

피스톤 압축 링 재료의 지르코니아 순도에 따른 트라이볼로지 특성

오성모*

(논문접수일 2006. 6. 21, 심사완료일 2006. 8. 7)

Tribological Characteristics with Purity Zirconia of Compression Ring Materials in Piston

Seong-Mo Oh*

Abstract

The friction and wear properties of ceramics are very important in the applications to engineering ceramic parts such as seal rings, pump parts, automobile meter parts, and so on. In this study, the effects of each other purity on the mechanical and tribological properties of purity zirconia ceramics were investigated. Also in order to determine the effects of sliding distance, sliding speed, contact load, friction coefficient, the amount of worn out material at a certain time, and the prepared composites were measured. Crystalline phases and microstructure were examined with XRD and SEM. The results show that we obtained the good properties of friction coefficient and wear resistance at the purity 99.5% of zirconia. than this of the purity 95% were great at the wear amount of worn out material.

Key Words : Tribology(트라이볼로지), Friction(마찰), Wear(마모), Anti-wear(내마모), ZrO₂(지르코니아)

1. 서론

점차 공학적으로 많이 응용되고 있는 세라믹스는 금속이나 폴리머에 비해 상대적으로 밀도가 낮고, 경도가 높으며, 열 및 부식에 대한 저항성이 좋으므로 내식성, 내열성, 내마모성 등의 우수한 특성을 지닌 재료로서 이용되어지고 있다⁽¹⁻³⁾. 특히 고온경도가 높아 마모되기 어렵다고 하는 성질은 내마모

재료로서 최적이며, 산화, 질화, 또는 탄소 세라믹의 형태 (Al₂O₃, ZrO₂, Si₃N₄, SiC 등)로서 많은 구조용 재료로 각광을 받고 있다⁽⁴⁻⁶⁾. 그러므로 이들 성질을 이용하여 각종 기계 부품 및 자동차의 기어, 베어링, 노즐 및 메카니컬 실 등의 기계 운동 부품 재료로서의 수요가 날로 증가하고 있다⁽⁷⁻⁹⁾. 이에 수반하여 세라믹스의 트라이볼로지에 관한 연구도 증가되고 있지만 그 기초적 연구는 금속에 비하여 훨씬 적고 마찰

* 중부대학교 자동차관리학과 (tiger@joongbu.ac.kr)
주소: 312-702 충남 금산군 추부면 대학로 101

기구나 그 마모특성에는 불분명한 점이 많다. 대기 중에서 세라믹의 윤활공학적인 특성에 관한 연구들에 의하면 마찰 및 마모거동은 복잡하여 미끄럼 속도, 접촉하중, 습도와 같은 인자들이 마멸거동에 영향을 미치고⁽¹⁰⁻¹³⁾, 온도의 증가와 소성변형, 미소파괴, 산화작용과 같은 여러 가지 다른 메커니즘에 영향을 받는다⁽¹⁴⁾. 이는 세라믹스가 그 종류도 많고 각각의 특성이 다르기 때문에 당연히 마찰 변형특성도 서로 다르게 되기 때문이라고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 저가격으로 가장 널리 이용될 가능성이 있는 순도를 달리한 지르코니아 세라믹의 마찰, 마모 거동을 고찰하여 각종 자동차의 미터계 부품에 트라이볼로지적 설계의 기초자료를 제시하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시험장치 및 시험재료

본 연구에 사용한 실험장치는 핀 온 디스크형 마찰-마모 시험장치로 시험부의 개략도를 Fig. 1에 나타내었으며, Fig. 2에 저널과 디스크 타입의 시편을 확대 도시하였다. 마찰력과 마모량은 스트레인게이지(strain gauge)와 선형위치미터(linear

potentiometer)에 의해서 측정되며, 하중은 유압튜브를 통하여 압력으로 전달된다.

실험재료는 상압 소결한 지르코니아의 세라믹이며, 그 순도는 각각 95%와 99.5%로 2종류로 하였으며, Table 1에는 이들 시험편의 물리적 및 기계적 성질을 표시하였다. 시험편의 저널은 끝이 구 형태로 지름이 8mm이고, 길이는 60mm이며, 디스크의 외경은 20mm와 두께 5mm로 하였다.

