

부분 및 완전 안정화 지르코니아의 열확산 계수

이 홍 립 · D. P. H. Hasselman* · L. D. Bentsen* · R. Syed*

연세대학교 공과대학 요업공학과

*미어지니아 주립대학 재료공학과

(1985년 6월 5일 접수)

Thermal Diffusivity of Partially and Fully Stabilized Zirconia

Hong Lim Lee, D. P. H. Hasselman*, L. D. Bentsen* and R. Syed*

Dept. of Ceramic Engineering, College of Engineering,

Yonsei University, Seoul Korea

*Dept. of Materials Engineering, Virginia Polytechnic Institute

and State University, Blacksburg, VA 24061, U. S. A.

(Received 5 June, 1985)

ABSTRACT

Thermal diffusivities of zirconia samples partially or fully stabilized by MgO and Y₂O₃ were measured by laser-flash method up to 1400°C.

The values of thermal diffusivity decreased as the contents of MgO and Y₂O₃ increased due to the phonon scattering effect of defect structure of cubic phase formed.

The temperature dependence of thermal diffusivity showed that the thermal diffusivity values decreased due to phonon-phonon scattering as the temperature increased.

The difference in thermal diffusivity was observed on cooling after heating up to 1400°C for magnesia stabilized zirconia samples but not for yttria stabilized zirconia samples.

1. 서 론

세라믹재료의 부스러지기 쉬운 취약성을 극복하기 위한 한가지 방법으로서 지르코니아의 마르텐사이트 전이(Martensitic transformation) (정방형 → 단사형)를 이용한 세라믹재료의 강화에 대한 연구가 세계 각국에서 활발하게 진행되고 있다¹⁻³⁾.

부분 안정화 지르코니아(Partially Stabilized Zirconia)는 완전히 안정화시키는데 필요한 안정화제(CaO, MgO, Y₂O₃ 등)의 양보다 적은 양을 첨가하거나 또는 일단 완전히 안정화한 지르코니아를 적당히 일처리함으로써 얻을 수 있는데⁴⁾ 이 부분 안정화 지르코니아는 열팽창계수가 순수한 지르코니아나 완전 안정화 지르코니아의 그것보다 작기때문에 열충격저항이 이들보다 클 뿐만 아니라 응력변태(stress-induced phase trans-

formation)에 기인되어 강도와 인성이 크게 증가한다고 보고되고 있다^{4,5)}.

열충격저항계수 R' 과 R'' 은 다음 (1) 및 (2) 식으로 쓸 수 있다⁶⁾.

$$R' = St(1-\nu)k/aE \quad (1)$$

$$R'' = St(1-\nu)\alpha/aE \quad (2)$$

여기서 St는 강도, ν 는 프아손비, a는 열팽창계수, E는 양율이며 k와 α 는 각각 열전도도와 열확산계수이다. 이 (1)식과 (2)식에서 열전도도 또는 열확산계수가 클수록 열충격저항이 커지는 것을 알 수 있다. 또한 열확산계수 또는 열전도도는 온도에 의존하기 때문에 안정화 지르코니아 또는 부분 안정화 지르코니아를 고온 구조용재료로서 사용할 경우에 대하여 열전도도 또는 열확산계수의 값을 정확하게 측정해 두어야 할 필요성이 있다.

2. 실험

2.1 시 료

부분 안정화 또는 완전 안정화 지르코니아 시료는 미국, 독일, 일본, 호주 등 세계 각국에서 상용용 또는 연구용으로 제조된 27종류의 제품을 사용하였다.

안정화제로서는 2.6~5.0 wt%의 MgO와 2.4~16.9 wt%의 Y₂O₃를 첨가한 시료들이다. 이 시료들을 지름이 10mm 두께가 약 2mm 되도록 자르고 표면손상을 제거하기 위해서 1μm diamond paste 로써 표면을 충분히 연마한 다음 아세톤 중에서 초음파 세척기로 잘 세척한 다음 X선 분석과 열확산계수 측정에 사용하였다.

2.2 지르코니아 동질이상(polymorphs)의 정량분석
 각 시료에 대한 정량분석은 적점비교법⁶⁾에 의한 X선 분석을 행하였다. 입방정, 정방정 및 단사정 지르코니아의 구조데이터는 Pearson Handbook⁷⁾을 사용하였으며 계산은 Computer에 의해서 행하였다.

