

畫像分析法을 利用한 밀의 硬·軟質性 區分

박동수* · 고종민* · 서득룡* · 김경민** · 손재근**

Using Image Analysis Technique to Test Grain Hardness in Wheat

Dong-Soo Park*, Jong-Min Ko*, Duck-Yong Suh*,
Kyung-Min Kim**and Jae-Keun Sohn**

ABSTRACT: The development of new approaches for wheat grain hardness assessment may impact the grain industry in marketing, milling and breeding. This experiment was to develop a new method for fast identification between softness and hardness, and for maintaining germinability of seed after measurement in wheat. Results from the comparisons of accuracy and significance between image analysis and conventional methods(NIRS and textrometer) were summarized. Data obtained from image analysis for grain hardness did not show any difference from those of the conventional methods. The protein content analyzed by micro-Kjeldahl method was significantly correlated with the grain hardness measured by image analysis, textrometer, and NIRS. The analysis for wheat grain hardness using image analysis may be used as an alternative method to the conventional methods. This method also takes the seeds after analysis can be utilized as breeding materials in early generations.

Key words : *Triticum aestivum*, Image analysis, Hardness.

밀(*Triticum aestivum* L.)은 세계적으로 가장 중요한 식량 작물중의 하나이며 蛋白質含量 또한 높은 작물이다. 밀에 있어서 硬·軟質性은 밀의 用途를 결정하는 기본적인 기준이 되며 일반적으로 경질은 빵용으로, 연질은 국수용 또는 과자용으로 이용되고 있다.

밀의 경도를 數理的으로 나타내는 방법으로는 곡립을 파쇄하는데 소요되는 힘을 중량으로 표시하여 나타내거나¹⁾, 搗精抵抗性²⁾ 또는 礫子質率¹⁷⁾의 정도에 따라 구분하고 있다. 초자질율에 의한 경·연질성은 곡립을 절단하였을 때 나타나는 절단면의 투광도에 따라 초자질 부분과 흰색의 분상질 부분으로 구분할 수 있으며 초자질율은 전체

곡립에 대한 초자질 부분의 면적비로 판정한다^{15, 17)}. 그러나 礫子質率의 측정은 곡립내에서 礫子質部分과 粉狀質部分을 구분하는 基準이 불명확한 문제점이 있다는 보고¹⁶⁾가 있으며 이의 측정은 客觀的이지 못하다는 보고¹⁵⁾도 있었다. 그후 일정한 중량의 곡립을 분쇄하는데 소요되는 시간으로 측정하는 방법¹¹⁾과 particle-size index에 의한 방법^{17,18,19)} 및 近赤外分光分析法(NIRS)을 이용하는 방법^{2,5,16)} 등에 의해 밀의 경·연질성이 구분되고 있다. 그러나 이러한 방법은 곡립의 파쇄 또는 분쇄를 통하여 경·연질성을 구분하기 때문에 종자의 再生이 불가능한 단점이 있다. 최근에는 硬度測定의 정확성을 높이기 위하여 畫像分析法에 의해 밀

* 영남농업시험장(National Yeongnam Agricultural Experiment Station, RDA, Milyang 627-130, Korea)

** 경북대학교 농과대학(College of Agr., Kyungpook National Univ., Taegu 702-701, Korea) <97. 6. 7 接受>

가루의 경도를 측정된 보고^{20,21)}도 있으나 이 방법 역시 곡립을 분쇄하기 때문에 측정후 종자의 發芽力이 喪失되는 문제점이 있어서 初期世代에 있어서의 선발에는 적용하기 어려운 단점이 있다.

畫像分析은 인간이 보는 視覺情報을 數值化하여 해석하는 것으로 농학분야에서의 응용은 현미경하에서 染色體의 形態識別⁶⁾, 보리의 白度檢定⁷⁾, 포장에서 콩의 生育診斷¹²⁾, 米粒의 형태로부터 品種의 判別¹⁾ 등 많은 분야에서 화상분석의 이용이 시도되고 있다.

따라서 본 연구는 畫像分析法에 의해 곡립의 發芽力에 영향을 주지 않고 硝子質部分과 粉狀質部分을 보다 객관적인 방법으로 區分하여 硝子質率을 구할 수 있는 方法을 摸索하고 이러한 화상분석법과 기존의 측정방법과 比較分析하기 위하여 수행하였다.

