

Hardness of Constituent Phases in $Ti(C_{0.7}N_{0.3})$ -WC-Ni Cermets Measured by Nanoindentation

Seongwon Kim[†], Dae-Min Kim, Shinhoo Kang*, Hyeong-Jun Kim, and Hyung-Tae Kim

Engineering Ceramic Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, 30 Gyeongchung Rd.,
Shindun-Myeon, Icheon, Gyeonggi-do, 467-843, Korea

*Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Shillim-Dong, Kwanak-Gu, Seoul, 151-742, Korea
(Received December 14, 2008; Revised January 23, 2009; Accepted January 23, 2009)

나노인덴테이션으로 측정된 $Ti(C_{0.7}N_{0.3})$ -WC-Ni 써멧 구성상의 경도

김성원[†] · 김대민 · 강신후* · 김형준 · 김형태

요업기술원 엔지니어링세라믹센터

*서울대학교 재료공학부

(2008년 12월 14일 접수 ; 2009년 1월 23일 수정 ; 2009년 1월 23일 승인)

ABSTRACT

The constituent phases in $Ti(C_{0.7}N_{0.3})$ -xWC-20Ni (wt%, x=5, 15, 25) cermets were characterized using nanoindentation in conjunction with observation of microstructure. The microstructure of cermet is composed of hard phase and binder phase, which gave rise to a wide range of hardness distribution when nanoindentation was carried out on the polished surface of cermets. Because of the inhomogeneous nature of cermet microstructure, observation of indented surface was indispensable in order to separate the hardness of each constituent phase. The measured values of hardness using nanoindentation were ~14 GPa for the binder phase and ~24 to 28 GPa for the hard phase, of which nanoindentation hardness was decreased with the addition of WC into $Ti(C_{0.7}N_{0.3})$ -Ni system. In addition, the nanoindentation hardness of Ni binder phase was much higher than reported Vickers hardness, which could result from confined deformation of binder phase due to the surrounding hard phase particles.

Key words : $Ti(C,N)$, Cermet, Hardness, Nanoindentation

1. 서 론

우수한 기계적 물성과 화학적 안정성으로 인하여 $Ti(C,N)$ 계 써멧은 절삭공구 소재로서 널리 사용되고 있다.¹⁾ 특히 $Ti(C,N)$ 계 써멧은 탄소강, 스텐리스강 등의 고속도 밀링, 증절삭, 마무리절삭 등에 이용된다.²⁾ 이러한 특징은 유심/주변조직(Core/rim structure)이라 불리는 독특한 미세구조를 지니는 경질상(Hard phase)의 기계적인 물성에 기인한다. 경질상을 이루고 있는 유심은 액상소결 과정 중에 녹지 않고 남아있는 원료 $Ti(C,N)$ 입자이고 주변조직은 유심 주위에 용해-재석출(Dissolution-reprecipitation)에 의해서 형성된 탄질화물의 고용상이다.³⁾ $Ti(C,N)$ 계 써멧에는 물성향상 등의 목적으로 여러 가지 탄화물이 첨가되는데 WC는 그 중에서도 필수적인 첨가탄화물에 속한다. WC 첨가는 액상과 경질상 간의 적심성(Wettability)과 소결성(Sinterability)이 증진되어 향상된 소결밀도 및 기계적 물

성을 제공한다.^{4,5)} 또한, $Ti(C,N)$ -Ni 써멧에 WC가 첨가되면 소결 중에 경질상의 입자미세화와 인성의 증가를 가져온다는 보고^{5,6)}도 있다.

써멧에 있어 또 다른 특징은 불균질한 미세구조를 지닌다는 것인데, 미세구조를 이루는 대표적인 구성상(Constituent phase)은 탄·질화물의 경질상(Hard phase)과 Ni, Co 등 금속의 결합상(Binder phase)이다. 이 중 경질상은 전이금속(IV, V, VI 족)의 탄화물이나 질화물로서 대부분 동일한 결정학적 구조(B1, NaCl 구조)로 조성에 따라 격자상수가 다르다.^{7,8)} WC의 경우 육방정의 결정구조를 가지나 $Ti(C,N)$ 계 써멧에 첨가되어 소결과정 중에 액상의 결합상에 용해되었다가 $(Ti,W)(C,N)$ 고용상 형태로 석출되어 주변조직을 형성하는 경우에는 입방정 구조이다. 이와 같이 설계된 조성에 따라 첨가된 탄·질화물이 유심/주변조직의 형성에 미치는 영향에 대한 연구가 $Ti(C,N)$ 계 써멧의 이해에 상당한 부분을 차지한다.

