

액상소결의 기공채움 이론과 미세구조 발달

이성민 · 최덕순* · 강석중

한국과학기술원 재료계면공학연구센터, *영남대학교 생산기술연구소

Pore Filling Theory of Liquid Phase Sintering and Microstructure Evolution

Sung-Min Lee, Duk-Soon Choi and Suk-Joong L. Kang

Center for Interface Science and Engineering of Materials (CISEM),

Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST),

Kusong-dong, Yusong-gu, Taejon 305-701, Korea

*KITECH, Yeung Nam University, Daedong, Kyongsan 712-749, Korea

(Received January 12, 1999)

Abstract Based on the pore filling theory, the microstructure evolution during liquid-phase sintering has been analyzed in terms of interrelationship between average grain size and relative density. For constant liquid volume fraction, the microstructure trajectories reduced to a single curve in a grain size(x)-density(y) map, regardless of grain growth constant. The slope of curves in the map was inversely proportional to average pore size, while it increased rapidly with liquid volume fraction. Increase in pore volume fraction retarded the densification considerably, but showed marginal effect on the slope. The activation energy of densification was predicted to be the same as that of grain growth as long as the liquid volume fraction is constant for any temperature range studied. The present analyses on microstructure evolution may demonstrate the usefulness of pore filling theory and provide a guideline for process optimization of liquid-phase sintering.

1. 서 론

분말성형체의 소결에서는 치밀화와 입자성장이 동시에 일어나며 상대밀도와 평균 입자크기는 미세구조의 발달을 표현할 수 있는 두 인자이다. 고상소결에서 치밀화 속도는 입자크기에 의존하고 입자성장 속도는 상대밀도와 기공의 크기에 의존하므로 치밀화와 입자성장은 독립적이지 않고 밀접하게 상호 연관되어 있다.¹⁻⁶⁾ Brook²⁾은 이러한 상호 연관성을 고려하여 소결 과정중에 일어나는 미세구조의 발달과정을 입자-기공 크기 곡선으로 나타낼 수 있음을 보여주었다. 또한 Harmer³⁾는 다양한 치밀화와 입자성장기구에 대하여, 초기 입자크기, 첨가제 등과 같은 소결 변수의 변화가 미세구조발달도의 입자크기-밀도 곡선에 미치는 영향을 설명하였고, 원하는 미세구조를 얻기 위하여 제어되어야 할 소결 변수를 제시하기도 하였다.

고상소결의 경우와는 달리 액상소결에서는 유사한

종류의 연구가 거의 이루어져 있지 않다. 액상소결 이론에서 가장 대표적인 Kingery의 입자 편평화 모델⁷⁾은 기본적으로 고상소결의 두 입자모델과 동일하다. 이 모델에 의하면 일정한 크기의 입자 사이에 존재하는 액상에 의하여 발생된 모세관력에 의하여 두 입자사이의 접촉면은 압축 응력을 받게 되고 접촉면에서 원자의 활동도는 높아진다. 따라서 접촉면에서 입자 목으로의 물질이동이 일어나고 입자의 모양이 변형(shape accommodation)되면서 시편의 수축이 일어나는 모델이다. 입자 편평화 모델은 입자성장을 전혀 고려하지 않았기 때문에 치밀화와 입자성장사이의 연관성을 설명하는 것이 불가능하다. 또한 액상소결에서 입자변형(shape accommodation)에 절대적인 영향을 미치는 입자성장의 효과를 무시하였기 때문에 계산된 치밀화 속도식은 실제 치밀화 현상을 전혀 반영하지 못하고 있다.⁸⁻¹⁰⁾

이에 비하여 기공채움 이론은 입자성장과 치밀화

가 동시에 일어나는 실제 미세구조의 관찰을 바탕으로 연구되어진 모델이다. 액상소결의 치밀화는 액상이 기공을 채움으로써 일어나고 액상으로 채워진 기공자리에는 액상 포켓이 형성된다.¹¹⁻¹⁷ 액상에 의한 기공채움은 작은 크기의 기공에서 먼저 일어나고 시간이 지남에 따라 큰 기공 또한 액상으로 채워져 시편의 치밀화가 진행된다.^{13,14} 이때 액상량이 많을수록 짧은 시간내에 기공채움이 일어난다.¹⁵ 기공채움이 일어난 뒤에는 액상 포켓내로 입자성장이 일어나 미세구조 균질화가 진행된다.¹¹ 이러한 현상학적인 관찰 사실에 바탕을 둔 기공채움 이론은 Kingery의 입자 편평화 모델과는 달리 입자성장이 치밀화에 가장 중요한 역할을 한다.^{18,20} 따라서 이 이론은 입자성장에 따른 치밀화를 제시하여 줄 수 있으며 액상량, 초기 기공율 등과 같은 소결 변수가 미세구조의 발달에 미치는 영향을 예측 가능하게 한다.