2.2 시험방법

실험조건으로서 미끄럼속도를 0.1m/s~0.7m/s까지 변화시켰고, 접촉하중은 중심축에 하중을 가하여 50N~100N까지 25N씩 상승시켰으며, 미끄럼거리는 100m에서 2km까지 단계적으로 변화시켰다. 순도를 달리한 각 시험편의 경도값은 마이크로비커스 경도계를 이용하였으며, 마모실험은 상온에서 0.001mg의 디지털 천칭을 사용하여 실험 전후의 마모체적(mm³)의 중량 감소량으로 측정하고, 이를 시험편의 비중을 이용하여 환산하였다. 결정상 분석과 미세구조는 각각 XRD와 EDS, SEM등을 사용하여 각 실험조건에 따른 마모과정을 고찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미끄럼속도에 의한 마찰 마모 특성

Photo. 1에 실험 전 순도 99.5%의 지르코니아를 나타내었으며, 이들 세라믹은 폴리싱한 시험편 표면으로서 결정상 분석과 미세구조는 각각 EDS와 SEM등을 이용하여 관찰한 것으로서 표면에 시험편의 제조 및 표면가공에 의한 결함부를 볼 수 있다. Fig. 3은 저널을 순도 99.5%, 디스크를 95%

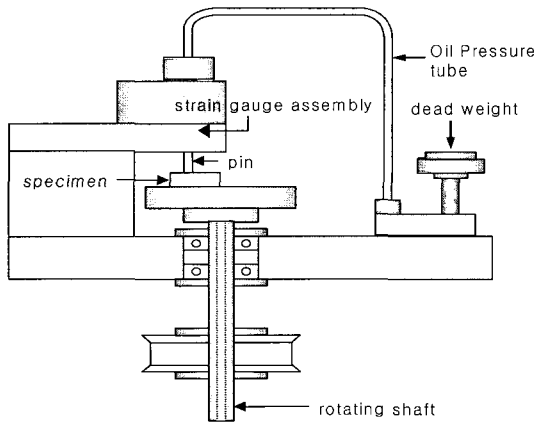


Fig. 1 Schematic diagram of test machine

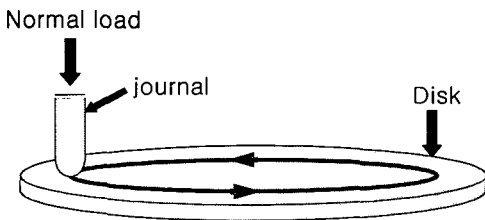
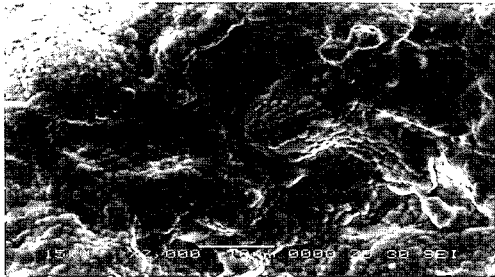


Fig. 2 Exploded view of journal and disk

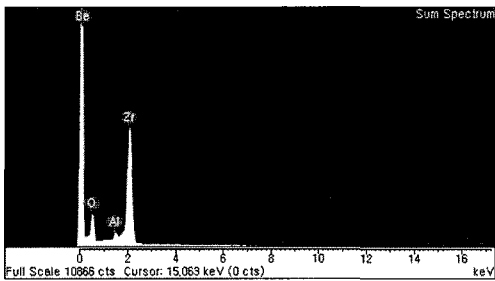
Table 1 Physical and chemical properties of Zirconia Ceramic

| Item | Zirconia | |
|---|----------|-------|
| | 95 | 99.5 |
| Purity(%) | 95 | 99.5 |
| Specific Gravity | 6.4 | 6.49 |
| Flexural Strength(MPa) | 750 | 1,000 |
| Compressive Strength(MPa) | 5690 | 5690 |
| Young's Modulus of Elasticity(GPa) | 200 | 210 |
| Poisson's Ratio | 0.31 | 0.31 |
| Vickers Hardness Load 500g(GPa) | 10.8 | 12.7 |
| Thermal Conductivity 20°C (cal·cm/cm ² ·sec·°C) | 3 | 3 |

