

## 식품분쇄용 세라믹 롤 재료 개발과 기계적 특성평가

# Development of Ceramic Roll Materials for Food Grinding Processing and Evaluation of Mechanical Behavior

강 위 수

정희원

W. S. Kang

### SUMMARY

In order to prevent the possibility of mixing of metal powder during food grinding processing with the metal roll mill this study was conducted to develop the materials of ceramics roll as a substitute of gray cast iron roll mill.

Since the ceramics is brittle material and can be broken easily by a crack, it was needed to develop engineering ceramics roll materials with high elastic modulus and fracture toughness. Adding 0~50 wt%  $Al_2O_3$  as densification additives to porcelain body material and forming the ceramics an different condition, mechanical properties were evaluated. The material structure's densification process was analyzed by SEM and XRD. The evaluation of the mechanical properties of ceramics roll materials were compared and analyzed by non-destructive test using Young's modulus and destructive test using 3-point bending strength and fracture toughness.

The results showed several correlative results. Porcelain body material with 40 wt%  $Al_2O_3$  content heated at 1,200°C for 5h was high bulk density of 2.77. Young's modulus of 118.4 GPa, 3-point bending strength of 137 MPa and fracture toughness of 2.88  $MPa \cdot m^{1/2}$ . After analyzing the relationship between non-destructive test and destructive test, the coefficient of determination was more than 0.9. Therefore, the evaluation of non-destructive test by ultrasonic was turned out to be feasible in evaluating the mechanical properties of ceramics.

**Keywords** : Ceramics roll mill, Densification, Ultrasonic test, Mechanical behavior.

---

This study was conducted by the research fund of advanced technology project(No:297001) and supported by ARPC. The article was submitted for publication in September 2000, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in January 2001. The coresponding author is W. S. Kang, Assistant Professor, Agricultural Machinery Engineering program, Kangwon National University, 192-1 Hyojadong, Chunchon, 200-701, E-mail: <kangwiso@kangwon.ac.kr>

## 1. 서 론

식품가공 산업분야에서 분쇄는 식품가공 중에 실시되는 작업으로서 유효 성분의 추출을 용이하게 하고 표면적 증가로 용해능력 및 가공효율을 향상시키기 위한 목적으로 이용한다. 일반적으로 국내에서 식품재료 분쇄는 해머밀, 롤밀을 사용하나 해머밀은 분쇄효율은 좋으나 분쇄 열과 소음 등의 문제로 인해 롤밀이 많이 보급되어 왔다. 국립기술품질원(1996)의 조사에 의하면 국내의 4만여 개 방앗간에서 10만여 개의 회주철 롤 분쇄기가 사용되고 있으나 분쇄 공정상에서 롤 밀간의 접촉압력 등에 의한 접촉부의 마모에 의한 쇳가루가 고춧가루에 혼입되며, 현재 사용되고 있는 분쇄기는 개발당시와 비교하여 분쇄원리나 구조가 크게 변화되지 않았다. 강 등(1999, 2000)은 쌀과 고춧가루 분쇄시 롤 분쇄기의 롤 회전비를 변화시켜 분쇄능 향상과 분쇄 소요에너지를 절감할 수 있는 기술을 개발하였고, 기존의 회주철 롤보다 세라믹스롤의 분쇄능이 우수하다고 보고하였다. 최근 국민 보건에 대한 관심이 고조되고 식품 가공 재료에 쇳가루의 잔존문제가 여론화되면서 이를 최소화하기 위한 방안들이 제기되고 있으며 쇳가루 발생을 근본적으로 해결하기 위해서는 내마모성과 내부식성 성질을 가진 롤 소재 개발이 요구되고 있으며, 이에 대하여 강 등(1999, 2000)은 범용 세라믹스 롤 소재 및 생산기술 개발에 대한 연구를 하였다. 현재 식품가공 분야에서 사용되고 있는 롤 소재를 금속에서 세라믹스로 교체하면 내식성 및 내마모성이 향상되나, 세라믹스는 원자나 이온이 강한 결합력에 의하여 변형이 일어나기 어려운 구조로 구성되어 응력완화가 일어나기 힘들어 비교적 작은 균열에 의해서도 파괴가 시작되며 충격에 약한 결점을 갖고 있다. 따라서 세라믹스 롤 분쇄기의 재료로 사용하기 위해서는 탄성계수가 높고 우수한 파괴인성과 양산화가 가능한 구조용 세라믹소재가 요구된다(강 등, 1999).

세라믹스의 파괴 원인은 기공, 이물질 개재, 이상입자 성장, 불균일한 성형, 표면의 흠 발생 등에 의한 강도의 편차에 의하기 때문에 강도분포를 정확하게 알 수 있다면 취성재료인 세라믹스의 강도 향상과 응용에 있어서 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 강도를 평가하는 방법으로 실험실에서 시편을

제작하여 기계적 특성을 평가하는 와이블 통계처리법을 사용하고 있으나(Weibull, 1951), 와이블 통계처리를 적용하기 위해서는 시험편과 공장에서 생산되는 실용부품의 원료공급, 분말의 화학성분, 입자크기, 각 생산공정(성형조건, 소결)이 일정하여야 하나 현실적으로는 이것이 불가능하여 시제품과 실용부품의 강도 분포에 차이가 크기 때문에 실용부품의 강도를 정확히 평가 할 수 있는 비파괴적 측정방법의 개발이 요구되며 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(장병국 등, 1995; Schilling 등, 2000; 강 등, 1999).