본 연구에서는 먼저 기공채움 모델을 간단히 요약하고 이에 바탕을 둔 전산모사 결과를 제시하고자 한다. 개발된 전산모사 모델을 이용하여 일반적인 소결 조건에서 입자크기와 밀도가 소결이 진행됨에 따라 어떻게 변화하는지 보여주고자 한다. 이어서 초기 기공율, 기공크기, 액상량 등 다양한 소결 변수의 변화에 따라 입자크기-밀도 곡선이 변화하는 양상에 대하여 분석하고자 한다. 이러한 분석을 바탕으로 소결의 활성화 에너지가 갖는 물리적 의미를 제시하고, 소결 온도, 승온 속도 등 소결 조건의 변화가 미세구조 변화에 미치는 영향도 분석하고자 한다.

2. 기공채움 모델과 전산모사

2.1. 기공채움 모델

일반적으로 액상소결체 내의 액상은 서로 연결되어 있으므로 시편 전체에 걸쳐서 동일한 액상압력이 유지되고 있다. 이때 액상의 압력은 Laplace식²¹에 따라 액상 meniscus의 반경에 반비례하여 증가한다. 액상 meniscus의 반경은 일정한 입자크기에서는 액상량이 증가할수록, 일정한 액상량에서는 입자의 크기가 클수록 증가한다.²² 즉 액상의 압력은 입자크기가 클수록 액상량이 많을수록 증가한다. 만약 액상의 압력이 위치에 따라 다른 경우 액상은 그 압력차이가 소멸되는 방향으로 움직이게 된다.

그림 1은 기공채움 현상을 모식적으로 보여주고

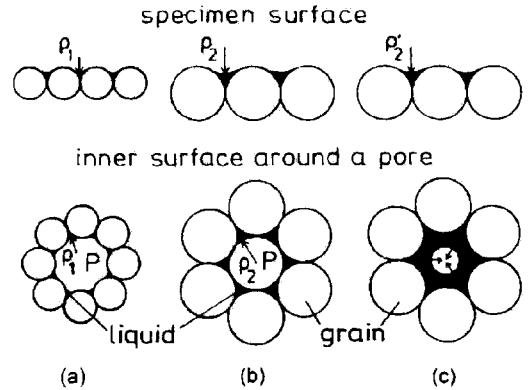


Fig. 1. Schematic showing the liquid filling of a pore during grain growth; (a) before pore filling, (b) critical moment of filling, and (c) liquid flow right after critical moment. No effect of gases entrapped in pore is assumed. P is the pore and (is the curvature radius of liquid meniscus).²³

있다.²³ 액상의 압력은 시편 전체에 걸쳐 균일하므로, 시편 외부와 기공내의 기체 압력이 동일하다면, 시편 표면과 기공 주위의 액상은 동일한 meniscus 반경을 가진다. 소결이 진행됨에 따라 입자성장이 일어나고 동시에 액상 meniscus의 반경 또한 비례하여 증가한다(그림 1(a)). 이때 시편 표면의 meniscus 반경은 입자성장이 일어남에 따라 항상 증가할 수 있는데 반하여 기공 주위의 meniscus 반경은 액상 meniscus들이 서로 맞닿는 조건 즉 액상이 기공의 표면을 완전히 적실 때까지만 가능하다(그림 1(b)). 일단 액상이 기공 표면을 완전히 적신 후에는 액상이 기하학적으로 젖음각을 만족하면서 meniscus의 반경이 증가하는 것이 불가능하다. 약간의 입자성장이 추가로 일어날 경우, 시편 표면의 액상 meniscus 반경은 증가하게 되나 기공의 주위에서는 그러하지 못하여 시편 표면에서의 액상의 압력이 기공 주위에서보다 높아지게 된다. 이러한 압력차이로 인해 액상은 시편 표면에서 기공 주위로 이동하게 된다(그림 1(c)). 액상이 기공 주위로 이동하게 됨에 따라 기공에서의 액상 meniscus 반경은 더욱 작아져 액상 압력차이가 더욱 커지고 액상의 이동은 더욱 촉진되어 기공은 액상으로 채워지게 된다. 액상량이 일정한 경우, 액상 meniscus의 반경은 입자크기에 비례하므로 채워지는 기공의 크기는 입자크기에 비례하게 될 것이다.¹⁸ 즉 기공이 액상으로 채워져 치밀화가 일어나기 위하여서는 입

자성장이 필수적으로 동반되어야 함을 알 수 있다.

