

알루미늄 복합재료의 마찰용접시 브레이크 타이밍이 접합계면 효율에 미치는 영향

김현수^a · 박인덕^b ·篠田 剛^c · 김태규^{a*}

^a밀양대학교 신소재공학부, ^b부산시청 공업기술과, ^c나고야 대학

Effect of Brake Timing on Joint Interface Efficiency of Aluminum Composites During Friction Welding

Hyun-Soo Kim^a, In-Duck Park^b, Takeshi Shinoda^c and Tae-Gyu Kim^{a*}

^aDept. of Material Engineering, Miryang National University, Miryang 627-706, Korea

^bIndustry & Technology Div., Busan Metropolitan City Hall, Busan 611-735, Korea

^cDept. of Material Science & Engineering, Nagoya University, Nagoya, 464-8603, Japan

(Received January 24, 2006; Accepted February 19, 2006)

Abstract Friction welding of Al₂O₃ particulate reinforced aluminum composites was performed and the following conclusions were drawn from the study of interfacial bonding characteristics and the relationship between experimental parameters of friction welding and interfacial bond strength. Highest bonded joint efficiency (HBJE) approaching 100% was obtained from the post-brake timing, indicating that the bonding strength of the joint is close to that of the base material. For the pre-brake timing, HBJE was 65%. Most region of the bonded interface obtained from post-brake timing exhibited similar microstructure with the matrix or with very thin, fine-grained Al₂O₃ layer. This was attributed to the fact that the fine-grained Al₂O₃ layer forming at the bonding interface was drawn out circumferentially in this process. Joint efficiency of post-brake timing was always higher than that of pre-brake timing regardless of rotation speed employed. In order to guarantee the performance of friction welded joint similar to the efficiency of matrix, it is necessary to push out the fine-grained Al₂O₃ layer forming at the bonding interface circumferentially. As a result, microstructure of the bonded joint similar to that of the matrix with very thin, fine-grained Al₂O₃ layer can be obtained.

Keywords : Friction welding, 3004 Aluminum alloy, MMC(Metal Matrix Composites), Brake timing

1. 서 론

최근 자원 및 에너지 절약이라는 관점에서 자동차의 경량화에 대한 요구가 높아지고 있으며 경량화 재료로서 알루미늄합금이나 마그네슘합금에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히, 알루미늄합금은 가공성 및 자원재활용성이 우수하기 때문에 그 수요가 상당히 많은 편이다. 그러나 강재에 비하여 강도가 약하기 때문에 최근에는 불연속 섬유나 세라믹스 입자를 분산강화 시킨 금속기복합재료가 많이 개발되

고 있다.

금속기복합재료는 비중이 작고 고강도이며 내마모성이 뛰어나고 열전도율이 높으며 또한 열팽창계수가 작고 소성가공에 의한 강화효과를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

그러나 자동차나 구조물 등에 금속기 복합재료를 적용하려면 2차 가공기술로서 금속기복합재료간의 접합이 필요하다. 금속기복합재료의 접합기술로는 아크, TIG, MIG, CO₂ 레이저, 저항용접법 등의 용융용접법과 확산접합 및 마찰용접 등의 고상접합법이 보고되

*Corresponding Author : [Tel : +82-55-350-5452; E-mail : tgkim@mnu.ac.kr]

고 있다¹⁾.

금속기복합재료에 용융용접법을 적용하는 경우는 공극의 생성과 모재금속의 용융에 의한 용융부에서의 세라믹스 입자 분포의 변화 등에 의하여 접합부가 취약해지는 문제점이 있다²⁾. 그러나 금속기복합재료에 고상접합법의 한 방법인 마찰용접을 실시하면 용융용접에서 나타나는 문제점이 생기지 않고 특정 조건에서 모재와 비슷한 강도가 얻어진다³⁾. 따라서 금속기복합재료 접합기술에서는 고상접합법이 유용한 방법으로 알려져 있다⁴⁻⁸⁾.

