

충격시험에 따른 배의 허용낙하높이 추정

Estimation of Allowable Drop Height for Oriental Pears by Impact Tests

김만수 정현모 서 룬 박일규 황용수
정회원 정회원 정회원 정회원
M. S. Kim H. M. Jung R. Seo I. K. Park Y. S. Hwang

SUMMARY

Impact between fruits and other materials is a major cause of product damage in harvesting and handling systems. The oriental pears are more susceptible to bruising than other fruits such as European pears and apples, and are required more careful handling. The interest in the handling of the pears for the processing systems has raised the question of the allowable drop height to which pears can be dropped without causing objectionable damage.

Drop tests on pears were conducted using an impact device developed by authors to estimate the allowable drop height without bruising. The impact device was constructed to hold in a selected orientation and to release a fruit by vacuum for dropping on to a force transducer. The drop height was adjustable for zero to 60 cm to achieve the desired distance between the bottom of the fruits and the top of the impact force transducer. The transducer was secured to 150 kg_r concrete block. The transducer signal was sampled every 0.17 ms with a strain gage measurement board in the micro computer where it was digitally stored for later analysis.

The selected sample fruit was Niitaka cultivar of pears which is one of the most promising fruit for export in Korea. The pears were harvested during the 1998 harvest season from an orchard in Daejeon. The sample fruit was selected from two groups which were stored for 3 months and 5 months respectively by the method of current commercial practice. The pears were allowed to stabilize at environmental condition(18°C, 65% rh) of the experimental room.

One hundred fifty six pears were tested from the heights of 5, 7.5, 10 and 12.5 cm while measurement were made of impact peak force, contact time, time to peak force, dwell time, pear diameter and mass. The bioyield strength and modulus of elasticity were measured using UTM immediately after each drop test.

The allowable drop height was estimated on the base of bioyield strength of the pears in two ways. One was assumed the peak force during impact test increasing linearly with time, and the other was based on the actual drop test results.

This study was conducted by the research fund supported by Ministry of Agriculture and Forestry. The article was submitted for review in May 2001, and approved for publication by the editorial board of KSAM in July 2001. The authors are M. S. Kim, Professor, H. M. Jung, R. Seo, and I. K. Park, Research Assistant, Division of Agricultural Engineering, Y. S. Hwang, Professor, Division of Plant Science, Chungnam National University. The corresponding author is M. S. Kim, Professor, Division of Agricultural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea. E-mail: <mskim@cnu.ac.kr>.

The computer program was developed for measuring the impact characteristics of the pears and analyzing the data obtained in the study. The peak force increased while contact times decreased with increasing drop height and contact times of the sample from the hard tissue group. The allowable drop height increased with increasing bioyield strength and contact times, and also varied with Poisson's ratio, mass and equilibrium radius of the pears. The allowable drop height calculated by a theoretical method was in the range from 1 to 4 cm, meanwhile, the estimated drop height considering the result of the impact test was in the range from 1 to 6 cm. Since the physical properties of fruits affected significantly the allowable drop height, the physical properties of the fruits should be considered when estimating the allowable drop height.

Keywords : Impact test, Allowable drop height, Oriental pears.

1. 서 론

우리나라에서 생산되는 과실은 맛과 영양면에서 외국산 농산물에 못지 않게 우수할 뿐만 아니라, 이들 과실은 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.

과실은 품종, 재배기술, 환경의 요인에 영향을 받아 품질, 형상, 색택, 병충해정도, 상해정도에 따라 과실의 품질 즉 상품성이 결정되게 된다. 또한 과실은 수확, 저장, 포장, 수송, 상하차 등 유통과정중에 크고 작은 물리적 손상을 받기 쉽고 한번 손상을 받은 과실은 생리적 작용으로 부패 및 변질이 진행되어 전 유통과정을 통하여 과실의 품질 저하가 상당한 수준에 이르고 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 실정임에도 불구하고 우리나라의 경우, 과실의 질적 및 양적 손실을 줄이기 위한 수확 후 작업기술에 대한 연구는 매우 초보적인 단계에 머물고 있다.

과실이 유통과정 중에 받을 수 있는 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.

