

배의 안전낙하높이 추정

Estimation of safety drop height for pear

김만수* 정현모* 박일규* 이영희**
정회원 정회원 정회원 정회원
M.S.Kim H.M.Jung I.K.Park Y.H.Lee

I. 서 론

우리나라에서 생산되는 농산물은 맛과 영양면에서 외국산 농산물에 못지 않게 우수할 뿐만 아니라, 이들 농산물은 동남아를 비롯하여 세계 여러 나라의 시장에서도 평이 좋아 매년 수출이 증가되고 있는 추세에 있다. 이와 같이 국민들의 고급농산물의 소비경향과 외국산 농산물과의 품질경쟁을 고려해 볼 때 농산물의 양적인 증대뿐만 아니라 질적인 문제에서도 많은 관심을 두어야 할 시점에 이르렀다.

과실의 수확, 저장, 수송, 상하차 등 유통과정 중에는 기계적 외력들이 과실에 작용되어 손상을 입히기 쉽다. 기계적 외력들에는 압축력, 충격력 등이 있으나 이중에서 충격력에 의한 과실의 손상이 압축력보다 훨씬 큰 것으로 알려져 있다. 그러나 우리나라에서는 아직 충격으로 인한 과실의 손상에 관한 인식이 부족할 뿐만 아니라 이에 관한 연구도 미흡한 실정이다. 따라서 우리나라의 대표적인 과실품종인 배에 대하여 충격특성을 분석하고 손상을 주지 않을 배의 안전낙하높이를 분석하였다.

II. 재료 및 방법

2.1 실험재료 및 장치

실험에 사용된 배는 일반농가에서 재배되어 1998년 10월에 한 나무에서 수확된 후 약 3개월과 약 5개월 정도 저온저장($0\pm 1^{\circ}\text{C}$, $85\pm 5\%$ rh)된 신고 품종의 배이었다. 공시재료에 대한 수확시기 및 기본적인 물성은 표1과 같으며, 시료를 실험실의 환경조건(18°C , 75% rh)에서 약 4시간 동안 실험실 환경에 적응시킨 후 실험을 수행하였다.

충격실험장치는 그림1에서 보는 바와 같이 약 150kg의 콘크리트 바닥(concrete block) 위에 설치하였다. 낙하높이는 원하는 위치로 자유로이 조절할 수 있도록 하였으며 배는 진공 펌프와 고무 컵으로 잡도록 하였다. 배는 SSR(solid state relay)를 컴퓨터로 작동시켜 낙하시켰으며 충격력은 하중변환기(load cell)로 측정하였다.

*충남대학교 농과대학 농업기계공학과

**농촌진흥청 농업기계화연구소

Table 1. Harvesting time and physical characteristics of the pears used in impact tests

	Harvesting time	Volume (10 ³ m ³)	Mass (kg)	True density (kg/m ³)
Specimen1	Around Oct. 1999	4.35~6.53	0.43~0.61	897.40~1123.25
Specimen2	Around Oct. 1999	0.38~0.79	0.40~0.77	898.17~1121.42

