

수박 밀도 자동 계측시스템 개발

Development of Automatic Measurement System for Density of Watermelons

최규홍*	이강진*	손재룡*	김기영*	최동수*
정회원	정회원	정회원	정회원	정회원
K.H. Choi	K.J. Lee	J.R. Son	K.Y. Kim	D.S. Choi

1. 서론

원예산물은 출하과정에서 외관과 내부품질에 따라 분류되고, 그 결과에 따라 상품성과 가격이 결정된다. 수박의 경우에도 품질이나 가격은 크기, 무게, 외피모양, 타격할 때 나는 반사음, 촉감 등에 따라 결정되는데, 주로 경매사 또는 감별사의 경험이나 표본검사에 의존하고 있다. 최근 과실류에 비해 크고 껍질이 두꺼운 수박, 메론 등의 내부품질을 비파괴·실시간으로 판정하기 위한 연구가 국내외에서 활발히 수행중이다. 특히 X-선, 음파, 근적외선 등을 이용하여 속도, 공동, 당도, 밀도 등을 신속히 검출하기 위한 연구가 대부분을 차지하고 있다.

원예산물의 밀도나 비중은 내부성분, 속도, 내부붕괴(internal breakdown)와 같은 생리장해에 큰 영향을 받기 때문에, 밀도를 측정함으로써 내부품질에 대한 간접적인 판정이 가능하다. 일반적으로 생리장해를 입은 청과물은 비중이 낮은 반면에, 정상과의 경우에는 상대적으로 비중이 높다. 밀도는 어떤 물체의 단위 부피당 질량을 나타내는 척도로서 흔히 kg/m^3 또는 g/cm^3 의 단위를 사용하고, 물체의 비중은 물체의 밀도를 물 밀도에 대비하여 나타낸 것이다. 청과물의 밀도 또는 비중 측정에 가장 널리 사용되는 방법은 부력법(platform scale method)이다. 이 방법은 용기에 물을 채우고 대상물체를 용기에 넣고 완전히 물 속에 잠기게 하였을 때 물의 부피가 증가한 만큼 나타나는 저울의 무게를 측정하여 비중으로 환산한다.

Kato(1997)는 수박의 밀도는 공동(空洞), 크기, 당도 모두와 상관관계가 있다고 보고한 바 있다. 정전용량과 전자저울을 이용하여 측정된 체적과 중량으로부터 수박의 공동유무와 당도를 예측할 수 있는 온라인 선별시스템을 개발하였고, 현재 대형 수박선과장에 설치 활용중이다. 일본 생연기구(1998)에서는 CCD카메라를 이용하여 감귤(만감류)와 토마토의 부피과(浮皮果) 또는 공동과에 대한 선별결과, 변형과가 많은 토마토에서 큰 오차를 나타냈다. 즉 카메라 영상처리에 의한 공동과, 부피과 선별정밀도를 높이기 위해서는 3방향에서의 투영면적을 측정할 수 있도록 보완이 요구된다고 보고한 바 있다.

이 연구는 수박 밀도를 비파괴적이면서 신속히 판정할 수 있는 영상처리식 밀도 계측시스템과 부력식 밀도 계측시스템을 개발·평가하고, 수박의 밀도와 내부품질과의 상관관계를 분석하여 밀도를 이용한 수박 내부품질 판정가능성을 구명하고자 수행하였다.

* 농촌진흥청 농업기계화연구소

2. 밀도 계측시스템

가. 계측시스템 구성

수박과 같이 크기가 큰 대상물의 밀도를 실험실 등에서 간편하면서 어느 정도 정밀측정이 가능한 방법은 부력법이다. 이 방법은 일정 크기의 용기에 물을 가득 채운 후 대상물을 담가 배제된 물의 무게를 측정하여 밀도를 환산한다. 그러나 매번 측정할 때마다 물을 보충하고, 물을 계량해야하는 등 전처리과정이 복잡하고, 1회 측정하는데 3~5분 정도가 소요되는 단점이 있다.

