

세라믹 롤 소재 개발과 초음파를 이용한 기계적 특성평가

Development of Ceramic Roll Materials and Evaluation of Mechanical Properties by Ultrasonic

강위수* 박인근*
정회원 정회원
W.S.Kang R.K.Park

1. 서론

식품가공 산업분야에서는 가공재료 중 유효한 성분 추출용이, 표면적 증가로 용해능력 및 가공효율을 향상시키기 위한 목적으로 분쇄를 한다. 국내에서 일반적으로 식품재료 분쇄는 햄머밀, 롤분쇄기를 범용적으로 사용하고 있는 실정인데 햄머밀은 분쇄시 분쇄효율은 좋으나 분쇄열과 소음 등의 문제로 인해 롤밀이 많이 보급되어왔다. 국내의 4만여개 방앗간에서 10만여개의 회주철 롤 분쇄기가 사용되고 있으나 분쇄공정상에서 롤 밀간의 접촉압력 등에 의한 접촉부위의 마모가 초래되고 마모된 금속이 식품 분쇄 재료에 혼입 되고 있고, 현재 생산되고 있는 분쇄기는 개발당시와 비교하여 분쇄원리나 전체적 구조가 크게 변화되지 않은 것으로 조사되었다⁽¹⁾. 최근 국민 보건에 대한 관심이 고조되고 식품 가공 재료에 설탕의 잔존문제가 여론화되면서 이를 최소화하기 위한 방안들이 제기되고 있으며 근본적으로 내마모성과 내부식성 성질을 갖는 롤 소재개발이 요구되고 있는 실정이다. 현재 식품가공분야에서 사용되고 있는 롤 소재를 금속에서 세라믹스로 교체하면 내부식성, 내마모성이 우수하여 가장 이상적인 소재이나 분쇄공정상에서 외부의 충격이 롤에 가해진 힘보다 롤 소재의 강도가 크면 롤 손상이 일어나지 않을 것이다. 세라믹스 롤의 기계적 강도에 대한 설계는 외부 충격의 크기에 의하여 결정되기 때문에 세라믹스 소지의 치밀도, 기계적 강도, 파괴인성 등에 관한 자료가 요구되나 이에 대한 연구가 아직 초기상태이다^(2, 4).

세라믹스의 기계적 특성 품질 평가방법에 있어서는 파괴적 방법과 비파괴적 방법이 있다. 세라믹스 롤과 같은 구조물 형태를 갖은 상태에서는 외관상 검사밖에 없기 때문에 제품에 대한 신뢰성 평가가 어려운 실정이다. 따라서, 초음파를 이용한 비파괴적 방법을 응용한다면 세라믹스 롤 재료의 탄성계수 등을 정확하게 측정 할 수 있고 세라믹스 롤 제품의 신뢰성을 향상시킬 수 있으므로 이에 대한 연구가 수행되고 있다⁽¹⁻⁸⁾.

† 본 연구는 농림기술개발연구비로 수행되었음.

* 강원대학교 농업생명과학대학 농업공학부 농업기계전공

본 연구에서는 백토소지에 알루미나를 첨가한 시편에 대해 소성온도와 첨가량에 따른 조직의 치밀화에 의한 기계적 특성이 좋고 경제적인 소재 개발과, 세라믹스의 기계적 특성평가에 있어서 초음파를 이용하여 측정된 탄성계수와 파괴 검사한 결과의 상관관계를 찾아 기계적 특성 품질평가에 대해 초음파 음속을 이용한 비파괴적 방법의 신뢰성을 확립하는데 필요한 기초자료를 제시하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

1. 공시재료

본 연구의 공시재료는 공업용 알루미나(Al_2O_3 , 순도:96%)와 백토소지를 이용하여 백토소지에 알루미나 첨가량을 0~50wt.% 첨가하여 볼밀을 이용 5시간 혼합·분쇄한 후, 일축유압프레스로 250MPa의 압력을 가하여 $12 \times 5 \times 60(mm^3)$ 의 각주상의 시편을 성형하였다. 또한, 재료의 치밀화를 위하여 냉간정수압성형기(CIP: Cold Isostatic Press)를 사용하여 150MPa의 압력을 가하여 시편을 제작하였다.

