Food Eng. Prog.
Vol. 21, No. 2. pp. 132~137 (2017.5)
DOI https://doi.org/10.13050/foodengprog.2017.21.2.132
ISSN 1226-4768 (print), ISSN 2288-1247 (online)

산업식품공학
Food Engineering Progress

반응표면분석법을 이용한 반죽물성의 모델링 및 최적화

이구연 · 최광석[1] · 김태우[2] · 조관형[3] · 강동진[4] · 김성태[4] · 장동진[4*]
강원대학교 의생명과학대학 생명건강공학과, [1]옥두식품, [2]강원대학교 웰빙특산물산업화지역혁신센터
[3]인제대학교 약학대학 약학과, [4]인제대학교 공과대학 제약공학과

Modeling and Optimization of Dough Properties Using Response Surface Design

Kooyeon Lee, Gwkang Seok Choi[1], Tae Woo Kim[2], Kwan Hyung Cho[3], Dongjin Kang[4], Sung Tae Kim[4], and Dong-Jin Jang[4]*

Department of Bio-Health Technology, Kangwon National University
[1]OkduFood Co., Ltd.
[2]Well-being Bioproducts R&D RIC, Kangwon National University
[3]Department of Pharmacy, College of Pharmacy, Inje University
[4]Department of Pharmaceutical Engineering, College of Engineering, Inje University

Abstract

The purpose of this study was to optimize dough properties using response surface methodology (RSM) and to demonstrate the performances of dough prepared under optimized conditions. Dough mixed with yeast, margarine, salt, sugar and wheat flour was prepared by fermentation process. Hardness, cohesiveness and springiness of dough were selected as critical quality attributes. The critical formulations (yeast and water) and process (fermentation time) variables were selected as critical input variables based on preliminary experiment. Box-Behnken design (BBD) was used as RSM. As a result, the quardratic, the squared and the linear model respectively provided the most appropriate fit (R^2>90) and had no significant lack of fit (p>0.05) on critical quality attributes (hardness, cohesiveness and springiness). The accurate prediction of dough characteristics was possible from the selected models. It was confirmed by validation that a good correlation was obtained between the actual and predicted values. In conclusion, the methodologies using RSM in this study might be applicable to the optimization of fermented foods containing various wheat flour and yeast.

Key words: dough properties, optimization, Box-Behnken design, response surface design

서 론

최근 식생활이 빠르게 서구화 및 간편화 됨에 따라 밀가루를 포함한 제과, 제빵 분야에의 수요가 크게 증대되고 있으며 소비자의 기호가 고급화되고 있어 현대인의 기호에 맞는 새로운 제품 개발 및 과학적인 품질관리가 경쟁력의 관건이 되고 있다(Ko & Joo, 2005; Lee & Oh, 2005; Park, 2012). 제과, 제빵 분야에서 사용되는 밀가루 반죽의 여러 가지 물리적 특성은 최종 제품의 품질에 크게 영향을 미치게 되며, 반죽의 물성은 밀가루의 구성 성분, 사용되는 설탕과 소금의 양, 이스트의 양, 발효시간, 물의 양 그리고 그 밖의 여러 조건들에 의해서 영향을 받게 된다(Oh & Kim, 2002). 최종제품의 품질을 좌우 할 수 있는 여러 특성들 중 가장 빈번하게 활용되는 것들로서 반죽의 경도(hardness), 응집성(cohesiveness), 탄력성(springiness), 씹힘성(chewiness), 파쇄성(brittleness) 등이 있다(Kim & Park, 2008; Kim & Shin, 2009; Park, 2012). 반죽의 경도는 제품의 성형공정에서 구조를 형성하고 유지할 수 있게 하므로 원활한 공정의 진행을 위해서 적절한 값의 설정 및 유지가 필요하다(Lee et al., 2001). 응집성은 반죽 내 밀가루 입자간의 응집을 통한 반죽의 형성, 최종 제품에서 조직의 촉촉함, 그리고 생성된 반죽이 다른 물체에 달라 붙는 성질과 관련이 있어 중요하다(Kim & Shin, 2009; Cho et al., 2011; Ha et al., 2012). 또한, 적절한 탄력성은 최종제품의 견고성과 더불어 소비자의 기호에 맞는 적절한 식감을 제공하는데 필수적이다(Choi et al., 2012). 그러나 반죽

