

ABO_w/AC4CH복합재료의 제조 및 기계적 특성

Manufacture and Mechanical Properties of ABO_w/AC4CH Composite Material

허 선 철*, 박 원 조*, 허 정 원**
SunChul Huh, WonJo Park, ChungWeon Hur

ABSTRACT

Metal matrix composites with whisker reinforcements have significant potential for demanding mechanical applications including defense, aerospace, and automotive industries. Especially, metal matrix composites, which are reinforced with aluminum borate whisker, have been used for the part of piston head in automobile because of good specific strength and wear resistance. Aluminum alloy-based metal matrix composites with whisker reinforcements have been produced using squeeze casting method, which is kind of an infiltration method. In this study, AC4CH-based metal matrix composites with Al₁₈B₄O₃₃ reinforcement have been produced using squeeze casting method, after T6 heat treatment, we evaluated mechanical properties of matrix and MMC composite were evaluated.

주요기술용어 : Reinforcement fiber(강화섬유), Matrix material(기지재), Preform(예비성형체), Squeeze casting method(고압응고주조법), Metal matrix composite(금속기 복합재료), Infiltration(함침)

1. 서 론

산업이 발전함에 따라 기존의 소재들보다 우수한 경량, 고강도의 소재 개발이 요구되고 있다. 특히 우주 항공, 자동차 부품 등에 사용되는 재료들은 높은 강도와 강성이 요구될 뿐만 아니라, 재료의 밀도도 중요한 인자로 인식되고 있다. 금속재료는 우주 항공산업, 고속전철, 자동차, 선박분야에 많이 사용하고 있으나, 기존의 소재보다 우수한 물성의 재료가 각 분야에서 요구되고 있다. 따라서 금속재료에 높은

강도의 세라믹 섬유나 분말, 휘스커(whisker) 등을 강화하여 재료의 강도를 보완하고자 하는 연구가 많이 진행되고 있다.^{1,2)} 그 중에 금속기 복합재료는 높은 비강도, 탄성도, 우수한 내피로 특성 등으로 우주, 항공 부품에서부터 자동차, 스포츠 용품 및 일반 산업 용품에까지 그 응용범위가 점점 확대되어 가고 있다. 그러나, 금속기 복합재료는 금속재료에 비해서 연성과 인성값이 낮기 때문에 낮은 인성치를 보완하기 위한 노력이 시도되고 있다. 복합재료와 연성이 좋은 금속 합금을 적층하면 복합재료의 적층 방향에 따라 이방성이 생길 수는 있으나, 인성이 개선되는 것을 기대할 수 있다.^{3,4)} 현재 금

* 회원, 경상대학교 수송기계공학부

** 안산공과대학 컴퓨터응용기계설계과

속기 복합재료의 적층에 대한 연구는 순금속과 합금을 조합한 것뿐 아니라, 입자강화 금속기 복합재료와 휘스커 강화 금속기 복합재료에 알루미늄 합금을 적층한 재료에 대해서도 행해지고 있고, 그 파괴거동이 보고되고 있다.⁵⁻⁷⁾ 이와 같이 다양한 복합재료 중에서도 ABO_w/AC4CH 복합재료는 탁월한 비강도와 탄성도를 가지고 있고, 실리콘 카바이드 휘스커(SiC whisker) 복합재료보다 단가가 저렴한 장점이 있다.^{1,3,6)} Fe⁸⁾ 등은 계면반응물이 Al/ABO_w 복합재료의 영률에 미치는 영향을 기술하고 있고, Yao⁹⁾ 등은 알루미늄 보레이트 휘스커(9Al₂O₃ · 2B₂O_{3w})와 Al 계면 반응생성물이 재료파괴거동에 미치는 효과에 대한 연구를 하였다. 그리고 이¹⁰⁾ 등은 Al/ABO_w-Al 복합재료의 적층수에 따른 충격특성을 연구하였다. 그러나, 국내에서는 ABO_w/AC4CH 복합재료에 대한 연구를 거의 찾아보기 힘들고, 국외에서도 ABO_w/AC4CH 복합재료에 관한 강도 평가는 거의 이루어지지 않은 상태이다.

