Composites Research

Vol. 32, No. 3, 158-162 (2019)
DOI: http://dx.doi.org/10.7234/composres.2019.32.3.158
ISSN 2288-2103(Print), ISSN 2288-2111(Online)

Paper

용융가압함침 공정으로 제조된 고체적률 TiC–Inconel 718 금속복합재료의 미세조직 및 특성

조승찬*† · 이영환* · 고성민* · 박현재* · 이동현* · 신상민* · 조일국** · 이상복* · 이상관*†

Microstructure and Properties of TiC-Inconel 718 Metal Matrix Composites Fabricated by Liquid Pressing Infiltration Process

Seungchan Cho*†, Yeong-Hwan Lee*, Seongmin Ko*, Hyeonjae Park*, Donghyun Lee*, Sangmin Shin*, Ilguk Jo**, Sang-Bok Lee*, Sang-Kwan Lee*†

ABSTRACT: Titanium carbide (TiC) reinforced Inconel 718 matrix composites were successfully fabricated by a novel liquid pressing infiltration process. Microstructure and mechanical properties of the fabricated 55 vol% TiC–Inconel 718 composite are analyzed. The composite exhibits superior mechanical properties, such as hardness and compressive strength as compared with Inconel 718. It is believed that Mo and Nb, which are alloying elements in the matrix, diffuse and solidify into the TiC reinforcement, resulting in generation of core-rim structure with excellent interfacial properties.

초 록: 본 연구에서는 용융가압함침 공정을 이용하여 고체적률의 TiC 입자가 균일 분산된 Inconel 718 금속복합재료를 제조하고, 미세조직 및 기계적 특성을 분석하였다. 약 55 vol%의 TiC가 균일하게 분산된 TiC-Inconel 718 복합재료를 제조함으로써 Inconel 718 대비 우수한 경도 및 압축강도 특성을 나타내었으며, 이는 기지에 고용된 합금원소인 Mo 및 Nb이 TiC 강화재 내부로 확산·고용되어 우수한 계면 특성을 가지는 core-rim 구조의 TiC 형성에 의한 것으로 판단된다.

Key Words: 금속복합재료(Metal matrix composite), 탄화 타이타늄(Titanium carbide), 인코넬(Inconnel), 용융가압함침(Liquid pressing infiltration)

1. 서 론

최근 자동차, 항공, 발전 등 다양한 산업 분야에서는 연료의 가격인상 및 에너지 저감 정책 등으로 인해 에너지의 효율을 높이는데 많은 연구를 하고 있다. 이러한 이유로 인해 재료의 경량화가 필수적이고, 추가로 고강도, 고기능성 소재에 대한 요구가 증가하고 있다[1,2].

Inconel 718은 대표적인 오스테나이트계 니켈(Ni)기 초합금 중 하나로서 상온에서 최대 700°C까지 광범위한 온도에 걸쳐 우수한 기계적 물성을 가지는 재료로 알려져 있다[3]. 이러한 특징으로 인해 Inconel 718 합금은 자동차 및 항공기 엔진 부품으로 많이 활용되는 재료이다. Inconel 718의 우수한 기계적 물성은 다양한 합금원소 첨가에 의한 고용강화, 석출강화, 분산강화와 같은 강화기구에 의한 것으로

Received 17 May 2019, received in revised form 27 June 2019, accepted 28 June 2019

*Composites Research Division, Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea
*†Composites Research Division, Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea,
Corresponding authors, Seungchan Cho (E-mail: sccho@kims.re.kr) and Sang-Kwan Lee (E-mail: lsk6167@kims.re.kr)
**Department of Advanced Materials Engineering, Dong-Eui University, Busan, Korea

알려져 있으며[4], 보다 높은 온도범위까지 우수한 구조물성을 확보하기 위한 연구개발이 계속 진행되고 있지만, 가벼우면서 고강도를 동시에 달성할 수 있는 신소재 개발이 계속해서 요구되고 있다. 이러한 경량 고강도 소재개발 방법 중의 하나로 금속복합재료(metal matrix composite; MMC)에 관한 관심이 증가하고 있다. 금속복합재료는 고경도의 세라믹입자를 연성의 기지재와 결합시켜 이들의 장점을 동시에 구현할 수 있음으로 Ni기 초합금 복합재료를 개발할 경우, 우수한 고온 물성을 가지는 경량 Ni기 금속복합재료 개발이 가능할 것으로 예상된다.

