

■■■■■■■■■■  
**論 文**  
 ■■■■■■■■■■

## 다공질 Ni 및 Ni-Cr 으로 강화한 AC4C 복합재료의 제조 및 특성연구

김용현\* · 김억수\*\* · 여인동\*\*\* · 이광학

### A Study for Characteristic and Manufacturing of Porous Ni/AC4C and Ni-Cr/AC4C Composites

Young-Hyun Kim\*, Eok-Soo Kim\*\*, In-Dong Yeo\*\*\* and Kwang-Hak Lee

#### Abstract

Ni and Ni-Cr porous metals which are estimated to be easy to fabricate by squeeze casting are used as strengtheners for composite materials. As a matrix material, Al-7%wtSi-0.3 wt%Mg(AC4C) has been used. In case of Ni/AC4C and Ni-Cr/AC4C composite, 750°C melt temperature and minimum 25 MPa squeezing pressure are needed to produce sound composite materials. The observation of interfacial reaction zone at various heat treatment condition showed that solutionizing temperature of above 520°C, the interfacial reaction zone increased proportionally with increasing heat treatment time and reaction products formed by interfacial reaction are mainly composed of  $Al_3Ni$  and  $Al_3Ni_2$  phases. The tensile strength of Ni/AC4C and Ni-Cr/AC4C composite is lower than the matrix metal and this can be explained by the brittle intermetallic compounds formed at the interface of Ni and Ni-Cr reinforcements. But the properties of hardness, wear resistance and thermal expansion are better than the matrix due to the strengthening effect of Ni-Cr porous metals. (Received December 8, 1999)

#### 1. 서 론

Al합금기 복합재료는 경량화에 의한 연비향상, 내열성, 낮은 열팽창성 및 우수한 내마모성 등을 갖는 장점 때문에 많은 연구가 진행되어 왔다.

복합재료는 강화 예비성형체 또는 발포체를 사용하여 부분 복합화하는 방법과 용침법, 교반주조법 등을 이용한 전체 복합화 방법이 있다[1-3]. 일반적으로 콘로드 등 고하중을 받는 부품은 전체 복합화가 필요하며 실린더라이너, 브레이크 디스크 및 피스톤의 top ring부 등 내마모성과 내열성이 요구되는 부품은 표면 부위 또는 특정부위만 복합화하는 것이 전체 복합화에 따른 재료의 인성저하를 막고, 기지금속에 비하여 고가인 강화재 사용을 절약할 수 있어서 제조원가 절감이 가능하며, 기계가공 문제를 해소할 수 있다. 국내에서는 그동안 피스톤의 top ring부 복합화 개발에 이어

SiC 입자강화 알루미늄 복합재인 Duralcan ingot를 사용한 브레이크 디스크 개발이 완성차 업체를 중심으로 일부 진행중에 있지만, 너무 경한 SiC 입자에 의한 패드재 손상과 SiC 입자의 분리, 디스크 전체를 강화시키는데 따른 인성부족, 가공성문제, 제조원가절감문제 등이 실용화를 어렵게 하고 있다[4-10].

한편, Ni기 발포금속은 고압주조에 의하여 기지금속인 알루미늄이 침투될 때 계면에서 금속간화합물 층을 형성하여 내마모성을 향상시켜 주며 열처리를 통하여 금속간화합물 생성량을 조절할 수 있다. 또한, Ni 발포체의 체적율(Vf)는 자유로운 조절이 가능하여 복합화 소재에 대한 내마모성의 정량적인 조절이 가능하도록 하는 장점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 용탕단조법을 이용하여 SiC 입자강화 알루미늄 복합재 사용시 문제가 되고 있는 브레이크 디스크를 대상으로 다공질 Ni 및 Ni-Cr 발

울산대학교 재료금속공학부(School of Materials Science and Metallurgical Engineering)

\*영동전문대학 금속과(Dept. of Metallurgical Eng., Yeong Dong College)

\*\*동남정밀(주) 기술연구소(Dong Nam Precision Co., R&D Center)

\*\*\*한국생산기술연구원 생산기반연구센터(Korea Institute of Industrial Technology)

Table 1. Chemical composition of AC4C alloy(wt.%).

Material	Si	Mg	Cu	Zn	Fe	Mn	Ti	Al
AC4C	7.2	0.3	<0.001	0.016	0.32	<0.001	0.15	Bal

포금속을 사용하여 강화 Al합금기 복합재료의 제조 및 그 특성을 연구 하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험에 사용된 기지금속은 주조용 합금으로 널리 이용되고 있는 Al-7 wt%Si-0.3 wt%Mg(AC4C)알루미늄 합금이며 그 화학적 조성은 Table 1과 같다. 강화소재로는 체적율이 5%이고 평균공경(孔徑)이 0.6 mm이며, 비교적 균일한 크기의 기공이 일정간격으로 형성되어 3차원적 망상구조를 하고 있는 Ni 및 Ni-Cr 두종류의 다공질 발포금속을 사용하였다. 발포체의 크기는 가로 600 mm, 세로 450 mm, 두께 5.1 mm인 일본 Sumitomo Metal Co.에서 제작된 것을 사용하였으며, 직경  $\phi 86$  mm로 절단하여 예열없이 사용하였다. 시험편 제조는 유압프레스를 이용하여 350°C로 예열된 금형에 강화재를 삽입 후 용탕온도는 750, 850 및 950°C로, 가압력은 10, 25, 50 및 100 MPa로 변화시키며 복합

재료 시험편을 제조하였다.

한편, 인장시험편은 Fig. 1의 (a)와 같이 ASTM B 557-84M 규격으로 가공하여 Instron 8501을 이용하여 cross head speed 1 mm/min로 인장시험을 행하였으며, 열팽창시험은 Fig. 1의 (b) 규격으로 가공하여 Shimadzu thermal analysis TA501를 이용하여 시험하였다.

또한, 내마모 시험은 Fig. 1의 (c) 규격으로 시험가공한 후, 상대재로 #600 메시의 sand paper를 사용하여 pin on disk type 마모 시험기로 1.3 및 2.3m/sec의 활주속도로 시험하였으며, 내마모 시험은 시험 전·후 알콜에 세척·건조 후 전자저울을 이용하여 0.0001g 까지 무게를 측정하여 마모량을 측정하였다.

주조조직 및 인장시험편 파단면의 조직관찰은 광학현미경과 SEM을 이용하였으며, 계면반응층을 관찰하기 위해 용체화 처리 온도인 520°C에서 1~24시간까지 유지한 후 수냉하여 반응층을 형성시킨 시험편을 XRD를 이용하여 분석 하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 Ni 및 Ni-Cr 강화 AC4C 복합재료의 제조

본 연구에 사용된 강화재 Ni 및 Ni-Cr 다공질 발포금속의 형상을 Photo. 1에 나타내었다. 사진에서 보는 바와 같이, 발포금속은 비교적 균일한 크기의 기공이 일정간격으로 형성되어 있는 망상구조를 하고 있다. Ni 및 Ni-Cr 다공질 발포금속의 제조는 쉽게 제거가 가능한 발포수지(polyurethane foam)로 원하는 다공질 금속부재가 얻어질 수 있도록 소정의 기공율을 갖는 형상으로 성형한 후 carbon류의 도전성 재료를 피복하고 그 도전성 재료의 표면에 Ni 도금을 하고 발포수지를 제거한 후 Ni 표면의 산화막을 환원 처리하여 제거함으로써 얻어진다.

Photo. 2 및 Photo. 3에는 Ni 및 Ni-Cr 발포금속을 강화재로 이용해 750°C의 일정주조 온도에서 가압력을 10, 25, 50 및 100 MPa로 변화시켜 제조한 복합재의 미세조직을 나타내었다. 기지조직은 Al-Si 아공정합금