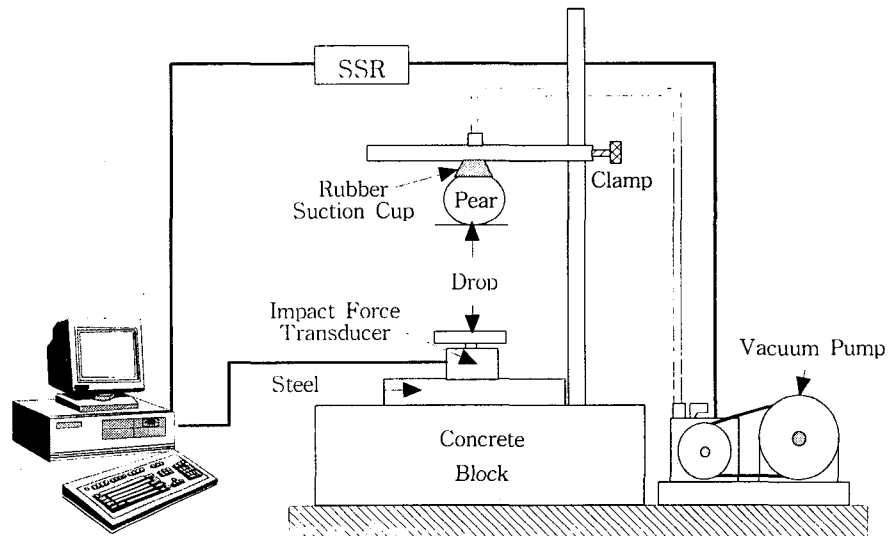


Fig. 1 Schematic diagram of the impact tester.

2.2 실험방법

과실과 같은 점탄성체의 안전낙하높이 즉 과실이 자유낙하 하여 충격에 의한 손상을 입지 않고 낙하할 수 있는 높이는 다음과 같은 이론 식으로 추정 될 수 있다. 질량 m 인 과실이 강체로 가정될 수 있는 바닥에 충돌하여 충격이 일어났을 때 운동량(momentum)과 역적(impulse)의 관계는 다음과 같다.

$$mv_1 - mv_2 = \int Fdt \quad \text{----- (1)}$$

여기서, m : 물체의 질량(kg)

v_2 : 충격이 끝나는 속도 (=0) (m/s)

v_1 : 충격시작속도 ($v_0 = \sqrt{2gh}$) (m/s)

F : 충격력(N)

과실의 충격문제에서 충격력-시간곡선은 과실이 점탄성체이기 때문에 최고충격력을 중심으로 하여 좌우대칭으로 되지 않는다. 그러나 충격접촉시간(contact time, t_c)의 반(1/2)에서 최고충격력이 발생되고 충격력은 시간에 대하여 직선적인 관계가 있다고 가정하면 (실체는 곡선적 관계) 식(1)의 우변의 적분은 최고충격력에 대하여 $t_c/2$ (time to peak force, t_{mf})까

지만 하면 된다. 왜냐하면 충격력-시간곡선에서 최고충격력을 중심으로하여 오른쪽은 압축 변형된 것이 회복되는 구간이므로 압축변형량과는 관계가 없기 때문이다.

$$mv_0 = \int_0^{t_{mf}} F dt \quad \text{----- (2)}$$

$$mv_0 = \int_0^{t_{mf}} F dt = \frac{1}{2} F_m t_{mf} \quad \text{----- (3)}$$

여기서, $F_m(N)$: 최고충격력

$t_{mf}(s)$: 최고충격력에 도달하는 시간

또한 최고충격력(F_m)은 시간에 대해서 직선적으로 증가한다고 가정하면 식(2)은 식(3)과 같이 된다. 과실에 충격을 가하여 손상을 입지 않을 허용응력을 σ_p 라 하면 이 값은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_p \leq \frac{F_m}{A} \quad \text{----- (4)}$$

여기서, σ_p : 과실이 충격으로 손상을 입지 않을 응력(Pa) A : 충격으로 생기는 접촉면적(m^2)

반경이 R 인 과실이 수평면에 충돌하여 생기는 접촉면적은 Hertz의 접촉이론으로부터 다음과 같은 식이 된다.

$$\begin{aligned} A = \pi a^2 &= \pi \left[\frac{(3E_m K/2)}{(2/R)} \right]^{2/3} = 2.5933 (E_m K R)^{2/3} \\ &= 2.6 (E_m K R)^{2/3} = 2.6 \left(\frac{F_m (1-\mu^2) R}{E} \right)^{2/3} \quad \text{----- (5)} \end{aligned}$$

식(3) 및 식(5)을 식(4)에 대입하고 낙하높이 H 에 대하여 정리하면 다음 식과 같다.