써멧 제조 후에 필수적으로 평가하는 기계적 물성 중 하나로서 비커스 경도가 있는데, 이러한 압입시험법(Indentation technique)은 측정의 용이성과 신속성으로 인

[†]Corresponding author : Seongwon Kim

E-mail : woods3@kicet.re.kr

Tel : +82-31-645-1452 Fax : +82-31-645-1485

해 재료의 기계적 물성을 평가하는데 있어 가장 널리 사용되는 방법의 하나이다. 그러나, 실제 측정에 있어서 특정하중을 재료에 인가한 뒤 생긴 압흔의 면적을 광학현미경을 이용해 측정하므로 압입하중에 한계를 지니고 있다. 최근에 그에 대한 대안으로 이용되는 나노인덴테이션(연속압입시험)은 하중과 변위를 연속적으로 측정하여 얻어진 하중-변위 곡선(Load-displacement curve)을 이용하여 기존압입시험에 비교해 경도나 탄성계수와 같은 좀더 다양한 물성을 얻을 수 있을 뿐 아니라, 수 mN의 하중을 사용하여 박막^{9,10}이나 복합소재의 매우 작은 영역의 물성을 평가¹¹⁻¹³할 수 있다.

본 연구에서는 질삭공구로 응용되는 조성에 근사한 $Ti(C_{0.7}N_{0.3})-WC-Ni$ 씨멧의 미세구조를 관찰하고 나노인덴테이션을 이용해 구성상의 경도를 평가하여 경질상과 결합상으로 이루어진 불균질한 미세구조가 국부적이고 개별적인 기계적 물성평가에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한, WC 첨가량에 따른 구성상의 상대적인 경도변화를 통하여 $Ti(C_{0.7}N_{0.3})-WC-Ni$ 씨멧의 조성설계에 대하여 논의하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 $Ti(C_{0.7}N_{0.3})-xWC-20Ni$ (wt%, $x=5, 15, 25$) 씨멧 구성상의 특성을 평가하기 위하여 $Ti(C_{0.7}N_{0.3})$ ($1\sim3\ \mu m$, Kennametal Inc.), WC ($\sim 2\ \mu m$, H.C. Starck), Ni ($3\sim4\ \mu m$, Novamet) 분말을 출발원료로 일반적인 세라믹공정을 통해 시편을 제조하였다. 조성에 따라 칩량한 분말은 WC-Co 불과 아세톤을 혼합 매질로 사용한 어트리션 밀링(Attrition milling)으로 10시간 동안 습식혼합 후 건조하였다. 건조된 분말을 유발로 분쇄하고 #120 mesh 체가름한 후, 100 MPa 일축가압하여 디스크형태로 성형하였다. 각 조성의 성형체는 흑연발열체로를 이용해 $1450^{\circ}C$ 에서 1시간 동안 진공소결하였다.

소결체의 단면을 6에서 $1\ \mu m$ 다이아몬드 슬러리로 연마한 후, 전계방사형 주사전자현미경(FE-SEM, JSM-6701F, JEOL, Japan)으로 미세구조를 관찰하였다. 또한, 연마된 표면에 대하여 나노인덴터(Triboindenter, Hysitron, USA)로 소재의 경도를 평가하였다. 나노인덴테이션은 Berkovich 압입자로 5 mN의 하중에 $5\ \mu m$ 간격으로 15×3 의 격자형태로 압입하여 실험하였다. 단일의 압입시험은 5초(1mN/sec.)동안 압입, 2초 동안 5 mN의 압입하중을 유지, 다시 5초(-1 mN/sec.)동안 압입을 제거하는 하중제어모드(Load control mode)에서 시행되었고 각각 압입점에서 얻은 하중-변위곡선으로부터 경도값을 구했다. 또한, 압입시험이 끝난 시편의 단면에 대해서 FE-SEM을 이용하여 압흔의 위치를 확인하였다.