따라서, 본 연구에서는 알루미늄 보레이트 휘스커(9Al₂O₃ · 2B₂O_{4w}) 프리폼(preform)에 알루미늄 AC4CH를 용탕단조(squeeze casting)법으로 침투(infiltration)시켜 ABO_w/AC4CH 복합재료를 제작하여 이 재료의 인장 및 기계적 시험을 하였다. 그리고 ABO_w/AC4CH 복합재료의 T6 열처리에 따른 강도와 연신율의 변화, 경도변화를 고찰하였다.

2. 제조방법 및 실험방법

2.1 복합재료의 제작

강화재료로 사용된 휘스커는 M12 type으로 일본의 西國化成(株)에서 생산된 것이며, 매트릭스 재료로 사용된 AC4CH는 순수한 Al-Si-Mg 계 합금에서 Fe의 함량을 0.2% 이하로 관리하여 인성을 높인 알루미늄 합금이다. 이 합금은 주물용 합금 중 중간 정도의 강도를 나타내지만, 연신율이 커서 인성이 우수하고 주조성도 양호하며, 내식성이 우수한 합금으로 여러 가

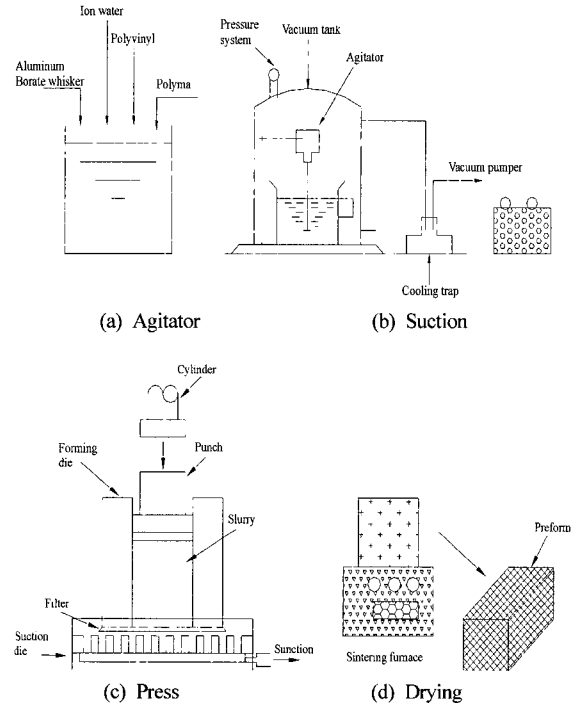


Fig. 1 Process of preform preparation

지 기계부품으로 많이 사용되며, 현재 자동차 휠용 합금으로 이용되고 있다.¹¹⁾ Fig. 1은 복합재료의 프리폼을 제작하기 위한 장치들을 나타내고 있다. a)는 교반장치, b)는 진공상태에서 휘스커를 기지재와 섞는 장치, c)는 압축성형기, d)는 건조와 소결된 복합재를 나타내고 있다. MMC의 강화재료인 알루미늄 보레이트 휘스커 150g과 물 1000cc 그리고 바인더(아니온계 폴리 아크릴 아미드) 0.1g을 잘 교반하여 휘스커 펄프(whisker water pulp)를 그림과 같이 압축해서 필터를 통해 수분을 제거하여 프리폼을 제작하며 프리폼의 물리적, 기계적 성질은 Table 1과 같다. 프리폼의 가열속도는 5°C/min로 가열하여 1200°C에서 4시간동안 유지하고 소결시킨 후로 냉하였고, 소결된 프리폼은 120×80×50(w×h×t)의 치수로 가공하였다.

2.2 Squeeze casting method

완성된 프리폼을 이용하여 용탕단조법에 의

Table 1 Physical properties of aluminum borate whisker

| Crystal structure | Orthorhombic |
|-------------------------------------|--------------|
| Lattice constant | |
| a axis | 7.69 |
| b axis | 15.00 |
| c axis | 5.66c |
| Whisker axis(μm) | c axis |
| Length (μm) | 10~30 |
| Diameter (μm) | 0.5~1.0 |
| Density (g/cm^3) | 2.93 |
| Melting point($^{\circ}\text{C}$) | 1420~1460 |
| Young's modulus(GPa) | 400 |
| Tensile strength(GPa) | 8 |
| Moh's hardness | 7 |