$$H \leq \frac{0.9841 \sigma_p^6 (1-\mu^2)^4 R^4 t_c^2}{m^2 E^4} \quad \text{----- (6)}$$

여기서, μ : 과실의 포아송비(무차원) R : 과실의 반경(m)

E : 과실의 탄성계수(Pa) t_c : 충격접촉시간(s)

실제현상에 좀 더 가까운 낙하높이를 추정하기 위해서는 충격실험을 통하여 실제로 구한 식(2)을 식(3)으로 나누어 준 값을 N_1 (2식의 충격량 비)이라 하면 식(6)은 다음과 같은 식이 된다.

$$H \leq \frac{0.9841 N_1^2 \sigma_p^6 (1-\mu^2)^4 R^4 t_c^2}{m^2 E^4} \quad \text{----- (7)}$$

배의 낙하방향은 과실의 가장 연한 부분인 볼부분(chek portion)이 충격판에 떨어지도록 하였으며, 배의 낙하높이는 5cm 7.5cm, 10cm 12.5cm에서 충격실험을 수행하였다. 각 시료

를 자유낙하 시켜 배가 자유낙하하기 시작하여 하중변환기에 1~2번 충격을 할 때까지 충격력과 시간을 계측하였으며, 배가 하중변환기에 충격을 가하는 순간부터 0.17ms의 일정한 시간 간격으로 충격력을 측정하여 데이터 파일로 저장시켰다.

속도 및 변위계산을 하기 위하여 힘-시간곡선을 적분하여야 하는데 측정자료와도 잘 맞으면서 적분하는데 편리한 다음과 같은 시간에 대한 6차 다항식으로 표시하였으며 이들 식은 그림2에서 보는 바와 같이 모든 실험자료와 잘 일치하였다.

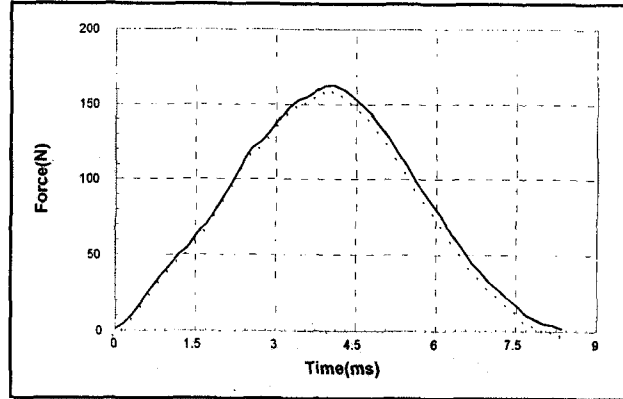


Fig. 2 Curve fitting of the typical force versus time data for impact of the pear.

$$E = a_1 + b_1 t + c_1 t^2 + d_1 t^3 + e_1 t^4 + f_1 t^5 + g_1 t^6 \quad (8)$$

여기서, F = 충격력(N) a_1, b_1, \dots, g_1 = 실험계수(무차원)

t = 접촉시간(s)

III. 결과 및 고찰

3.1 생물체항복강도를 기준으로 한 이론낙하높이

배에 대한 이론낙하높이는 식(6)을 이용하여 추정하였다. 여기서 충격을 가하여 배가 손상을 입지 않을 허용응력(σ_p)을 본 실험에서 측정한 생물체항복강도를 적용하였다. 생물체항복강도는 과실에 미세한 파괴가 시작되는 응력이므로 이 값은 배에 손상을 주지 않는 최소의 응력이라고 생각할 수 있기 때문이다. 그 외의 다른 물리량들은 표2에서 보는 바와 같이 본 실험에서 측정되었던 최고, 최저 및 평균치로, 다만 포아송비는 0.25, 0.35, 0.45로 가정하여 이론낙하높이를 추정하였다.