*Corresponding author: Dong-Jin Jang, Department of Pharmaceutical Engineering, College of Engineering, Inje University, Gimhae 50834, Korea
Tel: +82-55-320-3393, Fax: +82-55-327-4955
E-mail: djjang@inje.ac.kr
Received February 19, 2017; revised May 7, 2017; accepted May 12, 2017

제조는 여러 가지 재료들, 제조 공정들 그리고 공정조건들이 복잡한 관계를 이루고 있다. 따라서 제조 공정에서 관계되는 변수들은 반죽 특성들 뿐 아니라 제종제품에도 지대한 영향을 미칠 수 있으므로 사용되는 입력변수들과 반죽 또는 제품특성과의 관계를 밝히고자 하는 연구가 식품산업에서 진행되고 있다(Chen et al., 1988; Vélez-Ruiz & Sosa-Morales, 2003; Różyło, 2014). 이러한 주제들과 관련하여 최근에는 다변량분석(multivariate analysis) 기법들 중 하나인 반응표면분석법(response surface methodology)을 사용하여 반죽의 제조과정과 그 결과로서 나타나는 물리적 특성들을 과학적으로 이해하고 결과를 예측하고자 하는 연구가 다양하게 보고되고 있다(Ghodke, 2009; Kittisuban et al., 2014).

본 연구에서는 밀가루 반죽의 여러 가지 특성들을 반응표면분석법의 기법 중 하나인 박스-벤켄법(Box-Behnken design)을 사용하여 모델링하고 정확한 결과를 예측할 수 있게 함으로써 최적의 반죽과 최종 제품을 제조할 수 있는 최적의 제조조건을 제시하고 그 정확성을 확인하였다.

재료 및 방법

재료

밀가루는 큐원(Samyang Millmax, Seoul, Korea)에서 생산된 제빵용 밀가루를 사용하였고 마가린은 식물성 마가린(Ottogi, Anyang, Korea)를 사용하였다. 제빵용 효모는 인스턴트 건조 이스트(Ottogi)을 소금(Hanju Corporation, Ulsan, Korea)과 설탕(TS Corporation, Seoul, Korea)은 모두 시판용 제품을 구입해 사용하였다.

반죽제조

분말원료들(이스트, 소금, 설탕, 밀가루)과 액상원료들(마가린 그리고 물)을 미리 정해진 양에 맞춰 각각 계량하였다. 소금, 설탕, 밀가루 그리고 마가린은 각각 0.6 g, 8.2 g, 55 g 그리고 2.9 g을 사용하였으며 물과 이스트 함량은 Table 1에 나타낸 것처럼 여러 번의 실험에 따라서 조금씩 다르게 사용하였다. 계량된 분말원료들을 vertical screw mixer (SS type, Kanto Mixer Co., Japan)을 사용하여 150 rpm에서 1분간 혼합하였다. 그 후 얻어진 혼합물에 액상원료를 넣고 200 rpm에서 2분간 반죽하였다. 완성된 반죽은 30 g씩 나누어 100 mL 비커에 나누어 넣고 32°C로 맞춰진 인큐베이터에서 미리 정해진 시간 동안 발효공정을 진행하였다(Table 1에서 발효시간 표시). 각각 공정간에는 시간이 지체되지 않게 실험설계를 하였으며 얻어진 발효물 역시 가능한 빠른 시간 내에 테스트가 진행되도록 하였다.

반죽특성평가

제조된 반죽의 물리적인 특성들을 조사하기 위하여 texture analyzer (TA-XT2, Brookfield Engineering Laboratories Inc., Stoughton, MA, USA)를 사용하였다. TPA (texture profile analysis) mode에서 이중 압축시험 (double compression test) 방식으로 진행하였으며, 반죽에서 취한 시료를 실린더형 탐침(cylindrical probe)을 사용하여 직경 25 mm인 원기둥을 제조한 후에 3회 반복 측정하여 평균값을 계산하였다. 1차와 2차 압축 사이에는 30초의 지연 시간을 두었고, 2 mm/s의 속도와 50%의 변형(deformation)으로 측정하였다.

