특집 : 마찰교반접합기술과 응용기술동향

2상 스테인리스강의 마찰교반접합의 기술 동향

최돈현 · 안병욱 · 연윤모 · 정승부

Friction Stir Welding of Duplex Stainless Steel

Don-Hyun Choi, Byung-Wook Ahn, Yun-Mo Yeon and Seung-Boo Jung

1. 서 론

마찰교반접합 (Friction Stir Welding)은 1991년 영국 TWI에서 개발된 이래 주로 Al 합금 및 Mg 합금 등 경량화 재료가 적용이 되는 여러 산업 분야에서 적용이 되어 성공적으로 산업화가 이루어지고 있다. 이와 같이 경량 재료의 접합에서 그 우수성을 나타내고 있는 마찰교반접합기술은 Al 합금과 같은 비철금속재료에 국한되지 않고 Fe[1-10], Ti[11-15], Ni[16-19] 합금 등의 고융점 재료에 대해서도 최근 활발히 연구되고 있고 접합 특성도 우수하여 그 적용이 검토되고 있다. 그러나 Al 및 Mg 합금과 같은 비철금속재료의 접합과는 달리 고융점 재료의 접합에는 고가의 툴이 요구되고 있으며 접합 시에는 툴이 마모되는 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 극복하고 고융점 재료에 대한 마찰교반접합의 적용이 확대되기 위해서는 툴 재질 및 접합공정 개발이 매우 중요하며 이에 대한 연구 또한 활발히 진행되고 있다.

최근 스테인리스강의 개발은 Ni 원료 가격의 급격한 상승으로 인하여 Ni 함량이 높은 기존의 오스테나이트 스테인리스강에서 상대적으로 Ni의 함유량이 적어 가격 경쟁력이 있는 2상 스테인리스강으로 대체하려는 움직임이 증가하고 있다. 2상 스테인리스강은 오스테나이트 상과 페라이트 상이 1:1로 혼합된 미세조직을 갖는 스테인리스강으로서 강도가 높고, 내공식성이 우수하며 특히 오스테나이트계 스테인리스강에서 가장 문제가 되는 응력부식균열 저항성이 매우 우수한 것으로 알려져 있다[20].

하지만 2상 스테인리스강의 용접 시 용접 입열에 따라 페라이트와 오스테나이트의 적정 분률이 변화하는 문제점이 있을 뿐만 아니라 열영향부에서의 페라이트 상 조대화, 시그마 상 및 카이 상 등의 석출로 인한 내식성 저하 및 충격 강도 감소 등의 문제가 발생할 수 있다고 보고되고 있다[21-22]. 이러한 문제를 해결하기 위한 2상 스테인리스강의 용접공정 및 적합한 재료개발이 많은 연구자들에 의해 연구되고 있는 상황이며 향후 2상 스테인리스강에 대한 산업체의 수요는 점차 증가될 것으로 예상된다.

따라서 본 논문에서는 스테인리스강 중에서 최근 주목받고 있는 2상 스테인리스강에 대한 마찰교반접합의 적용에 있어서 지금까지 보고된 연구 결과를 조직 및 기계적 특성을 중심으로 정리하여 소개하고자 한다.

2. 2상 스테인리스강의 마찰교반접합 시 열이력 및 석출 특성

Fig. 1은 2205 2상 스테인리스강(2t)을 WC기 툴을 사용하여 툴 회전 속도 600rpm으로 고정하고 접합 속도를 50~250mm/min의 접합 조건에서의 접합부의 열 이력을 나타낸다[23]. 그래프에서 나타내듯이 접합 시 접합부 내 최고 온도는 접합 속도에 반비례하는 것을 알 수 있으며 이러한 결과는 다른 연구결과에서도 비슷하게 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

일반적으로 마찰교반접합 시 접합부 내 최고 온도는 툴 회전 속도와 접합 속도가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 특히 Fe계 합금의 경우 접합 시 상변태 및 이상의 석출을 수반하므로 이에 따라 접합 시 접합부의 열 이력 예측 및 측정은 매우 중요하다.

$$\frac{T_{peak}}{T_{mp}} = K\left(\frac{Rs^2}{V\times 10^4}\right)^{\alpha} \quad (1)$$

식 (1)은 툴 회전 속도(Rs)와 접합 속도(V)를 이용하여 접합부 최고 온도(T_{peak})를 예측 할 수 있는 식을 나타낸다. 여기서 K와 α는 상수이며 T_{mp} 는 피접합재의 용융점이다. 식 (1)과 실험적 결과를 근거로 하여 접합 속도(V)와 최고 온도(T_{peak})간의 관계를 간략히 정리하면 다음 식으로 된다.