소결체내에는 다양한 크기의 기공이 있다. 입자성장이 진행됨에 따라 액상 meniscus 반경은 증가하고 작은 크기의 기공이 먼저 액상으로 채워지게 된다. 액상으로 채워진 기공, 즉 액상 포켓의 액상은 시편 전체에서 볼 때 그 만큼의 액상을 고상-액상이 균일하게 분포된 시편으로부터 뽑아낸 것과 같다. 따라서 액상의 기공채움에 따라, 액상으로 채워진 기공을 제외한 나머지 부분의 액상량 즉 유효 액상량이 감소하게 된다.^{19,20)} 유효 액상량이 감소하게 되면 시편 전체에 미치는 모세관력이 증가하게 되므로 입자의 모양은 더 각진 형태로 변화되려는 구동력을 갖게 된다.²⁴⁾ 기공이 액상으로 채워지면 액상 포켓에 접해 있는 입자들이 포켓의 내부로 성장해 들어가면서 미세구조의 균질화가 진행된다.¹¹⁾ 균질화 과정에 의해 액상 포켓내에 존재하던 액상이 기공의 자리로부터 시편의 나머지 부분으로 되돌아옴으로 유효 액상량은 증가하게 된다. 이러한 유효 액상량의 변화는 액상소결의 상태를 상징적으로 보여주는 지표가 될 수 있다.^{19,20)} 유효 액상량의 감소가 크게 일어나는 경우는 기공채움 과정이 활발히 일어나 치밀화가 빠른 속도로 일어나는 시기이며, 입자는 점점 각진 형태로 바뀌어가고 있는 단계이다. 이에 비하여 유효 액상량의 회복이 주로 일어나는 경우에는 미세구조 균질화가 기공채움보다 활발히 일어나는 상태이고, 치밀화는 거의 중단되었으며 입자의 모양은 점차로 둥글어지는 단계에 있음을 의미한다.

2.2. 전산모사

액상 소결체 내의 기공은 크기 분포를 가진다. 본 연구에서는 기공의 모양을 구형으로, 기공크기 분포

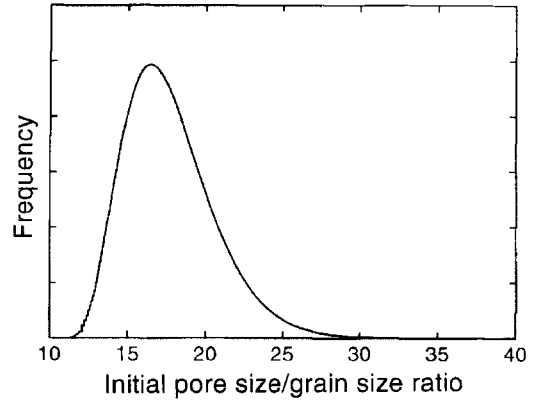


Fig. 2. Pore size distribution used in calculation for a given porosity.

는 실제 소결체의 분포와 유사한 lognormal 분포로 가정하였다. 그림 2는 전산 모사에 사용된 기공의 크기 분포를 보여주고 있다. 기공의 크기는 초기 입자크기의 10배에서부터 시작하여 초기 입자크기의 0.01배 단위로 증가하여 최대 40배까지이다. 젖음각이 0도인 경우, 액상이 기공내부를 완전히 적시어 액상에 의한 기공의 채움이 일어나는 조건은 액상 meniscus의 반경이 기공의 반경과 같을 때이다.¹⁸⁾ 따라서 기공채움 조건을 결정하기 위해서는 액상 meniscus의 반경을 결정하는 유효 액상량, 입자크기의 계산이 매우 중요하다. 유효 액상량과 입자크기가 주어지면 이전의 연구결과²²⁾로부터 액상 meniscus 반경의 계산이 가능하여지고 액상으로 채워지는 기공의 크기를 구할 수 있다.

