

TiB₂의 SHS 및 직접 접촉가열에 의한 동시 가압법: 온도분포 모델링 및 공급에너지와 치밀화 관계

정진근 · 조 건 · 이형복*

한국과학기술원 재료공학과

*명지대학교 무기재료공학과

(1995년 5월 2일 접수)

Simultaneous Consolidation of Titanium Diboride with Self-Propagating High-Temperature Synthesis, Direct Contact-Heating, and Pressure: Modeling of Temperature Distribution and the Relationship between Applied Energy and Densification

G. K. Chung, K. Cho and H. B. Lee*

Korea Advanced Institute of Science and Technology

*Myung-Ji University

(Received May 2, 1995)

요 약

TiB₂를 통전에 의해서 접화시키는 방법으로 SHS 반응에 의한 합성을 하면서 동시에 압력을 가하는 상태에서 전기적인 접촉가열에 의해 열에너지를 계속 공급하면서 치밀화하는 실험을 하였다. SHS와 접촉가열에 의한 동시가압으로 합성된 TiB₂는 최대 80% TD까지의 밀도를 얻을 수 있었다. 이때 열평형 방정식을 이용하여 수치해석적인 방법으로 시간에 따른 시편의 온도의 변화를 예측하였으며, 치밀화에 필요한 충분한 고온에 도달하였음을 알았다. SHS 법에 의하여 TiB₂를 반응합성과 동시에 추가적으로 지속적인 전기에너지를 공급하고 압력을 가하면서 치밀화하는 실험결과, 공급해 준 에너지와 상대밀도 사이에는 지수함수적인 관계가 있음을 알았다. 따라서 더 높은 밀도를 얻기 위해서는 많은 에너지를 공급해야 할 것이다.

ABSTRACT

TiB₂ was simultaneously synthesized and densified with concurrent self-propagating high-temperature synthesis and direct contact-heating by electrical power input and pressure. Density of TiB₂ synthesized by self-propagating high-temperature synthesis and consolidated simultaneously by direct contact-heating and pressure was maximum 80% of the theoretical density (4.52 g/cm³). Temperature profile was analyzed by solving heat balance equation with numerical method (FTCS method). The temperature of the sample was sufficiently raised to that temperature sufficient to be densified. It was ascertained that the density of the SHS synthesized TiB₂ is exponentially proportional to the input thermal energy per mass.

Key words: TiB₂, SHS, Consolidation, Temperature

1. 서 론

TiB₂는 융점이 2980°C로 매우 높고 기존에 널리 쓰이고 있는 WC-Co 계의 절삭공구보다 내마모성이 우수하기 때문에 새로운 절삭공구로서 그 응용이 기대되고 있다. 또한 높은 전기전도도와 내화학성으로 인하여 알루미늄 정련용 전극으로 이용되고 있는 재료이다¹⁾.

그러나 이러한 응용이 가능하기 위해서는 치밀한 소결체를 제조하는 것이 필수적인 문제로 대두되어 치밀한 소결체를 얻기 위한 연구가 1950년대부터 시작되었으나, TiB₂ 자체의 소결성이 매우 불량하여 치밀한 소결체를 얻을 수 없었으며²⁾, 최근에 발표된 문헌에서도³⁾ self-propagating high-temperature synthesis(SHS) 공정에서 동시가압에 의한 실험 결과 순수한 TiB₂의 경우에 치밀화의

정도는 50~60% TD이었다.

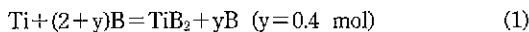
SHS 반응 시에는 불순물 가스가 발생하게 되는데 이러한 불순물 가스가 빠져 나가면서 pore-channel 들이 생성물 내부에 생겨서 porous 한 반응물이 생기게 된다⁴⁾. 이러한 SHS 반응 생성물의 난소결성을 해결하기 위해 고온가압로를 이용한 소결, 첨가제를 이용한 상압소결 등의 연구가 진행되고 있다.

