Journal of Korean Powder Metallurgy Institute
Vol. 1, No. 2, 1994

기계적 합금법으로 제조된 MA754 산화물 분산강화 합금의 마찰압접에 관한 연구

강지훈 · 박성계 · 김지순 · 권영순
울산대학교 재료공학과

Friction Welding of MA754 ODS Alloy Produced by Mechanical Alloying

Ji-Hoon Kang, Sung-Gye Park, Ji-Soon Kim and Young-Soon Kwon
Department of Materials Science and Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea
(Received September 11, 1994)

ABSTRACT In order to find an optimal friction-welding condition for Ni-base ODS alloy (MA 754) produced by mechanical alloying, joint experiments were performed with various conditions of friction pressures (50~500 MPa), friction times (1~5 sec) and upset pressures (50~600 MPa). The optimal friction pressure and upset pressure must be above 400 MPa and 500 MPa, respectively, which are determined by tensile strengths and fracture features of as-welded joints. A maximum strength of 975 MPa could be obtained under these pressure conditions at friction time of 2 sec. Microstructural features of bonded interface by optical microscope and SEM revealed that the interface regions of all specimens are consisted with three distinct regions and defects such as voids, cracks and wavy interfaces exist in the joints produced under not-optimized conditions. EDS results showed that these defects include oxides composed with elements of Al, Y and Ti. The hardness on the bonded interface was higher than in the base metal region. Specimens fractured in bonded interface region had lower strength values compared to those fractured in base metal region. Surfaces of the former showed a typical intergranular fracture.

1. 서 론

ODS(Oxide-Dispersion-Strengthened) 합금은 고온에서 안정한 산화물을 초합금기지에 균일하고 미세하게 분산시켜 고온강도와 내열성을 강화시킨 초내열재료로서, Gas Turbine용 Nozzle 및 Blade 등의 재료로 활용될 수 있는 차세대 내열재료로서 주목을 받고 있다.[1,2] 특히, 합금화가 되기 힘든 성분원소를 액상의 출현없이 상온부근에서 혼합하여, 미세한 분산상을 얻을 수 있도록 한 기계적 합금법(Mechanical Alloying, MA)의 개발은 초합금기지에 산화물 입자의 균일 분포를 보다 용이케 함으로써 MA계열의 다양한 ODS합금이 개발되게 되었다.[3] 특히, 이렇게 하여 개발된 MA계열 ODS 합금 중 하나인 MA754 합금은 융점이 높고(1673 K), 석출강화상인 γ' 상에 의한 석출강화 없이 산화물(Yttria, Y_2O_3)에 의한 분산강화에 의해서만 강화된 합금으로 크립 및 피로 저항성 등 고온 물성이 매우 우수한 재료로 알려져 있다.[4]

그러나, MA ODS 합금의 보다 폭넓은 실용화를 위해서는 여러 문제점들이 지적되고 있는데, 그 중에서도 터어빈 블레이드와 같은 복잡한 구조물 제조시 필수 불가결한 적정 접합기술의 개발이 아직 이루어지지 않아 이 문제에 대한 해결 방안이 크게 기대되고 있다. 최근까지 행해진 ODS 합금의 실용화를 위한 접합 연구결과들을 살펴 보면, TIG, EBW, Laser 용접법 등의 용융용접 등은 모재의 상당량을 용융시키므로 용접부 근방의 산화물 입자의 균일

분포가 소멸되어 본래의 강화기구의 이점이 소실되고[5-7] 용접균열 등의 접합결함이 심하게 나타나는 것으로 보고되었다.[8] 모재를 거의 용융시키지 않는 접합방법으로는 브레이징, 액상확산접합, 고상확산접합, 마찰압접 등과 같은 접합법이 있으나, 브레이징의 경우 Creep Strength가 저하하며, 삽입금속 이상의 온도에서는 사용이 불가능하다는 단점을 갖고 있으며,[9,10] 액상확산접합의 경우에는 합금성분의 균일화가 완료된 단계에서 접합층내에 'Bamboo Structure'로 알려진 이상(異常) 미세조직과 산화물의 편석 응집 등이 확인되어 아직 만족할 만한 결과를 얻지 못한 것으로 보고되고 있다.[11-13] 기타 고상확산접합,[14] HIP법,[15] 표면개질에 의한 액상확산접합[16] 등의 연구 결과에서도 계면의 산화물 응집 및 접합성의 결여로서 적절한 고온 기계적 성질을 보여주지 못한 것으로 보고되고 있다.

따라서 본 연구에서는 ODS합금의 실용화를 위한 적절한 접합기술 개발의 한 방안으로, 마찰압접(Friction Welding or Inertia Bonding) 방법의 가능성을 조사하고자 하였다. 마찰압접법은 대개 브레이크식 시스템으로 구성되는 것이 보통인데, 한 쪽의 시편을 일정 속도로 회전시키면서, 다른 쪽의 고정시편을 일정한 압력으로 밀착시켜, 접합면간의 상대 운동으로 발생하는 마찰열에 의해 모재의 변형저항을 감소시켜 접합하는 방법이다. 이와 같은 마찰압접법의 장점은, 마찰열에 의해 접촉면 및 그 근방이 고온이 되면서 격렬한 소성변형이 일어남으로써, 밀착된 접합계면에 존재하고 있던 산화피막 및 흡착층 등의 오염층이 접합면 밖으로 제거되어 청정한 접합계면이 얻어질 수 있으며, 접합시 가해지는 외부의 압력에 의해 액상의 출현없이 고상확산 접합과 같은 효과를 얻을 수 있을 뿐 아니라, 이 모든 과정이 극히 짧은 시간 동안에 매우 간단한 공정으로 완료된다는 점 등으로 요약할 수 있다.[17] 본 연구에서는 마찰압력과 시간, 마찰 후 접촉압력 등을 다양하게 변화시켜 접합체를 제조한 후, 접합체 강도에 대한 인장시험과 접합계면의 결함 및 미세구조에 대한 현미경 관찰과 EDS에 의한 원소분석, 접합이음부의 경도분포의 조사와 파단면에 대한 분석 등을 통하여 최적의 압접조건을 확인하고자 하였다.