이러한 과실의 충격 특성 구명을 위한 실험장치는 과실의 유통과정중의 현상과 유사한 장치인 자유낙하식 충격실험장치가 주로 사용되고 있다 (Delwiche. et al., 1987; Brusewitz, 1989; Lichtenst-eigher. et al., 1988).

Horsfield 등(1972)은 과실의 충격하중을 받을 때 과실내부에 발생하는 전단응력을 이론적으로 해석하기 위해서 두 개의 구가 충돌하는 경우에 대하여 Hertz의 접촉이론을 적용시켰으며, 과실의 충격으로 인한 손상은 흡수된 에너지보다 큰 내부전단 응력의 발생에 원인이 있다고 보고하였다. Diener 등(1979)은 사과와 복숭아에 대하여 충격반응을 측정하여 경도계로 측정한 기계적 특성과 비교 분석하였다. 멍 체적은 낙하높이가 증가함에 따라 직선적으로 증가하고, 과실이 떨어져서 발생하는 다중충격(multiple impact)은 멍 체적의 증가를 가져온다고 보고하였다. Brusewitz 등(1989)은 사과를 저온저장하면서 낙하높이별 충격실험을 하였으며, 저장기간이 길어짐에 따라 멍 체적은 약간 증가하는 반면 흡수에너지(absorbed energy)는 크게 증가한다고 보고하였다. 충격중의 접촉시간은 저

Table 1 Physical characteristics of the pears used in the impact tests

	Volume (10 ⁻³ m ³)	Mass (kg)	True density (kg/m ³)	Equilibrium radius (10 ⁻³ m)	Modulus elasticity (kPa)	Bioyield strength (kPa)	Storage period (months)
Sample group 1	4.35~6.53	0.43~0.61	897.40~1123.25	5.03~5.68	1325.67~1328.55	200.39~200.85	3
Sample group 2	0.38~0.79	0.40~0.77	898.17~1121.42	5.12~5.81	1149.33~1169.24	180.08~183.20	5

장기간에 따라서 약 20% 증가하는 것으로 보고하였다. Delwiche 등(1989)은 시간특성치는 과실의 경도와 밀접한 관계가 있으며, 이 값은 낙하높이에 많은 영향을 받으나 과실 크기에는 별 영향을 받지 않는다고 보고하였다.

따라서, 본 연구에서는 우리나라의 대표적인 과실인 배에 대한 충격실험과 UTM에 의한 기계적 특성의 측정을 통하여 손상을 주지 않을 배의 허용낙하높이를 분석하고자 하였으며 이를 위하여 자유낙하 충격실험장치를 제작하고 충격특성치의 측정 및 분석을 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하였다.

2. 재료 및 방법

가. 실험재료

실험에 사용된 배는 일반농가에서 재배되어 1998년 10월에 수확된 후 약 3개월(시료1)과 약 5개월(시료2) 정도 저온저장($0 \pm 1^\circ\text{C}$, $85 \pm 5\%$ rh)된 신고 품종의 배이었다. 공시재료에 대한 기본적인 물성은 표 1과 같으며, 시료를 실험실의 환경조건(18°C , 65% rh)에서 약 4시간 동안 적응시킨 후 실험을 수행하였다.

나. 실험장치 및 계측, 분석용 컴퓨터 프로그램

충격실험장치는 그림 1 및 표 2의 제원과 같으며 약 150 kgf의 콘크리트 바닥(concrete block) 위에 설치하였다. 낙하높이는 원하는 위치로 자유로이 조절할 수 있도록 하였으며 배는 진공펌프와 고무 컵으로 잡도록 하였다. 배는 SSR(solid state relay)를 컴퓨터로 제어하여 낙하시켰으며 충격력

은 하중변환기(load cell)로 측정하였다.

계측 및 분석용 컴퓨터 프로그램 언어는 Visual Basic(ver. 6.0, Microsoft)으로 작성되었으며, 본 프로그램은 배가 자유낙하하기 시작하여 하중변환기에 1~2번 충격할 때까지 충격력과 시간을 계측하여 데이터 파일로 저장하는 부분과 저장된 데이터 파일을 불러들여 분석하는 프로그램으로 구성되었다.