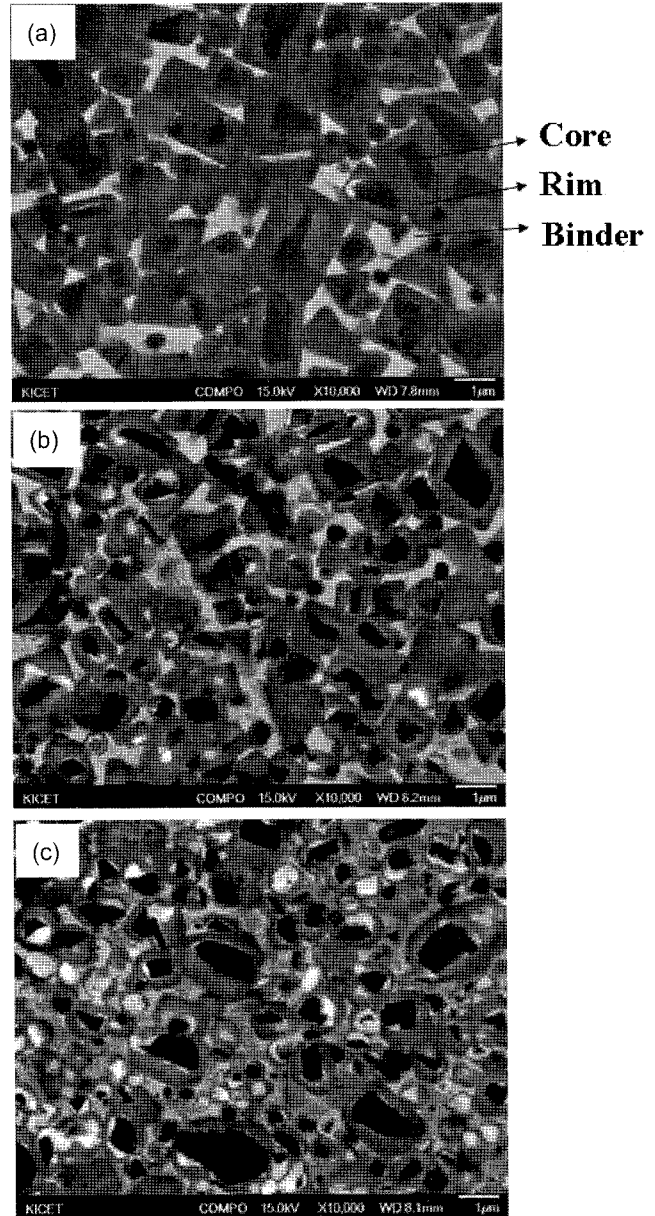


Fig. 1. SEM micrographs of $Ti(C_{0.7}N_{0.3})-xWC-20Ni$ (in wt%) sintered at $1450^{\circ}C$ for 1 h under a vacuum : (a) 5WC, (b) 15WC, and (c) 25WC. (Arrows indicate each constituent phase.).

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 $Ti(C_{0.7}N_{0.3})-xWC-20Ni$ (wt%, $x=5, 15, 25$) 씨멧의 주사전자현미경 후방산란전자(Back-scattered electron) 모드에서의 미세구조를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 WC 첨가량에 관계 없이 다른 탄화물이 첨가된 경우에서^{14,15}와 같이 유심/주변조직이 나타난다. 다소 불규칙하고 심지어 음의 곡률반경이 나타나는 유심과 주변의 계면 형상(Fig. 1(c))은 변형에너지(Strain energy)에 의한

계면불안정 (Interface instability)로 설명될 수 있으나^{16,17)} 최근의 투과전자현미경 분석결과에 따르면¹⁸⁾ $Ti(C_{0.7}N_{0.3})-Ni$ 씨멧에 WC가 첨가되는 경우 주변조직의 격자상수는 유심의 그것에 비해 변화가 없는 것으로 나타났다. 또한, 경질상과 결합상 사이의 계면은 비교적 등근 형상을 나타내는데 이는 계면에서의 표면에너지가 좀 더 등방성을 가진다는 것을 의미하며 $Ti(C,N)-Ni$ 에 NbC ¹⁴⁾나 VC ¹⁵⁾가 첨가되었을 때의 각진 입자의 경질상과는 극명한 대비를 이룬다.