로 가열하고, b)의 스퀴즈 캐스팅 장치의 금형 내에 고정하였다. 이때의 금형온도는 200°C 이며 760°C 의 용탕을 금형에 주입하여 프레스 장치에서 가압력 83.4MPa , 가압속도 $50\text{m}/\text{sec}$, 가압시간 40sec 로 프리폼의 공극에 용탕을 침투, 응고시켜서 휘스커 강화복합재료를 제작하였다

2.3 T6 heat treatment

T6열처리는 일반적으로 용체화 처리 후에 시효처리를 행하며 AC4CH의 경우, 535°C 정도의 온도에서 수 시간 용체화 처리하여 인성을 개선한다.^{9,12)} 그 이유는 공정 Si가 용체화 처리시간이 길어짐에 따라 확산에 의해 각이 없어지고 둥그런 형상을 가지게 된다. 이로 인하여 응력집중이 작아져 인성이 개선되는 것이다. AC4CH의 경우, Mg_2Si 중간상의 석출에 따른 경화가 현저히 나타난다. 그 후, 충분한 인성이 요구되는 합금으로 사용될 경우 $140^{\circ}\text{C} \sim 160^{\circ}\text{C}$ 저온에서 수 시간 시효처리하여 아시효상태에서 사용되는 경우가 많다.¹²⁾ T6 열처리전의 재료에서 복합부 및 미복합부를 각각 $20 \times 20 \times 100(\text{mm})$ 를 절단한 후 내수연마로서 습식연마를 실시하고 열처리 조건은 Fig. 3과 같다. JIS H5202규정에 의해 535°C 까지 가열한 전기로(VJ-880DP)에 시료를 넣고 8시간 동안 유지시켰다. 용체화 시간이 경과한 후 수중에서 급냉하여 용체화시켰다. 시효처리는 155°C 로 가열한 전기로에서 용체화 하여 처리한 재료를 넣고 8시간 동

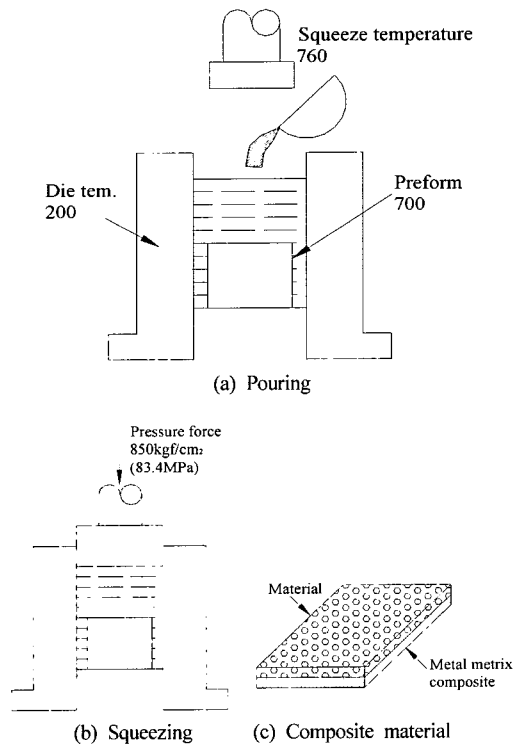


Fig. 2 Process of squeeze casting.

해 복합재료를 제작하였으며 제작과정은 Fig. 2와 같다. 먼저 a)에서 제작한 프리폼을 약 700°C

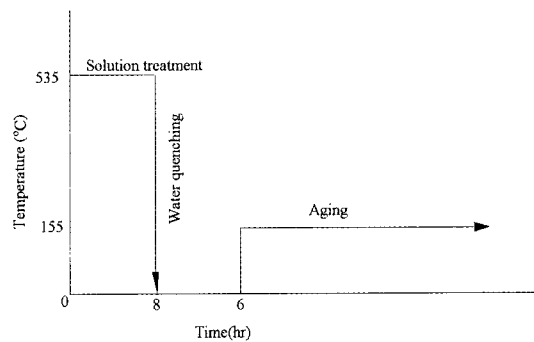


Fig. 3 Schematic diagram of T6 heat treatment

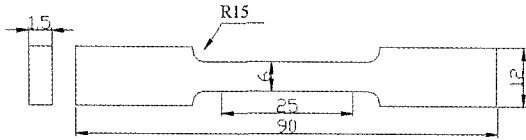


Fig. 4 Configuration of tensile test specimen (unit : mm)

안 유지하고 노냉으로 인공시효경화 처리를 하였으며 이상의 처리는 대기중에서 행하였다.