각각의 배 시료에 대하여 저장된 데이터 파일을 불러들여 배가 하중변환기에 2번 충돌한 충격력-시간곡선을 도시하도록 하였으며 여기에서 첫 번째 충돌한 충격력-시간곡선을 마우스로 클릭하면 그림이 확대되어 도시되고 이 그림에서 최고충격력(peak force, PF), 충격시간(duration of time) 또는 접촉시간(contact time, CT), 최고충격력까지의 시간(time to peak force), 정지시간(dwel time), 역적(impulse) 등을 계산하여 출력하도록 하였다. 또한

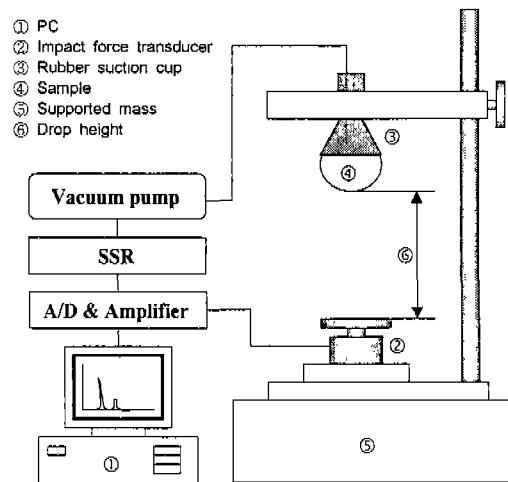


Fig. 1 Schematic diagram of the impact tester.

Table 2 Specifications of impact test and measuring system

Items	Specifications	Remarks
8 Channel strain gage measurement board	Acquisition rate : 7 kHz Resolution : 12 Bits	ADAC 5508G
Load cell	Rated load : 200 kg Rated output : 2.0345 mV/V Eerror : < 0.03 % R.O	KYOWA LU-200KE
SSR	Input voltage : 4~30 V	CELDEC
Vacuum pump	Output : 0.4 kW (1/2 HP)	DAEWON

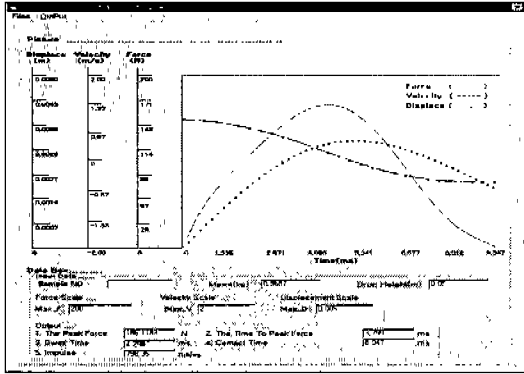


Fig. 2 The force, velocity and displacement curves of a typical pear dropping onto a rigid surface.

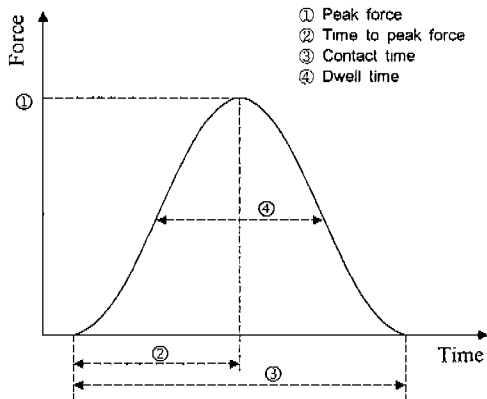


Fig. 3 Diagram of the impact force-time curve.

충격력-시간곡선을 시간에 대한 6차 다항식으로 구한 후 물체의 자유낙하식을 적용하여 가속도, 속도 및 변위를 계산하고 그래프로 나타낼 수 있도록 프로그램 하였으며 충격력-시간곡선, 속도-시간곡선, 변위-시간곡선은 그림 2와 같다.

그림 3은 충격특성치들에 대한 정의를 나타낸 그림이다.