材料 및 方法

밀의 硝子質 檢定材料를 마련하기 위하여 올밀 등 40품종 및 계통을 1995년 10월 23일에 畦幅 40cm, 株間距離 10cm로 嶺南農業試驗場 田作圃場에서 10월 23일 파종하였으며 施肥量은 N-P₂O₅-K₂O를 10-8-8kg/10a로 하였고 기타 재배법은 嶺南農業試驗場 標準栽培法에 준하였다.

畫像分析法을 통한 초자질율의 측정은 밀 품종당 100립씩 3반복으로 수행하였다. 곡립을 세로로 세워 절반 정도가 clay block에 삽입시켜 고정된 후 麥芽分析機의 보조기기인 切斷機(disc sander)를 이용하여 곡립을 절단하였다. 畫像分析에는 Kontron Image System, KS 400(Kontron Electronic GmbH, Germany)을 사용하였다. 곡립이 고정되어진 clay block은 3CCD(3 charge coupled device) 카메라를 이용하여 컴퓨터에 입력하였고 입력된 화상의 크기는 256가지 흑백 농도값을 가지는 고해상도 모니터에 560×425 pixel(畫素)로 나타내었으며 2개의 halogen lamp(75W)를 사용하여 동일한 조도하에서 화상을 입력하였다.

종실의 硬度는 硬度計(Textrometer ; Text analyser, XT.RA Dimension)를 이용하였으며 품종당 10개의 곡립을 2mm 체로 건조립을 선립한 후 60℃ 건조기에 2일간 건조하여 수분함량이 11±0.5%가 되도록 조절하여 시료로 이용하였다. 硬度測定은 Lai 등¹⁰⁾의 방법에 따라 각 Compression test를 실시하였으며 test speed는 1mm/sec로 고정하여 종실이 처음 파괴되는 순간의 압력(first peak)과 최대압력(highest peak)을 각각 kg으로 표시하였다.

近赤外分光分析法(NIRS)에 의한 硬度測定을 위하여 Tempering한 시료를 수분이 14%이하가 될 때까지 상온에서 건조시킨 후 Heico sample mill(Model TI-100)을 이용하여 10초간 분쇄하고 150μm 체를 이용하여 밀기울을 제거한 후 근적외 스펙트럼 측정용 시료용기에 밀가루 2g을 넣고 近赤外分光分析裝置(NIRS system 6500)에 장착한 후 NSAS(NIRS system data analysis software)를 사용하여 400nm에서 2,500nm까지의 스펙트럼을 측정하고 吸光度資料를 컴퓨터에 입력하여 微分變換한 후 AACC방법²⁾에 의해 赤外線 波長인 1,680nm와 2,230nm 범위의 미분변환된 자료와 回歸式을 사용하여 측정하였다.

밀가루의 蛋白質含量 測定은 NIRS에서 사용한 동일시료 0.5g을 H₂SO₄-H₂O₂로 濕式分解시켜 micro-Kjeldahl법에 따라 全窒素含量을 정량한 후 窒素計數 5.82를 곱하여 환산하였다.

結果 및 考察

畫像分析을 통한 밀 硝子質率 측정은 穀粒切斷部에 나타나는 흑백 농도값(glay value)의 차이를 數值化하여 硝子質部分과 粉狀質部分을 분할하는 기준값을 설정하는 첫 번째 畫像分析段階와 설정된 기준값을 이용해 곡립내의 초자질부와 분상질부의 면적을 구하여 각 품종들의 초자질율을 측정하는 두 번째 화상분석단계로 구분하여 수행하였다.

