



표면마찰접합 기술

이창길, 김성준 | 한국기계연구원 한흥남 | 서울대학교

1. 서 론

마찰교반용접(Friction Stir Welding, 이하 FSW) 기술은 영국의 TWI(The Welding Institute)에서 개발된 새로운 고상접합기술로 접합재의 특성이 매우 우수하며 고속 자동화 용접이 가능한 환경친화적인 고상접합 기술로 평가받고 있다^[1-3]. 또한, 지금까지 난용접성 소재로 분류되었던 Al 합금, Mg 합금, Ti 합금 등의 접합이 가능하게 된 것도 FSW 기술의 큰 장점 중의 하나이다^[4,5]. 그러나, FSW 기술의 접합원리상 접합용 공구에는 접합재 내부로 삽입되는 이른바 pin이 반드시 필요하다^[1,2]. 이로 인해 접합 말단에 항상 pin이 빠져나간 흔적인 이른 바 key-hole 또는 pin-hole이 남게 되며, 이는 경우에 따라 심각한 용접결함으로 작용하게 된다. 또한 맞대기 접합의 경우 두께가 얇은 판재에는 FSW 기술을 적용하는 것이 용이하지 않은 것으로 알려져 있다^[2-4].

이러한 FSW 기술의 한계점에 착안하여 두께가 얇은 금속 판재를 접합할 수 있는 표면마찰접합(Surface Friction Joining, 이하 SFJ) 기술이 제안되었다^[6]. SFJ 기술에서는 접합재 내부로 삽입되는 pin이 없는 단순한 형태의 환봉형 접합용 공구를 사용하는 것이 FSW 기술과 다른 점이다. 따라서, 마찰은 접합용 공구와 접합재의 접촉면에서만 일어나고, 접합용 공구의 회전에 동반되는 접합재 재료의 소성유동이 판재 내부로 침투하여 접합되는 것이 특징이다. 현재까지 SFJ 기술은 맞대기 접합뿐만 아니라 겹치기 접합, 점용접 등 다양한 형태의 접합이 가능한 것으로 확인되었다^[7,8]. 한편, SFJ 기술의 접합원리를 활용하면 다양한 응용기술을 파생시킬 수 있다. 접합부는 연속적인 강한 전단변형과 마찰열 및 가공발열에 따른 동적 재결정의 발생으로 결정립이 미세화되는 등 모재와는 다른 미세조직과 기계적 특성을 가지게 된다. 이를 활용하면 특정한 부분의 미세조직과 기계적 특성을 적절한 조건에 의해 임의로 변화시킬 수 있으며, 이를 활용하면 다양한 응용기술을 파생시킬 수 있다.

본 고에서는 SFJ 기술의 개요, SFJ 기술을 적용하여 접합한 접합재의 기계적 특성, 그리고 응용기술로서 판재성형공정에의 적용 가능성, 장래의 전망 등에 관하여 살펴보고자 한다.

2. 금속 판재의 접합

그림 1은 SFJ 기술의 접합 원리를 도식화하여 나타낸 것이다. 접합재(1, 2)와 고속회전하는 접합용 공구(3)를

접촉시키면 마찰열이 발생하며, 이로 인해 접촉 부위의 재료는 연화됨과 동시에 공구 회전에 의해 소성유동과 가공발열이 일어난다. 소성유동이 접합재 내부로 침투하면서 접합요구선(5) 양쪽의 재료는 강제로 혼합이 되며, 접합용 공구의 이동에 따라 접합이 이루어지게 된다. 그림 1에서 '6'으로 표시된 부분은 접합부에 형성된 소성영역을 나타낸다. 이와 같은 원리로 접합재의 접합이 이루어진다.

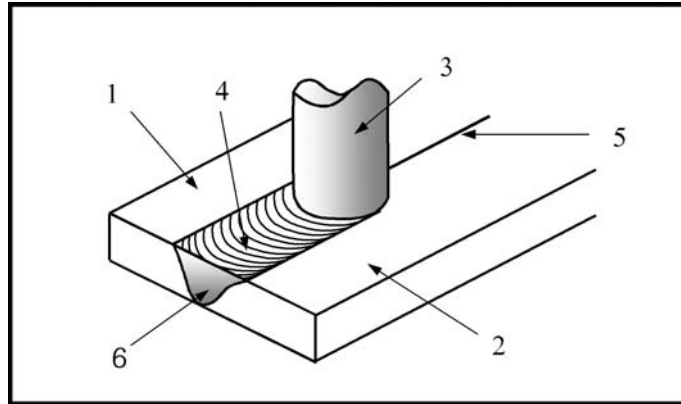


그림 1. 표면마찰접합법의 접합 원리.