2. 실험방법

Table 1. Chemical composition of MA754 alloy used (wt.%)

Ni	Cr	Fe	Al	Ti	C	O	Y_2O_3
78.42	19.48	0.31	0.30	0.45	0.05	0.39	0.60

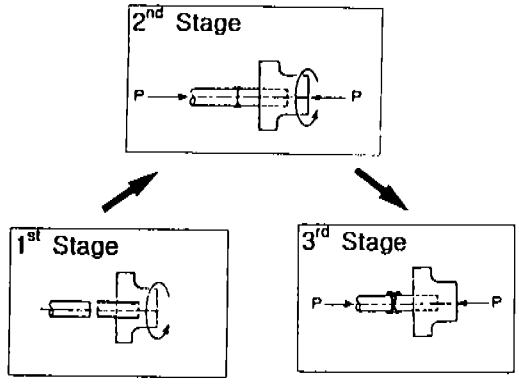


Fig. 1. Stages in friction welding (Brake-Type).[17]

2.1. 모 재

실험에 사용된 모재는 기계적 합금법으로 제조된 Inco사의 Ni기 MA754 합금이었으며, 먼저 표 1과 같은 조성이 되도록 원료분말을 종형(縱型)의 고에너지 볼밀에 장입하여 Ar 가스 분위기에서 기계적 합금한 후, 연강재 용기내에서 탈가스 처리와 열간압출 및 소결과정을 거쳐 제조되었다. MA754 모재는 선반가공에 의해 직경 10 mm, 길이 50 mm로 가공한 후 아세톤으로 초음파 세척한 후 접합에 사용하였다.

2.2. 접 합

접합은 브레이크식 마찰압접기를 사용하여 행하였으며, 그림 1에 나타낸 바와 같이,[17] 마주보고 있는 두 모재 시험편 중 한 쪽을 회전시키고, 회전하지 않는 다른 한 쪽 시험편을 회전하고 있는 시험편의 정면으로 이동, 일정 마찰압력(Friction Pressure)과 시간으로 접촉케 하여 마찰시킨 후, 회전시험편을 정지시킴과 동시에 일정시간 동안 가압력(Upset Pressure)을 주어 접합하였다. 이와 같은 압접과정은 일련의 세 가지 단계로써 설명할 수 있는데, 첫번째 단계는 건식마찰(Dry Friction)과 마멸(Wear)이 주로 일어나면서 회전력(Torque)이 급격히 상승함과 아울러 온도가 상승하여 열적 연화(Thermal Softening)에 의해 재료의 변형저항이 줄어들고 회전력이

다시 급격히 감소하는 단계이다. 두번째 단계는 변형강화(Strain Hardening)와 열적 연화의 과정이 평형을 이룸으로써 회전력이 일정하게 유지되는 과정이며, 마지막 세번째 단계는 비틀림단조(Torsional Forging)가 일어나는 단계로써, 회전력이 다시 급격히 상승하다가 계면중심의 가열된 열영향부(Heat-Affected Zone, HAZ)가 나선형으로 외부로 뿜어져 나옴에 따라 회전력과 온도가 연속적으로 강하하는 과정이다. 특히, 마지막 단계의 접합계면 HAZ부의 외부로의 이탈과정은 접합계면에 존재하였던 불순물 또는 표면산화층을 제거하여, 청정한 계면간의 접촉을 가능케 함으로써, 고상확산에 가까운 접합이 이루어지게 된다. 본 실험에서는 회전시험편의 회전수는 2400 rpm으로 고정하였으며, 다른 한 쪽의 고정 시험편과의 마찰압력(P_1)과 마찰시간(t_1)은 각각 50~500 MPa과 1~5초로 변화를 주었고, 업셋압력(P_2)도 50~600 MPa로 변화시켜 접합을 행하였다. 이때 업셋압력은 모든 시편에 대해 일정하게 6초 동안 가하였다.

2.3. 접합체의 평가

접합체는 각 압접조건당 2개 이상의 접합시험편에 대한 상온 인장강도를 측정하였으며, 파단이 일어난 위치를 확인한 후 파면에 대한 분석을 주사전자현미경(SEM)과 에너지분산형 분광분석기(EDS)를 사용하여 행하였다. 접합이음부의 접합성을 확인하기 위하여, 접합체를 접합면에 수직으로 절단, 연마한 후 광학현미경과 SEM, EDS 등으로 관찰, 분석하여 접합부의 형상과 결함형성 여부, 접합계면의 미세조직 등을 조사하였다. 이때 사용된 부식액은 염산(1.19) 40 ml + 질산(1.40) 30 ml + 글리세린 10 ml의 혼합용액이었으며, 상온에서 10분간 부식처리하였다. 마찰압접에 따른 모재와 접합계면부의 경도분포를 조사하기 위하여, 접합이음부로부터 모재쪽으로 일정 간격을 두어 마이크로비커스 경도를 측정하였다.