세라믹스 재료는 파단시 일반적으로 변형이 0.2% 이하로 변형되므로 완전탄성체라 볼 수 있으며 재료의 화학조성비, 성형조건, 소결조건에 따른 각 재료의 기계적 성능은 초음파를 이용한 비파괴적 방법을 응용하여 세라믹스 재질의 Young's modulus, 인장율, 전단율, Lamé 상수 등을 측정하여 판정 할 수 있다(문정훈 등, 1998; Garcia 등, 2000). 또한 세라믹스 재료의 수명평가에 필요한 파괴인성, 곡강도 등과 같은 파괴검사와 재료의 초음파 속도를 측정하여 탄성계수를 분석하고 SEM을 이용한 미세구조의 파악과 특성을 비교·분석하여 롤 분쇄기에 적합한 세라믹스 롤 부품 재료의 수명·신뢰성을 평가하는 기술이 요구되고 있는 실정이나 아직 초기 연구상태이다(강 등, 1999; George 등, 1989; Kishi 등, 1999; Chang 등, 1997; Louis 등, 1996; Panakkal, 1996).

본 연구에서는 내마모성이 우수하고 양산화가 가능한 세라믹스 롤 소재를 개발하기 위하여 세라믹스 자기소지의 치밀화를 위한 첨가제로 0~50 wt%  $Al_2O_3$ 을 첨가시켜 성형한 공시재료를 1,200℃~1,400℃에서 소결하여 공시체를 제작하였고, 세라믹스 조직의 치밀화 경향은 비중, SEM으로 분석하고, 기계적 특성에 미치는 결정상 생성은 XRD로 분석하였다. 공시체의 기계적 강도는 비파괴적 검사인 초음파를 이용하여 각 공시체의 초음파 속도를 측정하여 Young's modulus를 구하고자 하였으며, 파괴적 검사인 3-점곡강도와 파괴인성을 측정하여, 그 결과치를 비교·분석하여 내마모성이 우수한 롤 소재를 개발하고자 하였으며, 기계적 특성 품질 평가에 있어서 초음파 음속을 이용한 비파괴적 방법의 신뢰성을 확립할 수 있는 평가 기술을 개발하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 공시재료 및 시편 제작

표 1은 공시재료인 자기소지와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말의 화학성분 분석치이다. 백토소지의 화학성분은 주로 SiO<sub>2</sub> 65.2 wt%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 21.4 wt%, K<sub>2</sub>O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, CaO가 혼입되었으며, 강열감량이 7.3 wt%이었다. 첨가제인 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : 93.8wt%, MgO : 0.64 wt%, 불순물로 SiO<sub>2</sub> 및 K<sub>2</sub>O가 소량 혼입되어 있음을 알 수 있다.

자기소지에 첨가제로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말을 0, 10, 20, 30, 40, 50 wt%로 첨가하여 각각 불 밑에 5시간 혼합·분쇄한 후, 일축유압프레스로 12×5×60 (mm<sup>3</sup>)의 각주상의 성형시편을 1차 제작하고, 시편의 치밀화를 위하여 냉간 정수압 성형 기(CIP: Cold Isostatic Press : Reaction Eng., Model CP-3-1-40)를 사용하여 150MPa 압력에서 3분간 유지시켜 시편을 제작하였다. 제작된 시편을 전기로에서 5℃/min의 승온속도로 1,200~1,400℃에서 5시간 유지한 후 로냉하였다. 공시체는 각 온도별로 12개씩 제조하여 공시체의 비중, 종·횡속도, 탄성계수, 3-점곡강도, 파괴인성을 측정하였다.

### 나. 미세구조 관찰

공시체의 미세구조는 연마기(Struers Labo Pol-5)를 이용하여 표면을 연마한 시편을 5% HF 수용액에서 4분간 etching한 후, Au를 코팅하여 주사형 전자현미경(JEOL Model(SEM), JMS-5410, Japan)을 이용하여 세라믹스 내부 조직을 관찰하였다.

### 다. X-선 회절분석

공시체의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량과 소성온도별에 따른 결정상의 변화를 조사하고자 X-선 분말회절기(Powder X-ray Diffractometer, Model D5005, Netherlands)를 이용하여 CuK $\alpha$ 1, Ni filter, 40 kV, 30 mA의 조건으로 5° ~ 70° 범위에서 측정하였다.