따라서 이 연구에서는 위와 같은 계측상의 번거러움을 해소하고 동시에 신속하고 반복간 측정정밀도를 높일 수 있도록 밀도 계측시스템을 설계 제작하였다. 시스템은 그림 1에서 보는바와 같이 투명아크릴 수조(∅400×500), 로드셀, 프레임, 채반, 전기모터 및 제어장치로 구성하였다. 대기중에서와 수중에서의 수박 무게 측정을 위해 반구형 채반 2개를 그림과 같이 설치하여 수박이 수조에 완전히 잠길 수 있는 구조로 제작하였다. 수박의 잠기는 정도는 상부와 하부에 설치한 2개의 리미트스위치 사이의 거리를 변화시켜 조절하였다. 그리고 채반을 지지하는 수직 바(bar)를 20kg용량의 로드셀에 연결하여 무게를 측정하였다.

밀도 측정과정은 그림 2에서 보는 바와 같이 채반에 수박을 넣고 마우스로 “시작” 메뉴의 클릭과 동시에 대기중에서 수박 무게가 측정되고, 전기 모터에 의해 수박을 물에 완전히 침수시켜 물 속에서 5초 동안 정지 안정된 상태에서 무게를 측정된 후 다시 초기의 위치로 자동 복귀된다. 이때 이미 주어진 계산식에 의한 밀도계산, 결과의 저장, 계측시스템의 구동 및 제어를 위한 프로그램은 Visual C++/Microsoft를 이용하여 개발하였다. 그림 2와 그림 3는 각각 밀도 계측알고리즘과 컴퓨터 화면을 나타낸 것이다. 또한 온도에 따른 밀도 변화를 보상하기 위해 온도별 밀도표를 미리 입력하여 밀도 측정전의 물 온도를 입력할 수 있도록 메뉴에 포함시켰다.

밀도 환산은 공기에 의한 부력을 무시하고 수박 체적을 V라고 하면, 힘의 평형조건과 부력은 각각 식(1)과 식(2)으로 나타낼 수 있고, 수박 체적은 식(3)로 부터 구할 수 있다.

$$F_{air} = F_{water} + F_b \dots\dots\dots(1)$$

$$F_b = \rho_{water}V \dots\dots\dots(2)$$

$$V = (F_{air} - F_{water}) / \rho_{water} \dots\dots\dots(3)$$

여기서, F_{air} = 공기중의 수박 무게

F_{water} = 물속에서의 수박 무게

ρ_{water} = 물의 비중량(=1g/cm³)

따라서 수박 밀도 ρ 는 식(4)으로 표현할 수 있다.

$$\rho = F_{air} / V \dots\dots\dots(4)$$

나. 계측시스템 평가

밀도 계측시스템의 무게 측정에는 인장형 로드셀(CAS SB-20L, Max. 20kg)을 사용하였고, AD변환기의 분해능은 12bit이었다. 수박의 무게 측정범위를 4~10kg로 가정하면,

20kg 로드셀의 1 digit(1bit)로 발생하는 오차는 0.09~0.24%FS이다. 따라서 로드셀의 해상도는 0.001g/cm³ 이하였다.

밀도 계측시스템의 정확도를 확인하기 위해 탄력이 좋은 고무풍선에 수박 크기 정도로 물을 채워 고정채반에 넣고 밀도를 측정한 결과 1.002g/cm³을 나타내 물의 이론밀도 1g/cm³에 근접하는 결과를 보여 정확한 밀도 계측이 가능한 것으로 판단되었다. 또한 밀도 계측시스템의 측정 반복간 정밀도를 파악하기 위해 수박 6개를 임의로 선정하여 3반복 측정 시험한 결과, 표 1에서와 같이 측정표준편차가 0.001~0.004g/cm³로 대체로 양호한 결과를 나타냈다.