1,2: 판재, 3: 접합용 공구, 4: 접합부
5: 접합요구선, 6: 소성영역

따라서, SFJ 기술은 MIG, TIG, GMAW, 레이저 용접, 전자빔 용접 등과 같은 기존의 접합기술과는 달리 별도의 열원(heat source), 용접봉, 용가제(filler), flux 등이 불필요하며 접합 과정에서 유해광선이나 유해물질이 배출되지 않기 때문에 경제적이면서도 환경친화적인 접합기술이다. 그림 2는 SFJ 기술을 적용하여 접합된 금속판재들의 예를 나타낸 것이다.

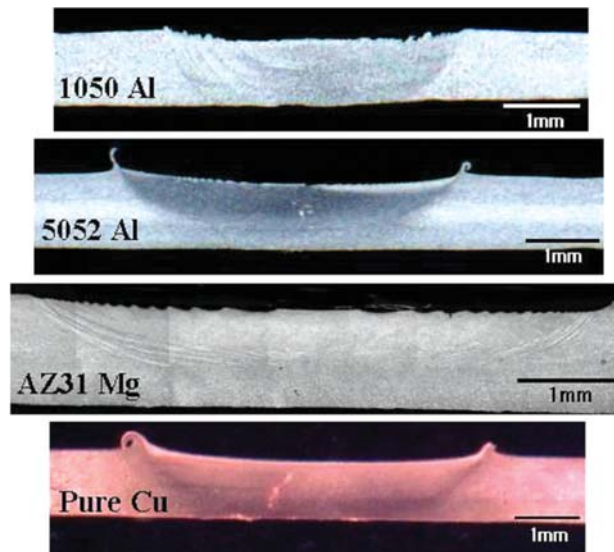


그림 2. 표면마찰접합된 금속판재들

3. 접합조건에 따른 소성영역의 깊이

그림 1에서 본 바와 같이 접합재와 접촉하는 접합용 공구의 고속회전에 의해 발생하는 소성유동이 접합재 내부로 침투하면서 접합이 되기 때문에 주어진 접합조건에서의 소성영역의 깊이가 곧 접합할 수 있는 판재의 두께를 결정한다. Back-up plate 재료, 판재의 두께, 접합용 공구의 지름 및 회전속도, 접합속도 등이 소성영역의 깊이 변화에 직접적인 영향을 미치는 변수들이다.

그림 3은 back-up plate 재료에 따른 소성영역의 깊이를 측정하여 나타낸 것이다. 그림 3에서 back-up plate 재료로 알루미늄을 사용하였을 경우 소성영역의 깊이가 가장 얇고 탄소강, 스테인리스강, ceramic의 순서로 깊어지며, 스테인리스강과 ceramic의 경우에는 소성영역 깊이가 유사함을 볼 수 있다. 접합용 공구와 접합재와의 마찰과 소성가공에 의해 발생한 열의 일부는 접합재 배면과 접촉하고 있는 back-up plate를 통하여 외부로 손실된다. 이 때 back-up plate 재료의 열전도율이 낮으면 열이 외부로 손실되는 정도가 낮아짐으로써 소성영역 내에 보다 많은 양의 열이 축적될 수 있다. 이에 따라 접합용 공구와 접합재 접촉면으로부터 배면까지의 온도구배가 작아지게 되어 보다 깊은 영역까지 소성유동이 일어날 수 있게 된다. 이러한 이유로 스테인리스강과 ceramic을 back-up plate 재료로 사용하였을 경우 소성영역이 가장 깊게 형성된다.

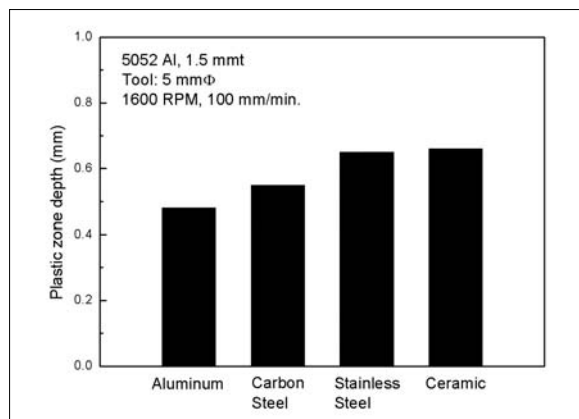


그림 3. Back-up plate 재료에 따른 소성영역 깊이

그림 4는 접합용 공구의 지름과 회전속도, 접합속도, 접합재의 두께 등의 공정조건에 따른 소성영역 깊이의 변화를 측정하여 나타낸 것이다. 그림 4에서, 공구의 지름과 회전속도가 증가하면 소성영역의 깊이도 증가하는 반면(그림 4(a), (b)), 접합속도와 판재의 두께가 증가하면 소성영역의 깊이가 감소하는 것을 볼 수 있다(그림 4(c), (d)). 접합조건에 따른 소성영역 깊이의 변화는 접합 과정에서 마찰열 및 가공발열의 발생과 접합재를 포함한 주변으로의 열 방출이 조건에 따라 달라지기 때문에 발생한다. 접합 과정에서 마찰열은 접합용 공구와 접합재의 상대적인 운동에 의해 발생하며, 가공발열은 공구의 회전에 의한 재료의 소성유동으로 발생하는데, 마찰면적 또는 속도가 증가하거나 재료의 소성변형 속도가 증가하면 마찰열과 가공발열의 발생량도 증가한다. 따라서, 공구의 지름이 증가하거나 회전속도가 증가하면 소성영역의 깊이도 증가하게 된다.(그림 4a), (b)) 그리고, 접합용 공구의 지름과 회전속도가 일정할 때 접합속도가 증가하면 접합선상의 특징위치를 공구가 통과하는 시간이 감소한다. 이

