

세라믹의 超塑性

釜山工業大學
金屬工學科
教授 李鍾文

1. 序 論

세라믹은 구조용 세라믹과 기능성 세라믹으로 대별되는데 구조용 세라믹은 내열성, 내마모성, 내식성, 耐酸化性 등 주로 세라믹이 가진 기계적 특성을 이용한 것이고, 기능성 세라믹은 세라믹이 가진 전기적, 磁氣的, 광학적, 생체적인 특성을 이용한 것이다. 이와 같이 세라믹은 금속재료에서는 얻을 수 없는 많은 장점을 가지고 있으나 취약하여 금속과 같이 소성가공이 용이하지 않은 커다란 결점을 가지고 있다. 세라믹製의 부품 등을 제공하는 방법으로서 성형과 소결을 분리하여 실시하는 소위 간접법이 종래 주류로 되어 있다. 이것은 사출성형, 주입성형, CIP 등에 의한 성형을 실시하고, 잇달아서 소결을 실시하는 방법이지만 소결 수축에 의한 치수 정밀도의 저하를 보완하기 위하여 연삭 및 연마공정을 생략할 수 없으며, 가공 효율이나 코스트의 면에서 불리하게 되고 있다.

최근, 수 종류의 세라믹에 있어서 금속의 경우와 동일한 超塑性이 發現되는 것이 발견되었다. 이것은 세라믹을 製品의 粗形狀까지, 또는 블록(block)이나 板과 같은 단순한 형상으로 소결한 후 초소성 발현의 조건 하에서 소성가공을 실시하여 최종제품형상 (Net Shape) 또는 최종제품에 가까운 형상(Near Net Shape)에 까지 성형할 수 있는 가능성을 나타

내었다. 또 성형과 소결을 동시에 실시하는 직접법에 있어서도 소결축진에 유효한 점이 확인되는 등 수많은 분야에 응용이 기대되고 있어 세라믹의 초소성 현상은 현재 커다란 관심을 모으고 있다.

본고에서는 세라믹의 초소성의 특징 및 그 응용과 금후의 과제 등에 관하여 개략적인 소개를 하고자 한다.

2. 세라믹의 超塑性의 特徵

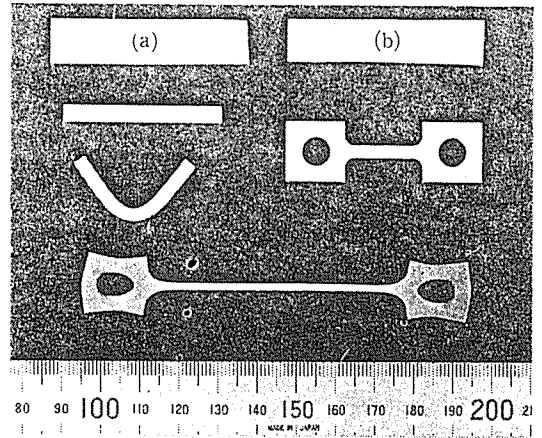
〈그림-1〉은 3Y-TZP(3몰% 이트리아 部分安定化 正方晶 지르코니아 多結晶體)의 인장 및 굽힘 시험 결과의 예를 나타낸 것이다. 거시적인 줄림(hanging)이 없이 마치 엿과 같이 균일하게 변형되어 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 變形速度 感受性指數(m 값)가 크고($m \approx 0.5$), 또 변형 중의 微視 組織에도 커다란 변화가 생기지 않는 등, 역학적 및 조직적으로도 안정되어 있기 때문이라고 생각된다. 이와 같이 세라믹이 금속과 같은 초소성 변형을 나타내는 것이 확인된 것은 극히 최근의 일이다.

일단 ‘세라믹의 超塑性’이라는 용어의 의미를 언급하여 두고자 한다. 종래, 순수한 ZrO_2 , Bi_2O_3 , Bi_2WO_6 등에 있어서 변태 중의 커다란 크리이프 변형에 대하여 ‘變態 超塑性’이, 또 MgO , UO_2 , Al_2O_3 , SiC , $MgO \cdot 2Al_2O_3$ 등의 압축 및 굽힘 변형에 있어서 30% 정도의 變形能을 나타내는 경우에 대하여 ‘微細結晶粒 超塑性’이 발현한 것으로 간주하여 왔다. 그러나 이들의 결과는 모두 $m \approx 1$ 을 나타내고 있으나 인장응력을 받는 경우에도 커다란 신율이 생길 것인가 생기지 않을 것인가는 확인되지 않았다.

세라믹의 경우, 소결할 때 결합제로서 유리質 성분이 첨가되는 경우가 많은데, 이들이 粒界에 모여서 입계 유리相을 형성하면, 유리相의 연화점 이상의 온도에서는 어느 정도의 소성 변형이 그의 粘性流動(이 경우 $m \approx 1$ 을 나타낸다)에 의하여 가능하게 된다. 그런데 금속과 비교하여 세라믹에서는 입계 에너지와 표면 에너지 사이에 커다란 차이가 없기 때문에 입계 분리나 입계 공극이 발생하기 쉬워서 인장응력을 받으면 수%~10수%에서 과단되어 버리는 경우가 많다.