TiB₂ 등의 SHS 반응시에는 매우 많은 양의 열량이 방출되어 순간적으로 고온으로 상승하는데 이점을 이용하여 반응과 동시에 고온인 상태에서 폭발력 등의 고압을 이용하여 반응물을 치밀화시키는 연구가 진행된 바 있다⁵⁾. 그러나 이러한 동시가압에 있어서는 순간적으로 고압이 가해지기 때문에 crack 등이 생기는 것을 방지하기가 매우 어렵고 치밀한 반응물을 얻는 동안 고온을 유지할 수 있는 열적 절연장치를 만들기 힘들다는 어려움이 있다⁶⁾.

본 실험에서는 위의 여러 가지 난점들을 극복하기 위하여 반응과 동시에 치밀화를 시키는 방법으로서 통전에 의한 점화에 의해 반응이 일어난 이후에도 전기 에너지를 공급하여 시편을 비교적 직접 가열함으로(접촉가열) 고온가압로를 사용하지 않으면서 동시가압을 행하였으며 이론적으로 열평형방정식으로부터 시간에 따른 시편의 온도를 예측함과 동시에 가해 준 열에너지가 치밀화 정도에 미치는 영향을 조사해 보고자 하였다.

2. 실험

본 실험에서 사용한 분말은 titanium(Ti, -325 mesh ; -44 μm, Cerac Co.)과 결정질 boron(B, -325 mesh ; -44 μm, Aldrich Co.)으로서 Ti는 순도가 99.5%인 고순도 분말이었으며, 결정질 B은 92.5%로 순도가 비교적 낮은 것이었다. 각 분말은 다음에 가정된 반응식에 필요한 정량비로 칭량하였다.



실제의 화학정량비로 반응을 하였을 경우에는 B의 불포화된 melt의 존재로 TiB와 같은 제 2의 상이 나타나므로 과량의 B를 혼합한 원료를 반응시켰다⁶⁾. 칭량된 분말은 mortar에서 약 30분간 전식 혼합하였으며, 혼합된 분말 4g을 지름 35mm의 cylindrical shape의 mold에서 약 15000 psi 정도의 압력으로 성형하였다. 성형된 반응물은 graphite mold 내에서 통전에 의해서 점화시키고 실험이 종료될 때까지 연속적으로 전기에너지를 가하여 반응물이 접촉가열됨으로서 고온을 유지할 수 있도록

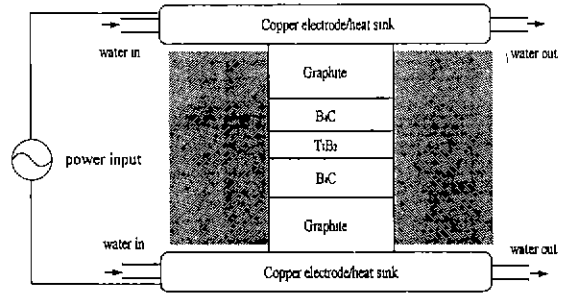


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

하였으며, 반응이 완료된 직후부터 press로 1000~3000 psi의 uniaxial static pressure를 가하여 치밀화가 진행될 수 있도록 하였다.

본 실험에 사용된 동시반응 및 치밀화 장치는 Fig. 1과 같다. 고온을 유지할 수 있도록 반응 용기 내부를 alumina paste로 단열하였는데 alumina paste는 단열의 목적 외에 전기 절연의 목적으로도 사용되었다.

반응 및 치밀화된 시편은 Si를 표준 물질로 하여 XRD를 이용하여 상분석을 하였으며, 2시간 이상 물 속에서 끓이고 12시간 이상 물 속에 유지시킨 후 Archimedes 법을 이용하여 밀도를 측정하였다(ASTM C20-87).

시편의 치밀화 정도는 가한 압력과 SHS에 의한 열량, 전기적 에너지의 공급량 등으로부터 분석하였다.