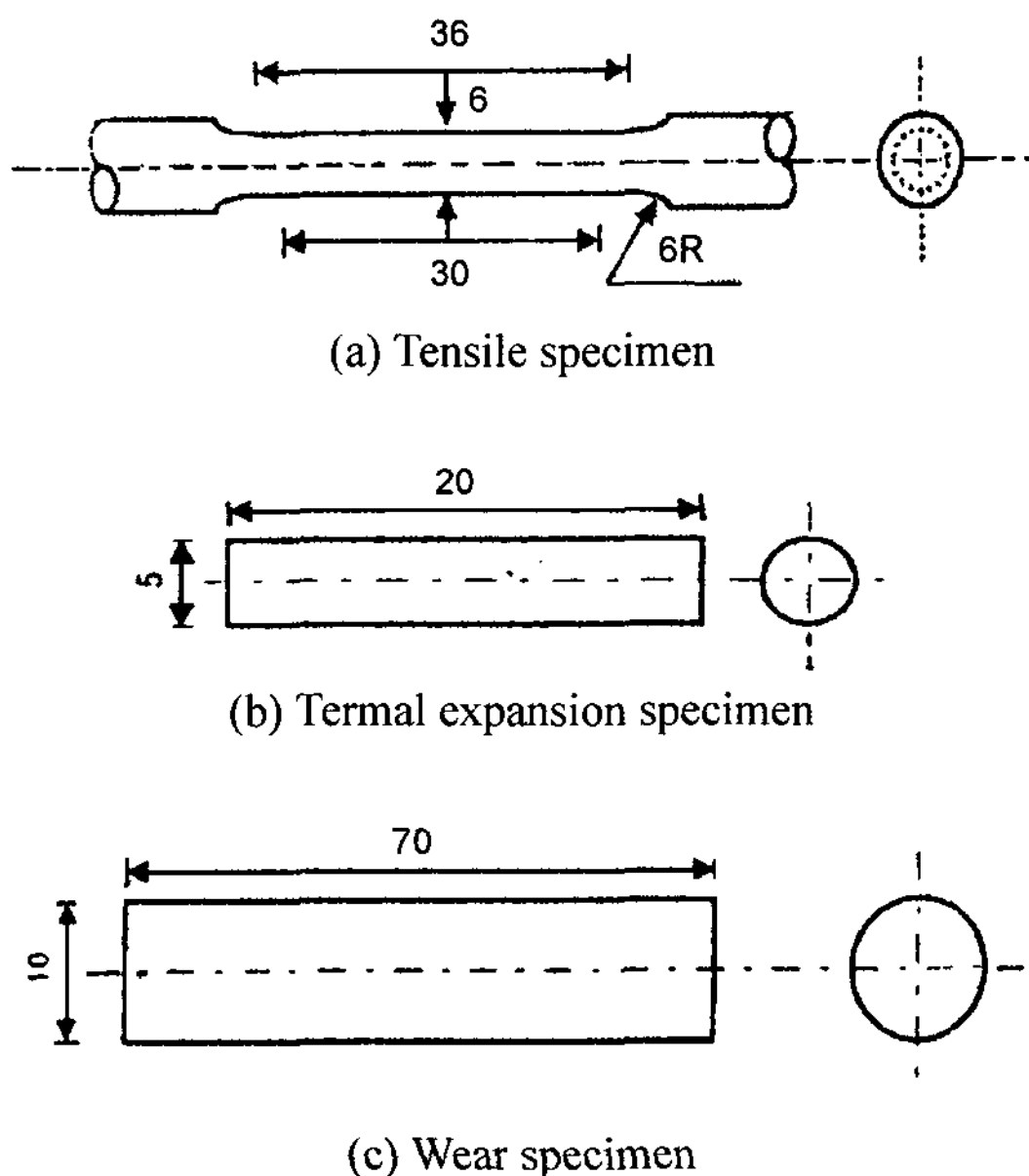


Fig. 1. Shape and dimension of various specimens(mm)

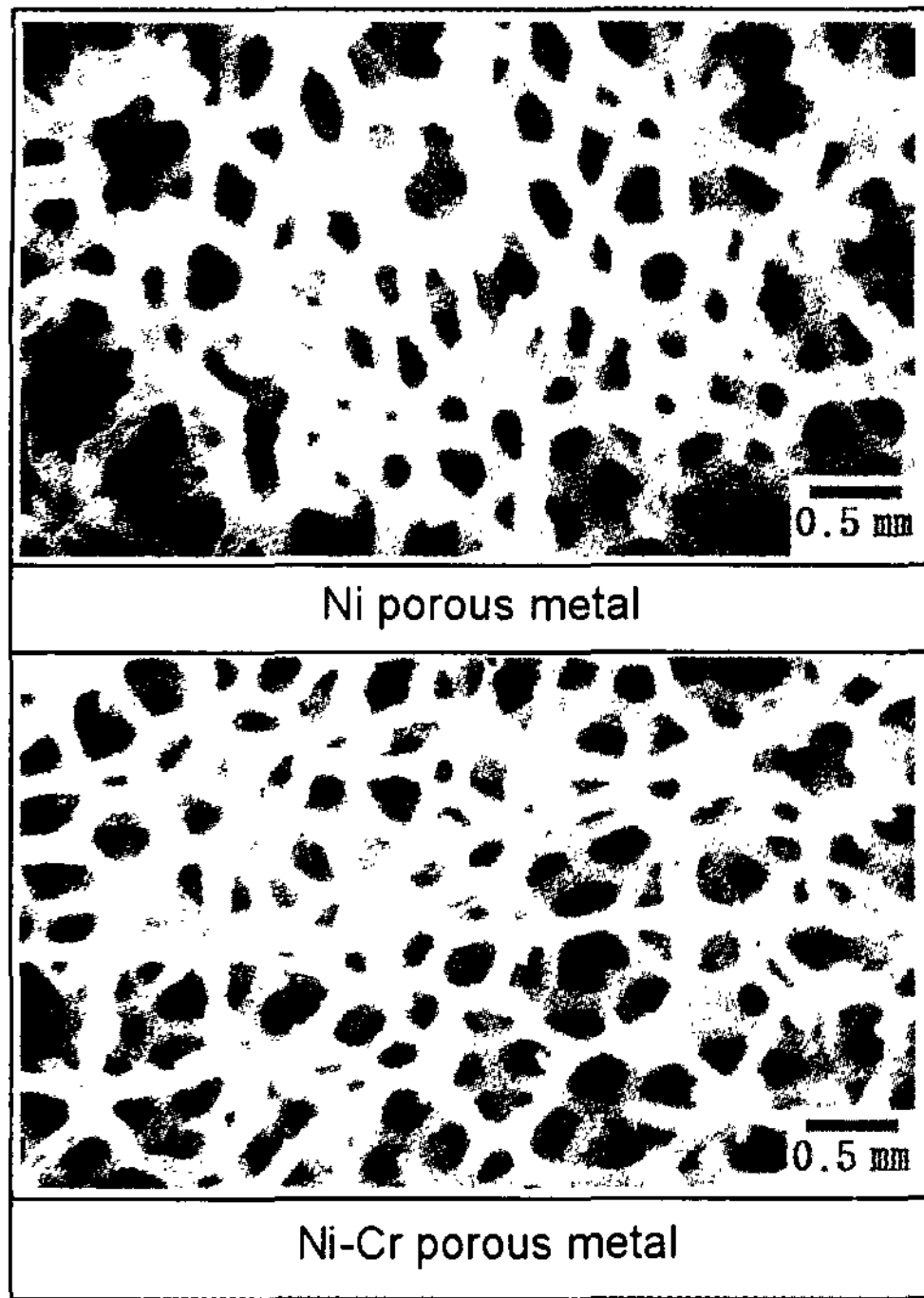


Photo 1. SEM photographs of Ni and Ni-Cr porous metal.

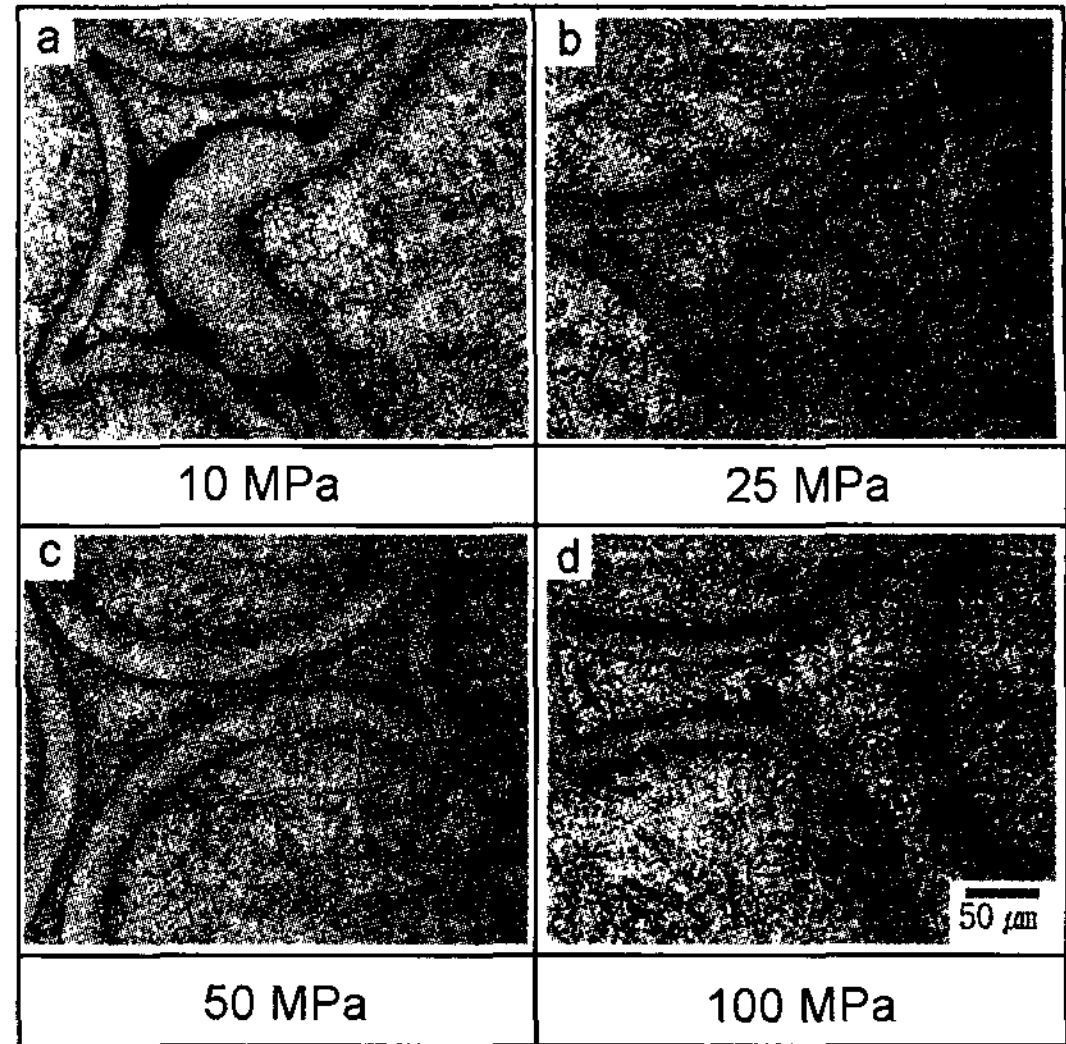


Photo 3. Microstructure of Ni-Cr/AC4C composites with various pressure.

