용하여 구할 수 있다. 제품을 진동테이블에 단단하게 고정시키고 시스템을 0.1~0.5g(0에서 최대 진폭까지) 사이의 최대 가속도를 가진 3Hz에서 100Hz 사이의 주파수로 진동시킨다. 주파수를 계속 바꾸어도 가속도는 일반적으로 0.5g에 고정시킨다. 제품의 자연주파수는 육안으로 제품이 공진 현상을 보이거나 혹은 떠는 소리를 듣고 파악하게 된다 (ASTM Standard D 3580 "제품의 진동(수직 사인 곡선 운동) 시험" 참조). 이 과정은 단지 제품의 자연주파수가 3~100Hz 범위에 있을 때 이용되는데 대개 일반 제품의 자연주파수가 이 범위 이내일 때 파손점을 가지게 된다.

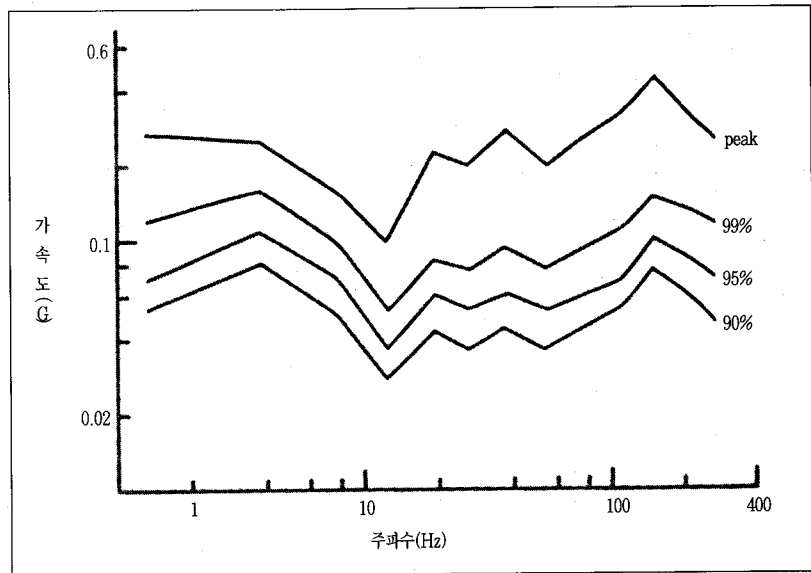
유통중의 진동주파수를 최대가속도치와 함께 [표 5·1]에 나타내었다. 유통중의 진동은 주파수와 진폭의 변동이 극심하여 매우 복잡한 양상을 띠고 있다. 따라서 [표 5·1]은 가장 빈도수가 높은 범위를 일반화한 데이터일 뿐이다.

[그림 5·5]는 진동을 설명하는 또 다른 방법으로서 주파수, 가속도치 및 발생가능성 등의 상관관계를 나타내었다. 유의해야 할 점은 만약 제품의 자연주파수가 유통중에 일어나는 주파수와 일치할 경우 제품에 대한 시험을 사전에 필히 실시해야 한다는

[표 5-1] 유통중의 진동

수송형태	주파수	최대 가속도
철도	현가장치 주파수	2~7Hz
	측면현가장치	3/4~2Hz
	본체	50~70Hz
트럭	바퀴	approx. 1Hz
	현가장치	2~7Hz, 4Hz
	스프링 없는 현가장치	10~20Hz
트레일러	본체	50~100Hz
	본체	2~4.6Hz
	바퀴	0.7~3.1Hz
항공	프로펠러	2~10Hz
	분사장치	100~200Hz
선박	바다 및 엔진	10,000Hz

[그림 5-5] 유통중의 진동:주파수, 가속도치 및 발생가능성



것이다.

제품시험의 목적은 제품이 자연주파수 상태로 진동되었을 때 손상을 입게 되는지 여부를 조사하기 위해서이다. 제품을 진동테이블에 고정시켜 놓고 여러 자연주파수대와 적당한 시간 및 가속도로 변환하면서 진동시킨다. 각 주파수대별로 시험시간은 판단의 문제이지만 통상 30분을 기준으로 한다. 각각의 진동시험이 끝나

면 제품이 손상되었는지 여부를 조사하고 손상을 받은 경우의 주파수대를 측정한다. 따라서 제품을 이 범위에서 보호할 수 있도록 포장설계를 하든지 아니면 유통중에 일어나는 주파수대에 공명하지 않도록 조치를 취하여야 한다.

5-2. 포장제품의 진동

포장 강좌

유통중에 일어나는 진동 때문에 제품의 포장은 평가를 위한 시험을 하여야 할 것이다. 만약 이러한 시험에 합격하지 못하면 포장설계를 다시 해야 함은 당연하지만 합격한다해도 포장제품이 적재하역과정까지 안전하게 보호된다는 보장은 할 수 없다. 제품이 적재하역을 견딜 수 있는가에 대한 시험방법으로서 다음의 3가지가 효과적으로 이용된다.

