

호밀가루의 레올로지 특성분석

이귀현

Analysis of Rheological Properties of Rye Flour

G. H. Lee

Abstract

Rheological properties of cereals such as rye are great important for the design of die for extrusion and the development of models for extrusion process. Therefore, this study was carried out to analyze the rheological properties according to moisture content of rye flour and extrusion temperature. Rheological properties of rye flour were investigated by using a capillary rheometer for moisture content of three levels (30, 35, 40%) and extrusion temperature of three levels (120, 130, 140°C). Determination coefficients for the relationship between apparent shear stress (τ_{ap}) and apparent shear velocity ($\dot{\gamma}_{ap}$) were relatively high in the range of 0.973 ~ 0.997 under each extrusion condition. The values of consistency index (K) was decreased with increasing moisture content and extrusion temperature. However, the value of flow behavior index (n) presented the highest value at moisture content of 35%, but it was not affected by extrusion temperature.

Keywords : Rye flour, Rheological properties, Extrusion process, Die design

1. 서론

호밀(Rye)은 라이보리 혹은 흑밀이라고도 한다. 호밀은 춥고 찬 냉대성 기후와 메마르고 척박한 땅에서도 잘 자라는 곡류로 전 세계적으로는 유럽국가와 러시아 지역에서 주로 많이 생산되고 있다.

호밀은 과거에 유럽국가에서 열량, 단백질, 탄수화물의 가장 중요한 공급원이었으나, 밀, 기름, 설탕 등을 손쉽게 구하게 되면서 호밀의 소비가 급격히 줄어들었다. 최근에는 호밀 내에 함유된 생리활성 성분의 새로운 기능성이 밝혀지면서 식품 산업계의 큰 관심을 불러일으키고 있어 호밀을 이용한 신제품의 개발이 활성화 되고 있는 실정이다(Hwang, 2003). 호밀의 영양성분은 단백질 10 ~ 15%, 지방 2 ~ 3%, 전분 55 ~ 65%, 회분 2%, 총 식이섬유 15 ~ 17% 등을 포함한다. 식이섬유소는 물에 대한 용해도에 따라 수용성 식이섬유와 불용성 식이섬유로 구분되며, 셀룰로즈와 리그닌은 대표적인

불용성 식이섬유 성분이다. 반면에 β -glucan과 arabinoxylan과 같은 식이섬유 성분은 부분적으로는 불용성이고 부분적으로는 수용성의 특징을 나타내며, β -glucan과 arabinoxylan과 같은 수용성 식이섬유는 매우 낮은 농도(0.5 ~ 2%)에서도 점질성 겔(viscous gel)을 형성한다(Hwang, 2003). 호밀은 밀에 비해서 β -glucan과 arabionoxylan을 더 많이 함유하고 있으나 셀룰로즈(cellulose)와 리그닌(lignin)의 양은 밀과 비슷하다. 호밀은 비영양소 성분인 리그닌의 좋은 공급원으로서 secoisolariciresinol(SECO)과 matairesinol(MAT)이 가장 많이 분포하고 있으며, 통호밀은 47 μ g/100g의 SECO과 65 μ g/100g의 MAT를 함유하며, 이들은 주로 낱알의 외층에 분포한다. 또한 호밀은 폴리페놀류, ferulic acid, 피탄산, alkylresinol 등의 각종 생리활성성분을 다량 함유하고 있는 것으로 알려져 있다. 호밀은 밀과 달리 빵이나 다른 식품들을 제조할 때 대부분 전곡가루(whole grain flour)로 소비된다. 호밀은 제분해서 빵을 만드는 원료로 가장 많이 쓰이며, 누

This study was conducted by an assistance of Agriculture and Life Sciences Research Institute, Kangwon National University. The article was submitted for publication on 2010-11-19, reviewed on 2010-12-03, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2010-12-10. The author is Gwi Hyun Lee, Professor, Department of Biosystems Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, 200-701, Korea. Corresponding author is G. H. Lee, KSAM member, Professor, Department of Biosystems Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, 200-701, Korea; Fax: +82-33-255-6406; E-mail: <ghlee@kangwon.ac.kr>

록, 면류, 된장, 간장의 원료로도 쓰인다. 이밖에도 호밀가루를 이용한 전통식품과 식품 압출성형공법의 발전으로 호밀 프레이크(flake) 및 아침식사용 시리얼(cereal) 등도 많이 생산되고 있다(Lorenz, 2000).