Table 1. Levels and target values of variables in Box-Behnken design

	Independent variable	Symbol	Level		
			-1	0	1
Formulation variable	Water	X_1	25	30	35
	Yeast	X_2	1	2	3
Process variable	Fermentation time	X_3	30	45	60
	Dependent variable	Symbol	Lower value	Target value	Upper value
	Hardness	Y_1	60	70	80
	Cohesiveness	Y_2	1	2.5	3
	Springiness	Y_3	1	1.25	1.5

최적화 연구 및 통계분석

본 연구에서는 반죽물성에 미치는 영향을 알기 위하여 반응표면분석법 중 박스-벤켄법을 사용하여 최적화 연구를 수행하였다. 반죽제조 및 반죽특성 평가에 대한 예비시험(preliminary test)을 통해 주요한 독립변수로, 물의 함량(X_1), 이스트 함량(X_2) 그리고 발효시간(X_3)를 선정하였고 선정된 독립변수를 3단계(-1, 0, 1)로 수준(level)을 나누었다. 여러 가지 독립변수에 의해 나타나는 중요한 반죽 특성으로는 경도(Y_1), 응집성(Y_2) 그리고 탄력성(Y_3)를 선정하여 최적화 연구를 진행하였다. 수준 외에도 최종적으로 얻고자 하는 최적 목표값(target value)을 정하였다(Table 1). 주요한 독립변수들의 주효과(main effects), 교호효과(interaction effects), 이차식효과(quardratic effects)를 고려하여 최적화 모델(optimal model)을 선정하였고, 최적 조건을 선택하였다. 본 디자인에서 사용된 2차 다항식은 다음과 같이 나타내었다.

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + A_{11}X_1^2 + A_{22}X_2^2 + A_{33}X_3^2 + A_{12}X_1X_2 + A_{13}X_1X_3 + A_{23}X_2X_3$$

Y: 종속변수(dependent variables)
A_0: 절편(intercept)
A_1, A_2, A_3: 선형계수(linear coefficients)
A_{11}, A_{22}, A_{33}: 자승계수(squared coefficients),
A_{12}, A_{13}, A_{23}: 교호작용계수(interaction coefficients)
X_1, X_2, X_3: 독립변수(independent variables)

미니탭(Minitab version 16, Minitab Inc., State college, PA, USA)을 사용하여 ANOVA 분석, 등고선도 작성 그리고 3차원 그래프 작성을 수행하였다. *p*-values가 0.05 미만일 때 통계적으로 유의하다고 판정하였으며, 다항식의 적합성(fitness)를 평가하기 위해서 상관계수(squared correlation coefficients, R^2)를 사용하여 모델의 품질지표(quality indicator)로 사용하였다.

모든 실험데이터는 평균±표준편차로 기술하였으며 평균값들 사이의 유의성의 판단은 Student t-test를 사용하여 판정하였다($p<0.05$).

결과 및 고찰

최적화 연구

반죽에 영향을 미치는 중요한 인자들을 선택한 후에, 반응표면분석 기법 중 가장 빈번하게 사용되는 방법 중에 하나인 박스-벤켄법으로 최적화를 수행하였다. 3개 인자(factor), 3개 수준(level) 그리고 3개의 중심점(center point)으로 구성되어 있는 15회 시험진행으로 공정최적화를 위한 2차 다항식 모델을 구성하였다. 통상적으로 사용하는 3개의 중심점으로 모델의 예측력(prediction)과 강건성(robustness)을 부여하였다.

반죽의 경도와 탄력성에서는 교호작용을 포함한 이차식 모델(quardratic model)이 가장 높은 적합성(fit)을 나타냄을 확인하였고(경도: R^2 = 92.27; 탄력성: R^2 = 94.41), 적합성결여(lack of fit) 역시($p>0.05$, 경도: 0.235; 탄력성: 0.281)으로서 신뢰성이 높아 적절한 모델로 판단하였다(Table 3). 다른 모델들은 적합성결여가 $p<0.05$으로 작거나 선택된 모델에 비하여 낮은 적합성을 나타냄을 확인하였다.

