

전기마당가압소결시편의 내부온도변화에 주는 형타의 영향

장재식, 박현철, 최유일

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《새 재료부문의 과학자, 기술자들은 전자공업에 절실히 필요한 화합물반도체와 정밀사기재료를 개발하고 그 생산을 공업화하기 위한 연구사업을 다그치며 초전도재료와 금속수지복합재료를 비롯한 새 재료들과 우리 나라에 없는것을 대신할수 있는 재료를 개발하기 위한 연구사업도 전망성있게 밀고나가야 합니다.》(《김정일선집》 증보판 제15권 487페이지)

고속바이트, 연마석 등을 비롯한 각종 초경질특수공구재료들은 보통 초경질립자와 결합제, 충전제로 이루어진 복합재료형식의 소결과정을 통하여 제조된다.[4] 소결과정에 립자 성장을 억제하고 치밀한 구조를 가진 재료를 제조하기 위하여 초고압소결, 자체전과고온소결, 마이크로파소결, 플라즈마방전소결 등 여러가지 새로운 소결방법들이 개발되고있다.

전기마당가압소결(electric field assisted sintering)은 시료를 통하여 흐르는 전류에 의하여 직접 시료가 가열되는 소결방법이다. 전기마당가압소결은 열간정수압소결이나 전통적인 가압소결과 달리 가열속도가 매우 빠르기때문에 새로운 높은 성능을 가진 나노복합재료를 제조할수 있다. 소결과정에 소결온도가 재료의 미세구조와 성능에 결정적영향을 주기때문에 소결시편의 온도분포특성을 해석하는것이 중요하다. 전기마당가압소결을 해석하기 위한 여러가지 모형[1]들이 제기되었지만 소결시편내부온도분포에 미치는 형타들의 영향을 밝히지 못하였다.

본문에서는 열-전기과정을 다같이 고려한 소결모형을 제기하고 ABAQUS프로그램을 리용하여 소결시편내부온도의 분포와 그것에 미치는 형타의 영향을 밝혔다.

1. 소결모형과 치밀화

소결과정에 시편의 온도는 열평형방정식에 의하여 결정된다.

$$\int_V \rho C_p \frac{\partial \theta}{\partial t} dV = \int_V \dot{q}_e dV + \int_S (\dot{q}_c + \dot{q}_{대류} + \dot{q}_r + \dot{q}_{ec}) dS \quad (1)$$

여기서 V 는 면적 S 로 둘러싸인 임의의 체적, ρ , C_p , θ 는 각각 밀도, 비열, 온도이다.

체적열은 저항가열에 의해 발생하며 결면열흐름은 열전도, 대류에 의한 열흐름, 복사에 의한 열흐름, 경계면가열효과들로 이루어진다.

저항가열에 의하여 발생하는 단위체적당 열량은

$$q_e = (-\nabla \varphi) \sigma (-\nabla \varphi) = (\nabla \varphi) \sigma (\nabla \varphi) \quad (2)$$

이다. 여기서 σ 는 전기전도도, φ 는 전기포텐셜이다.

열전도에 의한 열흐름은

$$q_c = k_g(\theta_1 - \theta_2) \quad (3)$$

이다. 여기서 k_g 는 접촉공간에서의 열전도도, θ_1 은 한쪽 면의 결면온도, θ_2 는 접촉한 반대쪽 면의 온도이다.

복사에 의한 열흐름은

$$q_r = \sigma_s \varepsilon (\theta_1^4 - \theta_2^4) \quad (4)$$

이다. 여기서 σ_s 는 스테판-볼츠만상수, ε 은 복사능, θ_1 은 복사결면의 온도, θ_2 는 공극에서 복사하는 경우에는 흡수결면의 온도, 공간분위기에서 복사하는 경우에는 분위기의 온도이다.

대류에 의한 열흐름은

$$q_{\text{대류}} = h(\theta_s - \theta_e). \quad (5)$$

여기서 h 는 대류계수, θ_s 는 결면온도, θ_e 는 분위기온도이다.

