

## TiC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계 확산구동 재결정에 미치는 ZrC와 VC 첨가영향

채 기 웅

호서대학교 재료공학과  
(1995년 10월 23일 접수)

### Effects of ZrC and VC Addition on the Diffusion Induced Recrystallization of TiC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>

Ki-Woong Chae

Dept. of Mater. Eng., Hoseo Univ.  
(Received October 23, 1995)

#### 요 약

TiC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계의 확산구동 재결정에 미치는 ZrC와 VC의 첨가 영향을 관찰하였다. TiC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계의 확산구동 재결정은 ZrC를 첨가하였을 때 효과적으로 억제되었고, 반대로 VC의 첨가시에는 대폭 증진되었다. 특히, 확산구동 재결정을 억제하였던 ZrC는 그 첨가량을 증가시키면 또 다시 재결정을 일으켰다. TiC에 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>와 VC가 첨가되어 생성되는 (Ti,Cr)C와 (Ti,V)C 복합탄화물은 모상인 TiC보다 작은 격자상수를 갖는 반면, ZrC 첨가에 의한 (Ti,Zr)C 상은 더 큰 격자상수를 갖는다. 따라서, ZrC 첨가에 의한 TiC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계 확산구동 재결정의 억제현상은 생성되는 (Ti,Cr,Zr)C 상의 격자상수가 모상인 TiC와 동일하게 조절됨으로써 이루어지는 것으로 생각된다. 즉, TiC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계의 확산구동 재결정은 TiC 모상과 생성되는 복합탄화물상간의 격자상수 차이에 의해 일어나는 것으로 믿어진다.

#### ABSTRACT

The effect of ZrC and VC addition on the diffusion induced recrystallization (DIR) of TiC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> has been investigated. With increasing the amount of added ZrC to Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, the DIR of TiC was suppressed at the beginning and then occurred. On the contrary, the DIR was accelerated with the addition of VC to Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>. Because the lattice parameters of (Ti,Cr)C and (Ti,V)C are smaller, and that of (Ti,Zr)C is larger than that of TiC, the lattice parameter of (Ti,Cr,Zr)C is expected to be similar to that of TiC. The results indicate that the strain energy due to lattice mismatch between TiC and solid-solution carbide is the driving force of the observed DIR.

**Key words:** Diffusion induced recrystallization (DIR), Lattice mismatch, Strain energy

#### 1. 서 론

일반적으로 어떤 재료에 다른 원소를 확산시키면 시간이 증가함에 따라 열처리 온도에서 평형을 이루는 새로운 조성의 고용상이 균일하게 형성된다. 그러나, TiC에 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>가 확산되는 경우는 TiC 입자 내부에 (Ti,Cr)C의 조성을 가지는 새로운 복합탄화물의 입자가 생성되는 재결정화가 일어난다<sup>1)</sup>. 이렇게 주어진 재료에 어떤 원소가 확산되어 고용체를 형성하는 경우, 재료의 표면이나 입계에서는 새로운 조성의 입자가 생성되어 성장하는 현상을 확산구동 재결정(Diffusion Induced recrystallization: DIR)이라 부른다. 이 현상은 박막시편이나<sup>2-4)</sup>

단결정재료등<sup>5-7)</sup> 재료상태에 관계없이 관찰되었으며, 금속계뿐만 아니라 산화물계에서도<sup>8-10)</sup> 보고되어, 일정한 조건만 만족되면 모든 재료에서 일어날 수 있는 현상으로 믿어진다.