제작된 시편을 전기로에서 $5^\circ C/min$ 의 승온속도로 1200, 1300, 1400 $^\circ C$ 에서 5시간 유지한 후 노에서 서서히 냉각시켜 공시체를 제조하였다.

표 1은 공시재료의 화학성분 분석표를 나타낸 것이다.

Table 1. Chemical compositions of Al_2O_3 and porcelain bodies

	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	CaO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	ZrO ₂ (%)	lg.loss (%)
Al ₂ O ₃	2.58	93.8	0.17	0.836	0.17	1.65	0.55	0.05	
porcelain bodies	65.2	21.4	1.04	-	0.41	2.89	0.92	0.01	7.27

2. 초음파 계측계의 구성 및 측정 방법

본 연구에서 사용된 초음파 펄스발생 및 측정장치는 PC로 제어가 가능한 RAM-10000 (RITEC, USA)으로서 PC내에는 고속 A/D Convertor Board가 장착되어 있고 Sampling Rate 100MHz, Resolution 8bit인 Sonix사의 STR 8100을 사용하였다. 측정방법에 있어서는 펄스에코우법(pulse-echo method)을 이용하였다. 종파의 속도는 5MHz의 탐촉자를 사용하였고 횡파의 음속 측정에는 60 $^\circ$ 의 굴절각을 가지는 5MHz의 수신용 탐촉자와 2MHz의 수신용 탐촉자를 이용하여 음속을 측정하였다.

본 연구에서 사용한 초음파 측정장비의 block diagram은 그림 1과 같다.

$$K_{1c} = \frac{1}{\pi^{3/2} \tan \psi} \cdot \frac{P}{C^{3/2}} = x \frac{P}{C^{3/2}} \text{-----식(5)}$$

여기서, P : 시편에 가해진 하중 C : 시편 MC길이
 ψ : indenter의 각도(68°)

6. 미세구조 관찰

공시체의 미세구조는 연마한 시편을 5% HF수용액에서 4분간 에칭한 후, Au를 코팅하여 주사전자현미경(Akashi Co., SS130, Japan)을 이용하여 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구의 수행을 위해 백토소지에 알루미나를 첨가시켜 제작한 시편을 펄스반사법을 이용하여 초음파의 음속을 측정하여 초음파 속도와 부피비중, 3점곡강도, 파괴인성의 관계를 조사한 결과는 다음과 같다.

Table 2 Relation between bulk density, ultrasonic velocity and young's modulus.

Sintering Temp.(℃)	1200℃				1300℃				1400℃			
	V _L (m/s)	V _T (m/s)	Bulk Density	Young's modulus (GPa)	V _L (m/s)	V _T (m/s)	Bulk Density	Young's modulus (GPa)	V _L (m/s)	V _T (m/s)	Bulk Density	Young's modulus (GPa)
0	5915	3528	2.453	75	5685	2172	2.113	28.2	5596	2019	2.024	23.5
10	6264	3191	2.537	68.3	5475	2938	2.184	48.6	5507	2564	2.18	39.1
20	6199	3311	2.55	73.1	6307	3150	2.471	64.1	5827	2680	2.182	41.3
30	6803	3884	2.692	102.7	6695	3742	2.504	89	6183	3647	2.217	72.4
40	7090	4136	2.77	118.4	7051	4123	2.602	109.4	6906	3954	2.436	95.5
50	6743	3752	2.622	94.1	6817	3886	2.501	96.2	6809	3886	2.373	89.1