3. 이론 및 수치해석

3.1. 열평형 방정식을 이용한 시편의 이론 온도

Unsteady state에서의 energy balance equation은 Fig. 2와 같은 기하학적 형상을 기초로 각각의 zone에 대하여 다음과 같은 energy balance equation를 구하여 위치와 시간에 따른 온도함수 $T(z, t)$ 식을 구하였다. Mold의 내면($r=R$)을 단열재의 paste로 coating 하였으므로 그 내면은 단열 상태로 보고 heat flux의 방향은 z 축과 평행하다고 가정하였다. 또한 mold 내에서의 시편의 위치와 열이동의 symmetry로 인하여 cylindrical coordinate의 origin을 시편의 중심에 위치시키고 구성 재료에 따라 3개의 zone으로 나누는 것이다.

$$\text{zone 1: } \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} + \frac{q_1}{k_1} = \frac{1}{\alpha_1} \frac{\partial T_1}{\partial t} \quad (2)$$

$$\text{zone 2: } \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} + \frac{q_2}{k_2} = \frac{1}{\alpha_2} \frac{\partial T_2}{\partial t} \quad (3)$$

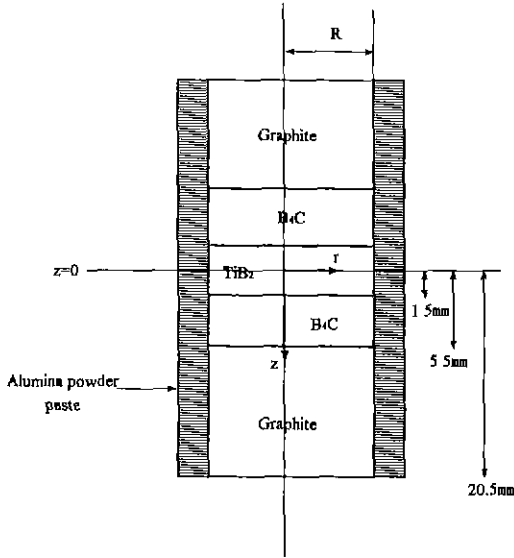


Fig. 2. Schematic diagram of heat balance model.

$$\text{zone 3: } \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha_3} \frac{\partial T_3}{\partial t} \quad (4)$$

T_i : Temperature of zone i as a function of z and t

z : z-coordinate in cylindrical coordinate

t : time

i : zone index (1, 2 or 3)

q_i : Heat generation at zone i

k_i : Thermal conductivity of zone i

k_i : Thermal diffusivity of zone i

α_i : Thermal diffusivity of zone i (-k/ρ c_p)

위 식에서 heat generation 항에 해당하는 q/k는 단위 부피·단위 시간에 증가되는 열량을 나타내는 것이다. 본 실험의 모델에 있어서 heat generation 항에는 ① SHS 반응에 의한 발열량, ② 전기에너지에 의한 주열, 그리고 ③ 가해 준 압력에 의하여 생성되는 열량이 포함된다. SHS 반응에 의한 발열량의 경우에는 SHS의 전파 속도가 빠르므로(1.49 cm/sec)²⁰ 실험이 진행되는 시간에 비하여 아주 짧은 시간 동안의 발열이기 때문에 ① SHS 반응에 의한 발열이 이루어지는 시간대와 ② SHS 반응이 끝나고 주열과 압력에 의한 열량만을 고려하는 시간대로 나누어 각 zone의 온도 분포를 식 (2), (3), (4)를 적용시켜 계산할 수 있다. 각 heat generation 항들은 다음 식에 의하여 구해진다.

Table 1. Specific Heat of TiB₂²¹

Temperature (K)	Specific Heat, c _p (cal/g·K)
300	0.1533
400	0.1698
600	0.2028
810	0.240
1088	0.260
1366	0.280
1644	0.305
1922	0.340
2199	0.362
2477	0.360
2755	0.360

$$\text{SHS에 의한 열: } \frac{1}{\tau_1} \int_{T_0}^{T_{ad}} c_{p(TiB_2)} dT \quad (5)$$

(τ₁는 SHS 반응시간)

$$\text{주열: } \frac{iV}{m} \quad (6)$$

$$\text{압력에 의한 열: } \frac{-\alpha \bar{V} T_p}{\tau_2} \quad (7)$$

τ₁ : SHS reaction time

T_{ad} : Adiabatic temperature

T₀ : Reference temperature

c_p : Heat capacity under constant pressure

i : Current

V : Voltage

m : Mass of sample

α : Thermal expansion coefficient of sample

p : Pressure

τ₂ : Time under pressure

\bar{V} : Mean value of volume

앞의 결과중 SHS에 의한 발열량은 온도에 따른 TiB₂의 정압비열의 변화(Table 1)²¹를 바탕으로 이론적인 단열온도까지 TiB₂를 상승시키는데 필요한 열량으로부터 계산할 수 있다. 그리고 실제 가한 에너지가 모두 열량으로 변화되어 시편에 흡수되지 않는 경우를 고려하여 각 heat generation 항목들에 대해서 efficiency factor ε_i를 곱하면 일반적인 heat generation 식을 얻을 수 있다.