본 연구에서는 알루미늄이 체적율이 37%로 큰 알루미늄 입자강화 알루미늄 복합재료(이후 MMC라 한다)를 사용하여 마찰용접법을 실시하여 마찰용접의 조건 특히, 브레이크 타이밍(Brake timing)이 접합부의 강도와 효율에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험방법

2.1. 시험편의 화학조성 및 기계적 성질

본 연구에 사용한 시험편은 미국 LANXIDE사가 개발한 알루미늄 비가압 금속침투법[PRIMEX]으로 만들어진 MMC를 사용하였다⁹⁾. 모재는 A3004 알루미늄합금¹⁰⁾, 강화입자는 평균입경 2~5 μm의 알루미늄 입자이고 체적함유율은 37% 이었다.

표 1에 모재인 A3004 알루미늄합금의 조성을 나타내었고, 표 2에 MMC 소재의 실온에서의 기계적 성질을 나타내었다. 인장강도는 255MPa로 비교적 높으며, 연신율은 0.7%로 매우 작은 값을 나타내었다.

2.2. 마찰용접 시험편 및 시험조건

그림 1에 마찰용접 시험편의 형상을 나타내었고, 방전가공으로 제작 하였다.

표 3은 마찰용접시험의 시험조건을 나타내었다. 우선 마찰압력 P_1 , 마찰 업셋 거리 u_1 , 업셋 시간 t_2 를 고정하고, 업셋 압력 P_2 와 회전수 N , 브레이크 타이밍 등을 변화시켜서 실험하였다. 또한 업셋 압력은 마찰압력에 대하여 1~3배, 회전수는 2000, 3000,

Table 2. Mechanical properties of MMC at room temperature

Tensile strength (MPa)	255.6
Vickers hardness (Hv)	269
Elongation (%)	0.7

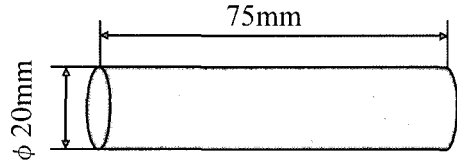


Fig. 1. Shape of friction welding specimen.

Table 3. Friction welding conditions

Friction pressure	31.8	P_1 (MPa)
Friction upset distance	1	u_1 (mm)
Upset pressure	31.8, 63.6, 95.5	P_2 (MPa)
Upset time	10	t_2 (s)
Rotation speed	2000, 3000, 4000	N (rpm)
Brake timing	Process I, II	

4000 rpm의 조건으로 실험을 실시하였다.

2.3. 브레이크 타이밍 제어 조건

브레이크 타이밍은 공정I과 공정II로 나누었다. 이것은 마찰단계에서 회전을 정지하고 시작하는 타이밍과 업셋 압력을 가하는 타이밍에 변화를 주었다. 그림 2에 브레이크 타이밍의 회전수와 마찰 및 업셋 압력의 관계를 나타내었고, (a)가 공정 I이고 (b)가 공정 II이다. 공정 I은 마찰단계의 종료와 동시에 회전하고 있는 부재에 브레이크가 작동하여 회전이 급격하게 감소하여 주축회전이 완전하게 정지함과 동시에 업셋 압력이 가해지는 공정이다. 공정 II는 부재 회전의 감속 중에 업셋 압력을 가하여 접합을 완료하는 공정이다.

2.4. 인장시험

인장시험편은 JISZ2201 4호에 의하여 평행부 길이 20 mm, 직경 14 mm로 가공하여 사용하였다. 그림 3

Table 1. Chemical composition of A3004 Al alloy(mass %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
<0.3	<0.7	<0.25	1.0~1.5	0.8~1.3	-	<0.25	-	bal.