다양한 세라믹계 강화재 중에서 TiC는 낮은 밀도(4.93 g/cm^3), 높은 녹는점(3067°C), 높은 경도(3200 kg/mm^2) 및 높은 기계적 강성을 지니며 특히, Ni기 초합금과 적절한 젖음성을 갖기 때문에 Ni 금속복합재료의 강화재로서 활용성이 높다[5].

본 연구에서는 용융가압함침(liquid pressing infiltration) 공정을 이용하여 TiC–Inconel 718 금속복합재료를 제조하였다. 제조된 금속복합재료는 미세조직 분석과 물성 평가를 통해 복합재료의 건전성을 확인하였으며, 다양한 산업분야에서 적용될 수 있는 가능성을 살펴보았다.

2. 실험 방법

2.1 TiC 프리폼 (preform)

강화재로는 평균 입도가 3.2 μm인 TiC 분말(Changsha Langfeng Metal Materials Co., Ltd)을 이용하였다. TiC 분말을 일축가압 성형기를 이용하여 80 MPa 압력을 가해 지름 55 mm, 높이 25 mm의 크기의 프리폼 형상을 만들고 아르곤 분위기에서 1400°C, 2시간 동안 소결하여, TiC의 체적률이 약 60%인 TiC 프리폼을 제작하였다. TiC 프리폼의 입자들은 약한 결합력(weak-bonded TiC preform)을 유지하기 때문에, 액상의 Inconel 718이 함침되는 단계에서 TiC 입자들 사이의 결합만 끊어질 뿐 초기 형상은 유지하면서 균일 분산/분포를 가지도록 하였다.

2.2 용융가압함침 TiC-Inconel 718 복합재료

본 연구에서는 독자 개발한 용융가압함침장비를 이용하여 TiC–Inconel 718 복합재료를 제조하였다. 챔버의 경우 최대 30 bar까지 가압이 가능하게 설계되어 있고, 최대 가열온도는 약 1800°C로 고온에서 고압의 압력을 부가할 수 있는 장비이다[6]. 상부 몰드에 Inconel 718 합금, 하부 몰드에 TiC 프리폼을 장입한 후 챔버 내부를 10^{-2} torr 수준의 진공상태로 유지시키면서 분당 8°C의 승온속도로 1600°C까지 가열하였다. Inconel 718 기지합금이 용해된 후 상부의 Inconel 718 용탕을 하부 프리폼이 있는 몰드로 장입 시킨 후에 아르곤 가스를 이용하여 10 bar의 압력으로 가압 함침하고 일정 시간을 유지한 후 로냉 하여 직경 100 mm, 높이 50 mm 크기의 용융가압함침 TiC-Inconel 718 복합재료를 제조하였다.

2.3 미세조직 및 특성 평가

용융가압함침 공정으로 제조된 TiC-Inconel 718 복합재료의 건전성을 평가하기 위해 주사 전자 현미경(JSM-6610LV, JEOL) 및 투과 전자 현미경(JEM-2100F, JEOL)을 이용하여 미세조직을 분석하였다. 아르키메데스 방법을 이용하여 밀도를 측정하였으며, 인장 및 압축강도는 만능 시험기(5882 model, Instron)를 이용하여 측정하였다. 경도는 로크웰 경도기(HR-210MR, mitutoyo)를 사용하여 경도 값을 5번 측정하고 평균값을 계산하였으며 상분석을 위해 X선회절분석(D/Max-2500, Rigaku)을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