한편, 금속의 경우 변형속도 감수성지수(m) >0.3 이라 하더라도 대부분의 경우 신율 수100% 이상을

나타내므로 $m > 0.3$ 을 일단 초소성 발현의 목표로 생각할 수 있다. 그러나 세라믹에서는 $m \approx 1$ 에 있어서도, 인장에 있어 신율이 전술한 바와 같이 대단히 작은 경우가 있으며, m 값만으로 초소성의 발현을 확실히 나타낼 수는 없다. 그래서 세라믹에서는 $m > 0.3$ 의 조건에다가 인장응력 하에서 어느 정도의 신율(100% 이상)을 발생할 때만 초소성이 발현된 것으로 생각하는 방법도 있다. ‘超塑性’이란 것은 외부에서 과잉의 에너지 등을 재료에 주어서 강제적으로 變形能을 증대시키는 것이 아니고, 재료 자신이 가지고 있는 변형능이라고 한다면 커다란 신율의 발현은 초소성의 필요 조건이라고 할 수 있다.



〈그림-1〉 3Y-TZP를 초소성 발현의 조건하에서 인장 및 3점 굽힘한 결과의 예

그러나 실제의 소성가공 과정에 있어서 100% 이상의 연성을 필요로 하는 경우는 드물다. 특히 세라믹 초소성의 응용으로서 기대되는 것으로 성형과 소결은 종래대로 실시하고, 그 후 초소성 변형을 이용하여 ‘Net Shape’ 또는 ‘Near Net Shape’로 하면, 코스트가 높게 되는 원인이 되고 있는 연삭 및 연마 공정을 대폭적으로 절감시킬 수가 있다. 또 초소성 단조나 소결 단조 등과 같이 압축 변형이 대부분을 차지하는 경우도 많다. 따라서 張出 성형 등과 같이 커다란 인장 변형을 필요로 하는 경우를 제외하고는 100% 이상의 커다란 신율이라는 조건은 실용상 반드시 필요한 것은 아니라고 생각된다. 초소성의 특징으로서 대단히 낮은 변형 저항과 스프링 백

(Spring back)이 거의 없는 것도 중요하다. 前者는 型材料의 부담이 경감되고, 에너지 절약에 유효하다. 또 後者는 양호한 연성과 함께 우수한 성형성 및 轉寫性(스탬핑性), 즉 제품의 치수 정밀도의 향상과 표면의 평활화, 또는 복잡한 형상(예를 들면 2차 곡면)의 부여 등에 유효하다. 이와 같이 초소성의 발현은 커다란 신율 이외에도 실용상 유용한 특징을 가지고 있다.

3. 세라믹의 超塑性 變形의 메카니즘

‘세라믹의 초소성’의 크리테리언(Criterion), 즉 “ m 값과 신율이 모두 크다”를 만족하는 미세결정립 초소성에 있어서도 다음과 같이 재료 내부의 미세적 구조가 다른 두가지의 경우가 있다. 즉,

- ① 유리상이 입계 全面을 덮은 듯이 존재하는 경우
- ② 유리 相을 포함하지 않거나, 있더라도 입계 3중점 등에 국부적으로 존재하고, 입계 全面에는 존재하지 않는 경우

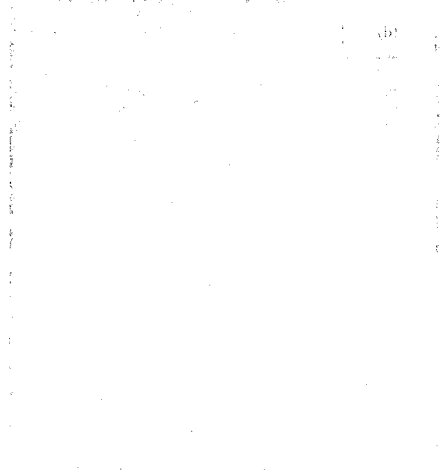
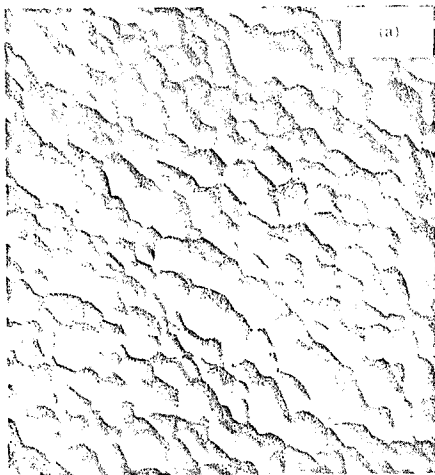
전술한 ①항의 조건은 금속에서는 볼 수 없는 세라믹 특유의 현상이며, 주로 입계 유리相의 점성 유동에 의하여 초소성이 진행된다. 이 경우, $m \approx 1$ 로 되지만

신율은 100% 정도로 유지되는 경우가 많다. 이러한 종류의 초소성을 나타내는 재료로서는 베타 스포듀멘 글라스 세라믹(B-Spodumene Glass Ceramics) 및 常壓 소결 질화규소(Si_3N_4) 등이 있다. 변형의 메카니즘으로는 입계 유리相(초소성 상태에서는 液相)을 경유한 물질의 응력 방향으로의 이동, 즉 응력 방향에 평행한 입계에서 용해한 물질이 액상을 경유하여 수직 방향의 입계에서 석출하는 일종의 확산 크리이프(Creep)에 의하여 변형이 진행된다는 보고가 있다.

