

YBa₂Cu₃O_{7-x} 세라믹 초전도체의 크리프와 超塑性 변형에 대한 變形機構圖

윤준도 · 초우예*

경남대학교 무기재료공학과

*리하이대학교 재료과학공학과

(1996년 4월 29일 접수)

Deformation Mechanism Map for Creep and Superplastic Deformation in YBa₂Cu₃O_{7-x} Ceramic Superconductors

Jondo Yun and Yc T. Chou*

Dept. of Inorg. Mater. Eng., Kyungnam Univ.

*Dept. of Mater. Sci. and Eng., Lehigh Univ.

(Received April 29, 1996)

요 약

YBa₂Cu₃O_{7-x} 초전도 세라믹의 850°C에서의 소성변형에 대한 랭돈-모하메드형 변형기구도(變形機構圖)가 작성되었다. 이는 나바로헤링 크리프, 코블 크리프, 및 멱수법칙 크리프 기구(機構)들과 계면반응지배 및 입계확산지배 입체미끄럼의 초소성변형 기구들을 포함하는 것으로, 발표된 실험결과와 일치하는 것으로 나타났다. 특히, 기존 문헌에 보고된 크리프변형의 각종 계수의 측정값이 일관되지 않는 이유를 잘 설명하고 있으며, 초소성변형에서 계면반응지배에서 입계확산지배 과정으로 이행하는 현상을 잘 반영하는 것으로 나타났다.

ABSTRACT

Deformation mechanism map of Langdon-Mohammed type for YBa₂Cu₃O_{7-x} superconducting ceramic was constructed by considering mechanisms of Nabarro-Herring, Coble, and power-law creep and grain boundary sliding (GBS) with an accommodation by grain boundary diffusion. The map was found consistent with experimental results, not only of the creep but also of the superplastic deformation. It showed the transition from interface reaction-controlled to the grain boundary diffusion-controlled GBS mechanism at about 1 μm grain size and 100 MPa flow stress, in agreement with the experimental results.

Key words: Ceramic superconductors, Deformation mechanism map, Plastic and superplastic deformation, Diffusional and power-law creep, Grain boundary sliding, Grain boundary diffusion controlled, Interface reaction controlled

1. 서 론

높은 전이온도를 갖는 YBa₂Cu₃O_{7-x} 세라믹 초전도체가 10년전 최초로 발견된 이래, 이 물질의 분자, 결정, 미세 구조 등에 대한 분석연구와 각종 물성에 대한 조사연구가 진행되었으며, 실제 응용에 필요한 각종의 성형방법이 연구개발되었다. 또한, 이 물질의 고온 소성(塑性)변형에 대한 연구도 진행이 되었는데, 이는 새로이 발견된 물질에 대한 폭넓은 이해를 요구하는 과학적 호기심과 소성변형을 이용한 가공법이나 성형법에 대한 공학적 관심 때문이었다. 그 결과, 이 물질의 고온에서의

크리프 변형 거동과 초소성 변형 거동에 대한 연구결과가 多數 보고되었는데, 이를 요약하면 Table 1과 같다¹⁾. 이 표에서 응력지수(n), 입도지수(p), 및 활성화 에너지(Q)는 고체재료의 소성변형에 관한 다음과 같은 일반식에서의 지수에 해당하며, 소성변형의 특징을 나타내고 변형기구에 따라 다르게 나타나는 중요한 계수이다.

$$\frac{dc}{dt} = A \frac{\sigma^n}{d^p} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

여기서 dc/dt 는 변형속도, A는 상수, σ 는 응력, d는 입도, R은 기체상수, T는 절대온도이다.

Table 1. Previous Studies on the Plastic Deformation of YBa₂Cu₃O_{7-x} Ceramic Superconductor.