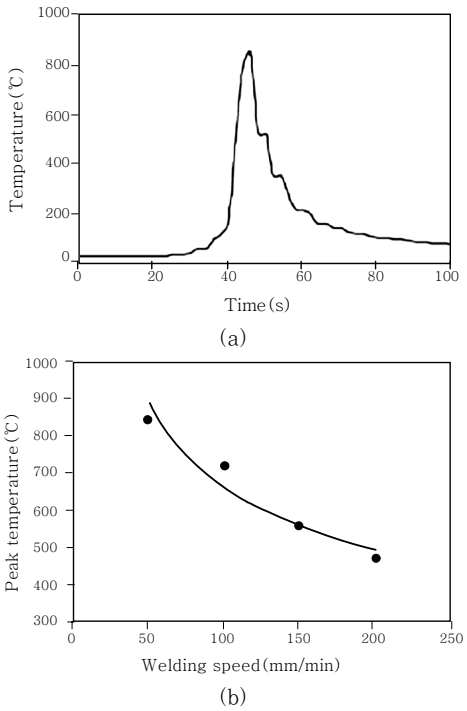

Fig. 1 (a) Thermal profile measured at the welding speed of 50mm/min and (b) Recorded peak temperatures as a function of welding speeds[23)]

$$T_{peak} = 4569.8\left(\frac{1}{V}\right)^{0.419} \quad (2)$$

식 (2)에서 알 수 있듯이 접합부 최고 온도는 접합 속도(V)가 감소함에 따라 높아지는 것을 알 수 있다. 이러한 열 이력은 툴 재료와 피접합재 사이의 마찰에서 발생하는 입열량과도 관련이 있다. 접합 시 인가되는 입열량은 다음의 식을 통하여 계산 할 수 있다.

$$Q = \frac{4}{3}\pi^2 \frac{\eta\mu N w r^3}{V} \quad (3)$$

여기서 Q는 접합부 길이 대비 입열량을 의미하며 η는 입열 효율, μ는 마찰 계수, N은 툴 삽입에 의한 압입 하중, r은 숄더의 직경을 의미한다. 식 (3)에 의하면 접합 속도(V)가 감소하게 되면 입열량(Q)이 증가하게 되며 따라서 접합 속도가 낮을수록 접합 시 최고 온도는 증가한다는 결론을 얻을 수 있다. 따라서 식 (3)에 근거하여 접합 속도가 50mm/min인 경우의 순 입열량을 유도할 수 있으며 그 관계는 다음과 같다.

$$Q/D_t = K \times (\Delta t_{8/5})^{1/2} \quad (4)$$

여기서 Q는 순 입열량(J/mm)을 의미하며, D_t는 피접합재의 두께, K는 열 계수($J/mm^2s^{1/2}$) 그리고 $\Delta t_{8/5}$는 800℃에서 500℃까지의 냉각되는 시간을 의미한다. 이러한 상기 식들을 이용하여 계산된 접합 속도에 따른 접합부 최고 온도와 순 입열량을 Table 1에 나타내었다.

Fig. 1과 Table 1에서 볼 수 있듯이 접합 시 접합부 최고 온도는 실제 측정값과 계산 값이 큰 차이를 나타내지 않는 것을 알 수 있으며 접합 속도가 증가함에 따라 접합부 최고 온도 및 입열량은 큰 폭으로 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 2는 2205 2상 스테인리스강과 2507 슈퍼 2상 스테인리스강의 등온 열처리 후의 시그마상 석출 곡선을 나타낸 것이다[20)]. 여기서 2205는 시그마 상 석출 곡선만을 나타내었고 2507은 1% 및 3%의 시그마 석출 곡선과 함께 상온 충격치가 50% 저하되는 결과를 함께 나타낸 것이다. 이 그래프에서 알 수 있듯이 시그