반면, 응집성에서는 교호작용이 없는 자승 모델(square model)이 가장 높은 적합성을 나타냄을 확인하였고(R^2 = 93.32), 적합성결여(lack of fit) 역시($p>0.05$, lack of fit: 0.194)으로서 신뢰성이 높아 적절한 모델로 판단하였다(Table 3). 요약해서 말하면, 반죽의 주요한 품질 특성인 경도, 탄력성 그리고 응집성을 예측하는 모든 모델에서 90% 이상의 매우 높은 적합성과 함께 높은 적합성 결여를 나타

Table 2. Design and results in Box-Behnken design

Run	Water (X_1, g)	Yeast (X_2, g)	Fermentation time (X_3, minute)	Hardness (Y_1, N)	Cohesiveness (Y_2)	Springiness (Y_3, mm)
1	25	1	45	49.8	3.71	0.35
2	30	2	45	58.4	2.63	1.09
3	35	3	45	60.8	1.92	1.03
4	30	2	45	55.3	2.44	0.87
5	35	2	30	60.5	1.74	0.47
6	25	2	60	62.1	1.67	1.05
7	30	3	60	71.8	0.68	1.29
8	25	2	30	58.3	3.06	1.16
9	30	3	30	57.2	1.55	0.49
10	35	1	45	57.3	2.72	0.62
11	25	3	45	52.4	2.88	0.58
12	35	2	60	83.8	0.79	2.67
13	30	1	30	52.0	3.20	0.58
14	30	1	60	64.1	2.31	0.95
15	30	2	45	58.0	2.37	0.94

Table 3. Statistical analysis results of the optimal models in hardness (Y_1), cohesiveness (Y_2) and springiness (Y_3)

Term	Hardness (Y_1)		Cohesiveness (Y_2)		Springiness (Y_3)	
	Coefficient	*p*	Coefficient	*p*	Coefficient	*p*
Intercept	158.5	0.000	1.420	0.000	9.470	0.000
X_1	-1.930	0.001	-0.104	0.000	-0.305	0.010
X_2	2.380	0.048	-0.614	0.000	1.804	0.108
X_3	-4.592	0.000	0.283	0.000	-0.312	0.000
X_2^2	-	-	-	-	-0.423	0.002
X_3^2	0.034	0.001	-0.004	0.000	0.001	0.018
X_1X_3	0.065	0.009	-	-	0.008	0.000
R^2 (%)	92.27		93.32		94.41	
Lack of fit	0.235		0.194		0.281	

내어 사용하기에 적합하였다.

경도는 여러 독립변수들의 변화에 따라 49.8 N에서 83.8 N까지 분포되었으며, 다음의 이차 관계식으로 나타낼 수 있었다(Table 2).

$$Y_1 = 158.5 - 1.930X_1 + 2.380X_2 - 4.592X_3 + 0.034X_3^2 + 0.065X_1X_3$$

세가지 독립변수들 중 발효시간은 가장 영향력이 컸으며 물과의 교호작용도 나타내고 있었다. Fig. 1A와 1C의 등고선도와 3차원 반응표면 분석도에서도 역시 이스트와 발효시간에 의해 반죽의 경도가 증가하고 있음을 확인할 수 있었다.

응집성은 독립변수들의 변화에 따라 0.79에서 3.71까지 분포되었으며, 다음의 자승모델로 나타낼 수 있었다(Table 2).

$$Y_2 = 1.42 - 0.104X_1 - 0.614X_2 + 0.283X_3 - 0.004X_3^2$$

이스트와 물의 첨가에 대해서는 응집성이 다소 감소하는 경향을 보였다. 자승항의 영향으로 발효시간의 증가에 따라서는 응집성이 증가하다가 다시 감소하기 시작하는 경향이 나타났다(Fig. 1B).