2.3 열확산계수의 측정방법

두께 L(cm), 밀도 D(g/cm³), 비열 C(cal/g°C)인 시편의 앞면에 Q(cal/cm²)의 복사 에너지를 순간적으로 비취줄 때 그 시료 뒷면의 온도 T(L, t)는 시간 t(s)에 따라 다음의 (3)식으로 나타낼 수 있다⁸⁾.

$$T(L, t) = \frac{Q}{DCL} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 \alpha t}{L^2}\right) \right] \quad (3)$$

여기서 n은 정수이며 α(cm²/s)는 열확산계수이다. 또한 시간이 충분히 경과했을 때 시료뒷면의 최고 온도 T(L, ∞)에 대한 온도의 비 즉, 무차원의 온도 R를 (4)식으로 정의하고 또 무차원의 시간 ω를 (5)식으로 정의하면 다음과 같이 된다.

$$R = T(L, t) / T(L, \infty) \quad (4)$$

$$\omega = \pi^2 \alpha t / L^2 \quad (5)$$

따라서 (3)식은 보다 간단하게 (6)식으로 나타낼 수 있다.

$$R = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp(-n^2 \omega) \quad (6)$$

이 (6)식을 Fig. 1에 나타내고 온도 R이 1/2에 도달하는 걸리는 시간 t_{1/2}에서의 ω값을 구하면 1.37이 되는데 이 값으로부터 α를 나타내면 (7)식으로 쓸 수 있다. 따라서 시료의 두께 L과 시간 t_{1/2}를 알면

$$\alpha = 1.37 L^2 / \pi^2 t_{1/2} \quad (7)$$

(7)식으로부터 α값을 알 수 있다.

본 연구에서는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 Laser-Flash⁹⁾를 사용하여 시간 t_{1/2}를 측정하였다. Fig. 2에서와 같이 탄소저항발열체로된 전기로 속에 두께가 약

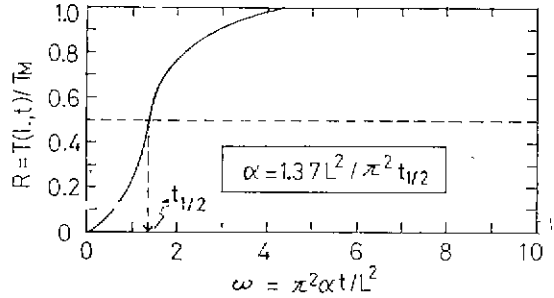


Fig. 1. Dimensionless plot of rear surface temperature.

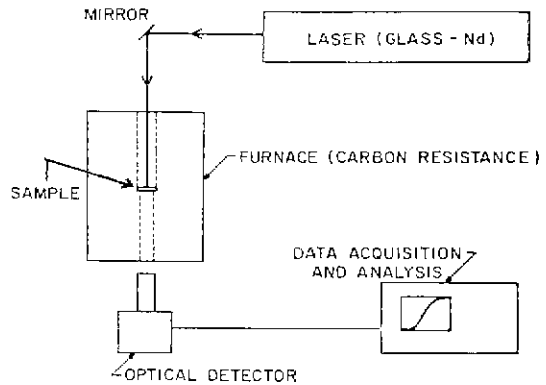


Fig. 2. Principal components of laser-flash diffusivity apparatus used in this study.

2mm 이고 지름이 약 10mm 인 시편을 설치하고 Nd-Glass Laser 광선을 시편에 보내면 시편 뒷면의 온도가 상승하면서 발산되는 적외선을 상온에서 700°C까지는 InSb Detector로써 또한 700°C 이상에서는 Si-photodiode detector를 사용하여 온도를 탐지하고 이것을 Oscilloscope와 Computer로 읽는다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 지르코니아의 동질이상(Polymorphism)과 열확산계수

Table 1(a)에는 MgO를 안정화제로 첨가하여 얻은 부분안정화 지르코니아(Mg-PSZ)와 완전안정화 지르코니아(Mg-FSZ) 시료에 대한 실험결과를 나타내었으며 Table 1(b)에는 Y₂O₃를 안정화제로 첨가하여 얻은 부분안정화 지르코니아(Y-PSZ)와 완전안정화 지르코니아(Y-FSZ)시료에 대한 실험결과를 나타내었다. 이들 시료는 미국, 독일, 일본, 오스트랄리아, 스웨덴 등 세계각국의 11개 회사 및 연구소에서 제조된 27종류이며 이들을 X선 회절분석에 의해서 정량분석을 행하

Table 1(a). The crystallographic phases, densities, and room temperature thermal diffusivities for MgO-stabilized zirconia.