2.4 인장 시험편

제작된 복합재료의 인장강도 시험을 위해 판재로 제작한 인장시험편의 형상과 치수는 Fig. 4와 같고 시험조건은 평행부 길이를 25mm로 하여 크로스헤드 속도는 0.1mm/min의 속도로 시험을 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 AC4CH의 기계적 성질

실험에 사용된 기지재인 AC4CH의 기계적 성질은 아래와 같다. 전체 연신율은 16.8% 정도이나 인장강도와 항복강도가 거의 같은 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

3.2 복합재료의 미시조직

Fig. 5는 복합재료의 미시조직사진을 나타내고 있다. 그림에서 매트릭스에 휘스커가 균등

Table 2 Mechanical properties of AC4CH aluminum alloy

| | |
|------------------------------|--------------------------------------|
| Tensile strength (MPa) | 260 |
| Yield strength (MPa) | 260 |
| Young modulus (GPa) | Tensile : 72.5 Compression : 24.0 |
| Elongation (%) | 16.8 |
| Hardness (HB) | 70 |
| Density (g/cm ³) | 2.68 |

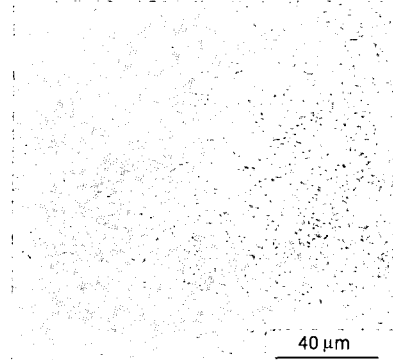


Fig. 5 Optical microstructure of composite material

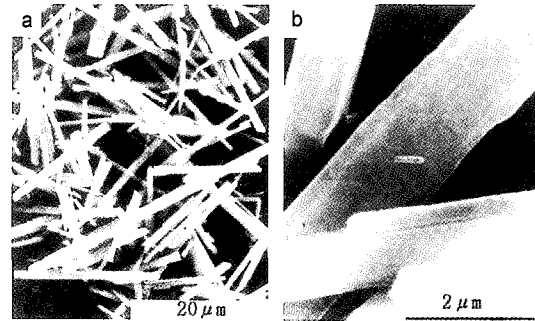


Fig. 6 SEM photographs of whiskers

하게 분포하고 있다는 것을 알 수 있으므로 비교적 스퀴즈 캐스팅법에 의한 제조 방법이 우수하다는 것을 알 수 있다.

3.3 휘스커만 추린 조직사진

복합재의 강화재는 보레이트 휘스커($9Al_2O_3 \cdot 2B_2O_3$)이고, 이 휘스커의 구조는 $Al_2O_3 \cdot SiO_3$ 계의 화합물로 되어 있으며 복합재에서 휘스커만을 추출한 조직사진을 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 휘스커가 비교적 균등하게 얽혀있는 모습을 알 수 있으며 열처리 전 상태이므로 휘스커의 표면은 비교적 매끈한 모습을 알 수 있다.

