

액상교반법에 의한 Al/TiCp 복합재료의 제조에 관한 연구(I)

임종국 · 김명한 · 최재하

충북대학교 공과대학 재료공학과

A Study on the Fabrication of Al/TiCp Composites by Liquid Mixing method(I)

Jong-Kuk Rhim, Myung-Han Kim, Jae-Ha Choi

Dept. of Materials Engineering, Chung Buk national University, Cheong Ju, 360-763, Korea

초 록 TiC입자를 강화재로 한 Al금속기지 복합재료를 액상교반법으로 제조하는데 따른 제조조건과 물성특성과의 관계를 조사하였다. TiC 입자는 중량비 10%를 첨가하였으며, 젖음성을 향상시키기 위하여 1.5wt%의 Mg을 첨가하였다. TiC 입자 첨가에 의하여 내마모 특성, 인장강도, 경도 등이 증가되었으나 과도한 교반은 기계적 특성을 저하시켰다. 본 실험조건에서 교반 속도의 최적조건은 500rpm이었다. Wetting agent로서 첨가한 Mg은 기지에 고루 분산하였다.

Abstract The mechanical properties of Al/TiCp composite fabrication by liquid mixing was investigated. The composites, containing 10 wt% TiC, were produced using induction furnace with mechanical stirring. The amounts of 1.5 wt% Mg were added to wetting agents. The presence of aluminum in TiC composites showed enhanced strength without loss of ductility at room and elevated temperatures. Especially, wear resistance was found to dramatically improve. But excess stirring determined the mechanical properties. Approximate values at present work were 500 rpm. There was no interfacial reaction of any kind and the interface remains clearly delineated.

1. 서 론

금속기지 복합재료는 고강도, 고비탄성률, 작은 열팽창계수, 좋은 내마모성, 고온성질우수 등을 포함하여 많은 장점¹⁾²⁾을 지닌 뛰어난 재료의 한 종류이다. 또한 전통적인 재료에서 얻을 수 없는 성질들의 조합으로 새로운 재료를 개발할 수 있는 기회를 제공해 준다. 특히 입자강화 복합재료의 경우 화이버, 혹은 위스커 강화 복합재료와 비교하여 비등방성을 감소시킬 뿐만 아니라 압축이나 단조를 포함한 전통적인 재래기법을 이용하여 2차 가공을 할 수 있는 장점이 있다. 이러한 입자강화 복합재료의 기지금속으로서의 Al이 많이 사용되고 있으며 입자강화재로서는 여러가지 금속 산화물, 탄화물 등의 세라믹 소재가 많은 연구³⁾⁴⁾의 대상이 되고 있다. 특히 SiC입자 강화 복합재료의 경우 많은 연구가 진행되어 항공기 구조용 소재로서 이미 이용⁵⁾⁶⁾되고 있

다.

본 연구에서는 입자 강화재로서 TiC를 채택하였다. TiC는 고온에서 안정하기 때문에 강화재로서의 역할은 충분히 수행할 뿐만 아니라, 또한 기지미세화에 의한 기지의 강화효과⁷⁾⁸⁾도 기대할 수 있기 때문이다. 또한 Kuruvilla 등은 분말야금제조방법을 사용하여 복합재료를 제조, 기계적 성질을 조사한 결과 첨가입자로 사용한 B,C, SiC, TiC, Al₂O₃ 중에서 TiC가 가장 우수하다고 평가하였다. 또한 본 연구에서 제조방법으로서의 액상교반법을 택하였는데 이것은 기존의 제조공법을 이용할 수 있고, 비교적 간단한 설비로 제조할 수 있다는 이점이 있다. 그렇지만 제조에 따른 여러 변수의 영향에 대해서는 아직 보고된바가 없다. 따라서 본 연구에서는 TiC입자 강화재를 Al기지에 첨가하여 금속기지 강화 복합재료를 액상교반법으로 제조하는데 따른 제 특성 중 용탕온도, 혼합시간, 혼합속도 등

중요한 인자를 two level factorial design을 이용한 통계적 분석¹¹⁾을 통하여 상호 작용의 효과가 복합재료의 물성특성에 미치는 영향을 비교 분석했다. 이를 토대로 좀더 우수한 복합재료의 제조를 위한 기초 자료로 삼고, 또한 TiC입자강화 Al복합재료에 대한 신 소재로서의 이용가치를 평가하고자 했다.