대부분의 식품가공공정에서 취급하는 유체의 점성은 제품 또는 중간제품의 품질을 나타내는 목표로 사용되고 있을 뿐만 아니라 식품성형공정에 중대한 영향을 미치게 되므로 이 측정은 식품공업에서 중요한 의미를 가지고 있다. 식품의 압출공정은 연속흐름의 공정으로 압출성형기 내부에서 일어나는 압출조리공정의 여러 주요지표를 계산하기 위해서는 압출성형기 내부에서 형성되는 반죽의 유체 변형성을 규명해야 한다. 호밀가루를 포함한 곡류가루는 함유하고 있는 전분, 단백질, 지방 등의 화학적 구성성분의 차이로 인해 가공공정 동안 서로 다른 유동특성을 나타낸다. 특히 호밀가루를 이용한 프레이크 및 시리얼 등의 압출성형 동안 레올로지 특성은 곡류의 화학적 구성성분 뿐만 아니라 온도와 함수율과 같은 압출성형 공정변수에 의해 크게 변화한다(Harper, 1981; Colonna, et al., 1989). 이러한 곡류의 레올로지 특성은 압출성형용 사출구설계 및 압출성형 공정모델 개발에 매우 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 수분함량 및 압출온도가 호밀가루의 레올로지 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

가. 시료

본 연구에 사용된 호밀가루는 핀란드 제품으로 성립식품으로부터 구입하였다. 호밀가루 20 g의 각 시료 5개를 100°C의 열풍건조기에서 24시간 건조시켜 30분간 데시케이터에서 향량시킨 후 무게를 측정하고 평균하여 초기함수율을 구하였으며, 10.5%(w.b.)로 나타났다. 시료의 함수율을 30%, 35%, 40%의 각각 일정한 수준으로 만들기 위해 초기함수율에 대해 적정량의 물을 첨가하여 10분 동안 믹서로 잘 혼합하였다. 물을 혼합한 시료는 비닐포장으로 밀봉하여 24시간동안 4°C의 냉장고에 저장하여 수분이 평형상태에 도달한 후 실험에 사용하였다. 본 실험은 습량기준(w.b.) 수분함량 30%, 35%, 40% 및 압출온도 120°C, 130°C 및 140°C에서 호밀의 레올로지 특성을 분석하였다.

나. 레올로지 측정

일반적으로 식품의 레올로지 특성분석 연구를 위해 모세관 점도계가 널리 이용되고 있다(Senouci and Smith, 1988; Parker et al., 1989; Singh and Smith, 1999). 본 실험에서도 호밀가루의 레올로지 특성분석을 위해 모세관 점도계(Rheo-Tester 2000, Gottfert Co., Germany)를 사용하였으며, 약

100 g의 시료를 바렐에 삽입하고, 약 5분의 평형상태 후 120°C, 130°C 및 140°C에서 압출하였다. 실험에 사용된 모세관 점도계의 사출구 직경은 3 mm였고, 길이/직경 비(L/D)는 10/1이었다. 여기서 겔보기 전단속도($\dot{\gamma}_{ap}$)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\gamma}_{ap} = 4AV/\pi R^3 \quad (1)$$

여기서 A 는 다이 단면적, V 는 다이 속도, R 은 다이 반경을 나타내며, 겔보기 전단응력(τ_{ap})은 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_{ap} = PD/4L \quad (2)$$

여기서 P 는 압출압력, D 는 사출구 직경, L 은 사출구 길이를 나타내며, 겔보기 점도(μ_{ap})는 다음과 같이 표현된다.

$$\mu_{ap} = \tau_{ap}/\dot{\gamma}_{ap} \quad (3)$$

많은 유체는 전단응력을 전단속도에 대하여 ln - ln 좌표에 그렸을 때 직선을 나타낸다. 이와 같은 거동을 나타내는 유체는 다음과 같은 지수법칙식 또는 Ostwald de Waele식으로 표현할 수 있다.

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n \quad (4)$$

여기서 $K(N \cdot s^n/m^2)$ 는 점조도 지수, n 은 유동거동지수로 무차원이다. n 이 1일 때 뉴턴유체이므로 n 값은 뉴턴유체의 성질로부터 벗어나는 정도를 나타낸다. n 이 1보다 작을 때의 소성유체로서 전단속도가 증가하면 겔보기 점도가 감소하므로 전단을 희석성 유체라 하며, 전분 현탁액, 마요네즈, 초콜릿 등 많은 유체식품은 여기에 속한다. n 이 1보다 큰 유체를 딜라탄트 유체라 하며 전단속도가 증가하면 겔보기 점도가 증가하므로 전단을 농축성 유체라고도 한다.

