

하이브리드 마찰교반접합된 니켈기 초합금의 미세조직과 기계적 특성 발달

송 국 현 · Kazuhiro Nakata

Development of Microstructure and Mechanical Properties of Hybrid Friction-stir-welded Ni-Base Superalloy

K.H. Song and K. Nakata

1. 서 론

니켈기 초합금은 고온에서 고강도와 내산화성이 우수한 금속으로서, 전력발전설비, 가스터빈과 해양시스템 분야 등에 주로 사용되고 있다¹⁻²⁾. 일반적으로, 이들 산업의 구축과 보수작업의 방법으로서, arc, TIG나 electron beam 등의 용융용접이 도입되고 있다. 그러나 니켈기 초합금에 대하여 기존의 용융용접을 도입할 경우, 특유의 높은 입열량 때문에 입계에서 Cr편석이 발생하기 쉬우며, 결과적으로 접합재의 기계적 물성의 향상에 제한적인 요소로 작용할 수 있다³⁻⁴⁾. 따라서, 이들 문제점을 해결하기 위해, 근본적으로 입열량의 제어가 필요하며, 이를 대체할 방법으로서 낮은 입열량으로 접합이 가능한 마찰교반접합의 도입이 필요하다. 한편, 니켈기 초합금에 대하여 마찰교반접합을 도입한 연구들이 보고된 바 있으나, 고온에서 고강도를 유지하는 초합금 특유의 성질 때문에, 접합 시 툴과 재료 사이에 부하가 크게 발생하며, 이로 인해 접합속도의 향상은 제한적인 것으로 보고된 바 있다⁵⁻⁶⁾. 따라서, 툴과 재료간의 부하를 최소화하기 위해 별도의 열원을 도입한 하이브리드 마찰교반접합의 도입이 절실히 요구된다.

하이브리드 접합프로세스는 접합결합의 억제와 우수한 접합특성 때문에 상당한 관심을 받고 있다⁷⁻¹⁰⁾. 이러한 관점에서, 최근 laser-arc, laser-TIG, laser-MIG와 laser-FSW 등의 하이브리드 방식의 접합프로

세스에 대한 연구가 다양하게 수행되고 있다⁷⁻¹¹⁾. 특히, laser-FSW의 하이브리드 방식은 철강재료와 같은 용접 금속의 접합에 적용될 경우, 툴과 재료간의 부하를 줄여 줌으로써, 접합속도 개선과 더불어 미세조직과 기계적 물성 발달에 큰 효과를 나타내는 것으로 보고된 바 있다¹¹⁾. 그러나 아직까지 니켈기 초합금에 대하여 laser-FSW 하이브리드 방식의 접합프로세스는 도입된 바가 없다. 따라서, 이 연구는 니켈기 초합금에 대하여 하이브리드 마찰교반접합의 적용 가능성을 평가하고, 이 과정에서 나타나는 미세조직과 기계적 물성의 발달 양상을 평가하고자 수행되었다.

2. 실험 방법

2.1 하이브리드 마찰교반접합

이 연구에 사용된 재료는 니켈기 초합금 중 인코넬 600 합금이었고, 이에 대한 화학조성을 표 1에 나타내었다. 마찰교반접합을 수행하기 위해, 시편은 37.5 mm × 150 mm × 2 mm의 크기로 제작되었고, 쇼울더 직경 15 mm와 프로브 직경 6 mm와 길이 1.8 mm를 갖는 WC-Co툴이 준비되었다. 별도의 열원으로서 2 kW의 YAG laser가 도입되었고, 재료와 laser 간의 조사각은 45도를 채택하였다. 이를 이용하여, 하중 22.5 ~ 35.3 kN, 툴 회전속도 400 rpm과 접합속도 300 ~ 450 mm/min의 조건하에, 그림 1에 도시된 바와 같

표 1 Inconel 600 합금의 화학 조성

Element	Ni	Cr	Fe	Si	Mn	C	S
mass %	76.0	15.5	8.0	0.25	0.50	0.08	0.008

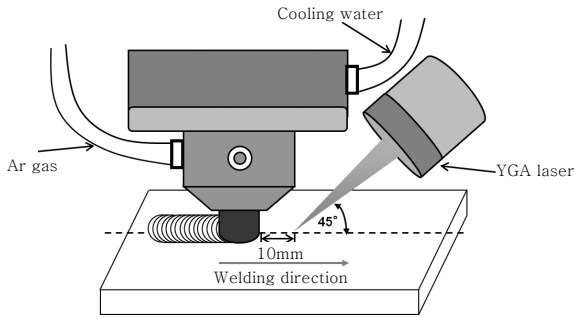


Fig. 1 Schematic diagram of hybrid friction stir welding

이, laser를 조사하면서 마찰교반접합이 수행되었고, 접합 시 시편표면의 산화를 방지하기 위해, 아르곤 가스를 충분히 흘려주었다. 또한, 원활한 마찰교반접합을 위해, 톨이 접합진행방향에 대해 3° 기울어진 상태로 접합을 수행하였다.