러한 경우 그 위치를 접합용 공구가 통과하는 동안 발생하는 열의 양이 감소하게 되므로 소성영역의 깊이 역시 감소하게 된다.(그림 4(c)) 한편, 마찰과 소성유동에 의해 발생한 열은 접합재와 접합용 공구, back-up plate를 통해서 외부로 방출된다. 접합용 공구와 back-up plate의 재료인 합금공구강과 스테인리스강의 열전도도는 각각 약 45W/mK와 15W/mK로 알루미늄의 열전도도(약 170W/mK)보다 매우 낮으므로 주로 접합재를 통해서 열이 방출된다고 할 수 있다. 따라서, 접합재의 두께가 증가하면 열이 방출될 수 있는 부피가 증가하기 때문에 소성영역 깊이는 감소하게 된다.(그림 4(d))

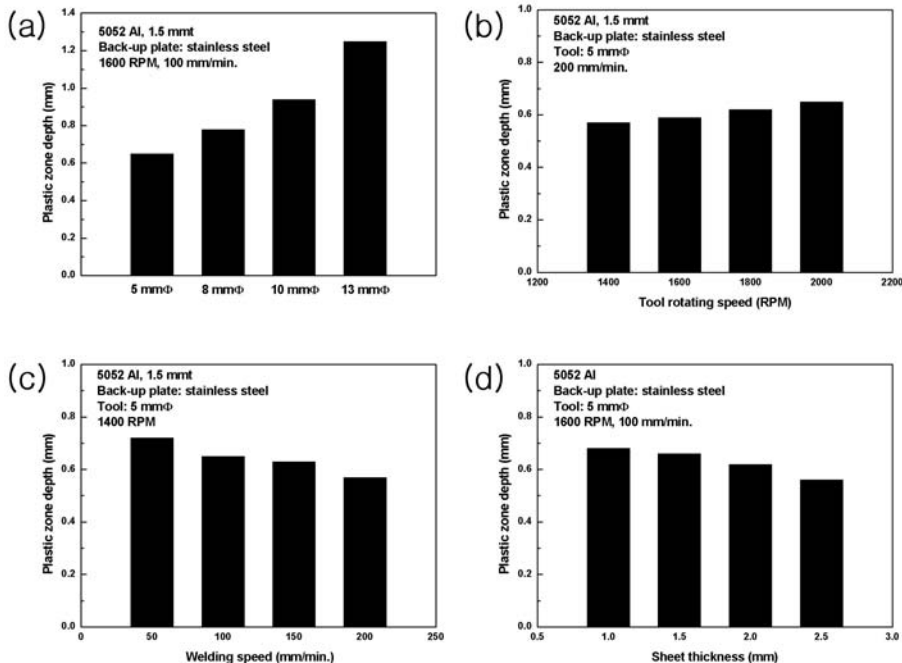


그림 4. 5052 알루미늄 합금 판재의 공정조건에 따른 소성영역 깊이의 변화.

(a) 공구의 지름, (b) 공구의 회전속도, (c) 접합속도, (d) 접합재의 두께

4. 접합재의 미세조직과 인장성질

그림 5는 지름 5mm의 접합용 공구를 사용하여 접합된 두께 1.0mm 5052 알루미늄 합금 판재의 단면을 거시적으로 나타낸 것이다. 사진의 왼쪽이 공구의 회전방향과 진행방향이 일치하는 advancing side이며 오른쪽이 공구의 회전방향과 진행방향이 반대가 되는 retreating side이고, 단면 사진 중앙에 반달 모양으로 나타나는 부분이 접합시 형성된 소성영역이다. 판재의 표면에서는 소성영역의 폭이 공구의 지름과 거의 일치하나 내부로 들어가면서 점차 줄어든다. 마찰교반용접(FSW)된 접합재에서는 접합부 주변의 열-기계적 영향부(thermo-mechanically affected zone, TMAZ) 또는 열영향부(heat affected zone, HAZ)를 명확하게 관찰할 수 있으나^[9], 그림 5에서는 TMAZ나 HAZ가 뚜렷하게 구별되지 않는다. 접합부와 모재의 결정립 크기를 EBSD(electron back-scattered diffraction) 방법으로 측정된 결과, 모재의 결정립 크기는 약 30 μ m인 반면 접합부에서는 평균적으로 약 5 μ m를 나

타내어 상당히 미세화 되었음을 알 수 있다. FSW의 경우 접합부의 결정립이 미세화되는 것은 접합 과정에서 연속적인 강한 전단변형과 마찰열 또는 가공발열에 의해 동적 재결정이 발생하기 때문으로 알려져 있는데⁹⁾, SFJ의 경우에도 동일한 과정이 발생한다고 할 수 있다.