### 라. 초음파측기의 구성 및 측정방법

본 연구에서 사용된 초음파의 펄스발생 및 측정장치는 PC로 제어 가능한 RAM-10,000(RITEC, USA)으로서 PC내에는 고속A/D convertor board가 장착되어 있고 sampling rate 100MHz, resolution 8bit(Sonix, STR 8,100)를 사용하였다. 종파의 속도 측정은 5 MHz의 탐촉자를 사용하였고 횡파의 속도 측정에는 60°의 굴절각을 가지는 5 MHz의 수신용 탐촉자와 2 MHz의 송신용 탐촉자를 이용하여 초음파 진행시간을 측정하여 음속을 계산하였다. 그림 1은 초음파 음속 측정을 위한 RAM-10000의 block diagram을 나타낸 것이고 그림 2는 횡파속도 측정방법을 나타낸 것이다.

### 마. 초음파를 이용한 탄성계수 측정

물체속을 초음파가 전파하는 속도로부터 Young's modulus를 구하는 것이 펄스법의 원리로서 현재 널리 이용되고 있는 방법이다. 이는 진동자를 이용하여 초음파가 물체속을 통과하는 종파속도 V<sub>L</sub>(Longitudinal wave velocity)과 횡파속도 V<sub>S</sub>(Transverse wave velocity)를 직접 측정하고, 세라믹스 재료에서 종파속도 V<sub>L</sub>, Poisson ratio  $\nu$ 와 Young's modulus E, 부피비중  $\rho$ 의 관계식은 다음과 같다(Schilling 등, 2000).

Table 1 Chemical compositions of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder and porcelain body material

(Unit : wt%)

Comp.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	ZrO <sub>3</sub>	lg.loss
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> powder	2.58	93.8	0.17	0.836	0.17	1.65	0.55	0.05	
Porcelain body	65.2	21.4	1.04	-	0.41	2.89	0.92	0.01	7.27

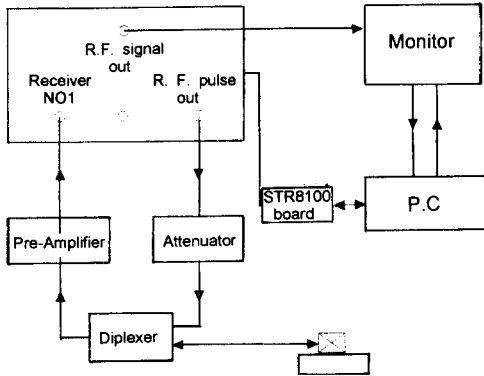


Fig. 1 Block diagram of ultrasonic testing block with RAM-10000 equipment.

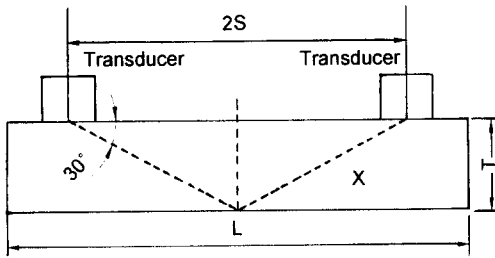


Fig. 2 The measurement of transverse wave ultrasonic velocity.

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\nu = \left(1 - \frac{V_T^2}{V_L^2 - V_T^2}\right) \dots\dots\dots (2)$$

$$E = 2\rho V_T^2(1 + \nu) \dots\dots\dots (3)$$

바. 3-점곡강도의 측정

열처리 온도에 따른 시편의 곡강도 측정은 UTM(Universal Testing Machine, United Co., SMF Model)을 이용하여 0.5 mm/min의 cross head speed로 span 거리 30 mm의 조건으로 측정하여 식(4)을 이용하여 3점-곡강도 값을 산출하였다.

$$\delta_{b3} = \frac{3PL}{2tw^2} \dots\dots\dots (4)$$

여기서,  $\delta_{b3}$  : 3-점 곡강도,

P : 최대하중

L : 하부지점간의 거리

t : 시편의 두께

w : 시편의 폭

사. 파괴인성 측정

선 탄성 파괴 역학적 관점에서 균열이 성장하여 파괴를 일으킬 때 균열선단에서의 응력확대 계수  $K_{Ic}$ 는 식(5)와 같다. 압흔(indentation)법은 Vickers 경도시험기(Akashi. Co., MVK- G2)를 이용하여 연마된 시편표면에 5kgf/하중, 15sec/하중시간으로 압흔을 형성시킨 후, 압흔과 크랙의 길이를 측정하여 식(5)를 이용하여 파괴인성을 계산하였다(Lawn 등, 1975).

$$K_{Ic} = \frac{1}{\pi^{2/3} \tan \psi} \cdot \frac{P}{C^{2/3}} \dots\dots\dots (5)$$

여기서, P : 시편에 가해진 하중(kg)

C : 시편 MC길이

$\psi$  : indenter의 각도(68°)

3. 결과 및 고찰

가. 결정상 분석과 미세구조 관찰

그림 3은 자기소지에 0~50 wt%  $Al_2O_3$ 의 첨가량에 따른 공시재료를 1,200°C에서 5시간 소결 한 후, X-선 회절분석한 결과이며, 그림 4는 위 재료의 SEM 사진이다.