2. 실험 방법

실험디자인은 혼합에 따른 시간, 온도, 속도를 변수로 택하여 2단계로 하고 나머지 인자들은 고정하였다. Table 1에서와 같이 온도는 750, 850°C, 교반속도 500, 1000rpm, 교반시간 5, 15분으로 하였다. 이렇게하여 이들 세 인자들에 대한 효과의 강도를 검사하기 위해 two level factorial design을 이용한 통계적 처리¹¹⁾를 행하였다. 실험횟수는 Table 2에 보인

바와 같이 기지실험을 함하여 총9회로 행하였으며, 이때 사용된 Al기지의 조성은 Table 3에 보인바와 같이 Al함량이 99.7%인 잉곳트를 사용하였다. 또한 강화재로 사용한 TiC입자의 평균입도는 40 μ m로서 조성은 Table 4와 같고 입도 분포와 형상을 photo 1에 보였다.

Table 1. Process conditions of two level factorial design.

Variable name	Low(-)	High(+)
Mixing Temp.	750°C	850°C
Mixing Speed	500 rpm	1000rpm
Mixing Time	5min	15min
Feeding rate	Fixed to 30g/min.	
SiC amounts	Fixed to 10%	
Av. Part.size	Fixed to 40 micron	

Table 2. Liquid mixing experimental summary.

	Mixing time	Mixing temp	Mixing speed	Wt % TiC	Feeding rate	Av. Particle size
1	-	-	-	Fixed to 10 wt%	Fixed to 30g/min	Fixed to 40 micron
2	+	-	-			
3	-	+	-			
4	+	+	-			
5	-	-	+			
6	+	-	+			
7	-	+	+			
8	+	+	+			
9	-	-	-			

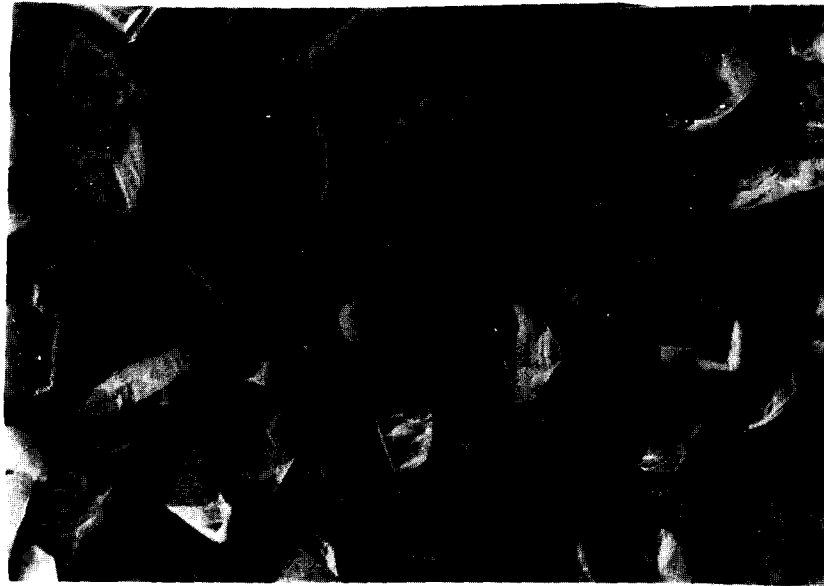
Table 3. Chemical composition of commercial pure aluminum ingot.

Fe	Mg	Si	Zn	Cu	Mn	Cr	Ti	Al
0.132	0.037	0.038	0.005	0.002	0.002	0.002	0.000	Bal.

Table 4. Content analysis for titanium carbide.

Density	4.91
Total Carbon	19.78%
Free Carbon	0.09%
Combined Carbon	19.69%
Fe	0.35%
+ 170	1.0%
170/325	98.6%
- 325	0.40%

시료의 용해는 고주파 유도로 이용하여 Fig. 1과 같이 자체제작한 장치를 사용하였다. 유도로 직상에 타고메타에 연결된 모터를 설치하여 임펠리를 설치하였다. 임펠리는 고강도 흑연판을 가로세로 각각 5cm, 두께 5mm로 가공하여 직경 7mm의 텅스텐 봉에 알루미늄 시멘트로 접합하여 모터에 연결하였다. 유도로의 도가니재료로는 흑연을 사용하였으며 먼저 Al을 용해한 후 wetting agent인 Mg을 중량비 1.5% 장입하고 산화방지를 위하여



(X100)

Photo 1. SEM micrograph of the TiC reinforcements.