접촉저항에 의하여 경계면에서 발생하는 열량은

$$q_{ec} = J(\varphi_1 - \varphi_2) = \sigma_g(\varphi_1 - \varphi_2)^2. \quad (6)$$

여기서 J 는 경계면에서 흐르는 전류밀도, φ_1 은 한쪽 결면의 전기포텐셜, φ_2 는 다른쪽 결면의 전기포텐셜, σ_g 는 접촉공간의 전기전도도이다.

모형은 유한요소해석프로그램 ABAQUS 6.5에서 설정되고 해석되었다.

전기마당가압소결을 위한 장치구성도는 그림 1과 같다.

그림 1에서 보는바와 같이 직류는 흑연누름봉을 거쳐 고리모양형타와 분말성형체로 흐른다. 따라서 전원이 공급되면 누름봉과 형타, 성형체에서 다같이 저항열이 발생한다.

모형에서 제기한 부분품들의 종류와 기하학적크기는 표 1과 같다.

표 1. 소결계의 구성부분품들의 기하학적크기

요소	직경/mm	높이/mm
흑연누름봉	20	25
흑연고리(외경)	45	40
경질합금성형체	20	20

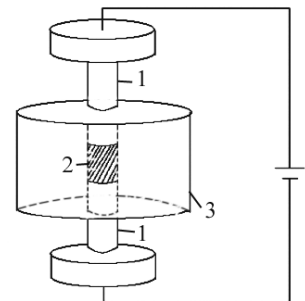


그림 1. 전기마당가압소결 장치의 구성도

1-흑연누름봉, 2-분말성형체, 3-흑연고리

모의실험에서 리용된 재료의 열전도도와 비전기전도도는 표 2와 같다.

표 2. 방온도에서의 열전도도와 비전기전도도

재료	열전도도/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	비전기전도도/($\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
WC	162	$1.93 \cdot 10^7$
누름봉	119	$7.29 \cdot 10^4$
흑연고리	60	$5.38 \cdot 10^4$

소결과정에 소결체의 열전도도와 전기전도도는 소결체의 상대밀도 ρ 에 따라서 다음과 같이 변한다.[1]

$$\frac{k_{\text{유}}}{k_s} = \exp(7\rho - 7), \quad \frac{\sigma_{\text{유}}}{\sigma_s} = \exp(7\rho - 7) \quad (7)$$

여기서 ρ 는 상대밀도, $k_{\text{유}}$, k_s , $\sigma_{\text{유}}$, σ_s 는 각각 재료의 유효열전도도, 열전도도, 유효전기전도도, 전기전도도이다.

소결온도에 따르는 상대밀도의 변화는 실험자료로부터 이끌어낼수 있다.[2]

$$\rho(T) = 0.5356 + \frac{0.4244}{1 + \exp\left(\frac{1017 - T}{66}\right)} \quad (8)$$

유한요소해석프로그램 ABAQUS 6.5에서는 축대칭 열-전기유한요소 DCAX4E를 리용하였으며 소비전력은 전류값이 10A/s의 속도로 계단식으로 증가하여 120s후에는 1200A까지 오르도록 설계하였다.

가열시간에 따르는 시편결면의 온도와 상대밀도변화는 그림 2와 같다.