한편, ②항과 같은 미세 구조를 가진 세라믹의 초소성 발현은 금속의 경우와 유사 또는 일치하는 경우가 많다. 즉, $m < 1$ 에서 非뉴톤 粘性을 나타냄과 동시에 신율은 수 100% 이상에 달한다. 또 초소성 변형 후의 조직은 다음과 같은 특징을 나타낸다.

- ① 粒内の 전위(Dislocation) 밀도는 거의 변화하지 않는다.
- ② 결정립은 응력 방향으로 다소 변형되지만 전체적으로는 等軸粒狀이다.
- ③ 표면에 입계 미끄럼의 흔적이 생긴다.
- ④ 동적인 誘起粒 성장은 있으나 그다지 강하지는 않다.
- ⑤ 입계에 공동(Cavity)이 생긴다.
- ⑥ 결정의 相은 변화하지 않는다.

실험 결과의 예로서 <그림-2>에 3Y-TZP의 초



<그림-2> 變形 前 表面을 鏡面으로 연마한 3Y-TZP 인장시험편을 $T=1,500^{\circ}C$ $\dot{\epsilon}=4.17 \times 10^{-4} S^{-1}$ 에서 $\epsilon=40\%$ 까지 인장변형한 후의 표면미시조직. (a) 平行部, (b) 肩部. 肩部에도 粒界가 나타나고 있는 것은 熱腐蝕이 발생하기 때문이다.

논단 III

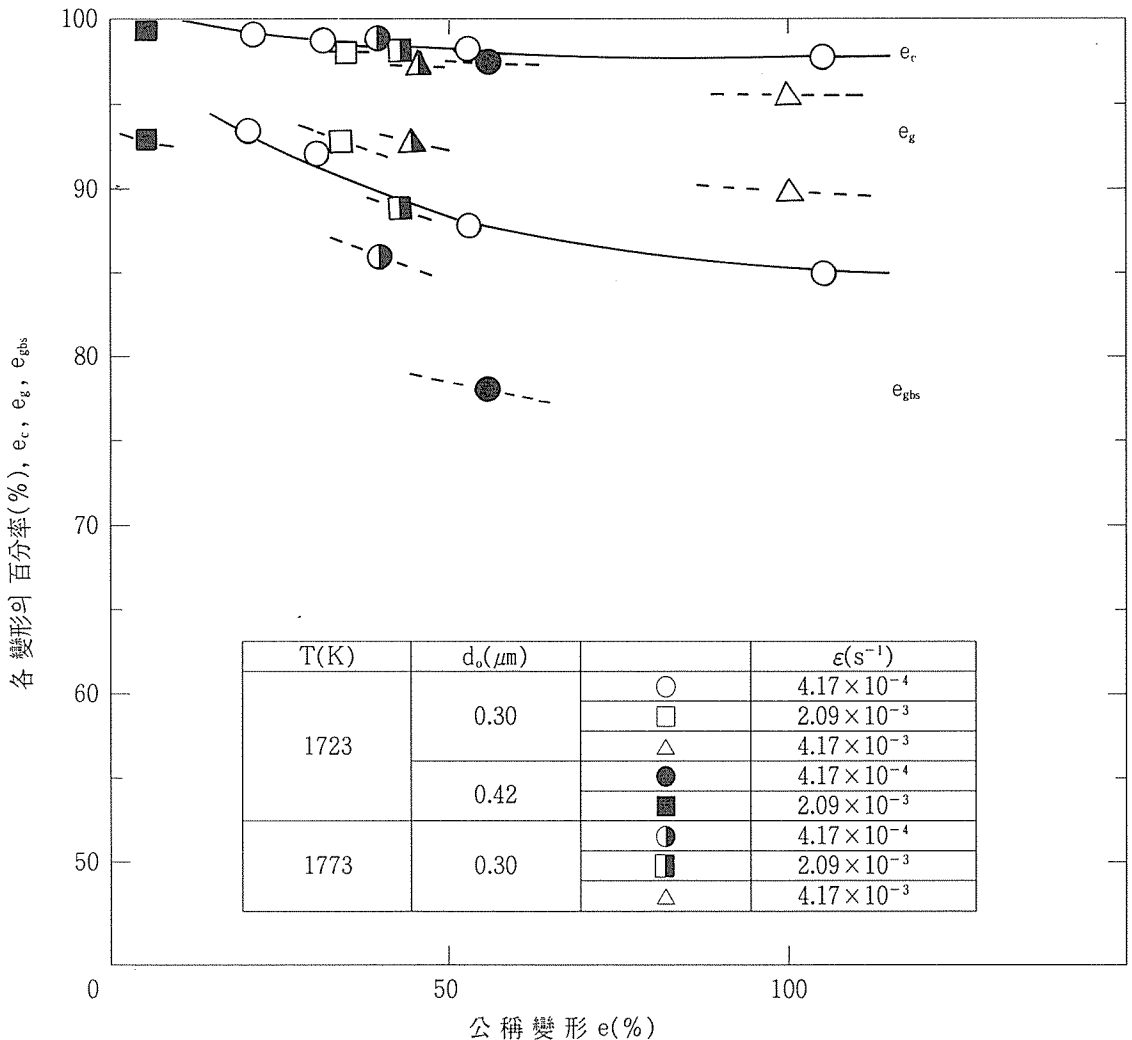
소성 변형 후의 표면 미시조직을 나타내었는데, 입계 미끄럼(Sliding)의 흔적이 현저히 나타나 있다. 또 <그림-3>은 3Y-TZP에 대하여 전체 변형(e_t)에 차지하는 입계 미끄럼(e_{gbs}), 粒內 변형(e_g) 및 공동에 기인하는 변형(e_c)의 비율을 나타낸 것이다. 전체 변형(e_t)의 증가와 함께 공동에 기인하는 변형(e_c)의 비율이 증가하지만, 입계 미끄럼의 전체 변형에 대한 기여는 항상 80% 이상을 차지한다는 것을 알 수 있다. 이들의 결과는 주요한 변형 모드가 입계 미끄럼인 점, 또 그것에 기인하는 공동의 발생, 그리고 어느 정도의 입내 변형(주로 확산 크리이프에 의한