각 zone에 대한 미분방정식의 일반해는 다음과 같다.

zone 1:

$$T_1(z, t) = -\frac{q_1}{2k_1} z^2 + c_1 z + c_2 + c_5 \exp(-\alpha_1 \lambda^2 t) (c_3 \cos \lambda z + c_4 \sin \lambda z) \quad (8)$$

zone 2:

$$T_2(z, t) = -\frac{q_2}{2k_2} z^2 + c_1' z + c_2' + c_5' \exp(-\alpha_1 \lambda'^2 t) (c_3' \cos \lambda' z + c_4' \sin \lambda' z) \quad (9)$$

zone 3:

$$T_3(z, t) = -c_5'' \exp(-\alpha_3 \lambda''^2 t) (c_3'' \cos \lambda'' z + c_4'' \sin \lambda'' z) \quad (10)$$

여기에서 $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, \lambda$ 는 상수항이며 위의 식을 풀기 위한 초기 조건 및 boundary condition 들은 다음과 같다.

$$T = \text{Room temperature } (t=0, 0 \leq r \leq R) \quad (11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (t \geq 0, z=0) \quad (12)$$

$$T_1 = RT \quad (t \geq 0, z=l) \quad (13)$$

$$T_1 = T_2, T_2 = T_3 \text{ at each boundary} \quad (14)$$

여기에서 l은 시편 중심($z=0$)에서 copper electrode (heat sink)까지의 거리이다.

식 (8)~(10)은 analytical 하계 해를 구하기가 용이치 않아 수치해석적인 방법이 온도함수 $T(z, t)$ 을 구하는데 사용되어야 할 것이다.

3.2. 수치해석법을 이용한 시편온도의 결정

수치해석에는 FTCS(The Forward Time/Central Space Method) 법⁸⁾을 사용하였으며 그 방법은 다음과 같다.

식 (2)~(4)의 미분방정식은 다음과 같은 방정식들로 표현할 수가 있다.

zone 1:

$$\frac{T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j}{(\Delta z)^2} + \frac{q_1}{k_1} = \frac{1}{\alpha_1} \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} \quad (15)$$

zone 2:

$$\frac{T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j}{(\Delta z)^2} + \frac{q_2}{k_2} = \frac{1}{\alpha_2} \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} \quad (16)$$

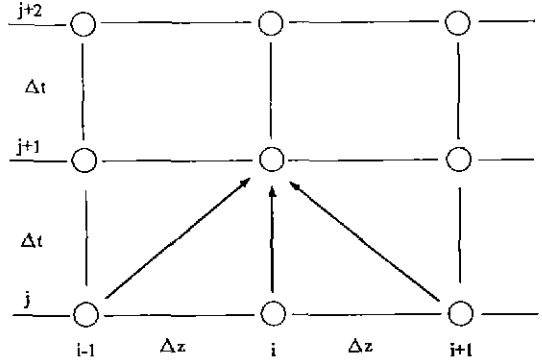


Fig. 3. Grid for the forward time/central space method.

zone 3:

$$\frac{T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j}{(\Delta z)^2} = \frac{1}{\alpha_1} \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} \quad (17)$$