Fig. 1은 최근에 탄화물계에서는 처음으로 보고되어진 TiC에서 일어나는 확산구동 재결정의 미세조직이다<sup>1)</sup>. 단결정인 조대한 TiC 입자(~30 μm)의 표면에서부터 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>의 확산으로 인해 1~2 μm의 크기를 가지는 (Ti,Cr)C 복합 탄화물의 재결정립이 생성되고 있다. 열처리 시간의 증가는 단결정적이었던 TiC 입자를 모두 (Ti,Cr)C 입자로 재결정화하였으며, 그 이후로는 입성장만이 일어났다. TEM을 통한 재료내부의 직접적인 관찰은 확

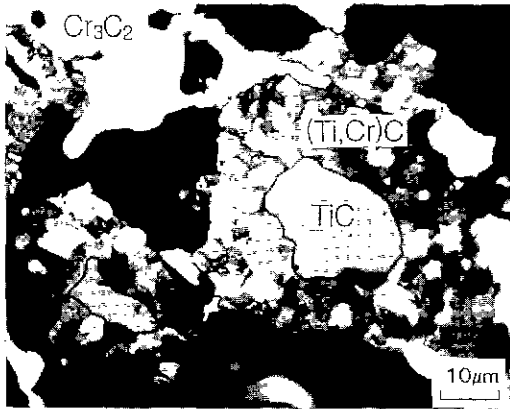


Fig. 1. Microstructure of the 20TiC-80Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> specimen heat-treated at 1550°C for 15 min.



Fig. 2. Microstructure of the 20TiC-74Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-6ZrC specimen heat-treated at 1550°C for 15 min.

산과정 중에 전위가 생성되며, 이 전위가 재결정을 일으키는 것으로 보고되었다<sup>1)</sup>. 그러나, 이러한 전위가 어떤 원인으로 생성되는지 구체적인 실험결과는 보여 주지 못하였다.

본 연구에서는 TiC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계에서 관찰되어진 확산구동 재결정의 구동력을 모델실험을 통해 직접적으로 규명하고자 하였다. 이러한 실험의 목적은 확산구동 재결정이 빠른 확산에 의한 재료의 합금화와 동시에 입자의 크기를 변화시키므로 실제적 응용의 가능성을 가지고 있고, 응용을 위해서는 현상의 제어방법을 확립하여야 할 필요가 있기 때문이다. 최근에 ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>계에서는 크기가 다른 원소를 첨가하는 방법을 통해 모상과 확산상간의 격자상수차이가 확산구동 재결정의 원인임을 보인 바 있다<sup>16)</sup>. 따라서 본 연구에서도 동일한 실험방법을 통해 TiC의 확산구동 재결정의 구동력을 규명하고자 하였다. 이를 위해 원소 크기가 다른 ZrC와 VC를 첨가하였고, 이때 이들이 확산구동 재결정에 미치는 미세조직의 변화를 관찰하였다.

## 2. 실험방법

시편 제조에는 TiC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, ZrC 그리고 VC 분말이 사용되었는데, 모두 Hermann C Starck사의 제품이었다. TiC는 평균입자 크기가 30 µm의 큰 것을 사용하였으며 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, ZrC 그리고 VC 분말의 평균 입도는 1~2 µm였다. 여기서 큰 크기의 TiC 입자를 사용한 것은 재결정현상을 용이하게 관찰하기 위함이었다.

TiC계와 같은 탄화물계 세라믹스의 혼합과정은 치밀화에 중요한 영향을 미치므로 통상 오랜 분쇄와 혼합

시간을 필요로 한다 그러나, 본 실험에서는 TiC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계에서 관찰되어진 확산구동 재결정의 구동력 규명을 위한 모델실험이 목적이었으므로 아세톤을 분산매로 3~5분간 유리막대로 저어 주는 혼합방법을 이용하였고, 이를 통해 혼합중 일어날 수 있는 TiC 입자의 분쇄를 방지하였다. 실험에 사용된 분말의 조성은 각각 무게비로 20TiC-74Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-6ZrC, 20TiC-56Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-24ZrC, 그리고 20TiC-76.4Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-3.6VC였다. 습식혼합된 분말은 건조시킨 후 유리막대를 이용하여 다시 한번 2~3분간 저어 주는 건식혼합을 행하였다.