3.4 열처리재의 조직과 X선 분석

열처리는 535°C에서 8시간 유지한 후 수중에서 급냉하여 용체화 처리를 하였으며 반응생성

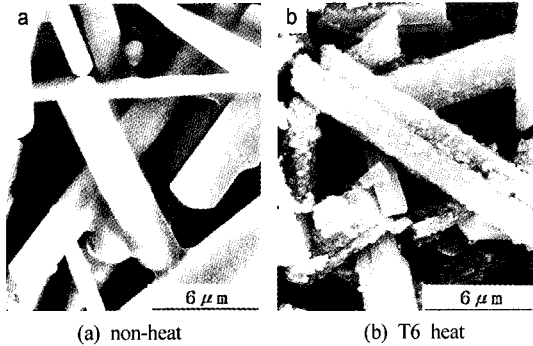


Fig. 7 SEM photographs of extracted whisker

물의 유무를 확인하기 위하여 비열처리재 및 T6열처리재에서 추출한 휘스커의 조직사진을 Fig. 7에 나타내었다. 휘스커의 정출에는 15% 회염산을 사용하였으며 추출은 약 1주일간 상온에서 실시하였다. a)는 열처리하지 않은 시험편의 조직사진을 나타내는 것으로서 비열처리재에서 추출한 휘스커의 표면은 반응생성물이 거의 확인되지 않았으며 비교적 매끈하고 깨끗한 표면을 유지하고 있다. b)는 T6열처리한 시험편의 조직사진을 나타내는 것으로서 T6열처리재에서 추출한 휘스커 표면은 거친 형상의 반응생성물이 생성되었음을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과의 원인 중에서 시차 열분석(DTA)에서 발열반응이 일어났던 온도를 반응생성물의 임계온도로 결정하면 될 것으로 생각한다.

그리고, T6열처리에 의해 휘스커의 표면에 많은 반응생성물이 확인되었기 때문에 반응생성물의 종류를 알아보기 위해 X선 회절시험(XRD: X-ray diffraction)한 결과에서 $MgAl_2O_4$ 의 회절피크가 나타나는 것을 확인할 수 있었으므로 $MgAl_2O_4$ 의 spinal이 MMC의 강도에 큰 영향을 미칠 것으로 생각한다.

기지재인 AC4CH 합금 및 MMC의 T6 열처리 전·후의 조직사진을 Fig. 8에 나타내었다. MMC는 기지재 중에서 휘스커가 비교적 균일하게 분산되어 있는 것으로 관찰되었으며, 휘스커 상호간에 석출물이나 정출물이 MMC보다

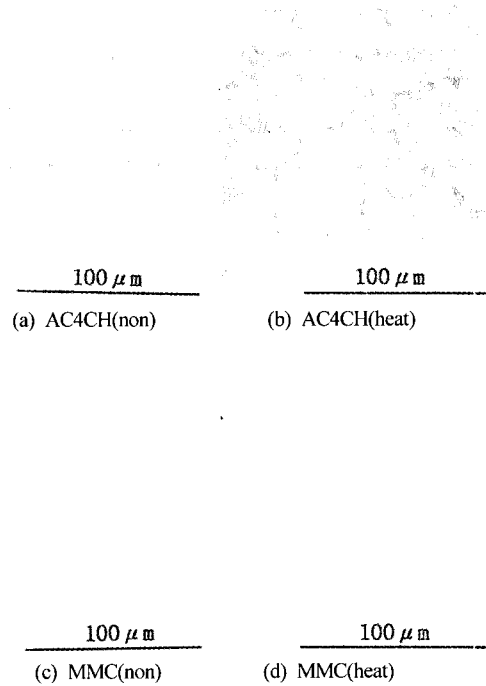


Fig. 8 SEM photographs of MMC and AC4CH structure

는 미세하지 못하다. 따라서 복합화에 의해 석출물이나 정출물의 미세화는 기계적인 형상에 기여할 것으로 기대된다. 한편, T6 열처리한 AC4CH는 T6열처리전보다도 조직이 미세하며 MMC는 시효처리에 의해 석출물의 형상, 분포 및 밀도의 변화는 그다지 명확하지 않으나 조대화 되어 있는 것으로 확인되었다.

3.5 Aging time에 따른 경도결과

aging time에 따른 비커스 경도 결과를 알기 위해 AC4CH와 MMC에 대한 경도 측정결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 AC4CH의 경우 aging time에 따른 경도변화가 크나 MMC의 경우 거의 유사한 값을 나타내고 있다. 또한 AC4CH와 MMC 모두 aging time이 8시간이 가장 높은 경도값을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 T6열처리의 경우 aging time을 8시간으로 고정하여 기계적 시험을 하였다.