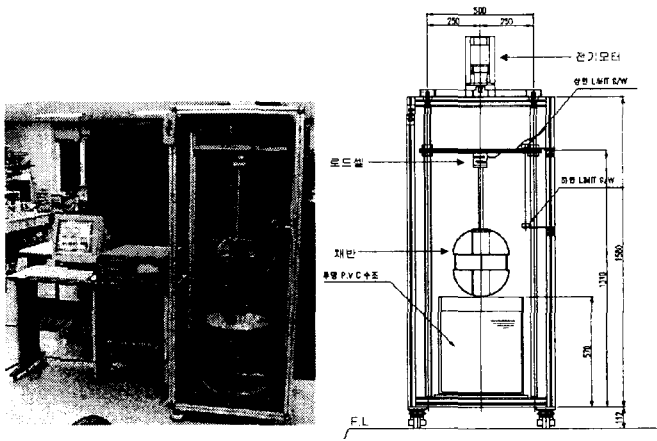


그림 1 부력식 밀도 계측시스템

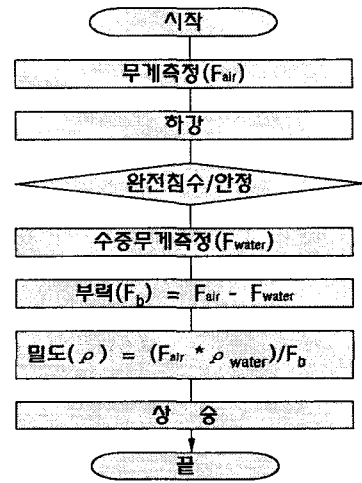


그림 2 밀도 계측알고리즘

한편, 수박 1개를 사람이 부력법으로 밀도를 5반복 측정했을 때 밀도는 최소 0.966g/cm³에서 최고 0.991g/cm³로 측정 반복간 차이가 컸고, 표준편차 역시 0.011g/cm³로 이 연구에서 개발된 계측시스템의 최대 측정편차 0.004g/cm³보다 2배 이상으로 높았다.

수원시 소재 원예연구소에서 재배된 삼복꿀수박 35개를 공시재료로 하여 밀도 계측시스템과 인력에 의한 부력법으로 밀도를 측정하였고, 그림 4과 표 2는 두 방법간 밀도 측정 결과를 비교한 것이다. 그림 4에서 보는바와 같이 계측시스템에 의해 측정된 수박 밀도는 사람이 측정했을 때 보다 낮게 측정되었고, 두 측정반복간 표준오차는 0.0592g/cm³로 큰 차이를 보였다.

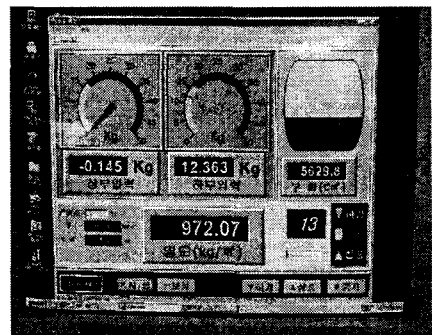


그림 3 밀도계측시스템 측정화면

그림 5는 부력식 밀도 계측시스템으로 측정된 수박 밀도와 공동 크기를 나타낸 것으로, 그림에서 보는바와 같이 공동이 클수록 밀도가 크게 감소하는 것을 보여 수박의 밀도 계측으로 공동 판정은 가능한 것으로 판단되었다.