제조된 TiC-Inconel 718 금속복합재료의 미세조직을 살펴 보기위해 SEM 분석을 실시하였고 이를 Fig. 1에 나타내었다 TiC-Inconel 718 복합재료의 SEM 이미지를 살펴보면 5~15 μm 크기의 TiC 강화재가 기지 내에 균일하게 분산되어 있는 모습을 살펴 볼 수 있다. 이미지 분석을 통하여 계산된 TiC 강화재의 체적률은 약 55%로 프리폼 대비 체적률이 약간 감소하였음을 알 수 있는데, 이는 가압성형시 TiC 입자 사이로 용융 Inconel이 침투되면서 약하게 물리적으로 접촉되어 있는 TiC 입자들이 벌어지면서 용탕이 침투된

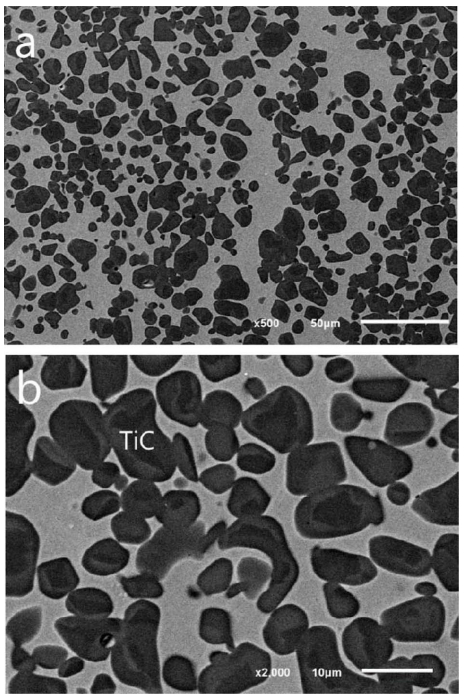

Fig. 1. Microstructure of as-infiltrated TiC-Inconel 718 composites: (a) low magnification and (b) high magnification

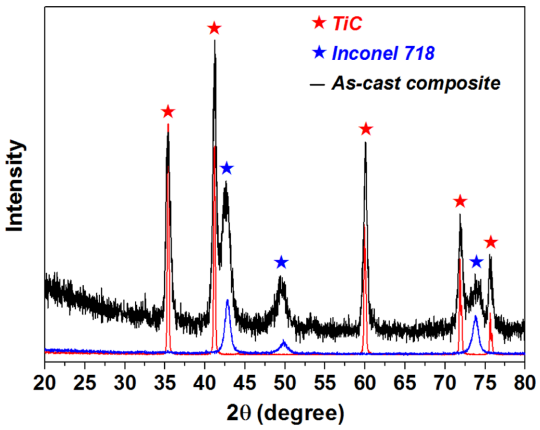

Fig. 2. XRD patterns of TiC, Inconel 718, and TiC-Inconel 718 composites

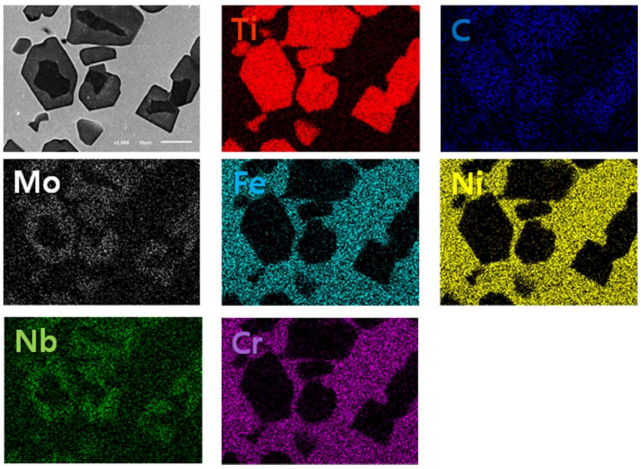

Fig. 3. SEM-EDS mapping images of TiC-Inconel 718 composites

결과로 판단된다. XRD 분석 결과 TiC 및 Inconel 718의 피크만 명확하게 관찰되었으며 미세 석출물 등의 피크는 관찰되지 않았다(Fig. 2).