References	Temperature (°C)	Grain Size (μm)	n*	p*	Q* (kJ/mol)	Remarks
1	870~980	20~100	1.0	—	800±100	C
2	850~980	7~76	1.0	2.8±0.6	970±130	C
3	800~890	—	1.25	~	565~1220	C
4	750~950	10~50	2.5	—	201	C, H, 1 GPa
5	850~960	—	2.5	~	1080	C, Y
6	900~950	—	—	—	—	C, Y
7	930	3	—	—	—	C, P
8	840~900	—	—	—	—	C, Y
9	800~950	13	—	—	—	C, Y
10	25~800	40~50	—	—	—	C, H, 1 GPa
11	25	—	—	—	—	C, H, 0.4~0.7 GPa
12, 13	775~850	0.5~1.4	2.0±0.3	2.7±0.7	745±100	C, S, Strain 110%
14	800~850	1	—	—	—	T, S, Strain 80%

* n: stress exponent, p: grain size exponent, Q: activation energy

** C: compression, T: tension, S: superplasticity, H: hydrostatic pressure, P: preferred orientation, Y: yield drop

Table 1에서 보면 발표된 n, p, Q값들이 동일하지 않은 것을 알 수 있는데, 이 같은 불일치는 개별연구간에 입도, 온도, 응력 등 실험조건이 다르고 실험조건에 따라 변형기구(機構, 메카니즘)가 크게 달라질 수 있기 때문이다. 이같은 실험조건에 따른 변형기구의 변화를 이해하는 데는 변형기구도(變形機構圖, deformation mechanism map)가 매우 유효하다고 알려져 있다. 변형기구도(또는 변형도)는 에쉬비젠¹³⁾과 랭돈-모하메드¹⁶⁾의 두가지가 있는데, 전자는 변형조건 중 온도와 응력을, 후자는 입도와 응력을 두 좌표축으로 사용하여 이들 변형조건하에 주도적으로 나타나는 변형기구를 도면상에 표시한 것이다. 변형도는 시각적 효과 때문에, 한 재료의 변형기구의 변화를 일목요연하게 가시화 할 수 있고 여러재료의 기계적 성질을 가시적으로 비교할 수도 있다. 이같은 교육적·지식적 기능 이외에도, 어떤 조건에서 어떤 변형기구가 작동할 것인가를 예측하게 하는 예측적 기능을 갖고 있다¹⁷⁾.

본 연구의 목적은 YBa₂Cu₃O_{7-x}의 크리프 변형과 초소성 변형기구를 포함하는 랭돈-모하메드¹⁶⁾ 변형도를 작성함으로써, 크리프 연구결과간의 불일치 문제를 토의하고, 초소성과 크리프 현상을 보다 명확하게 이해하는데 있다.

2. 변형도의 작성

2.1. 크리프 변형에 대한 변형도

세라믹의 고온 소성변형 도중에는 체확산에 의한 나바로헤링(Nabarro-Herring) 크리프, 입체확산에 의한 코블(Coble) 크리프, 및 전위의 이동에 의한 멱수법칙(power-law) 크리프의 세가지 과정이 주로 일어나므로 변형도 작성 작업에 이들 세 과정을 고려하기로 한다. 그 변형속도(dε/dt) 식은

나바로헤링(체확산) 크리프

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{B\Omega D_1}{kT} \frac{\sigma}{d^2} \quad (2)$$

코블(입체확산) 크리프

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{150\Omega\delta D_{gb}}{\pi kT} \frac{\sigma}{d^4} \quad (3)$$

멱수법칙(전위) 크리프

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{AGbD_1}{kT} \left(\frac{\sigma}{G}\right)^n \quad (4)$$

와 같이 주어지는데, 여기서 A, B는 상수, Ω는 원자부피

Table 2. Physical Constants Used for Constructing the Deformation Mechanism Map of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ¹⁸⁾.

Symbol	Constants	Values	Unit
Ω	atomic volume	1.74×10^{-28}	m^3
b	Burgers vector	3.87×10^{-10}	m
δ	GB thickness	7.74×10^{-10}	m
G	shear modulus at 850°C	22.7	GPa
D_i	volume diffusion coefficient	$1 \times 10^{25} e^{-1030000/RT}$	m^2s^{-1}
D_{gb}	GB diffusion coefficient	$1 \times 10^{25} e^{-745000/RT}$	m^2s^{-1}
n	stress exponent in power-law creep	3	—
A	constant in power-law creep equation	3	—
B	constant in N-H creep equation	40	—

(atomic volume), D_i 은 체확산계수, D_{gb} 는 입계확산계수, k는 불쓰만 상수, δ 는 입계의 두께, π 는 원주율, G는 전단탄성률. b는 버거스벡터의 길이이며, n은 응력지수로 멱수법칙 크리프의 경우 3~5의 값을 갖는다.