로 한 경우, 미끄럼거리를 2km로 일정하게 하였을 때 미끄럼 속도의 변화에 따른 저널과 디스크의 마모량 $W[\text{mm}^3]$ 을 나타낸 것이다. 그림에서처럼 75N과 100N에서의 미끄럼속도 변화에 따라 순도 95%인 디스크의 마모량이 저널인 99.7%의 것보다 크게 나타나며, 속도의 증가함에 따라 마모량 또한



(a)



(b)

Photo. 1 SEM and EDS of the Zirconia purity 99.5% specimen

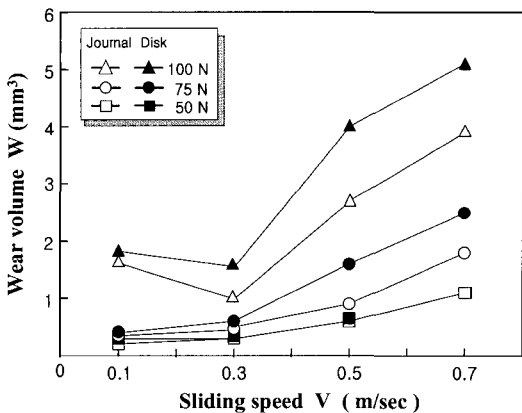


Fig. 3 Relation between wear volume and sliding speed (Sliding distance : 2km)

0.3m/s에서 급격히 증가 하였지만 접촉하중 50N인 경우는 속도가 0.5m/s이상의 속도영역에서 마모량이 급격히 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 양 시험편의 접촉부가 소성유동에 의한 윤향효과가 지배적으로 작용하기 때문이며, 급격히 상승하는 속도역에서는 마찰속도의 증가에 따른 충격력의 증대 및 마찰면 온도의 상승 때문이라고 사료된다.

Photo. 2는 미끄럼 속도를 0.1m/s로 하고, 미끄럼거리를 100m로 한 경우 미끄럼속도에 따른 마찰면을 나타낸 것으로서 0.1m/s 경우는 전 마찰면 표면에는 소성유동이 지배적으로 작용하고 있지만, 0.3m/s의 속도영역부터는 점차 간극이나 표면의 결함부로부터 균열이 발생하여 탈락된 마모입자의 응착으로 인하여 미끄럼방향으로 그루브가 형성되었다.

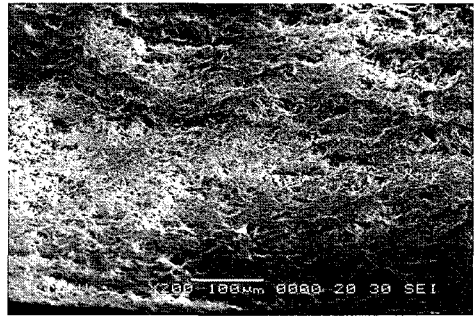


Photo. 2. SEM of the rubbed surface ZrO_2

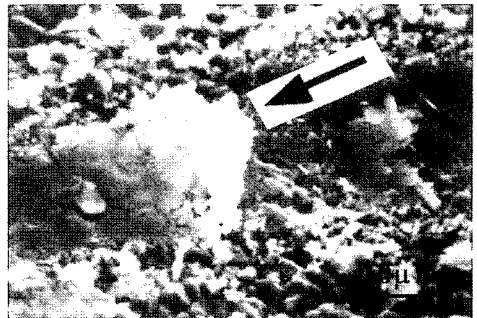


Photo. 3 SEM of wear surface at the ZrO_2

Table 2 Chemical composition of wear surface ZrO_2

| Sliding distance | ZrO_2 | O | Al | Zr | Re-mainder |
|------------------|----------------|-------|------|-------|------------|
| 2km | 0.3m/s | 7.24 | 0.77 | 83.78 | 8.21 |
| | 0.5m/s | 12.64 | 0.81 | 78.80 | 7.75 |
| | 0.7m/s | 13.80 | 1.10 | 76.77 | 8.33 |