MgO CON-TENT (wt%)	PHASES (vol %)			DEN-SITY (g/cm ³)	ROOM TEM. THERM. DIF. (cm ² /s) × 10 ³	SOU-RCES
	CU-BIC	TE-TRA.	MO-NO.			
2.6	40	18	42	5.331	13.20	A1
2.7	45	50	3<	5.754	11.36	B1
2.8	54	23	23	5.677	12.25	A2
3.0	59	28	13	5.697	11.40	A3
3.0	35	17	48	5.419	10.96	C
3.3*	69	23	8	5.755	10.51	D1
3.3	47	36	17	5.737	12.70	D2
3.3	57	35	8	5.780	11.30	D3
3.3	56	31	13	5.611	11.20	A4
3.4	40	28	32	5.708	11.20	E1
3.4	46	0	54	5.562	11.50	E2
3.5	64	28	8	5.593	11.02	A5
3.9	88	12	0	5.629	7.74	B2
5.0	100	0	0	5.591	6.74	B3
5.0	0	0	100	5.527	23.97	B4

* The specimen contains a small amount of CaO.

고 밀도와 열확산계수를 측정하여 Table 1(a)와 1(b)에 나타내었다. Table 1(a)와 1(b)에서 제조원을 나타내는 기호중 영문자의 대문자는 제조원을 나타내며 그 다음에 붙인 숫자는 같은 제조원의 것으로서 안정화제의 첨가량의 차이에 따라 일련번호로 나타낸 것이다.

Fig. 3(a)에는 Table 1(a)에 나타낸 Mg-PSZ와 Mg-FSZ의 열확산계수를 MgO의 첨가량에 따라 나타낸 것이다. 그러나 Fig. 3(a)에는 B4 시료의 열확산계수는 나타내지 않았다. B4 시료는 처음에는 B3 시료와 마찬가지로 5wt%의 MgO가 첨가되어 100% 입방정으로 완전안정화된 것이었으나 열처리에 의해서 MgO가 입계에 연속상으로 석출되면서¹⁰ 100%의 단사정으로 전이하여 기계적강도가 저하된 대신에 열확산계수의 값은 Table 1(a)에서와 같이 6.74×10⁻³cm²/s에서 23.97×10⁻³cm²/s로 크게 증대됨으로써 열충격저항이 크게 향상된 시료이다.

Fig. 3(a)에서 알 수 있듯이 열확산계수는 안정화제인 MgO의 첨가량의 증가와 더불어 감소하고 있다. 이 경향은 안정화제의 증가와 더불어 입방정이 증가하고 (8)식에 따라서 산소이온의 격자결함(vacancy)이

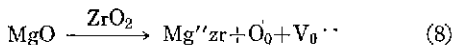


Table 1(b). The crystallographic phases, densities, and room temperature thermal diffusivities for Y₂O₃-stabilized zirconia.

Y ₂ O ₃ CON-TENT (wt%)	PHASES (vol %)			DEN-SITY (g/cm ³)	ROOM TEM. THERM. DIF. (cm ² /s) × 10 ³	SOU-RCES
	CU-BIC	TE-TRA.	MO-NO.			
2.4	47	27	26	5.684	11.90	F1
3.6	50	43	7	5.043	11.10	G
4.0	62	38	0	5.844	11.00	F2
4.5	51	49	0	6.095	12.27	H
5.0	50	44	6	5.984	11.00	D4
5.3	50	50	0	5.920	10.44	I
5.4	47	53	0	5.845	11.90	J
5.5	65	35	0	5.698	10.78	F3
8.6 ¹	75	0	25	5.674	10.40	K
9.0 ²	100	0	0	5.573	7.20	A6
16.8 ³	100	0	0	5.371	7.00	A7
16.9 ⁴	100	0	0	5.646	8.90	A8

¹ The specimen contains Al₂O₃: 3.8wt%

² The specimen contains CaO: 0.9, SiO₂: 0.9, Al₂O₃: 0.7wt%.

³ The specimen contains Al₂O₃: 1.0wt%.

⁴ The specimen contains Al₂O₃: trace.