① Repetitive Shock Test

개별적재되는 포장화물에 대한 시험방법으로서 통상 트럭 바닥면에서 연속적인 기계적 충격에 노출되기 쉬운 포장화물이 이에 해당된다. 시험중 미끄러짐을 방지하기 위하여 시료를 진동 테이블에 단단하게 고정하고 0.5inch의 고정 변위와 2Hz의 주파수로 진동테이블을 진동시킨다. 시료

가 진동테이블에서 떠는 소리가 날 때까지 혹은 테이블의 가속도가 1.1g(0에서 정점까지)에 이를 때까지 주파수를 점차 증가시킨다. 이 주파수에서 시험을 30분간 계속하고 나서 시료인 제품과 포장이 손상을 입었는지 여부를 조사한다.

② Single Container Resonance Test

단위화물이나 다른 제품과 함께 적재된 개별화물의 포장상태를 알아보기 위하여 시료를 일반적재 방식대로 진동테이블에 고정시킨다.

가속도를 0.5g로 고정시키고 주파수를 2Hz부터 100Hz 혹은 150Hz까지 차츰 올린다.

올리고 내리는 작동을 두번함으로써 시료의 자연주파수를 알아낸 다음 진동테이블의 주파수를 각 자연주파

수대로 고정하여 15분 이상 시료를 진동시킨다. 진동이 끝난후 각 자연주파수에서의 손상여부를 조사한다.

③ Unitized Load or Vertical Shock Resonance Test

사이즈가 큰 적재화물에 이용되는 방법으로서 실제 적재시의 높이에 해당하는 한줄 적재 박스들이 시료로 사용된다. 시료는 약간의 수평운동과 수직운동이 가능하도록 고정시킨다. 진동테이블은 2Hz부터 100Hz, 혹은 150Hz까지 높이고 내리면서 두번 작동시키고 적재 제품의 공진 주파수에 맞추어 계속 진동시킨 후 손상여부를 조사한다.

※ 연습문제는 다음호에 진동편을 완결한 후 신도록 하겠다.

'95서울國際包裝機資材展

SEOUL INTERNATIONAL PACKAGING EXHIBITION 95

1. 전시안내

- 가. 전시기간 : '95. 4. 10(월) ~ 4. 14(금)(5일간) 10:00~17:00
 나. 장 소 : 한국종합전시장(KOEX)
 다. 주 최 : 대한무역진흥공사(KOTRA), 산업디자인포장개발원(KIDP)
 라. 후 원 : 상공자원부, 한국기계공업진흥회, 한국방송공사
 마. 협 찬 : 대한상공회의소, 전국경제인연합회, 한국무역협회, 중소기업 협동조합중앙회, 중소기업진흥공단, 한국무역대리점협회
 바. 참가대상 : 국내외 포장 관련 기계계 생산 또는 취급업체 및 포장디자인 영역업체
 사. 참가대상 품목 : • 포장재료 및 용기
 • 포장기계 및 부품
 • 포장재료 가공기기
 • 물류관련 기자재
 • 기타관련기기
 • 포장디자인

아. 전시규모(전시장면적) : 360개 부스(7,488㎡) 1개 부스 : 3m × 3m

2. 참가신청

가. 신청기간 : '94. 9. 1~12. 31(전시장 소전주시 마감)

나. 신청장소 및 문의처 : * 산업디자인포장개발원 진흥부 전시과
 서울 종로구 연건동 128
 전화 : (02) 708-2070~3 FAX : (02) 765-9679

* 대한무역진흥공사 전시부 국내전시과
 서울 강남구 삼성동 159 한국종합무역센터 13층
 전화 : (02) 551-4412~7 FAX : (02) 557-5784

다. 제출서류 : — 참가신청서(요청하면 우송해 드립니다)..... 1부
 — 사업자등록증사본 1부
 — 주요전시품카타로그 1부

라. 참가비(VAT별도)

구분	전시면적만 신청	전시면적+조립식부스
국내업체	₩ 900,000/부스(9㎡)	₩ 1,215,000/부스(9㎡)
해외업체	US \$ 1,620/부스(9㎡)	US \$ 2,070/부스(9㎡)

* 납입처 : • 국내업체 : 산업디자인포장개발원
 (온라인 : 국민은행 031-25-0000-553)
 (온라인 : 상업은행 112-01-212061)

• 해외업체 및 AGENT(단순수입판매업체) : 대한무역진흥공사
 (온라인 : 상업은행 424-01-001351)

* 제반서비스(전기, 전화, 급배수, 압축공기 등) 신청 : 대한무역진흥공사