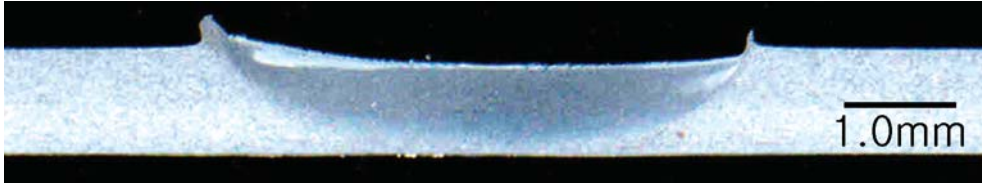


그림 5. 5052 알루미늄 합금 접합재의 단면 모습

그림 5의 접합재에 대하여 접합부를 중심으로 위치별 경도를 측정된 결과를 그림 6에 나타내었는데, 접합부의 평균적인 경도는 70Hv 정도로 모재와 유사하다. 반면, 접합부와 모재 경계영역의 경도가 다소 낮은 것을 볼 수 있는데, 이 부분이 TMAZ 또는 HAZ 일 것으로 판단된다. 5052 Al 합금과 같은 가공경화형 합금의 경우, TMAZ 또는 HAZ에서는 접합시의 소성변형과 열의 영향으로 동적 회복(dynamic recovery)이 발생하기 때문에 모재나 접합부보다 낮은 경도를 나타낸다고 알려져 있다⁹⁾.

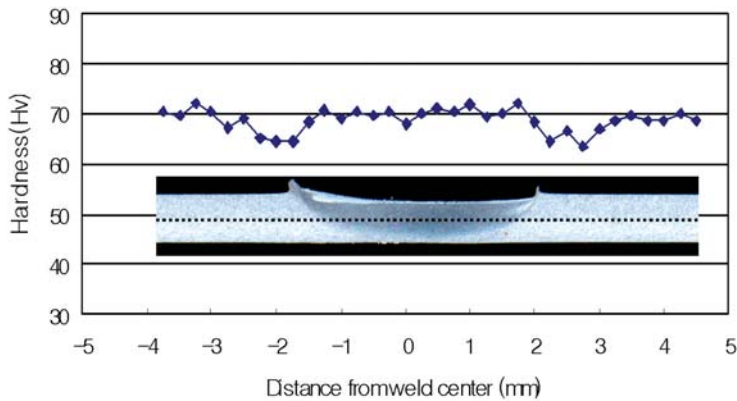


그림 6. 5052 알루미늄 합금 접합재의 접합의 위치에 따른 경도

그림 7은 접합속도와 접합용 공구 회전속도의 변화에 따른 접합재의 인장 성질을 정리하여 나타낸 것으로, 두께 1.0mm의 5052 알루미늄 합금 판재를 2-pass 접합한 후 인장시험한 결과이다. 인장시험은 gage부 길이 25mm, gage부 폭 6.3mm의 인장시험편을 사용하여 실시하였다. 모재는 항복강도 174MPa, 인장강도 232MPa, 연신율 11%의 인장 성질을 나타내었다. 그림 7(a)에서 접합속도에 관계없이 접합재의 인장강도는 모재와 유사하며, 항복강도와 연신율은 모재에 비해 다소 낮은 150MPa와 9% 정도의 수준을 나타내었다. 그림 7(b)에서 접합용 공구 회전속도의 증가에 따라 항복강도와 인장강도가 약간 감소하는 것을 볼 수 있으나 감소의 정도가 그리 크지 않은 반면, 연신율의 경우에는 1,800RPM 이상의 조건에서 모재의 절반 이하 수준으로 감소함을 볼 수 있다. 따라서, 일부 접합조건을 제외하면 접합재의 인장 성질은 모재와 유사한 수준을 나타낸다고 할 수 있으며, 이로부터

SFJ 접합재가 종래의 용융용접법으로 접합한 경우보다 월등히 우수한 인장 성질을 가지는 것을 확인할 수 있다. 1-pass 접합한 두께 0.5mm 접합재와 2-pass 접합한 두께 1.5mm 접합재 역시 그림 7과 유사한 결과를 나타내었다.