것으로 생각된다)도 생긴다는 것을 나타내는데, 이들의 경향은 금속의 경우와 대단히 유사하다.

또는 응력(σ), 변형 속도(ϵ), 粒徑(d), 온도(T)의 관계를 나타내는 구성식도 금속의 경우와 동일한 Dorn 式, 즉

$$\epsilon = K\sigma^n d^{-p} \exp(-Q/RT)$$

에 따른다. 上記한 式에서 $n=1/m$, p : 입경 지수, Q : 활성화 에너지, R : 기체 정수, K : 정수를 각각 나타낸다.



<그림-3> 전체 변형(e_t)에서 차지하는 입계 미끄럼(e_{gbs}), 粒內 변형(e_g) 및 공동에 기인한 변형(e_c)의 비율과 그들의 전체 변형에 대한 의존성

세라믹의 경우, 동일한 재료에 대하여 m 값 및 p 값의 측정 결과가 연구자에 따라서 상당히 다른 경우가 있다. 예를 들면 3Y-TZP의 경우, m 값은 0.3~1.0, p 값은 1~3이라는 보고가 있다. 이러한 원인으로서는 원료 분말 및 결정체의 제조 프로세스의 차이에 의하여 입계 유리상의 관여 방식이 다르기 때문이라는 설명이 보고되고 있다. 실제로 3Y-TZP에 대하여 1~2mm의 아모르퍼스상이 입계에 존재한다는 보고와 아모르퍼스상은 전혀 존재하지 않는다고 하는 보고가 있다. 따라서 세라믹의 변형 메커니즘을 m 값이나 p 값의 측정 결과로부터 검토할 경우에는 입계 유리상의 영향을 충분히 고려할 필요가 있다.

또 세라믹의 초소성에서는 응력과 변형 속도의 兩對數 관계가 S자 모양을 나타내지 않는 결과가 많다. $\log\sigma - \log\dot{\epsilon}$ 線圖에 있어서 영역 I은 입계 미끄럼의 한계 응력(threshold stress)에 기인하므로 세라믹의 경우, 영역 I이 관찰되지 않는 원인으로서 입계 아모르퍼스상이 반드시 존재하고 있는 것으로 생각되는데, 3Y-TZP에 대하여 영역 I의 존재를 시사하는 결과도 있다. 따라서 입계 미끄럼의 한계 응력에 대해서는 금후 당연히 검토가 필요하다.

영역 III이 나타나지 않는 원인으로서 높은 應力 상태가 되면 변형 모드가 변화하기 때문이라는 설명도 있으나, 높은 응력 상태가 입경에서는 없고 빠른 변형 속도에 기인하고 있으므로 이것에 대해서는 더욱 검토할 필요가 있다고 생각된다. 다른 사고 방식으로서 세라믹에서는 전위의 파이엘스(Peiers)응력이 크므로 응력 상태가 전위 크리프를 생성시키는 값에 도달하기 전에 파괴 응력에 도달해 버리기 때문에 영역 III이 나타나지 않는다고 하는 설명도 나오고 있다.

어느 경우든지 입계 미끄럼이 주요한 변형 기구인데, 입계 미끄럼의 조정(Accommodation) 프로세스에 대해서는 계면 반응에 율속된 입계 미끄럼 등의 주장이 제안되고 있으나 아직 정설은 없다. 이온 결합 또는 공유결합으로 이루어진 화합물 결정인 세라믹의 초소성 현상이 금속의 초소성과 거의 같은 모양의 거동을 나타내는 것은 초소성의

변형 기구가 원자간 결합의 종류나 결정 구조에 따르지 않고, 多結晶體에 공통된 현상이라는 것을 시사하고 있다.

4. 超塑性을 發現하는 세라믹

초소성을 발현하는 세라믹은 다음과 같은 미시 조직과 성질을 공통적으로 가지고 있다.