입력된 初期畫像이 화상처리되어 곡립의 평균 흑백농도값을 측정하는 과정은 그림 1에서 나타

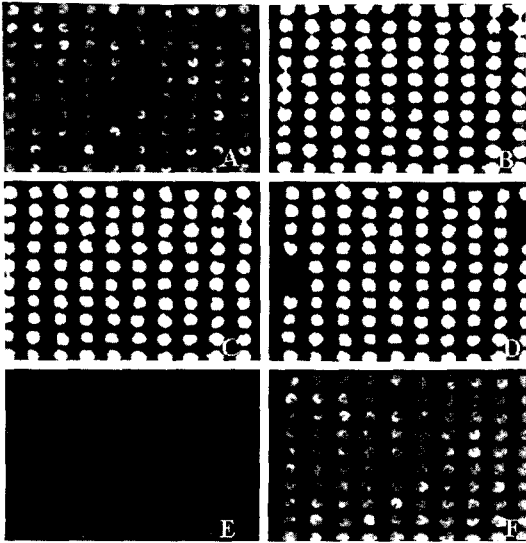
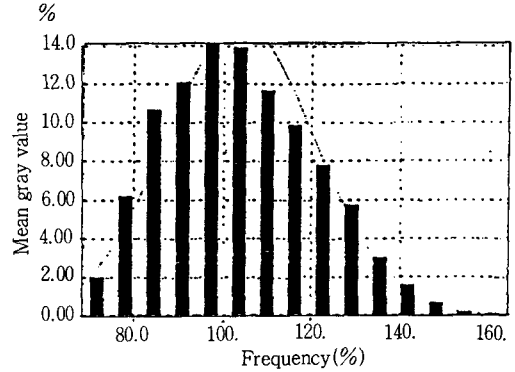


Fig. 1. Making process of optical image for 40 wheat varieties measured by image analysis.

난 바와 같이 최초의 입력화상은 곡립절단부의 최적 흑백농도값을 얻기 위해 많은 화상처리과정을 거쳤다. 우선 화상을 256단계의 濃度分布(검은색은 0, 흰색은 255)를 가지는 黑白畫像(그림 1A)으로 전환한 후, 컴퓨터가 측정하고자 하는 대상을 인식할 수 있도록 穀粒(object)은 흰색으로, 背景(background)은 검은색으로 표시되는 1차 binary화상(그림 1B)을 만들었다. 그러나 이 binary화상에는 측정하고자 하는 대상물외에 非測定對象物(noise)이 흰색으로 남아있는 경우가 많고, 또한 측정대상물인 흰색부분이 실제 곡립의 크기보다 크거나 작을 수 있으며 어떤 경우에는 대상물들이 상호 겹쳐지는 경우도 있기 때문에 비측정 대상물을 제외한 최적의 binary화상을 만들기 위하여 順次的으로 畫像處理하였다(그림 1C, 그림 1D).

최적 binary화상(그림 1D)에서 측정대상물과 배경과의 경계부분만을 지정한 화상(그림 1E)을 만든 후, 초기 입력화상과 최종 처리화상을 겹쳐 모든 화상처리 과정이 정확히 수행되었는지를 판정하기 위해 確認畫像(그림 1F)을 만들었다. 확인화상이 만들어지면 확인화상내 주어진 각 곡립



Statistics	
tile	glassy10
parameter	MEAND
counts	11833
lower bound	68.5085
upper bound	164.058
underflow	0
in range	11833
overflow	0
classes	15
modul	6.36998
minimum count	11
maximun count	1675

Statistics	
minimum	68.5085
maximum	163.958
sum	1.22853e+006
median value	102.533
mean	103.822
variance	285.534
std. dev.	16.8978
skewness	0.36098
kurtosis	-0.400903

Fig. 2. Data histogram for mean gray value of 40 wheat varieties measured by image analysis.

의 평균 흑백농도값을 자동측정하여 한개 화상의 첫 번째 화상분석단계를 완료하였다. 이후 이러한 과정이 자동으로 반복될 수 있는 프로그램을 작성하여 공시된 40개 품종을 자동 화상분석한 결과는 그림 2에 나타내었다.

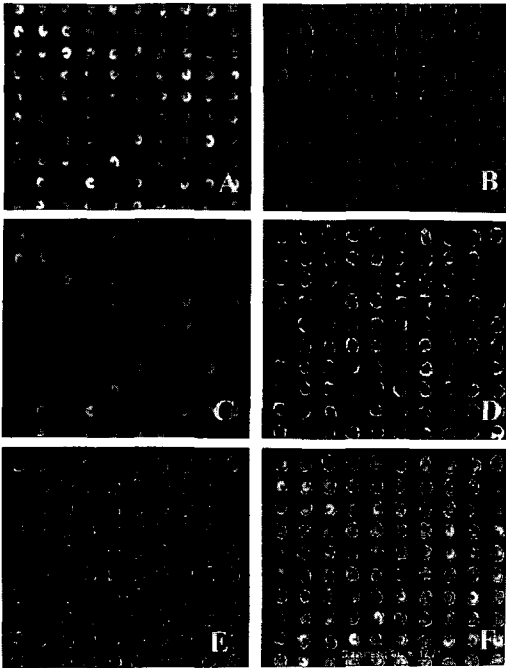


Fig. 3. Major process for measuring glassiness of 40 wheat varieties by image analysis.