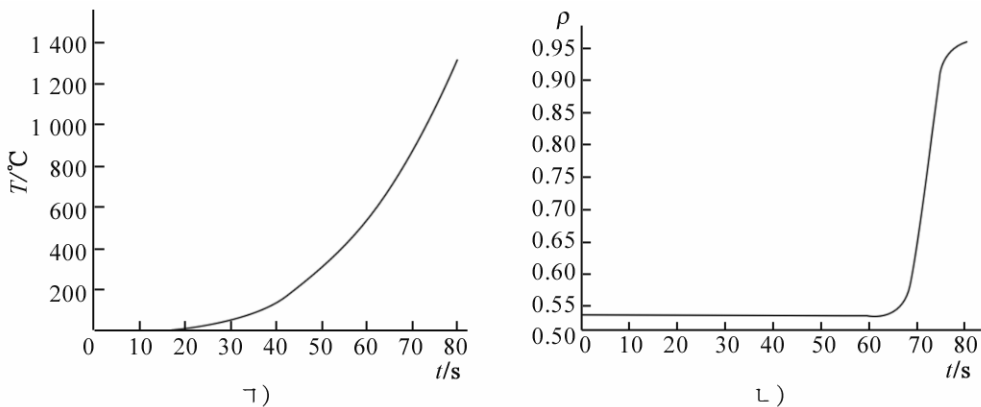


그림 2. 가열시간에 따르는 시편결면의 온도(가)와 상대밀도(나)변화

그림 2에서 보는바와 같이 소결체는 80s동안에 1300°C의 온도에 도달하며 이것은 선행연구[3]의 결과와 일치한다. 이때 상대밀도는 0.95로서 치밀해진다.

따라서 전기마당가압소결방법으로는 소결시간을 단축하면서도 치밀한 구조를 가진 재료를 제작할수 있다는것을 보여준다.

2. 소결형라크기에 따르는 온도분포와 입구전력의 변화

소결장치의 구성부분들인 흑연누름봉과 고리모양형타의 크기변화는 장치의 모든 위치들에서 전류밀도의 변화를 가져오며 이것은 시편내부에서의 온도분포에 영향을 준다. 또한 소결온도에 도달하기 위한 소비전력의 값에도 영향을 준다.

소결형타제작에서 가장 중요한것은 소결시편내부에서 온도차이를 최대한으로 줄이면서도 필요한 온도에 도달하기 위한 소비전력의 값을 최소로 하는것이다.

모의실험에서는 누름봉의 길이와 고리모양형타의 외경, 높이가 각이한 경우에 시편내부중심의 온도가 1300°C에 도달하는 순간의 시편결면과 시편중심에서의 온도차와 소비전력을 구하였다.

각이한 크기의 형타에서 시편겉면과 시편중심에서의 온도차와 소비전력값을 표 3에 주었다.

표 3에서 보는바와 같이 흑연누름봉의 길이가 커질수록 시편중심과 겉면사이의 온도차이가 커진다. 또한 고리모양형타의 높이와 외경이 커짐에 따라 시편중심과 겉면사이의 온도차도 커진다. 특히 소결시편내부온도분포에 주는 누름봉길이의 영향이 가장 크다.

이 모의실험결과에 기초하여 시편 내부에서의 온도차와 전력소모가 작은 최량형타값을 결정할수 있다.

표 3. 각이한 크기의 형타에서 시편겉면과 시편중심에서의 온도차와 소비전력값

형타의 높이 /mm	누름봉의 길이/mm	형타외경 /mm	온도차 /°C	소비전력 /kW
30	25	45	80	11.4
40	25	45	130	7.3
50	25	45	150	6.3
40	15	45	100	6.8
40	25	45	130	7.3
40	35	45	170	7.6
40	25	35	100	6.2
40	25	40	110	6.4
40	25	45	130	7.3

맺 는 말

전기마당가압소결방법으로 경질합금(WC-Co)을 제조할 때 소결체내부의 온도분포와 그것에 미치는 고리모양형타와 누름봉크기의 영향을 소결모형에 기초하여 해석하고 최량형타의 크기를 결정할수 있는 해석모형을 제기하였다.

참 고 문 헌

- [1] X. Wang et al.; Acta Mater., **55**, 10, 3611, 2007.
- [2] D. B. Gillia; Mat. Sci. Eng., **A 279**, 185, 2000.
- [3] H. C. Kim et al.; Int. J. Refractory Met. and Hard Mat., **24**, 202, 2006.
- [4] X. Hui; Diamond and Abrasives Engineering, **32**, 1, 187, 2012.

주제 105(2016)년 10월 5일 원고접수

Influence of Die on Internal Temperature Change of Electric Field Assisted Sintering Material

Jang Jae Sik, Pak Hyon Chol and Choe Yu Il

On the basis of sintering model, we analyzed the distribution of internal temperature of electric field assisted sintering material and the influences of changes of die and punch dimension on it.

Key words: electric field assisted sintering, sintering model, temperature distribution