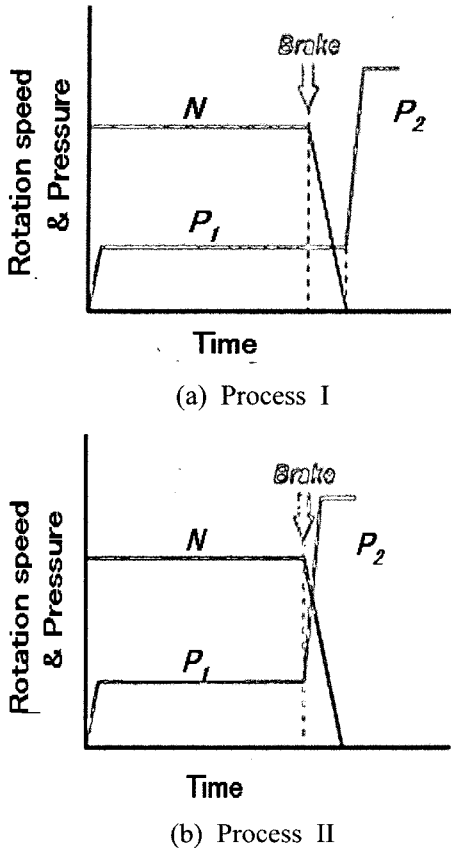


Fig. 2. Schematic diagram of friction welding parameters for (a) Process I and (b) Process II (P_1 : Friction pressure, N : Rotation speed, P_2 : Upset pressure).

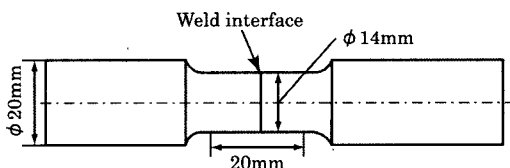


Fig. 3. Shape of tensile test specimen.

에 인장시험편의 형상과 치수를 나타내었다. 인장시험속도는 3 mm/min로 하였으며, 각 시험편에 대하여 인장강도를 측정하고, MMC 모재의 인장강도를 100%로 하여 환산하여 비교한 접합 효율을 평가하였다.

2.5. 접합계면의 조직관찰방법

마찰용접 시험편의 접합단면을 절단하여 경면 연마한 후, Keller액을 사용하여 3초간 에칭하여 레이저 현미경을 사용하여 접합계면을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 브레이크 타이밍의 영향

3.1.1. 마찰용접 데이터의 영향

브레이크 타이밍을 변화시켰을 경우의 마찰용접 데이터의 영향을 조사하였다. 실험조건은 $P_1=31.8$ MPa, $u_1=1$ mm, $P_2=63.6$ MPa, $t_2=10$ sec, $N=4000$ rpm으로 설정하였다.

그림 4(a) 및 (b)에 브레이크 타이밍을 변화시켰을 때의 회전수, 압력, 마찰 업셋 거리의 변화를 각각 나타내었다. 그림 중의 점선은 업셋 압력이 가해진 타이밍을 나타낸 것이다. 브레이크 타이밍을 변화시켰기 때문에 회전수가 감속하는 타이밍과 업셋 압력이 가해지는 타이밍이 다르게 된다.