표 1 계측시스템의 반복시험 및 측정방법과의 비교 단위(g/cm³)

구 분		수박1	수박2	수박3	수박4	수박5	수박6
계 측 시스템	반복 1	0.964	0.966	0.967	0.973	0.972	0.955
	반복 2	0.962	0.965	0.967	0.977	0.977	0.955
	반복 3	0.956	0.962	0.969	0.975	0.974	0.958
	평균 (표준편차)	0.961 (0.004)	0.965 (0.002)	0.968 (0.001)	0.975 (0.002)	0.974 (0.003)	0.956 (0.002)
인력계측		0.941	0.963	0.978	0.980	0.975	0.955

표 2 계측시스템 및 인력에 의한 밀도 측정결과 (2001 삼복풀수박)

No	진밀도	추정밀도	err ²	No	진밀도	추정밀도	err ²
1	0.999	0.965	0.0058	19	0.960	0.941	0.0032
2	0.997	0.984	0.0023	20	0.948	0.936	0.0020
3	0.972	0.958	0.0023	21	0.949	0.942	0.0012
4	0.975	0.970	0.0010	22	0.977	0.953	0.0040
5	0.880	0.890	0.0017	23	0.994	0.965	0.0048
6	0.966	0.953	0.0020	24	0.965	0.920	0.0077
7	0.984	0.964	0.0035	25	1.022	0.972	0.0085
8	0.937	0.933	0.0007	26	0.960	0.958	0.0002
9	0.944	0.942	0.0004	27	0.980	0.959	0.0036
10	0.986	0.971	0.0026	28	0.995	0.982	0.0022
11	0.956	0.945	0.0020	29	0.967	0.959	0.0014
12	0.974	0.939	0.0060	30	1.005	0.970	0.0060
13	0.975	0.948	0.0046	31	0.996	0.975	0.0035
14	0.994	0.953	0.0069	32	0.956	0.937	0.0032
15	1.001	0.960	0.0070	33	0.982	0.953	0.0048
16	0.936	0.933	0.0005	34	1.020	0.970	0.0085
17	0.958	0.948	0.0016	35	0.956	0.946	0.0016
18	0.981	0.948	0.0056				0.0592

표준오차 ; $err^2 = \sqrt{\frac{\sum(\text{진밀도} - \text{추정밀도})^2}{\text{개체수}}}$

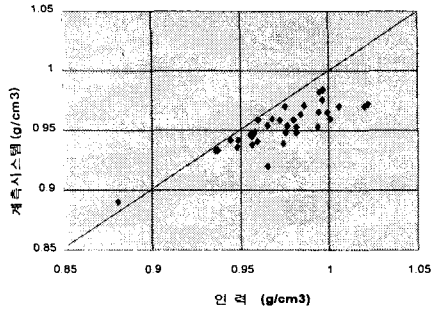


그림 4 계측시스템 및 인력에 의한 밀도 측정결과

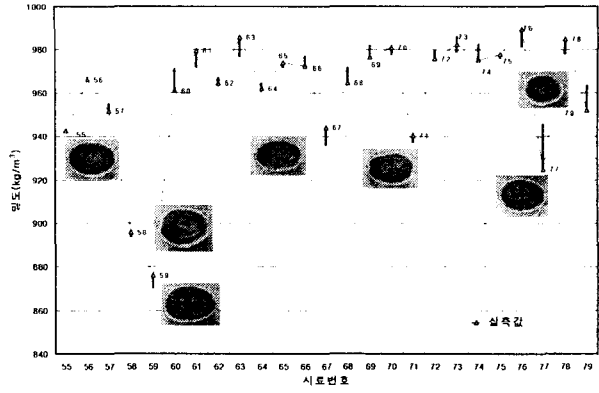
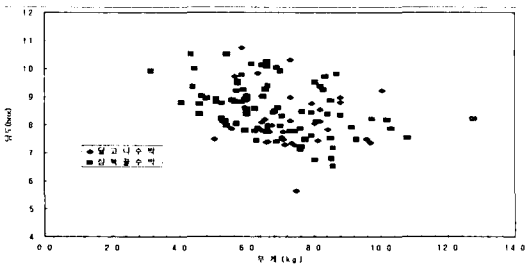
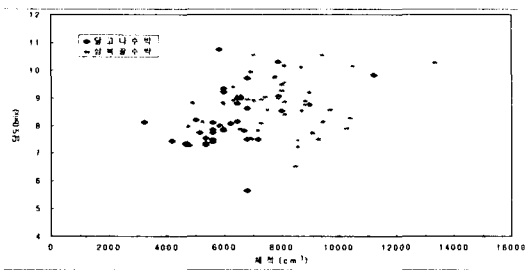