변형도내 임의의 한 구역 内部에서는 $d\epsilon_1/dt \gg d\epsilon_2/dt$, $d\epsilon_1/dt \gg d\epsilon_3/dt$ 이고, 구역과 구역의 경계에서는 $d\epsilon_1/dt = d\epsilon_2/dt \gg d\epsilon_3/dt$, 세구역이 만나는 점에서는 $d\epsilon_1/dt = d\epsilon_2/dt = d\epsilon_3/dt$ 이므로, 각 구역간의 경계선은 (2), (3), (4) 식을 이용하여 풀면 다음 식으로 표현이 된다.

나바로헤링 크리프-코블 크리프의 경계선

$$\frac{d}{b} = \frac{300D_{gb}}{B\pi D_i} \tag{5}$$

멱수법칙 크리프-코블 크리프의 경계선

$$\frac{d}{b} = \left(\frac{300\Omega}{A\pi b^3} \frac{D_{gb}}{D_i} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\sigma}{G} \right)^{-\frac{n-1}{3}} \tag{6}$$

멱수법칙 크리프-나바로헤링 크리프의 경계선

$$\frac{d}{b} = \left(\frac{B\Omega}{A\pi b^3} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\sigma}{G} \right)^{-\frac{n-1}{2}} \tag{7}$$

세구역이 만나는 삼중점

$$\frac{\sigma}{G} = \left(\frac{B^3\pi^2\Omega}{A300^2b^3} \frac{D_i^2}{D_{gb}^2} \right)^{\frac{1}{n-1}} \tag{8}$$

이 식들에 Table 2에 있는 기존 문헌에¹⁸⁾ 보고된 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 에 대한 상수값을 대입하여 850°C에서의 변형도를 그리면 Fig. 1과 같이 된다.

변형도내의 사각형 I은 기존 문헌에 발표된 크리프

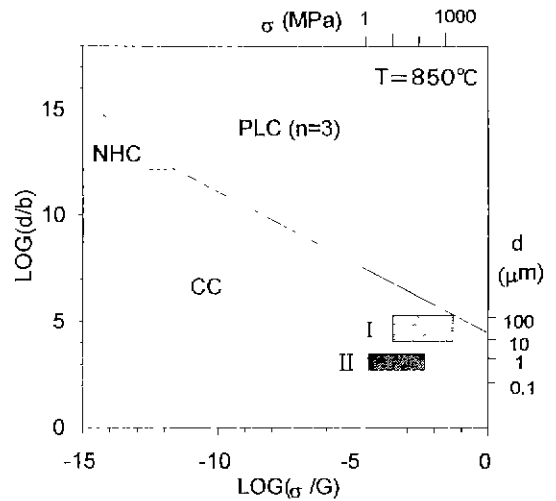


Fig. 1. Deformation mechanism map for the creep of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Rectangles I and II show experimental conditions for the reported works of creep and superplastic deformation in $YBa_2Cu_3O_{7-x}$.

데이터를 표시하고 사각형 II는 초소성 데이터를 표시한다. 사각형 I이 코블 크리프 구역내에 위치하고 우상위가 멱수법칙 크리프 구역과 만나고 있는 모습에서, 사각형내 조건하에서 입계확산 크리프가 주도적으로 일어나고 입자와 응력이 100 μm와 1 GPa에 접근할 만큼 클 때 멱수법칙 크리프가 일어난다는 것을 알 수 있다. 이것은 다음 세가지 점에서 기존 문헌에 보고된 실험 결과와 일치한다. 첫째로, 여러그룹들이 행한 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 의 크리프 실험¹⁻³⁾에서 응력지수(n)값으로 1~1.25를 얻었는데, 이는 확산 크리프의 n값과 거의 동일하다. 둘째로, 부소드 등⁴⁾은 1 GPa의 정수압하에 100 μm 입

Table 3. Various Mechanisms for the Superplastic Deformation of Polycrystalline Materials.