- ① 평균 입경이 1 μ m이하의 균일하고 等軸인 粒狀 조직
- ② 변형 중의 결정 성장속도가 느리고, 조직의 안정성이 높다.

어떠한 세라믹일지라도 상기한 조건을 만족시킨다면 초소성 발현의 가능성이 높을 것으로 생각된다. 상기한 ①의 조건을 만족시키기 위해서는 원료 분말의 미세화, 균일화가 이루어져야 한다. 또 ②의 조건을 만족시키기 위해서는 다른 종류의 세라믹을 복합하여 2相 조직이 되도록 하는데 粒成長을 억제하는 물질을 첨가하는 것이 유효하다. 세라믹은 일반적으로 입계 이동도가 작으므로 미세화하는 것은 그다지 곤란하지 않다. 따라서 금후 더욱 많은 세라믹에 있어서 초소성화가 이루어질 것으로 생각된다.

〈표-1〉은 현재까지 확인된 ‘세라믹의 초소성’의 크라이테리언에 따른 세라믹을 기능별로 분류하여 나타낸 것이다. 구조용 세라믹 이외에도 수 많은 기능성 세라믹 및 세라믹 복합체에 있어서 초소성화가 실현되고 있는 것을 알 수 있다. 특히 최근에는 나노(nano: 1/10억) 구조 제어에 의하여 나노 미터 단위의 입경을 가진 세라믹의 제조도 가능하게 되어가고 있다.

〈표-2〉는 1991년 일본 오사카(大阪)에서 개최된 “첨단 재료의 초소성에 관한 국제 회의”에서 발표되었던 세라믹 및 세라믹식 복합재료의 초소성 관련 분야에서 연구대상이었던 재료의 예인데, 실제로 수 많은 종류에 걸쳐 있으며, 세라믹의 초소성에 대한 관심이 얼마나 큰가를 보여주고 있다.

〈표-1〉 超塑性 세라믹의 機能別 分類

性 質	機 能	材 料	用 途
機 械 的	強 度	Si ₃ N ₄ , SiC, Y-TZP, Mullite, Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ / Al ₂ O ₃ , Mullite / ZrO ₂ , Si ₃ N ₄ / SiC	構 造 用 部 材 等
電 氣 的	誘 電 性	BaTiO ₃	컨 덴 서
	壓 電 性	PbTiO ₃	壓 電 素 子
	絶 緣 性	Al ₂ O ₃	IC 基 板
	半 導 體	BaTiO ₃	서 어 미 스텐
	超 電 導 體	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} , Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	超 電 導 線
	이 온 傳 導 性	ZrO ₂	酸 素 센 서
光 學 的	透 光 性	ZnS	레이저 윈도우
生 體 的	生 體 活 性	Hydroxyapatite	人 工 骨
	生 體 不 活 性	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂	

〈표-2〉 1991년도 '첨단재료의 초소성에 관한 국제회의(ICSAM-91)'에서 언급한 초소성 재료의 종류

合 金 및 金 屬 系 複 合 材 料			金 屬 間 化 合 物	세라믹 및 세라믹계 複合材料
Al-Ca-Si	IN 905XL	Tool Steel	Ni ₃ Al	Y-TZP
Al-Ca-Zn	IN 9051, 52	UHC Steel	Ni ₃ Si	Y-TZP / Al ₂ O ₃
Al-Cu	IN 100	Superdux 64	Ti ₃ Al	hydroxyapatite*
Al-Cu-Mn	IN 625 LCF	Fe-Cr-Ni	TiAl	Si ₃ N ₄ / SiC
Al-Cu-Si	MA6000	SKD11-PM Steel	alpha-2	Al ₂ O ₃
Al-Cu-Zr	MA754	Stainless Steels	super alpha-2	3Al ₂ O ₃ . 2SiO ₃
Supral 100	Cu-Al-Ni	T15 PM HSS	Fe ₃ (Si, Al)	alpha' sialon**
Supral 200	Cu-42Zn	HPb59-1Brass	Nb ₃ Al	beta' sialon***
Al-Li	Coronze328	Pb-62Sn	Ni ₃ (Si, Ti)	Si-Al-M-N-O
Al 8090	Cu-p	Zn-22Al	Ni-9Si	Al ₂ O ₃ : Pt(95:5)
Al 2090	Cu-Zn-Ni	Zn-Cu-Ti	Ti-34Al-2Mo	BaTiO ₃
Weldalite	Nb-Hf-Ti	alpha / beta brass	Ni-Si-Ti(B)	ZnS
Al-Mg-Mn	Ti-Mo-Sn-Zr	SiCp/7475		ZnS/diamond
Al-Mg-Cr	Ti-9V-Mo-Al	beta SiCw/2024		PbTiO ₃
Al-Mg-Zr	Ti-6Al-4V	beta SiCw/2124		Fe ₃ C/Fe
Al 5083	Ti SP700	beta SiCw/6061		Wc/Co
Al-Zn-Mg	Ti-36Al	SiCw/7075		YBa ₂ Cu ₃ O _{7-y}
Al 7475	Ti-Al-Mo	alpha SiN/2124		YBa ₂ Cu ₃ O _{7-y}
Al 7064	Ti-IMI843	alpha SiN/7064		+ Ag
IN 9021	Mg-Mn-Ce	beta SiNw/2024		
In 9021-1	Mg-Li	beta SiNw/6061		
In 905XL	Mg-Al-Zr	SiNp/6061		
		SiCw/Zn-22Al		

* Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂ ** Si_{6-x}Al_xO₇N_{8-x} *** M_{Z/N}Si_{6-x-z}Al_{x+z}O_xN_{8-x}

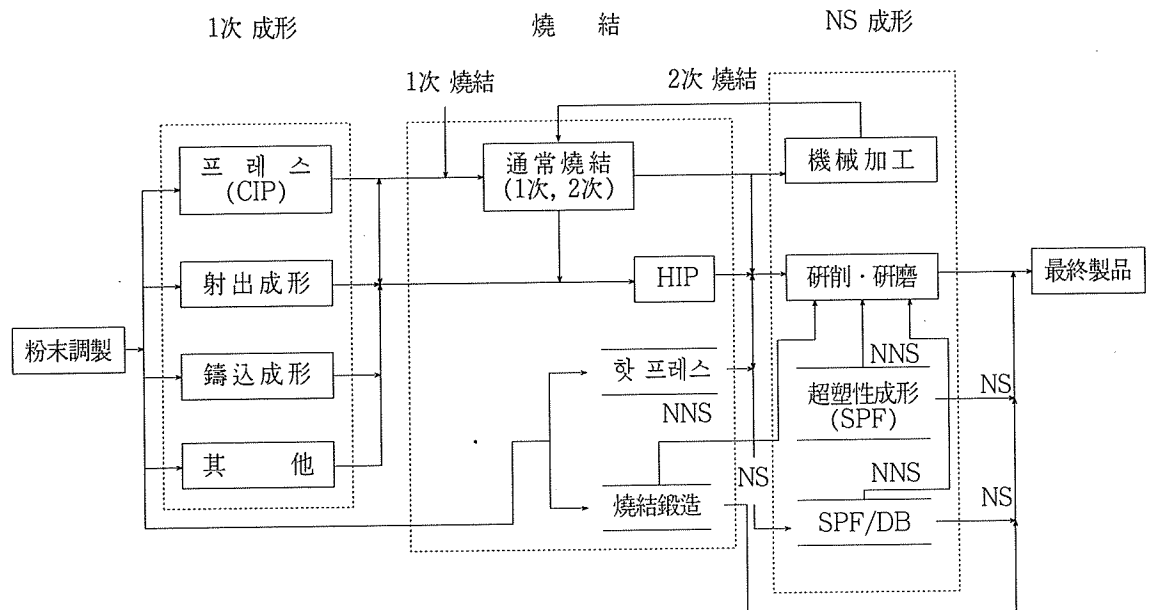
5. 세라믹의 超塑性 現象의 應用

세라믹 제품의 제조 프로세스는 일반적으로 분발 조정 → 성형 → 소결 → 연삭 및 연마 → 최종 제품으로 된다. 통상 세라믹 제품의 제조 프로세스중에 초소성을 이용하는 새로운 프로세스를 포함하여 이들의 상호 관계를 (그림-4)에 나타내었다. 초소성을 이용하는 프로세스는 대부분 'Net Shape' 또는 'Near Net Shape'까지 성형을 실시하는 것으로서 연삭 및 연마 공정을 대폭적으로 삭감하고 있는 것이 特長이며 이하에 각각의 공정에 대하여 개략적인 설명을 하고자 한다.

HIP(Hot Isostatic Pressing : 熱間等壓加壓法 또는 熱間靜水壓加壓法)를 초소성이 발현하는 조건하에서 실시하면 소결체의 치밀화에 대단히 유효하며, 거의 이론 밀도에 가까운 결정체를 얻을 수 있다. 예를 들면 20% Al₂O₃와 80% 3Y-TZP의 복합체인 3Y-20A의 HIP체는 2,500MPa 정도의 높은 강도를 나타낸다. Hot Press는 HIP 정도까지는 못되지

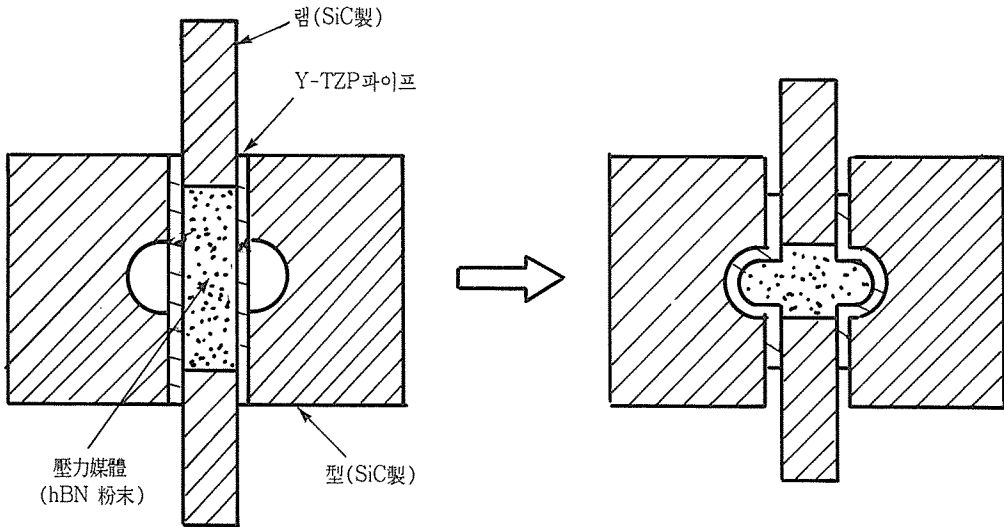
만 소결체의 치밀화에 유효하다. '소결 단조'란 것은 소결과 성형을 동시에 실시하는 것인데, 초소성을 이용하면 소결체의 치밀화와 복잡한 형상의 부여가 가능한 것이 이점이다. 소결 단조는 비교적 빠른 시일에 실용화될 가능성이 커서 현재 연구 개발이 활발히 진행되고 있다.