자기소지 공시체에는 Quartz상과 원료에 불순물로 혼입된 CaO,  $Na_2O$  등과 반응하여 생성된  $SiO_2$  유리상과  $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  화학성분인 mullite로 구성되었음을 XRD로 분석한 결과로부터 알 수 있으며(그림 3), 그림 4-[a]에 침상인 mullite상이 생성되었음을 관찰 할 수 있었다.

자기소지에 10 wt% ~ 30 wt%  $Al_2O_3$ 를 첨가한 공시체인 경우 그림 3의 XRD 분석결과로부터 유리상과 mullite상이 생성되었음을 알 수 있으며, 그림 4-[b]~[d]와 같이 mullite의 결정상이 성장되

Table 2 Bulk density, ultrasonic velocity and young's modulus of porcelain body materials with 0~50 wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content heated at 1,200°C~1,400°C for 5h

Addition of Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (wt%)	1200°C				1300°C				1400°C			
	V <sub>L</sub> (m/s)	V <sub>S</sub> (m/s)	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	Young's modulus (GPa)	V <sub>L</sub> (m/s)	V <sub>S</sub> (m/s)	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	Young's modulus (GPa)	V <sub>L</sub> (m/s)	V <sub>S</sub> (m/s)	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	Young's modulus (GPa)
0	5915 ± 50	3528 ± 94.4	2.453 ± 0.02	75.0 ± 2.92	5685 ± 33.4	2172 ± 75.9	2.113 ± 0.01	28.2 ± 1.86	5596 ± 61.7	2019 ± 27.0	2.024 ± 0.03	23.5 ± 0.64
10	6264 ± 77.8	3191 ± 193	2.537 ± 0.04	68.3 ± 7.01	5475 ± 133	2938 ± 119	2.184 ± 0.03	48.6 ± 3.28	5507 ± 124	2564 ± 100	2.18 ± 0.01	39.1 ± 2.7
20	6199 ± 318	3311 ± 176	2.55 ± 0.02	73.1 ± 5.95	6307 ± 27	3150 ± 110	2.471 ± 0.07	64.1 ± 3.92	5827 ± 239	2680 ± 113	2.182 ± 0.03	41.3 ± 2.8
30	6803 ± 35	3884 ± 127	2.692 ± 0.02	102.7 ± 5.57	6695 ± 42	3742 ± 73	2.504 ± 0.02	89 ± 2.22	6183 ± 42	3647 ± 121	2.217 ± 0.01	72.4 ± 3.31
40	7090 ± 28	4136 ± 127	2.77 ± 0.01	118.4 ± 5.99	7051 ± 29.1	4123 ± 140	2.602 ± 0.02	109.4 ± 6.09	6906 ± 39	3954 ± 150	2.436 ± 0.04	95.5 ± 4.89
50	6743 ± 76	3752 ± 143	2.622 ± 0.01	94.1 ± 8.34	6817 ± 32	3886 ± 131	2.501 ± 0.02	96.2 ± 6.51	6809 ± 38	3886 ± 93	2.373 ± 0.01	89.1 ± 3.1

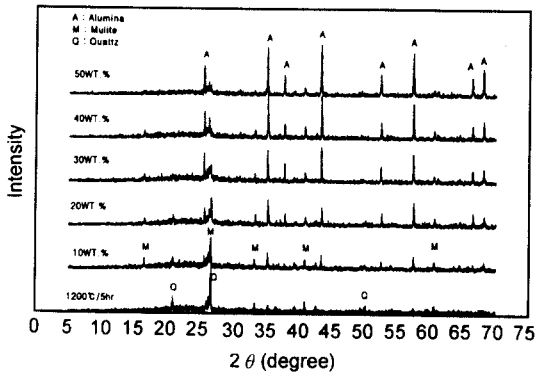


Fig. 3 XRD patterns of porcelain body materials with 0~50 wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content heated at 1,200°C for 5h.

있음을 관찰할 수 있었다.

40 wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 첨가한 공시체의 경우 그림 3과 같이 유리상이 소멸되면서 mullite상과 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>상이 생성되었으며, 그림 4-[e]에서 보듯이 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자주변에 침상인 mullite가 생성되었음을 관찰할 수 있다. 50 wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 첨가한 공시체의 경우 주결정상으로서 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>상이 생성되었으나,

낮은 소성온도로 인하여 치밀화 되지 않은 조직 상태를 그림 4-[f] 사진으로 관찰 할 수 있었다.

소성온도를 1,300°C 및 1,400°C로 증가시킨 공시체에서는 침상인 mullite상이 증가하면서 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>상이 감소되었음을 XRD 분석결과 확인 할 수 있었다(그림 5). 점토계 원료에 40 wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 첨가한 공시체의 경우, 그림6-[a]와 같이 1,300°C에서 소성한 시료의 mullite상이 성장하면서 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>상이 감소되었고, 1,400°C의 공시체에서는 mullite의 결정립의 크기가 더욱 성장되었음을 관찰 할 수 있었다(그림 6-[b]).