Fig. 3은 SEM-EDS mapping 이미지를 나타낸 결과로 TiC는 짙은 색의 중심부와 옅은색의 외곽부로 음영이 나뉘어 있는 것을 알 수가 있다. 이를 EDS mapping을 통하여 자세히 분석한 결과, TiC 입자의 안쪽은 TiC로 분석되었으며, 바깥쪽에는 TiC에 Nb 및 Mo가 다량 고용되어 있는 core-rim 구조인 것을 확인할 수 있다. 이는 Inconel 718 기지 내에 합금원소로 포함된 Nb 및 Mo가 제조 과정 동안 TiC 입자 내로 확산되고 응고과정에서 고용되어 형성된 것으로 판단된다.

TiC 강화 금속복합재료에 Mo이 첨가될 때, TiC와 금속기지 간의 젖음성 및 TiC의 공유결합강도를 향상시킨다고 보고된 바 있다[7,8]. 또한, TiC 입자 표면에서 Nb이 Ti의 치환형 원소로 작용하여 고용체 탄화물을 형성을 통한 강화 효과에 관한 연구도 보고되었다[9,10]. 따라서 이러한 Mo, Nb의 확산이 TiC 강화재가 Inconel 718 합금과 적절한 젖음성

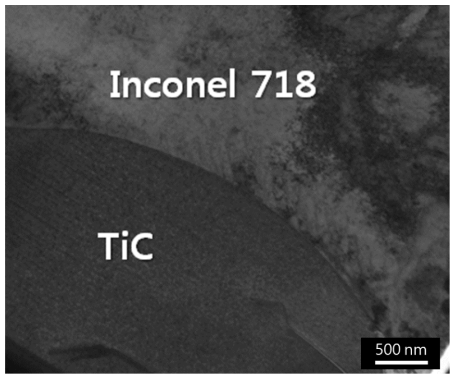

Fig. 4. TEM image of TiC-Inconel 718 composites

Table 1. Density and hardness of Inconel 718 and as-infiltrated TiC-Inconel 718 composites

Properties	Inconel 718	TiC-Inconel 718
Density (g/cm^3)	8.19	6.34
Hardness (HRC)	32.5	51.2

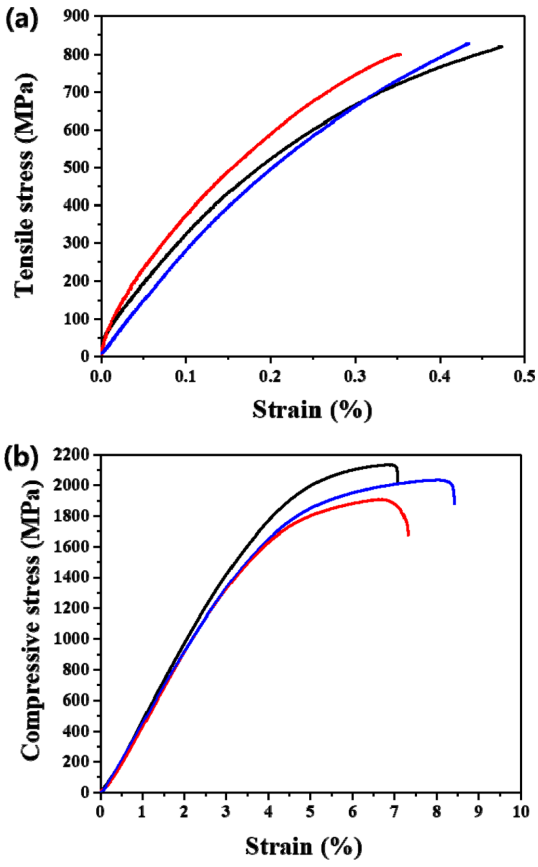

Fig. 5. (a) Tensile and (b) compressive stress-strain curves of TiC-Inconel 718 composites