'초소성 성형'이란 것은 소결되어진 결정체에 소성 가공을 실시하여 Net Shape 또는 Near Net Shape 까지 성형을 실시하는 것이다. 초소성 성형에는 板材의 張出 성형, 벌지(bulge) 성형, 굽힘 등 주로 인장 변형을 이용하는 것과 압출이나 단조 등 주로 압축 변형을 이용하는 것이다. (그림-5)에 粉體를 압력 전달매체로 사용한 세라믹의 벌지 가공예를 나타내었다. 또 'SPF/DB'란 것은 초소성 성형(SPF)과 확산접합(DB)을 동시에 실시하는 것으로 종래 티타늄 합금의 성형가공법으로써, 특히 항공기 부품의 제조에 응용하여 높은 신뢰성과 제품의 중량 감소, 코스트의 저하 등이 달성되었던 우수한 가공기술이다.



NS : Net Shape, NNS : Near Net Shape
 : 通常 工程, : 超塑性 關聯 工程

〈그림-4〉 세라믹 제품의 제조 프로세스

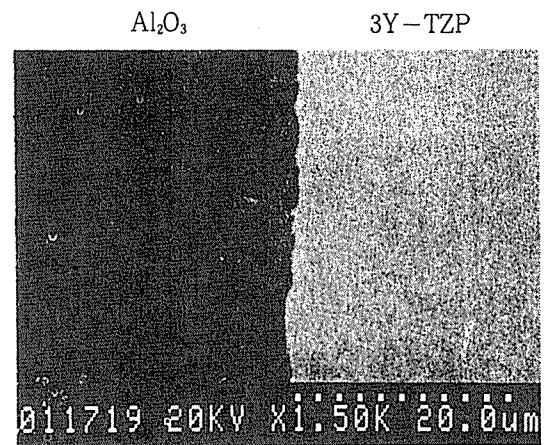


〈그림-5〉 분체를 압력전달매체로 사용한 세라믹의 벌지 加工

세라믹 끼리의 확산 접합은 被接合材의 한쪽 또는 양쪽이 초소성을 나타내는 조건하에서는 母材에 필적하는 접합 강도가 얻어지고 있다. 또 초소성이 발현되지 않는 세라믹 끼리의 접합에 초소성 세라믹 접합 계면에 인서트(insert)함으로써 양호한 접합 강도가 얻어지고 있다. 〈그림-6〉에 0.1mm 두께의 3Y-TZP를 인서트로 사용한 Al_2O_3 의 固相 접합예를 나타내었다. 그림에서 Al_2O_3 의 거친 표면이 3Y-TZP의 초소성 유동에 의하여 매몰되어 있는 것을 볼 수 있다. 세라믹의 SPF/DB에 대해서는 연구개발수준이 아직 초기 단계이지만 금후의 발전이 크게 기대된다.

초소성 성형이나 SPF/DB등은 피가공재 및 型材 모두 동일한 온도로 가열하여 느린 변형속도로 장시간에 걸쳐 성형을 실시하는 것이 보통이다. 그래서 型 재질과 윤활제의 선정이 어렵다. 型 재질은 대기 중에서는 탄화규소(SiC)가 사용되고, 진공이나 불활성가스 중에서는 흑연이나 탄화규소가 사용되고 있으나 型 재 및 가공 코스트가 비싸지게 되는 어려움이 있다. 또 윤활제에 대해서는 진공이나 불활성 가스 중에서는 흑연이나 육방정 질화붕소(hBN)의 微粉末이 사용되지만 대기 중에서 사용하는 윤활제에 대해서는 어떤 것이 좋은지 아직 확실하지 않다. 어느 경우에도 피가

공재와 型 및 윤활제의 평형상태도나 강도비 등을 잘 검토하면서 적절한 재질을 개발해 나갈 필요가 있다. 또 마찰계수의 측정도 중요한 과제이다.