2.2 조직 관찰

접합 후 접합재의 거시조직과 미세조직을 관찰하기 위해, 시편은 2 mm × 20 mm 크기로 제작되었고, 기계적 연마를 통해 시편의 경면을 얻었다. 이 후 제조된 97 ml HCl, 2 ml HNO₃와 1 ml H₂SO₄ 용액을 이용하여, 시편표면에 대해 15초간 부식시킨 후 광학현미경을 통하여 거시조직과 미세조직을 관찰하였다. 이후 모재와 교반부의 결정립형상, 결정립크기와 입계특성분포 등을 분석하기 위해, 전자후방산란회절(electron back scattered diffraction, EBSD) 분석이 수행되었다. EBSD 분석은 FEG-SEM에 부착된 TSL-OIM™을 이용하여 시편표면에 대해 수행하였다.

2.3 물성 평가

마찰교반접합된 소재의 기계적 물성을 평가하기 위하여, 비커스 경도와 인장시험이 도입되었다. 경도 측정을 위하여, 시편은 2 mm × 20 mm의 크기로 절단되었고, 기계적 연마를 통하여 시편표면의 경면을 얻은 후 시편의 cross-section면에 대해 경도를 측정하였다. 이에 사용된 장비는 비커스 미소경도기 FM 7465였으며, 측정은 다이아몬드 압입자 1000 g의 하중으로 15초간 압입하는 방식으로 수행되었다. 인장시험의 경우, 교반부의 영향을 평가하기 위해, 그림 2에 도시된 바와 같이, 두께 1.5 mm를 갖는 횡방향과 종방향 두 종류의 판상시편에 대해 인장시험이 수행되었다. 인장시험은 INSTRON 4481형 기계식 만능재료 시험기를 이용하여 상온에서 인장속도 0.72 mm/min의 조건으로 수행

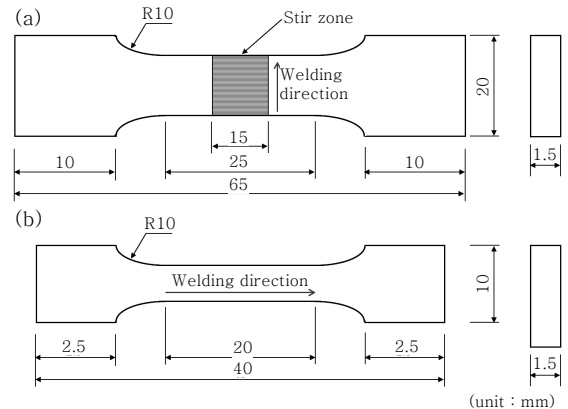


Fig. 2 Specifications of (a) transverse (weld joint) and (b) longitudinal (stir zone) specimens used in the present study

되었다. 각 시편의 인장값은 3회 측정치의 평균값을 취하였다.

3. 실험 결과

3.1 외관과 거시조직

하이브리드 마찰교반접합된 Inconel 600 합금의 외관을 그림 3에 나타내었다. 300 mm/min과 450 mm/min의 속도로 접합된 시편 모두, 그림 3(a)와 (b)에 나타난 바와 같이, 외관상 결함이 없는 양호한 접합성을 나타내었다. 이들 두 소재에 대해 접합부 단면의 거시조직을 관찰하였고, 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 300 mm/min의 속도로 접합된 소재는, 그림 4(a)에 나타난 바와 같이, 소재의 표면으로부터 1.9 mm까지 내부결합이 없이 양호하게 접합되었다. 접합속도가 현저히 증가된 450 mm/min의 소재 또한 300 mm/min의 소재와 마찬가지로, 그림 4(b)에 나타난 바와 같이, 교반부에 결함이 없이 양호하게 접합된 것으로 확인되었

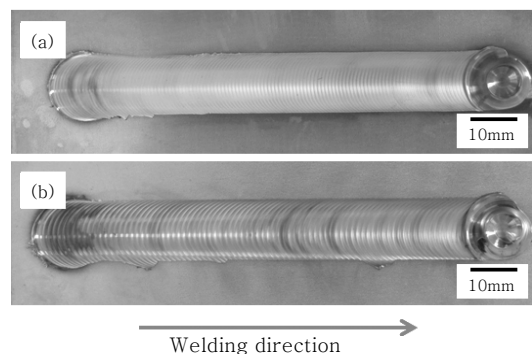


Fig. 3 Welding profiles of the specimens welded at a welding speed of (a) 300 mm/min and (b) 450 mm/min