혼합된 분말은 직경 10 mm의 원통형 금형에서 3 MPa의 압력으로 성형체로 제조되었는데, 한번의 성형에 이용된 분말의 양은 약 1.2 g이었다. 성형된 시편은 0.1 torr의 진공을 유지하는 진공소결로에서 15°C/min의 승온속도로 1550°C에서 15분부터 1시간까지 소결을 행한 후 노냉하였다. 소결된 시편들을 절단한 후, 다이아몬드 분말로 연마하고 Murakami 용액(H<sub>2</sub>O : K<sub>2</sub>Fe(CN)<sub>6</sub> : NaOH=10 : 1 : 1)으로 10초간 부식시켜 광학현미경으로 미세조직을 관찰하였다. X-선 분석실험을 실시하여 새로 생성된 상의 격자상수를 측정하였고 EDX를 이용하여 조성분석을 행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 20TiC-74Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-6ZrC 조성의 시편을 1550°C에서 15분간 열처리하여 얻은 미세조직이다. 원료 분말로 사용된 큰 크기(평균 30 µm)의 TiC 입자(짙은 회색)와 기지상인 밝은 색의 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>를 쉽게 구분할 수 있으며 화살표 Z로 표시된 연한 회색의 ZrC도 관찰된다. 앞서의

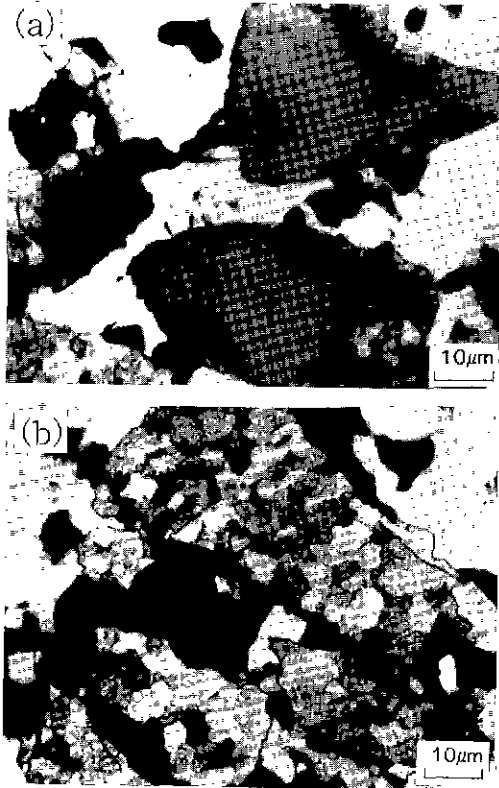


Fig. 3. Microstructures of the (a) 20TiC-74Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-6ZrC and (b) 20TiC-56Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-24ZrC specimen heat-treated at 1550°C for 1 h.

Fig. 1의 20TiC-80Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계와 동일한 조건인 1550°C에서 15분간 열처리한 것인데 재결정이 일어난 정도는 크게 달랐다. 즉, TiC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>에서의 재결정은 15분간의 열처리에 의해 약 9 µm 두께의 확산층에 1~2 µm의 입정을 가지는 재결정이 균일하게 일어난 반면, ZrC를 첨가한 경우는 TiC 입자가 부식에 의해서도 어떠한 입계도 관찰되지 않는 열처리전 단결정의 모습을 그대로 보이고 있다. 따라서, ZrC의 첨가는 TiC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계의 확산구동 재결정을 효과적으로 억제하고 있다.

TiC에 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>가 고용되어 생성되는 (Ti,Cr)C의 복합탄화물은 TiC보다 작은 격자상수를 갖는다<sup>11)</sup>. 여기서 6 ZrC 조성은 Norton 등이<sup>12)</sup> 보고한 TiC가 ZrC의 고용체를 형성할 경우 증가하는 격자상수의 크기를 근거로 TiC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계에서 생성되는 (Ti,Cr)C의 격자상수의 감소분을 ZrC의 첨가로 상쇄한 것이다. 따라서, 새로이 생성되는 (Ti,Cr,Zr)C 복합탄화물의 격자상수는 모상인 TiC와 동일할 것으로 생각된다. 조성의 변화에도 불구하고 모상과 새로운 고용상간의 격자상수차이를 없앤 결과 확산구동

재결정은 효과적으로 억제되었다.