그림 3은 유효 액상량의 계산에 사용된 모델을 보여주고 있다. 기공이 액상으로 채워지기 전에는 기공은 안정된 상태로 소결체내에 존재한다(그림 3(a)). 액상이 기공을 채워 액상 포켓을 형성하면 액상 포켓

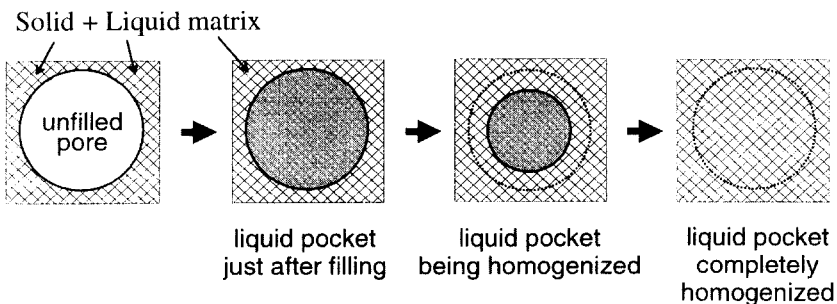


Fig. 3. Schematic showing pore filling and microstructure homogenization for a single pore.

주위의 액상-고상 부분은 기공을 채운 액상량만큼 유효 액상량이 감소하게 된다. 액상이 기공을 채운 직후부터 미세구조 균질화는 액상 포켓 주위의 입자들이 포켓의 중심으로 대칭적으로 성장해 들어가면서 일어나며 입자가 포켓의 중심부까지 성장해 들어가면 완결된다고 가정하였다. 이러한 미세구조 균질화 과정을 통하여 액상은 포켓으로부터 나머지 시편부분으로 돌아가게 되므로 미세구조 균질화에 의한 유효 액상량의 증가는 균질화된 부피와 동일하다고 볼 수 있다.

하나의 기공에 대하여 액상채움, 균질화를 그림 3과 같이 묘사할 수 있을 때, 실제 소결체내에 다양한 크기의 기공들은 그림 4와 같이 세 가지 종류로 나누어질 수 있다. 아주 작은 기공은 이미 액상으로 채워지고 미세구조 균질화가 완료되어 소결 초기의 기공이 있던 위치를 미세구조상에서 확인할 수 없다. 중간 크기의 기공은 액상으로 채워져 있고 미세구조 균질화가 진행되고 있는 중이어서 미세구조상에 존재하는 액상 포켓으로 초기의 위치를 알 수 있다. 큰 기공의 경우 액상으로 채워지지도 않았고 따라서 미세구조 균질화도 진행되지 않았으며 미세구조상에서 안정된 큰 기공으로 남아있다. 이러한 경우 소결의 진행에 따른 상대 밀도는 아래와 같은 식으로 구할 수 있다.

$$\rho = 1 - \frac{\sum_{j=m+1}^n V_p^j}{V_s^i + V_l^i + \sum_{j=m+1}^n V_p^j} \quad (1)$$

여기서, V_s^i 는 초기 고상의 부피, V_l^i 는 초기 액상의 부피, V_p^j 는 $j \leq m$ 인 경우 채워진 기공의 부피, $j > m$ 인 경우 채워지지 않은 기공의 부피를 나타낸다.

액상에 의한 기공채움, 미세구조 균질화를 전산모사하기 위하여 액상량에 따른 입자성장을 계산하여야 한다. 일반적으로 입자 성장은

$$G^n - G_0^n = Kt \quad (2)$$

의 성장 방정식으로 표현되며, 입자가 확산지배에 의하여 성장하는 경우 $n=3$ 이다.^{25,26)} 여기서, G 는 시간 $t=t$ 일 때의 입자크기, G_0 는 초기 입자크기, K 는 입자 성장 속도상수를 나타낸다. 확산지배 입자성장의 경우, 반응상수 K 는 액상량에 따라 달라지며, 여러 연구자들에 의하여 이론적, 실험적으로 연구되어 왔다.²⁷⁾ 본 전산모사는 초기 입자크기 G_0 를 $1 \mu\text{m}$ 로 가정하였고 K 의 값은 아래와 같이 Co-Cu 계의 실험식²⁷⁾을 따른다고 가정하였다.

$$K = K_0 \left(\frac{0.05}{f_i^{\text{eff}}} \right)^{0.8} \quad (3)$$

여기서, K_0 는 기준 액상량인 5%에서의 입자성장 속도 상수이다.