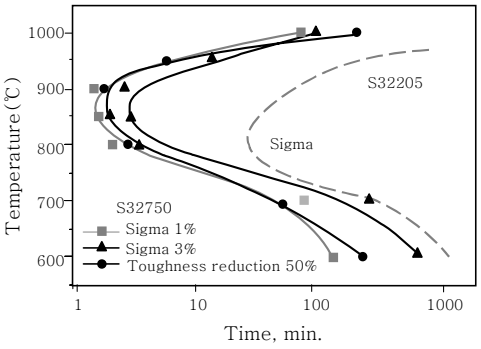

Fig. 2 Isothermal precipitation diagram for S32205 and S32750 duplex stainless steels

Table 1 Calculated amounts of net heat input at various friction stir welding speeds

v(mm/min)	Tp(℃)	CR(℃/s)[a]	$\Delta t_{8/5}$	Q(J/mm)
50	849	86.96	3.45	94.8
100	724	-	-	47.4
150	562	-	-	31.6
200	474	-	-	23.7

[a]CR is the cooling rate from 800 to 500℃

마상 석출을 방지하기 위해서는 2205 2상 스테인리스강의 경우 약 800℃에서 약 30분이내, 2507 슈퍼 2상 스테인리스강은 약 850℃에서 2분 미만으로 냉각속도를 제어해야한다. 실제로 시그마상이 약 1%만 석출이 되어도 상온 충격 특성이 50% 저하되므로 용접 시 용접 조건 선정이나 층간 온도의 관리가 중요하다고 알려져 있다. 하지만 앞서 기술한 바와 같이 2상 스테인리스강의 마찰교반접합은 접합 조건에 따라 접합부 최고 온도가 석출 온도 구간 이하이거나 혹은 그 이상이더라도 냉각 속도가 10초 이내인 것을 고려한다면 마찰교반접합은 2상 스테인리스강의 접합에 있어서 신뢰성 있는 접합부를 구현할 수 있을 것으로 생각된다.

3. 마찰교반접합된 2상 스테인리스강의 미세조직

Si_3N_4 툴을 이용하여 툴 회전속도 460rpm, 접합 속도 60mm/min 조건에서 마찰교반접합한 2205 2상 스테인리스강(3t)의 접합부 단면 마크로 조직을 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 접합부내에서 결함은 관찰되지 않았으며 좌우 대칭의 단면 형상이 형성된 것을 관찰 할 수 있었다. 또한 접합부 내 AS 하단에서는 주변 조직과는 다른 이상 조직이 관찰되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 툴 회전 속도 460rpm에서 접합한 경우, 접합부의 각 영역별 미세조직을 나타낸다. 접합부 내 AS(Advancing side) 하단에서는 주변 조직과는 다른 밴드 형상의 조직이 관찰이 되었으며 이러한 밴드 형상의 조직 형성은 다른 연구 결과에서도 알려진 바 있다[24-25]. 밴드형상 조직의 EPMA 화학 분석 결과를 Fig. 5에 나타낸다. EPMA 분석 결과 다량의 Si이 밴드 형상을 따라 검출되었으며 이러한 Si은 접합 시 마모된 툴의 재료가 접합부내에 혼입이 되어 나타난 결과로 판단된다. 기존 연구 결과에 의하면 Si_3N_4는 고온에서 Si와 N의 분해가 일어난다는 보고가 있으며[26] 마찰교반접합 시 툴이 고온에 노출되는 것을 고려할 때 툴 마모는 단순히 마찰에 의한 기계적 마모뿐만 아니라 고온 분위기 하에서 Si와 N이 분해되어 마모되는 화학적 마모에도 큰 영향을 받는 것으로 생각된다. 이러한 마모 원인에 근거하면 툴 재료의 일부인 N도 밴드 형상을 따라 다량 검출되어야 하나 주변 조직과 동일한 함량을 나타내었으며 이러한 이유는 재료 내에서의 N의 확산속도가 Si 보다 빨라 재료 전체로 확산이 되었기 때문에 나타난 결과로 알려져 있다[26]. 또한 이러한 마모에 의한 툴 재료의 혼입은 접합부 내식성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 304 스테인리스강을 PCBN 툴을 이용하여 마찰교반접합하는 경우 마모된 툴 재료가 Cr과 반응하여 CrB_2를 형성하며[27] WC기 툴로 접합하는 경우에는 접합부내에 다량의 $Cr_{23}C_6$가 생성되어[28] 접합부의 내식성을 현저히 저하시킨다는 보고가 있다. 이처럼 스테인리스강의 마찰교반접합 시 마모된 툴 재료가 접합부내에 혼입되어 내식성을 저하시키는 새로운 부식 형상을 나타내므로 스테인리스강의 마찰교반접합 시에는 적정한 툴 재료 선정 및 접합 시 툴 마모가 발생하지 않도록 접합을 하는 것이 매우 중요하다.