Fig. 3의 (a)는 20TiC-74Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-6ZrC(이후 6ZrC) 시편을, (b)는 ZrC의 첨가량을 증가시킨 20TiC-56Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-24ZrC(이후 24ZrC) 조성의 시편을 1550°C에서 1시간 열처리하여 얻은 미세조직이다. 열처리 시간의 증가에도 불구하고 TiC 입자는 초기의 각진 다각형을 그대로 유지하고 있으나, 단결정이었던 TiC 입자 내부에는 부식정도가 다른 새로운 재결정립들이 생성되고 있다. 그런데, 첨가한 ZrC의 양에 따라 재결정의 정도가 크게 다르게 나타나고 있다. (a)의 경우 확산구동 재결정이 부분적으로는 관찰되고 있으나 전반적으로 여전히 억제되고 있는 반면, ZrC가 많은 양 첨가된 (b)시편에서는 모든 입자에서 재결정이 완료되었고, 재결정립도 4~6 µm의 크기를 보였다. 즉, TiC 입자 내부에서의 확산구동 재결정은 이미 완료되었으며, 이후에 입성장이 진행되었음을 알 수 있다. 이런 결과는 ZrC 첨가로 억제되었던 TiC의 확산구동 재결정이 ZrC 첨가량의 증가에 의해 또 다시 증진됨을 의미한다.

Fig. 3(b) 조성은 ZrC 농도를 증가시킴으로써 새로이 생성되는 복합탄화물의 격자상수를 모상인 TiC보다 오히려 크게 해 준 경우이다. 만일 Fig. 2에서 관찰되는 재결정의 억제효과가 생성되는 복합탄화물의 격자상수 조절과 무관하며 ZrC의 첨가에 의한 화학적 자유에너지의 변화에 기인한 것이라면 이 조성에서도 재결정현상은 억제되어야만 한다. 그러나, 실제적으로는 더욱 빠른 재결정이 관찰되고 있다.

Fig. 1~3의 결과들은 탄화물계인 TiC의 확산구동 재결정이 ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>10)</sup>와 Mo-Ni-Cu-Fe<sup>11)</sup>계의 확산구동 재결정에서와 같이 모상과 새로이 생성되는 확산상간의 격자상수차이에 기인함을 분명히 보여 주는 것이다. TiC 모상에 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>의 확산으로 (Ti,Cr)C 복합탄화물상이 생기면 모상과 새로운 복합탄화물상간의 격자상수차이에 의해 정합변형에너지가 생성된다. 이 정합변형에너지는 임계값이상으로 커지면 전위의 생성으로 소멸되는데<sup>11)</sup>, 이렇게 생성된 전위가 재배열과 합체과정을 통해 확산구동 재결정의 결정립으로 성장하게 되는 것이다<sup>11)</sup>. 따라서, 모상과 확산상간의 격자상수 차이를 제거할 수 있으면 전위의 생성을 막아 확산구동 재결정을 억제할 수 있게 된다.

한편, 재결정이 효과적으로 억제되어진 6ZrC 시편에도 Fig. 2의 R과 같이 입계에서 부분적으로 재결정화된 입자가 관찰되고 있다. 조성분석결과 재결정립(R)에서 Zr은 검출되지 않았으나, 약 5 mol% 범위(측정된 Cr의 농도를 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>의 mol%로 환산한 것)의 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>이 검출되었다. 이는

Fig. 2에서 관찰되는 재결정립이 Cr의 고용으로 인하여 생성된 것임을 의미한다. 6ZrC 시편에서의 확산구동 재결정은 열처리 시간이 증가하면 점점 뚜렷하게 관찰된다. 그런데, Fig. 3(a) 시편에서도 생성된 재결정립에서는 5~15 mol%의 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 만이 검출되었다 이와 같이 6ZrC 시편에서 열처리 시간의 증가에 따라 재결정현상이 관찰되는 것은 첨가한 원소들의 고용과 확산속도에 차이가 있기 때문으로 생각된다. 고용되지 못하고 남아 있는 ZrC (화살표 Z)와 조성분석결과들이 이를 뒷받침해 주고 있다.