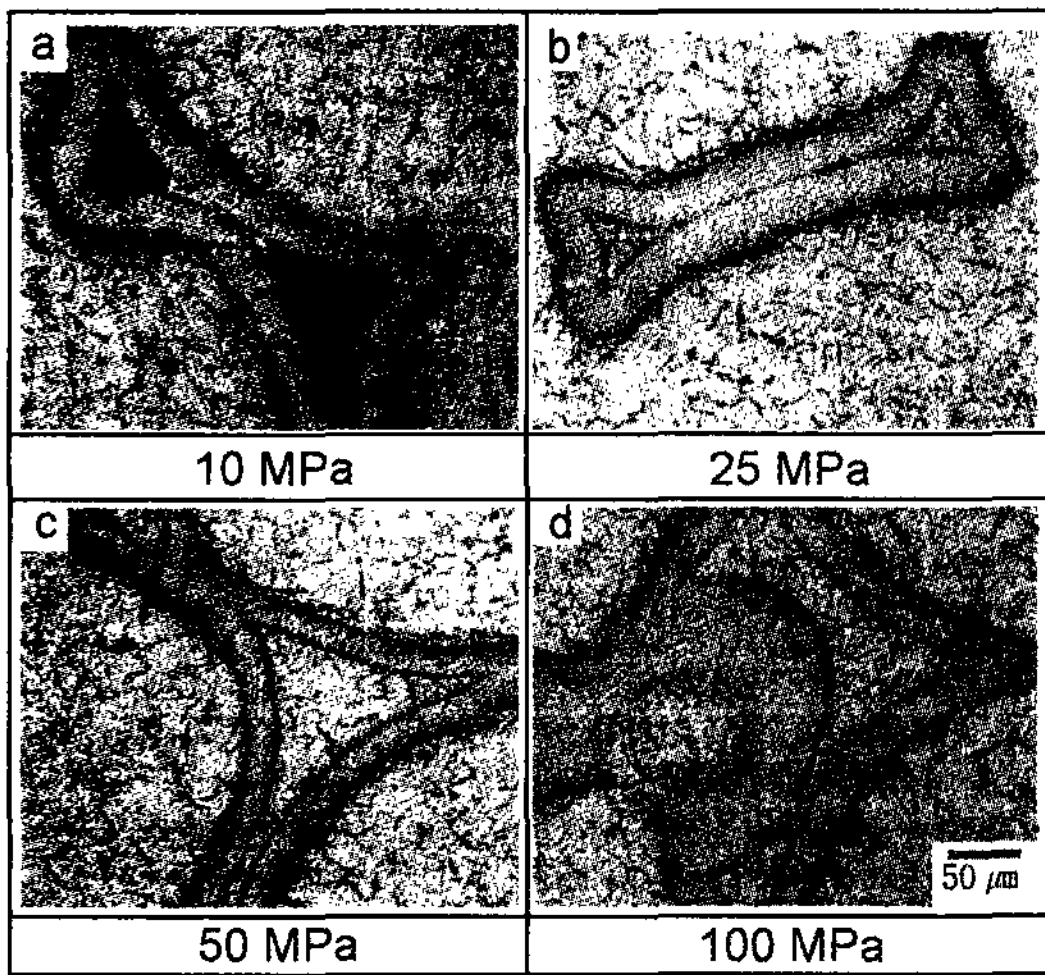


Photo 2. Microstructure of Ni/AC4C composites with various pressure.

의 전형적인 조직인 초정  $\alpha$  수지상에 공정 Si이 미세 분산된 조직으로서 용탕가압에 의해 비교적 미세균일한 조직을 보이고 있다. 다공질 발포금속과의 복합화 양상은 가압력이 10 MPa인 경우, 발포금속의 계면 및 edge에 용탕미침투 영역이 존재하고 있는 것을 볼 수

있으며, 압력이 25 MPa 이상으로 증가하게 되면 용탕은 강화재 edge 부분까지 완전히 침투하여 건전한 복합재를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. Photo. 2에서 Ni/AC4C의 경우, 주조시 기지금속과 강화재 계면에 반응층이 형성되어 있음을 볼 수 있으며, 이 반응층은 가압력에 따라서 거의 변화를 보이지 않았다.

반면, Photo. 3의 Ni-Cr/AC4C 복합재료의 경우에는 가압력에 관계없이 계면반응층이 형성되지 않았다. 주조온도를 750, 850 및 950°C로 변화시키고, 주조압력을 25 MPa로 하여 주조시험한 결과, 두가지의 발포금속 강화복합재 모두 주조온도에 관계없이 유사한 두께로 계면반응층이 형성되어 있는 반면에 Ni-Cr 발포금속의 경우에는 계면반응층을 관찰할 수 없었다. 따라서, 발포금속을 강화재로 이용할 경우 복합재를 얻기 위해서는 750°C이상의 주조온도에서 최소 25 MPa이상의 가압력이 필요함을 알 수 있었다.

### 3.2 Ni 및 Ni-Cr 강화 복합재의 열처리에 따른 계면 반응층 형성

주조시험을 통해 750°C, 50 MPa에서 제조된 Ni 및 Ni-Cr/AC4C 복합재료의 계면반응층 형성 및 관찰을 위해 기지금속의 용체화처리 온도인 520°C에서 1, 3, 5, 7, 10 및 24시간 동안 열처리를 행하였으며 그 결과를 Fig. 2와 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보듯이,

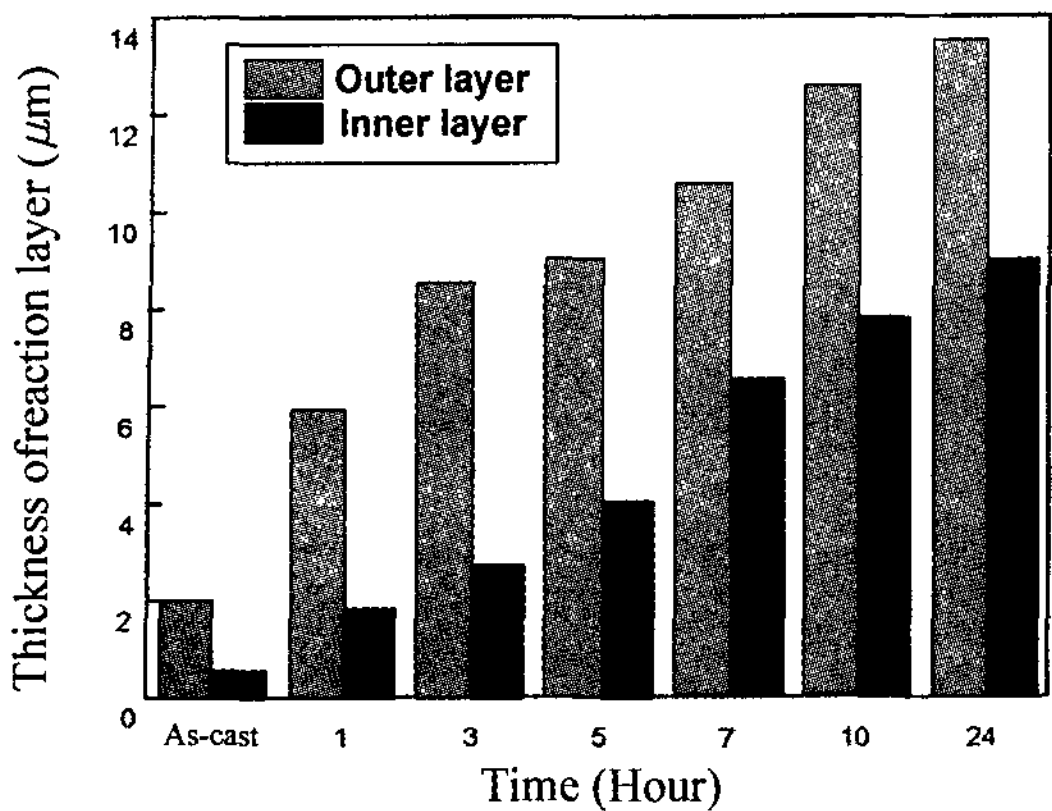


Fig. 2. Thickness of reaction layer of Ni/AC4C composite by heat treatment at various time.