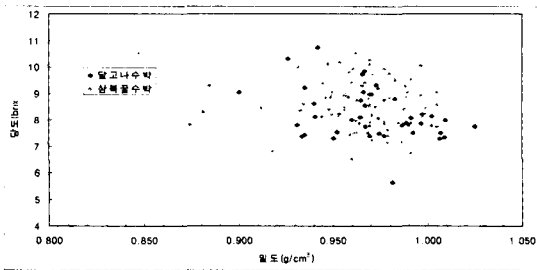
그림 5 수박 공동과의 밀도



(a) 무게 vs 당도

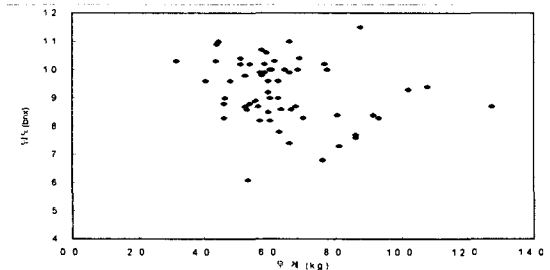


(b) 체적 vs 당도

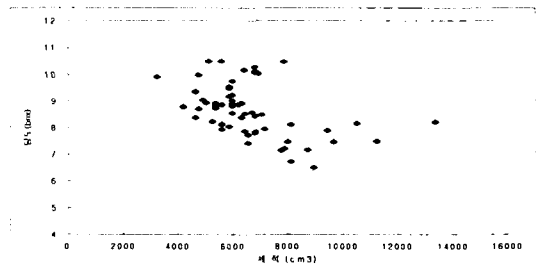


(c) 밀도 vs 당도

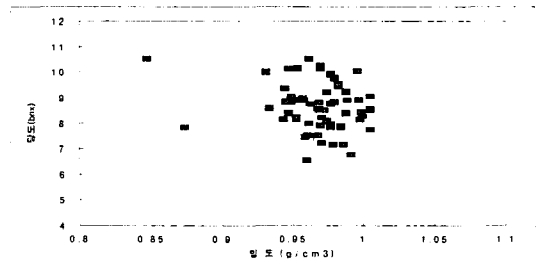
그림 6 수박의 무게, 체적, 밀도와 당도의 상관관계(2000년산 수박)



(a) 무게 vs 당도



(b) 체적 vs 당도



(c) 밀도 vs 당도

그림 7 수박의 무게, 체적, 밀도와 당도의 상관관계(2001년산 삼복꿀수박)

3. 수박 내부품질 특성 구명

가. 재료 및 방법

시험에 사용된 수박은 수원 소재 원예연구소 시험포장에서 재배한 삼복꿀수박과 달고나 수박으로, 2000년 시험에서는 삼복꿀수박 87개와 달고나 수박 39개를, 2001년도에는 삼복꿀수박 74개를 공시재료로 하였다.

수박의 내부품질인자와 계량이 가능한 물성 인자들과의 상관관계를 구명하고자 시료 각각의 당도, 무게, 길이, 직경, 체적, 밀도 등을 측정하였다. 한번 시험때 마다(수확일자별) 10~14개 수박을 수확하여 공시재료로 사용하였고, 시험절차는 다음과 같다.