Ar으로 shield하였다. 실험온도에 도달한 후 교반과 동시에 전기로에서 미리 실험온도까지 예열해둔 TiC입자를 분당 30g의 속도로 총중량비의 10%를 장입하였다. 이때 교반시간과 교반온도, 교반속도를 앞의 실험조건과 같이 행하였다. 교반을 완료한 후 Ar으로 degasing 하고 용탕을 균형에 주입하여 응고시켰으며 냉각후 표피를 밀링으로 제거해 낸후 절단하여 분석했다. 또한 내마모시편과 인장시편을 시료의 중심부로부터 가공하였다. 내마모 시험은 Tokyo사 제품의 고속마멸시험기를 이용했으며 이때 상대제인 회전디스크는 S45C탄소강을 940°C에서 1시간 열처리 후 수냉하여 경도 62H_{RC}로 한 후 사용하였다. 또한

인장시험은 시편가공후 25ton Instron시험기를 사용하여 상온에서 10⁻²/s의 strain rate로 실시하였으며, 이때 데이터는 3회 반복하여 평균값을 구하여 실험값으로 하였다. 경도시험은 마모시험을 한 시편을 이용하여 Vickers경도계로 하중 100으로 하여 행하였으며 역시 3회 측정하여 평균값을 구하였다. 금속현미경 관찰을 위한 부식액은 증류수 50ml, HCl 15ml, HNO₃ 25ml, HF 10ml로서 Tucker시약을 약간 변형시켜 부식하였다. 이로부터 금속현미경 및 전지현미경으로 미세구조를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 시료분석 및 조직관찰

Table 5에 각 실험조건에서의 TiC 분석결과를 보여주고 있다 또한 이에 대한 Two level factorial design의 Yate's algorithm에 의한 분석결과를 Table 6에 보였다. 이 결과에 의하면 교반속도의 영향이 5.24로 가장 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 이것은 교반속도의 영향이 TiC 입자의 wetting에 가장 크게 작용함을 알 수 있고, 그 다음으로 온도의 영향이 1.54의 값, 시간의 영향은 0.9로 예리범위이내의 값을 보임으로 거의 무시할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 온도, 시간, 교반속도 세 인자에 의한 상호작용값도 대략 0.9정도의 값

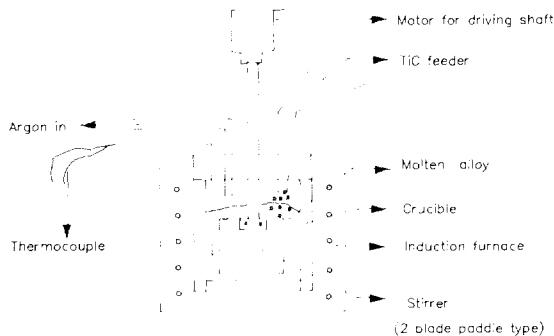


Fig. 1. Induction furnace for the fabrication of TiC composites.

Table 5. Data from experimental results.

Test No. Values	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TiC Analysis	1.87	2.88	3.50	4.25	7.25	7.88	8.50	9.80	0.014
Hardness (Vickers)	33.7	39.4	40.2	43.6	35.0	38.0	35.0	50.5	32.6
Tensile Strength (Kg/mm ²)	6.14	7.7	6.45	7.02	5.0	4.68	5.95	7.24	4.83
Elongation (%)	31.0	24.24	13.44	33.76	31.0	34.0	26.48	14.36	31.2

Table 6. Yates's algorithm for TiC content, two levels factorial designs.

test condition number	design matrix variables			algorithm					identi- fication	
	t	T	S	run average (TiC cont.) y	(1)	(2)	(3)	divisor		estimate
1	-	-	-	1.87	4.75	12.5	45.95	8	5.74 ± .12	average
2	+	-	-	2.88	7.75	33.45	3.69	4	0.92 ± .24	time(t)
3	-	+	-	3.5	15.15	1.76	6.15	4	1.54 ± .24	temp.(T)
4	+	+	-	4.25	18.30	1.93	0.41	4	0.10 ± .24	tT
5	-	-	+	7.25	1.01	3.0	20.95	4	5.24 ± .24	speed(S)
6	+	-	+	7.88	0.75	3.15	0.17	4	0.04 ± .24	tS
7	-	+	+	8.50	0.63	0.26	0.15	4	0.04 ± .24	TS
8	+	+	+	9.80	1.30	0.67	0.93	4	0.93 ± .24	tTS

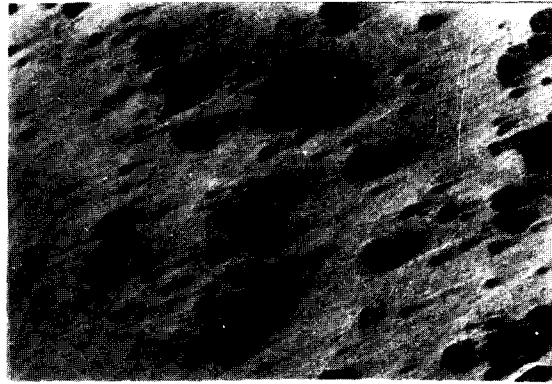
$$Y(=TiC) = 5.74 + (0.92/2)t + (1.54/2)T + (5.24/2)S + (0.93/2)tTS$$