3. 결과 및 토론

액상소결의 기공채움 이론에서 기공이 액상으로 채워져 치밀화가 이루어지려면, 필수적으로 입자성장이 일어나야 하므로 입자성장 속도가 치밀화 속도를 결정한다. 그림 5(a)는 액상량을 5%, 기공율을 10%로 일정하고 입자성장의 속도상수 K_0 가 0.2, 0.5, $1 \times 10^{-19} \text{ m}^3/\text{s}$ 로 변화할 때 시간에 따른 밀도의 변화를 보여주고 있다. 입자성장 속도상수가 증가함에 따

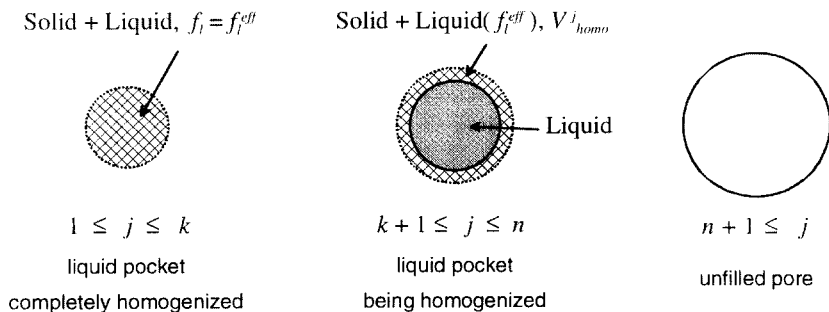


Fig. 4. Schematic of three types of pores present during densification of liquid-phase sintering. (a) small pores already filled with liquid and completely homogenized, (b) medium pores already filled with liquid and partially homogenized in the outer shell of the former pore, and (c) large pores not yet filled with liquid.²⁰⁾

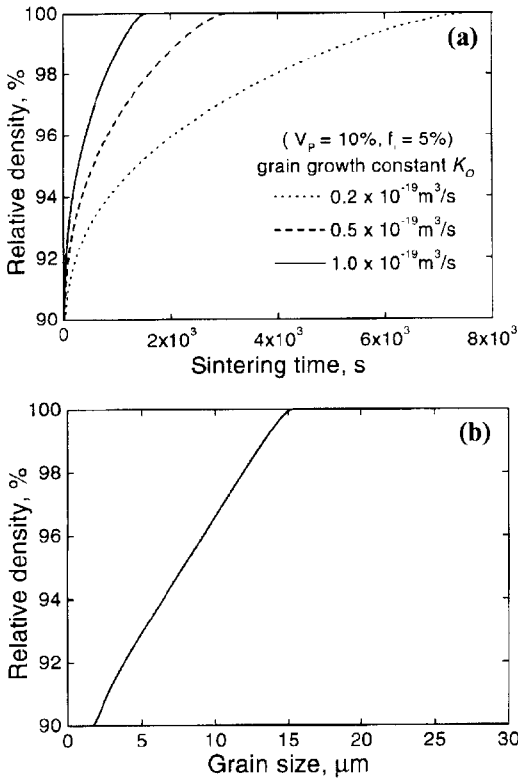


Fig. 5. Calculated curves of relative density (a) with sintering time and (b) with grain size for different grain growth constants K_g , for compacts with liquid volume fraction of 5% and pore volume fraction of 10%.

라 치밀화 속도가 빨라짐을 볼 수 있다. 그러나 각각의 치밀화 곡선을 입자크기에 따른 밀도의 변화로 나타내면 그림 5(b)와 같이 입자성장 속도 상수와 무관하게 하나의 곡선으로 중첩되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 주어진 액상량에서 기공채움과 미세구조 균질화가 전적으로 입자성장에 의하여 결정되기 때문이며, 다른 모든 소결 변수가 동일하고 입자성장 속도만이 차이가 날 경우, 동일한 입자크기를 가지는 항상 소결 밀도와 미세구조는 동일하다는 것을 의미한다. 따라서 특정한 소결 밀도에 도달하는 시간은 그 소결 밀도에 상응하는 입자크기에 도달하는 시간이며 입자성장속도상수 K_g 에 정확히 반비례하게 된다.

동일한 액상량에서 기공율이 다를 때 입자크기와 밀도의 변화를 계산하였다. 그림 6은 액상량이 5%로 동일하고 기공율이 5, 10, 15%로 다를 때 입자크기-밀도 곡선의 변화를 보여준다. 초기 출발 기공율이

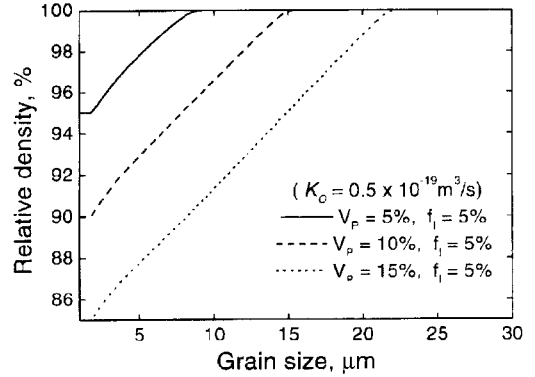


Fig. 6. Calculated relative density vs. average grain size curves for compacts with liquid volume fraction of 5% and various pore volume fractions.