그림에서 브레이크 타이밍의 변화에 의해 업셋 거리가 다른 것을 알 수 있었다. 공정 I은 감속과정에

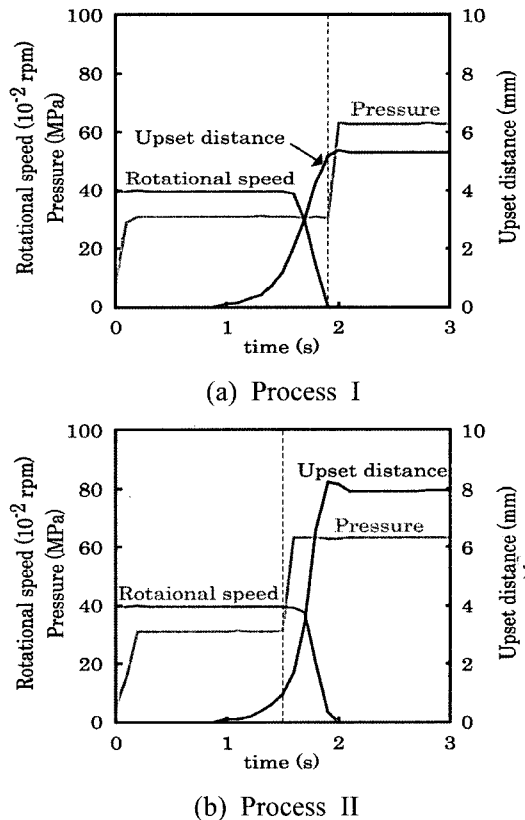


Fig. 4. Effect of brake timing on friction welding data ($P_1=31.8$ MPa, $u_1=1$ mm, $P_2=63.6$ MPa, $t_2=10$ sec, $N=4000$ rpm).

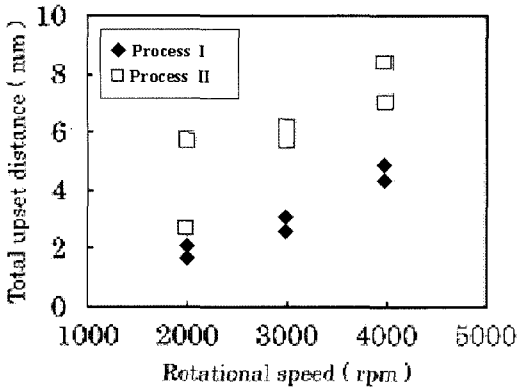


Fig. 5. Relationship between total upset distance and rotational speed ($P_1 = 31.8 \text{ MPa}$, $u_1 = 1 \text{ mm}$, $P_2 = 3.6 \text{ MPa}$, $t_2 = 10 \text{ sec}$).

업셋 거리가 급격하게 증가하고, 업셋 압력이 가해졌을 때 업셋 거리는 거의 증가하지 않았다. 이것은 공정 I의 경우, 부재가 업셋 압력에 의한 압축변형을 받을수록 연화하지 않았기 때문이라 판단된다.

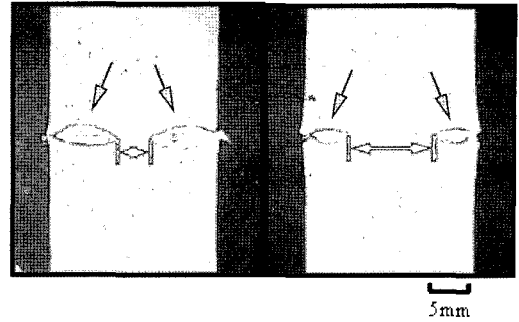
이것에 대하여 공정 II는 업셋 압력을 가할 때 업셋 거리는 급격하게 증가하고, 전 업셋 거리도 공정 I의 5.3 mm에서 8 mm정도까지 증가하였다. 이것은 공정 II는 업셋 압력을 가할 때 부재의 회전이 정지하지 않고, 감속과정에 더 큰 압력이 가해졌기 때문이라고 판단된다.

그림 5에 공정 I과 II의 업셋 거리와 회전수의 관계를 나타내었다. 그림에서 브레이크 타이밍에 관계 없이 회전수의 증가와 함께 업셋 거리도 증가함을 알 수 있었다. 앞에서 설명하였듯이 공정 II는 공정 I에 비하여 전 업셋 거리가 증가하였고, 회전수 2000 rpm인 경우 공정 II에서는 전 업셋 거리에 오차가 나타났다.

3.1.2. 접합계면의 매크로관찰

접합계면 조직에 미치는 브레이크 타이밍의 영향을 조사하기 위하여 공정 I 및 II의 접합계면의 매크로 관찰 하였다.