탄력성은 독립변수들의 변화에 따라 0.35 mm에서 2.67 mm까지 분포되었으며, 적절한 모델은 이차 관계식이었다(Table 2).

$$Y_3 = 9.47 - 0.305X_1 + 1.804X_2 - 0.312X_3 - 0.423X_2^2 + 0.001X_3^2 + 0.008X_1X_3$$

이 식을 통해서 발효시간 증가에 따른 반죽 탄력의 증가를 확인할 수 있었으며, 이런 현상은 Fig. 1D에서도 분명하게 나타난다. 이스트와 물의 함량 역시 탄력성에 영향을 주었으나 발효시간에 비해 탄력성에 미치는 영향이 다소 작았다.

설계공간(design space)의 확립과 최적점(optimal point) 제시

반죽의 특성에 큰 영향을 주는 독립변수인 물, 이스트 그리고 발효시간이 주요한 종속변수인 경도, 응집성, 탄력성에 미치는 영향을 나타내는 모델들을 설정하고 등고선도

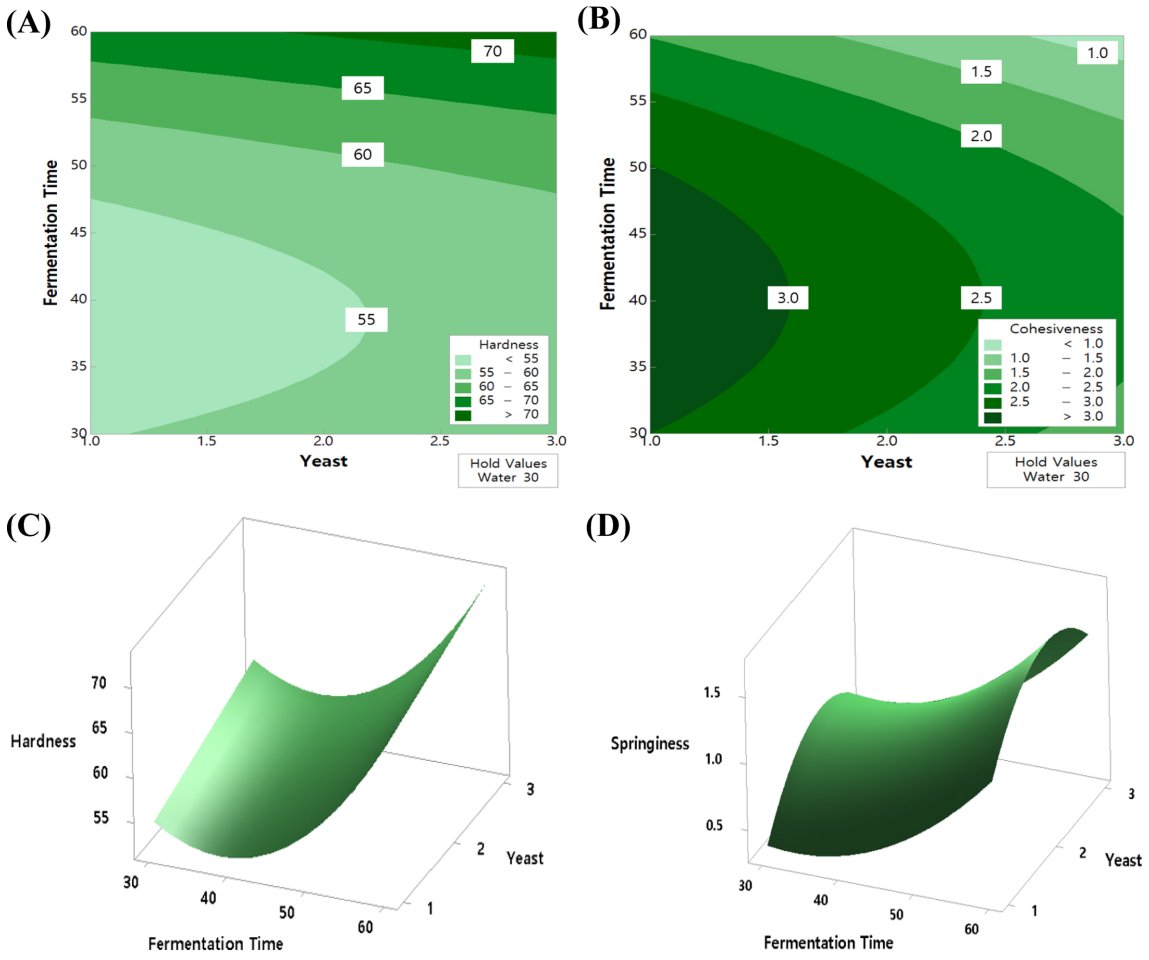

Fig. 1. Contour plots or 3D response surface plots indicating the effects of the mutual interactions on hardness, cohesiveness and springiness of dough.