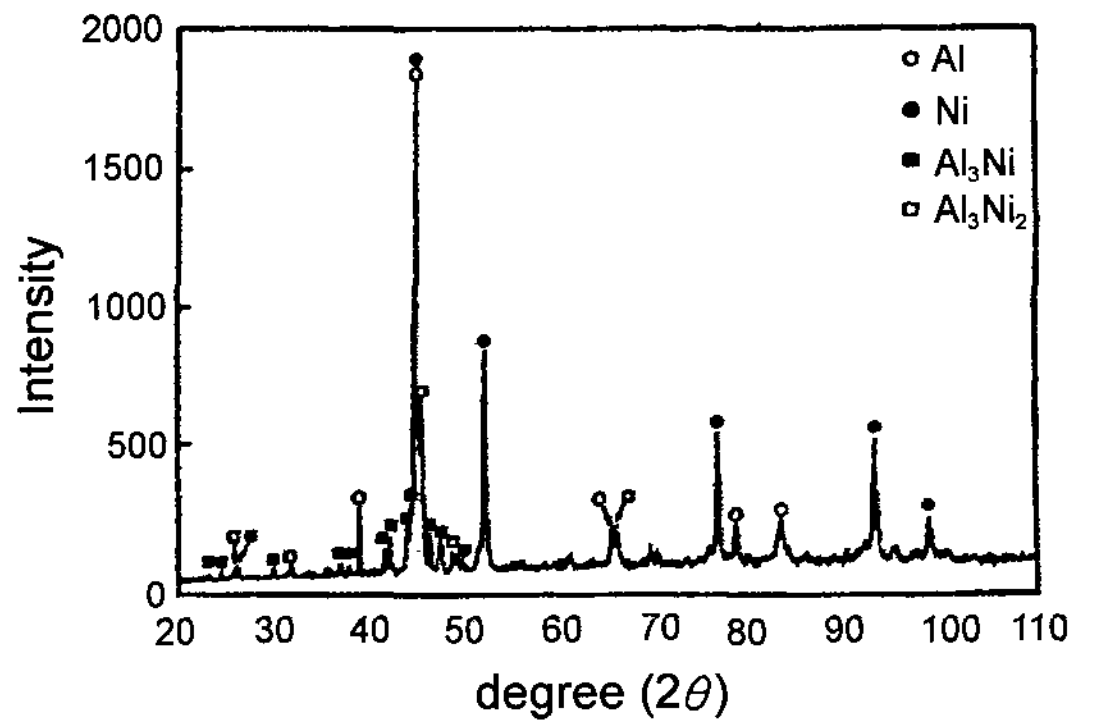


Fig. 3. X-ray intensity analysis of Ni/AC4C composite.

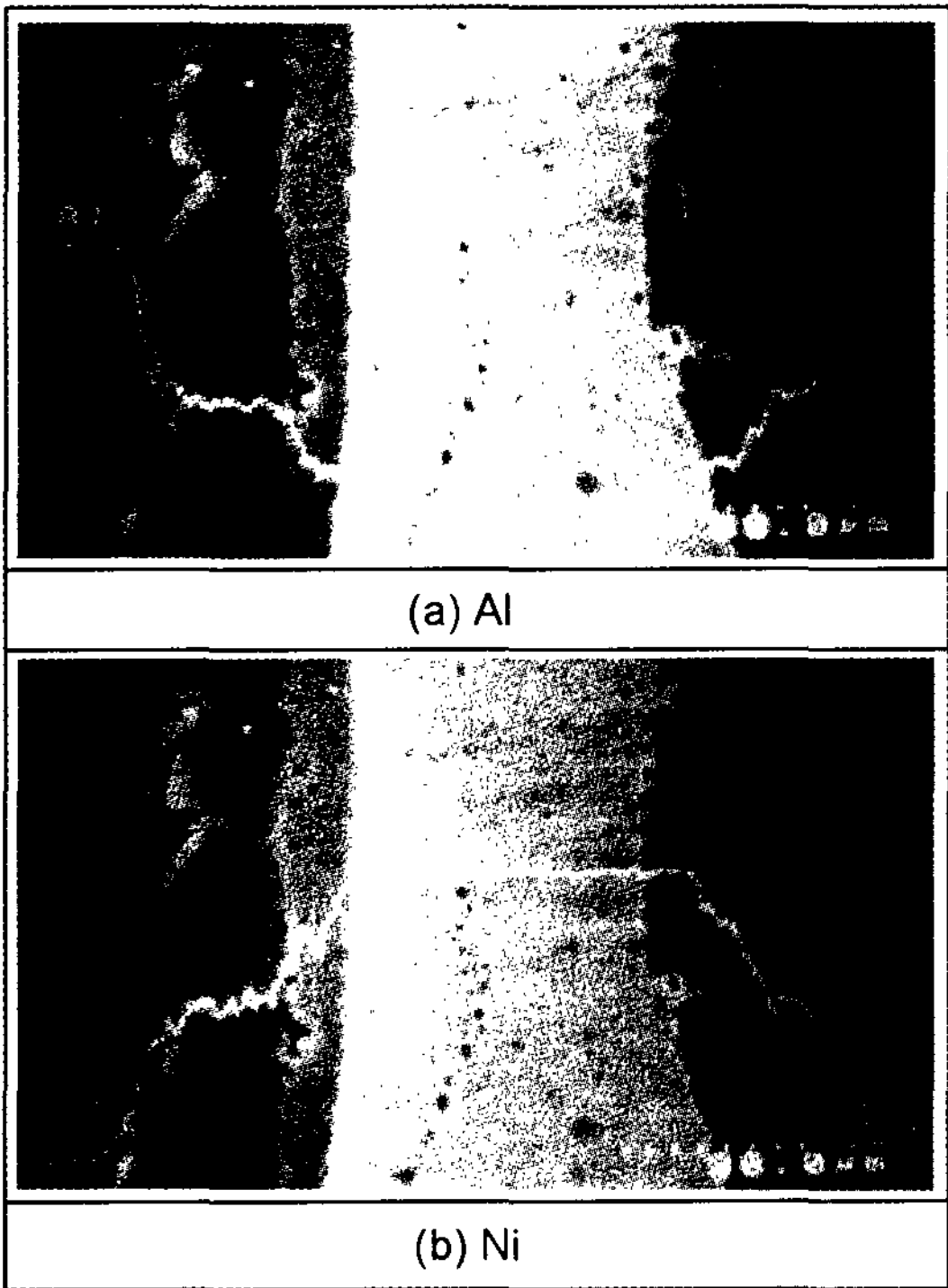


Photo 4. EDX analysis of Ni/AC4C composites heated for 7 hours at 520°C.

Ni의 경우 열처리 시간에 비례하여 계면반응층은 증가하는 경향을 나타내었으며, 열처리 시간이 1시간 지나면 알루미늄 기지금속과 인접한 부분에 두꺼운 외부 반응층과 Ni 강화재에 인접해 있는 내부의 얇은 계면 반응층의 2층으로 분리되어 있음을 볼 수 있었다. 또

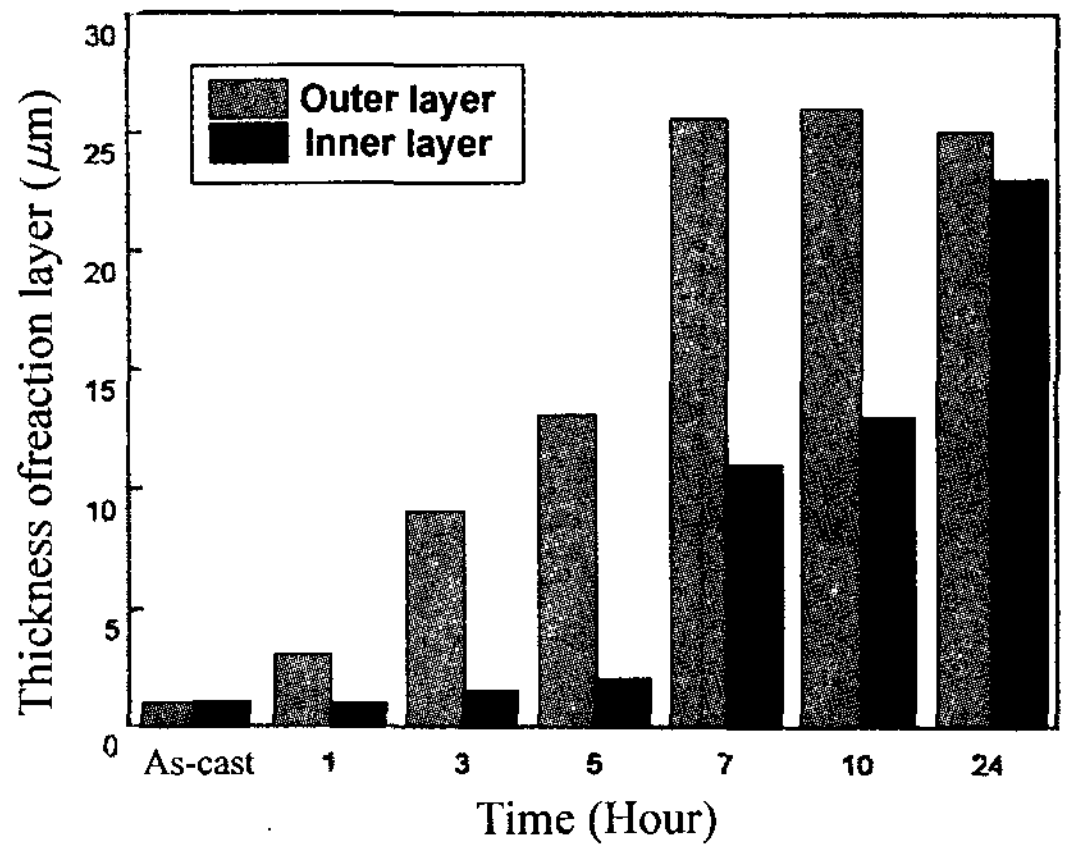


Fig. 4. Thickness of reaction layer of Ni-Cr/AC4C composite by heat treatment at various time.