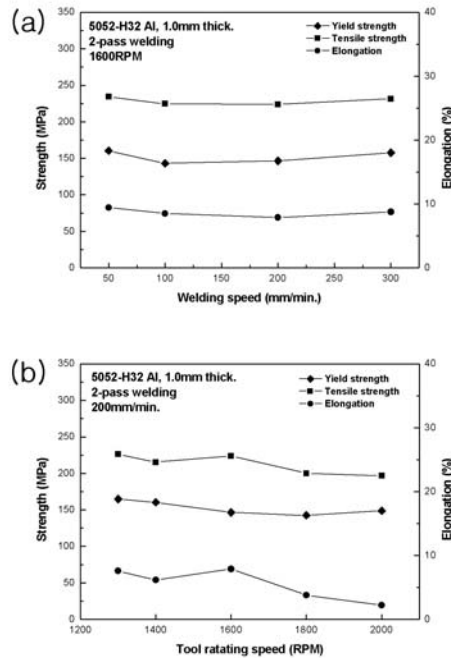


그림 7. 5052 알루미늄 합금 접합재의 접합조건에 따른 인장성질

5. 국부 표면개질을 이용한 판재 성형성 향상

전기자동차, 연료전기자동차 등 환경친화형 자동차에는 차체 경량화의 목적으로 알루미늄 합금, 특히 5000계 등의 가공경화형 합금 판재가 다량 사용될 것으로 전망된다. 석출경화형 합금의 경우에는 최고시효 상태에서 충분한 성형성을 확보하기 어렵기 때문에 용체화처리 상태에서 성형하여야 하며, 이에 따라 성형 후 시효처리 과정에서 변형이 발생할 가능성이 매우 높다. 반면, 가공경화형 합금은 부품 성형 후의 열처리가 필요치 않기 때문에 변형이 발생하지 않으며 추가적인 열처리 비용도 절감할 수 있다. 그러나, 가공경화형 합금 역시 재료 자체의 성형성이 비교적 열악하다. 따라서, 자동차에 폭 넓게 적용되기 위해서는 소재 자체의 성형성을 더욱 향상시키거나 전처리를 통해 부품 성형시 변형과 응력이 집중되는 부분의 국부적 성형성을 향상시키는 것이 필요하다.

전술한 바와 같이 접합부는 연속적인 강한 전단변형과 마찰열 및 가공발열에 따른 동적 재결정의 발생으로 결정립이 미세화되는 등 모재와는 다른 미세조직과 기계적 특성을 가지게 된다. 이를 활용하면 특정한 부분의 미세조직과 기계적 특성을 적절한 조건에 의해 국부적으로 개질할 수 있다. 이러한 국부 표면개질(locally surface-modification, 이하 LSM) 방법은 다양한 용도로 활용될 수 있는데, 특히 판재의 성형성 향상에 큰 효과가 있음이

저자들에 의해 최근 확인되었다^[10]. 이에 본 항에서는 SFJ 접합원리를 이용하여 국부 표면개질된 판재의 성형성 향상에 대하여 소개하고자 한다.

접합용 공구와의 마찰과 소성유동에 의해 국부적으로 미세조직이 변화된 국부 표면개질 판재와 공급상태(as-received, 이하 AR) 판재에 대하여 대표적인 판재 성형성 평가 방법 중의 하나인 LDH(limited dome height) 시험을 표 1의 조건으로 실시하였다. 성형성 시험에는 5052 알루미늄 합금 판재를 사용하였으며, 길이 210mm, 폭 120mm, 두께 1.5mm의 시편을 판재의 압연방향과 시편의 길이방향이 일치하도록 가공하였다. 국부 표면개질 부위는 다양한 지름의 공구를 사용하여 회전속도 1,600RPM, 진행속도 100mm/min. 조건으로 시편의 길이방향과 평행하게 시편의 중심선에 형성시켰다. 또한 국부 표면개질 부위에서 gage부 길이 25mm, gage부 폭 6.3mm, 두께 1.5mm의 인장시편을 채취, 인장시험을 하여 모재 부위의 인장성질과 비교하였다.

표 1. LDH 시험 조건

Punch dia. (mm)	Punch rate (mm/min.)	Blank holding force (kN)	Lubrication
100	2	60	no

그림 8에 LDH 시험 결과를 정리하여 나타내었다. 그림 8에서 5 ϕ LSM의 표기는 지름 5mm의 접합용 공구를 사용하여 국부 표면개질된 판재를 나타내며, 이는 다른 국부 표면개질 판재에도 동일하게 적용된다. LSM 판재들의 LDH 값이 AR 판재보다 높으며, 표면개질에 사용된 공구의 지름이 증가할수록 LDH 값도 증가함을 확인하였다. 그림 8의 결과는 SFJ 접합원리를 이용한 국부 표면개질에 의해 성형성이 향상되었음을 의미하며, 이를 활용하여 판재 성형시 응력과 변형이 집중되는 부위를 성형 전에 적절하게 국부 표면개질하면 파단의 발생을 억제하면서 용이하게 성형할 수 있음을 보여 준다.