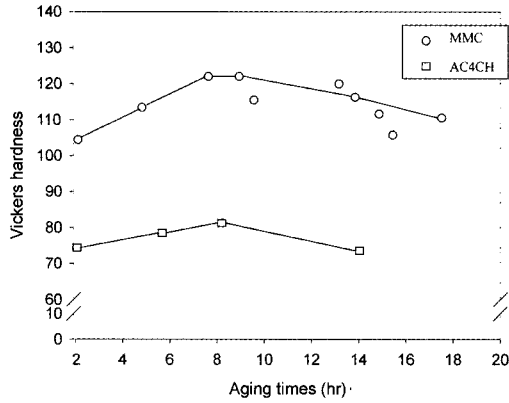


Fig. 9 Variation of vickers hardness with aging time

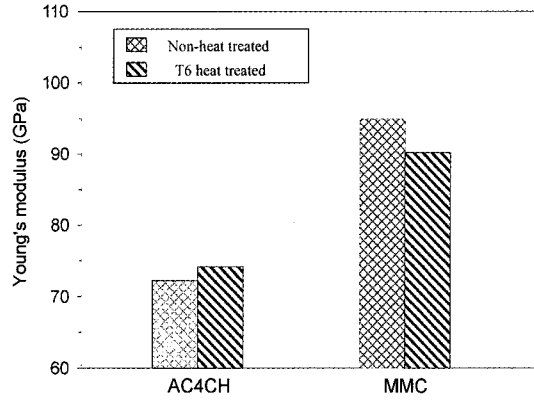


Fig. 11 Young's modulus of AC4CH matrix and MMC

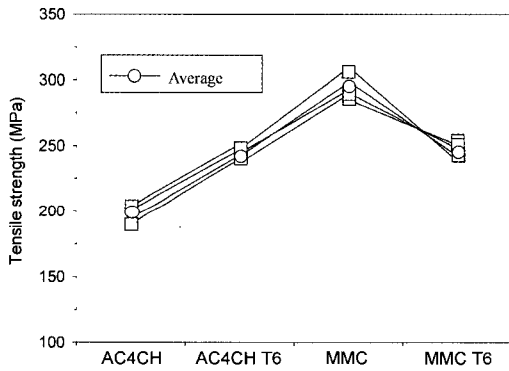


Fig. 10 Tensile strength of AC4CH and MMC

3.6 인장시험 결과

T6열처리 전의 AC4CH와 MMC 그리고 T6 열처리 후의 AC4CH와 MMC의 인장강도 특성을 Fig. 10에 나타내었다.

그림에서 보는 것처럼 AC4CH의 경우는 열처리전에 비해 열처리 후가 인장강도가 증가하고 있으며 MMC의 경우는 열처리전에 비해 열처리 후가 인장강도가 감소하고 있다는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 7에서 설명한 반응생성물인 MgAl₂O₄인 spinal 때문에 MMC의 경우 인장강도가 저하하는 것으로 생각한다.

3.7 탄성계수 측정 결과

열처리전과 열처리 후의 MMC와 AC4CH 기지의 탄성계수 측정결과를 Fig. 11에 나타내

었다. 그림에서 AC4CH는 열처리전에 비해 열처리 후가 탄성계수 값이 증가하고 있으나 MMC의 경우 열처리 후의 탄성계수값이 감소하고 있다는 것을 알 수 있다.

3.8 비커스 경도 측정 결과

MMC와 AC4CH 각 소재의 열처리 전·후의 비커스 경도결과를 Fig. 12에 나타내었다. AC4CH의 경우 열처리전에 비해 열처리후가 경도값이 증가하였으나 MMC의 경우 열처리후가 경도값이 감소하고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 MMC가 AC4CH에 의해 열처리전의 경우는 약 2배 정도 증가하였고 열처리 후는 약 40% 정도 증가하였다는 것을 알 수 있다.

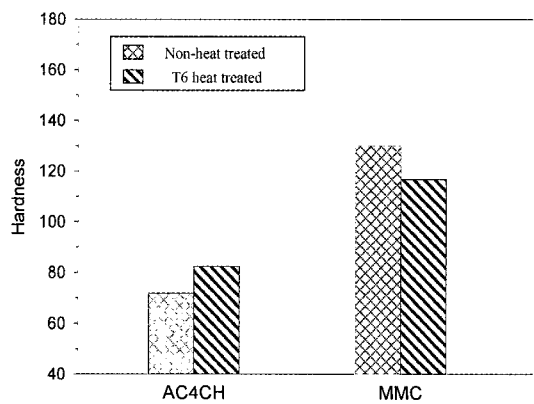


Fig. 12 Vickers hardness of AC4CH matrix and MMC

4. 결론

알루미늄 보레이드 휘스커 프리폼에 알루미늄 AC4CH를 용탕단조법으로 침투시켜 MMC를 제작하여 기계적 성질과 열처리 전·후의 기계적 특성을 시험한 결과는 다음과 같다.