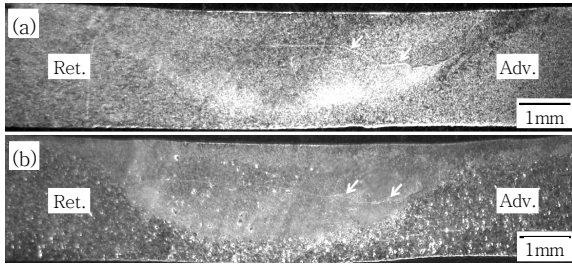


Fig. 4 Macrostructures of the weld zone in the specimens welded at a welding speed of (a) 300 mm/min and (b) 450 mm/min. Adv. and Ret. indicate the advancing side and retreating side, respectively, of the weld. Arrows indicate the presence of the band structure in the stir zone

다. 그러나 두 소재 모두 교반부 중심에 band structure가 형성되었는데, 이들은 니켈기 초합금 특유의 성질로 인해 마찰교반접합 시 툴과 재료간의 부하가 크게 발생함으로써 형성되는 것으로 보고된 바 있다¹²⁾.

3.2 온도분포변화

두 종류의 접합소재에서 관찰된 온도분포 변화를 그림 5에 나타내었다. 온도분포측정은 교반부 정중앙의 저면에서 온도측정센서를 이용하여 수행하였다. 별도의 열원이 도입된 하이브리드 마찰교반접합의 경우, 그림 5에 나타난 바와 같이, 열원에 의해 sub-peak(화살표로 나타난 부분)이 관찰되었고, 최고도달온도가 각각 810°C(300 mm/min)와 840°C(450 mm/min)로 나타남으로써, 마찰교반접합 단독으로 수행된 것 보다 다소 높은 것으로 확인되었다¹²⁾. 특히, 450 mm/min의 조건이 300 mm/min보다 높은 최고도달온도를 나타내었는데, 이는 350 mm/min보다 증가된 tool down

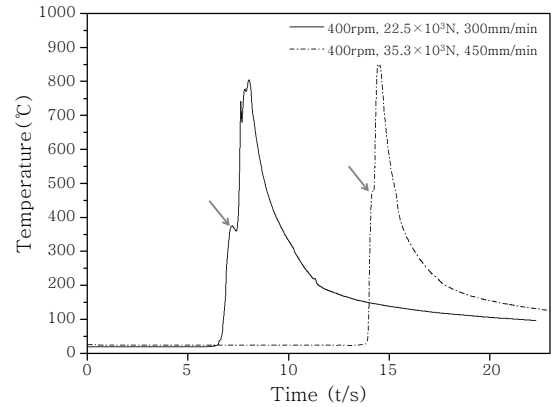


Fig. 5 Temperature hysteresis in the stir zone during the hybrid friction stir welding

force에 의해 나타난 결과라 할 수 있다. 또한, 최고도달온도 이후 150°C까지 냉각되는데 각각 7초(300 mm/min)와 5초(450 mm/min)가 소요됨으로써, 접합속도의 증가에 의해 냉각속도가 점차 가속화 되는 양상을 나타내었다.

3.3 접합재의 EBSD 평가

모재와 하이브리드 마찰교반접합된 소재들의 입계맵을 그림 6에 나타내었다. 초기 모재는 그림 6(a)에 나타난 바와 같이, 2 μm 에서 25 μm 사이의 결정립들이 비교적 불균질하게 분포되어 있었고, 평균입도는 5.5 μm로 확인되었다. 하이브리드 마찰교반접합의 적용은 교반부의 결정립 미세화를 촉진하였고, 이 또한 접합속도의 증가에 의해 더욱 큰 효과를 나타내었다. 그 결과, 300 mm/min의 속도로 접합된 소재는 그림 6(b)에 나타난 바와 같이, 1 μm에서 15 μm 사이의 결정립들로 분포되어 있었고, 평균입도가 3.8 μm로 현