다. 낙하높이 추정을 위한 이론식

과실과 같은 점탄성체의 안전낙하높이 즉 과실이 자유 낙하하여 충격에 의한 손상을 입지 않고 낙하할 수 있는 높이는 다음과 같은 이론 식으로 추정 될 수 있다. 질량 m 인 과실이 강체로 가정

될 수 있는 바닥에 충돌하여 충격이 일어났을 때 운동량(momentum)과 역적(impulse)의 관계는 다음과 같다.

$$mv_1 - mv_2 = \int Fdt \dots\dots\dots (1)$$

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 충격접촉 시간(contact time, t_c)의 1/2에서 최고충격력이 발생 되고 충격력은 시간에 대하여 직선적인 관계가 있다고 가정하면 (실제는 곡선적 관계) 식(1)의 우변의 적분은 최고충격력에 대하여 $t_c/2$ (time to peak force, t_{mf})까지만 하면 된다. 왜냐하면 충격력-시간곡선에서 최고충격력을 중심으로 하여 오른쪽은 압축 변형된 것이 회복되는 구간이므로 압축변형량과는 관계가 없기 때문이다.

$$mv_0 = \int_0^{t_{mf}} Fdt = \frac{1}{2} F_m t_{mf} \dots\dots\dots (2)$$

$$F_m = \frac{2mv_0}{t_{mf}} = \frac{2m\sqrt{2gH}}{t_{mf}} \dots\dots\dots (3)$$

여기서, F_m : 최고충격력 (N)

t_{mf} : 최고충격력에 도달하는 시간 (s)

H : 낙하높이 (m)

g : 중력가속도 (m/s^2)

또한 최고충격력(F_m)은 시간에 대해서 직선적으로 증가한다고 가정하면 식(1)은 식(2)과 같이 된다. 과실에 충격을 가하여 손상을 입지 않을 허용응력을 σ_b 라 하면 이 값은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_b \leq \frac{F_m}{A} \dots\dots\dots (4)$$

여기서, σ_b : 충격으로 손상을 입지 않을 응력 (Pa)

A : 충격으로 생기는 접촉면적 (m^2)

반경이 R 인 과실이 수평면에 충돌하여 생기는 접촉면적은 Hertz의 접촉이론(Sitkci, 1986)으로부터 다음과 같은 식이 된다.

$$A = \pi a^2 = \pi \left[\frac{(3F_m K/2)}{(2/R)} \right]^{2/3} = 2.5933(F_m K R)^{2/3} \\ = 2.6(F_m K R)^{2/3} = 2.6 \left(\frac{F_m(1-\mu^2)R}{E} \right)^{2/3} \dots (5)$$

여기서, $K = \frac{1-\mu^2}{E}$

μ : 과실의 포아송비 (무차원)

R : 과실의 반경=등가반경(equilibrium radius) (m)

a : 접촉면적의 장반경 (m)

식(3) 및 식(5)을 식(4)에 대입하고 낙하높이 H 에 대하여 최고충격력은 시간에 대하여 직선적으로 증가한다는 가정으로부터 다음 식과 같은 이론 낙하높이의 식이 된다.

$$H \leq \frac{0.9841 \sigma_b^5 (1-\mu^2)^4 R^4 t_c^2}{m^2 E^4} \dots \dots \dots (6)$$

여기서, E : 과실의 탄성계수 (Pa)

t_c : 충격접촉시간 (s)

충격실험을 통하여 얻어진 충격력-시간곡선을 적분한 식(1)을 식(2)으로 나누어 준 값을 N_1 (두 식의 충격량 비)이라 하면 식(6)은 다음과 같은 식이 되고 이식으로 실제의 낙하높이를 추정할 수 있다.

$$H \leq \frac{0.9841 N_1^2 \sigma_b^5 (1-\mu^2)^4 R^4 t_c^2}{m^2 E^4} \dots \dots \dots (7)$$

라. 실험방법

배의 낙하방향은 과실의 가장 연한 부분인 볼부분(check portion)이 충격판에 떨어지도록 하였으며, 배의 낙하높이는 5, 7.5, 10 및 12.5 cm에서 충격실험을 수행하였다. 여기서 한 번의 자유낙하 충격실험에 한 개의 배 시료를 사용하였으며, 각 시료를 자유낙하 시켜 배가 자유낙하하기 시작하

여 하중변환기에 1~2번 충격을 가할 때까지 충격력과 시간을 계속하였으며, 배가 하중변환기에 충격을 가하는 순간부터 0.17 ms의 일정한 시간간격으로 충격력을 측정하여 데이터 파일로 저장시켰다.