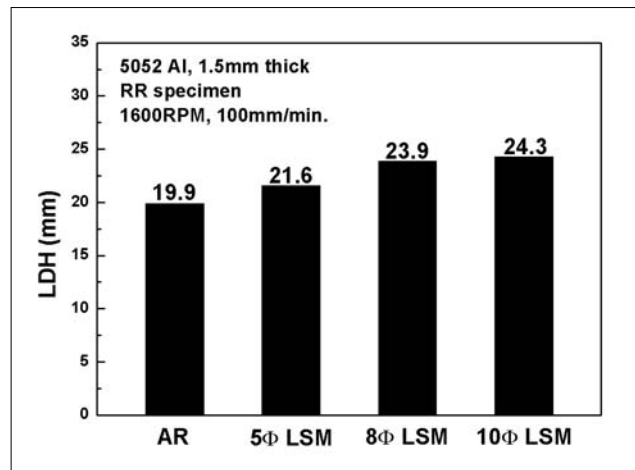


그림 8. 5052 알루미늄 모재 및 국부 표면개질 판재의 LDH 값

그림 9는 그림 8의 각 LSM 판재 국부 표면개질 부위에서 채취한 시편을 인장하여 얻어진 공칭응력-공칭변형율(engineering stress-engineering strain) 곡선을 진응력-진변형율(true stress-true strain) 곡선으로 변환한 것으로 모재 즉, AR 판재와 비교하여 나타낸 것이다. 그림 9에서 LSM 시편의 항복응력과 인장응력은 AR 시편보

다 낮으나 균일변형율은 크게 증가하였다. 특히, 균일연신 구간에서 LSM 시편이 AR 시편보다 변형율 증가에 따른 가공경화가 활발하게 진행되는 것을 볼 수 있다.

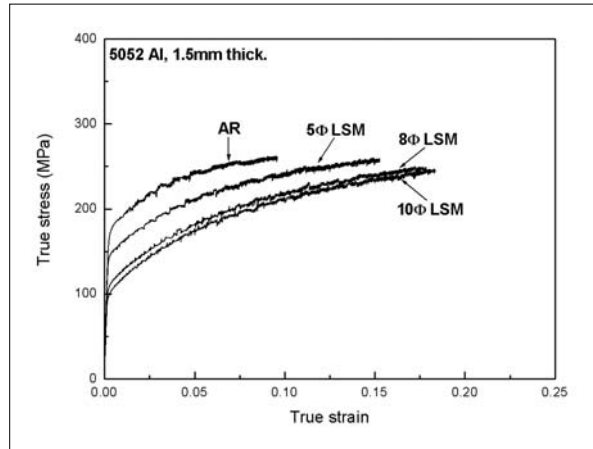


그림 9. AR 및 LSM 시편의 진응력-진변형율 곡선

표 2는 그림 9의 인장곡선으로부터 AR 시편과 LSM 시편들의 인장 성질을 진응력과 진변형율로 나타낸 것이다. 표 2에서 LSM 시편들이 AR 시편에 비해 항복응력과 인장응력이 낮은 반면 균일변형율과 가공경화지수는 크게 증가하였다. 그리고, 국부 표면개질에 사용된 접합용 공구 지름의 증가에 따라 항복응력과 인장응력은 감소하는 대신 균일변형율과 가공경화지수는 증가하며, 인장응력의 감소 정도보다 항복응력의 감소 정도가 훨씬 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서, 그림 9와 표 2의 결과는 국부 표면개질된 LSM 판재들은 외부로부터 응력이 가해질 때 국부 표면개질 영역이 모재보다 많은 변형을 수용할 수 있으며 이로 인해 성형성이 향상될 수 있음을 보여 준다.

표 2. 진응력과 진변형율로 변환한 5052 알루미늄 모재(AR) 및 국부 표면개질(LSM) 판재의 인장성질.

Specimen	Yield Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Uniform Strain	Strain Hardening Exponent, n
AR	174.3	261.4	0.096	0.140
5φ LSM	148.1	256.0	0.153	0.194
8φ LSM	112.6	248.8	0.178	0.257
10φ LSM	102.8	244.8	0.184	0.269

그림 10은 표면마찰접합된 판재(SFJed)의 성형성을 모재(AR)와 비교한 것으로 SFJed 시편의 성형성이 AR 시편보다 50% 이상 되었음을 나타낸다. 그림 8의 국부 표면개질 판재의 경우보다 성형성 향상의 효과가 더욱 크게 나타나는데, 이는 공업적으로 중요한 의미를 가진다. 알루미늄 합금 판재를 주로 사용하는 미래형 자동차뿐만 아니라 수송기기 전반적으로 볼 때 부품의 형상이 다양해지는 등의 여러 가지 이유로 판재를 접합한 후 부품을 성형하여야 할 필요가 종종 있을 것으로 예상할 수 있다. 종래의 용융용접법을 적용한 접합부는 특성인 모재에 비해 현저하게 떨어지기 때문에 성형성이 모재보다 열악하나, 그림 10은 SFJ 방법으로 접합된 접합재의 성

형성이 모재보다 향상되기 때문에 접합 후 성형이 용이함을 보여 준다.