주사전자현미경의 후방산란전자 모드에서 이미지의 국부적인 밝기는 구성원소의 평균원자량에 의해 결정되므로 밝게 나타나는 부분일수록 상대적으로 중원소가 풍부하게 존재한다는 것을 알 수 있다. 조성에 관계없이 밝은 회색으로 나타나는 Ni의 결합상에 비교적 어두운 콘트라스트(Contrast)의 경질상 입자가 분포되어 있는 다소 불균질한 미세구조를 나타낸다. 특히 경질상의 경우에는 전형적인 유심/주변조직을 나타내는데 검은 색의 유심은 원료의 $Ti(C_{0.7}N_{0.3})$ 이 액상소결 중에 용해되지 않고 남은 것으로 회색의 $(Ti,W)(C,N)$ 주변조직이 석출되는 시작점이 된다. 주변조직의 경우에도 중원소(이 경우 W)의 함량에 따라 비교적 소결 초반에 형성된 유심 바로 외부의 밝은 회색으로 나타나는 내주변조직(Inner rim)과 어두운 회색으로 나타나는 W이 내주변조직에 비해 적은 외주변조직(Outer rim)으로 나뉜다. 이러한 내/외주변조직은 계 내에 WC의 첨가량이 증가할수록 그 구분이 분명해진다(Fig. 1 (b), (c)).

씨멧이나 초경 재료에 있어서 조성설계에 따른 기계적 물성치 변화를 평가하는 방법으로 비커스 경도법이 가장 널리 쓰이고 있다. 비커스 경도법의 경우 일정하중을 재료표면에 압입하고 압흔의 크기를 광학현미경으로 측정하여 소재의 경도를 평가하게 된다. 예를 들어 약 10 GPa 정도의 경도를 지니는 씨멧 소재에 1 kg중 압입하는 경우에 압흔의 대각선 길이가 약 40 μm 정도로 경질상의 입자크기가 대략 수 μm 정도임을 감안하면 단일의 압입과정 중에 수 백개의 경질상 입자와 기지상의 결합상이 관여하는 것을 알 수 있다. 이러한 거시적인 경도평가법의 단점을 보완하기 위하여 최근에 나노인덴테이션을 이용한 복합소재의 경도평가가 활발히 이루어지고 있다.¹¹⁻¹³⁾

Fig. 2(a)는 $Ti(C,N)-WC-Ni$ 씨멧에 5 mN의 하중으로 나노인덴테이션을 행한 후 압흔의 미세구조를 보여주고 있는데 단일의 경질상 입자 위에 압입이 이루어진 것을 알 수 있다. Fig. 2(b)는 나노인덴테이션으로 경질상 위에 압입되었을 때의 하중-변위곡선을 나타낸 것이다. 하중-변위곡선은 나노인덴테이션을 이용한 압입시험 과정 중에 압입자와 연결된 압전센서를 통해서 압입하중을 제어함과 동시에 압입깊이를 연속적으로 측정된 데이터이다. 특히 하중-변위곡선으로부터 압입의 최대하중과 압입깊이를 구

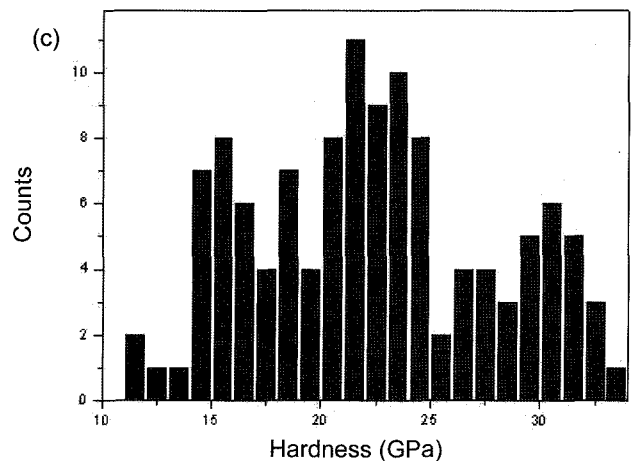
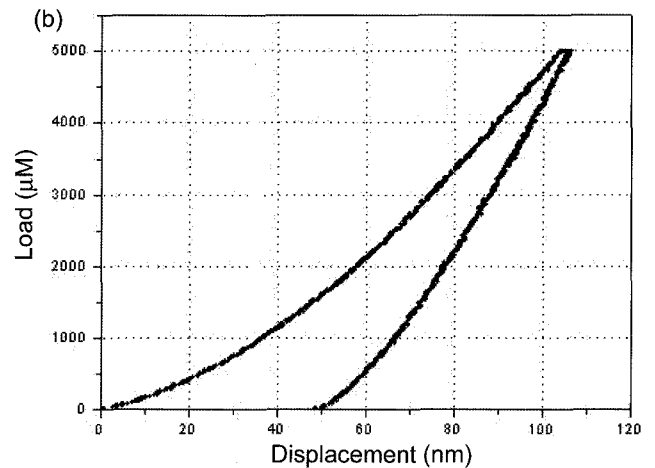
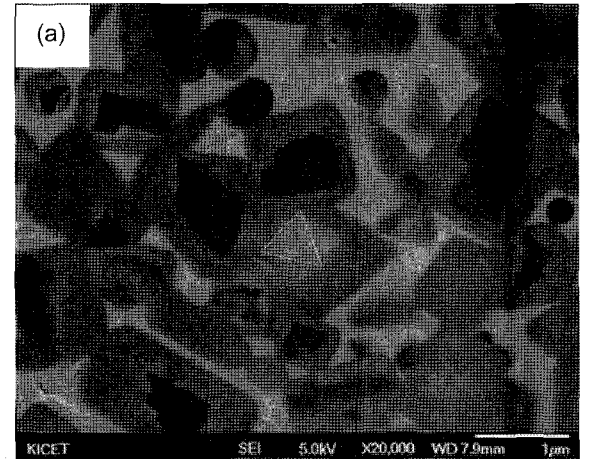