을 나타냄으로, 각 인자의 효과가 상호작용에 의한 영향때문에 상쇄되었음을 알 수 있다. 이들에 대한 광학현미경 사진의 일부를 Photo 2에 보였다. 사진에서 알 수 있듯이 교반속도 증가에 따라 TiC의 양이 증가됨을 알 수 있고 편석도 증가된다. 저온고속 교반시는 TiC와 계면과의 격렬반응으로 인해 TiC의 미세한 과편이 분쇄되어 기지에 분포됨으로서 기계적 성질에 커다란 영향을 미침을 알 수 있다. 한편 고온 고속 교반시는 TiC로부터 분해된 Ti와 Al기지와 반응으로 인해 Al₂Ti를 형성하고 또한 C는 Al₄C₃를 형성하여 각각 기지와 입자주위에 분포하게 된다. TiC의 분포를 관찰하기 위해 연마면을 부식시킨 후 광학현미경을 통해 관찰한 결과 Banerji 등¹²⁾이나 Chen¹³⁾, Wei 등¹⁴⁾에 의해 보고된 것과 같이 기지의 결정입자가 상당히 미세함을 알 수 있고 입자는 임계구분없이 고분 분포하고 있다. Photo 3의 우측사진은 계면에서 TiC가 분

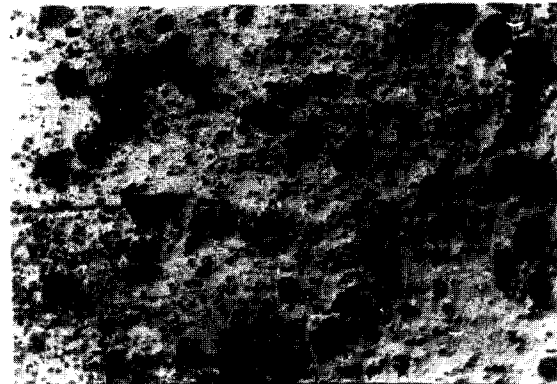
해되어 떨어져 나오는 것을 보여주고 있다. TiC의 미세한 입자가 기지에 분포함으로써 미량일 경우는 기지 강화원으로서 작용하지만 이것이 심해질 경우 심한 편석으로 인해 인장 강도의 급격한 저하를 초래하였다. 본 실험에서는 6번이 이에 해당하는 것으로서 광학현미경사진에서도 확인할 수 있다. 따라서 교반속도의 증가는 잇음성을 향상시켜 TiC의 용해를 증가시키거나, 온도도 같이 증가되어야 함을 확인할 수 있으며 이것은 Rhec¹⁵⁾의 연구결과와도 일치한다. 그러나 용탕의 온도가 지나치게 되면 Al₄C₃의 형성이 촉진되어 기계적 강도의 저하를 유발하게 된다.

3-2. 마모시험

입자상화복합재료의 가장 우수한 특징중의 하나가 내마모 특성¹⁶⁾이다. 따라서 본 연구에서도 TiC 입자강화 복합재료의 내마모 특성을 조사하였다. 마모시험은 TOKYO사 DAT-



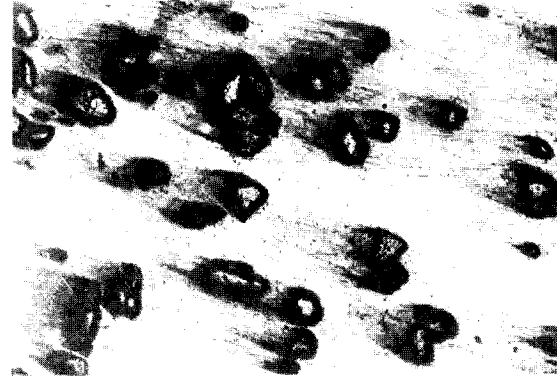
Sample No. 5



Sample No. 6



Sample No. 7



Sample No. 8

Photo 2. TiC particle dispersed in Al matrix.



Photo 3. Showing the fragments from the TiC particles.