Photo. 3과 Table 2는 지르코니아의 응착마모 구간에서의 SEM 및 EDS 분석 결과이고, 이때 실험조건은 접촉하중을 100N으로 일정하게 하여 미끄럼거리를 2km까지 하여 속도 0.5m/s의 속도변화에서 마모거동을 나타내었다. 속도가 증가하는 경우 간극이나 표면의 결합부로부터 균열이 발생하여 이것이 마모분으로 탈락된 흔적 및 응착으로 인하여 미끄럼 방향으로 그루브가 형성되는 것을 알 수 있다. 그리고 지르코니아 입자의 마모분산량 또한 속도가 증가하면 응착마모가 일어나지만 산화마모도 함께 일어난 것을 알 수 있다. Table 2의 EDS 분석 결과 지르코니아 입자의 마모분산량이 증가함과 속도의 증가함에 따라 마찰표면에서 산소의 검출량이 증가하고 있음을 알 수 있다.

마찰계수는 접촉면의 상태에 대응하여 결정되므로 마찰계수의 급격한 변화는 접촉면의 상태가 급격히 변하고 있다는 것을 표시하고 있다. Fig. 4는 Fig. 3의 실험조건에서의 마찰계수를 나타낸 것이다. 그림에서 접촉하중 하중이 50N 인 경우 속도가 초기에 0.3m/s까지의 저속영역에서, 75N 및 100N인 경우는 속도가 0.5m/s까지의 속도영역에서는 마찰계수가 증가하고 있지만 그 이상의 속도영역에서는 길들여진 구간으로 마찰계수의 변화량이 완만해짐을 알 수 있다. 한편 마찰계수가 증가하고 있는 저속영역에서 고속영역에서 보다 마찰계수가 적게 나타나는 것은 마찰 시험 전에 폴리싱으로 인한 표면가공시 이미 표면에 대기중의 흡착층 또는 산화물이 형성되어 윤활작용을 하기 때문이라 생각된다.

3.2 마모에 미치는 ZrO₂의 속도특성

Fig. 5는 저널을 속도 99.5%, 디스크의 속도를 95% 및

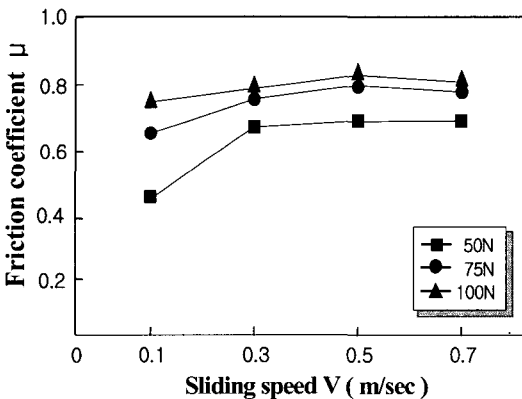


Fig. 4 Effect of sliding speed on the friction coefficient (Sliding distance : 2km)

99.5%로 한 경우, 미끄럼거리를 2km 로 하였을 때의 미끄럼속도의 변화에 따른 마모량을 나타낸 것이다. 그림에서처럼 속도 관계없이 시험편 모두 속도의 증가에 따라 증가하며, 디스크의 마모량은 순도가 적을수록 크게 상승한다는 것을 알 수 있다.

본 실험의 경우 순도가 큰 저널의 마모량이 디스크의 마모량보다 대체로 적게 나타나지만, 속도 95%의 마모량은 저널과 더불어 큰 상승을 보이며, 또한 마모량은 오히려 저널인 속도 99.5%가 디스크보다 크게 나타나 있는 것을 볼 수 있다. 마모량은 순도가 작을수록 크게 증가하는 것은 탄성계수 및 열전도율이 낮은 재료일수록 마찰시 발생하는 열이 방산되기 어려우므로 국부적 및 순간적인 온도상승이 일어나 단위 시간당 발열량이 적게 되어 마찰면의 강도가 저하하기 때문이라고 생각된다.