Fig. 2. (a) An SEM micrograph of an indentation mark on $Ti(C_{0.7}N_{0.3})-15WC-20Ni$ (in wt.%) cermet by nanoindentation with 5 mN load, (b) a typical load-displacement curve, and (c) A scatter diagram which shows the hardness distribution of around 120 indentation points.

할 수 있고 압입깊이는 표준시편인 퀴츠유리로 보정된 압입자의 형상으로부터 접촉면적으로 환산되어 경도를 구할 수 있다.¹⁰⁾ 압입이 제거되는 곡선부분을 외삽하여 그

기울기로부터는 일정한 탄성변형을 일으키는데 필요한 하중값인 탄성계수를 구할 수 있는데 본 연구에서는 경도값에 국한하여 논의하겠다. 나노인덴테이션의 경우 측정된 압입깊이로부터 접촉면적을 계산하므로 압입자의 형상이 이상적인 삼면체에서 벗어나는 것을 보정하는 것이 필수적이며 압입깊이가 얇을수록 측정된 경도값이 증가하는 경향을 보이는 인덴테이션 크기 효과 (Indentation size effect)는 금속에 대한 압입시험의 경우에 두드러지는 것으로 알려져 있다.^{10,19)}

이와 같이 나노인덴테이션을 이용하여 재료의 국부적인 부분에 압입시험을 하더라도 경질상과 결합상으로 이루어진 세멧의 불균질한 미세구조로 인하여 측정된 경도값이 분포를 가지게 된다. Fig. 2(c)는 $Ti(C,N)-WC-Ni$ 세멧에 5 mN 하중으로 임의의 압입시험했을 때 얻어진 나노인덴테이션 경도값의 산포도를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 경도값이 10~30 GPa에 걸쳐 분포하고 있는데 최빈값이 하나 이상인 산포를 보인다. 나노인덴테이션을 이용하여 복합소재의 경도를 평가하는 경우에 이와 같은 산포가 종종 나타나는데 그 거동은 압입하중과 소재의 경도로 결정되는 압흔의 크기와 소재의 입자크기 및 서로 다른 상 간의 부피비에 의존하는 것으로 사료되며 불균질하지만 비교적 단순한 미세구조인 WC-Co 소재

에 나노인덴테이션을 행한 경우에는 경도의 산포가 bimodal 거동을 나타내기도 한다.¹¹⁾

Fig. 3은 압입위치가 서로 다른 압흔의 미세구조를 나타낸 것이다. 그림에서 보여주는 것과 같이 구성상의 경도값이 다르므로 위치에 따라 압흔의 크기가 달라지고 들이상의 구성상에 걸쳐서 압입되는 경우도 발생한다. 앞에서 언급한 바와 같이 세멧의 특징 중 하나인 불균질한 미세구조로 인해 임의로 압입시험을 행하면 구해지는 경도값이 산포를 가지게 되고 이러한 물성치들로부터 경질상과 결합상의 물성을 분리하기 위해서는 압입시험 후 압흔의 미세구조 관찰이 필수적이다.¹²⁾ 본 연구에서는 각 시편에 대하여 5 mN의 하중으로 5 μm 간격을 두고 45회의 압입시험을 15 \times 3 격자모양으로 행한 후 전자현미경을 이용해 압흔의 위치를 확인해 경질상과 결합상의 경도값을 분리하여 평가하였다. Fig. 3에서도 알 수 있듯이 임의로 압입시험을 하게 되면 절반이상의 압흔은 경질상/결합상, 유심/주변조직 혹은 서로 다른 입자사이에 걸쳐서 위치하였고 미세구조상에서 적지 않은 면적을 차지하는 $Ti(C,N)$ 유심에 압흔이 위치하는 경우는 드물었다.