Table 2. Results of tensile strength measurements for the MA754 friction weldments produced under various conditions

Fricition pressure (MPa)	Upset pressure (MPa)	Friction time (sec)	Upset time (sec)	Tensile strength (MPa)	$\frac{\sigma_{measured}}{\sigma_{base\ metal}}$ (%)
50	50	2	6	517	54%
	100	3		495	51%
	150	3		722	75%
80	150	3		786	81%
	200	4		676	70%
100	200	3		729	75%
	250	3		728	75%
		5		634	66%
200	300	1		864	90%
	400	1		925	96%
		1.5		883	91%
		2		880	91%
		3		906	94%
		4		906	94%
300	500	1.5		931	96%
400	500	1		928	96%
		1.5		942	98%
		2		950	98%
		3		917	95%
	600	1		939	97%
		2		975	101%
		3		948	98%
500	600	2		972	101%

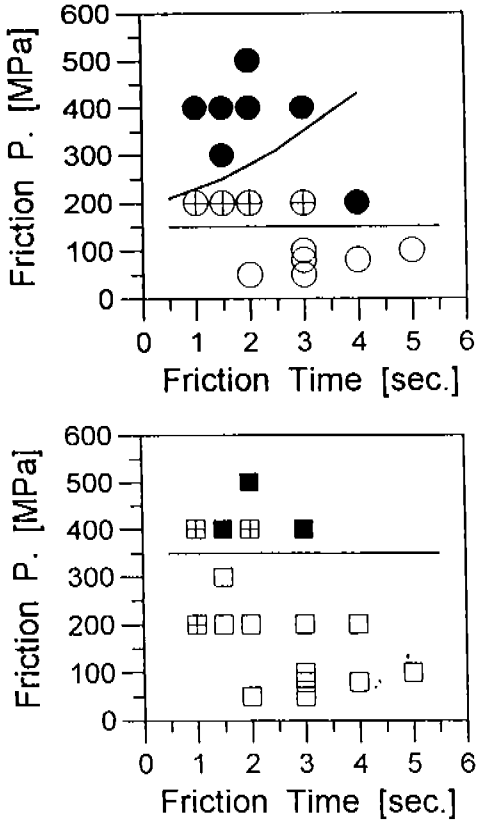


Fig. 2. Effect of friction pressure and friction time on (a) the tensile strength (○: $\sigma_{measured}/\sigma_{base\ metal}$<90%, ⊕: 90~95% and ●: >95%) and (b) the fracture locations of as-welded MA754 friction weldments (□: fractured in bonded interface, ■: fractured in base metal and ⊞: mixed-type fracture of both above).

3. 결과 및 고찰

3.1. 접합체 강도에 미치는 압접변수의 영향

최적의 압접조건을 확인하기 위하여 각 압접조건에서 제조된 접합체에 대한 인장시험을 행하여, 인장강도와 파단 위치 등을 측정, 조사하였으며, 모재강도(평균 965 MPa)에 대한 측정된 접합체 강도의 비를 백분율로 계산하여, 각 압접조건에서의 접합성을 비교, 평가하였다. 표 2는 본 연구에서 조사된 모든 압접조건에서의 접합체 평균 인장강도 값을 정리하여 나타낸 것이다.

3.1.1. 마찰압력(Friction pressure)

그림 2(a)는 여러 업셋압력 조건에서 마찰압력과 시간을 달리하여 제조한 접합체의 강도를 모재의 강도와 비교한 결과를, 모재강도의 95% 이상과 90~95%, 90% 이하인 경우로 분류하여 도시한 것이다. 비록 각 시험편별로 업셋압력이 서로 다르다고는 하나, 100 MPa 이하의 마찰압력에서는 모든 시편이 모재의 90%에 못미치는 접합체 강도치를 보이고 있으며, 200 MPa로 마찰압력을 증가시키더라도 모재강도의 90~95%의 강도만을 보여 양호한 접합체를 얻을 수 없음을 알 수 있으나, 300 MPa 이상으로 마찰압력을 증가시킬 경우에는 모재에 근접하는 강도를 갖는 접합체의 제조가 가능하였다. 그림 2(b)는 위의 각 시편의 파단위치를 정리하여 도시한 것으로, 200 MPa 이하의 마찰압력에서는 파단이 대부분 접합층에서 일어남으로써 양호한 접합이 이루어지지 않았음을 알 수 있으며, 300 MPa의 경우에도, 접합체 강도가 앞에서 살펴본 바와 같이(그림 2의 (a)) 모재강도의 96%에 해당하는 비교적 높은 값을 보임에도 불구하고 접합층에서 파단이 일어남을 알 수 있다. 그러나, 400 MPa 이상에서는 파단이 접합계면과 모재층을 함께 포함하는 영역 또는 모재에서 일어나, 양호한 접합체가 얻어질 수 있음을 확인하였다.

3.1.2. 업셋압력(Upset pressure)

그림 3(a)는 앞의 그림 2에서처럼, 측정된 접합체의 인장강도를 모재의 강도와 비교하여 그 결과를 업셋압력과 마찰시간에 대해 도시한 것이다. 각 시편들의 마찰압력이 서로 다르기는 하나, 300 MPa보다 낮은 업셋압력이 가해질 경우에는 예외없이 모재의 90% 이하 강도값만을 보이고 있으며, 300 MPa과 400 MPa의 업셋압력에서는 마찰시간에 따라 90~95%, 또는 95% 이상으로 접합체 강도값의 변화가 있으나, 500 MPa 이상의 업셋압력에서는 모든 시험편이 모재의 95% 이상의 강도값을 나타내고 있다. 그림 3(b)는 위의 시험편들의 파단위치를 도시한 것으로, 300 MPa 보다 낮은 업셋압력에서는 모든 시험편의 파단이 접합층에서 일어남으로써 접합성이 매우 불량함을 알 수 있으며, 300 MPa과 400 MPa에서도 접합층 파단과 모재와 접합계면층이 함께 포함된 혼합형 파단이 함께 관찰되어 최적의 조건으로는 판단되지 않았다. 그러나, 500 MPa 이상의 업셋압력에서는 거의 모든 시험편이 모재부에서 파단되어 양호한 접합체가 형성되었음을 알 수 있으며, 앞의 그림 2의 결과와 함께 최적 압접을 위한 마찰압력과