식(1)의 충격량을 계산하기 위해서는 충격력-시간곡선을 적분하여야 하므로 식은 적분하기에 편리하면서 모든 실험자료와도 잘 일치하는 식이어야 한다. 따라서 본 연구에서는 몇 가지 형태의 식을 실험자료에 적용해 보았던 결과, 실험자료와도 잘 일치하였고 적분하는 데도 편리한 것으로 판단되었던 식(8)과 같은 시간에 대한 6차 다항식을 이용하였다.

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

여기서, F : 충격력 (N)

a_1, b_1, \dots, g_1 : 실험계수 (무차원)

t : 접촉시간 (s)

또한 충격실험이 끝난 직후에 배의 시편(직경 17.6 mm, 길이 20 mm)을 채취하여 UTM(Universal Testing Machine)을 이용한 평판압축실험(하중재하 속도 25 mm/min)으로 배의 생물체항복강도 및 탄성계수를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 배의 충격특성치

낙하높이 4수준에서 총 156개의 배시료에 대하여 충격 실험하였던 결과를 요약하면 표 3에서와 같다. 표에서 보는 바와 같이 낙하높이에 따라 충격특성치들이 대체로 일률적인 경향을 나타내었으나 낙하높이 5 cm 및 10 cm 시료들에서의 생물체항복강도(BS)가 낙하높이 7.5 cm 및 12.5 cm 시료들에서 보다 약간 작았다는 것은 전자의 시료들이 상대적으로 연하다(soft)는 것을 의미한다. 충격접촉시간을 보면 연한 과실시료(낙하높이 5 cm 및 10 cm 시료)에서는 8.470 ms 및 8.403 ms로 단단한 과실시료(낙하높이 7.5 cm 및 12.5 cm 시료)의 6.980 ms 및 7.013 ms 보다 약간 긴 것을 알 수 있었으며 이러한 결과는 Brusewithz 등(1989) 및 Delwiche(1987)의 연구결과와도 잘 일치하고 있다. 이외의 다른 충격특성치들도 대체로 이러한 경향을 잘 따르고 있음을 알 수 있다.

Table 3 Impact characteristics of the pears

Parameters	Drop height(10 ⁻² m)			
	5	7.5	10	12.5
PF	190.790 (29.279)	263.253 (40.313)	279.127 (41.256)	331.194 (51.377)
PT	3.846 (0.536)	3.209 (0.517)	3.127 (0.491)	3.108 (0.486)
CT	8.470 (0.949)	6.980 (0.972)	8.403 (0.910)	7.013 (0.899)
PG	36.308 (5.894)	26.835 (4.109)	53.056 (6.258)	33.863 (5.237)
VC	0.817 (0.146)	0.903 (0.208)	1.121 (0.219)	1.104 (0.271)
C ₁	50.314 (10.682)	82.617 (19.282)	75.024 (14.965)	107.624 (25.285)
C ₂	13.473 (6.214)	26.635 (10.800)	20.331 (8.264)	35.720 (14.051)
BS	183.202 (26.478)	200.847 (35.396)	180.081 (24.321)	200.387 (32.391)
E	1169.238 (153.214)	1328.547 (194.864)	1149.326 (149.582)	1325.686 (194.864)
No. of samples	23	55	23	55

Note : PF = Peak force (N), PT = Time to peak force (ms), CT = Contact time (ms), PG = Peak G (g), VC = Velocity change (m/s) C₁ = PF/PT (kN/s), C₂ = PF/PT² (MN/s²), BS = Bioyield Strength (kPa), E = Apparent Elastic Modulus (kPa)
Values in parenthesis indicates standard deviation.

나. 생물체항복강도를 기준으로 한 이론 낙하 높이

배에 대한 이론 낙하높이는 식(6)을 이용하여 추정하였다. 여기서 충격을 가하여 배가 손상을 입지 않을 허용응력(σ_p)을 본 실험에서 측정된 생물체항복강도를 적용하였다. 생물체항복강도는 과실에 미세한 파괴가 시작되는 응력이므로 이 값은 배에 손상을 주지 않는 최소의 응력이라고 생각할 수 있기 때문이다(Kim et al., 1992; Jung, 1999; Park, 2001). 그 외의 다른 물리량들은 표 3에서 보는 바와 같이 본 실험에서 측정되었던 최고, 최저 및 평균치로, 다만 포아송비는 0.25, 0.35, 0.45로 가정(Chen et al., 1987)하여 이론 낙하높이를 추정하였다.