열처리 초기에 복합탄화물의 생성은 TiC 입자비로 Cr와 Zr의 체적확산에 의해 이루어질 것이다. 확산이 시작되는 초기에 Cr와 Zr의 동시 고용은 모상과 생성되는 복합탄화물상간의 격자상수차이를 일으키지 않음으로써 정합변형 에너지에 의한 전위의 생성을 억제하게 된다. 그러나, 열처리가 진행됨에 따라 Zr보다 빠른 Cr의 확산으로 인하여 TiC 입자내부에는 Cr의 농도가 점진적으로 증가하고, 이에 따라 정합변형에너지에 의해 전위가 생성된다. 이후 체적확산이 지배적이었던 초기 재결정단계와는 다르게 원자반경이 작은 Cr의 확산이 생성된 전위와 입계를 통해 매우 빠르게 TiC 입자내부로 확산됨으로써 Cr의 농도증가로 연속적인 확산구동 재결정이 일어나는 것이다. 즉, 재결정의 억제현상은 체적확산이 지배적일 것으로 판단되는 재결정립생성 이전에 효과적으로 나타나며, 이후 확산속도의 차이에 의한 농도의 변화로 정합변형에너지가 임계값에 도달하면 전위가 생성되고 이후 입계가 형성되면, 확산경로의 변화에 따른 Cr의 빠른 확산으로 재결정화가 급속히 연속적으로 진행되는 것으로 믿어진다. 만일, ZrC와 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>가 TiC 입자에서 동일한 확산속도를 가진다면 열처리 시간의 증가에도 불구하고 재결정은 억제될 것이다.

한편, Fig. 3(a)의 6ZrC 시편에서 확산구동 재결정은 특정한 TiC계면에서 먼저 일어나고 있다. 첨가원소의 불균일한 혼합이나 TiC 모상속에서 확산속도의 이방성이 그 원인일 수도 있으나, ZrC 첨가에 의해 구동력이 감소되어 있다면 정합변형에너지가 가지는 특징으로도 그 가능성을 생각해 볼 수 있다. 정합변형 에너지는 TiC와 같은 입방정계에서 그 크기는  $E_c = Y(n)\delta^2$ 으로 표현된다<sup>44)</sup>. 이때, Y(n)는 방향에 따라 다른 elastic modulus이며,  $\delta$ 는 정합변형(coherency strain)으로 모상의 격자상수가  $a_0$ 이고 확산층의 격자상수가  $a$ 일 때,  $\delta = (a_0 - a)/a_0$ 으로 나타내어진다. 식에서 알 수 있듯이 정합변형에너지는 모상과 확산층간의 격자상수차가 크거나 Y의 값이 큰 경우에 커지게 되고 정합변형에너지가 클수록

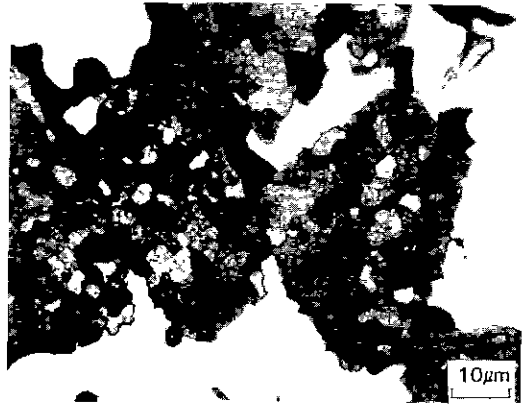


Fig. 4. Microstructure of the 20TiC-76.5Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-3.5VC specimen heat-treated at 1550°C for 15 min.