지수법칙식의 양쪽에 대수를 취하면, $\ln \tau = n \ln(\dot{\gamma}) + \ln K$ 로 실험값으로부터 $\ln \tau$ 와 $\ln(\dot{\gamma})$ 를 그리면 직선을 얻을 수 있으며, 직선의 기울기로부터 유동거동지수 n 과 절편 값으로부터 점조도 지수 K 를 구할 수 있다. 또한 지수법칙식을 이용하여 겔보기 점도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mu_{ap} = \tau_{ap}/\dot{\gamma}_{ap} = K(\dot{\gamma}_{ap})^{n-1} \quad (5)$$

여기서, 겔보기 점도(μ_{ap})는 뉴턴유체에서 점도의 개념을 비 뉴턴유체에도 적용하기 위해 고안된 물질 상수이다. 뉴턴 유체에서는 겔보기 점도가 일정한 값을 나타내는 반면 비 뉴턴유체는 전단속도에 따라 그 값이 변하는 특성이 있다.

3. 결과 및 고찰

압출조건에 따른 호밀의 겉보기 전단응력과 전단속도의 관계를 나타내는 지수법칙식의 점조도 지수(K) 값 및 유동거동 지수(n) 값을 표 1에 나타내었다. 각 실험조건에서 겉보기 전단응력과 겉보기 전단속도의 상관관계를 나타내는 결정계수(r^2) 값의 범위는 0.973 ~ 0.997로 높게 나타나 지수법칙식이 잘 적용됨을 알 수 있다. 그림 1, 2, 3 및 표 1에서와 같이 본 연구에서 점조도 지수 K 값은 호밀의 수분함량 및 압출온도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 유동거동지수 n 값은 0.20 ~ 0.29의 범위에 있었으며 호밀의 수분함량 35%에서 가장 큰 값을 나타내었으나, 압출온도에 따른 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다. 점조도 지수 K 값에 대한 본 연구와 유사한 결과로 표 2와 같이 Madeka와 Kokini(1992)는 amioca 전분의 수분함량(20% ~ 40% 범위)과 압출온도(100°C ~ 150°C 범위)가 증가할수록 K 값은 감소하나, 반대로 n 값은 증가한다고 보고하였다. 또한 옥수수 전분에 대한 Vergnes와 Villemaire(1987)의 레올로지 연구에 있어 K 값은 본 연구 결과와 유사하게 압출온도 및 함수율의 증가에 따라 감소하나, 반대로 n 값은 증가한다고 보고한 바도 있다(표 2). 또한, 밀가루 반죽의 수분함량이 증가 할수록 K 값이 감소한다는 본 연구와 유사한 연구결과가 보고된바 도 있다(Sharma and

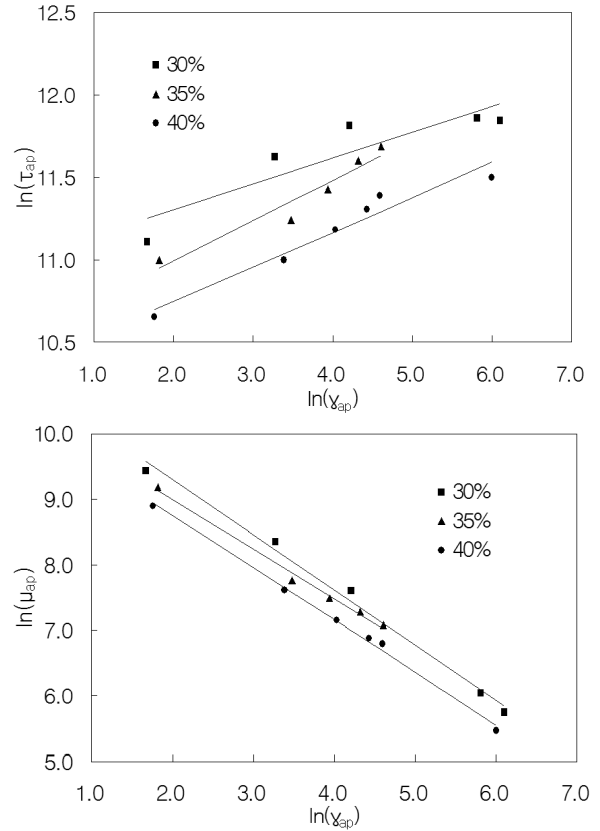


Fig. 2 Apparent shear stress and viscosity at temperature of 130°C.