그림 6에 공정 I 및 II의 접합계면을 매크로 관찰 결과를 나타내었다. 실험조건은 $P_1=31.8 \text{ MPa}$, $u_1 = 1 \text{ mm}$, $P_2=63.6 \text{ MPa}$, $t_2=10 \text{ sec}$, $N=3000 \text{ rpm}$ 으로 설정하였다. 그림에서 화살표로 나타낸 회색 부분이 알루미늄 미세화층을 나타낸다. 브레이크 타이밍의 차이에 따라 접합계면의 매크로 조직이 다른 것을 알 수



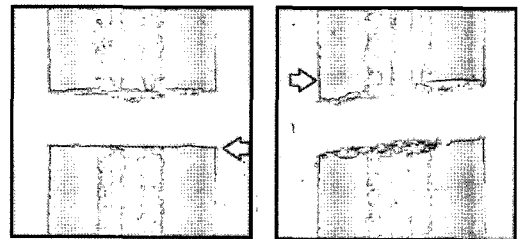
(a) Process I (b) Process II

Fig. 6. Effect of brake timing on macrostructure of weld interface ($P_1 = 31.8 \text{ MPa}$, $u_1 = 1 \text{ mm}$, $P_2 = 63.6 \text{ MPa}$, $t_2 = 10 \text{ sec}$, $N = 3000 \text{ rpm}$).

있었다. 공정 I 및 II에서 모두 알루미늄 미세화층이 관찰되나, 크기는 공정 II가 I에 비하여 작게 나타났다. 또 좌우 대칭으로 관찰되는 알루미늄 미세화층간의 폭도 공정 II가 컸고, 알루미늄 미세화층은 외주부 근처에서 관찰 되었다. 이것은 공정 I의 경우는 업셋 압력에 의한 접합계면의 변형이 축 방향만의 압축변형이지만, 공정 II는 업셋 압력 가할 때 접합계면 부근의 부재가 모재로부터 Scatter flash 형태로 접합계면 중심에서 외주방향으로 향하여 압출현상과 유사하게 변형이 발생하였기 때문이라고 판단된다.

3.2. 접합부의 성능 평가

그림 7(a) 및 (b)는 공정 I 및 II의 조건으로 마찰 용접하여 인장시험을 행한 시험편의 파단후의 외관 사진 및 접합효율을 나타낸 것이다. 그림중의 화살표



47.8% (Joint efficiency) 94.5%
(a) Process I (b) Process II

Fig. 7. Appearance of tensile tested specimen ($P_1 = 31.8 \text{ MPa}$, $u_1 = 1 \text{ mm}$, $P_2 = 63.6 \text{ MPa}$, $t_2 = 10 \text{ sec}$, $N = 4000 \text{ rpm}$), tensile strength of base metal : 255.6MPa.

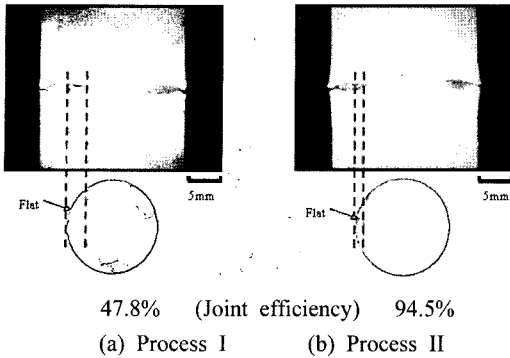


Fig. 8. Macrostructure of weld interface and fractured surface ($P_1 = 31.8$ MPa, $u_1 = 1$ mm, $P_2 = 63.6$ MPa, $t_2 = 10$ sec, $N = 4000$ rpm), tensile strength of base metal : 255.6 MPa.

는 접합계면을 나타낸다. 마찰용접의 조건은 $P_1 = 31.8$ MPa, $u_1 = 1$ mm, $P_2 = 63.6$ MPa, $t_2 = 10$ sec, $N = 4000$ rpm 이었다.

공정 I 및 II 모두에서 인장시험편 접합계면에는 알루미늄 미세화층인 회색의 층이 관찰되었다. 외관 사진에서 공정 I은 접합계면인 회색층에서 파단하였지만, 공정 II는 접합계면의 회색층에서 모재로 향하여 파단하였다. 공정 I 및 II의 접합효율은 47.8%, 94.5%로 각각 나타났다.