Fig. 4는 나노인덴테이션과 미세구조관찰을 통해서 얻은 $Ti(C_{0.7}N_{0.3})-25WC-20Ni$ 의 압입위치에 따른 경도의 산포도와 조성에 따른 경질상과 결합상의 나노인덴테이션

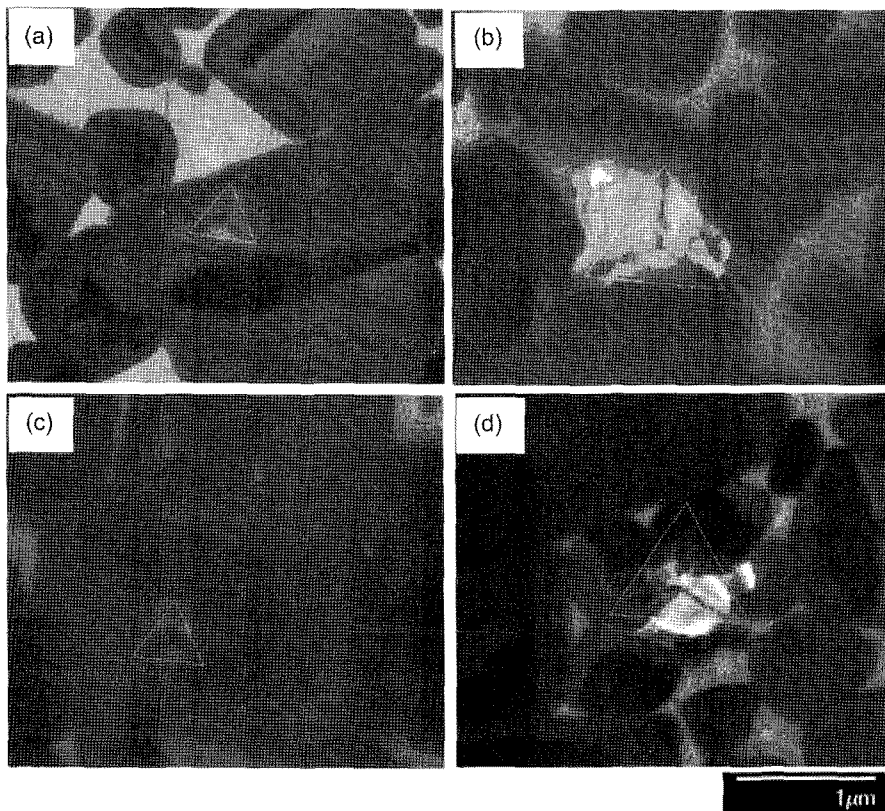


Fig. 3. SEM micrographs of indentation marks on various sites in $Ti(C_{0.7}N_{0.3})-WC-Ni$ cermets using nanoindentation with the load of 5 mN : (a) on the rim, (b) on the binder, (c) on the rim and the core, and (d) on the rim and the core.