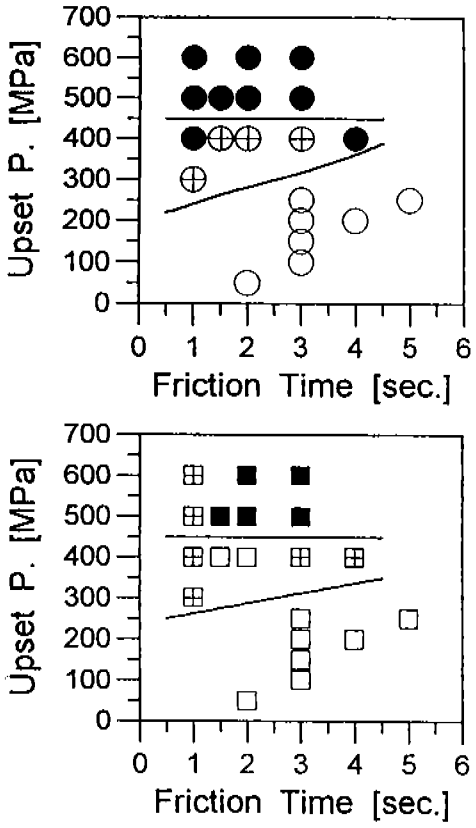


Fig. 3. Effect of upset pressure and friction time on (a) the tensile strength (○: $\sigma_{measured}/\sigma_{base\ metal}$<90%, ⊕: 90~95% and ●: >95%) and (b) the fracture locations of as-welded MA754 friction weldments (□: fractured in bonded interface, ■: fractured in base metal and ⊞: mixed-type fracture of both above).

업셋압력 조건은 각각 400 MPa과 500 MPa 이상이 되어야 할 것으로 결론지었다.

3.1.3. 마찰시간(Friction time)

그림 2의 그림들에서 보는 바와 같이, 마찰압력과 업셋압력이 모두 300 MPa보다 낮은 경우에는, 마찰시간이 가장 짧은 1초의 경우는 물론, 마찰시간을 3~4초로 증가시키더라도 대부분 시험편의 접합강도가 모재강도의 90% 이하 또는 90~95% 정도이고, 접합계면층에서의 파단을 보임으로써 접합성에 미치는 마찰시간의 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 그러나, 앞서 언급한 바와 같은 최적의 (마찰압력/업셋압력) 조건인 400 MPa/500 MPa과 400 MPa/600 MPa 등의 조건에서는 그림 4에 나타낸 바와 같이, 마찰시간의 변화에 따라 접합강도가 변하는

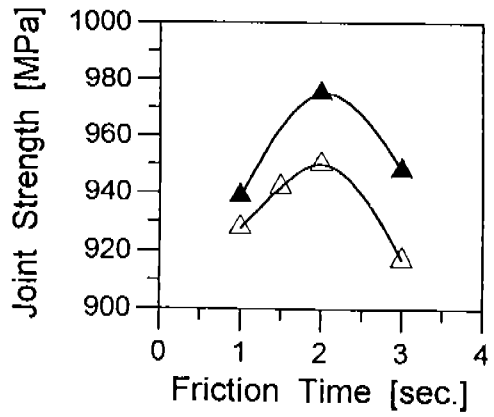


Fig. 4. Effect of friction time on the tensile strength of MA754 friction weldments (Friction pressure: 400 MPa, Upset pressure: 500 MPa (△) and 600 MPa (▲)).

것을 알 수 있다. 즉, 두 경우 모두 마찰시간 1초의 경우 낮은 접합강도를 보이다가, 1.5에서 2초로 마찰시간이 점차 증가됨에 따라 최대 강도치에 이른 후, 마찰시간을 계속하여 3초로 늘릴 경우 접합강도가 다시 급격히 감소하는 경향을 보여, 이 두 조건에서는 마찰시간을 2초로 유지하는 것이 최적의 조건임을 확인하였다.

3.2. 접합이음부의 형상 및 결함

그림 5(a)와 (b)는 각각 (마찰압력/마찰시간/업셋압력)=(200 MPa/2 sec/400 MPa)과 (400 MPa/2 sec/600 MPa)의 압접조건에서 제조된 접합체의 접합면에 대한 수직방향 단면을 광학현미경을 사용하여 관찰한 결과로서, 마찰압접 조건에 상관없이 접합이음부가 3영역으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 즉, 첫째로 마찰열과 업셋압력의 영향을 가장 많이 받아 접촉면에 띠형태로 형성되어 있는 영역 I과, 둘째로 영역 I에 인접해 있으며, 당초의 모재간 접촉면이 마찰열에 의해 승온된 후 업셋압력 적용시 모재 외부로 밀려나가면서 형성된 metal flow 형태의 영역 II, 셋째로 마찰과 압접의 영향을 거의 받지 않았을 모재부의 영역 III으로 나눌 수 있다. 특히, 이와 같은 영역의 구분은 앞서의 실험결과들로부터 얻어진 최적의 압접조건인 (400 MPa/2 sec/600 MPa)의 경우 더욱 뚜렷하며, (200 MPa/2 sec/400 MPa)의 경우 영역 I과 II의 형성이 뚜렷치 못함을 알 수 있다. 이는