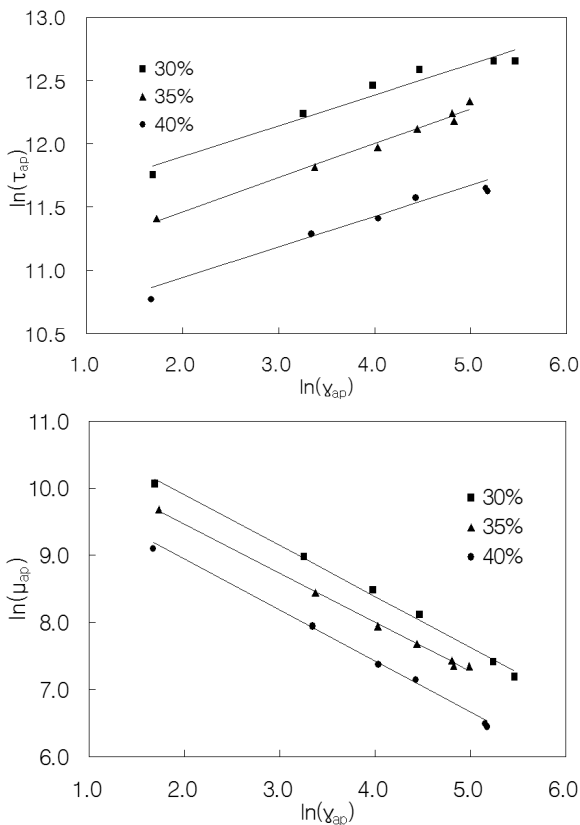


Fig. 1 Apparent shear stress and viscosity at temperature of 120°C.

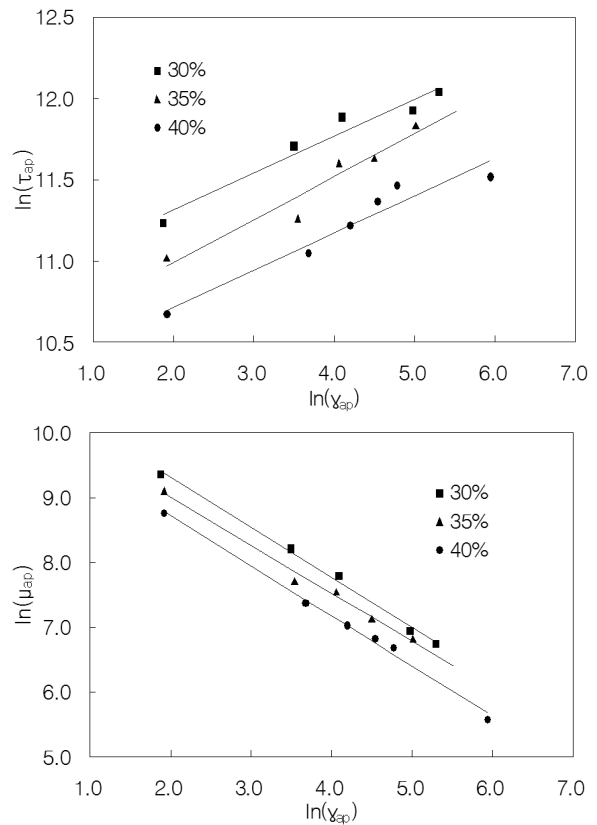


Fig. 3 Apparent shear stress and viscosity at temperature of 140°C.