U고속 마모시험기를 사용하여 마모하중은 3.2kg, 마찰거리는 100M, 마모속도는 0.79, 1.15, 1.65, 2.41, 3.67 M/sec의 5가지로 시험하였다. 시험편의 마모량은 마모된 현의 길이 b 와 이에 따른 호가 이루는 단면적, 회전하는 상대재의 폭 B 를 곱한 체적으로 다음과 같이 계산한다.

$$W = B[\pi r^2 \sin^{-1}(b/2r)/180 - (b/2)\{r^2 - (5/4)\}]$$

이때 단면적 b 가 상대재의 지름보다 매우 작기 때문에 $W = Bb^3/12r$ 로 간략하게 계산할 수 있다. 이렇게 해서 얻은 각 시험편에 대한 마모량의 그래프를 Fig. 2에 보였다. 여기서 볼 수 있는 바와 같이 TiC의 함유량이 증가

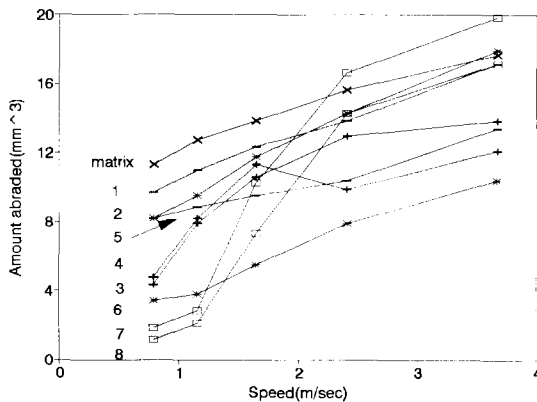


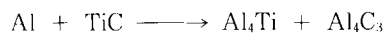
Fig. 2. Relation between wear loss amount and sliding speed of as-casted Al-1.5%Mg-x%TiC(x=1-10%)composites.(abration distance : 100m, load : 3.2kg)

될수록 마모량은 현저하게 감소함을 알 수 있다. 즉 TiC 첨가에 의해 내마모특성이 크게 향상되었다. 또한 마모속도에도 거의 영향받지 않았다. 다만 실험번호 7, 8은 TiC의 양이 가장 많은 경우로서 마모속도가 증가되어 고속마모시험시에는 오히려 기지조직 보다도 마모량이 커짐을 알 수 있다. 이것은 TiC량의 증가로 인해 기지에 충분히 wetting되지 못한 TiC입자가 마모시험중 빠져나와 시험편의 마모량을 크게 증가시켰기 때문이다. 이것은 인장 시험 결과에서도 나타났다. 즉 Table 5에서 8번 시료의 경우 TiC의 양이 크게 증가하였음에도 불구하고 강도의 증가는 TiC의 첨

가량이 낮은 3, 4번과 비슷함을 알 수 있다. 반면 경도값은 크게 증가하였다. 본 실험에서 마모기구를 규명하기 위해 전자현미경으로 마모면을 관찰한 결과 저속의 조건에서는 거의 슬라이딩 마모에 의해 지배되다가 점차 속도가 증가됨에 따라 용융마모에 의해 지배됨을 확인할 수 있었다. 따라서 본 실험의 7, 8번의 경우 용융마모기구에서 TiC 입자의 존재에 의해 마모량이 증대되는 것으로 사료되나 명확한 마모기구에 대해서는 계속 연구를 진행 중에 있다.

3-3. 인장강도와 연신율

Table 5에서 보인바와같이 TiC 입자 첨가에 의해 인장강도가 증가되었음을 알 수 있다. Banerji 등¹⁶⁾의 연구에 의하면 Al기지에 TiC 입자를 생성시킴으로써 이들 입자가 Al결정의 핵생성을 촉진하여 결정립미세화를 가져온다고 하였다. 또한 Sahoo 등¹⁷⁾은 Al-4.5wt% Cu기지에 9% TiC 입자 강화에 의해 55%이상의 항복강도 향상을 가져온다고 하고, 이러한 강도의 증가를 입자 미세화와 Orowan 입자 강화로 설명하였다. Satyaprasad 등¹⁸⁾의 연구에 의하면 열처리에 의해 분해된 TiC 입자가 기지와 반응하여 Al_4Ti_3 와 Al_4Ti 의 생성이 전자회절에 의해 확인됐다. 즉,



이때 TiC 입자와 Al기지의 열팽창계수 차이로 인해 TiC 입자 주위에는 높은 밀도의 전위가 존재하게 되며 이로 인해 TiC로부터 분해된 Ti은 Al기지로 확산해 들어가게 된다. 이 Ti이 Al과 반응해 Al_4Ti 를 형성해 1nm이하의 아주 미세한 석출물을 형성함으로써 결국 강도의 증가 요인이 된다. 또한 분해된 C는 Al과 Al_4C_3 를 형성하며 이것은 두 상사이의 경계에 생성되게 되는데 이때 반응은 다음과 같이 된다.