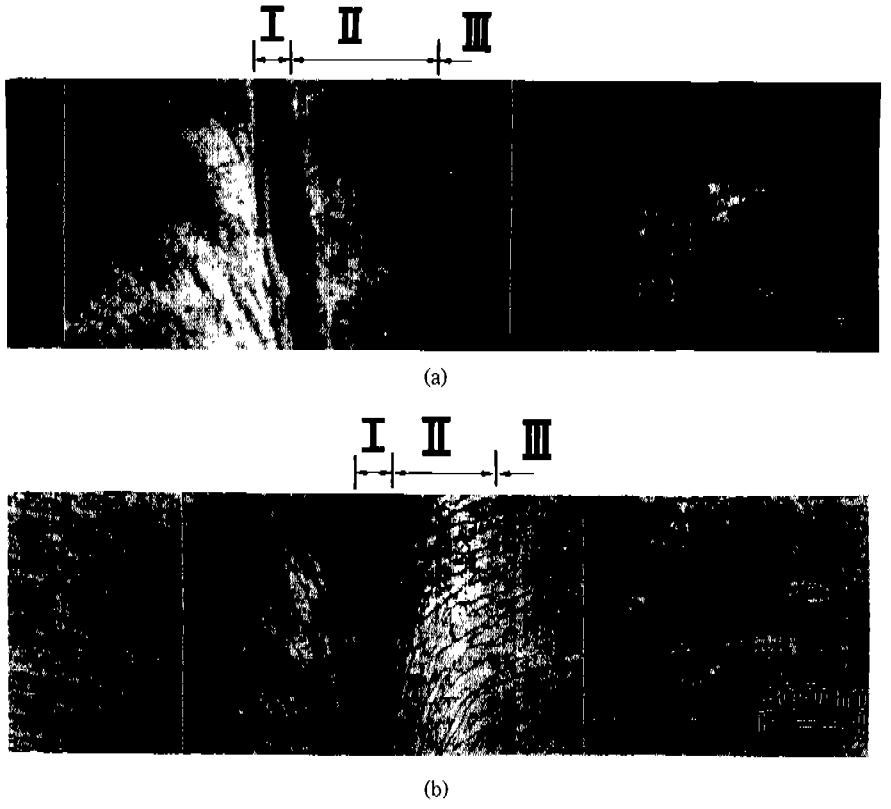
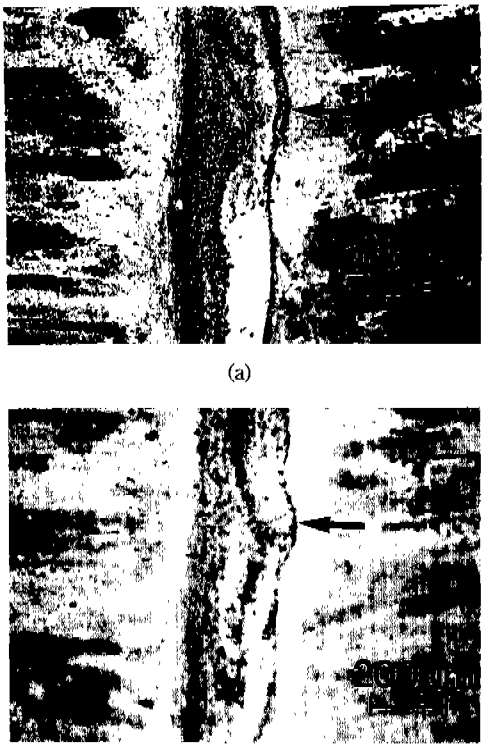


Fig. 5. Optical micrographs of the bonded interfaces of MA754 friction weldments produced under the conditions of (Friction Pressure/Friction Time/Upset Pressure): (a) (200 MPa/2 sec/400 MPa) and (b) (400 MPa/2 sec/600 MPa).

압접조건이 최적화되지 못함으로 인해, 마찰에 의한 모재간 접촉부의 승온이 충분치 못하였고, 업셋압력 또한 충분히 높지 않아 접촉면에 존재하였던 불순물 및 산화물층 등이 접합계면 밖으로 완전히 제거되지 못하여 접촉면에서의 확산에 의한 접합이 어려웠기 때문일 것으로 사료된다. 실제로 이들 시편들과 마찰압접조건이 더욱 불량한 (100 MPa/3 sec/200 MPa)의 조건에서 제조된 접합체의 접합부 단면을 보다 고배율(×200)로 관찰하여 비교한 결과(그림 6), 최적조건의 경우에서는 별다른 접합부 결함을 확인할 수 없었던 데에 반해, 그렇지 못한 경우들에서는 영역 I의 접합이음부가 직선이 아닌 띠형태를 보여 양 모재의 접촉면이 충분히 제거되지 못하였음을 알 수 있으며, 특히 계면부를 따라 형성되어 있는 void와 균열 등의 접합결함 내부에서 Al과 Y, Ti 등이 EDS 분석 결과 확인되어, 위의 추론을 뒷받침하여 주고 있다.

3.3. 접합계면의 미세조직

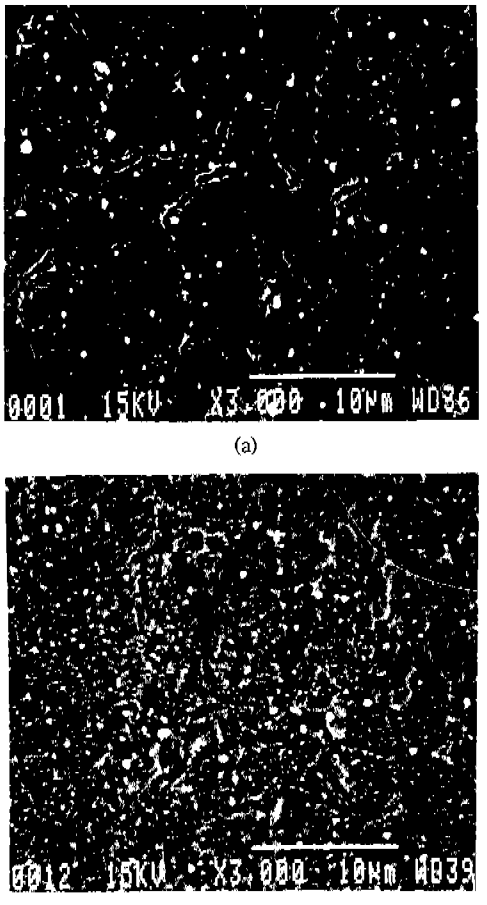
3.2.절에서 살펴본 바와 같이, 접합계면은 영역 I, II, III으로 구별되는 3영역으로 구성되어 있는데, 이들 중에서 영역 III, 즉, 모재부는 마찰압접과정에서 열영향을 거의 받지 않는 부분이기 때문에 모재 제조시 압연공정에 의해 형성된 texture의 결정립 형태가 그대로 유지되어 있었으며, 미세한 산화물 입자가 기지내에 균일하게 분산되어 있는 전형적인 미세구조를 보였다. 반면에, 열영향을 가장 많이 받는 영역 I에 대한 미세조직 관찰결과는, 앞에서 보였던 그림 5의 광학현미경 사진과 함께, 그림 7(a), (b)에 나타낸 (100 MPa/3 sec/200 MPa)과 (400 MPa/2 sec/600 MPa)의 (마찰압력/마찰시간/업셋압력) 조건으로 제조된 접합체 단면의 SEM 사진에서 보는 바와 같이, 모재가 갖고 있던 texture 형태를 더 이상 찾아볼 수 없어, 마찰압접 중의 온도 상승과 업셋압력 적용에 따른 변형가공 등으로 미세구조의 변화가