한, 열처리 초기에는 외부 반응층이 빨리 성장하지만 3시간을 전후하여 성장속도가 둔화된 반면, 내부 반응층은 시간이 경과하면서 일정하게 성장하는 경향을 보여주었다. 24시간 경과 후에 외부 반응층(outer layer)의 두께는 약 13 μm, 내부 반응층(inner layer)은 약 9 μm까지 성장하였다. Photo. 4는 520°C에서 7시간 열처리한 후 계면반응층을 EDX로 Al과 Ni에 대해 라인 분석한 결과를 나타낸 것이다. 사진에서 알 수 있듯이, 계면반응층은 뚜렷하게 2층으로 형성되어 있으며, 반응층이 바뀔 때마다 Al 및 Ni의 양이 급격하게 감소 또는 증가함을 확인할 수 있었다. 이러한 화합물상을 확인하기 위하여 X-ray 분석을 행하였으며 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. X-ray 분석 결과 계면반응에 의해서 형성된 화합물상은 Al<sub>3</sub>Ni 및 Al<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub>상임을 확인할 수 있었다.

반면에 Ni-Cr/AC4C 복합재료는 주조 상태에서는 반응층이 형성되지 않았으나 열처리하면 Ni/AC4C 복합재료와 유사하게 열처리 시간에 따라 반응층 두께가 증가하였으며 3시간 정도가 경과하면 두 층으로 반응층이 분리되었다. Fig. 4는 Ni-Cr/AC4C 복합재료의 열처리 시간에 따른 계면반응층의 두께변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이, 기지금속과 인접한 외부 반응층(outer layer)은 7시간까지 급속히 성장하여 그 두께가 약 26  $\mu\text{m}$ 까지 성장하였지만 열처리 시간이 24시간으로 길어지면서 오히려 계면반응층의 두께가 다소 감소하였다. 반면 Ni-Cr 강화재와 인접해 있는 내부 반응층(inner layer)은 Ni 강화재를 사용했을 경우보다 생성속도가 다소 늦어졌고 5시간 이후 부터 빠른 속도로 성장하여 24시간이 경과된 후에는 약 23  $\mu\text{m}$ 까지 성장하였다. 또한, Photo. 5는 Ni-Cr/AC4C 복합재료를 520  $^{\circ}\text{C}$ 에서 7시간 열처리한 후 EDX로 라인 분석한 결과이다. 사진으로부터 반응층에 따라 Al의 양이 급속히 변화하였고 Ni과 Cr도 유사한 거동을 나타낼 수 있었다.

### 3.3 Ni 및 Ni-Cr 강화 AC4C 복합재의 기계적 특성 분석

Fig. 5는 기지금속(AC4C), Ni 및 Ni-Cr/AC4C 복합재료의 인장강도 값을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이, 복합재료의 인장강도는 모두 기지금속보다 낮았으며 T6 열처리에 의해 기지금속의 인장강도 값은 약 30% 정도 증가 하였고 복합재료의 경우는 그 증가폭이 감소하였다. 또, Photo. 6은 기지금속과 복합재료의 파단면을 나타낸 것으로 기지금속에 비해 발포금속 강

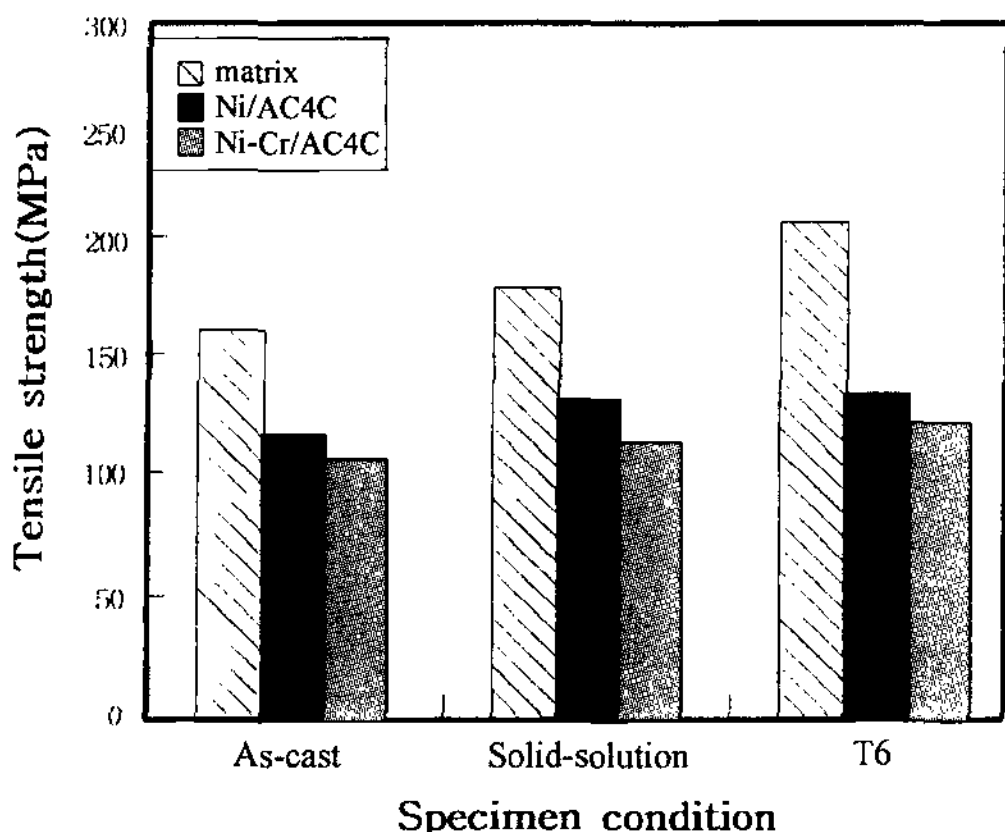


Fig. 5. Tensile strength of matrix(AC4C alloy) and composites.