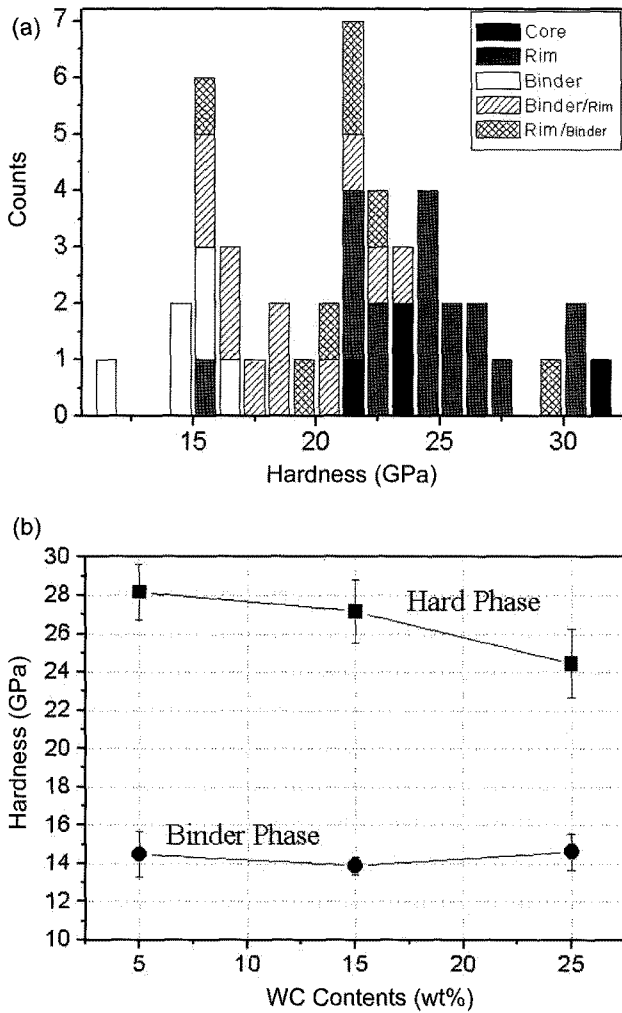


Fig. 4. (a) A scatter diagram which shows the hardness distribution of 45 indentation points on $Ti(C_{0.7}N_{0.3})-25WC-20Ni$ cermet and (b) hardness values of $Ti(C_{0.7}N_{0.3})-WC-Ni$ cermets measured by nanoindentation with 5 mN load.

경도를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)에서 둘 이상의 구성상에 걸쳐서 압입된 경우에는 압흔의 중심이 위치한 구성상의 명칭을 앞에 표시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 결합상이나 경질상에 단독으로 압입시험이 이루어진 빈도는 전체 압입시험의 절반에도 미치지 못했으며 특히 경질상 중 유심의 경우 미세구조분석을 통해 얻은 결과로는 20~30%의 면적비를 차지하지만 압흔이 유심에만 존재하는 경우는 거의 관찰되지 않았다. 이러한 미세구조 분석을 통해서 얻은 $Ti(C_{0.7}N_{0.3})-xWC-20Ni$ (wt.%, $x=5, 15, 25$) 씨멧 구성상의 나노인덴테이션 경도값을 그림 4(b)에 나타내었다. 그림에서 보여주는 것과 같이 경질상(주변조직)은 WC 첨가량이 증가함에 따라 28~24 GPa 정도로 나노인덴테이션 경도가 감소하였고, 결합상은 조성에 관계없이 ~14 GPa 정도의 나노인덴테이션 경도를 나타내었다.

$Ti(C,N)-Ni$ 씨멧계에 WC가 첨가되면 소결성이나 인성이 향상되는 것으로 알려져 있는데³⁾ 본 연구의 결과에서는 WC가 $Ti(C,N)$ 과 함께 $(Ti,W)(C,N)$ 고용상을 형성할 때 고용상 내에 W의 양이 증가할수록 나노인덴테이션 경도가 낮아지는 것으로 드러났다. 또한, 문헌^{7,20)}에 $Ti(C_{0.7}N_{0.3})$, WC, Ni 비커스 경도값은 각각 26.3, 20.6, 5.14 GPa로 나타나며, 특히 결합상의 경우 본 연구에서 얻은 나노인덴테이션 경도값에 비해 낮게 나타났다. 이는 나노인덴테이션 측정시 압입자가 결합상에 압입되더라도 결합상을 둘러싸고 있는 경질상에 의하여 변형이 제한받는 것과 관련된다. 즉, 압입시험법으로 측정되는 경도가 외부하중에 의한 영구적인 변형에 저항하는 재료의 물리적 성질임을 감안하면 설명이 가능하다.

4. 결 론

본 연구에서는 $Ti(C_{0.7}N_{0.3})-WC-Ni$ 씨멧 구성상의 경도를 나노인덴테이션과 미세구조관찰을 통해 평가하였다. 경질상과 결합상의 서로 다른 성질의 구성상으로 이루어진 씨멧에 임의로 나노인덴테이션을 행하면 얻어지는 경도값은 비교적 넓은 범위의 산포를 나타내며 구성상의 물성을 구분해내기 위해서는 압입시험 후 압흔 관찰이 필수적이었다. 측정된 경질상과 결합상의 나노인덴테이션 경도는 각각 약 24~28 GPa, 14 GPa이었고 WC 첨가량이 증가할수록 $(Ti,W)(C,N)$ 경질상의 나노인덴테이션 경도가 감소하는 경향을 보였다. 또한, 결합상의 나노인덴테이션 경도는 문헌의 비커스경도에 비해 높게 나타났는데 이는 압입에 의한 변형이 결합상을 둘러싸고 있는 경질상으로 인해 제한받기 때문인 것으로 사료된다.