표 2와 그림 2에서 보듯이 각각의 소성온도에서 알루미나 첨가량이 증가함에 따라 초음파의 종파 및 횡파의 속도가 증가되는 것으로 분석되었는데 이는 첨가량 증가에 따른 내부조직의 치밀화로 인해 밀도가 증가했기 때문이다. 초음파 음속을 이용하여 측정한 탄성계수는 소성온도가 1200℃이고 알루미나 첨가량이 40wt.%일 때 밀도는 2.77g/cm³, 탄성계수는 118.4GPa로 알루미나를 첨가하지 않은 백토소지의 시편보다 약58% 증가되어 가장 높게 측정되었다. 또한, 소성온도가 1300℃, 1400℃일 때 밀도와 탄성계수 및 초음파의 속도가 1200℃보다 낮게 나타난 이유는 백토소지가 소성온도 증가에 따라 내부에 존재하고 있던 미세한 기공들이 성장하여 기포발생에 의한 것으로 분석되었다. 알루미나 첨가량을 50wt.%로

첨가한 경우는 초음파의 속도와 밀도 모두 감소되었는데 이는 알루미나의 과포화로 인해 조직의 치밀화가 이루어지지 않았기 때문인 것으로 분석되었다.

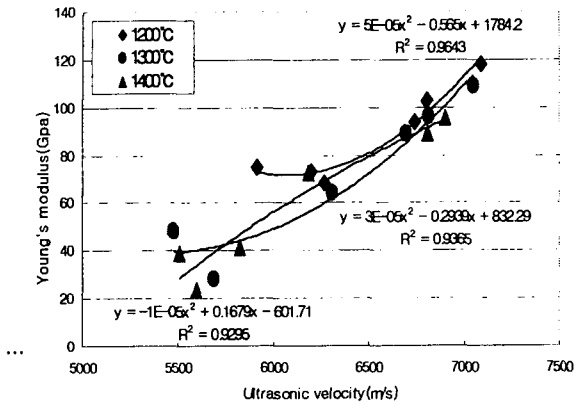


Fig 2. Effect of ultrasonic velocity on the young's modulus.

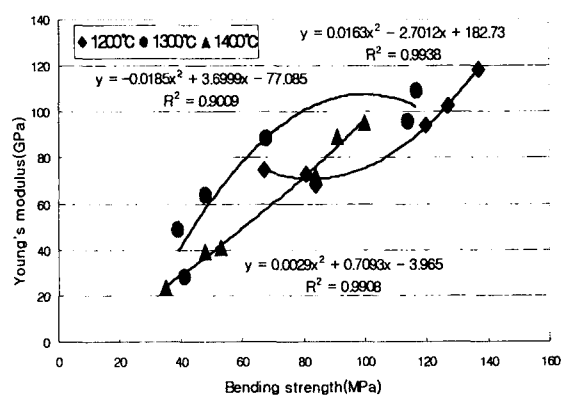


Fig 3. Relation between bending strength and young's modulus.

Table 3 Relation between young's modulus, bending strength and fracture toughness.

Sintering Temp.(°C)	1200°C			1300°C			1400°C		
	Young's modulus (GPa)	Bending strength (MPa)	Fracture toughness (MPa · m ^{1/2})	Young's modulus (GPa)	Bending strength (MPa)	Fracture toughness (MPa · m ^{1/2})	Young's modulus (GPa)	Bending strength (MPa)	Fracture toughness (MPa · m ^{1/2})
Al ₂ O ₃ Addition (wt.%)									
0	75	67	2.19	28.2	41	1.75	23.5	35	1.28
10	68.3	84	2.27	48.6	39	1.7	39.1	48	1.35
20	73.1	81	2.23	64.1	48	1.76	41.3	53	1.64
30	102.7	127	2.31	89	68	1.92	72.4	84	1.82
40	118.4	137	2.88	109.4	117	1.99	95.5	100	2.17
50	94.1	120	2.4	96.2	114	1.94	89.1	91	1.82