2상 스테인리스강의 모재의 경우, Fig. 4(e)에 나타내듯이 미세 조직은 압연 방향을 따라 연신된 결정립들이 관찰이 되며 페라이트 결정립 matrix위에 오스테나이트 결정립들이 island 형태로 존재하는 것을 볼 수 있다. 접합부의 경우 모재에 비해 미세한 등축정을 나타내고 있으며 AS의 경우 RS(Retreating side)보다

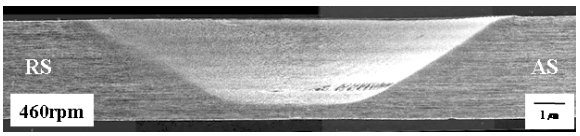

Fig. 3 Cross sectional macro graph of friction stir welded SAF2205

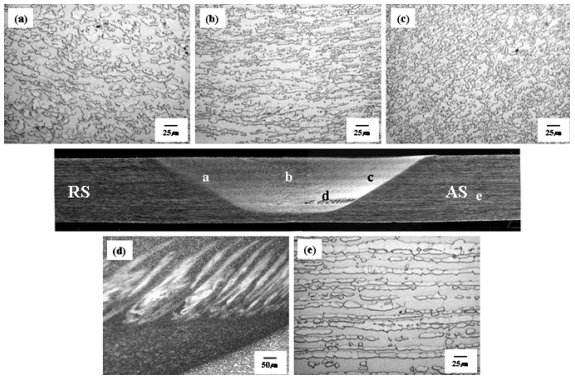

Fig. 4 Each microstructure in the weld of friction stir welded SAF2205: (a) RS (b) Center (c) AS (d) band structure, (e) BM

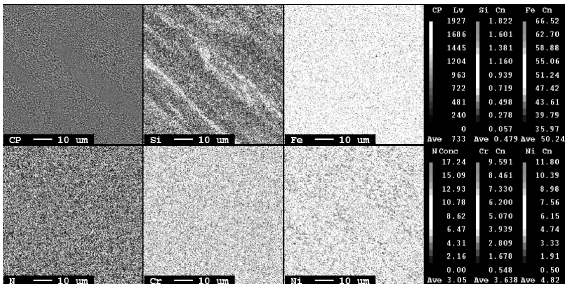

Fig. 5 Result of EPMA analysis in band structure

더 미세한 결정립이 존재하며 또한 페라이트 결정립이 오스테나이트 결정립 보다 상대적으로 더 조대한 것을 관찰 할 수 있다.

이러한 미세 조직 형상은 PCBN 툴을 이용하여 마찰교반접합한 2507 슈퍼 2상 스테인리스강의 접합부에서도 동일하게 관찰된다[29]. Fig. 6은 툴 회전 속도 450rpm, 접합 속도 60mm/min 조건에서 마찰교반접합된 2507 슈퍼 2상 스테인리스강(4t) 접합부의 페라이트 결정립과 오스테나이트 결정립의 크기를 나타낸다. Fig. 6에 나타내듯이 접합부내에서는 오스테나이트 결정립은 페라이트 결정립에 비해 더욱 미세한 것을 확인 할 수 있으며 RS에서 AS로 향할수록 두 상의 결정립 크기는 모두 작아지는 것을 확인 할 수 있다.