다를 지라도 곡선의 기울기는 대체적으로 일정한 것을 보여준다. 소결 초기에는 기공율이 높을수록 동일한 입자성장에 대하여 액상으로 채워지는 기공의 부피가 커서 입자성장에 따른 치밀화가 촉진될 수 있다. 그러나 유효 액상량 또한 크게 감소하므로 이후의 입자성장에 의한 치밀화는 크게 억제된다. 이 두 가지 상반된 효과로 인하여 입자크기-밀도 곡선의 기울기는 거의 일정한 값을 유지하게 된다.

그림 7은 기공율과 액상량이 동일하고 기공의 분포는 유사하나 기공의 평균크기가 17.7 μm 와 35.4 μm 로 다른 경우 입자크기에 대한 밀도의 변화를 보여주고 있다. 소결곡선의 기울기는 평균 기공크기에 반비례하여 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 동일한 소결 밀도를 얻기 위하여 채워져야 할 기공의 크기가

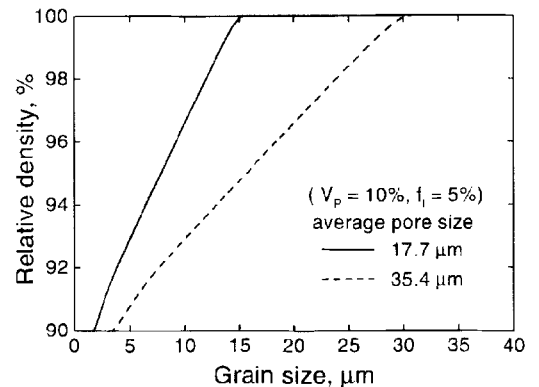


Fig. 7. Calculated relative density vs. average grain size curves for compacts with different average pore sizes, 17.7 and 35.4 μm .

두 배이면 기공채움에 필요한 입자크기도 두 배로 되어야 하기 때문이다. 이러한 결과는 액상소결의 비례법칙과 매우 유사하다.^{19,20} 비례법칙은 입자와 기공을 포함한 미세구조가 닮음 꼴이고 크기만이 다른 두 계가 동일한 밀도에 도달하는 시간이 얼마나 다른지를 나타낸다. 액상소결에서는 치밀화가 입자성장에 의존하기 때문에, 비례법칙의 지수는 입자성장식의 지수와 일치한다. 예를 들어 입자성장이 확산제어로 일어나는 경우 초기 입자와 기공의 크기가 두 배일 때 동일한 밀도에 도달하기 위하여 소요되는 시간은 23배로 늘어난다. 비례법칙과 달리 초기 입자크기는 동일하고 기공의 크기만 두 배 큰 경우에도 동일한 밀도에 도달하는 시간은 초기 입자성장속도가 빠른 이유로 해서 비례법칙과 거의 동일한 값을 가진다.

그림 8은 초기 액상량의 변화에 따른 입자크기-밀도 곡선의 변화를 보여주고 있다. 액상량이 증가할수록 동일한 크기의 기공을 액상으로 채우는데 필요한 입자크기는 감소하므로 입자성장이 많이 일어나지 않아도 치밀화가 가능하게 된다. 따라서 액상량이 증가할수록 입자크기-밀도 곡선의 기울기가 증가한다. 이는 액상량이 증가할수록 치밀화가 용이하게 이루어지며, 최종 입자크기도 작다는 일반적인 액상소결의 경험과도 일치한다.

이러한 계산 결과로부터 액상소결의 활성화에너지의 물리적인 의미를 분석하여 볼 수 있다. 가장 간단한 경우로서, 온도에 따른 액상량의 변화가 없고 점음각, 이면각 등 기타 소결 변수의 변화가 무시될 수 있는 조건에서의 소결을 생각하여 보자. 소결 온도가

증가할수록 입자성장도 빨라지고 그림 5(a)와 같이 시간에 따른 치밀화율도 빨라질 것이다. 그러나 이를 입자 크기에 따른 밀도변화로 나타낼 경우, 소결 온도에 무관하게 동일한 곡선을 얻을 수 있다. 즉 온도에 따라 빨라진 입자성장과는 무관하게 미세구조는 동일한 입자크기에서는 동일하고, 동일한 미세구조에 도달하는 시간이 온도가 증가함에 따라 입자성장속도상수 K_0 에 반비례하여 짧아질 뿐이다. 이러한 결과로부터 이전의 여러 연구자들이 연구한 액상소결의 활성화에너지(치밀화의 활성화에너지)는 실제로는 입자성장의 활성화 에너지와 동일한 값을 가졌을 것으로 판단된다. 만약 온도에 따라 액상량이 변화한다면, 액상량 변화에 따른 치밀화율의 차이가 액상소결의 활성화 에너지에 상당 부분 기여할 것이다.