11,833립의 평균 흑백농도값에 대한 頻度分布에서 平均과 中位數는 각각 103.822와 102.533, 최대값과 최소값은 각각 163.958과 68.51을 나타내었으며, 正規分布曲線에 가까운 分布樣相을 보였다. 곡립의 평균 흑백농도값의 분포가 正規分布에 가까웠기 때문에 흑백농도값의 빈도분포상에서 최저값에서 중위수인 102까지를 초자질로 규정하여 초자질 부분과 분상질 부분을 구분하는 기준값으로 하였다. 두 번째 畫像分析段階인 각 품종의 硝子質率을 구하기 위한 과정은 그림 3에 표시한 바와 같다. 입력된 初期畫像(그림 2A)을 그림 1의 화상처리 과정을 거쳐 1개의 화상 내에

測定對象物인 각 곡립들의 총면적을 구하고(그림 3B), 그림 1B와 그림 1G를 조합하여 면적이 측정되는 부분의 黑白畫像(그림 3C)을 추출하며, 이 화상에 첫번째 화상분석 단계에서 설정된 초자질 부분의 흑백농도값인 최저 68과 초자질 한계값 102를 지정하여 binary畫像(그림 3D)을 만들고 초자질 부분의 면적만을 측정하였다(그림 3E). 품종별로 입력된 화상 내의 전체 곡립면적에 대한 초자질로 구분된 부분의 면적비를 초자질율로 계산하여 한 품종의 畫像分析을 완료하였다(그림 3F). 이후의 모든 과정은 첫번째 분석과정과 동일하게 하여 모든 품종들의 초자질율을 自動分析하였다.

畫像分析法을 이용하여 밀 40품종에 대한 硝子質率을 측정한 결과는 표 1에서 나타난 바와 같이 F-value가 149.80으로 품종간에 고도의 유의성이 인정되었으며 CV 또한 4.59%로 나타났다.

화상분석법을 이용한 초자질율의 측정은 시료의 준비와 화상의 입력만 완료되면 이후의 처리과정은 모두 computer program에 의해 진행되므로 측정에 필요한 시간을 크게 줄일 수 있었다.

또한 검정후 종자를 다시 이용하고자 할 경우 곡립을 clay block에 고정할 때 胚가 있는 부분을 아래로 향하게 함으로서 穀粒의 保存이 가능하며 種子의 發芽力을 維持시킬 수 있어 初期世代에서 硬·軟質性에 대한 選抜이 가능한 장점이 있다.

硬度計에 의한 곡립의 경도측정은 표 2에서와 같이 最初頂點과 最高頂點의 F-value가 각각 11.190과 7.844로 품종간 유의성이 인정되었으나 실질적으로 연질밀임에도 불구하고 경질밀과 거의 같은 수준의 수치를 나타내는 경우가 많았다. 또한 반복간의 균일성을 유추할 수 있는 CV는 최초 정점과 최고정점에서 각각 9.48%와 10.12%로 나타나 화상분석법에 비해 그 변이성이 큰 것으로

Table 1. Analysis of variance of hardness measured by image analysis of 40 wheat varieties

Components	df	SS	MS	F-value	CV(%)
Total	119	42837.50			
Variety	39	42258.80	1083.56	149.80**	
Error	80	578.68	7.23		4.59

** : significant at 1% level.

Table 2. Analysis of variance of hardness measured by textrometer of 40 wheat varieties

Components	df	SS		MS		F-value		CV(%)	
		A	B	A	B	A	B	A	B
Total	399	1008.54	777.01						
Variety	39	552.66	356.96	14.17	9.15	11.19**	7.84**		
Error	360	455.88	420.05	1.27	1.17			9.48	10.12

A ; weight of first peak, B ; weight of highest peak, ** ; significant at 1% level.

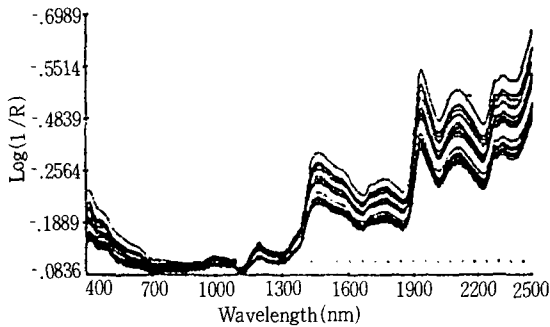


Fig. 4. NIR spectra of flour samples of 40 wheat varieties.