- i) 각 공시수박의 무게, 길이, 직경, 둘레를 측정하고,
- ii) 밀도는 2000년 시험에서는 시험자가 부력법으로 직접 측정한 결과를 이용하였고, 2001년도 시험에서는 이 연구에서 개발된 부력식 밀도 계측시스템에 의해 측정된 결과를 이용하였다.
- iii) 수박을 절단하여 원예연구소에서 설정한 등급기준(표3 참고)에 따라 내부공동, 피수박, 황대를 육안으로 판정하고, 당도는 절단한 후 단면의 5개 지점[적도1, 적도2, 구심, 꼭지, 바닥]에서 일정한 크기(3×3×3cm³)의 과육으로부터 즙을 내어 굴절당도계(Atago DBX-55)로 측정하였다.

그리고 통계분석(SAS 8.1)을 통하여 각 요인간 상관관계를 구명하였다.

표 3 수박 내부결함 판정기준 (원예연구소, 2001)

구 분		정상	1	2	3	4	5
공동	공동간격(cm)	0	0.5 이하	0.5~1	1~1.5	1.5~2	2 이상
	공동길이(cm)	0	1 이하	1~3	3~5	5~7	7 이상
	공동면적(cm ²)	0	0.5 이하	0.5~3	3~7.5	7.5~14	14 이상
황대	황대길이(cm)	0	1 이하	1~5	5~9	9~13	13 이상
	폭(cm)	0	0.2 이하	0.2~0.6	0.6~1	1~1.4	1.4 이상
	면 적(cm ²)	0	0.2 이하	0.2~3	3~9	9~18	18 이상
	Y 값	0	80~85	85~90	90~95	95~100	100 이상
피수박	과육색(a값)	22이상	20~22	18~20	16~18	14~16	14 이하
	면적(cm ²)	0	0.5 이하	0.5~3.0	3.0~7.5	7.5~14.0	14 이상

나. 결과 및 고찰

표 4는 시험 결과를 요약한 것으로, 무게, 길이, 직경, 체적의 평균값이 시험년도에 큰 차이를 보인 것은 2000년도와 2001년도 시험이 각각 출수후 30~56일과 출수후 20~48일에 이루어진 것에 따른 것으로 판단된다. 당도의 경우 구심부위가 다른 부위에 비해 0.6~0.8Brix 높게 나타났다.

그림 6과 그림 7은 각각 2000년, 2001년도산 수박의 무게와 당도, 체적과 당도, 밀도와 당도의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 대표적인 내부품질인자라 할 수 있

는 당도는 측정이 용이한 외관인자와 뚜렷한 상관관계를 보이지 않았다. 표 5과 표 6는 2000년도산 공시 수박의 당도, 밀도 및 외관인자들간의 관계를 나타낸 것이다. 무게, 길이, 직경, 체적 등 외관인자들간에는 두 품종 모두에서 높은 상관관계를 보였으나, 이들 외관인자와 밀도, 당도 등 내부품질인자들과는 매우 낮은 상관관계를 보였다. 다시 말해 계측이 용이한 외관인자로부터 내부품질상태를 예측하는데는 한계가 있는 것으로 판단된다.