소결 온도로의 승은 속도 또한 미세구조의 발달에 영향을 줄 수 있다. 그림 8에서 보여주듯이 치밀화율은 액상량이 증가할수록 증가한다. 액상량이 소결 온도가 높아짐에 따라 증가하는 경우, 승은 속도가 빨라 소결체가 낮은 온도에서 머무는 시간이 짧아질수록 완전히 치밀화 되었을 때의 입자크기는 작게 될 것이다. 예를 들어 초기 기공율이 10%일 때, 액상이 형성되는 바로 위 온도에서의 액상량이 3%이고, 소결 온도에서의 액상량이 5%인 경우를 생각할 수 있다. 소결 온도로의 승은 속도가 매우 빠른 경우에는 치밀화가 시작되는 초기부터 액상량이 5%인 것으로 생각할 수 있으나, 승은 속도가 느린 경우에는 승은 과정중에 액상량은 3%에서 5%로 점진적으로 변화하게 된다. K_0 가 $0.5 \times 10^{-19} \text{ m}^3/\text{s}$ 일 때 소결 온도로의 승은 속도가 매우 빠른 경우, 승은에 소요되는 시간이 30분이 걸리는 경우와 비교하여 완전히 치밀화 되었을 때의 입자 크기가 약 17% 작다. 이러한 이유는 승은 속도가 빨라 액상량이 처음부터 많은 경우, 기공 채움과 액상 포켓의 균질화가 빨리 시작되고, 유효 액상량의 회복 또한 빨라 작은 입자크기에서도 이후의 치밀화가 가능하기 때문이다.

액상소결체의 미세구조의 발달은 다양한 소결 변수에 따라 치밀화와 입자성장의 연관성을 규명하는 데서 출발하여야 한다. 기공채움 이론은 지금까지의 입자 편평화 모델과는 달리 소결 변수에 따른 액상소결체의 미세구조 발달을 성공적으로 예측할 수 있음을 보여 주었다. 즉 소결 조건의 변화에 따라 액상이 특정 크기의 기공을 채우는데 필요한 입자 크기를 분석함으로써 미세구조 발달도에서 입자크기-밀도 곡

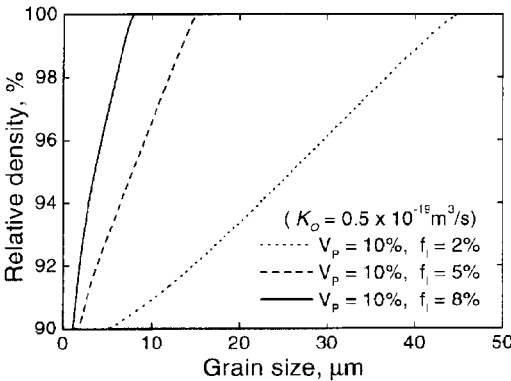


Fig. 8. Calculated relative density vs. average grain size curves for compacts with pore volume fraction of 10% and various liquid volume fractions.

선의 궤적을 예측할 수 있다. 또한 미세구조의 발달 과정을 소결 시간에 따라 분석하기 보다는 입자크기의 변화에 초점을 맞추어 치밀화 과정을 분석하는 것이 보다 타당함을 보여주고 있다. 이러한 분석과정은 소결 온도, 기공 크기, 액상량 이외의 다양한 소결 변수가 미세구조 발달에 미치는 영향을 연구하는데도 동일하게 적용되며, 최적의 미세구조를 얻는데 필요한 기초 지식을 제공하여 준다.