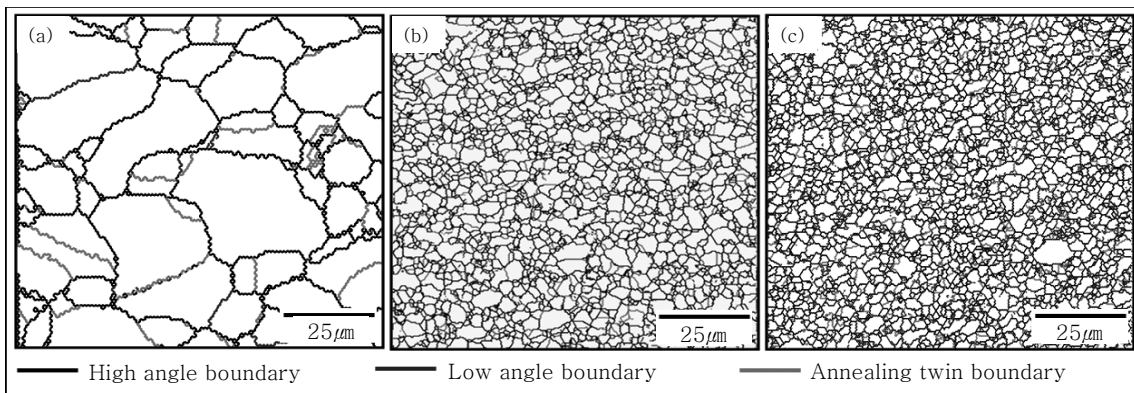


Fig. 6 Grain boundary maps of (a) base material and (b) specimen subjected to hybrid friction stir welding at a welding speed of 300mm/min, and (c) specimen subjected to hybrid friction stir welding at a welding speed of 450 mm/min: gray, black, and red lines indicate low-angle boundary, high-angle boundary, and annealing twin boundary, respectively

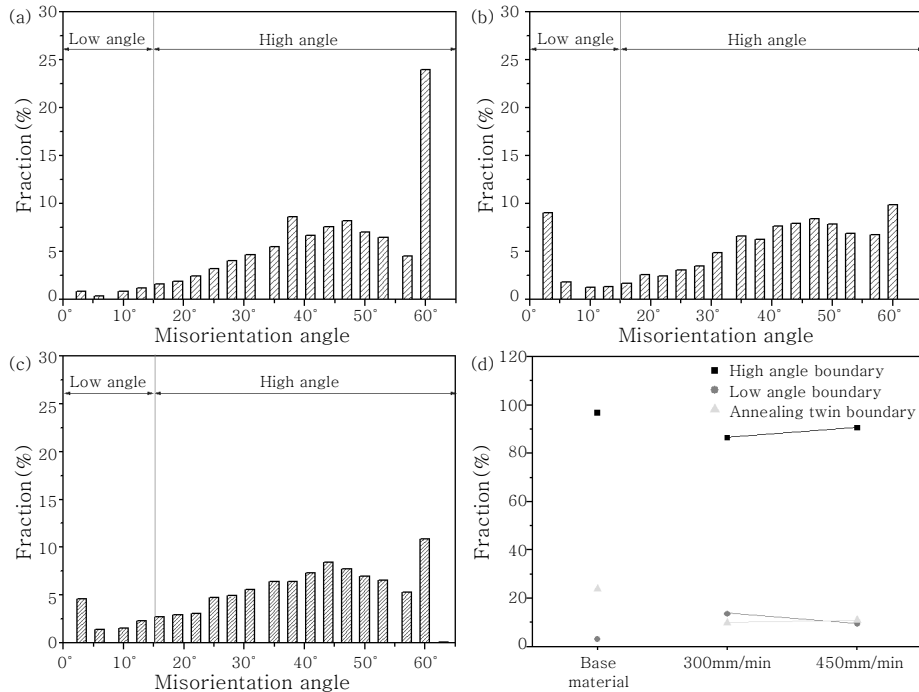


Fig. 7 Changes introduced in grain boundary character distribution by the hybrid friction stir welding; (a) base material, (b) specimen welded at a welding speed of 300 mm/min, (c) specimen welded at a welding speed of 450 mm/min, and (d) boundary fraction

저히 미세화 되었다. 450 mm/min의 속도로 접합된 소재의 경우, 그림 6(c)에 나타난 바와 같이, 평균결정립이 3.2 μm 로 나타남으로써, 300 mm/min의 속도로 접합된 소재보다 더욱 미세한 결정립 분포를 나타내었다.