따라서 Al_4Ti 와는 달리 Al_4C_3 는 입자와 기지사이의 경계에 생성하게 된다. 결정립계에 생성된 Al_4C_3 는 급속간 화합물로서 아주 취약하다. 또한 기지급속과 입자사이의 열팽창계수 차이와 기지로부터 입자로의 하중전달 효과에

의해 크랙생성원으로 작용한다.

본 연구에서 각 실험조건에 대한 인장강도를 살펴보면 2번 조건의 경우가 가장 강도의 값이 크게 나타났다. 이 조건은 온도와 속도는 낮지만 교반시간이 큰 조건으로서 위에서 살펴본 바와 같이 TiC 입자와 Al용탕과의 격렬반응으로 인해 TiC 입자의 분해를 유발하는 조건인 8번에 비교하면 당연한 결과이다. 즉 8번 시료의 경우 격렬반응으로 인해 TiC 입자와 기지계면 사이에 기공의 형성이 크게 증가되고, 또한 TiC 입자의 분해 작용으로 입자의

표면에너지가 현저하게 증가하여 젖음성을 저하시키는 효과를 가져왔다. 4번 실험 역시 교반시간은 길으나 속도는 저속으로 유지함으로써 용탕과의 격렬한 반응이 억제되어 강도가 유지되었다. 또한 고속교반의 경우에 전자현미경 관찰을 통하여 TiC 입자주위에 미세한 기공의 존재를 확인할 수 있었으며 이것이 또한 인장강도 및 탄성률의 저하요인으로 작용하였음을 알 수 있다. 또한 Table 7의 Yates algorithm 분석결과에서도 교반시간과 교반온도가 가장 큰 인자임을 알 수 있다. 따라서

Table 7. Yates's algorithm for tensile strength, two levels factorial designs.

test condition number	design matrix variables			algorithm						
	t	T	S	run average (T.S.) y	(1)	(2)	(3)	divisor	estimate	identification
1	-	-	-	6.14	13.84	27.31	50.18	8	6.27 ± .14	average
2	+	-	-	7.7	13.47	22.87	3.10	4	0.76 ± .28	time(t)
3	-	+	-	6.45	9.68	2.13	3.14	4	1.79 ± .28	temp.(T)
4	+	+	-	7.02	13.19	0.97	0.62	4	0.16 ± .28	tT
5	-	-	+	5.0	1.56	-0.37	-4.44	4	-1. ± .28	speed(S)
6	+	-	+	4.68	0.57	3.51	-1.16	4	-0.29 ± .28	tS
7	-	+	+	5.95	-0.32	-0.99	3.88	4	0.97 ± .28	TS
8	+	+	+	7.24	1.29	1.61	2.60	4	0.65 ± .28	tTS

$$Y(=T.S.) = 6.27 + (0.76/2)T + (1.1/2)S + (0.79/2)TS + (0.65/2)tTS$$

본 연구의 실험조건에서 교반속도는 500rpm이 최적조건임을 알 수 있다. 이 조건에서 TiC를 첨가하지 않은 기지조직과 비교하면 인장강도는 4.83에서 7.7kg/mm²로 약 50%가 증가하였으며, 반면 연신율은 31.2%에서 24.24%로 약 20%가 감소하였다.

3-4. 파면조직 관찰

위에서 언급한 바와 같이 TiC 입자로 부터 분해되어 생성된 Al₃Ti의 미세한 입자가 기지 내에 분포함으로써 결국 전위의 이동이나 슬립을 억제시켜 기지가 상당히 강화된다. Photo 4(a)는 인장강도 시험후 파면에 대한 SEM사진으로서 미세한 입자로 인한 많은 양의 덩집이 형성되었음을 알 수 있고 따라서

재료전체는 연성파괴모드임을 알 수 있다. Photo 4(b)는 TiC 입자주위의 SEM 사진으로서 TiC 입자와 기지사이의 계면분리는 일어나지 않음을 알 수 있지만 앞에서 언급한바와 같이 계면에 존재하는 미세한 Al₃Ti의 입자가 결국 크랙형성의 근원으로 작용하였음을 알 수 있다. 이것은 Al₃Ti가 비교적 취약한 금속간 화합물로서 인장시험시 기지로 부터 입자로의 하중전달효과에 의한 영향때문이다.