Hanna, 1993). Singh과 Smith (1999)는 귀리 가루의 레올로지 연구에 있어 수분함량 21% 및 압출온도 110°C에서의 K 값이 수분함량 28% 및 압출온도 125°C에서보다 큰 값을 나타냄을 보고하였으나, n 값은 수분함량 및 압출온도에 따른 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다(표 2). 곡물원료의 측면에서 볼 때 표 2와 같이 기존 연구에서 K 값의 크기는 대체로 amioca 전분, 옥수수 전분, 귀리 가루의 순으로 나타나났으나, 반대로 n 값의 크기는 귀리 가루, 옥수수 전분, amioca 전분의 순으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 사용한 호밀가루의 K 값은 amioca 전분과 옥수수 전분의 사이 값 정도로 나타났고, n 값은 amioca 전분과 다소 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다. 이와 같이 이전의 연구에서도 여러 성형조건하에서 식품에 대해 지수법칙식에 의한 전단응력과 전단속도의 관계가 잘 나타내지고 있다(Harper, 1981; Colonna et al.,

1989). 그러나 많은 연구를 종합하여 볼 때 점조도 지수 K 값은 대체적으로 압출온도 및 수분함량의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었으나, 유동거동지수 n 값은 시료의 종류, 압출온도 및 함수율에 따라 다소 다른 경향을 나타냄을 알 수 있다.

본 연구에서 시료의 함수율과 압출온도에 따른 K 및 n 값의 변화를 회귀분석하여 다음과 같은 식을 구하였다.

$$K = \frac{1676}{[1 + (\frac{T-64.11}{25.89})^2][1 + (\frac{M-15.27}{9.39})^2]} \quad (6)$$

$$n = 0.3959 - 0.03954T + 0.1407M + 0.0001502T^2 - 0.002M^2 \quad (7)$$

여기서 T: 압출온도(°C)

M: 시료 함수율(% wb)

Table 1 K and n values of power law equation depending on extrusion conditions of rye flour

Temperature (°C)	Moisture (% wb)	Power law indices		r^2
		$K(kPa \cdot s^n)$	n	
120	30	90	0.24	0.994
	35	55	0.27	0.997
	40	34	0.25	0.973
130	30	59	0.20	0.985
	35	36	0.29	0.996
	40	30	0.21	0.978
140	30	52	0.23	0.996
	35	35	0.27	0.991
	40	29	0.23	0.994

압출온도(T) 및 수분함량(M)과 점조도 지수(K)의 상관관계를 나타내는 결정계수(r^2) 값은 0.95로 비교적 높은 값을 나타내 식이 잘 표현되었음을 나타내었다. 또한 압출온도(T) 및 수분함량(M)과 유동거동지수(n)의 상관관계를 나타내는 결정계수(r^2) 값은 예상된 바와 같이 0.81로 다소 낮은 상관관계를 나타내었다. 그림 4는 압출온도(T) 및 수분함량(M)이 점조도 지수(K) 및 유동거동지수(n)에 미치는 영향을 나타내었다. 그림에서와 같이 점조도 지수 K 값이 호밀의 수분함량 및 압출온도가 증가할수록 감소한다는 것을 알 수 있었으나, 유동거동지수(n)의 값은 수분함량 35%에서 가장 높게 나타났으며, 압출온도와는 크게 상관이 없는 것으로 나타났다.

Table 2 Consistency coefficients (K) and flow behaviour indices (n) for various food materials

Temperature (°C)	Moisture (% wb)	Power law indices		References
		$K(kPa \cdot s^n)$	n	
100	20	341	0.25	Madeka and Kokini (1992) ^a
100	30	19	0.28	Madeka and Kokini (1992) ^a
120	20	130	0.26	Madeka and Kokini (1992) ^a
120	30	2	0.49	Madeka and Kokini (1992) ^a
110	21	40	0.27	Vergnes and Villemare (1987) ^m
110	28	12~18	0.32~0.34	Vergnes and Villemare (1987) ^m
150	21	13	0.35	Vergnes and Villemare (1987) ^m
150	28	4~9	0.43~0.45	Vergnes and Villemare (1987) ^m
100	21	5	0.53	Singh and Smith (1999) ^o
100	28	4	0.41	Singh and Smith (1999) ^o
125	21	4	0.41	Singh and Smith (1999) ^o
125	28	1	0.52	Singh and Smith (1999) ^o