1) 기지재 AC4CH의 인장강도는 200MPa 이고 MMC의 경우 300MPa로서 인장 강도가 1.5 배 이상 증가하였다.

2) AC4CH의 경우 T6 열처리 후가 열처리전에 비해 인장강도, 연신율, 경도값이 증가하였으나 MMC의 경우 열처리 후가 열처리 전에 비해 감소하였다.

3) AC4CH와 MMC 모두 T6 열처리 후 aging time이 8시간이 가장 높은 경도값을 나타내었다.

4) MMC의 경우 열처리 후가 열처리전에 비하여 기계적 특성들이 감소하고 있으므로 T6 열처리 온도 535°C는 부적합하다는 것을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국 21 사업에 의해 지원되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) M. R. Bache, W. J. Evans and I. Uygur, "Fatigue Life Predictions for Notch Geometries in Particle Reinforced Metal Matrix Composites", *Material Science and Technology*, Vol.14, pp.1065-1069, 1998.
- 2) S. Y. Chang, T. Hiroyasu and K. Akihiko, "Mechanical Properties and Fracture Process of SiC_w/Mg Composites Produced by Squeeze Casting and Extrusion", *Materials Transaction, JIM*, Vol.38, No.1, pp.18-27, 1997.
- 3) K. Yoshida and T. Yano, "Processing and Microstructure of Silicon Carbide Fiber Reinforced Silicon Carbide Composite by hot-pressing", *Journal of Nuclear Materials*, pp. 258-263, 1998.
- 4) M. Enoki and B. N. Kim, "Crack Propagation Behavior of Ni/NiAl Laminate Materials", *J. Japan Inst. Metals*, Vol.63, No.7, pp. 838-843, 1999.
- 5) P. Spriet and G. Habarou, "Application of Continuous Fiber Reinforced Ceramic Composites in Military Turbojet Engines", *Pap. Am. Soc. Mech. Eng.*, 96-Gt-286, pp.1-13, 1996.
- 6) W. S. Gibbs, J. J. Petrovic and R. E. Honnell, "SiC Whisker MoSi₂-matrix Composite", *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, Vol.8, pp.645-648, 1987.
- 7) J. Kajuch, J. Short and J. J. Lewandowski, "Deformation and Fracture behavior of Nb in Nb₅Si₃/Nb laminate toughness", *Acta metall. mater.*, Vol.43, pp.1955-1967, 1995.
- 8) W. D. Fei, X. D. Jiang, C. Li and C. K. Yao, "Effect of Interfacial Reaction on the Young's Modulus of Aluminium Borate Whisker Reinforced Aluminium Composite", *Journal of Materials Science letters*, Vol.15, pp.1966-1968, 1996.
- 9) C. K. Yao, W. D. Fei and X. D. Jiang, "Effect of Interfacial Reaction on Fracture Behaviour of Aluminium Borate Whisker Reinforced Aluminium Composite", *Materials Science and Technology*, Vol.13, pp.918-922, 1997.
- 10) 李常秘, 吉田誠, 佐佐木元, 福永秀春, "Al18 B4O33/Al 複合材料とアルミニウムの積層材料の 衝撃特性に及ぼす積層構造の 影響", *Journal of Japan Institute of Light Metals*, Vol. 48, No.5, pp.232-236, 1998.
- 11) 이지환, 이정중, 김병일, 배차현, "비철금속 재료", 원창출판사, pp.173-218, 1995.
- 12) L. F. Mondolfo, "Aluminium alloys; structure and properties Met", Vol.3, pp.369-375, 1976. "Mechanical Properties and Fracture Process of SiC_w/Mg Composites Produced by Squeeze Casting and Extrusion", *Materials Transaction, JIM*, Vol.38, No.1, pp.18-27, 1997.