식에서 온도항 T_i^j 에 대한 아래첨자(i)는 z 방향에서의 위치를 나타내고 위첨자(j)는 시간을 나타낸다. 윗 식으로부터 j 시간의 각 위치에 대한 온도($i-1, i, i+1$)를 알면 다음 식과 같이 (j+1) 시간의 온도를 알 수 있으므로 시간과 거리를 작은 간격(각각 $\Delta t, \Delta z$)으로 놓으면 $T(z, t)$ 의 값을 알 수가 있다. 즉,

zone 1:

$$T_i^{j+1} = \alpha_1 \Delta t \left(\frac{T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j}{(\Delta z)^2} + \frac{q_1}{k_1} \right) + T_i^j \quad (15-a)$$

zone 2:

$$T_i^{j+1} = \alpha_2 \Delta t \left(\frac{T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j}{(\Delta z)^2} + \frac{q_2}{k_2} \right) + T_i^j \quad (16-a)$$

zone 3:

$$T_i^{j+1} = \alpha_3 \Delta t \left(\frac{T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j}{(\Delta z)^2} \right) + T_i^j \quad (17-a)$$

Fig. 3과 같이 시간 j 때의 세 위치의 온도를 알면 시간 (j+1) 때의 한 점의 온도를 알 수 있는데, 초기온도 조건과 boundary condition 두개를 알고 있으므로 순차적으로 모든 시간과 거리에 따른 온도값을 알아낼 수가 있는 것이다. 수치해석에 사용한 값들은 Table 2에 나타냈다.

시편의 온도가 상온으로부터 2000 K 정도의 고온까지 변화하기 때문에 이 온도범위에서는 식에서 상수로 사용한 열전도도, 점압비열, 열확산계수 등의 값이 온도의

Table 2. Numerical Values Involved with Numerical Method

Materials	Heat generation, q (J/m ³ ·sec)	Heat conductivity, k (J/m·sec·K)	Heat diffusivity, α (m ² /sec)
TiB ₂	1.00×10 ⁶	85.68	4.9475×10 ⁻⁵
B ₄ C	2.99×10 ⁹	46.20	1.9536×10 ⁻⁵
Graphite	—	—	3.1820×10 ⁻⁴

함수라는 사실을 고려해야 하지만 그 변화 정도가 크지 않으며 또한 대부분의 실험 시간 동안 시편이 1500 K 이상의 고온에서 유지되므로 이러한 값들을 상수로 취급하여 온도식을 구하였음을 밝혀둔다.

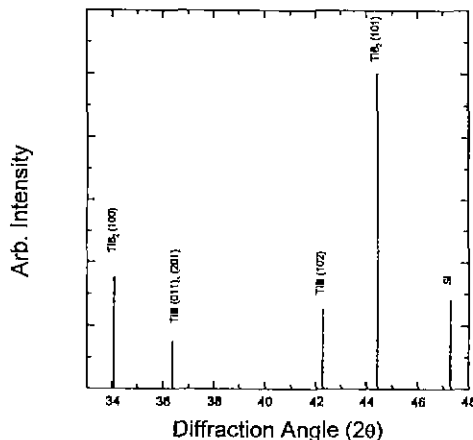
4. 결과 및 고찰

통전에 의한 반응 및 치밀화실험의 결과 생성된 TiB₂의 밀도는 이론 밀도(4.52 g/cm³)의 약 60%에서 80% 정도를 얻었다(Table 3). 반응생성물을 Si를 표준 물질로 하여 XRD를 통하여 상분석을 해 본 결과 Fig. 4와 같이 2차 상인 TiB 상이 부수적으로 생긴 것을 알 수 있다. TiB₂와 TiB의 상대강도비를 비교한 결과 $I_{TiB(102)}/I_{TiB_2(101)}$ 의 값은 0.25이었다.

반응 후에 열량을 계속 공급하면서 압력을 가했으나 Table 3의 시편 a의 경우와 같이 시간이 30초로 매우 짧은 경우에는 초기에 열전도에 의해 손실되는 열량의 역할이 비교적 커서 반응 후 생성된 TiB₂가 변형할 수 있는 충분한 온도를 유지하지 못했기 때문에 50% TD 정도의 낮은 밀도를 얻은 것으로 생각된다. 반면 10분 내지 15분 정도로 비교적 오랜 시간 열량을 공급하면서 가압한 시편 c, d의 경우에는 주물열에 의해 축적되는 열량이 시편의 온도를 상승시키는 역할을 하여 오히려

Table 3. Experimental Results Obtained from Consolidation with SHS and Additional Energy