Deformation mechanisms	Deformation parameters			References
	n	p	Q	
<ul style="list-style-type: none"> • Grain boundary sliding with accommodation at grain boundary • by dislocation 	2	1	Q _l	Langdon ¹⁹⁾
<ul style="list-style-type: none"> • Grain boundary sliding with accommodation at triple point • by dislocation • by lattice dislocation • by lattice dislocation • by grain boundary dislocation 	2	2	Q _{gb}	Ball, Hutchison ²⁰⁾
	2	2	Q _{gb}	Mukherjee ²¹⁾
	2	2	Q _{gb}	Gifkins ²²⁾
<ul style="list-style-type: none"> • by diffusion • by lattice dislocation • by grain boundary dislocation • diffusion controlled • interface reaction controlled 	1	2	Q _l	Ashby, Verrall ²¹⁾
	1	3	Q _{gb}	Ashby, Verrall ²³⁾
	2	1	—	Ashby, Verrall ²³⁾

Q_l: Activation energy for the lattice diffusion
 Q_{gb}: Activation energy for the grain boundary diffusion

도의 시편에 대한 소성변형 실험을 하여 응력지수값 2.5를 얻었는데, 이는 먹수법칙 크리프의 응력지수값 3과 근사한 값이다. 세체로, 크래머 등¹⁰⁾은 50 μm 입도와 1 GPa 응력하에 소성변형 실험한 시편에서 대단히 많은 수의 전위를 발견하여 먹수법칙 크리프가 일어났다는 사실을 밝혀냈다. 그 반면에, 낮은 응력하에 행한上記 크리프 변형실험¹⁻⁹⁾에서는 변형된 시편에서 전위가 거의 발견되지 않아 확산크리프가 일어났음을 지지해 준다. 결국, 변형도는 이같이 입도·응력조건에 따라 확산크리프나 먹수법칙 크리프 중 어느 한 쪽이 일어날 수 있고, 이것이 기존문헌에 보고된 결과들간의 불일치의 원인이라는 것을 보여주고 있다.

2.2. 초소성 변형을 포함하는 변형도

이와 같이 작성된 변형도(Fig. 1)는 확실히 크리프네 이타와는 일치하고 있으나 초소성변형 기구를 고려하고 있지 않으므로 초소성변형 데이터와 전혀 맞지 않는다. 이 변형도내에 초소성변형 기구를 삽입하기 위하여 일반적 다결정질 고체재료에서의 초소성 변형 메카니즘을 알아보면 Table 3에 보이는 바와 같다. 물성이 다른 재료에서는 일어나는 초소성변형 기구도 다른데, YBa₂Cu₃O_{7-x}의 경우에는 1.4 μm 이하의 입도 및 50 MPa 이하의 응력조건에서는 입계확산에 의한 순응을 수반하는 입계

미끄림(grain boundary sliding with an accommodation by grain boundary diffusion)이고, 그 이상의 입도와 응력 조건에서는 계면반응지배에서 입계확산지배로 속도지배의 과정이 바뀐다는 것이 밝혀져 있다^{13,24)}. 에쉬비 등이 제안한 계면반응지배와 입계확산지배 입계미끄림에 의한 초소성변형 방정식은²³⁾

계면반응지배 입계미끄림

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\beta b M \sigma (\sigma - 0.72\Gamma/d)}{0.84 G d} \quad (9)$$

입계확산지배 입계미끄림

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{98\Omega r \delta D_{gb} (\sigma - 0.72\Gamma/d)}{kT d^2} \quad (10)$$

이고, 여기에서 Γ는 입계자유에너지, β는 단위를 보정하는 상수, M은 粒界轉位の 移動度이다. 문턱응력(threshold stress)이 0일 때 팔호속의 음수항이 없어져, 변형속도는 계면반응지배의 경우, σ²/d에 비례하고 확산지배의 경우, σ/d²에 비례하게 된다. 계면반응지배와 입계확산지배 입계미끄림 메카니즘을 변형도 내에 삽입하기 위해 두 구역간의 경계선을 (9)식과 (10)식으로 구하면 그 식은 다음과 같이 표현된다.