표 3과 그림 3에서 보면 알루미나의 첨가량이 증가함에 따라 초음파를 이용하여 구한 탄성계수(young's modulus)값이 증가하였고 실제 파괴검사한 3점 곡강도 값도 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 알루미나의 첨가량이 증가함에 따라 내부조직이 치밀화가 이루어져 초음파의 종파 및 횡파의 속도가 빨라졌기 때문인 것으로 분석되었고 첨가량을 50wt.% 첨가한 시편의 경우에는 기계적 강도가 떨어진 것으로 나타났는데 이는 알루미나의 과포화로 인한 내부조직이 치밀화가 이루어지지 않아 밀도 값이 떨어진 원인에 있다. 소성온도가 1200°C이고 알루미나 첨가량을 40wt.% 첨가한 시편이 백토소지에 알루미나를 첨가시키지 않은 시편보다 실제 기계적 강도가 67MPa에서 120MPa로 2배 증가하여 가장 높은 것으로 분석되었다. 또한, 초음파를 이용하여 비파괴적 방법으로 측정된 탄성계수와 실제 파괴검사한 곡

강도와 의 관계는 그림 3에서 보듯이 각각의 소성온도에 대해서 R^2 값이 0.9이상인 2차 회귀 방정식의 관계를 가지는 것으로 분석되었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 백토소지에 알루미나를 첨가한 재료의 소성온도와 첨가량의 치밀화 따라 기계적 특성이 좋고 경제적인 세라믹스 롤 소재를 개발하고자 하였고 초음파 음속을 이용하여 측정된 탄성계수에 대해 파괴검사를 병행하여 신뢰성을 확립하는데 필요한 기초자료를 제시하고자 하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 백토소지에 알루미나를 첨가한 재료의 소성온도와 첨가량에 따른 기계적 특성평가에 있어 초음파를 이용한 비파괴적 방법과 파괴인성, 3점곡강도의 파괴검사를 수행한 결과 소성온도가 1200℃이고 알루미나 첨가량이 40wt.% 일 때 밀도가 2.77g/cm³로 가장 높아 조직이 가장 치밀하였고 초음파를 이용하여 측정된 탄성계수와 파괴검사한 3점곡강도의 값도 각각 118.4GPa, 137MPa로 기계적 강도가 가장 우수한 것으로 분석되었다.
- 2) 초음파 음속을 이용하여 탄성계수를 측정된 값과 파괴검사한 3점 곡강도 값과의 상관관계에서 1200℃일 때 $R^2=0.9938$ 인 $y=0.0163x^2-2.7012x+182.73$, 1300℃에서는 $R^2=0.9009$ 인 $y=-0.0185x^2+3.6999x-77.085$, 1400℃에서는 $R^2=0.9908$ 인 $y=0.0029x^2+0.7093x-3.965$ 의 이차회귀 방정식의 관계를 가져 조직이 치밀한 경우에는 초음파를 이용한 비파괴적 검사와 파괴검사에 있어서 신뢰도가 높은 상관관계의 회귀방정식을 갖는 것으로 분석되었다.
- 3) 초음파를 이용한 기계적 특성 측정의 신뢰성에 있어서 파괴검사를 통해 초음파를 이용한 품질평가의 신뢰성을 확립할 수 있는 것으로 분석되었다.

5. 참고문헌

- 1) 고춧가루분쇄기의 표준화에 관한 연구보고서. 1996. 국립기술품질원
- 2) 강위수, 박인근, 한상목, 신대용. 1999. 세라믹 자기소지에 Al₂O₃ 첨가량이 초음파 속도에 미치는 영향. 한국비파괴검사학회 99년도 추계학술발표회 논문집 pp.90-97
- 3) 문정훈, 김진구. 1998. 초음파탐상검사. 원창출판사
- 4) 범용 Ceramic Roll Mill 소재 및 생산기술 개발. 1999. 농림부
- 5) 장병국, 이상호, 오희갑, 1995. 비파괴 검사에 의한 세라믹스의 결함 및 신뢰성 평가. 요업기술 Vol. 10, No.4
- 6) David W. Richerson. Modern Ceramoc Engineering, Second edition
- 7) George T. Baaklini, Edward R. Generazio, and James D. Kiser. 1989. High-Frequency Ultrasonic Characterization of Sintered Silicon Carbide. J. Am. Ceram. Soc, 72[3] pp.383-387.
- 8) Kishi,T.and J.-H. Koo. 1999. Non-Destructive Evaluation of Engineering Ceramics. Key Engineering Material Vols. 161-163, pp. 587-592.