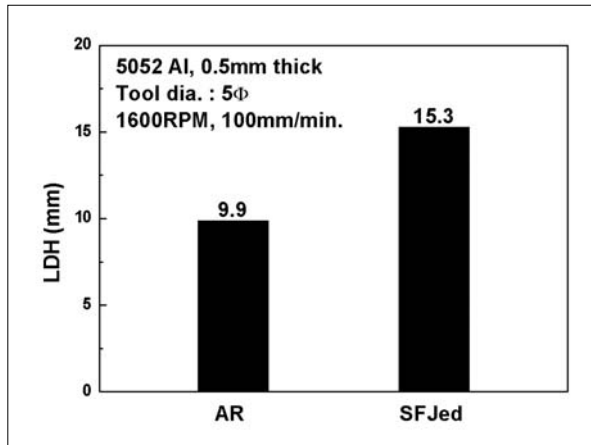


그림 10. 5052 알루미늄 모재 및 접합재의 LDH 값

부품 또는 제품을 제작하기 위하여 금속 판재를 성형하는 경우, 성형성 향상과 함께 중요하게 고려하여야 하는 것은 성형 후 소재 자체의 탄성에 의한 회복(spring-back)이 발생하는 점이다. 이러한 탄성회복은 재료 자체의 탄성계수가 낮을수록 항복강도 또는 가공경화지수가 높을수록 심하게 발생한다. 동일한 양의 변형이 가해졌을 때 알루미늄 합금 판재가 철강 판재보다 탄성회복 발생 정도가 크며, 금속 판재의 고강도화 추세에 따라 성형성 향상과 함께 탄성회복 제어 또는 완화에 대한 요구도 높아지고 있다. 탄성회복이 크면 성형 후 부품 또는 제품의 치수변화가 크며, 이로 인해 성형 후의 치수 교정, 금형의 수정 등과 관련된 비용이 추가로 발생하게 되고 개별 부품의 결합 과정에서도 여러 가지의 문제점들이 따르게 된다. 따라서, 탄성회복을 완화하는 것은 판재 성형에 있어 매우 중요한 해결과제 중의 하나이다. 최근 저자들은 SFJ 접합원리를 활용한 국부 표면개질 이 판재의 성형성 향상뿐만 아니라 탄성회복의 완화에도 효과가 있음을 확인하였다^[11].

두께 1.5mm인 5052 알루미늄 합금 판재를 이용하여 V-bending 시험을 통해 모재와 국부 표면개질 판재의 탄성회복을 비교하였다. 길이와 폭이 각각 100mm인 시편을 90° 각도의 V 자형 금형과 역시 90° 각도의 쇄기형 펀치를 이용하여 판재의 압연방향 또는 국부 표면개질 방향에 수직하게 변형시킨 후 탄성회복된 각도를 측정하는 방식으로 각 시편의 탄성회복 양을 측정하였다. 즉, 90° 변형 후 하중이 제거되었을 때의 각도가 클수록 탄성회복이 큰 것으로 평가된다. 국부 표면개질 부위는 다양한 지름의 공구를 사용하여 회전속도 1,600RPM, 진행속도

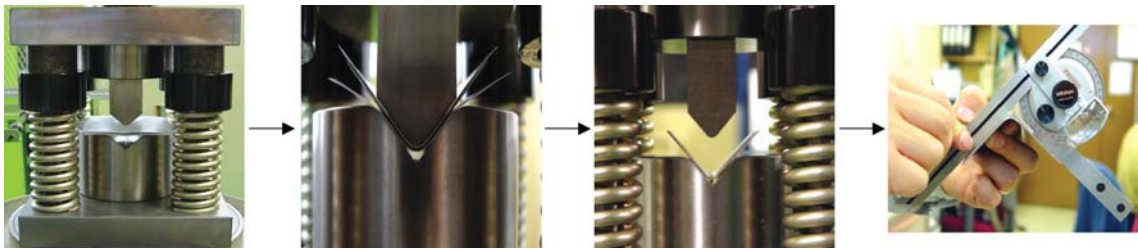


그림 11. V-bending 시험의 과정

100mm/min. 조건으로 판재의 압연방향과 평행하게 시편의 중심선에 형성시켰다. 그림 11은 V-bending 시험의 과정을 나타낸 것이다.

그림 12는 두께 1.5mm 5052 알루미늄 합금 모재와 국부 표면개질된 판재의 탄성회복 값을 비교한 것이다. 그림 12에서 각 시편에 대한 표기 방식은 그림 8과 동일하다. 그림 12에서 국부 표면개질된 LSM 판재의 탄성회복 값이 모재인 AR보다 작은 것을 볼 수 있다. 이는 SFJ 접합원리를 활용하여 국부 표면개질할 경우 판재 성형 후의 탄성회복을 완화할 수 있음을 보여 준다.