3-5. Mg의 분포

입자강화 복합재료의 제조시 젖음성 향상을 위해 wetting agent의 첨가가 아주 중요하며, 활성이 큰 원소중의 하나인 Mg의 효과가 가장 우수한 것으로 많은 연구결과가 보고^{3, 5, 19, 20)}

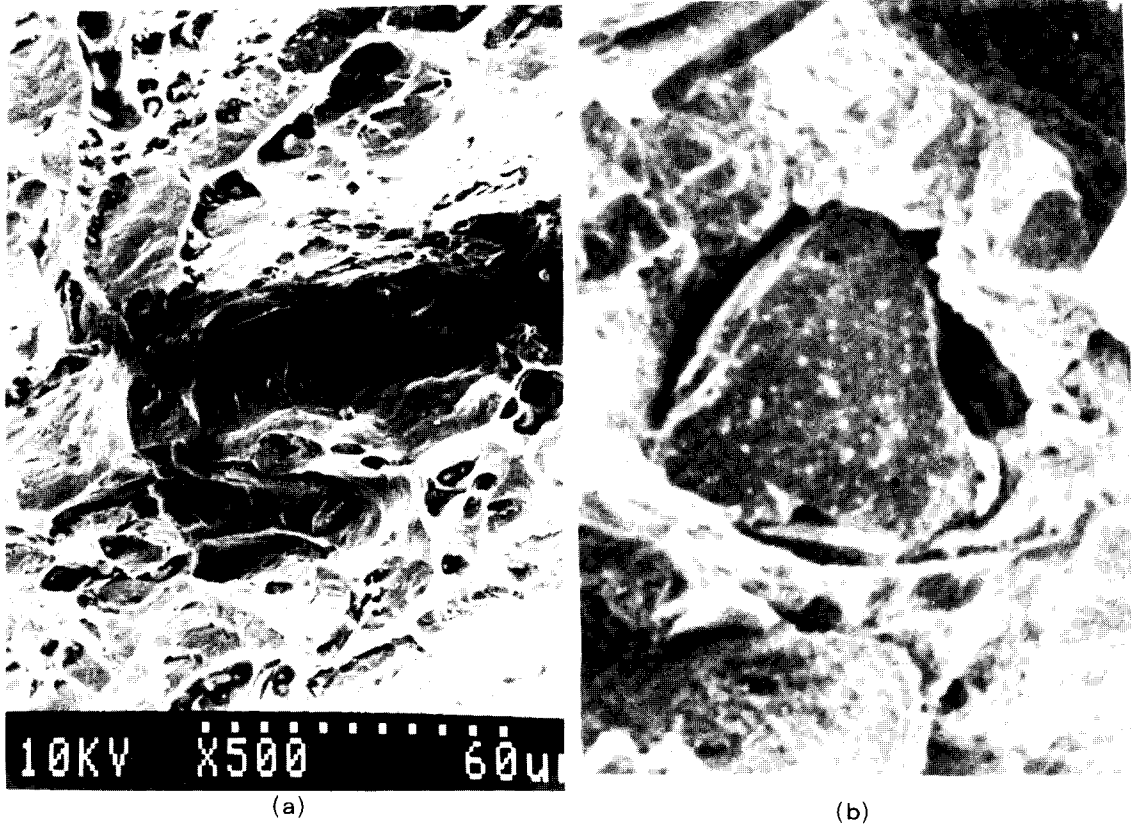


Photo 4. SEM micrograph of fracture surface.

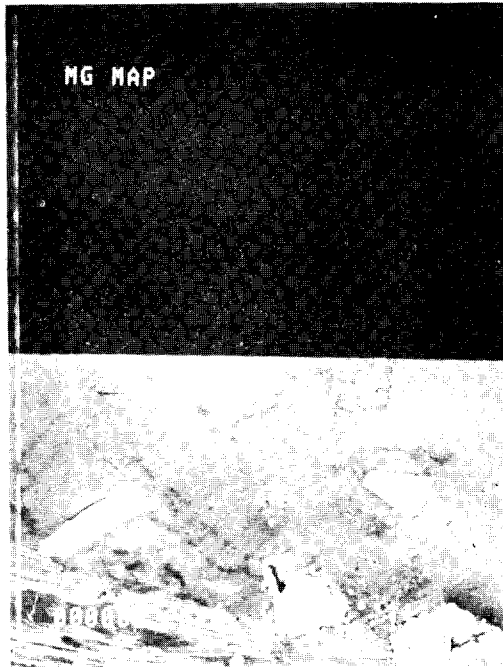


Photo 5. EPMA analysis of wetting agent(Mg) of Al/10wt%TiCp composite.