3.3 순도에 따른 ZrO₂ 세라믹의 마모특성

Fig. 6은 저널을 속도 99.5%, 디스크를 95%, 99.5%로 한 경우, 접촉하중을 75N로 하고 미끄럼속도를 0.3m/sec로 하였을 때, 미끄럼거리의 변화에 따른 마모량을 나타낸 것이다. 그림에서처럼 마모량은 순도를 달리한 각 시험편 모두 미끄럼거리의 증가에 따라 거의 직선적으로 증가하며, 특히 속도 95%의 마모량이 99.5%의 마모량 보다 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 초기 마모량은 높았으나 0.5km부터는 안정적인 마모량을 보였다가 1.5km부터는 급격한 마모량을 보이고 있다. 결과적으로 순도를 달리한 각 시험편의 마모량이 거리에 따라서 증가하는 것은 전술한 바와 같이 탄성계수 및 열전도율이 적으므로 열 축적에 의한 마모저항이 감소되

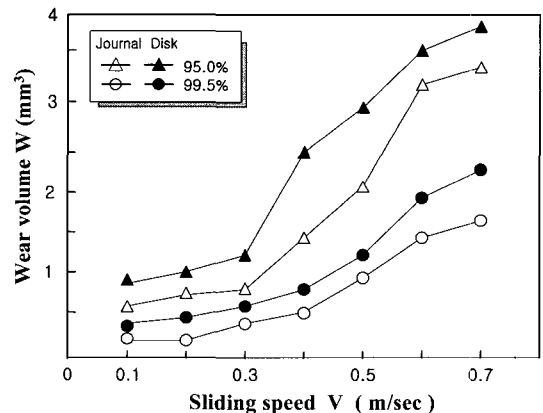


Fig. 5 Effect of sliding speed on the friction coefficient

어 마모를 증대시켜 준 것으로 생각 된다.

Fig. 7은 Fig. 6와 동일한 조건에서의 거리에 따른 마모계수 K를 나타낸 것이며 마모계수는 다음 식으로 구하였다.

단위 미끄럼거리당 마모체적, 즉 마모율 V/L 은 진실접촉면적 A_r ($\approx W/H$)에 각각 마모 메카니즘의 특징적인 어떤 두께 ξ 와 탈락 확률인자 κ 를 이용한 형태로 표현할 수 있다.

$$\text{즉, } \frac{V}{L} = \kappa A_r \xi \quad (1)$$

진실접촉영역에서 소성변형이 있다면, $A_r = W/H$ 로 쓸 수 있다.

$$\frac{V}{L} = K(\xi) \frac{W}{H} \quad (2)$$

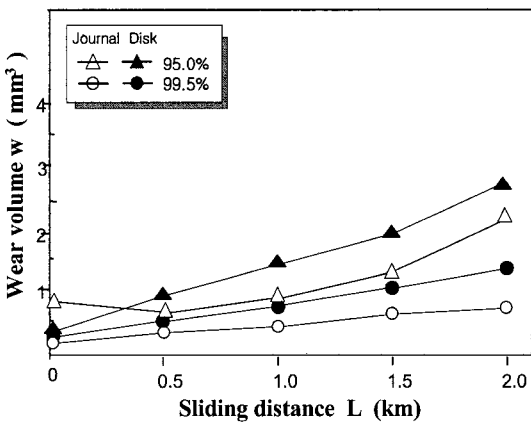


Fig. 6 Wear curve in wear volume with sliding distance

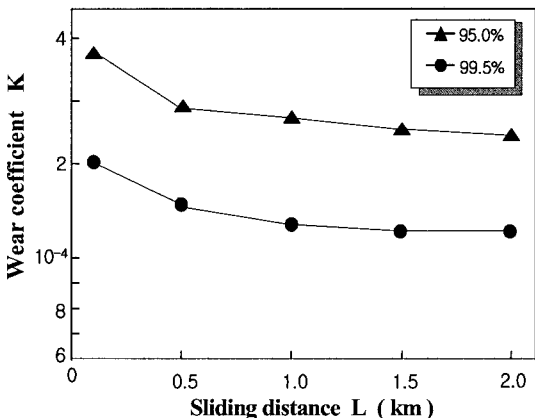


Fig. 7 Effect of sliding distance on the wear coefficient

여기에서 $K(\xi)$ 는 마모계수이고, W와 H는 진실접촉면의 폭과 높이이다.

Fig. 7에서 마모계수는 거리의 증가와 함께 감소하고 있지만 순도 99.5%가 그 경향이 크다는 것을 볼 수 있다. 이것은 진실접촉점에서의 온도상승으로 인하여 구구부적인 용융을 포함한 잔류마모분의 재소결의 가능성으로 생각되지만 확실하지는 않다.