(a)

(b)

Fig. 6. Defects in the bonded Interfaces of MA754 friction weldments produced under various conditions of (Friction Pressure/Friction Time/Upset Pressure): (a) (100 MPa/3 sec/200 MPa) and (b) (200 MPa/2 sec/400 MPa).



(a)

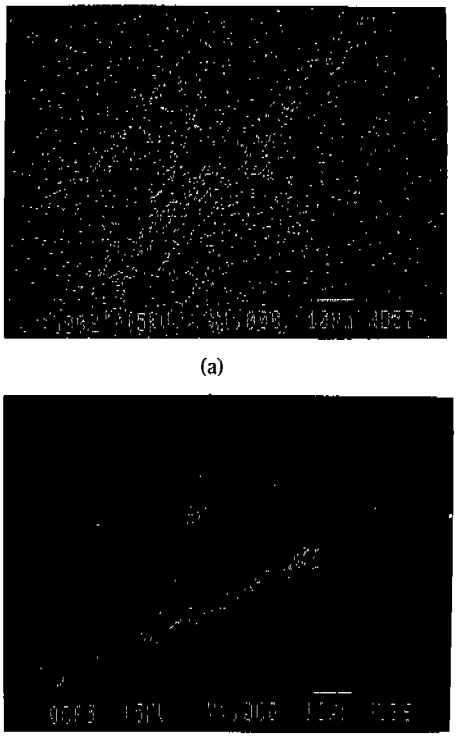
(b)

Fig. 7. SEM micrographs for the region I of MA754 friction weldments under the conditions of (Friction Pressure/Friction Time/Upset Pressure): (a) (100 MPa/3 sec/200 MPa) and (b) (400 MPa/2 sec/600 MPa).

있었음을 알 수 있다. 특히, (400/600 MPa)의 최적 조건에서 얻어진 (b)의 경우, 마찰압접 조건이 좋지 못한 (a)의 경우에 비해 균열 등의 접합결함이 없는 매우 균일한 미세구조를 보여주고 있다. 반면, metal-flow 형태를 보인 영역 II에서는 거의 모든 압접조건에서 비교적 균일한 미세구조를 보였으나, 영역 I에서와는 달리 예외없이 그림 8(a), (b)에 나타낸 바와 같은 미세균열과 산화물 응집 등의 접합결함이 관찰되어 영역 II의 접합결함을 줄이는 방안이 강구되어야 할 필요가 있을 것으로 생각된다.

3.4. 접합계면의 경도분포

그림 9(a)~(d)는 여러 마찰압접 조건에서 제조된 접합체의 접합이음부 경도분포를 조사한 결과로서, 마찰압력과 업셋압력이 모두 가장 낮은 (a)를 제외한 모든 경우에서 접합부의 경도가 모재쪽보다 높은 것을 알 수 있으며, 특히, 압접조건이 최적화된 (c), (d)의 경우 접합부와 모재간의 경도차가 더욱 뚜렷한 것을 알 수 있다. 이는 마찰압접시 양 모재가 받게 되는 가열과 급냉, 업셋압력 부가시의 단조효과 등의 차이에 기인하는 것으로 생각된다. 즉, (a)의 경우 접합부의 경도가 오히려 모재부보다 낮은 것은, 앞서 3.3.절에서 살펴본 바와 같이 미세구조가 매우 불균일하며, 3.5.절에서 언급하게 될 파단의 양상과 파면으로부터 확인한 결정립의 크기가 상대적으로 크게 나타난 것에 비추어, 급냉 단조 효과보다는 오히려 가열에 의한 연화 효과가 더욱 뚜렷하였기 때문일 것으로 사료된다. 이는 최적의 접합체 제조를 위해



(a)

(b)

Fig. 8. SEM micrographs for the region II of MA754 friction weldments produced under the conditions of (Friction Pressure/Friction Time/Upset Pressure): (a) (200 MPa/2 sec/400 MPa), (b) (400 MPa/3 sec/500 MPa).

서는, 마찰압접 과정 중에 가열과 급냉이라는 상반되는 효과가 서로 균형을 이루어야함을 시사하고 있으며, 3.1.3.절에서 기술한 바 있는, (400 MPa/500, 600 MPa)의 마찰압접 조건에서 2초의 마찰시간에서 최대 강도치를 보인 이유(그림 4 참조) 또한 이와 같은 가열과 급냉 효과간의 상호관련성에 기인할 것으로 사료된다.