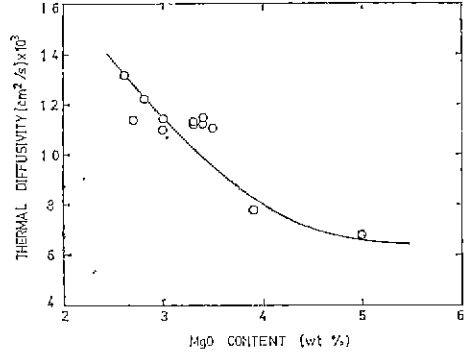


Fig. 3(a). Effect of MgO content on room temperature thermal diffusivity of MgO-stabilized zirconia.

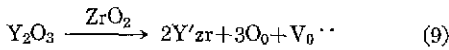
생겨나므로 이 결합에 의한 phonon 산란(phonon scattering) 때문에 열확산계수가 감소할 뿐만아니라 Zr²⁺와 이온반경차이가 큰 Mg²⁺이 고용함으로써 phonon의 mean free path를 감소시키므로 열확산계수는 더욱 감소하게된다. 여기서 Mg''_{Zr}은 Zr 자리에 Mg가 치환된 것을 나타내고 O₀는 산소자리에 산소가 들어간 것이며 V₀''는 산소의 격자 결함을 의미한다.

2.8~3.5wt%의 MgO를 첨가한 시료는 모두 상압

용으로 제조된 부분안정화 지르코니아로서 모두 최적 강도(strength)와 인성(toughness)을 가지도록 제조된 것인데 이들 시료는 $\sim 11.0 \sim 13.2 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ 범위의 열확산계수값을 나타내고 있으며 제조원에 따라 큰 차이가 없다. 그러나 MgO의 첨가량이 3.9wt% 이상에서 5.0wt%로 되면서 완전히 안정화되어 열확산계수값이 $6.74 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ 까지 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 완전히 안정화되면서 격자결합이 가장 많아지고 phonon의 mean free path 값이 가장 작아지기 때문이다.

Fig. 3(b)에는 Table. 1(b)에서 나타낸 Y-PSZ와 Y-FSZ 시료들의 열확산계수를 Y_2O_3 첨가량에 대하여 나타내었다. 9.0wt%의 Y_2O_3 를 첨가한 A6 시료의 열확산계수값은 Fig. 3(b)에 나타내지 않았다. 이것은 시료 중에 CaO, SiO_2 , Al_2O_3 등이 함유되어있으므로 상당량의 유리질(glass phase)이 생성되어있어 열확산계수가 크게 감소되었기 때문이다.

Y_2O_3 는 ZrO_2 에 고용하면서 입방경을 만들면서 (9)식에 의하여 격자결합이 많이 생겨나므로 phonon 산란



이 일어나게 되고 또한 Zr^{2+} 와 이온반경 차이가 큰 Y^{3+} 이 고용함으로써 phonon의 mean free path가 감소하게 되어 Fig. 3(b)에서의 같이 Y_2O_3 의 첨가량이 증가함에 따라서 열확산계수는 점점 감소하게 된다. 여기서 $\text{Y}'\text{Zr}$ 은 Zr 자리에 Y가 치환되어 들어간 것이며, O_0 는 산소자리에 산소가 들어간 것이고 V_0'' 는 산소의 격자결합을 의미하고 있다. Y_2O_3 가 16.8 및 16.9 wt%씩 각각 첨가된 A7과 A8의 시료는 열확산계수

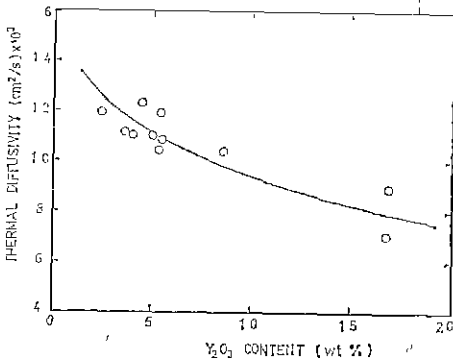


Fig. 3(b). Effect of Y_2O_3 content on room temperature thermal diffusivity of Y_2O_3 -stabilized zirconia.

값이 크게 다른데 이것은 첨가량은 거의 같으나 제조 과정에서 나타난 밀도의 차이때문인 것으로 생각된다.

Fig. 3(a)와 3(b)에 나타난 것으로 알 수 있듯이 MgO를 $\sim 3.5\text{wt}\%$ 까지 첨가한 Mg-PSZ와 Y_2O_3 를 $\sim 10\text{wt}\%$ 까지 첨가한 Y-PSZ의 열확산계수의 값들은 서로 거의 비슷하다. 이것으로부터 PSZ의 열확산계수는 안정화제의 종류에 따라서는 크게 달라지지 않는 것을 알 수 있다.