손상을 입지 않을 이론낙하높이는 표2에서 보는 바와 같이 약 1cm에서 약 4cm정도로서 배의 경우 매우 낮은 높이에서 낙하하더라도 손상이 생긴다는 것을 알 수 있다. 여기서 추정된 이론낙하높이는 실제현상에서 보다는 낮게 추정된 값이다. 왜냐하면 그것은 식(6)에서 충격량(impulse)을 계산할 때, 충격력은 시간에 대하여 직선적으로 증가한다고 가정하여 삼각형의 면적과 같이 계산하였으나 실제로 충격력은 시간에 따라 곡선적으로 증가하기 때문에 이 면적을 적분하면 삼각형으로 가정하여 계산한 충격량보다는 약간 커지므로 따라서 배가 충격으로 손상을 입지 않을 허용응력이 증가하기 때문이다.

Table 2. Theoretical drop height calculated on the basis of bioyield strength of the pear

		E ₁						E ₂						E ₃					
		σ _{p1}	μ ₁	σ _{p2}	μ ₂	σ _{p3}	μ ₃	σ _{p1}	μ ₁	σ _{p2}	μ ₂	σ _{p3}	μ ₃	σ _{p1}	μ ₁	σ _{p2}	μ ₂	σ _{p3}	μ ₃
H (10 ⁻² m)	m ₁																		
	t _{c1}	1.711						1.839						1.725					
	R ₁	1.267						1.362						1.277					
	m ₂	2.669						2.868						2.690					
	t _{c2}	1.977						2.214						1.992					
	R ₂	1.495						1.606						1.507					
	m ₃	4.021						4.320						4.052					
	t _{c3}	2.978						3.199						3.001					
	R ₃	2.252						2.420						2.270					

Not : E₁ = 1149.326(kPa)
 σ_{p1} = 180.081(kPa)
 μ₁ = 0.25
 m₁ = 0.521(kg)
 t_{c1} = 6.980(ms)
 R₁ = 5.033(10⁻²m)

E₂ = 1238.937(kPa)
 σ_{p2} = 190.464(kPa)
 μ₂ = 0.35
 m₂ = 0.536(kg)
 t_{c2} = 7.725(ms)
 R₂ = 5.423(10⁻²m)

E₃ = 1328.547(kPa)
 σ_{p3} = 200.847(kPa)
 μ₃ = 0.45
 m₃ = 0.550(kg)
 t_{c3} = 8.470(ms)
 R₃ = 5.812(10⁻²m)

3.2 생물체항복강도를 기준으로 한 실제의 낙하높이

강체와 같이 단단한 물체에 배가 자유낙하하여 충돌할 경우, 손상을 입지 않을 낙하높이를 추정하기 위하여 시료를 두 그룹으로 나누어 각각의 충격량을 식(2) 및 식(3)에 의하여 계산하고 그 비를 구하여 표3에 나타내었다. 시료 그룹1은 그룹2에 비하여 약간 연한 시료들로서 충격량은 계산치나 실측치에서 모두 그룹2의 값들보다 작은 반면 충격량비 N_1 은 약 3%정도 더 큰 값으로 나타났다. 이러한 현상은 Delwiche(1987)가 복숭아에 대한 충격실험 결과와도 잘 일치하는 것으로 연한 과실은 접촉시간이 길고 최고충격력은 작으면서 좌우로 퍼지는 종 모양을 하고 단단한 과실은 충격량비 N_1 은 연한 과실에서 크게 나타나는 것으로 판단된다.

Table 3. Average ratio of the impact measured to the calculated

	No. of pears	Impulse(10 ⁻³ N · s)		$N_1=M/C$
		Calculated(C)	Measured(M)	
Sample group1	46	0.420	0.496	1.166
Sample group2	98	0.464	0.521	1.128
Average	-	0.442	0.509	1.147

배가 단단한 물체에 자유낙하 하였을 때 손상을 입지 않을 낙하높이는 표3의 충격량비 N_1 을 식(7)에 대입하여 추정하였으며 그 결과를 표4에 나타내었다. 여기서 배의 탄성계수, 생물체항복강도, 포아송비, 질량, 접촉시간 및 배의 반경 등은 표2에 값들을 사용하였다.