을 갖게 하므로 Inconel 복합재료를 제조하는데 유리하게 작용하는 것으로 볼 수 있으며 복합재료의 물성 향상에 기

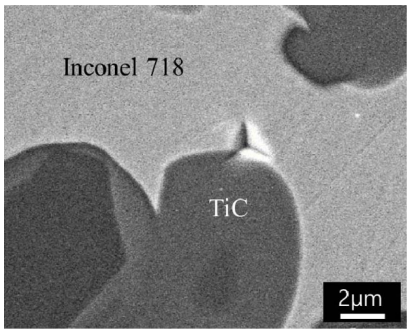

Fig. 6. SEM image of TiC-Inconel 718 composites after nanoindentation test

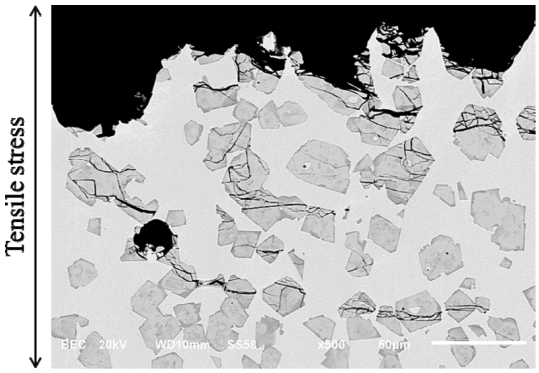

Fig. 7. SEM image of fracture surface TiC-Inconel 718 composites

여할 것으로 예상된다. Fig. 4의 TiC와 Inconel 718 계면을 분석한 TEM 결과에서도 TiC와 Inconel 718 기지합금이 밀착계면을 형성하고 있으며 기공 및 불순물 등의 결함이 없는 우수한 계면을 형성하고 있음을 알 수 있다.

용융가압함침 공정으로 제조된 55 vol% TiC-Inconel 718 복합재료의 밀도는 약 6.34 g/cm^{3}로 이론밀도 6.397 g/cm^3 대비 약 99.1%의 상대밀도를 나타내었으며 Inconel 718 대비 약 24% 경량임을 확인하였다. 경도는 51.2 HRC로 Inconel 718 대비 약 1.6배 높은 값을 나타내었다(Table 1).

또한, TiC-Inconel 718 복합재료의 상온 인장강도 및 압축강도를 3회씩 측정한 결과 상온인장강도는 평균 819 MPa, 상온압축강도는 2020 MPa을 나타내었다. 세라믹 강화재가 증가할수록 복합소재의 물성은 세라믹 거동을 나타내게 되고 인장강도가 감소한다는 보고가 있으며[11], 이는 강화재의 응집, 결함 및 계면 문제에 기인하는 것으로 판단된다.

하지만, 용융가압함침 TiC-Inconel 718 복합소재의 경우 nanoindentation test 후에도 TiC/Inconel 718 계면의 박리나 파단이 없는 것을 Fig. 6에서 알 수 있다. 따라서 TiC와 Inconel 718의 계면 특성이 우수함을 알 수 있으며 TiC 입자간 접촉 및 내부 결함에 의한 물성 감소가 예상되었다.