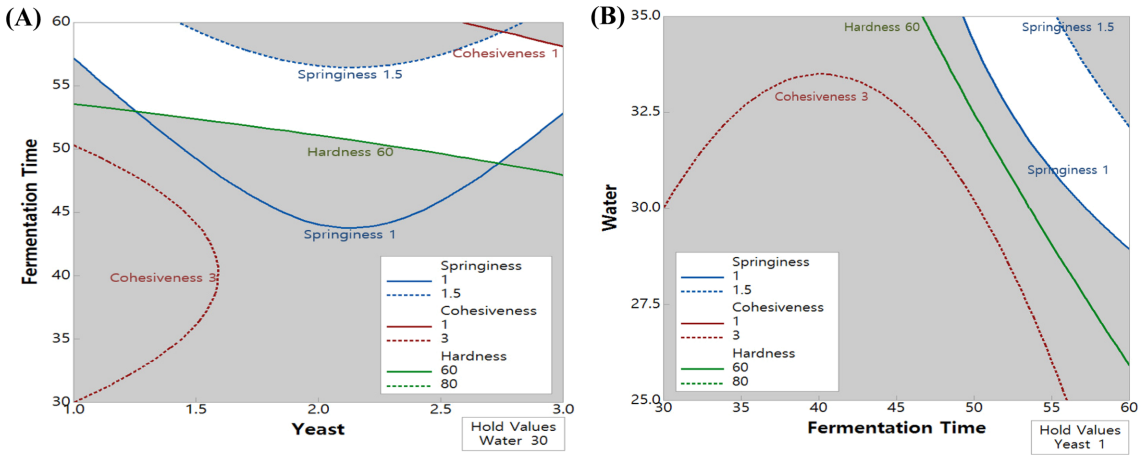

Fig. 2. Design spaces showing the location of optimized dough. (A) Yeast and fermentation time, (B) fermentation time and water.

와 3차원 입체그림을 사용하여 분석하였고(Table 3와 Fig. 1), 이 결과들을 통합하여 설계공간(design space)을 설정하였다(Fig. 2). 설계공간을 구성하기 위해서 미리 정해놓은 종속변수의 상한값, 하한값 그리고 목표값을 이용하여 설계공간 설정에 적용하였다. Fig. 2의 설계공간에서 나타내고 있는 것처럼 경도, 응집성 그리고 탄력성에서 미리 정해놓은 특성값을 모두 만족하는 부분이 흰색 영역으로 표시되었다. 흰색영역으로 나타난 영역 내 어떤 지점을 선택하면 최적의 반죽을 제조 할 수 있는 제조 조건이 정해지며 반죽의 주요한 물리적 특성들도 예측 할 수 있으므로 매우 유용하다.

최적점의 설정을 위해서 Table 1에 나타낸 것처럼 최적 목표점(target value)를 설정하고 최적점을 설정하였다. 최적화 설정 결과 물 35.0 g, 이스트 1.0 g 그리고 발효시간 52.4분으로 제조할 때 그 결과로서 얻어지는 반죽의 경도는 66.2 N, 응집성은 2.3 g 그리고 탄력성은 1.2%로 예측되었다. 이러한 예측이 정확한지 확인해 보기 위하여 제시된 조건으로 반죽을 3회 제조하여 물성을 측정한 결과 경도는 69.4±3.3 N, 응집성은 2.1±0.2 그리고 탄력성은 1.3±0.1 mm로 제조되어, 경도는 104.8%, 응집성은 91.3% 그리고 탄력성은 108.3%의 높은 정확도를 나타내었다. 이 결과를 통하여 최적화를 통하여 얻어진 모델은 최종 제품의 품질 특성을 비교적 정확하게 예측할 수 있어 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