이 에너지 소멸에 의한 전위의 생성은 빨라지게 된다. TiC에서 보고된<sup>15)</sup> 상온에서의 elastic constant를 이용하여 Y의 값을 구하면 <100> 방향에서  $5.62 \times 10^9$  N/m로 최대가 되며 <111> 방향에서  $5.35 \times 10^9$  N/m로 최소가 된다. 따라서, <100> 방향으로 정합변형에너지의 소멸을 위한 전위의 생성반응이 먼저 진행됨으로써 특정방향의 계면에서 재결정현상이 먼저 관찰될 수 있는 것이다.

Fig. 3(b)의 24ZrC 시편에 대한 조성분석에서는 입체부분의 초기 생성된 재결정립에서 약 0.8~1.4 mol%의 Zr를 검출할 수 있었으며, 내부의 결정립에서는 역시 Cr만이 검출되었다. 24ZrC 시편에서의 확산구동재결정은 초기 과량의 ZrC 첨가에 의한 모상과 복합탄화물상간의 격자상수차이가 정합변형에너지를 생성함으로써 일어나지만, 이후에는 입자반경이 작은 Cr의 빠른 확산에 의해 일어나는 것으로 생각된다. 따라서, 24ZrC 시편은 재결정과정 중에 구동력이 감소하는 과정(정합변형이 양수에서 음수로의 변화)을 겪게 되어 재결정속도가 TiC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계(Fig. 1)에서보다 느리게 진행되는 것으로 믿어진다.

한편, 격자상수차이가 재결정을 일으키는 원인이라면 TiC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>에서 생성되는 (Ti,Cr)C보다 더욱 작은 격자상수를 갖는 복합탄화물을 형성시키면 확산구동 재결정은 더욱 빠른 속도로 진행되어야 한다. Fig. 4는 20TiC-76.4Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-3.6VC 조성의 시편을 Fig. 1, 2의 시편과 동일한 조건인 1550°C에서 15분간 열처리하여 얻은 미세조직이다. TiC에 VC가 고용되면 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>가 고용되었을 때보다 격자상수가 더욱 감소한다<sup>12)</sup>. 여기서 3.6VC의 첨가량은 6ZrC 조성에서 TiC에 대한 ZrC가 차지하는 mol%와 동일한 양이다. Fig. 1, 2와 비교하여 재결정이

매우 빠르게 일어나 15분만에 모든 TiC 입자에서 재결정화가 완료되었음을 알 수 있다. 즉, VC의 첨가는 예상대로 확산구동 재결정을 대폭 증진시켰다. 이때, 생성된 재결정립들은 조성분석결과 (Ti,Cr,V)C의 복합탄화물임을 확인할 수 있었는데, 입자의 외부쪽 재결정립은 (Ti<sub>0.53</sub>Cr<sub>0.38</sub>V<sub>0.09</sub>)C의 조성을, 내부의 재결정립은 (Ti<sub>0.62</sub>Cr<sub>0.31</sub>V<sub>0.04</sub>)C의 조성을 보였다. 1시간의 열처리로 모든 입자가 동일한 조성에 이르렀을 때 X-선분석으로 측정된 격자상수값은 4.235 Å으로 (Ti,Cr)C의 복합상이 가졌던 4.253 Å보다 작은 값이었다. 즉, VC의 첨가로 생성되는 복합탄화물의 격자상수는 TiC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계에서 생성되는 (Ti,Cr)C보다 더욱 작아졌으며 그 결과로 재결정현상은 더욱 빠르게 진행되었다.