나. 재료의 물리적 성질 및 초음파를 이용하여 탄성 계수 특성 분석

표 2는 자기소지에 치밀화제 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 0~50 wt% 첨가하여 1,200°C~1,400°C 소성온도 범위에서 5시간 소결 한 공시체의 비중과 초음파로 각 공시체의 종·횡 속도를 측정하여 식(3)으로 Young's Modulus를 분석한 결과치이고, 표 3은 파괴 검사로 측정한 공시체의 3-점 곡강도와 파괴인성 결과치이다.

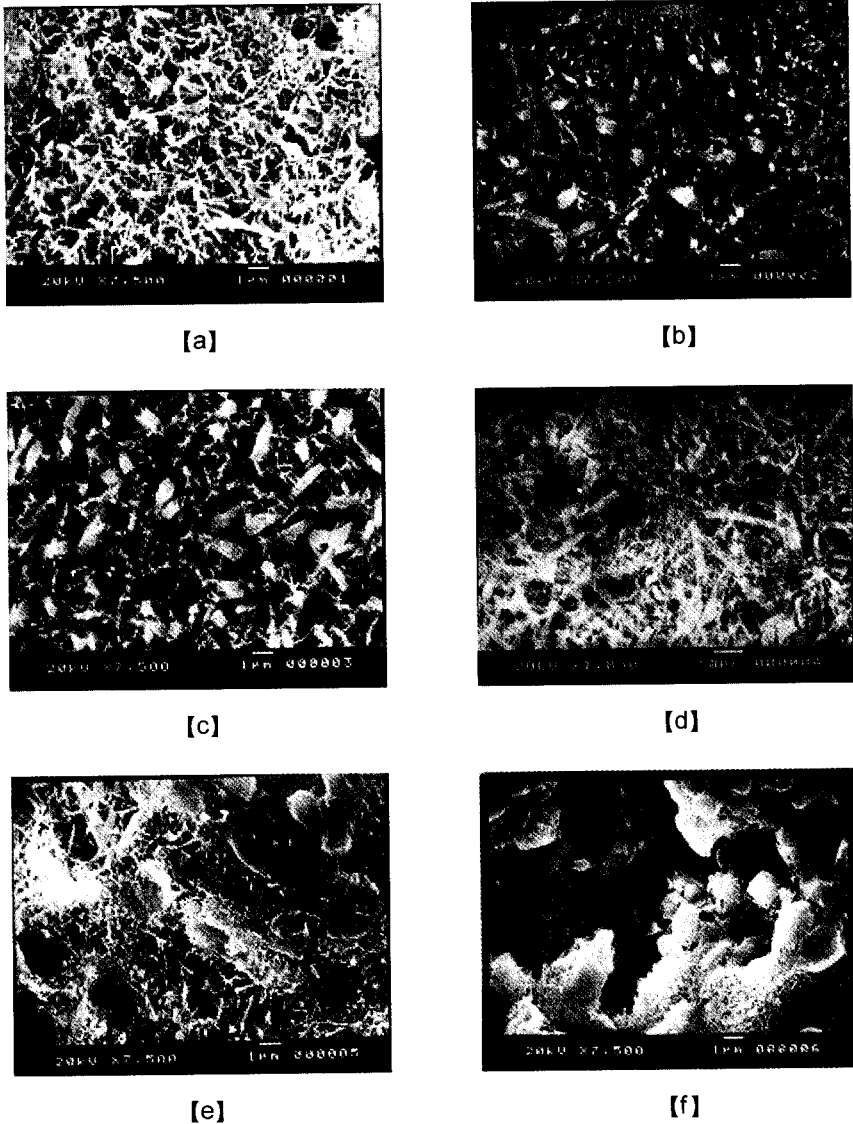


Fig. 4 SEM micrographs of porcelain body materials with [a] 0 wt%, [b] 10 wt%, [c] 20wt%, [d] 30 wt%, [e] 40 wt%, and [f] 50 wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content heated at 1,200°C for 5hr.

1,200°C에서 5시간 소성한 자기 소지 공시체의 경우 부피비중은 2.45, 곡강도 67 MPa, 파괴인성 2.19 MPa·m<sup>1/2</sup>로 측정되었으나(표 3), 10~20wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>을 첨가한 공시체의 경우는 불안정한 spinel 상, mullite상과 유리상으로 구성되어 물리적 성질 및 기계적 강도에는 영향을 미치지 못한다고 사

료된다. 30 wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가한 공시체인 경우 비정질인 유리상이 감소되면서(그림 3) mullite 결정상의 균일한 치밀화가 진행되어(그림 4-[d]), 부피비중 2.69, Young's modulus 102.7 GPa, 3-점 곡강도 127 MPa, 파괴인성 2.31 MPa·m<sup>1/2</sup>로 증가되었다. 자기소지에 40 wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 첨가한 공시체의 경