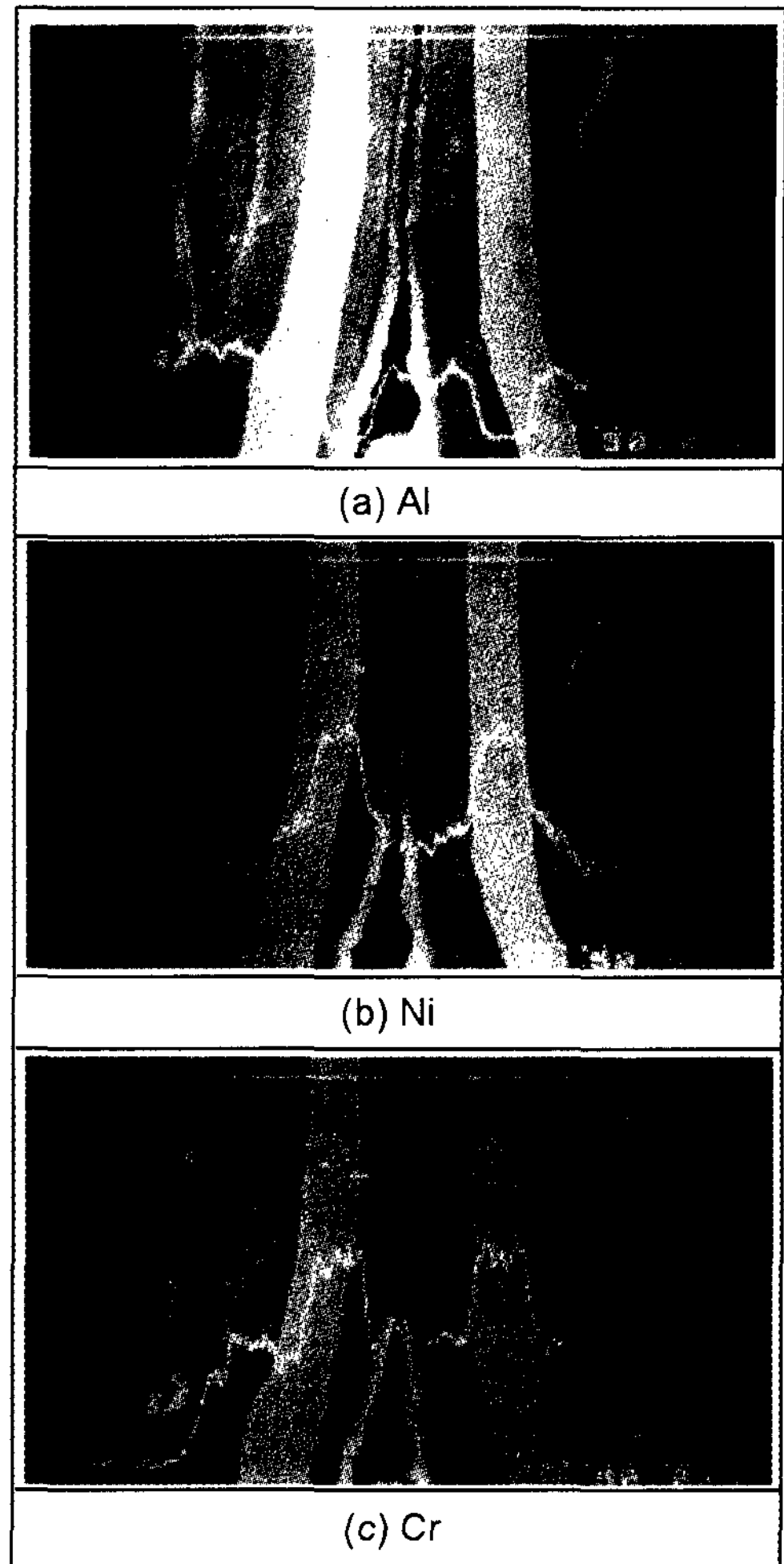


Photo 5. EDX analysis of Ni-Cr/AC4C composites heated for 7 hours at 520 $^{\circ}\text{C}$

화 복합재료는 취성파괴가 일어났음을 볼 수 있었다. Photo. 7 및 Photo. 8은 Ni 및 Ni-Cr/AC4C 복합재료의 인장시험후 균열생성원을 관찰하기 위해서 파단면을 연마한 후 그 조직을 관찰한 것이다. 두 경우 모두 강화재의 계면으로 균열이 진전되었음을 확인할 수 있었으며 파단된 강화상도 관찰되었지만 대부분의 강화재는 손상되지 않고 계면 부분의 일부가 박리된 상태로 남아 있었다. 즉, 인장시 하중이 강화재에 전달되면서 강화재와 기지금속의 계면에서 동시다발적으로 균열이 생성되고, 생성된 균열은 인접한 균열과 연결되어 전반적인 파괴가 진행된 것으로 생각된다. 결과적으로 Ni 또는 Ni-Cr의 발포금속을 강화재로 사용하는

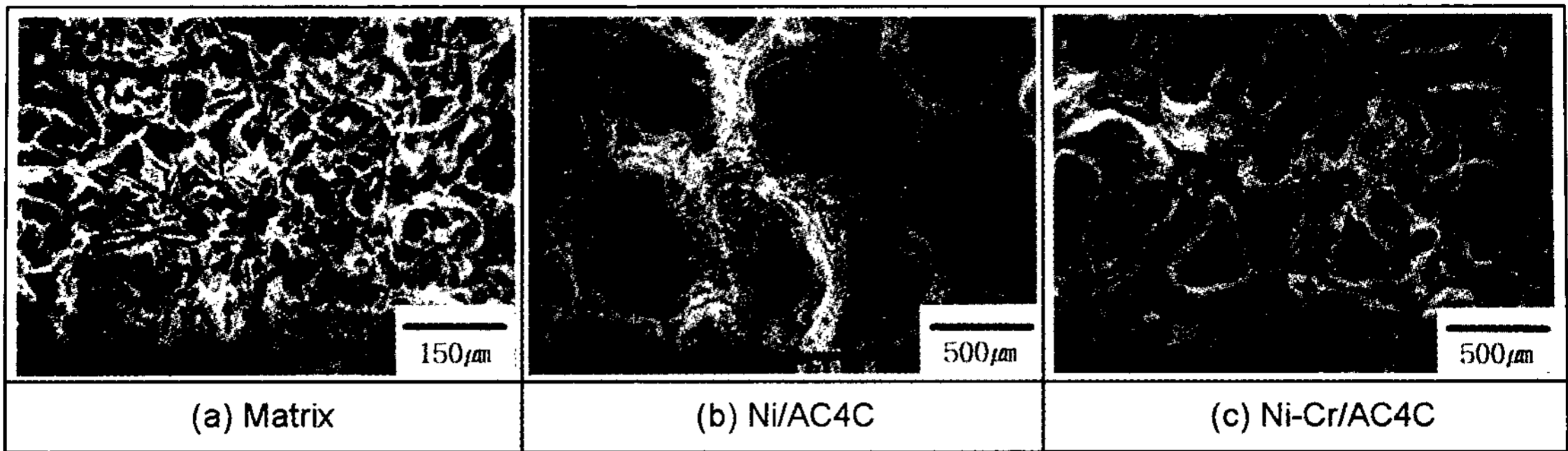


Photo 6. SEM fractographies of matrix and composites.

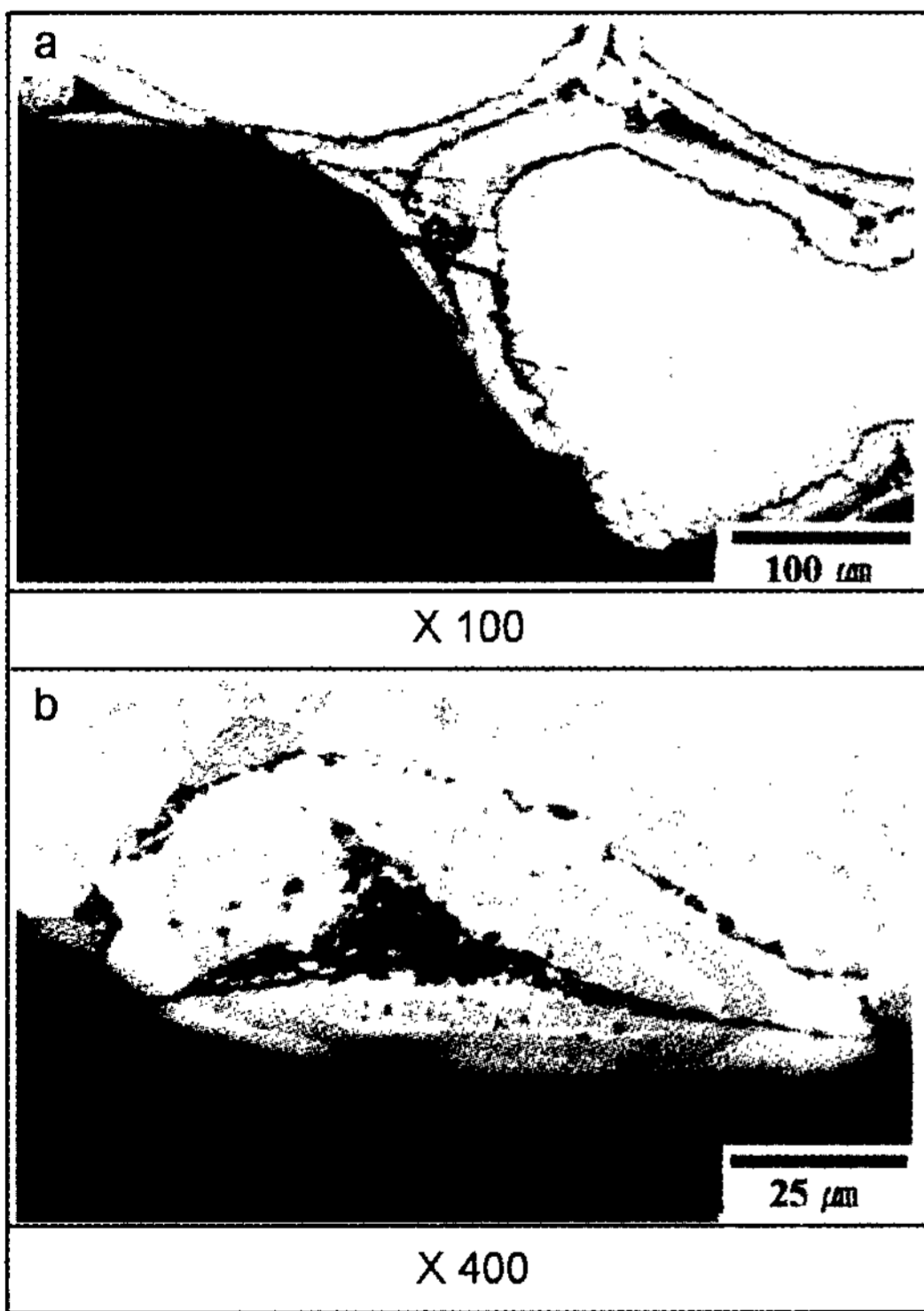


Photo 7. Cross sectional view of fractured tensile specimens of Ni/AC4C composites.