실험에 의하여 추정된 배에 손상을 주지 않는 낙하높이는 대체로 단단한 시료들인 그룹2

의 경우 이론치보다 약 27%, 연한 시료들인 그룹1에서는 약 36% 더 높게 추정되었다. 모든 시료들에 대한 평균은 약 32% 정도 이론치보다 실험치가 높게 나타났다.

Table 4. Practical drop height estimated on the basis of bioyield strength of the pear

		E ₁						E ₂						E ₃					
		σ_{p1}	μ_1	σ_{p2}	μ_2	σ_{p3}	μ_3	σ_{p1}	μ_1	σ_{p2}	μ_2	σ_{p3}	μ_3	σ_{p1}	μ_1	σ_{p2}	μ_2	σ_{p3}	μ_3
H (10 ⁻² m)	m ₁	2.327		2.501		2.346		1.723		1.852		1.737		1.304		1.401		1.314	
	t _{a1}	2.175		2.337		2.192		1.610		1.731		1.623		1.220		1.310		1.229	
	R ₁	2.252		2.420		2.270		1.667		1.792		1.681		1.262		1.356		1.271	
	m ₂	3.629		3.900		3.658		2.689		3.011		2.709		2.033		2.184		2.050	
	t _{a2}	3.392		3.645		3.419		2.513		2.814		2.532		1.902		2.043		1.917	
	R ₂	3.512		3.774		3.540		2.602		2.914		2.622		1.967		2.114		1.983	
	m ₃	5.469		5.875		5.511		4.050		4.351		4.081		3.063		3.291		3.087	
	t _{a3}	5.111		5.491		5.150		3.785		4.066		3.814		3.865		3.078		2.887	
	R ₃	5.292		5.685		5.332		3.919		4.210		3.949		2.964		3.185		2.987	

Note : The value on the first row in each cell indicated the drop height estimated with $N_1=1.166$ (group1), the value on the second row estimated with $N_1=1.128$ (group2), and the value on the third row estimated with $N_1=1.147$ (average of whole group)

IV. 요약 및 결론

우리나라의 수출유망과실 중의 하나인 배(신고)에 대한 충격에 의한 손상추정과 손상을 입지 않을 낙하높이를 구명하기 위하여 4수준의 낙하높이 별로 충격실험을 수행하였다. 이를 위하여 충격실험장치를 제작하였으며 실험장치구동, 충격특성인자들의 계측 및 분석용 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 배에 손상을 입히지 않을 안전낙하높이는 이론적 분석결과 약 1cm에서 약 4cm로 나타났으며 충격실험결과를 고려한 경우에는 약 1cm에서 약 6cm로 추정되었다. 낙하높이는 배의 물성에 따라 차이가 크므로 낙하높이를 추정할 때는 물성을 충분히 고려하여야 할 것이다.

V. 참고문헌

1. Brusewitz, G. H. and J. A. Bartsch. 1989. Impact parameters related to post harvest bruising of apples. Trans. of the ASAE 32(3) : 953-957.
2. Chen, P., M. Ruiz., F. Lu, and A. A. Kader. 1987. Study of impact and compression damage on asian pears. Trans. of the ASAE 30(4) : 1193-1197.
3. Delwiche, M. J. 1987. Theory of fruit firmness sorting by impact forces. Trans. of the ASAE 30(4) : 1160-1166.
4. Delwiche, M. J., T. McDonald, and S. V. Bowers. 1987. Determination of peach firmness by analysis of impact forces. Trans. of the ASAE 30(1) : 249-254.