지르코니아의 동질이상과 열확산계수와와의 관계를 검토하기 위해서 X선회절분석에 의해서 정방형이 관찰되지 않는 시료에 대해서 열확산계수와 단사정 및 입방형과의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 단사정-입방정계에서 입방정의 함량이 증가할수록 열확산계수값은 아래로 오목한 곡선을 그리면서 크게 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이 현상은 2상 복합체에 대한 열확산계수의 전형적인 특징이다¹¹⁾. 또한 Table 1(a)와 1(b)에서 정방정과 단사정의 상호 조성에는 거의 상관 없이 입방정의 함량이 비슷하면 열확산계수도 거의 비슷한 값을 가지게 되는데 이것으로부터 정방형과 단사정은 서로 대등한 열확산계수값을 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

3.2 열확산계수의 온도의존성

안정화제의 첨가량과 동질이상의 조성에 따르는 열확산계수의 의존성은 온도의존 특성에서도 나타나고 있다.

Fig. 5에는 MgO를 5wt% 첨가한 100% 입방정의 시

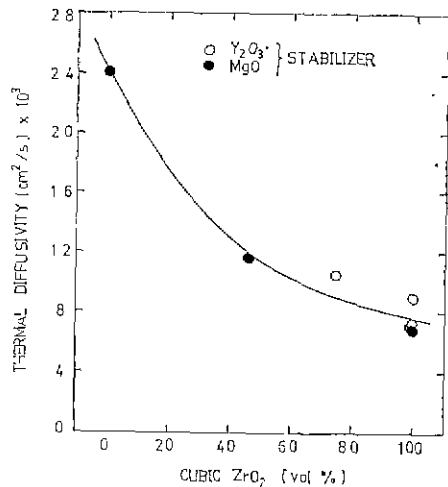


Fig. 4. Room temperature thermal diffusivity of zirconia in the system monoclinic-cubic phases.

료(B3)와 100% 단사정의 시료(B4)에 대한 열확산계수의 값을 상온에서 1000°C까지 측정하여 나타내었다. 100% 단사정의 시료는 상온에서 1000°C까지 온도가 상승함에 따라 열확산계수의 값이 $\frac{1}{3}$ 로 감소하고 있는데 이것은 온도의 상승과 더불어 phonon-phonon 상호작용으로 phonon의 mean free path가 감소하기 때문이며 이것은 절연재료의 특성이다¹¹⁾. 한편 100% 입방정의 시료는 상온에서 1000°C까지 온도가 상승하여도 열확산계수의 감소가 30% 이내인 것은 입방정 내의 격자결합과 Mg²⁺ 이온의 고용에 의한 phonon 산란과 phonon mean free path의 감소의 영향이 온도상승에 의한 phonon-phonon 상호작용에 의한 영향을 훨씬 능가하기 때문인 것이다.

Fig. 6에는 2.6wt%의 MgO를 첨가한 Mg-PSZ 시료의 열확산계수를 상온에서 1000°C까지 측정하여 나타내었다. 이 시료는 단사정과 입방정 그리고 정방정을 모두 가지고 있는 Mg-PSZ 이므로 Fig. 5에 나타낸 100% 단사정과 100% 입방정의 열확산계수의 중간값을 나타내고 있다. 즉 Fig. 6에서 알 수 있듯이 이 시료의 열확산계수는 온도의 상승과 더불어 단사정과 정방정의 영향으로 열확산계수값이 크게 감소하고 있다.

Fig. 5와 6은 물론 MgO를 3.3wt%와 3.4wt%씩을 각각 첨가한 시료에 대한 열확산계수값을 나타낸 Fig. 7과 Fig. 8에서도 알 수 있는 바와 같이 온도를 1000°C까지 상승할 때와 다시 1000°C에서 상온까지 냉각할 때에 열확산계수값은 거의 변화하지 않는다.

이것은 1000°C까지의 온도민화에 의해서 상변화가 거의 일어나지 않음을 알 수 있다. 또한 100% 단사정의 경우를 제외하고는 모두 1000°C 부근에서 열확산계수의 값이 $\sim 6 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ 을 보여주고 있다.