Acknowledgment

본 연구는 요업기술원 기본정책연구사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. S. Y. Zhang, "Titanium Carbonitride-Based Cermets: Process and Properties," *Mater. Sci. Eng. A*, **163** 141-48 (1993).
2. E. B. Clark and B. Roebuck, "Extending the Application Areas for Titanium Carbonitride Cermets," *Refract. Met. Hard Mater.*, **11** 23-33 (1992).
3. P. Ettmayer, H. Kolaska, W. Lengauer, and K. Dreyer, " $Ti(C,N)$ Cermets-Metallurgy and Properties," *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, **13** 343-51 (1995).
4. H. Matsubara, S. Shin, and T. Sakuma, "Grain Growth of TiC and $Ti(C,N)$ Base Cermet During Liquid Phase Sintering," *Solid State Phenom.*, **25&26** 551-58 (1992).
5. H. Suzuki, H. Matsubara, and T. Saitoh, "The Microstruc-

- tures of $Ti(C,N)$ - Mo_2C -Ni Cermet Affected by WC Addition," *Jpn. Soc. Powder Powder Metall.*, **31** [7] 236-40 (1983).
6. H. Suzuki and H. Matsubara, "Some Properties of $Ti(C,N)$ -WC-Ni Alloy," *Jpn. Soc. Powder Powder Metall.*, **33** [4] 199-203 (1986).
 7. L. E. Toth, "Transition Metal Carbides and Nitrides," pp. 6-7, Academic Press, New York and London, 1971.
 8. W. Lengauer, S. Binder, K. Aigner, P. Etmayer, A. Guillou, J. Debuigne, and G. Groboth, "Solid State Properties of Group IVb Carbonitrides," *J. Alloys & Comp.*, **217** [1] 137-47 (1995).
 9. M. F. Doerner and W. D. Nix, "A Method for Interpreting the Data from Depth-Sensing Indentation Instruments," *J. Mater. Res.*, **1** 601-9 (1986).
 10. W. C. Oliver and G. M. Pharr, "An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments," *J. Mater. Res.*, **7** [6] 1564-83 (1992).
 11. M. G. Gee, R. Roebuck, P. Lindahl, and H-O Andren, "Constituent Phase Nanoindentation of WC/Co and $Ti(C,N)$ Hard Metals," *Mater. Sci. & Eng. A*, **253** 128-36 (1996).
 12. S. Guicciardi, L. Silvestroni, G. Pezzotti, and D. Sciti, "Depth-Sensing Indentation Hardness Characterization of HfC-Based Composites," *Adv. Eng. Mater.*, **9** [5] 389-92 (2007).
 13. X. Shi, H. Yang, G. Shao, X. Duan, and Z. Xiong, "Nanoindentation Study of Ultrafine WC-10Co Cemented Carbide," *Mater. Char.*, **59** 374-79 (2008).
 14. F. Qi and S. Kang, "A Study on Microstructural Changes in $Ti(C,N)$ -NbC-Ni Cermets," *Mat. Sci. & Eng. A*, **251** [1-2] 276-85 (1998).
 15. S. Ahn and S. Kang, "Effect of VC Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of $Ti(C,N)$ -Based Cermet," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **35** [12] 1316-22 (1998).
 16. K. W. Chae, D. I. Chun, D. Y. Kim, Y. J. Baik, and K. Y. Eun, "Microstructural Evolution During the Infiltration Treatment of Titanium Carbide Iron Composite," *J. Am. Ceram. Soc.*, **73** [7] 1979-82 (1990).
 17. D. I. Chun, D. Y. Kim, and K. Y. Eun, "Microstructural Evolution During the Sintering of TiC - Mo - Ni Cermets," *J. Am. Ceram. Soc.*, **76** [8] 2049-252 (1993).
 18. S. Kim, "Dissolution-Reprecipitation Related Phenomena in Cermet System," pp. 58-63, Ph.D. Thesis, Seoul National University, Seoul, 2006.
 19. L. Qian, M. Li, Z. Zhou, H. Yang, and X. Shi, "Comparison of Nano-indentation Hardness to Microhardness," *Surf. Coat. Technol.*, **195** 264-71 (2005).
 20. A. Grosjeana, M. Rezrazia, U. J. Takadomb, and P. Bercot, "Hardness, Friction and Wear Characteristics of Nickel-SiC Electroless Composite Deposits," *Surf. Coat. Tech.*, **137** 92-6 (2001).