그림 6에서 관찰된 모재와 접합소재의 입계어긋남각(misorientation angle) 분포를 그림 7에 나타내었다. 모재는 그림 7(a)에 나타난 바와 같이 전체입계 중 고각각입계(high angle grain boundary)가 95% 이상을 차지하였고, 그 중 60도 분포가 24%를 나타냄으로써 가장 높은 분율을 차지하였다. 이들 60도 분포는 fcc 결정구조를 갖는 금속들 중 적층결함에너지(stacking fault energy)가 낮은 재료에서 주로 생성되는 어닐링쌍정립계(annealing twin boundary)로 확인되었다. 하이브리드 마찰교반접합된 소재의 경우, 그림 7(b)와 (c)에 나타난 바와 같이, 고각각입계가 각각 87%(300 mm/min)와 90%(450 mm/min)를 차지하였고, 그 중 어닐링쌍정립계가 11%와 10%를 차지하는 것으로 확인되었다. 두 종류의 접합소재에서 모두 고각각입계가 87% 이상 분포되었는데, 이를 통해 하이브리드 마찰교반접합 과정 중 동적재결정이 양호하게 일어났음을 미루어 짐작할 수 있다. 각각의 조건에서 관찰된 입계어긋남분포의 분율을 그림 7(d)에 간단히 나타내었다.

3.4 기계적 물성 평가

하이브리드 마찰교반접합된 Inconel 600 합금의 경도분포 변화를 그림 8에 도시하였다. 모재는, 그림 8(a)와 (b)에 도시된 바와 같이, 185 Hv에서 197 Hv 정도의 경도분포를 나타내었고, 평균 192 Hv 값을 나타내었다. 하이브리드 마찰교반접합의 적용은 경도분포의 향상을 촉진하였고, 접합속도가 증가함에 따라 경도값이 더욱 증가하는 양상을 나타내었다. 그 결과, 접합속도 300 mm/min와 450 mm/min 조건의 교반부는, 그림 8(a)와 (b)에 나타난 바와 같이, 각각 200 ~ 242 Hv와 210 ~ 250 Hv 값을 나타냄으로써, 모재보다 현저히 증가된 경도분포를 나타내었다.

모재와 하이브리드 마찰교반접합된 재료의 인장시험 결과를 그림 9에 나타내었다. 모재는, 그림 9(a)에 나타난 바와 같이, 표점거리 전체적으로 변형이 일어나면서 연신되었고, 시편의 중앙부에서 파단이 진행되었다. 이에 반해 하이브리드 마찰교반접합된 재료는, 그림 9(b)와 (c)에 나타난 바와 같이, 상대적으로 강한 마찰교반접합부의 변형이 거의 발생되지 않고, 모재부분에서 변형이 일어나면서 파단되는 양상을 나타내었다. 교반부 인장시편의 경우, 그림 9(d)와 (e)에 나타난 바와 같이, 시편 전체적으로 변형이 되면서 파단됨으로써, 모재와 유사한 양상을 나타내었다. 이때 각각의 조건에

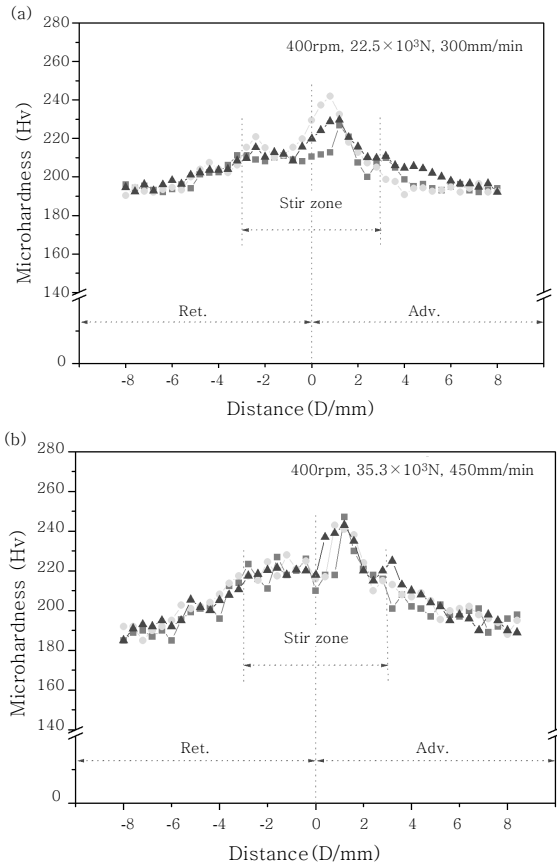


Fig. 8 Distributions of Vickers microhardness in hybrid friction stir welded specimens at a welding speed of (a) 300 mm/min and (b) 450mm/min. Adv. and Ret. Indicate the advancing side and retreating side, respectively, of the weld

서 관찰된 인장특성 결과를 그림 10에 나타내었다. 초기 모재는 인장강도와 연신율이 각각 698 MPa와 38%를 나타내었고, 이에 대하여 하이브리드 마찰교반 접합의 적용한 결과 점진적인 강도의 향상을 초래하였다. 그 결과, 접합속도 300 mm/min과 450 mm/min 조건에서 접합된 재료의 인장강도가 각각 718 MPa와 728 MPa로 나타났고, 연신율은 두 소재 모두 30%로 확인되었다. 한편, 교반부 시편의 경우, 인장강도가 736 MPa와 758 MPa로 모재와 접합재보다 증가한 반면, 연신율이 각각 30%와 28%로 감소되었다.