4. 결론

순도를 달리한 자동차 구조용 재료의 ZrO₂ 세라믹의 트라이볼로지 특성에 대한 고찰 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) ZrO₂의 순도 95%의 경우 미끄럼속도가 증가 할수록 마모량은 증가하며, 열충격력의 증대 및 마찰면 온도상승으로 인하여 마모량이 급속히 증가하는 속도구역이 존재한다.
- (2) 미끄럼속도의 변화에 따라 순도가 증가 할수록 마모량은 감소하지만 미끄럼거리에 따라서는 비례적으로 증가하고, 순도 95%가 탄성계수 및 열전도율의 저하로 마모량이 크다.
- (3) 마모특성에서 미끄럼 초기단계의 마모계수는 큰 값을 가지지만 미끄럼거리가 증가함에 따라 응착면의 전단강도 저하로 인하여 값은 감소한다.

참고 문헌

- (1) ZumGahr, K. H., 1989, "Sliding Wear of Ceramic-Ceramic, Ceramic-Steel, and Steel-Steel Pairs in Lubricated and Lubricated Contact," *Wear*, Vol. 133, pp. 1~22.
- (2) Singh, J. P., 1998, "Effect of Flaws on the Fracture Behavior of Structural Ceramics : a review," *Adv. Ceram. Mater.* Vol. 3, pp, 18~27.
- (3) Lee, K. H. and Kim, K. W., 1994, "Effects of Humidity and Sliding Speed on Wear Properties of Si₃N₄ Ceramics," *Materials Science and Engineering*, Vol. 186, pp. 185~191.
- (4) Gee, M. G., Matharu, C. S., Almond, E. A. and Eyre, T. S., 1990, "The Measurement of Sliding Friction and Wear of Ceramics at High Temperature,"

- Wear*, Vol. 138, pp. 169~187.
- (5) Fisher, T. E. and Tomizawa, H., 1985, "Interaction of Tribochemistry and Micro-fracture in the Friction and Wear of Silicon Nitride," *Wear*, Vol. 105, pp. 29~45.
- (6) Scott, H. G., 1985, "Friction and Wear of Zirconia at very Low Sliding Speeds," *ASME, New York*, pp. 8~12.
- (7) Andersson, P. and Holmberg, K., 1994, "Limitation on the use of Ceramics in Unlubricated Sliding Applications due to Transfer Layer Formation," *Wear*, Vol. 175, pp. 1~8.
- (8) Sasaki, S., 1989, "The Effects of the Surrounding Atmosphere on the Friction and Wear of Alumina, Zirconia, Silicon Carbide and Silicon Nitride," *Wear*, Vol. 134, pp. 185~200.
- (9) Oh, S. M., and Rhee, B. G., 2003, "Wear Behaviors of Ceramics TiN, TiC and TiCN with Arc Ion Plating," *J. of KSME International*, Vol. 17, No. 12, pp. 1904~1911.
- (10) Oh, S. M., and Rhee, B. G., 2001, "A Study on the Friction and Wear Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Plastics by Surface Modification," *J. of KSPE*, Vol. 18, No. 8 pp. 122~128.
- (11) Kim, J. H., Kim, H. J., Oh, S. M., Lee, G. H. and Rhee, B. G., 2002, "Numerical Analysis for Optimization of Film Uniformity and Deposition Growth Rate in the Vertical Cylindrical Reactor," *J. of KSPE*, Vol. 19, No. 8 pp. 92~99.
- (12) Oh, S. M., Kim, J. K. and Rhee, B. G., 2004, "Tribological Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Plastics Prepared by Ion Assisted Reaction," *J. of KSPE*, Vol. 21, No. 4 pp. 103~108.
- (13) Rhee, B. G., Oh, S. M., Jeon, C. Y., Kim, J. K. and Kim, D. H., 2005, "A Study on the Friction and Wear Characteristics of TiC, TiN and Ti(CN) with PECVD Process," *Transactions of the KSMTE*, Vol. 14, No. 2 pp. 1~7.
- (14) Leriche, A., Moorthat, G. and Cambier, F., 1988, "Preparation and Micro-structure of Zirconia-Toughened Alumina Ceramics," in Science and Technology of Zirconia, *Advances in Ceramics*, Vol. 24B, pp. 1033~1041.