요 약

이 연구에서는 표면반응분석법의 기법 중 하나인 박스-벤켄법을 사용하여 밀가루 반죽의 물리적 특성을 예측하고 조절 할 수 있는 방법을 연구하였다. 반죽의 주요한 물리적 특성으로는 경도, 응집성 그리고 탄력성을 선정하였고 주요한 영향인자들로서 물, 이스트 그리고 발효시간을 선정한 후에 영향인자들과 물리적 특성들의 관계를 나타내는 모델링을 수행하였다. 얻어진 모델을 통하여 설계공간을 설정하고 제조를 위한 최적조건과 예상 결과를 계산할 수 있었으며, 예측된 결과와 실제 결과들은 모두 90% 이상의 정확성을 나타내었다. 결론적으로 표면반응분석법에 의한 최적화 기법은 식품산업에서 반죽특성과 최종제품의 품질을 예측하는데 폭넓게 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부가 지원하는 지역주력산업육성(R&D) 기술개발사업으로 수행된 연구결과입니다.

References

Chen H, Rubenthaler GL, Schanus EG. 1988. Effect of apple fiber and cellulose on the physical properties of wheat flour. J. Food Sci. 53: 304-305.

Cho HJ, Yu YJ, Kang MJ, Um IC. 2011. Study on the noodle-making properties of rice added with natural polymers. Curr. Res. Agric. Life Sci. 29: 55-62.

Choi YH, Lee JE, Kim EM, Park SY. 2012. Quality changes of steamed rice bread with addition of active gluten and rice nuruk. Korean J. Food Nutr. 25: 253-258.

Ghodke SK, Ananthanarayan L, Rodrigues L. 2009. Use of response surface methodology to investigate the effects of milling conditions on damaged starch, dough stickiness and chapatti quality. Food Chem. 112: 1010-1015.

Ha GY, Yu JS, Shin MS, Ko JK, Kim BK, Kang HJ, Kim HS. 2012. Processing suitability of rice cake with ramie leaves (*Boehmeria Nivea L.*). Food Eng. Prog. 16: 242-248.

Kim GS, Park GS. 2008. Quality characteristics of cookies prepared with lotus leaf powder. Korean J. Food Cookery Sci. 24: 398-404.

Kim JN, Shin WS. 2009. Physical and sensory properties of chiffon cake made with rice flour. Korean J. Food Technol. 41: 69-

76.
Kittisuban P, Ritthiruangdej P, Suphantharika M. 2014. Optimization of hydroxypropylmethylcellulose, yeast β-glucan, and whey protein levels based on physical properties of gluten-free rice bread using response surface methodology. LWT-Food Sci. Technol. 57: 738-748.
Ko YJ, Joo NM. 2005. Quality characteristics and optimization of iced cookie with addition of jinuni bean (*Rhynchosia volubilis*). Korean J. Food Cookery Sci. 21: 514-527.
Lee JM, Lee MK, Lee SK, Cho NJ, Kim SM. 2001. Effect of gums added in making frozen dough on the characteristics of bread-making. Korean J. Food Sci. Technol. 33: 190-194.
Lee MH, Oh MS. 2006. Quality characteristics of cookies with brown rice flour. Korean J. Food Culture 21: 685-694.
Oh YK, Kim CS. 2002. Effect of green tea powder on dough rheology and gelatinization characteristics. J. Korean Soc. Food Sci. Nutr. 51: 749-753.
Park ID. 2012. Effects of sweet pumpkin powder on quality characteristics of cookies. Korean J. Food Culture 27: 89-94.
Różyło R. 2014. Effect of process modifications in two cycles of dough mixing on physical properties of wheat bread baked from weak flour. Food Bioprocess Tech. 7: 774-783.
Vélez-Ruiz JF & Sosa-Morales ME. 2003. Evaluation of physical properties of dough of donuts during deep-fat frying at different temperatures. Int. J. Food Prop. 6: 341-353.