MgO를 2.6wt% 첨가한 Mg-PSZ 시료에 대해서 열확산계수들 상온에서 1400°C까지 측정된 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 즉 1400°C까지 상승할 때와 1400°C에서 상온까지 냉각시킬 때의 열확산계수의 값은 일치하지 않고 냉각시킬 때의 열확산계수의 값이 약간 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 1400°C까지 온도를 올리기 전에는 시료의 동질이상의 조성이 입방정이 40%, 정방형이 18%, 단사정이 42%이던 것이 온도를

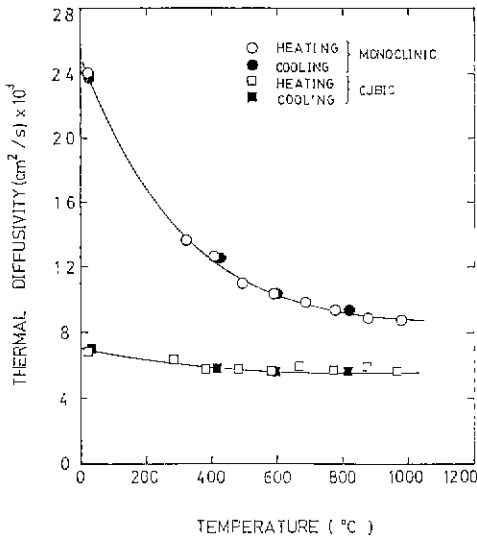


Fig. 5. Temperature dependence of thermal diffusivity for 5wt% MgO-ZrO₂.

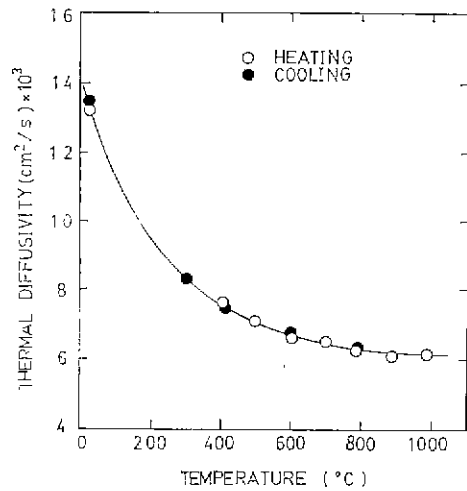


Fig. 6. Temperature dependence of thermal diffusivity for 2.6wt% MgO-ZrO₂.

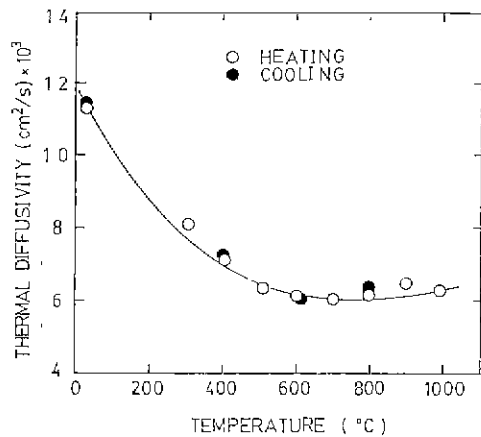


Fig. 7. Temperature dependence of thermal diffusivity for 3.3wt% MgO-ZrO₂.

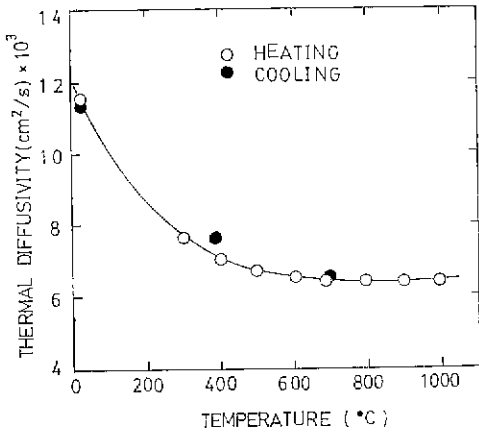


Fig. 8. Temperature dependence of thermal diffusivity for 3.4wt% MgO-ZrO₂.