손상을 입지 않을 이론 낙하높이는 표 4에서 보는 바와 같이 약 1 cm에서 약 4 cm 정도로서 배의 경우 매우 낮은 높이에서 낙하 하더라도 손상이 생긴다는 것을 알 수 있으며 본 연구의 실험법 위 내에서는 배의 탄성계수가 작고 생물체항복강도와 배의 크기가 크면서 충격접촉시간이 긴 경우에 허용낙하높이가 높아진다는 것을 알 수 있다. 여기서 추정된 이론 낙하높이는 실제현상에서 보다는 낮게 추정된 값이다. 왜냐하면 식(6)에서 충격량(impulse)을 계산할 때, 충격력은 시간에 대하여 직선적으로 증가한다고 가정하여 삼각형의 면

적과 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.

다. 생물체항복강도를 기준으로 한 실제의 낙하 높이

강체와 같이 단단한 물체에 배가 자유낙하하여 충돌할 경우, 손상을 입지 않을 낙하높이를 추정하기 위하여 충격량을 식(1) 및 식(2)에 의하여 계산하고 그 비를 구하여 표 5에 나타내었다. 시료 그룹1은 그룹2에 비하여 약간 연한 시료로서 충격량은 계산치나 실측치에서 모두 그룹2의 값들보다 작은 반면 충격량비 N_1 은 약 3% 정도 더 큰 값으로 나타났다. 이러한 현상은 Delwiche 등(1987)의 복숭아에 대한 충격실험결과와도 잘 일치하는 것으로 연한 과실은 충격시에 접촉시간이 길고 최고충격력은 작으면서 좌우로 퍼지는 종 모양을 하고 단단한 과실은 충격량비 N_1 은 연한 과실에서 크게 나타나는 것으로 판단된다.

배가 단단한 물체에 자유낙하 하였을 때 손상을 입지 않을 낙하높이는 표 4의 충격량비 N_1 을 식(7)에 대입하여 추정하였으며 그 결과를 표 6에 나타내었다. 여기서 배의 탄성계수, 생물체항복강

Table 4 Theoretical 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	1.711		1.839		1.725		1.267		1.362		1.277		0.959		1.003		0.966	
	t_{c1}	1.711		1.839		1.725		1.267		1.362		1.277		0.959		1.003		0.966	
	R_1	1.711		1.839		1.725		1.267		1.362		1.277		0.959		1.003		0.966	
	m_2	2.669		2.868		2.690		1.977		2.214		1.992		1.495		1.606		1.507	
	t_{c2}	2.669		2.868		2.690		1.977		2.214		1.992		1.495		1.606		1.507	
	R_2	2.669		2.868		2.690		1.977		2.214		1.992		1.495		1.606		1.507	
	m_3	4.021		4.320		4.052		2.978		3.199		3.001		2.252		2.420		2.270	
	t_{c3}	4.021		4.320		4.052		2.978		3.199		3.001		2.252		2.420		2.270	
	R_3	4.021		4.320		4.052		2.978		3.199		3.001		2.252		2.420		2.270	

Note : $E_1 = 1149.326$ (kPa), $E_2 = 1238.937$ (kPa), $E_3 = 1328.547$ (kPa), $\sigma_{p1} = 180.081$ (kPa), $\sigma_{p2} = 190.464$ (kPa), $\sigma_{p3} = 200.847$ (kPa), $\mu_1 = 0.25$, $\mu_2 = 0.35$, $\mu_3 = 0.45$, $m_1 = 0.521$ (kg), $m_2 = 0.536$ (kg), $m_3 = 0.550$ (kg), $t_{c1} = 6.980$ (ms), $t_{c2} = 7.725$ (ms), $t_{c3} = 8.470$ (ms), $R_1 = 5.033$ (10^{-3} m), $R_2 = 5.423$ (10^{-3} m), $R_3 = 5.812$ (10^{-3} m)

Table 5 Average ratio of the impact measured to the theoretically calculated

	No. of pears	Impulse(10^{-3} N·s)		$N_I = M/C$
		Calculated (C)	Measured (M)	
Sample group 1	46	0.420 (0.066)	0.496 (0.055)	1.166 (0.062)
Sample group 2	98	0.464 (0.097)	0.521 (0.107)	1.128 (0.064)
Average	-	0.442	0.509	1.147

Note : Values in parenthesis indicates standard deviation.