〈그림-6〉 0.1mm 두께의 3Y-TZP를 인서트로 사용한 Al_2O_3 의 固相 接合 접합조건: 1, 450°C, 6MPa

기능성 세라믹에의 초소성의 응용으로서는 집합 조직의 이용, 즉 초소성 압연이나 압출에 의하여 결정립을 어느 특정 방위로 배열시켜 전기적, 자기적, 광학적(예를 들면 투광성의 부여), 기계적 성질 등을 향상시키는 것이 고려되고 있다. 또 인공 뼈나 인공 치근의 성형 등의 의학적인 응용, 그리고 고온산화물 초전도체에 대해서는 단조나 Hot Press로 결정립을 배향시켜 입계전류를 증가시키는 코일 가공, 금속 시즈 중의 초전도 분체의 伸線 가공 등의 응용이 고려되고 있다.

6. 結 論

세라믹의 초소성 현상을 실용화시키기 위하여 금 후 달성하지 않으면 안될 과제로서는 다음과 같은 것이 있다.

즉, 재료적인 면에서는

- ① 초소성 발현 속도의 고속화 및 저온화
 - ② 입계 구조의 제어, 특히 입계의 강화
- 또 가공 프로세스적인 면에서는
- ③ 적합한 형재와 윤활제의 개발 및 마찰계수의 측정
 - ④ 가공 후의 기계적, 기능적 성질이 열화되지 않도록 가공 조건의 선정 및 설계.

상기한 ①항의 고속화 및 저온화에 대해서는 입계 아모르퍼스相의 이용이나 입경의 極微細化가 고려된다. 입계에 초소성 상태에서는 액상으로 되도록 아모르퍼스相이 존재하게 되면 입계 미끄럼 속도를 크게 할 수 있는 것은 틀림없다. 또 저온화에 대해서도 입계 아모르퍼스相은 유효하다. 예를 들면 리튬실리케이트 유리相의 첨가에 의하여 초소성 발현 온도가 1,100°C까지 낮아진다고 하는 보고가 있다. 또 입계 유리相을 이용할 경우, 입계 미끄럼에 기인한 응력 집중을 완화하는 조정 기구(윤속 기구)도 고속화, 저온화에 추종하지 않으면 의미가 없으므로 가장 적합한 아모르퍼스相 성분을 선정하는 것이 중요하다.

결정립의 미세화는 Dorn식으로부터 알 수 있듯이 변형 속도의 증가 또는 변형온도의 저하에 유효하다. '나노 미터' 정도까지 미세화할 수 있다면 상당한 고속화와 저온화를 도모할 수 있을 것이다.

②항의 입계 강화에 대해서는 입계 에너지를 저하

시키는 것과 결정립의 미세화가 유효하다. 입계 에너지를 저하시키는 것이 가능하다면 입계 분리나 입계 공극의 발생을 억제할 수 있게 된다. 입계 에너지를 저하시키는 첨가물의 탐구 및 입계 구조에 관한 연구 개발이 요망된다. 한편 결정립의 미세화는 粒界面上的의 변위의 확대에 의한 응력 집중이 약하므로 상대적으로 입계가 강화되는 이외에, Dorn식으로부터 알 수 있듯이 변형 응력도 저하하므로 공동(cavity)으로 발생하기 어렵게 된다.

한편, 가공 프로세스 면에 관한 것으로 ③항에 대해서는 실용상 빠른 시일내에 해결되지 않으면 안되는 중요한 과제인 것은 확실하다. 그리고 ④항에 대해서는 ①항 및 ②항과도 관련되지만 변형에 의한 입계 공동의 발생을 어떻게 최소한으로 억제하는가에 있으며, 가공 프로세스 면에서는 변형 온도와 속도의 최적화 또는 인장 성분이 많게 되지 않도록 변형 과정이나 부품 형상의 설계가 필요하다.

종래, 커다란 신율을 발현시키는 것에 중점을 두어 왔으나 신율은 100% 정도 일지라도 좋으며, 오히려 변형 후의 기계적 및 기능적 특성의 변화에 중점을 둔 재료 프로세스 설계, 즉 100% 이하의 변형에서는 인성, 내열성, 내산화성, 기타의 기계적, 기능적 성질이 열화되지 않도록 재료 프로세스 설계가 요망된다. 그래서 결정립의 미세화가 특히 중요하며, 또 적합한 유리相 성분의 선정과 제어도 중요하다. 결정립의 미세화는 금속의 경우, 耐疲勞性, 耐振性, 내식성 등의 特長을 나타내는데 세라믹의 경우도 전술한 바와 같은 조직 제어에 의한 초소성화에 부수하여 별도의 특성을 기대할 수도 있다.

또 세라믹의 초소성을 조사하기 위해서는 인장 시험이 필요하다. 세라믹의 인장 시험은 일반적으로 어렵고, 아직 표준 규격도 정해져 있지 않다. 그래서 초소성 특성을 간편하게 조사하는 방법으로서 굽힘 시험을 실시하는 방법이 제안되고 있다.

이상에서 세라믹의 초소성의 개요에 대하여 소개하였다. 세라믹의 초소성에 대한 연구는 아직 연륜이 일천함에도 불구하고, 대단히 많은 연구가 발표되고 있으며, 또 우수한 해설도 많이 발표되고 있다. 본고는 원문의 번역 정도에 지나지 않으므로 더욱 관심이 있을 경우에는 이와 관련한 참고 문헌을 참조하기 바란다.