되어 있다. 본 실험에서도 wetting agent로서 Mg을 1.5wt% 첨가하여 복합재료를 제조하였다. 이때 첨가된 Mg이 TiC의 분해를 촉진하여 입자의 계면에너지를 낮춤으로서 Al기지와 강화입자사이의 젖음성을 향상시켜 입자강화 복합재료의 강도증가에 기인하게 된다. SiC 입자강화 복합재료의 경우 분해된 Si과 Mg의 반응으로 인해 화합물이 생성되는 것으로 보고되어져 있으나 TiC입자 강화재의 경우 Ti과 Mg과의 화합물은 발견할 수 없었고 또한 EDAX분석을 행한 결과 Mg은 기지에 고루 분포하였다. Photo 5는 EPMA사진으로서 Mg 이 기지에 고루 분포하고 있음을 보여주고 있으며 XRD분석에서 Mg과의 화합물은 확인되지 않았다.

4. 결 론

Al기지에 10wt% dml TiC 입자를 용탕교반법에 의해 첨가하여 복합재료를 제조한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. TiC 입자용해량은 교반속도에 가장 큰

영향을 받으며, 용탕온도, 교반시간도 교반 속도보다는 작으나 TiC 입자 용해에 영향을 주고 있다. 이 세가지 제조 변수는 TiC 용해량에 상호 효과가 있다.

2. TiC 입자 용해량이 증가될수록 내마모성, 인장강도 및 탄성율 등이 증가하였으나, 첨가된 양에 반드시 비례하지 않았다. 계면과 입자사이의 결합력이 제 변수에 크게 좌우되며, 또한 TiC 분해에 의해 생성된 화합물의 조질이 아주 중요하다.

3. 본 연구범위에서 용탕온도(750°C)가 낮고, 교반속도(1000rpm)와 교반시간(15min)이 큰 경우 최적의 내마모 성질을 얻을 수 있다. 이는 잘게 분쇄된 TiC 입자의 분포에 기인된다.

4. Al/TiC 복합재료 제조시 wetting agent로서 첨가한 Mg은 기지에 고루 분포되었다.

후 기

이 연구는 1991년도 교육부지원 학술진흥재단의 자유공모(지방대학육성)과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. K. Otori, H. Watanabe and Y. Takeuchi, Mater. Sci. Thec., **3**, 7 (1987)
2. C. Milliere and M. Suery, Mater. Sci. Tech., **4**, 41 (1988)
3. M. Harata, T. choh, M. Kobashi, J. Japan Inst. Metals, **54** (12), 1382 (1990)
4. A.K.Kuruvilla, V.V.Bhanuprasad, Bull. Mater. Sci., **12** (5), 495 (1989)
5. S.Y.Oh, J.A.Cornie, and K.C.Russell, Metall. Trans., **20A**(3), 533 (1989)
6. S.K.Rhee, J.of the American Society, **53** (7), 386(1970)
7. Donald Webster, Metall. Trans., **13A** (8), 1511 (1982)
8. J.J.Lewandowski and C. liu, Materials Science and Engineering, **A107**, 241(1989)
9. Abinash Banerji, Winfried Reif, Metall. Tran., **17A** (12), 2127 (1986)
10. G.W.Halldin et al., Progress in Powder Metallurgy, **38**, 593 (1983)
11. William J. Diamond, *Experiment Designs*, 2nd Ed., Van Nostrand Reinhold, USA, (1989)
12. A. Banerji, W. Reif., Metall. Trans., **17A**, 2127 (1986)
13. M. Chen, T.Z.Kattamis, B.V.Chambersa, J. A.Cornie, Conf : Engielred Materials for Advanced Friction ane Wear Applications, Gaithersburg, maryland, USA 1-3 Mar, **63** (1988)
14. G.C.Wei, P.F.Becher, j. of the American Ceramic Society, **67** (8), 571 (1984)
15. S.K.Rhee, J. American ceramic society, **53** (7), 386(1970)
16. Jayantial M. panchal, Tim Vela, Advances in Powder Metalurgy, **2**, 497 (1983)
17. P. Sahoo, M.J.Koczak, *Proc. 1st japan International SAMPE Symposium*, Nov. 28-Dec. 958 (1989)
18. K. Satyaprasad, Y.R.Mahajan and V.V. Bhanuprasad, Scripta Metallurgica et Materialia, **26**, 711 (1992)
19. S.Y.Oh, J.A.Cornie, and K.C.Russell, Metall. Trans, **20A**(3), 527 (1989)
20. Doru M. Stefanescu, Avijit Moitra, A. Sedat Kacar, and Brij K. Dhindaw, Metall. Trans., **21A**(1), 231 (1990)