Table 6. 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 ¹⁾	2.501	2.346	1.723	1.852	1.737	1.304	1.401	1.314									
	t_{c1}	2.175 ²⁾	2.337	2.192	1.610	1.731	1.623	1.220	1.310	1.229									
	R_1	2.252 ³⁾	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_{c2}	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_{c3}	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 : ¹⁾ the values estimated with $N_I=1.166$ (group1)
²⁾ the values estimated with $N_I=1.128$ (group2)
³⁾ the values estimated with $N_I=1.147$ (average of whole group)

도, 포아송비, 질량, 접촉시간 및 배의 등가반경 등은 표 4에 값을 사용하였다.

실험에 의하여 추정된 배에 손상을 주지 않는 낙하높이는 대체로 단단한 시료들인 그룹2의 경우 이론치보다 약 27%, 연한 시료들인 그룹1에서는 약 36% 더 높게 추정되었다. 모든 시료들에 대한

평균은 약 32% 정도 이론치보다 실험치가 높게 나타났다.

4. 결 론

우리나라의 수출유망과실 중의 하나인 배(신고)

에 대한 충격에 의한 손상을 입지 않을 허용낙하 높이를 구명하기 위하여 4수준의 낙하높이 별로 충격실험을 수행하였다. 이를 위하여 충격실험장치를 제작하였으며 실험장치구동, 충격특성인자들의 계측 및 분석용 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 또한 배의 충격특성 및 기계적 특성들을 측정하였다. 최고충격력은 낙하높이에 따라 증가되는 반면 접촉시간은 감소되고 연한 시료들에 대한 접촉시간은 단단한 시료에서 보다 약간 길었다. 배의 허용낙하높이는 생물제항복강도 및 접촉시간에 따라서는 증가되었으며 이론적 분석결과 약 1 cm에서 약 4 cm이었고 충격실험결과를 고려한 경우에는 약 1 cm에서 약 6 cm로 추정되었다. 낙하높이는 배의 물성에 따라 차이가 크므로 낙하높이를 추정할 때는 물성을 충분히 고려하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Brusewithz, 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. Diener, R. G., K. C. Elliott, P. E. Nesselroad, M. Ingel, R. E. Adams and S. H. Blizzard. 1979. Bruise energy of peaches and apples. *Trans. of the ASAE* 22(2):287-290.
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.
5. Delwiche, M. J. 1987. Theory of fruit firmness sorting by impact forces. *Trans. of the ASAE* 30(4):1160-1166.
6. Delwiche, M. J., S. Tang and J. J. Mehlschau. 1989. An impact force response fruit firmness sorter. *Trans. of the ASAE* 32(1):321-326.
7. Horsfield, B. C., R. B. Fridley and L. L. Claypool. 1972. Application of theory of elasticity to the design of fruits harvesting and handling equipment for minimum bruising. *Trans. of the ASAE* 15(4):746-750.
8. Jung, H. M. 1999. Mechanical properties of selected fruits and vegetables. Chungnam National University master thesis.
9. Kim, M. S., J. M. Park and D. S. Choi. 1992. Force-deformation characteristics of the fruit flesh. *KSAM* 17(2):156-170 (In Korea).
10. Lichtensteiger, M. J., R. G. Holmes, M. Y. Hamdy and J. L. Blaisdell. 1988. Impact parameters of spherical viscoelastic objects and tomatoes. *Trans. of the ASAE* 31(2):595-602.
11. Park, I. K. 2001. Impact characteristics of the pears. Chungnam National University master thesis.
12. Sitkei, Gy. 1986. *Mechanics of agricultural materials*. 166-185.