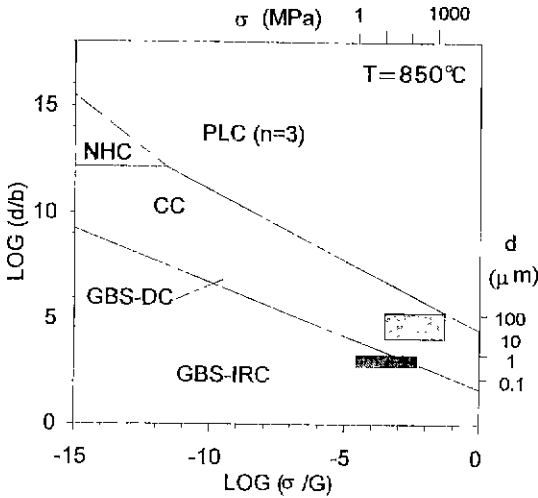


Fig. 2. Deformation mechanism map for $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ including superplastic deformation mechanisms.

$$\frac{d}{b} = \left(\frac{82.3\Omega\pi\delta D_{gb}}{\beta Mb^3kT} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\sigma}{G} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 물질의 粒界 轉位 移動度 M 은 측정된 바가 없으므로 추정된 값을 이용할 수 밖에 없고, 그 추정값과 Table 2의 상수값들을 이용하여 변형도를 그리면 Fig. 2와 같아진다. 확산지배와 반응지배 구역의 경계선이 로그로그 그래프 상에서 $-1/2$ 의 기울기를 갖고 있으며, 초소성 데이터 사각형(II)의 모서리에 걸쳐 있는 것을 알 수 있다. 여기에서 확산지배 입계미끄럼 구역과 코블 크리프 구역 간의 경계선이 점선으로 그려진 이유는 두 변형 메커니즘 방정식이 식 (9)와 식 (3)에서 보는 바와 같이 동일한 응력지수와 입도지수를 갖고 있으므로 수식상으로 경계가 형성되지 않기 때문이며, 또한 입계미끄럼은 크리프중에서도 일어나고 입도감소에 따라 그 발생분율이 증가하므로, 코블 크리프에서 입계미끄럼으로 전이하는 경계가 뚜렷하게 형성되지는 않을 것이기 때문이다.

Table 3에 제시한, 다른 n 값과 p 값을 갖는 기타 초소성 메커니즘들을 변형도내에 설치코자 시도하였으나, 그 어느 것도 크리프 데이터와 초소성 데이터 모두와 일치하는 것은 없었기에, 기타 변형기구들은 무시되었고 두가지 메커니즘만이 삽입되었다. 작성된 변형도는 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 의 초소성 실험에서 측정된 응력지수(n)값이 입도와 응력의 증가에 따라, $\sim 1\mu m$ 입도, $\sim 50 MPa$ 응력조건에서 2로부터 1로 바뀌는 것¹³⁾과 일치한다(Fig. 3). 이는 또한 흥미롭게도, 다른 세라믹 재료에서 관찰되는

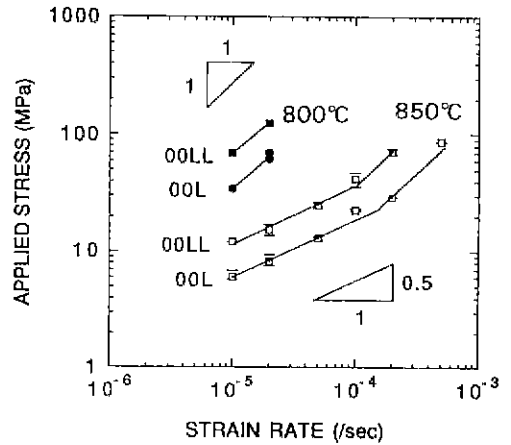


Fig. 3. Results of superplastic deformation in $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ceramic at 800 and 850°C. Note the change in the slope and stress exponent as the flow stress increases.

계면반응지배 소성변형의 개시점이 약 $1\mu m$ 입도와 $10 \sim 100 MPa$ 의 응력일 때라는 점과도 일치한다^{25, 29)}. $0.5 \sim 1.4\mu m$ 입도를 갖는 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 시편을 여러 응력 조건에서 초소성 실험할 때, 입도와 응력이 어느 한계 ($d \sim 1\mu m, \sigma \sim 100 MPa$)를 넘어서면 대량변형된 시편의 옆 표면에 엑스자 모양의 전단변형무늬(shear marks)가 형성된다는 보고가 있는데¹³⁾, 이는 이 한계값 이상에서 초소성변형이 안정적으로 일어나지 않고 일종의 파괴(failure) 과정이 진행중이라는 것을 보여주는 것이며, 이 한계값과 변형도 상의 초소성변형-크리프 사이의 경계가 대체적으로 일치하고 있다는 점이 주목된다.