4. 실험 고찰

4.1 하이브리드 효과

별도의 열원으로서 YAG laser의 도입은 마찰교반접합 시 충분한 예열효과를 나타냄으로써, 접합속도의 증가에 직접적인 영향을 주었다. 이 연구에서 적용되었던

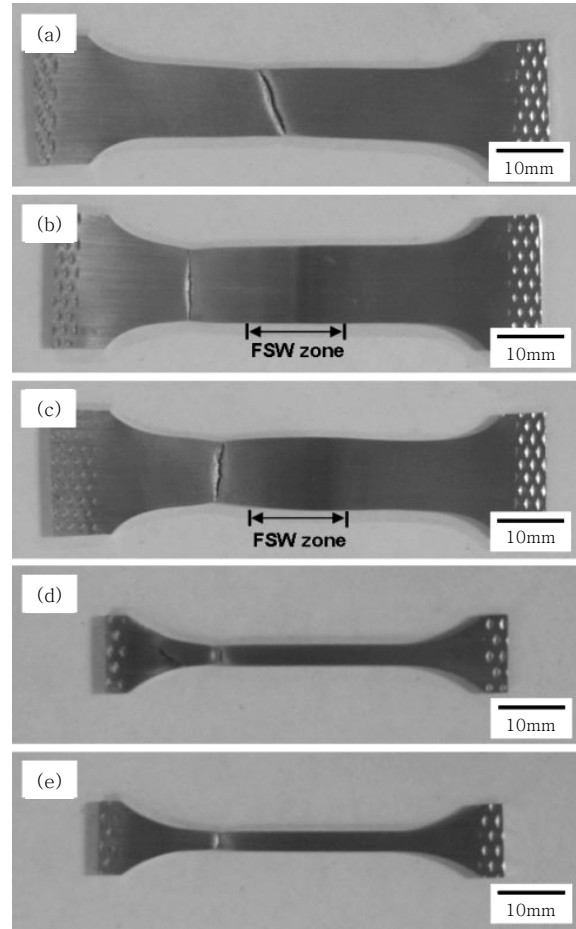


Fig. 9 Top views of the specimens subjected to the tensile tests. Transverse directions: (a) base material, (b) specimen welded at a welding speed of 300 mm/min and (c) specimen welded at a welding speed of 450 mm/min. Longitudinal directions: (d) specimen welded at a welding speed of 300 mm/min and (e) specimen welded at a welding speed of 450 mm/min

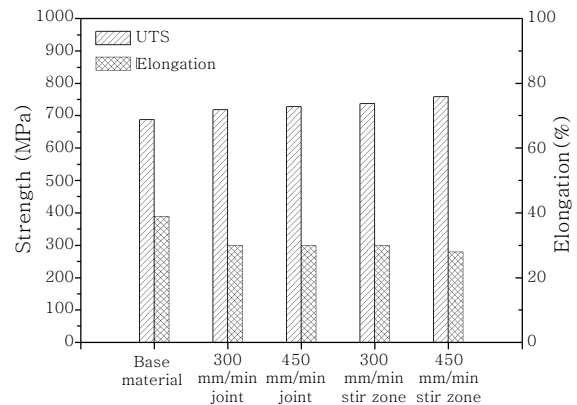


Fig. 10 Transverse (weld joint) and longitudinal (stir zone) tensile properties of hybrid friction stir welded specimens

접합조건과 동일한 조건하(22.5 kN, 400 rpm)에 열원을 도입하지 않고 마찰교반접합을 수행한 경우, 200 mm/min 접합속도가 재료내부에 결함발생이 없는 양호한 접합성을 얻는데 최적의 조건임이 확인된 바 있다¹²⁾. 그러나, 열원의 도입을 이용한 하이브리드 마찰교반접합은 그 보다 접합속도가 1.5배 증가된 300 mm/min의 조건에서도 접합부의 결함이 없이 양호한 접합성을 나타내었다. 이와 같은 접합속도의 증가는 예열효과에 기초한 틀과 재료간의 마찰감소로 해석될 수 있다. 즉, 열원을 도입하지 않은 마찰교반접합은 접합시 재료와 틀간의 마찰이 크게 작용함으로써, 접합속도 증가에 제한적인 요소로 작용하나, 열원의 도입을 통해 재료가 연화되어 마찰감소를 촉진함으로써, 접합속도가 증가된 것이라 할 수 있다. 따라서, 하이브리드 마찰교반접합의 적용은 고융점 재료의 마찰교반접합에서 극복할 수 없었던 접합속도의 증가와 더불어 접합재의 양호한 접합성을 얻는데 효과적이라 할 수 있다.