Sample	Pressure (MPa)	Power (W)	Time (min)	Relative density (% TD)
a	20.69	2250	0.5	50
b	25.52	2250	3	60
c	15.57	3000	15	71
d	13.10	3000	50	80

**Fig. 4.** XRD pattern of TiB₂ product showing TiB as a second phase.

더 낮은 압력을 가해 주었음에도 좀 더 치밀한 생성물을 얻을 수 있었다. 실제로 Ramberg and Williams⁹⁾ 등은 TiB₂의 경우에 ductile-brittle 천이온도를 1800°C로 보고 하였으며 이 온도 이하에서는 TiB₂가 brittle 하여 변형 및 치밀화가 어려운 것으로 생각된다.

Hoke⁷⁾ 등은 반응 후에 준정적압력(quasi-static pressure)을 가하는 실험을 통하여 압력과 밀도와의 관계식을 구하였는데 다음식과 같다.

$$\sigma_z = Y_0 \exp \left[-\frac{Q}{K} \left(\frac{T - T_r}{TT_r} \right) \right] \left[\frac{R^2 - R_c^2}{1 - R^2} \right] \times \left[\frac{(2 - R^2)}{(1 - R^2)(2 + R^2)} \right]^{1/2} \quad (18)$$

σ_z : applied stress

Y_0 : flow stress

Q : activation energy for deformation

K : Boltzman's constant

T_r : reference temperature (1800°C)

R : relative density

R_c : critical density at which the material loss all mechanical strength

앞의 식에서와 같이 동시가압실험을 할 때 온도가 떨어지게 되면 치밀화에 필요한 압력이 매우 커짐을 알 수가 있다.

Hoke 등의 실험은 반응이 완료된 이후에 추가적인 에너지의 공급 없이 quasi-static pressure를 가하면서 압력을 가하면서 압력과 밀도와의 관계를 고려한 반면 본 실험의 경우에는 추가적으로 지속적인 열량공급이

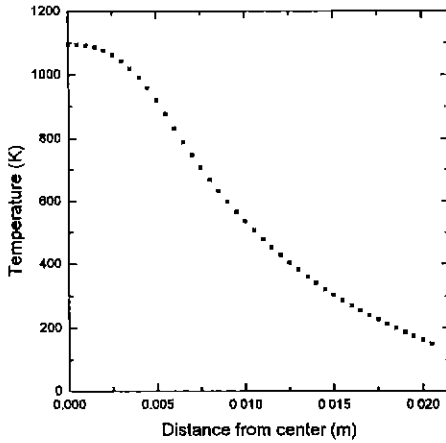


Fig. 5. Temperature profile as a function of distance (with respect to z-axis) at time=30 sec.

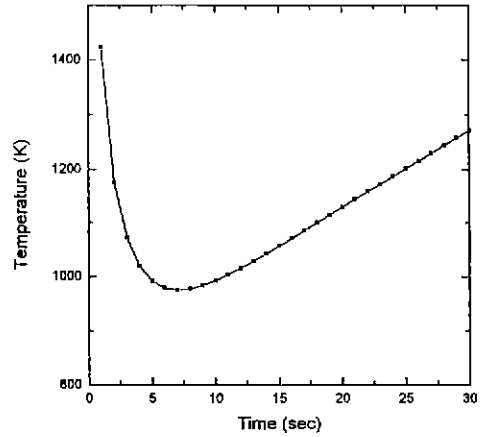


Fig. 7. Temperature profile of the sample as a function of time upto 30 sec.

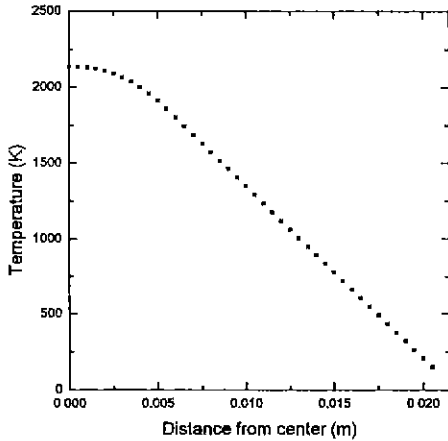


Fig. 6. Temperature profile as a function of distance (with respect to z-axis) at time=30 min.