3. 결 론

$YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 세라믹 초전도체의 850°C에서의 크리프 변형과 초소성 변형에 대한 변형기구도(變形機構圖, deformation mechanism map)가 작성되었다. 작성된 변형기구도는 나바로레링, 코블, 및 먹수법칙 크리프와 계면반응지배 및 입계확산지배 입계미끄럼 기구들을 포함하는 것으로, $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 세라믹의 고온에서의 크리프 데이터는 물론, 초소성 데이터와도 일치한다. 작성된 변형기구도는 기존문헌에 보고된 소성변형 개수의 불일치의 원인이 실험조건의 차이에 따른 다른 메커니즘의 활동이라는 점을 명확히 설명해 준다. 이 변형도는 또한, 일정 입도·응력조건에서 초소성 변형기구가 계면반응지배에서 입계확산지배 입계미끄럼으로 바뀌는 현상과 초소성변형이 불안정해지는 실험결과와 일치하였다.

감사의 글

저자들은 랭돈(T.G. Langdon)박사의 심도있는 제언과 엘버퀴크 조제(Jose M. Alburquerque)氏의 도움에 감사 드린다.

REFERENCES

1. A.W. von Stumberg, N. Chen, K.C. Goretta, and J.L. Routbort, "High Temperature Deformation of YBa₂Cu₃O_{7-x}," *J. Appl. Phys.*, **66**(5), 2079-2082 (1989).
2. K.C. Goretta, J.L. Routbort, A.C. Biondo, Y. Gao, A.R. Arellano-Lopez, and A. Dominguez-Rodriguez, "Compressive Creep of YBa₂Cu₃O_{7-x}," *J. Mater. Res.*, **5**(12), 2766-2770 (1990).
3. P.E. Reyes-Morel, X. Wu, and L.-W. Chen, "Deformation Characteristics of Textured Ba₂Sr_{1.5}Ca_{1.5}Cu₂O_{8-x} and YBa₂Cu₃O_{6+x} Polycrystals," pp. 590-597 in Ceramic Superconductors II, Ed. by M.F. Yan, Am. Ceram. Soc., Ohio, USA, 1988.
4. G. Bussod, A. Pechenik, C. Chu, and B. Dunn, "Effects of Temperature and Strain Rate on the Plastic Deformation of Fully Dense Polycrystalline YBa₂Cu₃O_{7-x} Superconductor," *J. Am. Ceram. Soc.*, **72**(1), 137-139 (1989).
5. Y. Kodama, and F. Wakai, "Hot Deformation and Superconductivity of YBa₂Cu₃O_{7-x} Ceramics," pp. 113-116 in Advances in Superconductivity II, Ed. by T. Ishiguro and K. Kajimura, Springer-Verlag, Tokyo, Japan, 1989.
6. O.A. Kaibyshev, R.M. Imaev, and M.F. Imaev, "Superplasticity of the Ceramic Compound YBa₂Cu₃O_{7-x}," *Sov. Phys Dokl.*, **34**(4), 375-376 (1989).
7. W.-J. Kang, S. Hanada, Y. Wadayama, and A. Nagata, "Microstructural Control of YBa₂Cu₃O_{7-x} by High Temperature Compression," *Mater. Sci. Eng.*, **B13**, 125-132 (1992).
8. K. Higashida, and N. Narita, "High Temperature Deformation and Textures in Oxide Superconductors," pp. 805-808 in Advances in Superconductivity III, Ed. by K. Kajimura, and H. Hayakawa, Springer-Verlag, Tokyo, Japan, 1990.
9. B.C. Hendrix, T. Abe, J.C. Borofka, P.-C. Wang, and J.K. Tien, "Hot Deformation of YBa₂Cu₃O_{7-x} and Composite YBa₂Cu₃O_{7-x}/Ag," *J. Am. Ceram. Soc.*, **76**(4), 1008-1010 (1993).
10. M.J. Kramer, L.S. Chumbley, and R.W. McCallum, "Analysis of Deformed YBa₂Cu₃O_{7-x}," *J. Mater. Sci.*, **25**, 1978-1986 (1990).
11. J. Rabier, and M.F. Denanot, "Plastic Deformation of YBa₂Cu₃O_{7-x} and Related Structural Defects," *Revue*