표 4 공시수박 외관 및 내부품질

연도 품종 시료수	시료 번호	무게 (kg)	길이 (mm)	직경 (mm)	둘레 (mm)	체적 (cm ³)	밀도 (g/cm ³)	당도1	당도2	당도3	당도4	당도5	평균 당도	껍질 두께 (mm)
2000 달고나 39개	Min	5.05	215	210	670	5015	0.900	5.5	4.2	6.0	4.6	5.8	5.6	8
	Max	10.05	287	265	822	10746	1.025	11.2	10.1	11.2	10.6	11.2	10.7	19
	Ave.	7.26	252	233	738	7491	0.970	7.9	7.9	9.0	8.1	8.3	8.2	13
	Var	1.35	275	172	1428		0.001	1.5	1.2	1.5	1.8	1.7	1.0	8
2000 삼복꿀 87개	Min	3.15	202	177	556	3224	0.847	4.5	5.3	6.1	6.0	4.8	6.5	7
	Max	12.75	335	271	865	13373	1.110	11.8	11.1	11.5	11.2	11.0	10.5	21
	Ave.	6.82	269	218	690	7065	0.966	8.4	8.4	9.2	8.6	8.5	8.6	14
	Var	2.76	571	273	3037		0.001	1.8	1.9	1.2	1.6	1.9	0.9	7
2001 삼복꿀 63개	Min	1.15	130	118	375	1254	0.917	3.9	3.8	4.9	2.5	3.6	4.4	9
	Max	7.85	288	234	736	8063	1.169	11.3	10.3	11.6	11.4	10.9	10.7	20
	Ave.	4.65	226	187	598	4743	0.979	7.5	7.3	8.5	7.5	7.7	7.7	13
	var	2.85	1109	624	4925		0.001	3.6	2.9	3.0	5.5	4.6	3.4	5

당도측정부위 : 당도1(적도1), 당도2(적도2), 당도3(구심), 당도4(꼭지), 당도5(화흔부)

표 7과 표 8는 수박의 무게, 체적, 밀도, 당도의 출수일(수확일)별 유의성 검정결과를 나타낸 것이다. 2000년도산 삼복꿀수박의 경우에는 표 7에서와 같이 모든 인자에서 출수일 경과에 따른 뚜렷한 유의차가 나타나지 않았다. 그러나 2001년시험에서는 표 8에서 보는 바와 같이 무게와 체적은 경과일수에 따라 유의차를 나타냈다. 당도 역시 성장기인 출수후 20~35일 사이에는 뚜렷한 차이가 나타났으나, 39일 이후에는 당도가 더 이상 증가하지 않는 경향을 보였다. 한편 밀도는 2000년도와 2001년도산 수박시험 모두에서 출수일별 통계적 수준의 유의차가 없는 것으로 나타났다. 이 같이 시험연차별로 차이를 보인 것은 2000년도의 봄기상상태가 나빠 생육이 불균일이 심한 수박과 불량 수박이 많이 포함된 것에 기인한 것으로 판단된다. 표 9와 표 10은 외관인자들과 당도 예측 회귀식이다. 결론적으로 계측이 용이한 수박의 물리적인자(무게, 길이, 직경, 부피, 밀도)로 내부품질을 예측하는데는 극단적인 결함을 제외하고는 불가능한 있는 것으로 판단되었다.

표 5 품질인자들간의 상관관계 (2000년산 삼복꿀수박)

	Weight	Length	Diameter	SSC	Vactual	Dactual
Weight	1.000					
Length	0.917	1.000				
Diameter	0.929	0.789	1.000			
SSC	-0.375	-0.299	-0.396	1.000		
Vactual	0.990	0.918	0.928	-0.381	1.000	
Dactual	0.116	0.028	0.052	-0.005	-0.019	1.000

SSC : Soluble Solid Content

Vactua : Volume measured by prototype

Dactual : Density measured by prototype

표 6 품질인자들간의 상관관계 (2000년산 달고나수박)

	Weight	Length	Diameter	SSC	Vactual	Dactual
Weight	1.000					
Length	0.888	1.000				
Diameter	0.918	0.709	1.000			
SSC	-0.093	-0.002	-0.057	1.000		
Vactual	0.985	0.905	0.898	-0.031	1.000	
Dactual	-0.075	-0.254	-0.026	-0.369	-0.244	1.000

SSC : Soluble Solid Content

Vactua : Volume measured by prototype

Dactual : Density measured by prototype

표 7 출수일별 유의성 검정 (2000년산, 삼복꿀수박)