나타났다. 이는 硬度計를 이용한 곡립의 경도측정은 종피의 두께, 종구의 깊이, 종실의 크기, 수분함량에 의해 영향을 받으며 compression force에 대한 저항성은 특히 종구의 깊이가 크게 관여한다는 Hong & Baikik⁸⁾의 보고와 비슷한 경향이었다.

NIRS를 이용한 밀가루의 硬·軟質性 區分을 위하여 400nm에서 2,500nm 범위의 波長에서 검정한 결과 그림 4에서와 같이 3가지 종류의 뚜렷한 吸光率의 범위를 볼 수 있었다.

이상과 같이 밀 40품종에 대하여 畫像分析法을 이용한 硝子質率, 硬度計에 의한 경도, NIRS를 이용한 경도와 蛋白質含量과의 관계를 조사한 결과는 표 3과 같다.

공시품종 중 우리 나라에서 육성된 품종은 대부분 硝子質率이 낮았으며 특히 그루밀의 경우 초자질율과 곡립경도 및 단백질 함량은 높았으나 NIRS에 의한 경도값은 비교적 낮아 측정방법에 따라 상이한 결과를 나타내는 품종도 있었다. 초자질율이 가장 높았던 품종은 Guamuehil로 초자질을 90.95%를 나타내었으며 경도계에 의한

곡립경도 또한 최초정점, 최고정점 모두 12.19로 가장 높았으며 NIRS에 의한 경도값에서도 604.15로 가장 높은 것으로 나타났고 단백질 역시 비교적 높은 것으로 나타났다.

또한 초자질율이 가장 낮았던 품종은 Sr10으로 17.71%를 나타내었으며 경도, 경도값, 단백질 함량이 역시 비교적 낮은 경향이였다. 이러한 측정 결과를 이용하여 분석한 畫像分析法, 硬度計, NIRS에 의한 경도값 및 蛋白質含量의 相關關係를 나타내면 표 4와 같다.

畫像分析法을 이용하여 측정한 硝子質率은 硬度計 및 NIRS에 의한 방법과 고도로 유의적인 상관이 인정되었으며 蛋白質含量과도 0.6126의 고도로 유의한 정의 상관이 인정되었다. 이러한 결과는 Pomeranz et al.¹⁴⁾이 밀의 경도분석을 위해 NIRS를 이용하여 1,850nm에서의 흡광도와 particle size index 및 搗精抵抗性 등에 의한 측정결과, 단백질 함량간의 상관계수는 particle size index와 NIRS에 의한 방법이 고도로 유의한 상관이 있었으며 NIRS에 의한 측정치와 단백질 함량간에도 유의적인 상관이 인정된다고 보고한 결과와 비슷한 경향이었다. 그러나 화상의 입력시 조도가 달라지면 흑백농도값이 달라지므로 적절한 조도를 설정하는 것과 균일한 조도를 유지할 수 있는 방법에 대한 문제가 극복된다면 화상분석법에 의한 초자질을 측정은 기존의 방법과 함께 밀의 연경질성 구분의 새로운 측정방법으로 사용이 가능할 것으로 사료되었다.

밀의 硬·軟質性 區分을 위해 畫像分析法에 의한 硝子質率 측정방법과 기존 방법과의 효율을 상호 비교한 결과(표 5), 화상분석법은 경도계와 NIRS를 통한 분석에서 필요한 곡립의 건조과정이 생략되고 측정에 소요되는 시간이 59초로 다른

Table 3. Protein content and grain hardness of 40 varieties measured by different methods in wheat