^a amioca starch, ^m maize starch, ^o oat flour

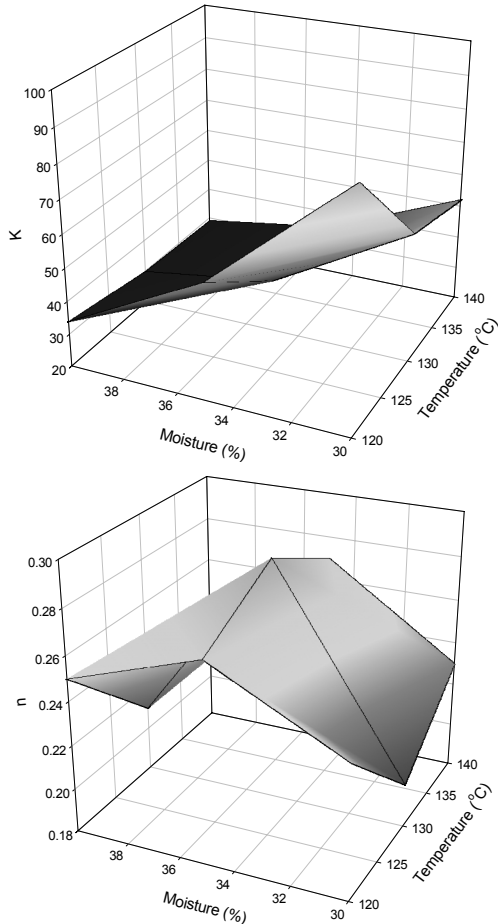


Fig. 4 The change of K and n values of power law equation depending on extrusion conditions of rye flour.

4. 요약 및 결론

압출성형동안 레올로지 특성은 시료의 화학적 구성성분 뿐만 아니라 온도와 함수율과 같은 압출성형 공정변수에 의해 크게 변화한다. 이러한 곡류의 레올로지 특성은 압출성형용 사출구(die) 설계 및 압출성형 공정모델 개발에 매우 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 모세관 점도계를 이용하여 수분함량(30%, 35%, 40%) 및 압출온도(120°C, 130°C, 140°C)가 호밀가루의 레올로지 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 각 압출조건에서 겔보기 전단응력(τ_{ap})과 겔보기 전단속도($\dot{\gamma}_{ap}$)의 상관관계를 나타내는 결 정계수(r^2) 값의 범위는 0.973 ~ 0.997로 높게 나타나 지수법칙식이 잘 적용됨을 알 수 있었다.
- (2) 점조도 지수(K) 값은 호밀의 수분함량 및 압출온도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈고, 유동거동지수(n) 값은 35%의 수분함량에서 가장 크게 나타났으나

압출온도의 변화에 따른 n 값의 변화 경향은 뚜렷하게 나타나지 않았다.

- (3) 압출온도(T) 및 수분함량(M)과 점조도 지수(K)의 상관관계는 큰 것으로 나타났으나, 압출 온도 및 수분함량과 유동거동지수(n)의 상관관계는 다소 낮은 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 강원대학교 농업생명과학연구원의 지원으로 수행된 연구임.

참 고 문 헌

1. Colonna, P., Tayeb, J. and C. Mercier. 1989. Extrusion cooking of starch and starchy products. In: Extrusion Cooking. Linko, P., Harper, J. M. (eds.), St. Paul, USA: American Association of Cereal Chemists.
2. Harper, J. M. 1981. Extrusion of Foods, vol. I, CRC Press, Boca Raton, USA.
3. Hwang J. K. 2003. Food and physiological functions of rye. Food Sci. & Industry 36(3):70-80. (In Korean)
4. Lorenz, K. R. 2000. In: Handbook of Cereal Science and Technology. Kup, K. and Ponte, J. E. (eds.), Marcel Dekker, New York, USA. pp. 223-256.
5. Madeka, H. and J. L. Kokini. 1992. Effect of addition of zein and gliadin on the rheological properties of amylopectin starch with low-to-intermediate moisture. Cereal Chemistry 69:489-494.
6. Parker, R., Lai-Fook, R. A. Ollett, A. L., and A. C. Smith. 1989. The rheology of food 'melts' and its application to extrusion processing. In: Rheology of Food, Pharmaceutical and Biological Materials. Carter, R. E. (ed), Elsevier, London, UK. pp. 57-73.
7. Senouci, A., and A. C. Smith. 1988. An experimental study of food melt rheology. I. Shear viscosity using a slit die viscometer and a capillary rheometer. Rheologica Acta 27: 546-554.
8. Singh, N., A. and C. Smith. 1999. Rheological behaviour of different cereals using capillary rheometry. J. of Food Engineering 39:203-209.
9. Sharma, N. and M. Hanna. 1993. Flow behaviour of wheat flour-water dough using a capillary rheometer. II. Effects of water, protein, mix and rest time. Cereal Chemistry 70:63-67.
10. Vergnes, B. and J. P. Villemaire. 1987. Rheological behaviour of low moisture molten maize starch. Rheologica Acta 26: 570-576.