3.5. 접합체의 파면분석

3.1.절에서 기술한 바와 같이, 접합체의 파단은 그 파단부위에 따라 크게 접합층 파단과 모재층 파단, 그리고 접합층과 모재를 포함하는 혼합형의 파단으로 나누어 볼 수 있다. 그림 10은 대표적인 접합층 파단의 예로서, (200 MPa/2 sec/400 MPa)의 조건에서 제조된 접합체의 파면사진을 나타낸 것이다. 파면이 비교적 굴곡이 심하고, 전형적인 연성 입계파괴

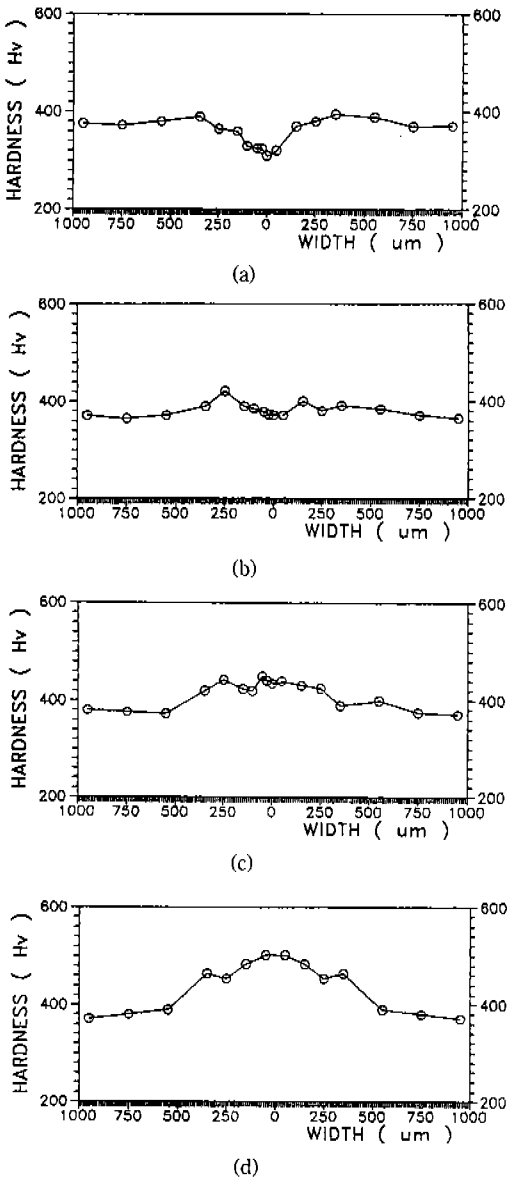


Fig. 9. Hardness distributions in the bonded interfaces of MA754 friction weldments produced under the conditions of (Friction Pressure/Friction Time/Upset Pressure): (a) (100 MPa/3 sec/200 MPa), (b) (200 MPa/2 sec/400 MPa), (c) (400 MPa/2 sec/500 MPa) and (d) (400 MPa/2 sec./600 MPa).

형태를 보이고 있다. 특히, 파면에서 관찰되는 결정립의 크기가 1 μm 이상이 대부분인 것을 알 수 있으며, 이들 결정립 사이사이(화살표 부분)에 결정립 크기에 상당하는 Y, Al, Ti 산화물이 다수 존재하고 있음을 EDS로 확인하였다. 반면에, 그림 11에 나타

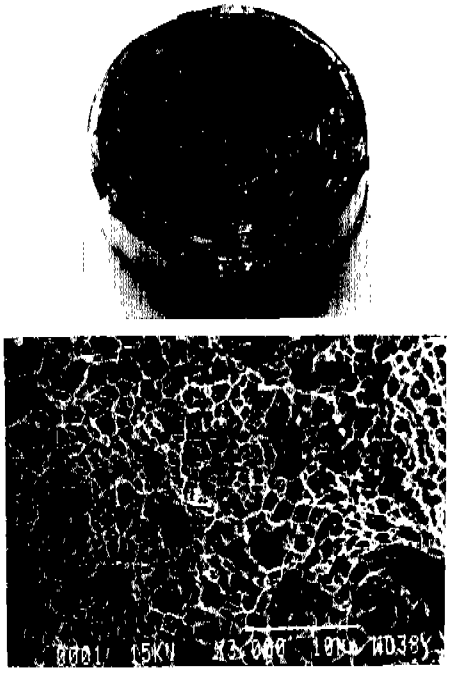


Fig. 10. Fracture surface of MA754 friction weldment produced under the condition of (Friction Pressure/Friction Time/Upset Pressure)=(100 MPa/3 sec/200 MPa), showing a typical fracture in the bonded interface.

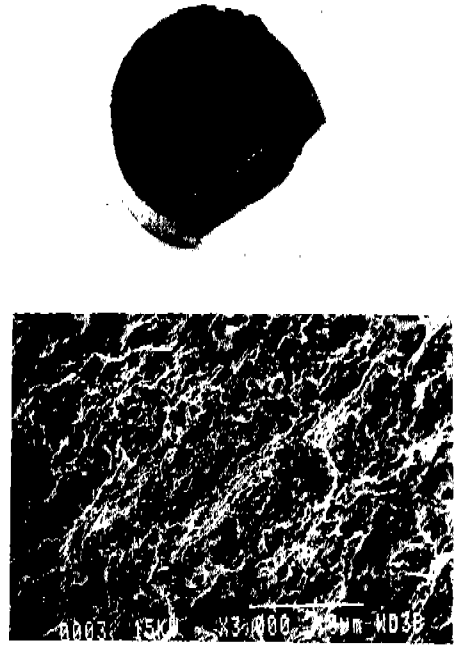


Fig. 11. Fracture surface of MA754 friction weldment produced under the condition of (Friction Pressure/Friction Time/Upset Pressure)=(400 MPa/2 sec/600 MPa), showing a typical fracture in the base metal.

낸 모재부 파단의 경우(400 MPa/2 sec/600 MPa)에는, 파단면이 매우 매끄럽고, 결정립의 크기도 앞의 경우보다 매우 미세하며, 산화물의 조대화나 국부적인 응집 등을 확인할 수 없었다. 그림 12에 나타낸 (300 MPa/1.5 sec/500 MPa)의 접합체 파면 관찰 결과는 모재부 파단과 접합부 파단의 혼합형 파단의 일례로서, 시험편의 심부(A 부분)와 외경부(B 부분)에서의 파단양상이 각각 접합부 파단과 모재부 파단으로 서로 다른 것을 알 수 있다. 이는 시험편의 회전속도가 중앙부보다 외경부가 더 높기 때문에 중앙부는 최적의 마찰압접조건에 도달하지 못하였으나, 외경부는 최적조건을 충족시킬 수 있었기 때문으로 사료된다.