Variety	Glassiness(%) ^x	Hardness ^y		Hardness score ^z	Protein content(%)
		1st peak	highest peak		
Olmil	30.17	9.73	11.34	463.67	9.32
Cheonggemil	47.72	10.97	11.57	452.36	11.01
Namhaemil	27.72	9.06	9.56	457.89	10.58
Dahongmil	46.80	9.51	10.25	451.91	10.74
Geurumil	71.88	12.16	12.16	512.28	15.15
Chugoku 122	39.73	9.85	10.40	467.05	11.64
Nampu	53.19	11.36	11.88	473.40	12.37
IT 080131	37.71	10.63	11.33	454.87	11.95
Milyang 29	33.07	7.59	8.70	456.90	11.67
YW1347-3B-36-1	60.82	10.52	11.03	468.55	14.55
Suweon 267	57.62	11.88	12.16	533.03	15.98
Suweon 272	71.74	11.86	11.90	528.07	12.63
Suweon 262	70.86	12.13	12.13	513.82	9.02
Yeonngong	63.93	12.02	12.05	508.41	11.22
Dongsanbaek	81.43	12.10	12.10	565.36	15.65
Kanto 107	41.23	9.96	10.45	455.25	10.98
Huazhung 5	45.99	10.65	11.05	454.67	12.88
IT 080087	32.36	10.24	10.46	457.60	13.76
Sr 10	17.71	10.02	10.16	481.85	12.8
IT 110112	71.94	12.15	12.16	576.13	15.3
Shann 7859	35.14	10.28	10.28	483.32	12.21
Shannang 17-17	71.88	12.09	12.12	525.71	14.53
IT 110150	80.25	12.16	12.16	564.61	15.93
IT 110171	54.31	10.07	10.22	472.91	12.06
Shine	74.19	12.05	12.05	555.61	15.52
Suweon 218	72.50	12.14	12.14	554.91	15.11
Suweon 219	84.18	12.15	12.15	575.90	16.28
Suweon 229	83.67	12.09	12.09	576.65	15.42
Fongkang 2	71.00	11.63	11.63	527.01	15.41
Fongkang 4	54.14	12.04	12.04	519.96	14.16
Urimil	36.31	10.22	10.12	449.32	10.24
Olgeurumil	53.80	9.73	9.73	463.69	12.14
Tabdongmil	64.54	11.42	11.42	514.99	13.88
Fongkang 15	85.60	12.07	12.07	525.36	15.78
Suweon 225	86.92	12.16	12.16	548.61	13.16
Suweon 233	56.16	10.17	10.17	445.75	12.45
Seri 82	71.75	12.16	12.16	533.12	11.93
Babiacora	54.60	11.39	11.39	469.80	12.61
Guamuehil	90.95	12.19	12.19	604.15	14.26
Bacanora	78.28	11.97	11.96	563.56	12.48
CV(%)	32.40	10.28	8.34	9.15	-

x ; measured by image analysis, y ; measured by textrometer, z ; measured by NIRS.

Table 4. Correlation of protein content and grain hardness measured by different method in wheat

Components		B	C	D	E
Glassyness percentage	[A]	0.8292**	0.7767**	0.8442**	0.6126**
Hardness(1st peak)	[B]		0.9586**	0.8030**	0.5833**
Hardness(highest peak)	[C]			0.7602**	0.5178**
Hardness score	[D]				0.6741**
Protein contents	[E]				

A ; glassyness percentage by image analysis, B, C ; hardness by textrometer, D ; hardness score by NIRS, E ; protein content by micro-Kjeldahl, ** ; significant at 1% level.

Table 5. Comparison of efficiency in grain hardness of wheat measured by different method in wheat

Components	Samples required	Time required				Viability ^z
		Dry ^x	Fixation ^y	Grinding	Measurement	
Image analysis	100 kernels	-	18.4min	47 sec	59.0 sec	○
Textrometer	1 kernel	2 day	-	-	4.8 min	×
NIRs	2g flour	2 day	-	3.2 min	2.0 min	×

x ; textrometer → dried at 60°C, NIRS → air dried for tempring, y ; fixation of kernels in clay block, z ; viability of kernels after analysis.

방법에 비해 적으나 곡립의 固定過程에서 18.4분이 소요되어 이 과정에 대한 효율성을 높일 필요성이 있었다.

그러나 측정이 완료되었을 때 기존의 경도측정 방법은 穀粒의 發芽力이 상실되는 반면 畫像分析法에 의한 측정은 胚部分의 손상이 없기 때문에 이후 종자용으로 사용할 수 있었다.

간의 오차가 적고, 측정된 결과가 기존의 경도 측정 방법과 상관이 매우 높아 새로운 軟硬質性的 區分基準으로 사용할 수 있었으며, 곡립의 연경질 성분 분석후 곡립의 發芽力이 상실되지 않으므로 밀의 用途別 高品質 育種效率 增進을 위한 初期 選抜方法으로 사용이 가능할 것으로 사료되었다.