Treatment	Weight	Volume	Density	Sugar content
DAH 56	8.52a	8.77a	0.972a	8.45c
51	5.92cd	6.09cd	0.970a	9.56ab
48	5.43cd	5.66cd	0.956a	8.93bc
44	7.20b	7.41b	0.970a	8.65bc
40	6.35bc	6.45bc	0.980a	9.98a
30	4.93d	5.11d	0.963a	9.95a
F-value	10.47	10.41	0.62	4.72
P-value	0.0001	0.0001	0.6831	0.0012

표 8 출수일별 유의성 검정 (2001년산, 삼복꿀수박)

Treatment	Weight	Volume	Density	Sugar content
DAH 48	5.59b	5.67b	0.985ab	10.33a
42	6.68a	6.86a	0.972bc	10.38a
39	6.12ab	6.18b	0.981ab	9.93ab
35	4.56c	4.52c	1.005a	9.35b
29	-	-	-	8.44c
23	3.56d	3.66d	0.977abc	7.06d
20	2.83e	2.97e	0.953c	6.20e
F-value	50.27	43.89	3.62	41.08
P-value	0.0001	0.0001	0.0065	0.0001

표 9 수박 당도예측 회귀모델 (2000년산, 삼복꿀수박)

Variable	Reg. Equation	F	R ²
W	SSC = 10.239 - 0.154W	3.44	0.0559
V	SSC = 10.278 - 0.155V	3.64	0.0597
D	SSC = 10.100 - 0.874D	0.04	0.0007
W, V	SSC = 10.282 + 0.170W - 0.322V	1.82	0.0601
W, V, D	SSC = 37.676 + 4.299W - 4.288V - 28.577D	1.77	0.0868

W : Weight

V : Volume

D : Density

표 10 수박 당도예측 회귀모델 (2001년산, 삼복꿀수박)

Variable	Reg. Equation	F	R ²
W	SSC = 4.492 + 0.898W	75.66	0.5536
V	SSC = 4.616 + 0.857V	62.07	0.5237
D	SSC = -8.246 + 17.464D	6.79	0.1002
W, V	SSC = 4.531 + 4.148W - 3.200V	45.39	0.6021
W, V, D	SSC = -10.102 + 0.423W + 0.435V + 15.041D	31.17	0.6131

W : Weight

V : Volume

D : Density

4. 요약 및 결론

이 연구는 수박 비파괴 품질판정기술 개발 일환으로 수행되었으며, 측정이 용이한 인자들과 수박 내부품질과의 상관관계를 구명하였다. 특히 밀도 측정에 의해 수박의 당도, 속도, 공동, 피수박, 황대 등 내부결함의 판정가능성을 구명하고자 수행되었다.

이 연구에서 개발된 부력식 밀도 실시간 계측시스템의 밀도측정 분해능은 $0.001\text{g}/\text{cm}^3$ FS 이었고, 탄력이 좋은 고무풍선에 물을 채워 밀도를 측정한 결과 $1.002\text{g}/\text{cm}^3$ 로 물의 이론밀도 ($\approx 1.0\text{g}/\text{cm}^3$)에 근접하였다. 수박을 이용한 밀도 측정시험에서 표준편차는 $0.001\sim 0.004\text{g}/\text{cm}^3$ 로 재현성이 우수하였다.

출수일별로 수확하여 체적, 무게, 밀도 및 당도를 측정하고 통계분석한 결과, 체적, 무게 및 당도는 출수후 35일까지는 유의차를 보였다. 그러나 35일 이후에는 뚜렷한 유의차가 나타나지 않았다. 특히, 밀도는 출수일에 따라 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다.

인용문헌

1. 김만수 외 3인. 1998. 수박의 음향특성에 관한 연구. 한국농업기계학회지 23(1): 57-66
2. 최동수 5인. 1999. 인공신경망을 이용한 수박의 음향특성 분석(I) -속도 및 공동-. 한국농업기계학회 학술논문집 4(1): 652-660
3. Koro Kato. 1997. Electrical Density Sorting and Estimation of Soluble Solids Content of Watermelon. J. agric. Engng Res. 67: 161-170