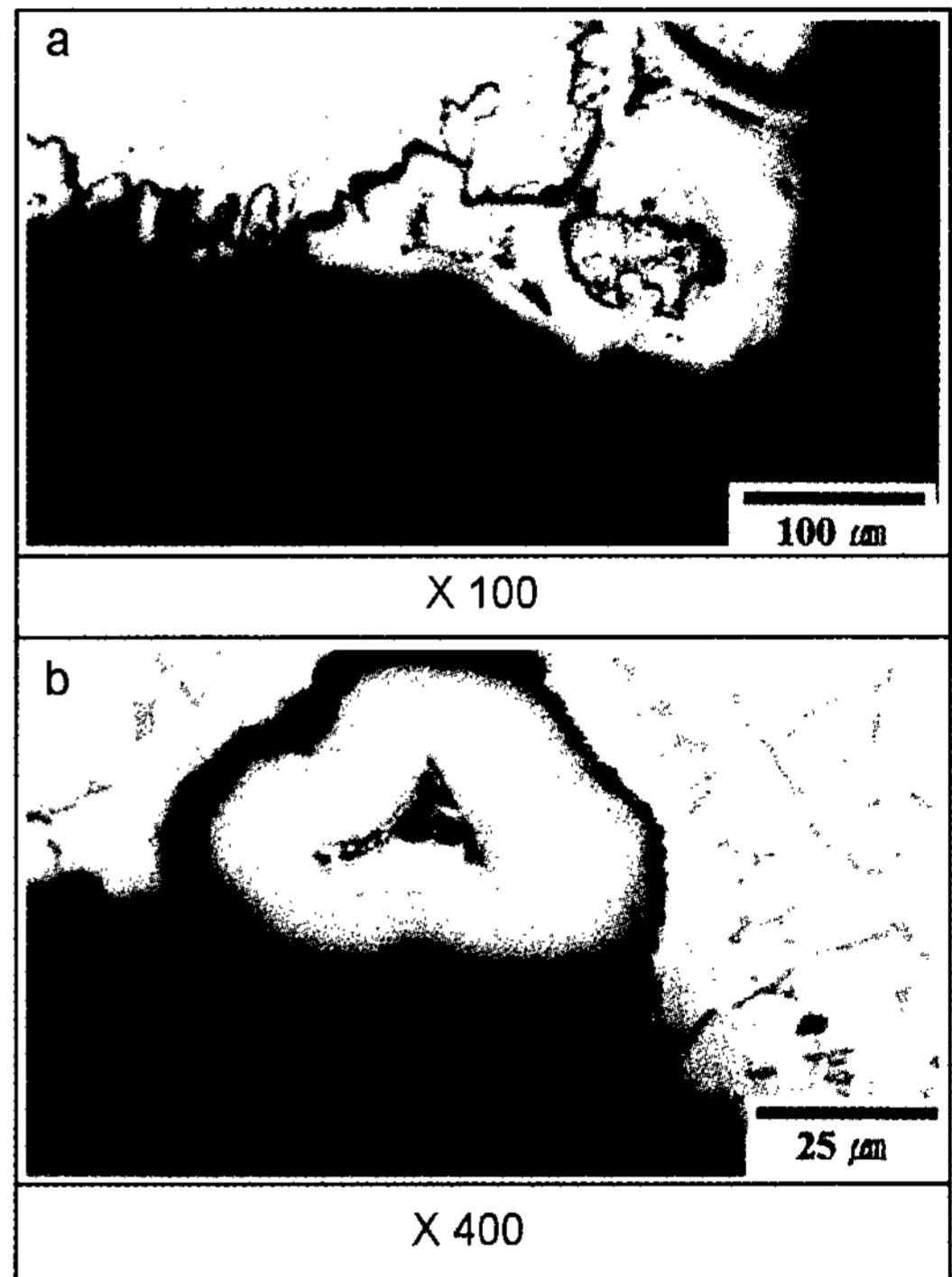


Photo 8. Cross sectional view of fractured tensile specimens of Ni-Cr/AC4C composites.

경우, 강화재와 기지금속사이의 계면에 형성되는 금속간 화합물은 인장강도 향상에는 기여를 하지 못하는 취성을 나타내었다. 따라서, Ni 및 Ni-Cr 다공질 발포 금속을 이용한 복합재료 제조의 경우 인장특성 개선을 위해서는 강화재인 발포금속의 공경을 보다 미세 · 균일하게 개선하고 최적의 주조조건이나 열처리 조건을 확립하여 형성되는 계면 반응층의 취성을 제어하는 보완 연구가 필요하리라 생각된다. 또, Fig. 6은 기지금

속 및 복합재료의 경도값을 측정된 결과이다. 경도측정은 각 시험편에 대해 5회씩 측정하여 그 평균값을 취하였다. 그림에서 보듯이, Ni 및 Ni-Cr 강화복합재료는 열처리에 의해 큰 폭으로 경도가 증가하였다. 이러한 현상은 발포금속을 강화상으로 이용한 복합재료의 경우 열처리시 강화상과 기지금속의 확산반응에 의한 금속간화합물의 형성 때문이라 생각된다.

또한, Fig. 7은 1.3 m/sec의 활주구간에서 마모시험을

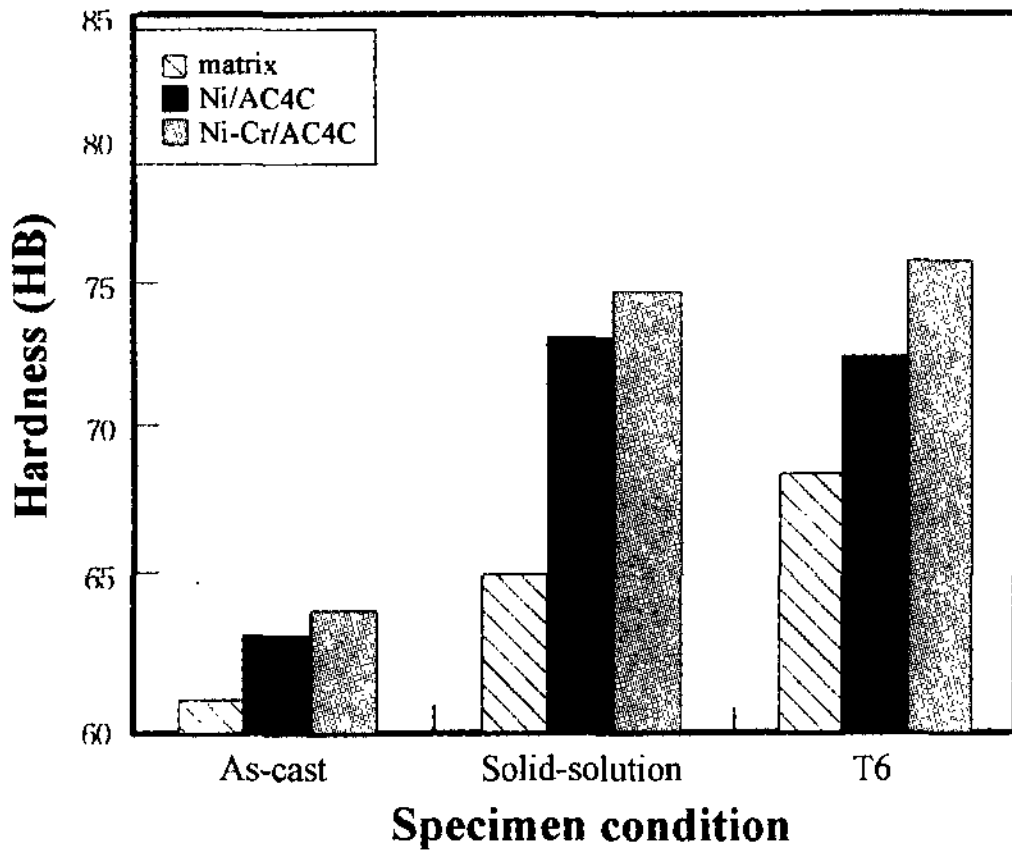


Fig. 6. Hardness of matrix(AC4C alloy) and composites by heat treatment condition.