摘 要

밀의 硬·軟質性 區分을 효과적으로 수행할 수 있는 새로운 방법을 모색하기 위해 畫像分析法을 이용한 측정법과 기존의 몇 가지 측정방법의 正確度 및 相關關係를 상호 비교 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

畫像分析法을 이용하여 측정한 곡립의 초차질율은 경도계 및 NIRS에 의한 방법과 고도로 유의적인 상관이 인정되었으며 곡립의 단백질 함량과도 분석방법간에 고도로 유의한 상관이 인정되었다.

畫像分析法을 이용한 硝子質率의 측정은 반복

引用文獻

1. 何部徳文, 佐々木行雄, 1993, 水稻種子の維持と増殖に關する研究, 第1報 玄粒の粒大および形狀の品種比較, 北陸作報 28:9-10.
2. American Association Cereal Chemists. 1983. Approved Methods of the AACC. Method. pp. 39-70, Approved October 1986. Association: St. Paul, MN.
3. Barmore M.A and Bequette R.K. 1968. Kernel colour and shape as guides to potential flour performance in wheat marketing. Agron. J. 60:223-228.
4. Beard B.H and Poehlman J.M. 1954, A

- study of quality as measured by the pearling test, in crosses between hard and soft wheats. *Agron. J.* 46:220-223.
5. Dellwiche G.H and Masie D.R. 1996, Classification of wheat by visible and near-infrared reflectance from single kernel. *Cereal Chem.* 73(3):399-405.
 6. 福田希一, 1990, 画像データの育種への利用-染色体研究における画像解析法の現状と展望-, 育種学 最近の進歩 31:123-134.
 7. 福岡忠彦, 福田希一, 1990, 画像解析法によるオオムギ精麦品質の数量化について, 育種 40:223-232
 8. Hong B.H and Baik B.K. 1995. Studies on selection of dietary fiber resources. III. Relationship between endosperm pentosan content and grain hardness in different classes of wheat cultivars. *Korean J. Breed.* 27(3):226-235.
 9. Jelinek J. 1929. Apparatus for the determination of the hardness of the kernel. *Proc. Int. Congr. Bread Wheat Flour*, 1st, Prague.
 10. Lai F.S, Rousser R, Brabec D, Pomeranz Y. 1985, Determination of hardness in wheat mixtures. II Apparatus for automated measurement of single kernel. *Cereal Chem.* 62(3):178-184.
 11. Miller B.S, Afework S, Pomeranz Y, Bruinsma B.L, and Booth G.D. 1982. Measuring hardness in wheat. *Cereal Foods World.* 27(2):61-64.
 12. 二宮正士, 1990, 画像データの育種への利用-二値画像データの解析とその応用, 育種学最近の進歩 31:143-152.
 13. Norris K.H. 1990. USDA NIR-hardness collaborative study, IRI., BARC, ARS /USDA, Beltsville, Maryland, 20705.
 14. Pomeranz Y, Peterson C.J, Marttern P.J. 1985, Hardness of winter wheat grown under different climatic condition, *Cereal Chem.* 62(6):463-467.
 15. Simmonds D.H. 1974. Chemical basis for hardness and vitreosity in the wheat kernel. *Bakers Dig.* 48(5):16.
 16. Williams P.C. 1979. Screening wheat for protein and hardness by near-infrared reflectance spectroscopy. *Cereal Chem.* 56(3):169-172.
 17. Yamazaki W.T and Briggie L.W. 1969. Components of test weight in soft wheat. *Crop Sci.* 9:457-459.
 18. _____, Andrews L.C. 1982. Experimental milling of soft wheat cultivars and breeding lines. *Cereal Chem.* 59(1):41-45.
 19. _____, Donelson J.R. 1983. Kernel hardness of some U.S. wheat. *Cereal Chem.* 60(5):344-350.
 20. Zayas I.E, Martin C.R, Steele J.L and Dempster R.E. 1991. Image texture of crushed wheat., *Machine Vision Architectures, Integration and Applications.* *Proc. SPIE.* 1615:203-215.
 21. _____, Steele, J, L. 1996, Image texture analysis for discrimination of mill fraction of hard and soft wheat. *Cereal Chem.* 73(1):136-142.