우 비결정질인 유리상이 소멸되면서(그림 3)  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자사이에 침상조직인 mullite가 치밀하게 형성되어(그림4-[e]), 부피비중 2.77, Young's modulus 118.4 GPa, 3점 곡강도 137 MPa, 파괴인성  $2.88 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 로 순수한 자기소지 공시체 보다 비중은 향상되어 세라믹스 조직이 치밀화가 되었고, young's modulus는 1.6배, 곡강도는 2배, 파괴인성은 1.2배가 각각 향상되었다.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 를 50 wt.% 첨가한 공시체의 경우 낮은 소성온도로 인하여 과량으로 첨가한  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 치밀화가 진행되지 않아

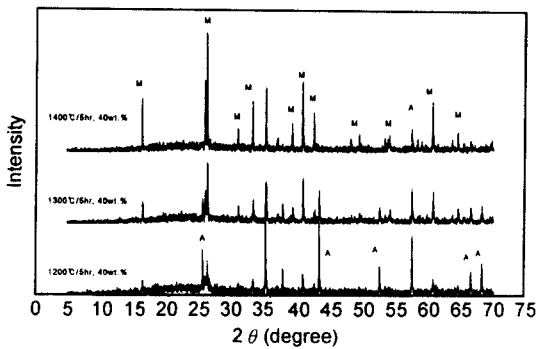


Fig. 5 XRD patterns of porcelain body materials with 40 wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content heated at 1,200°C ~ 1,400°C for 5hr.



[a]



[b]

Fig. 6 SEM micrographs of porcelain body materials with 40 wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content heated at [a] 1,300°C and [b] 1,400°C for 5h.

Table 3 Relationship between Young's modulus and 3-point bending strength, fracture toughness of porcelain body materials with 0~50 wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content heated at 1,200°C ~ 1,400°C for 5hr

Addition of $\text{Al}_2\text{O}_3$ (wt%)	1,200°C			1,300°C			1,400°C		
	Young's modulus (GPa)	Bending strength (MPa)	Fracture toughness ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )	Young's modulus (GPa)	Bending strength (MPa)	Fracture toughness ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )	Young's modulus (GPa)	Bending strength (MPa)	Fracture toughness ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )
0	75.0 ± 2.92	67 ± 2.62	2.19 ± 0.15	28.2 ± 1.86	41 ± 3.30	1.75 ± 0.20	23.5 ± 0.64	35 ± 3.46	1.28 ± 0.25
	68.3 ± 7.01	84 ± 3.80	2.27 ± 0.18	48.6 ± 3.28	39 ± 1.93	1.70 ± 0.20	39.1 ± 2.7	48 ± 5.55	1.35 ± 0.23
20	73.1 ± 5.95	81 ± 3.96	2.23 ± 0.18	64.1 ± 3.92	48 ± 3.44	1.76 ± 0.21	41.3 ± 2.8	53 ± 6.25	1.64 ± 0.23
	102.7 ± 5.57	127 ± 4.55	2.31 ± 0.16	89 ± 2.22	68 ± 4.36	1.92 ± 0.20	72.4 ± 3.31	84 ± 3.89	1.82 ± 0.23
40	118.4 ± 5.99	139 ± 6.69	2.88 ± 0.19	109.4 ± 6.09	117 ± 5.82	1.99 ± 0.21	95.5 ± 4.89	100 ± 11.35	2.17 ± 0.24
	94.1 ± 8.34	122 ± 4.92	2.40 ± 0.19	96.2 ± 6.51	114 ± 5.88	1.94 ± 0.21	89.1 ± 3.1	91 ± 13.30	1.82 ± 0.24

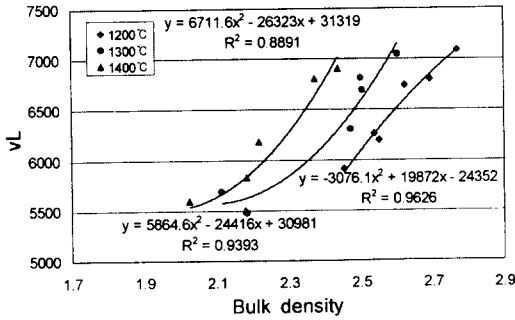


Fig. 7 Effect of bulk density on the longitudinal velocity of porcelain body materials with 0~50 wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content heated at 1,200°C~1,400°C for 5h.

(그림 4-[f]), 부피비중 2.4, Young's modulus 94.1 GPa, 3점 곡강도 120 MPa, 파괴인성 2.4 7MPa·m<sup>1/2</sup>의 값을 나타내었다.

온도가 1,300°C 및 1,400°C인 자기소지 공시체의 경우 1,200°C의 공시체보다 부피비중이 17.5%, 탄성계수는 68%, 3점 곡강도는 48%, 파괴인성이 42% 감소한 원인은 소결과정에서 유리상이 생성되어 큰 기공을 형성하여 용적이 팽창되었고, 기공에 의하여 기계적 강도는 급속히 감소하였기 때문이다. 자기소지의 치밀화를 위하여 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 10~40wt% 첨가한 공시체에서도 그림 5와 같이 소성온도 1,300°C 및 1,400°C에서 mullite 결정상이 성장하나 유리상의 생성에 의해 생성된 큰 기공에 의하여 용적이 팽창하고 부피비중도 감소하며, Young's modulus도 낮아지는 경향을 나타내었으며, 3-점 곡강도 및 파괴인성도 급속히 감소하였다(표 3).