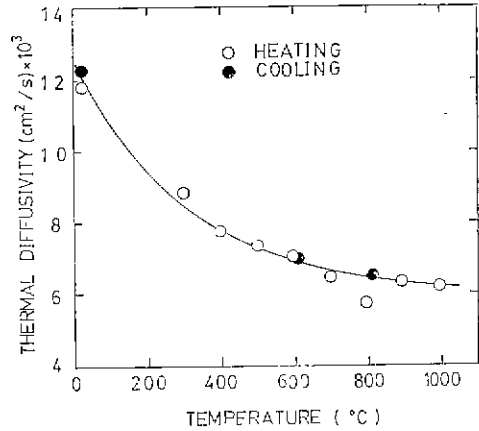


Fig. 10. Temperature dependence of thermal diffusivity for 2.4wt% Y₂O₃-ZrO₂.

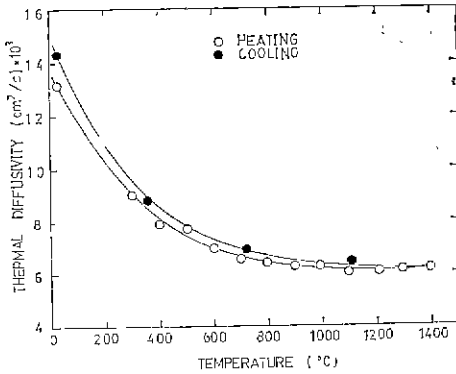


Fig. 9. Temperature dependence of thermal diffusivity for 2.6wt% MgO-ZrO₂.

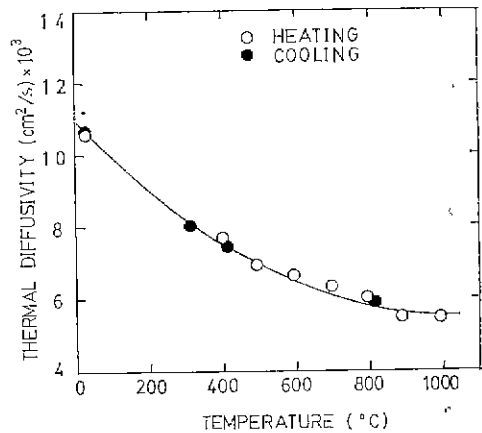


Fig. 11. Temperature dependence of thermal diffusivity for 5.3wt% Y₂O₃-ZrO₂.

1400°C 까지 올렸다가 다시 상온까지 냉각한 다음에는 입방정이 24%, 정방정이 0%, 단사정이 76%로 되어서 입방정이 감소함으로써 열확산계수가 증가한 것으로 믿어진다. 따라서 상전이를 피하기 위해서 Mg-PSZ는 그 사용온도를 1000°C 이상으로 올리지 않아야 할 것이다.

Y₂O₃를 안정화제로 첨가한 Y-PSZ 및 Y-FSZ에 대한 열확산계수의 온도의존성을 Fig. 10, 11, 12, 13에 나타내었다. Fig. 10과 11은 Y₂O₃를 각각 2.4 및 5.3wt%씩 첨가한 Y-PSZ 시료들에 대한 열확산계수를 1000°C까지 측정된 결과이며 Fig. 12와 13은 Y₂O₃를 4.0 및 16.9wt%씩을 첨가한 Y-PSZ 및 Y-FSZ 시료들에 대한 열확산계수를 1400°C까지 측정된 결과이다. MgO를 첨가한 Mg-PSZ 및 Mg-FSZ 시료들과 같이 Y-PSZ 및 Y-FSZ 시료들도 온도의 상승과 함께 열확산계수값

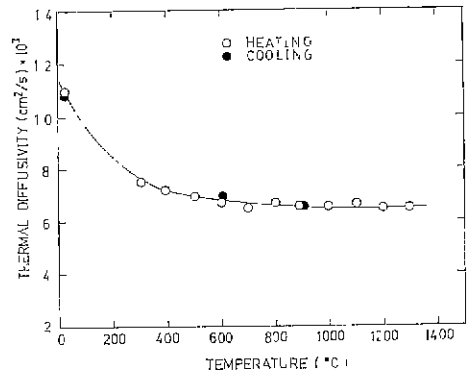


Fig. 12. Temperature dependence of thermal diffusivity for 4.0wt% Y₂O₃-ZrO₂.

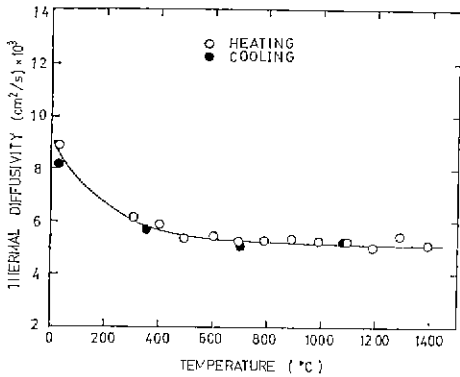


Fig. 13. Temperature dependence of thermal diffusivity for 16.9wt% Y₂O₃-ZrO₂.