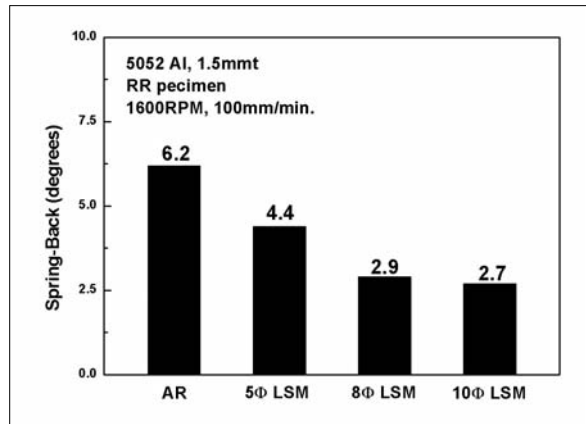


그림 12. 5052 알루미늄 모재 및 국부 표면개질 판재의 탄성회복 값

6. 결 론

표면마찰접합 기술은 기존 접합공정의 개념을 넘어선 새로운 고상접합 기술로서 종전에는 난용접성 소재로 분류되었던 알루미늄 합금 판재의 용이한 접합을 가능하게 하였다. 표면마찰접합 기술은 접합용 공구의 재질 선택에 따라 알루미늄 합금 뿐만 아니라 마그네슘 합금, 구리 합금, 티타늄 합금, 스테인리스강판 등에도 충분히 적용할 수 있을 것으로 판단되며 일부 기술적으로 가능함을 확인하였다. 또한 결함발생 및 접합 후 변형의 최소화, 우수한 접합특성, 경제성, 환경친화성, 성형성 향상 등의 뛰어난 장점을 지니고 있어 향후 다양한 산업분야에서 중요 접합기술로서의 위치를 차지할 것으로 전망된다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 21세기 프론티어연구개발사업의 일환인 ‘차세대 소재성형 기술개발 사업단’의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

❁ 참고 문헌

- [1] R. John and K. V. Jata, Friction Stir Welding and Processing, eds., K. V. Jata, M. W. Mahoney, R. S.

- Mishra, S. L. Semiatin, and D. P. Field, TMS, USA (2003) 57
- [2] G. Liu, L. E. Murr, C. Niou, J. C. McClure, and F. R. Vega, Scripta Mater., 37 (1997) 355
- [3] D. Lohwasser, "Application of Friction Stir Welding for Aircraft Industry", Proc. the 2nd Int. Sympo. on Friction Stir welding, Gothenburg, Sweden (2000)
- [4] T. Shinoda, "마찰교반접합의 특장과 금후의 전망", 마찰교반접합기술의 최신 동향과 실용예, 일간공업신문사, 일본 (2002) 7
- [5] C. J. Dowes, "Seam Welding Sheet and Plate, using Friction Stir Welding Process", Proc. of the 6th Int. Symp., Japan Welding Society, Nagoya, Japan (1996) 711
- [6] 한홍남, 이창길, 김성준, "박판접합용 표면이동 마찰용접법", 한국 특허, 제10-0543160 (2006)
- [7] 이창길, 김성준, 한홍남, "표면마찰이동용접법에 의한 금속판재의 겹치기 접합 방법", 한국 특허, 제 10-0618528 (2006)
- [8] 이창길, 김성준, "표면마찰이동용접법에 의한 금속판재의 점용접 방법", 한국 특허, 제10-0590616 (2005)
- [9] H. S. Yang, "Microstructural Development in Friction Stir Welding of Aluminum Alloys", Proc. Int. ICAA, Toyohashi, Japan (1998) 1483.
- [10] 이창길, 김성준, 한홍남, 정관수, 박상준, "성형성 향상을 위한 알루미늄 합금 판재의 국부 표면 개질 방법", 한국 특허출원, 10-2005-0082666 (2005)
- [11] 이창길, 김성준, 한홍남, 오규환, "알루미늄 합금 판재의 스프링-백 완화 방법", 한국 특허출원, 10-2006-0000515 (2006)



이 창 길

· 한국기계연구원 환경재료연구원 책임연구원
 · 관심분야 : 재료의 기계적 성질, 고강도 철강재료 개발, 환경친화형 고상접합 및 응용기술
 · E-mail : cglee@kmail.kimm.re.kr



김 성 준

· 한국기계연구원 환경재료연구원 센터장
 · 관심분야 : 환경친화형 재료 개발 및 공정기술, 고강도 철강재료, 고질소 스테인리스강
 · E-mail : sjkim@kmail.kimm.re.kr



한 홍 남

· 서울대학교 재료공학부 조교수
 · 관심분야 : 금속기공 및 미소역학
 · E-mail : hnhan@snu.ac.kr