#### 다. 초음파를 이용한 기계적 특성 평가

##### (1) 재료의 부피비중이 횡파속도에 미치는 영향

세라믹스 내부에 존재하는 조직의 치밀도와 결정상의 생성이 공시체의 횡파속도에 미치는 영향을 그림 7에 나타낸다. 소성온도가 1,200°C인 경우, 자기소지에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 30~40 wt% 첨가한 공시체는 mullite결정상에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 치밀하게 생성되어 종파속도가 증가하였다.

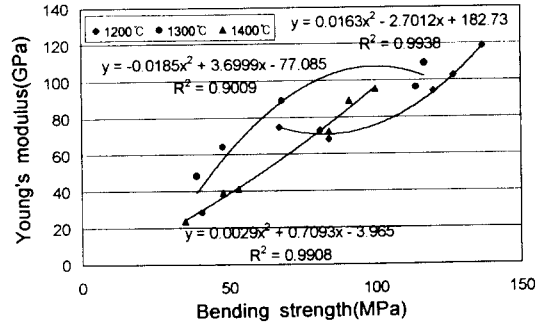


Fig. 8 Relationship between 3-point bending strength and Young's modulus of porcelain body materials with 0~50 wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content heated at 1,200°C~1,400°C for 5h.

소성온도가 1,300°C와 1,400°C인 자기소지에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 10~20 wt% 첨가한 공시체에는 유리상과 기공이 형성되었고, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 40 wt% 첨가한 공시체에는 초음파의 전달시간이 기공 및 유리상에 의하여 산란, 굴절되어 종파 및 횡파속도가 지연되는 경향을 나타내었다.

##### (2) 재료의 3-점 곡강도와 Young's modulus의 상관관계 분석

그림 8에 비파괴 검사인 초음파로 분석한 공시체의 Young's modulus와 파괴검사로 측정된 3-점 곡강도와의 상관관계를 나타냈다. 소성온도 1,200°C인 자기소지에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 20 wt%까지 첨가한 공시체의 Young's modulus는 유리상 생성에 의하여 초음파 속도가 지연되어 상승되지 않았으나, 3-점 곡강도는 약간 상승하였다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 30~40wt.%까지 첨가한 공시체에서는 유리상이 감소하여 지면서 조직이 치밀하게 되어 Young's modulus가 상승하고 3-점 곡강도도 증가하는 경향을 나타내었다. 회귀분석 결과 결정계수인 R<sup>2</sup> = 0.99이상으로 분석되었다. 소성온도가 1,300°C와 1,400°C인 공시체의 경우 기공이 생성됨으로서 소성온도 1,200°C에서 소결한 공시체보다 Young's modulus와 3-점 곡강도가 감소되었으며, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량이 증가하면 Young's modulus와 3-점 곡강도는 직선적으로 비례 상승되었음을 확인 할 수 있었으며, 회귀분석 결과 결정계수는 0.90~0.99로 나타났다.



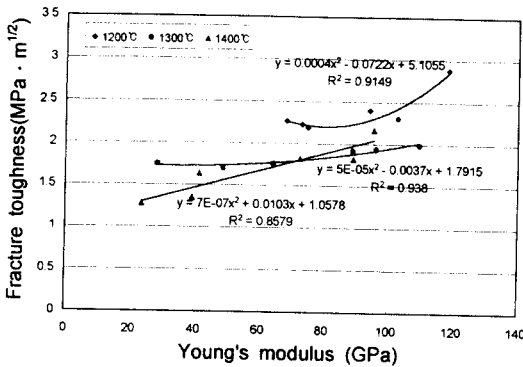


Fig. 9 Relationship between fracture toughness and Young's modulus in porcelain body materials with 0~50wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content heated at 1,200°C ~ 1,400°C for 5h.

(3) 재료의 파괴인성과 Young's modulus의 상관관계 분석

그림 9에 초음파를 이용하여 분석한 Young's modulus와 파괴인성의 상관관계를 비교하여 나타냈다. 공시체의 Young's modulus와 파괴인성간의 기계적 특성은 Young's modulus와 3점 곡강도 기계적 특성과 유사한 경향으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 우수한 기계적 특성과 경제적으로 양산화가 가능한 세라믹스 물 소재를 개발하고자 자기소지에 치밀화제인 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량과 소성온도에 따른 기계적 특성을 비파괴 검사와 파괴검사를 병행하여 신뢰성을 확립하는데 필요한 기초 자료를 제시하고자 하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 자기소지에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 첨가량과 소성온도에 따른 기계적 특성평가에 있어 초음파를 이용한 비파괴적 방법과 파괴인성, 3-점곡강도의 파괴검사를 수행한 결과 소성온도가 1200°C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량이 40 wt% 일 때 부피비중이 2.77로 치밀하였고, 초음파를 이용하여 측정된 Young's modulus, 3-점곡강도, 파괴인성은 118.4 GPa, 137 MPa, 2.88MPa · m<sup>1/2</sup>로 기계적 강도가 가장 우수하였다.
- 2) 초음파를 이용하여 Young's modulus의 측정