은 phonon-phonon 상호작용에 의해서 점점 감소하여 1000°C 근처에서는 $\sim 6 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ 의 값을 나타내고 있다. 그러나 MgO를 첨가한 시료들과는 다르게 Y₂O₃를 첨가한 시료의 경우에는 1000°C 이상 1400°C 까지 온도를 올리면서 열확산계수를 측정하고 다시 상온까지 냉각하면서 재측정하여 측정해도 Fig. 12와 Fig. 13에서 볼 수 있는 바와 같이 열확산계수는 차이를 나타내지 않는다. 즉 Y₂O₃를 안정화제로 첨가한 시료들은 1400°C 까지 온도를 상승했다가 다시 냉각시켜도 상전이에 의한 열확산계수의 변화는 나타나지 않는다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

MgO 및 Y₂O₃를 안정화제로 첨가하여 얻은 부분안정화 지르코니아 및 완전 안정화지르코니아에 대하여 상온에서 1400°C까지의 온도범위에서 열확산계수를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 지르코니아에 MgO 및 Y₂O₃의 첨가량을 증가시킬수록 입방정으로의 전이량이 증가하여 이 때 생성되는 격자결함에 의한 phonon 산란으로 인해서 열확산계수가 점점 감소하였다.

2. MgO 및 Y₂O₃로써 부분 또는 완전 안정화된 지르코니아 시료의 열확산계수는 온도의 증가와 함께 phonon의 mean free path가 감소함으로써 phonon-phonon 상호작용때문에 열확산계수의 값이 점점 감소하였다.

3. MgO로써 부분 또는 완전 안정화된 지르코니아는 1000°C까지는 온도를 상승시켰다가 다시 내려도 상전이에 의한 열확산계수의 변화가 관찰되지 않았으나 1000°C 이상 1400°C까지 가열했다가 다시 냉각할

때는 입방정 및 경방정이 단사정으로 일부가 전이되면서 냉각할 때의 열확산계수의 값이 상승할 때 보다 약간 더 증가하였다.

4. Y₂O₃로써 부분 또는 완전 안정화한 지르코니아는 1400°C까지 온도를 상승시킬 때와 다시 상온까지 냉각시킬 때의 열확산계수값은 달라지지 않았다.

5. 참고문헌

- 1) R. C. Garvie, R. H. Hannink, and R. T. Pascoe, "Ceramic Steel?", *Nature*, **258**, 703-704 (1975).
- 2) A. H. Heuer and L. W. Hobbs, *Advances in Ceramics*, vol. 3, Am. Ceram. Soc. Inc., Columbus, OH., 1981.
- 3) V. S. Stubican and J. R. Hellmann, "Phase Equilibria in some Zirconia Systems," *Advances in Ceramics*, vol. 3, pp. 25-36, Am. Ceram. Soc. Inc., Columbus, OH., 1981.
- 4) R. E. Jaeger and R. E. Nickell, pp. 163-84 in *Ceramics in Severe Environments*. Materials Science Research, vol. 5. Plenum Press, New York, 1971.
- 5) G. K. Bansal and A. H. Heuer, "Precipitation in Partially Stabilized Zirconia," *J. Am. Ceram. Soc.*, **58** (5-6) 235-238 (1975).
- 6) B. D. Cullity, *Elements of X-Ray Diffraction*, Second Ed., Addison-Wesley Publishing Co., Inc., pp. 411, 1978.
- 7) W. B. Pearson, *A Handbook of Lattice Spacings and Structures of Metals and Alloys*, vol. 2, Pergamon Press, New York 1967.
- 8) W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler and G. L. Abbott, "Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity," *J. Appl. Phys.*, **32** (9) 1679-1684 (1961).
- 9) M. A. Bucknam, L. D. Bentsen, James Makosey, G. R. Angell, and D. P. H. Hasselman, "The Measurement of the Thermal Conductivity of Refractories by the Laser-Flash Method," *Trans., Brit. Ceram. Soc.*, **82**(1) 18-23 (1983).
- 10) M. V. Swain, Private Communication.
- 11) C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, 5th Ed., John Wiley & Sons, Inc. New York, 1976.