#### 4. 결 론

확산구동 재결정이 일어나는 TiC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계에 원자반경의 크기가 다른 ZrC와 VC를 첨가함으로써 재결정현상을 억제시키거나 증진시킬 수 있었다. TiC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계에 6ZrC의 첨가는 새로이 생성되는 (Ti,Cr,Zr)C 복합탄화물상의 격자상수를 모상인 TiC와 동일하게 조절함으로써 확산구동 재결정을 효과적으로 억제하였다. 그러나, ZrC 첨가량을 증가시키면 확산층에 또 다시 격자상수차이에 의한 변형을 증가시킴으로써 재결정현상을 일으켰다. 그리고, VC의 첨가는 생성되는 (Ti,Cr,V)C 복합탄화물의 격자상수를 TiC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계에서 생성되는 (Ti,Cr)C 상보다 더욱 작게함으로써 재결정현상을 대폭 증진시켰다. 결국, TiC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>계에서 일어나는 확산구동재결정은 모상과 새로이 생성되는 복합탄화물상간의 격자상수차이에 의해 일어나는 것임을 알 수 있었다.

#### REFERENCES

1. K.W. Chae, C.S. Hwang, D.Y. Kim and S.J. Cho, "Diffusion Induced Recrystallization of TiC," *Acta Metall.*, in press. (1995).
2. J.W. Matthews and J.L. Crawford. "Formation of Grain

- Boundaries during Diffusion between Single Crystal Films of Gold and Palladium," *Phil. Mag.*, **11**, 977-91 (1965).
3. C.R.M. Grovenor, D.A. Smith and M.J. Gormge, "Nucleation and Migration of High Angle Grain Boundaries in Bilayer Foils," *Thin Solid Films*, **74**, 257-67 (1980).
4. E.J. Mittemeijer and A.M. Beers, "Recrystallization and Interdiffusion in Thin Bimetallic Films," *Thin Solid Films*, **65**, 125-35 (1980).
5. V.Y. Doo and R.W. Balluffi, "Structural Changes in Single Crystal Copper-Alpha Brass Diffusion Couples," *Acta Metall.*, **6**(6), 428-38 (1958).
6. L. Chongmo and M. Hillert, "A Metallographic Study of Diffusion-Induced Grain Boundary Migration in the Fe-Zn System," *Acta Metall.*, **29**, 1949-60 (1981).
7. T.A. Parthasarathy and P.G. Shewmon, "Vapor Transport and DIGM in the Ni-Fe System," *Metall. Trans.*, **14A**, 2560 (1983).
8. H.Y. Lee and S.J.L. Kang, "Chemically Induced Grain Boundary Migration and Recrystallization in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>," *Acta Metall.*, **38**(7), 1307-12 (1990).
9. J.J. Kim, B.M. Song, D.Y. Kim and D.N. Yoon, "Chemically Induced Grain Boundary Migration and Recrystallization in PLZT Ceramics," *Ceram. Bull.*, **65**(10), 43-45 (1986).
10. J.W. Jeong, D.N. Yoon and D.Y. Kim, "Chemically Induced Instability at Interfaces of Cubic ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Grains in a Liquid Matrix," *Acta Metall.*, **39**(6), 1275-79 (1991).
11. T. Hachisuka, "Solution Mechanism of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> in TiC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> Pseudo-Binary System," *J. Jap. Soc. Powd. Met.*, **37**(4), 556-61 (1990).
12. J.T. Norton and A.L. Mowry, "Solubility Relationships of the Refractory Monocarbides," *Metals Trans.*, **185** (2), 133-136 (1949).
13. Y.J. Baik, Y.H. Park and D.N. Yoon, "Chemically Induced Recrystallization in Mo-Ni-(Cu-Fe) Alloy," *J. Korean Inst. Metals*, **28**(7), 581-589 (1990).
14. D.N. Yoon, "Chemically Induced Interface Migration in Solids," *Annu. Rev. Mater. Sci.*, **19**, 45-58 (1989).
15. J.J. Gilman and B.W. Roberts, "Elastic Constants of TiC and TiB<sub>2</sub>," *J. Appl. Phys.*, **32**(7), 1405 (1961).