값과 3-점 곡강도, 파괴인성 값과의 관계에서 각각의 소성온도별에 대한 회귀분석 결과 결정계수인 R<sup>2</sup>값이 0.9 이상으로 나타나 파괴검사를 통해 초음파를 이용한 품질평가의 신뢰성을 확립할 수 있는 것으로 분석되었다.

참고 문헌

1. 강위수, 박인근. 2000. 세라믹스 물 소재 개발과 초음파를 이용한 기계적 특성 평가. 한국농업기계학회 2000년 하계학술대회 논문집 5(2):230-235.
2. 강위수, 한상목. 1999. "범용 ceramic roll mill 소재 및 생산기술 개발" 최종 연구보고서. 농림부. pp 248.
3. 강위수, 박인근, 한상목, 신대용. 1999. 세라믹 자기소지에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가량이 초음파 속도에 미치는 영향. 한국비파괴검사학회 99년도 추계학술발표회 논문집 pp 90-99.
4. 강위수, 강화석, 이귀현, 양승기, 목효균. 1999. 세라믹 물러와 금속 물러의 쌀 분쇄 생성물 특성 분석. 한국농업기계학회 1999년 동계학술대회 논문집 4(1):378-383.
5. 강위수, 강화석, 이귀현, 양승기, 목효균. 1999. 세라믹 물러와 금속 물러의 쌀 분쇄 소요에너지. 한국농업기계학회 1999년 동계학술대회 논문집 4(1):384-389.
6. 강위수, 양승기, 목효균, 1999. 치형 세라믹 물러와 금속 물러의 고추 분쇄 생성물 특성 분석. 한국농업기계학회 1999년 하계학술대회 논문집 4(2):234-239.
7. 강위수, 양승기, 목효균, 최상근, 이해익. 2000. 세라믹과 회주철 치형물 분쇄기를 이용하여 고추 분쇄시 전단력 증가가 분쇄 생성물에 미치는 영향 분석. 한국농업기계학회 2000년 동계학술대회 논문집 5(1):266-271.
8. 강위수, 이귀현, 양승기, 목효균, 박인근. 2000. 세라믹과 회주철 치형물 분쇄기를 이용하여 고추 분쇄시 전단력 증가가 분쇄 생성물에 미치는 영향 분석. 한국농업기계학회 2000년 동계학술대회 논문집 5(1):272-277.
9. 고춧가루 분쇄기의 표준화에 관한 연구보고서. 1996. 국립기술품질원.

10. 문정훈, 김진구. 1998. 초음파탐상검사. 원창출판사.
11. 장병국, 이상호, 오희갑. 1995. 비파괴 검사에 의한 세라믹스의 결함 및 신뢰성 평가. *요업기술* 10(4):358-371.
12. Chang, L. S. and T. H. Chuang, 1997. Ultrasonic Testing of Artificial Defects in Alumina Ceramic. *Ceramics International* Vol. 23:367-373.
13. Garcia, V. J. and C. H. Schilling. 2000. Models Relating Ultrasonic velocity to the microstructures of green and sintered ceramics: A Review. - *Nondestructive Evaluation of Ceramics - Ceramic Transaction* Vol. 89, pp. 67-84.
14. George, T. B, E. R. Generazio and J. D. Kiser. 1989. High-Frequency Ultrasonic Characterization of Sintered Silicon Carbide. *J. Am. Ceram. Soc.* 72(3):383-387.
15. Kishi, T. and J. H. Koo. 1999. Non-Destructive Evaluation of Engineering Ceramics. *Key Engineering Material* Vol. 161-163, pp. 587-592.
16. Lawn, B. R. and E. R. Fuller. 1975. Equilibrium Penny-like Cracks in Indentation. *J. Mater. Sci.* Vol. 10:2016-2024.
17. Louis, P. M., D. David and R. Moshe. 1996. Evaluation of Ultrasonic Determined Elasticity - Porosity Relations in Zinc Oxide, *J. Am. Ceram. Soc* 79(5):1281-89.
18. Panakkal, J. P. 1996. Longitudinal Ultrasonic Velocity As a Predictor of Material Properties of Porous Materials, *Trends in NDT Science & Technology; Proceedings of the 14th World Conference on Non-Destructive Testing, New Delhi, Vol. 4:2279-2282.*
19. Schilling, C. H. and J. N. Gray. 2000. Needs and Opportunities for NDE in Ceramic. - *Nondestructive Evaluation of Ceramics-Ceramic Transaction* Vol. 89:1-22.
20. Weibull, W. 1951. *J. Appl. Mech.* 18:293.