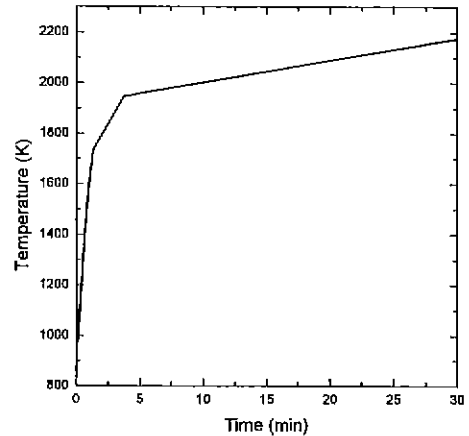


Fig. 8. Temperature profile of the sample as a function of time upto 30 min.

있었으므로 본 연구에서는 가해 준 열량과 밀도와의 관계를 고려하여 보았다.

앞에서 설명한 바와 같은 수치해석의 결과에서 시간이 30초 및 30분이 경과했을 경우에 온도와 z 축에서 시편중심($z=0$)으로부터의 거리의 관계를 도시한 것은 Fig. 5, 6과 같다. 이 그림을 보면 시간이 상당히 흐른 후에는 온도 profile이 정상상태에 도달하는 것을 알 수 있다. 여기서 우리가 알고 싶은 것은 시간에 따라서 시편의 온도가 어떻게 변하는 것인가 하는 것이므로 각 시간대에 대한 온도 vs. 거리 plot에서 시편 부분의 온도의 평균을 구하여 시간에 따른 시편온도의 변화를 관찰하였으며 이 결과는 Fig. 7, 8에 나타내었다.

일례로서 30초까지의 시편의 온도 변화를 나타낸 Fig. 7을 보면 시편이 처음에 SHS 반응에 의한 발열로 인하여 초기에 고온까지 상승하지만 열전도에 의한 열손실로 인해 온도가 급격하게 감소했다가 주열원에 의한 heat generation 등으로 인해 온도가 상승하는 것을 알 수 있다. 그리고 30분까지의 온도 변화를 나타낸 Fig. 8에서 알 수 있듯이 약 2~3분이 경과하게 되면 어느 정도 정상상태에 도달하게 되고 그 이후에는 온도 변화가 심하지 않게 되고 ductile-brittle 천이 온도인 1800°C 이상¹⁾을 계속 유지하므로 치밀화에 유리할 것으로 여겨진다.

한편 가해 준 에너지와 밀도와의 관계를 알아보기

Table 4. Data used for Calculating Input-energy Per Mass of TiB₂ Samples

Sample	a	b	c	d
Time (min)	0.5	3	15	50
Relative density	50	60	71	80
Temperature (K)	1272	1940	2045	2200
Applied stress (MPa)	20.69	25.52	15.17	13.10
Energy/mass (kJ/g)	21	111	540	1,803

위해서 단위질량당 순수하게 얻어지는 열량을 계산할 필요가 있다. 단위 질량당 가해 준 에너지는 식 (5)~(7)에 시간을 곱한 합과 같으며 다음 식으로 표현된다.

$$E_m = \int_{T_0}^{T_{ad}} c_p dT + iVt - \alpha \bar{V} T_p \quad (15)$$

윗 식에 따라 각 시편에 따라서 단위질량당 공급된 에너지와 계산에 필요한 data는 Table 4에 나타냈으며 이를 상대밀도에 대해서 plot 하면 Fig. 9와 같다. Fig. 9를 보면 단위질량당 에너지와 상대밀도가 지수함수적인 관계를 나타내고 있다. 따라서 가해 준 단위질량당 에너지를 알면 상대밀도를 추정할 수 있으리라 예상된다.