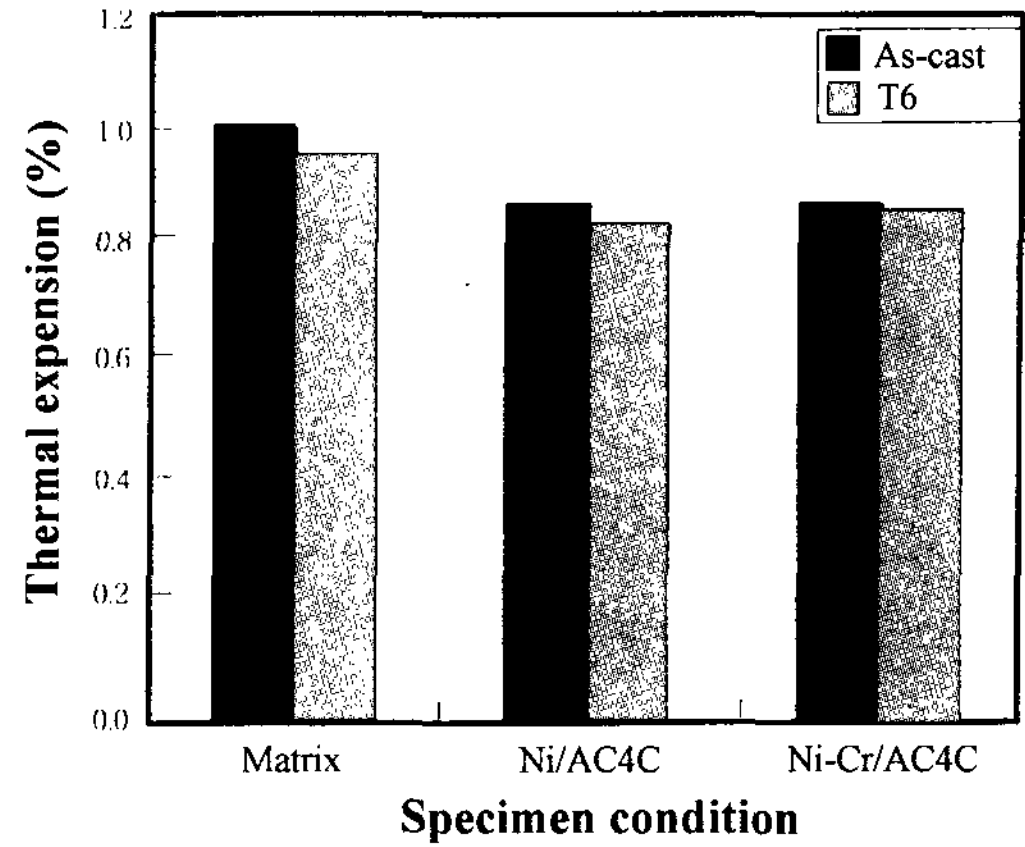


Fig. 8. Thermal expansion of matrix(AC4C alloy) and composites.

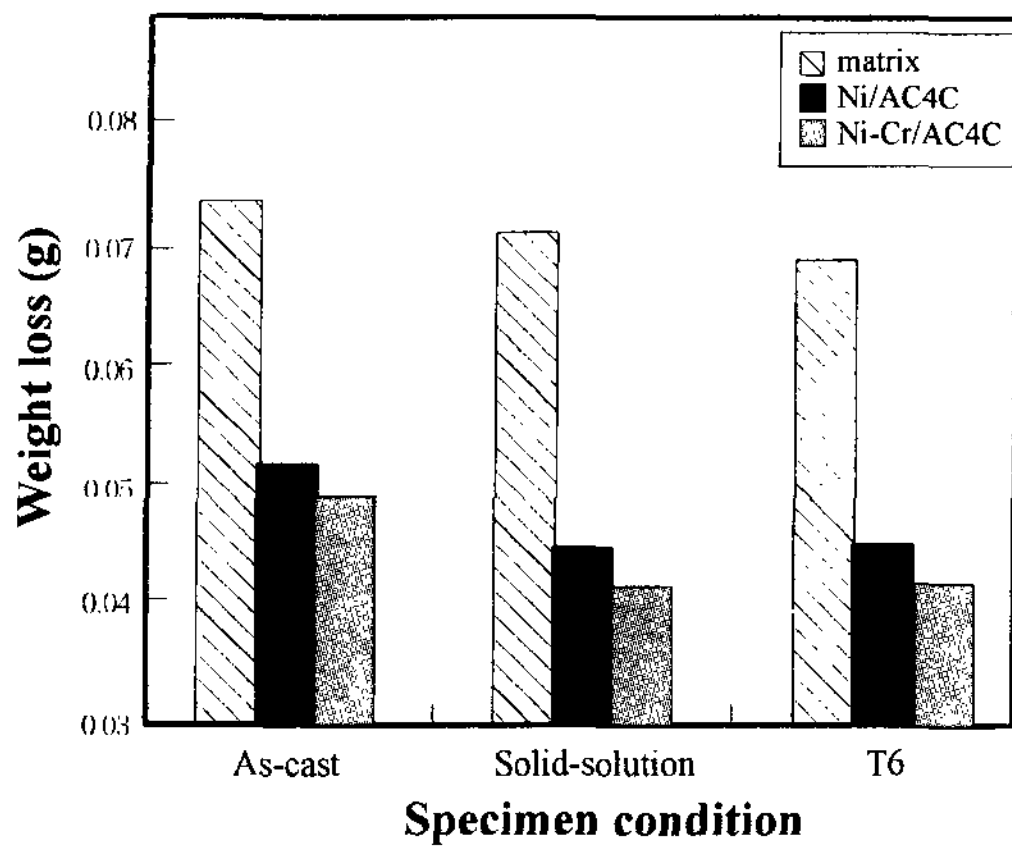


Fig. 7. Weight loss for matrix(AC4C alloy) and composites at 1.3 m/sec sliding velocity.

행한 결과를 나타낸 것으로, 기지금속의 경우 시효처리에 의해 내마모 특성이 향상되었고 복합재료의 마모 특성은 기지금속에 첨가된 강화재 때문에 크게 향상되었음을 알 수 있었다. Ni에 비해 Ni-Cr 복합재의 경우가 다소 마모량이 적는데 이는 Ni-Cr 복합재료가 반응층 형성이 더 많이 이루어져 금속산화물의 부피분이 상대적으로 Ni복합재료에 비해 높았기 때문이라 생각된다. 2.3 m/sec의 활주구간의 마모실험에서도 전반적인 경향은 1.3 m/sec의 경우와 비슷하였지만 전반적으로 마모량은 증가하였으며 발포금속을 강화한 복합재료의 경우 열처리 전·후의 차이가 다소 커졌음을 알 수 있었다. 한편, 열팽창 시험은 상온에서 400 °C까지 3°C/min의 속도로 승온하여 400 °C에서 50 °C까지

동일 냉각속도로 냉각하여 실험을 행하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 보듯이, 기지금속에 비해 복합재료가 열팽창률이 적었으며 이는 강화재로 들어간 재료가 상대적으로 기지금속에 비해 고온에서 열적으로 안정하기 때문이라 생각된다.

#### 4. 결 론

용탕단조법에 의한 Al-7 wt%Si-0.3 wt%Mg 합금기 Ni 및 Ni-Cr 다공질 발포금속강화 복합재료의 시험편을 제조·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Ni 및 Ni-Cr 다공질 발포금속강화 AC4C 복합재료의 제조를 위한 용탕 가압 조건으로는 용탕온도 750°C이상, 최소가압력 25 MPa 이상이 필요함을 알 수 있었다.

2) Ni/AC4C 및 Ni-Cr/AC4C 복합재의 열처리에 따른 계면 반응층을 관찰한 결과 용체화 처리 온도 520°C에서 열처리 시간의 증가에 따라 거의 비례적으로 계면 반응층이 증가하는 경향을 나타내었으며, 이때 계면반응에 의해 형성되는 화합물상은 Al<sub>3</sub>Ni 및 Al<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub>임을 확인하였다.

3) Ni/AC4C 및 Ni-Cr/AC4C 복합재료의 기계적 특성을 분석한 결과, Ni 및 Ni-Cr 강화재 계면에 형성되는 금속간 화합물의 강화특성으로 인하여 경도, 내마모 및 열팽창 시험등에서는 기지금속보다 크게 향상된 물성을 얻을 수 있었으나, 인장시 균열 생성원으로 작용한 강화재 계면의 영향으로 인한 취성적 파괴로

인장강도에는 기여하지 못하였다.

### 참 고 문 헌

[1] L. S. Castleman and L. L. Seigle : Trans. TMS-AIME ; (1985) 212, p.589

[2] M. M. P. Janssen and G. D. Rieck : Trans. TMS-AIME ; (1967) 239, p.1372

[3] Mechanisms of diffusion : Smithells Metals Reference Book ; E. A. Brandes and G. B. Brook(Eds.) 7th Ed. : Chapter 13

[4] S. B. Jung, Y. Minamino, T. Yamane and S. Saji : Journal of Material Science Letters ; (1993), 12, p.1684

[5] R. A. Varin, M. Metelinick and Z. Wronski : Metall. Trans. ; (1989), 20A, p.1153

[6] D. C. Dunand, J. L. Sommer and A. Mortensen : Metall. Trans. : (1993), 24A, p.2162

[7] U. A. Tambrini and Z. A. Munir : Z. A. Munir and J. B. Holt(Eds.) ; VHC, New York ; NY ; (1990), p.100

[8] I. Horsfall and M. Downing : Proc.of a Symposium sponsored by the joint SMD and MSD composite materials committee ; M. Singh(Eds.) ; Pittsburgh ; Pennsylvania ; 17~21 October(1993), p.149

[9] Wang-Shik, Shin and Dap-Chun, Choi : Journal of the Korean Foundrymen's Society ; (1996), Vol. 16, No. 4, p.308

[10] Hyun-Man, Kwak and Chang-Ock, Choi : Journal of the Korean Foundrymen's Society ; (1993), Vol. 13, No. 3, p.238