4. 결 론

소결체의 미세구조는 평균 입자크기와 소결 밀도로서 표현될 수 있으므로, 소결 중 미세구조의 발달은 입자크기-밀도 곡선의 변화로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 다양한 소결 변수의 변화에 따라 입자크기-밀도 곡선이 변화하는 양상을 기공 채움 이론을 바탕으로 전산모사하고 그 의미를 분석하였다. 액상량, 초기 기공율 등 기타의 소결 변수가 동일할 때 입자성장속도가 빨라짐에 따라 시간에 따른 치밀화 속도는 증가하였다. 그러나 입자크기에 따라 소결 밀도를 표시한 경우, 입자성장속도에 관계없이 하나의 입자크기-밀도 곡선으로 중첩되어 나타났다. 이는 시간에 따른 치밀화율은 다를지라도 입자크기가 동일하면 소결 밀도 또한 동일함을 의미한다. 입자크기-밀도 곡선의 기울기는 초기 기공율에 무관하게 거의 일정하였으나 평균기공크기에는 반비례하여 증가하였고 액상량이 증가할수록 크게 증가하였다. 한편 액상량이 온도에 무관하게 일정하고 입자성장 속도만이 빨라질 경우 액상소결의 활성화에너지는 입자성장의 활성화에너지와 동일한 값을 가지는 것으로 예측되었다. 이러한 미세구조예측과 분석은 기공채움이 일어나 치밀화가 이루어지는 입자크기가 소결 변수에 따라 어떻게 영향을 받느냐에 전적으로 의존하며, 미세구조의 발달을 이해하기 위해서는 입자크기를 주 인자로 하여 밀도의 변화를 분석하여야 함을 의미한다.

본 논문을 문인형 교수님의 회갑을 기념하여
봉정합니다.

참 고 문 헌

1. R. L. Coble: J. Appl. Phys., **32** (1961) 789.
2. R. J. Brook: J. Am. Ceram. Soc., **52** (1969) 56.
3. M. F. Yan: Mater. Sci. Eng., **48** (1981) 53.
4. R. J. Brook: Proc. Brit. Ceram. Soc., **32** (1982) 7.
5. M. P. Harmer: *Structure and Properties of MgO and Al₂O₃ Ceramics*, W. D. Kingery (Ed.), Am. Ceram. Soc. Inc., (1985) 679.
6. C. A. Handwerker, R. M. Cannon and R. L. Coble: *Structure and Properties of MgO and Al₂O₃ Ceramics*, W. D. Kingery (Ed.), Am. Ceram. Soc. Inc., (1985) 619.
7. W. D. Kingery: J. Appl. Phys., **30** (1959) 301.
8. S.-J. L. Kang, W. A. Kaysser, G. Petzow and D. N. Yoon: Acta Metall., **33** (1985) 1919.
9. D.-D. Lee, S.-J. L. Kang and D. N. Yoon: Scripta Metall., **24** (1990) 927.
10. W. A. Kaysser, M. Zivkovic and G. Petzow: J. Mater. Sci., **20** (1985) 578.
11. S.-J. L. Kang, W. A. Kaysser, G. Petzow, and D. N. Yoon: Powder Metall., **27** (1984) 97.
12. J.-K. Park, S.-J. L. Kang, K. Y. Eun and D. N. Yoon: Metall. Trans. A, **20** (1989) 837.
13. O.-J. Kwon and D. N. Yoon: *Sintering Process*, G. C. Kuczynski (Ed.), Proc. 5th Int. Conf. in Sintering and Related Phenomena, June 1979, Notre Dame, Plenum Press, New York (1980) 203.
14. O.-J. Kwon and D. N. Yoon: Int. J. Powder Metall. Powder Tech., **17** (1981) 127.
15. H.-H. Park, S.-J. Cho and D. N. Yoon: Metall. Trans. A, **15** (1984) 1075.
16. S.-J. L. Kang and P. Azou: Powder Metall., **28** (1985) 90.
17. S.-J. Cho, S.-J. L. Kang and D. N. Yoon: Metall. Trans. A, **17** (1986) 2175.
18. H.-H. Park, O.-J. Kwon and D. N. Yoon: Metall. Trans. A, **17** (1986) 1915.
19. S.-J. L. Kang, K.-H. Kim and S.-M. Lee: *Sintering Technology*, R. M. German, G. L. Messing and R. G. Cornwall (Eds.), Marcel Dekker, Inc. (1996) 221.
20. S.-M. Lee and S.-J. L. Kang: Acta. Mater., **46** (1998) 3191.
21. C. H. P. Lupis: *Chemical Thermodynamics of Materials*, Elsevier Science Publishing Co., Inc., New York (1983) 353.
22. H.-H. Park, S.-J. L. Kang and D. N. Yoon: Metall. Trans. A, **17** (1986) 325.
23. S.-J. L. Kang, P. Greil, M. Mitomo and J.-H. Moon: J. Am. Ceram. Soc., **72** (1989) 1166.
24. S.-J. L. Kang, K.-H. Kim and D. N. Yoon: J. Am. Ceram. Soc., **74** (1991) 425.
25. I. M. Lifshitz and V. V. Slyozov: Phys. Chem. Solids, **19** (1961) 35.
26. C. Wagner: Z. Elektrochem, **65** (1961) 581.
27. S. S. Kang and D. N. Yoon: Metall. Trans. A, **13** (1982) 1405.