- Phys Appl.*, **25**, 55-59 (1990).
12. Jondo Yun, M.P. Harmer, and Y.T. Chou, "Superplastic Flow in Fine-Grained YBa₂Cu₃O_{7-x} High Tc Superconductors," *Scripta Metall. Mater.*, **29**, 267-271 (1993).
13. Jondo Yun, "Superplastic Deformation of High Tc Superconductors: YBa₂Cu₃O_{7-x} and YBa₂Cu₃O_{7-x}/Ag," Ph. D. Dissertation, Lehigh University, Bethlehem, USA (1994).
14. J.M. Alburquerque, M.P. Harmer, and Y.T. Chou, "Tensile Superplastic Deformation in YBa₂Cu₃O_{7-x} and YBa₂Cu₃O_{7-x}/Ag," private communication (1994).
15. M.F. Ashby, "A First Report on Deformation-Mechanism Maps," *Act Metall.*, **20**, 887-897 (1972).
16. T.G. Langdon, and F.A. Mohamed, "Deformation Mechanism Maps for Ceramics," *J. Mater. Sci.*, **11**, 317-327 (1976).
17. M.R. Notis, "Deformation Mechanism Maps: A Review with Applications," pp. 1-23, in Deformation of Ceramic Materials, Ed. by R.C. Bradt and R.E. Tressler, Plenum Publishing Corp., New York, USA, (1975).
18. Jondo Yun, M.P. Harmer, and Y.T. Chou, "Deformation Mechanism Map for Creep in YBa₂Cu₃O_{7-x}," *J. Mater. Sci.*, **30**, 4906-4911 (1995).
19. T.G. Langdon, "Grain Boundary Sliding as a Deformation Mechanism during Creep," *Phil. Mag.*, **22**, 689-700 (1970).
20. A. Ball, and M.M. Hutchison, "Superplasticity in the Aluminum-Zinc Eutectoid," *Metal Sci. J.*, **3**, 1-7 (1969).
21. A.K. Mukherjee, "The Rate Controlling Mechanism in Superplasticity," *Mater. Sci. Eng.*, **8**, 83-89 (1971).
22. R.C. Gifkins, "Grain-Rearrangements during Superplastic Deformation," *J. Mater. Sci.*, **13**, 1926-1936 (1978).
23. M.F. Ashby, and R.A. Verrall, "Diffusion-Accommodated Flow and Superplasticity," *Acta Metall.*, **21**, 149-163 (1972).
24. Jondo Yun, M.P. Harmer, and Y.T. Chou, "Superplastic Deformation in Fine-Grained YBa₂Cu₃O_{7-x}," to be published in J. Am. Ceram. Soc.
25. R.M. Cannon, W.H. Rhodes, and A.H. Heuer, "Plastic Deformation of Fine-Grained Alumina (Al₂O₃): I. Interface-Controlled Diffusional Creep," *J. Am. Ceram. Soc.*, **63**(1-2), 46-53 (1980).
26. F. Wakai, and T. Nagano, "The Role of Interface-Controlled Diffusion Creep on Superplasticity of Yttria-Stabilized Tetragonal ZrO₂ Polycrystals," *J. Mater. Sci. Lett.*, **7**, 607-609 (1988).
27. M. Nauer, and C. Carry, "Creep Parameters of Yttria Doped Zirconia Materials and Superplastic Deformation Mechanisms," *Scripta Metall. Mater.*, **24**, 1459-1463 (1990).

28. N. Furushiro, T. Tanizawa, K. Akashiro, and S. Take-shita, "Grain Boundary Sliding during Superplastic Deformation in Ceramic Materials," pp. 245-250 in Superplasticity in Advanced Materials, Ed. by S. Hori, M. Tokizane, and N. Furushiro, The Jpn. Soc. Res. Superplast., Japan, 1991.
29. Y. Okamoto, M. Inoue, T. Shiono, K. Hayashi, and T. Nishikawa, "Diffusion Controlled and Interface Reaction Controlled Deformation in Fine-Grained Alumina and Y-TZP," pp. 269-274 in Superplasticity in Advanced Materials, Ed. by S. Hori, M. Tokizane, and N. Furushiro, The Jpn. Soc. Res. Superplast., Japan, 1991.