따라서 인장시편의 파단 미세조직을 분석하여 인장 파괴기구를 고찰하였다. Fig. 7은 TiC-Inconel 718 복합재료의 상온 인장 파단면 직하 미세조직이다. 계면박리 없이 TiC 입자 내부를 따라 파단이 발생한 것을 알 수 있어 효과적인 하중전달로 기지조직의 응력이 강화재에 잘 전달된 것을 알 수가 있다. 다만, 검은색으로 보이는 내부 결함 부위에서 우선적으로 파단이 발생하여 TiC 강화재의 파단으로 연결되는 것을 알 수가 있다. 따라서 공정 최적화를 통하여 내부 결함을 잘 제어할 경우 TiC-Inconel 718 복합재료의 인장강도는 기지합금 대비 상승할 것으로 예상되며, 열처리 공정을 통한 물성 극대화에 대한 연구도 진행할 계획이다. 따라서 본 연구에서는 용융가압함침 공정을 이용하여 TiC-Inconel 718 복합재료를 개발하였고, 미세조직 및 기초 물성 평가를 통하여 구조 소재로 적용 가능성을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 용융가압함침 공정을 이용하여 고체적률의 TiC-Inconel 718 금속복합재료를 성공적으로 제조하였다. 경도 및 압축시험 결과, Inconel 718 대비 우수한 경도 및 압축강도 특성을 보였으며, 계면에서의 균열 혹은 박리가 발생하지 않고 TiC 입자의 파괴가 관찰되어 건전한 계면 강도를 가지고 있음을 확인하였다. 이는 TiC의 균일 분산 및 기지에 고용된 합금원소인 Mo 및 Nb이 TiC 강화재 내부로 확산·고용되어 우수한 계면 특성을 가지는 core-rim 구조의 형성에 의한 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 민군겸용기술사업(14-CM-MP-04) 및 민군기술협력사업(NRF-2014M3C1A9060717)의 재원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Agrawal, S., Chose, A.K., and Chakrabarty, I., "Effect of Rotary Electromagnetic Stirring during Solidification of in-situ Al-TiB_2 Composites", *Materials and Design*, Vol. 113, 2017, pp. 195-206.
2. Ko, S., Park, H., Lee, Y.-H., Shin, S., Lee, D., Jo, I., Lee, S.-B., Lee, S.-K., and Cho, S., "Study on the Microstructure and Mechanical Properties of High Volume Fraction TiB_2-Al1050 Metal Matrix Composites", *Composites Research*, Vol. 32, 2019, pp.1-5.
3. Ma, W., Xie, Y., Chen, C., Fukanuma, H., Wang, J., Ren, Z., and Huang, R., "Microstructural and Mechanical Properties of High-performance Inconel 718 Alloy by Cold Spraying", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 792, 2019, pp. 456-467.
4. Sui, S., Chen, J., Ma, L., Fan, W., Tan, H., Liu, F., and Lin, X., "Microstructures and Stress Rupture Properties of Pulse Laser Repaired Inconel 718 Superalloy after Different Heat Treat-

ments", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 770, 2019, pp. 125-135.
5. Bakkar, A., Ahmed, M.Z.M., Alsaleh, A.N., Seleman, M. El-Sayed M., and Ataya, S., "Microstructure, Wear, and Corrosion Characterization of High TiC Content Inconel 625 Matrix Composites", *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 8, 2019, pp. 1102-1110.
6. Cho, S., Jo, I., Lee, S.-K., and Lee, S.-B., "Microstructure and Wear Characteristics of TiC-SKD11 Composite Fabricated by Liquid Pressing Infiltration Process", *Composites Research*, Vol. 30, 2017, pp. 209-214.
7. Kiviö, M., Holappa, L., Louhenkilpi, S., Nakamoto, M., and Tanaka, T., "Studies on Interfacial Phenomena in Titanium Carbide/Liquid Steel Systems for Development of Functionally Graded Material", *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 47, 2016, pp. 2114-2122.
8. Oh, N.-R., Lee, S.-K., Cho, S.-C., Jo, I.-G., Hwang, K.-C., Kim, D.-H., Cho, Y.-T., Suh, D.-W., and Hong, H.-U., "Temperature Dependency of the Tensile Characteristics and Transition of Fracture Behaviors in a Novel Infiltrated TiC-SKD11 Composites", *Korean Journal of Metals and Materials,* Vol. 55, 2017, pp. 156-164.
9. Shin, S.-G., "Ductile-Brittle Transition Property of Sintered TiC-Nb Composites", *Korean Journal of Materials Research*, Vol. 24, 2014, pp. 13-18.
10. Tsurekawa, S., Nakashima, M., Murata, A., Kurishita, H., and Yoshinaga, H., "Solid Solution Hardening of Titanium Carbide by Niobium and Zirconium at High-temperatures", *Journal of the Japan Institute of Metals and Materials*, Vol. 55, 1991, pp. 390-397.
11. Pagounis, E., and Lindroos, V.K., "Processing and Properties of Particulate Reinforced Steel Matrix Composites", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 246, 1998, pp. 221–234.