이와 같이 브레이크 타이밍에 따라 접합부강도가 크게 다른 이유는 다음과 같다. 인장시험을 행한 시험편의 접합계면을 매크로 관찰한 결과와 파단면을 그림 8에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 공정 II에서 알루미늄 미세화층은 외주방향으로 추출되어 있는 것을 알 수 있었다. 또 파단면을 관찰하면 접합계면에서 모재로 향하여 파단한 공정 II는 외주부근에만 평탄한 파단면이 관찰되었다. 이것에 대하여 접합계면에서 파단한 공정 I은 반경 약 4 mm이내의 영역만 제외하고 평탄한 파단면이 관찰되었다.

마찬가지로 평탄한 파단면이 관찰된 위치를 매크로 사진과 비교해 보면, 평탄한 파단면이 관찰된 영역은 대부분 알루미늄 미세화층이 존재하는 것을 알 수 있었다. 즉, 알루미늄 미세화층이 존재하는 영역의 크기가 접합부강도를 크게 좌우한다고 판단된다. 이것은 그림 6에 나타내었듯이 알루미늄 미세화층은 알루미늄 입자가 미세하게 파쇄되어 집적되어 있고, 모재 금속끼리의 결합이 작고 매우 취약하였기 때문에 미세화층의 영역이 클수록 접합효율은 떨어진다

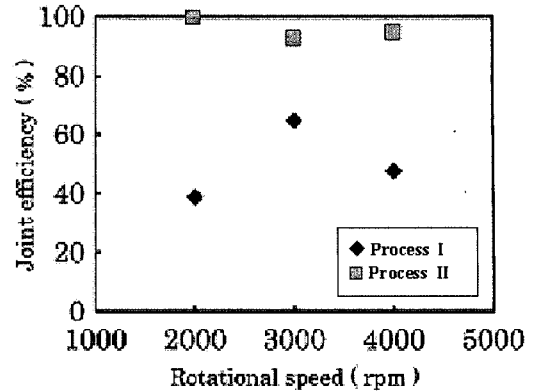


Fig. 9. Relationship between joint efficiency and rotational speed ($P_1 = 31.8$ MPa, $u_1 = 1$ mm, $P_2 = 63.6$ MPa, $t_2 = 10$ sec), tensile.

고 판단된다. 공정 II는 취약한 알루미늄 미세화층이 접합계면 외주방향으로 추출되었고, 접합계면 대부분의 영역이 모재에 가까운 조직 또는 매우 얇은 알루미늄 미세화층이 얻어졌다. 이 결과 공정 II는 접합부효율 94.5%로 모재의 인장강도에 가까웠다.

3.2.1. 회전수의 영향

공정 I 및 II가 접합효율에 미치는 회전수 영향을 조사하여 그림 9에 나타내었다. 실험조건은 $P_1 = 31.8$ MPa, $u_1 = 1$ mm, $P_2 = 63.6$ MPa, $t_2 = 10$ sec, $N = 2000, 3000, 4000$ rpm 이었다. 그림에서 회전수에 관계없이 공정 II가 I에 비하여 접합효율이 높고, 모재의 강도와 비슷한 것을 알 수 있다. 공정 II에서는 2000 rpm에서 접합부위는 손상 없이 모재 부분이 파단하여 접합부 효율이 100%였다. 또, 공정 II에서는 접합부 효율에 미치는 회전수의 영향은 없었다. 공정 I은 3000 rpm일 때 접합부효율이 65%로 가장 크게 나타났고, 모든 시험편들이 접합부계면에서 파단하였다. 따라서 공정 II의 조건으로 하면 회전수에 관계없이 접합부효율을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

3.2.2. 업셋 거리의 영향

앞절에서 설명하였듯이 브레이크 타이밍은 전 업셋 거리에 크게 영향을 미치고, 공정 II는 I에 비하여 업셋거리가 커지는 것을 확인하였다. 따라서 다양한 조건에 의하여 구한 접합효율과 전 업셋 거리의