4. 결 론

Ni기 산화물 분산강화 합금 MA754를 마찰압력, 마찰시간, 업셋압력 등을 변수로 하여 마찰압접시켜, 상온 인장강도와 접합이음부의 경도분포, 접합계면의 광학 및 전자현미경 관찰과 EDS 분석, 파단 양상과 파면의 관찰 등을 행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 접합체 강도가 모재 강도의 95% 이상이 되는 양호한 접합체를 얻기 위한 마찰압력 조건은, 2400 rpm의 회전속도와 6초의 업셋압력 유지시간에서 마찰압력과 업셋압력, 그리고 마찰시간이 각각 400 MPa 이상과 500 MPa 이상, 2초임을 확인하였다.

(2) 접합이음부의 관찰 결과, 모든 마찰압접 조건에서 접합이음부는, 기존 모재의 texture 조직을 유지하고 있는 모재부 영역(영역 III)과 접합계면부에 인접하여 업셋압력이 주어질 때 단조효과에 의해 계면 외부로 metal flow가 일어나면서 형성된 영역 II, 매우 미세한 결정립으로 구성된 중앙부의 영역 I로 이루어져 있음을 확인하였다.

(3) 최적접합조건이 충족되지 않은 경우, 접합부의 영역 I에서 관찰된 void와 균열, 불균일한 접합계면 등의 접합결함에 Al과 Y, Ti 등으로 구성된 산화물들이 응집되어 있음을 확인하였다.

(5) 접합이음부의 경도분포 조사 결과, 일반적으로

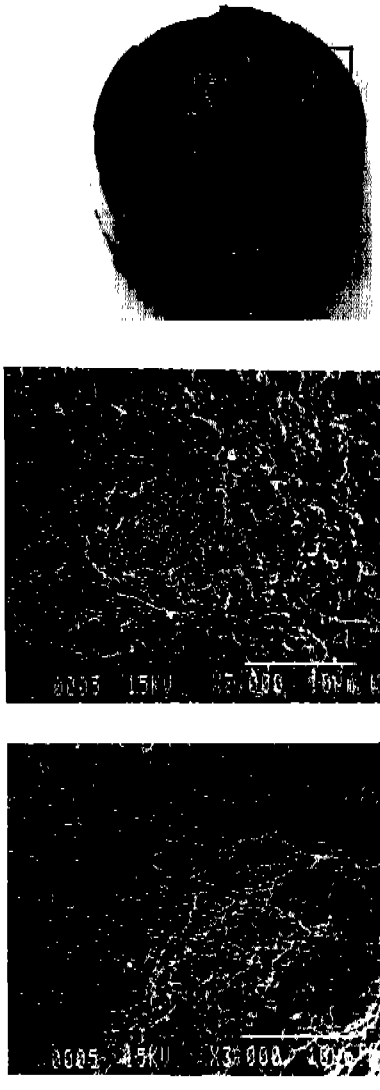


Fig. 12. Fracture surface of MA754 friction weldment produced under the condition of (Friction Pressure/ Friction Time/Upset Pressure)=(300 MPa/1.5 sec/ 500 MPa), showing a fracture of mixed-type.

알려진 바와 같이 마찰압접부의 가열, 급냉 및 단조효과에 의해 접합부의 경도가 모재의 경도보다 높은 것으로 나타났으나, (100 MPa/3 sec/200 MPa)의 (마찰압력/마찰시간/업셋압력) 조건의 압접체의 경우, 예외적으로 접합부의 경도가 모재에 비해 낮은 것으로 나타나 급냉 및 단조 효과 보다도 가열 연화 효과가 더 컸던 것으로 판단되었다.

(6) 접합체의 파단 양상은 크게 접합부 파단과 모재부 파단, 이들의 혼합형 파단으로 나눌 수 있었다. 모재부 파단의 경우, 파단면이 매끄럽고 파면상의 결정립도 매우 미세하였으며, 산화물의 응집도 찾아보기 어려웠으나, 접합부 파단의 경우에는 파면의 굴곡이 비교적 심하고 연성 입계파괴의 형태를 보였으며, 결정립도 모재부 파단의 경우에 비해 조대하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 한·일 국제 공동연구 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J. K. Tien, Superalloys : *Supercomposites and Superceramics*, J. K. Tien and T. Caulfield (Ed.), Academic Press Inc., (1989) 287
2. ODS 合金 特輯, 金屬, **62**(5) (1992) 2
3. J. S. Benjamin : Metall. Trans., **1** (1970) 2943
4. G. H. Gessinger : *P/M of Superalloys*, Butterworth & Co., London, p 258-286
5. T. J. Kelly : *Trends in Welding Research*, S. A. David (Ed.), ASM, (1981) 471
6. H. Ikawa : Trans. J. Welding Soc., **20**(1) (1971) 60
7. P. A. Moliar : J. Mater. Sci., **27** (1992) 2687
8. 高橋裕男 : 日本金屬學會會報, **27**(10) (1988) 808
9. T. J. Kelly : Welding J., **61** (1982) 317
10. 中尾嘉邦 : 日本 住友金屬鎔接委員會資料, **SW-51** (1990) 1
11. 森本壓吾, 平根煇夫 : 日本 耐熱金屬材料123委員會 研究報告, **27**(2) (1987) 225
12. 泉學 : 碩士學位論文, Osaka Univ. (1991)
13. 美野和明 : 日本 第3回特殊材料鎔接委員會, **SW-25** (1991) 3
14. C. Verpoort : MPR, Feb., 1988
15. I. A .Bucklow : Welding Institute Members Report (1987) 343
16. 丹本孝雄 : 博士學位論文, Osaka Univ. (1992)
17. K. K. Wang and W. Lin : Welding J., Research Supplement, **53** (1974) 233