본 연구에서 단순한 장치를 이용하여 동시가압 통전 법으로 얻은 70~80% TD의 밀도는 동시가압으로 일반적으로 얻을 수 있는 55% TD³⁾보다 높았으며, 그 이유는 동시가압중 지속적인 열의 공급으로 기인한 것이다. SHS 법에 의해 생성된 반응물질은 반응시에 비교적 단단한 구조를 형성하기 때문에 이를 치밀화시키기 위해서는 고온하에서 많은 열에너지를 공급하거나 혹은 높은 압력을 가해 줄 필요가 있으며, 고온을 유지하기 위해 완벽하게 단열을 시키거나 지속적인 에너지 공급을 통하여 치밀화를 촉진시킬 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 80% TD보다 높은 밀도를 얻기 위해서는 상당한 에너지의 공급이 있어야 할 것으로 예상되며 이에 대해서는 좀 더 체계적인 연구가 필요하다.

5. 결 론

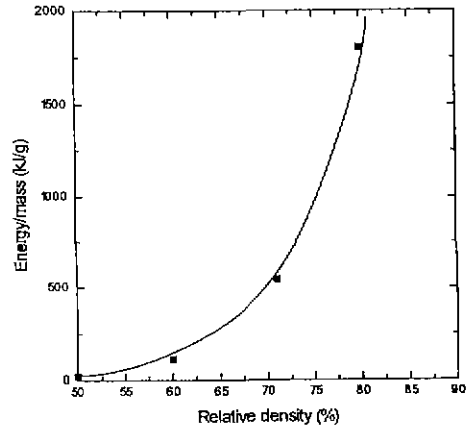


Fig. 9. Relationship between total input-energy and relative density of the product TiB₂.

1. 이론적인 모델 열평형 방정식을 확립하여 시편 내의 시간에 따른 온도를 예측하여 본 결과 치밀화가 진행되는 충분한 고온에 도달했음을 알 수 있었다.
2. SHS 법에 의하여 TiB₂를 반응합성과 동시에 추가적으로 지속적인 전기에너지를 공급하고 압력을 가하면서 치밀화하는 실험을 행한 결과 최대 80% TD의 반응물을 얻을 수 있었다.
3. 가해 준 에너지와 상대밀도와의 관계를 살펴 본 결과 이들 사이에는 지수함수적인 관계가 있음을 알았다.

감사의 글

본 연구는 1995년 한국과학재단의 연구비 지원에 의해 수행되었기에 이에 감사드리며, numerical analysis에 대해 조언을 준 한국과학기술원의 구준모 군에게 감사드립니다.

REFERENCES

1. H.R. Baumgartner, "Mechanical properties of densely sintered high-purity titanium diborides in molten aluminum environments," *J Am Ceram. Soc.*, **67**, 490-497 (1984).
2. G.V. Samsonov and B.A. Kovenskaya, "The nature of the chemical bond in borides," New York, in *Boron and refractory borides*. Edited by V. I. Matkovich, Springer-Verlag, 457-493 (1977).
3. D.A. Hoke and M.A. Meyers, "Consolidation of combustion-synthesized titanium diboride-based materials,"

- J. Am. Ceram. Soc.*, 78(2), 275-84 (1995).
4. D.A. Hoke, M.A. Meyers, L.W. Meyers and G.T. Gray III, "Reaction synthesis/dynamic compaction of titanium diboride," *Metal. Trans. A*, 23A, 77-86 (1992).
 5. L.J. Kecskes, T. Kottke and A. Niller, "Microstructural properties of combustion-synthesized and dynamically consolidated titanium boride and titanium carbide," *J. Am. Ceram. Soc.*, 73(5), 1274-82 (1990).
 6. C.W. Ahn, O.C. Kwon, K. Cho, H.Y. Sohn and H.B. Lee, "Phase characterization and burning rate in the self-propagating high-temperature synthesis (SHS) of titanium borides," unpublished work.
 7. Y.S. Touloukian and E.H. Buyco, "Thermophysical properties of matter," vol. 5, specific heat-nonmetallic solids, IFI/Plenum, New York-Washington (1970).
 8. K.A. Hoffmann and S.T. Chiang, "Computational fluid dynamics for engineers," vol. 1, A Publication of Engineering Education System, Wichita, Kansas, U.S.A. (1993).
 9. J.R. Ramberg and W.S. Williams, "High temperature deformation of titanium diboride," *J. Mater. Sci.*, 22, 1815-26 (1987).