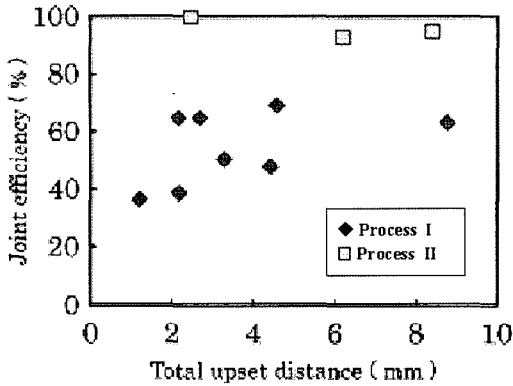


Fig. 10 Relationship between joint efficiency and total upset distance ($P_1 = 31.8$ MPa, $u_1 = 1$ mm, $P_2 = 31.8, 63.6, 95.5$ MPa, $t_2 = 10$ sec, $N = 1500, 2000, 3000, 4000$), tensile strength of base metal : 255.6MPa

관계를 구하였다. 실험조건은 $P_1=31.8$ MPa, $u_1=1$ mm, $P_2=31.8, 63.6, 95.5$ MPa, $t_2=10$ sec, $N=1500, 2000, 3000, 4000$ rpm 이었다. 그림 10에 접합효율과 전 업셋 거리의 관계를 각각 브레이크 타이밍에 대하여 나타내었다. 그림에서 공정 I은 전 업셋거리가 증가하여도 접합효율은 크게 증가하지 않고 최고 접합효율은 65%였다. 또한, 공정 II도 공정 I과 같은 경향을 나타내었다.

이상에서 공정 II에서 접합부 효율이 상승하는 것은 전 업셋 거리의 증가와 관계가 없었다. 따라서 MMC 동중재 마찰용접 접합부가 모재 수준의 효율을 얻기 위해서는 접합계면에 형성되는 알루미늄 미세화층을 가능한 접합계면 외주부로 밀어내고, 매우 얇은 층으로 최소화 시킬 필요가 있다고 판단된다.

4. 결 론

알루미늄 입자 강화 알루미늄 복합재료의 동중재 마찰용접을 실시하여, 접합계면의 현상 및 마찰용접

변수와 접합부 강도 관계를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 공정 II는 최고 접합부 효율이 100%에 근접하였고, 모재와 비슷한 접합부 강도가 얻어졌다. 공정 I은 최고 접합부 효율이 65%이었다.
2. 공정 II는 접합계면에 형성되는 알루미늄 미세화층이 접합계면 외주방향으로 추출됨으로서 접합계면 대부분의 영역에서 모재에 가까운 조직 또는 매우 얇은 알루미늄 미세화층이 관찰되었다.
3. 회전수에 관계없이 공정 II가 공정 I에 비하여 접합효율이 높았다.
4. 마찰용접 접합부가 모재 수준의 효율을 얻기 위해서는 접합계면에 형성되는 알루미늄 미세화층을 접합계면 외주부로 분포시키고, 매우 얇은 층으로 최소화 시킬 필요가 있다고 판단된다.

참고문헌

1. Okita: Light Metal Welding, **39** (9) (2001) 403.
2. Fukumoto and Kobayashi: Composite Material, **34** (1995) 1099.
3. Enjou, Ikeuchi, Murakami and Suzuki: J. of Japan Welding Society, **5** (1987) 317.
4. Katou, Asanuma, Ootuka and Tokisue: Proceeding of The Light Metal Society 81st Fall Annual Meeting, (1991) 87-88.
5. Katou and Tokisue: Friction Welding, **3** (1996) 104.
6. Toujou, Katou and Tokisue: J. of the JFWA, **1** (1994) 57.
7. Asanuma, Katou, Ootuka and Tokisue: Proceeding of The Light Metal Society 80th Annual Meeting, (1991) 197.
8. Katou and Tokisue: Light Metal Welding, **32** (1994) 429.
9. Masaaki Maruyama: NIKKEI Mechanical, **561** (2001) 60.
- 10 The Society of Light Metal, **41** (1991) 444.