4.2 결정립 미세화

하이브리드 마찰교반접합의 적용은 결정립 미세화를 초래하였고, 이는 접합속도가 증가함에 따라 더욱 가속화되었다. 그 결과, 초기 모재에서 5.5 μm 였던 평균 입도가, 그림 6에 나타난 바와 같이, 하이브리드 마찰교반접합 후 3.8 μm (300 mm/min)와 3.2 μm (450 mm/min)로 미세화되었다. 또한 이 결과는 열원을 도입하지 않은 채 동일한 접합조건(22.5 kN, 400 rpm)으로 수행된 마찰교반접합(4.4 μm) 보다 더욱 미세한 입도분포를 나타내었다¹²⁾. 이들 결정립 미세화는 하이브리드 마찰교반접합 시 동반되는 동적재결정으로 설명될 수 있다. 즉, 하이브리드 마찰교반접합은 틀의 회전에 의해 재료에 큰 변형량을 동반하며, 이 과정에서 열이 발생하게 된다. 이 때 발생하는 열은 통상적으로 재결정이 일어나기에 충분한 0.5 T_m 이상으로써, 접합시 동적재결정을 유발하기에 충분한 온도이다. 이 연구에서 측정된 온도분포결과 또한, 그림 5에 나타난 바와 같이, 810 $^{\circ}\text{C}$ (300mm/min)와 845 $^{\circ}\text{C}$ (450mm/min)로 확인됨으로써 Inconel 600 합금이 재결정 되기에 충분한 것으로 나타났다. 특히, 접합속도의 증가에 의해 결정립 미세화 효과도 증가되었는데, 이와 같은 결과는 접합시 동반되는 변형량과 냉각속도의 증가를 통해 얻어진 결과라 할 수 있다. 따라서, 하이브리드 마찰교반접합의 적용은 접합속도의 증가와 더불어 미세조직 발달에 효과적임을 알 수 있다.

이 연구에서 사용된 재료는 Inconel 600 합금으로서

중간 정도의 적층결합에너지를 갖는 소재이다. 이러한 재료는 동적회복(dynamic recovery)에 의한 전위의 재배열이 어렵기 때문에, 적층결합에너지가 높은 재료들 보다 동시 다발적인 재결정 핵생성에 더욱 유리한 조건을 갖고 있다¹³⁻¹⁴⁾. 즉, 하이브리드 마찰교반접합시 큰 변형량으로 인해, 전위밀도가 높게 축적되며, 이때 발생된 마찰열에 의해 전위밀도가 높은 결정립계와 결정립내부에서 더욱 많은 재결정 핵생성이 유발됨으로써, 결정립 미세화를 초래하게 된다. 따라서, Inconel 600 합금에 대한 하이브리드 마찰교반접합의 적용은 재료적인 측면이나 프로세스적인 측면에서 결정립 미세화에 큰 효과를 얻을 수 있다고 할 수 있다. 한편, 접합속도의 증가가 더욱 미세한 결정립을 얻는데 효과적이었는데, 이는 더 큰 변형량의 동반을 통해 더 많은 재결정 핵생성이 발생한 결과라 할 수 있다.

4.3 기계적 물성 발달

하이브리드 마찰교반접합의 적용은 접합재의 기계적 물성의 향상에 효과적이었다. 경도분포의 경우, 초기 모재에서 185 ~ 195 Hv 정도로 분포되어 있었으나, 교반부는 그림 8에 나타난 바와 같이, 200 ~ 242 Hv(300 mm/min)와 210 ~ 250 Hv(450 mm/min) 값을 나타냄으로서, 모재보다 현저히 증가된 경도분포를 나타내었다. 이와 같은 경도분포의 향상은 교반부의 결정립 미세화로 해석될 수 있다. 일반적으로, 재료의 기계적 물성은 결정립 크기에 가장 큰 영향을 받는다. 즉, 경도분포에 있어서 교반부의 경도값이 더욱 높게 나타난 것은, 모재보다 현저히 미세화된 결정립의 영향이라 할 수 있다. 더욱이, 입계맵(그림 6)에서 결정립내부에 저각각입계의 부재는, 경도값의 향상이 전위밀도의 영향이 아닌 결정립 크기의 결과임을 분명히 나타내고 있다.

모든 접합재의 인장시험시 그림 9에 나타난 바와 같이 모재부분에서 우선적으로 변형이 일어나면서 파단되었는데, 이 또한 교반부의 결정립 미세화로 해석될 수 있다. 즉, 상대적으로 미세한 입도분포를 갖고 있는 교반부가 더 큰 강도를 갖기 때문에, 모재에서 우선적으로 변형이 유발되었고, 그 결과 모재에서 파단되는 결과를 초래하였다. 뿐만 아니라, 접합속도가 증가하면서 접합재와 교반부 시편의 인장강도가, 그림 10에 나타난 바와 같이 점차 향상되었는데, 이 또한 더욱 촉진된 결정립 미세화의 결과라 할 수 있다. 따라서, 하이브리드 마찰교반접합의 적용을 통한 결정립 미세화는 경도와 인장강도의 기계적 물성의 향상에 효과적임을 알 수 있다.

5. 결 론

별도의 열원을 이용한 하이브리드 마찰교반접합이 300 mm/min과 450 mm/min의 접합속도로 접합결합 없이 성공적으로 수행되었다. 하이브리드 마찰교반접합의 적용은 교반부의 결정립 미세화를 촉진시켰고, 접합속도의 증가에 의해 결정립 미세화가 더욱 가속화되었다. 그 결과, 초기 모재에서 5.5 μm 였던 평균결정립이 3.8 μm 와 3.2 μm 까지 현저히 미세화 되었다. 또한, 교반부의 결정립 미세화는 접합재의 기계적 물성의 향상에 직접적인 영향을 주어, 경도와 인장강도가 증가되는 양상을 나타내었다. 특히, 450 mm/min의 속도로 접합된 소재는 교반부의 경도와 강도값이 모재보다 각각 25%와 10% 이상 향상됨으로써, 기계적 물성의 향상에 탁월한 효과를 나타내었다. 따라서, Inconel 600 합금에 대한 하이브리드 마찰교반접합의 적용은 미세조직 발달과 기계적 물성의 향상에 효과적임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. G. S. Was: Corrosion, **46** (1990), 319-330
2. W. F. Smith: Structure and Properties of Engineering Alloys, (1981)
3. Welding Handbook: vol. 3, 8th ed., (AWS, Miami, FL, (1996), 218-288



- 송국현
- 1976년생
- 한국생산기술연구원
- 융합공정 프로세스 개발
- e-mail : skhyun7@kitech.re.kr

4. J. D. Kim, C. J. Kim and C. M. Chung: Repair welding of etched tubular components of nuclear power plant by Nd:YAG laser, *J. Mater. Process. Tech.*, **114** (2001), 51-56
5. F. Ye, H. Fujii, T. Tsumura and K. Nakata: Friction stir welding of Inconel alloy 600, *J. Mater. Sci.*, **41** (2006), 5376-5379
6. Y. S. Sato, P. Arkom, H. Kokawa, T. W. Nelson and R. J. Steel: Effect of microstructure on properties of friction stir welded Inconel Alloy 600, *Mater. Sci. Eng. A*, **477** (2008), 250-258
7. M. Gao, X. Zeng, Q. Hu and J. Yan: Laser-TIG hybrid welding of ultra-fine grained steel, *J. Mater. Process. Tech.*, **209** (2009), 785-791
8. G. L. Liang, G. Zhou and S. Q. Yuan: Study on hybrid heat source overlap welding of magnesium alloy AZ31B, *Mater. Sci. Eng. A*, **499** (2009), 93-96
9. L. M. Liu and X. Zhao: Study on the weld joint of Mg alloy and steel by laser-GTA hybrid welding, *Mater. Char.*, **59** (2008), 1279-1284
10. M. Gao, X. Zeng, J. Yan and Q. Hu: Microstructure characteristics of laser-MIG hybrid welded mild steel, *Appl. Surf. Sci.*, **254** (2008), 5715-5721
11. H. Fujii, T. Tatsuno and T. Tsumura: Hybrid Friction Stir Welding of Carbon Steel, *Mater. Sci. For.*, 580-582 (2008), 393-396
12. K. H. Song, H. Fujii and K. Nakata: Evaluation of Grain Refinement and Mechanical Property on Friction Stir Welded Inconel 60, *Mater. Trans.*, **50** (2009), 832-836
13. J. M. Howe: Interfaces in Materials, (1997)
14. F. J. Humphreys and M. Hatherly: Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd ed., (Elsevier, Oxford, UK, 2004)

- Kazuhiro Nakata
- 오사카대학교접합과학연구소소장
- 오사카대학교접합과학연구소
- 접합프로세스개발
- e-mail : nakata@jwri.osaka-u.ac.jp