T. Saeid[23] 와 Y.S Sato[29]와 는 이러한 현상에 대해서 페라이트 상과 오스테나이트 상이 각기 다른 재결정 특성을 가지고 있기 때문에 일어나는 현상이라고 보고하였다. BCC 결정구조를 지니는 페라이트 상은 FCC 결정구조의 오스테나이트 상에 비해 더 많은 슬립계와 높은 적층결함 에너지를 가지고 있으며 이에 따라 오스테나이트 상이 페라이트 상보다 재결정이 더 쉽게 일어나는 것으로 알려져 있다. 그러나 2상 스테인리스강의 경우에는 이러한 현상이 적용되지 않으며 반대로 페라이트 상이 먼저 재결정되는 것으로 보고된 바 있다. 이러한 이유는 BCC 격자 내에서의 빠른 열확산성과 전위의 이동도에 의한 것으로 보고되었다[30]. 또한 T. Saeid[23]는 접합부내 페라이트 상과 오스테나이트 상의 결정 방위를 분석한 결과 접합 시 마찰열과 툴의 교반에 의한 소성변형에 의해 페라이트 상의 경우 동적 재결정이 발생하지만 오스테나이트 상의 경우 동적 재결정이 일어난 후에 다시 정적 재결정이 일어난다고 보고하였다.[31] 이러한 재결정 특성 차이에 의하여 페라이트 상의 경우 먼저 동적 재결정이 일어나고 그 후에 결정립 성장이 일어나지만 오스테나이트 상의 경우 페라이트 상보다 늦게 동적 재결정이 일어나며 그 후에 다시 정적 재결정을 겪기 때문에 상대적으로 결정립 성장이 어려워 페라이트 결정립 보다 더욱 미세한 결정립으로 존재하는 것으로 알려져 있다.

Fig. 7은 다양한 접합 속도 조건에서 마찰교반접합된 2205 2상 스테인리스강의 광학 미세 조직을 나타낸다[23]. 조직사진 결과에서 볼 수 있듯이 접합 속도가 증가함에 따라 페라이트 및 오스테나이트 결정립의 크기는 작아지는 것을 관찰 할 수 있으며 이러한 원인은 기존의 연구 결과에서 알려진 바와 같이 접합 속도가 증가함에 따라 상대적으로 접합부에 가해지는 입열량이 감소하게 되어 동적 재결정 후 결정립이 충분히 성장하지 못하기 때문에 나타난 결과로 생각된다.

2상 스테인리스강의 경우 가장 중요한 인자는 접합부에서의 페라이트 상과 오스테나이트 상의 적정한 분률이며 마찰교반접합에 따른 접합부내의 상 분률에 대해서도 연구 결과가 보고되고 있다. Fig. 8은 툴 회전 속도에 따른 2205 2상 스테인리스강의 마찰교반접합부의 페라이트 상과 오스테나이트 상의 분률을 EBSD를 이

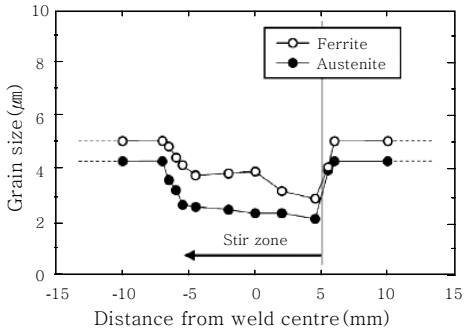

Fig. 6 Grain size profiles of the austenite and ferriite phases in the weld[29]

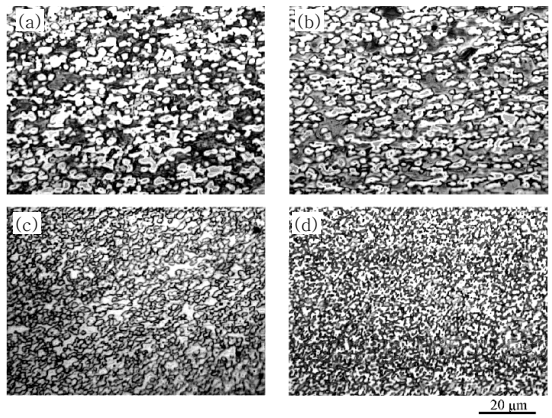

Fig. 7 Optical micrographs showing the grain size in the stir zone at different welding speeds of (a) 50mm/min, (b) 100mm/min, (c) 150mm/min, and (d) 200mm/min[23]

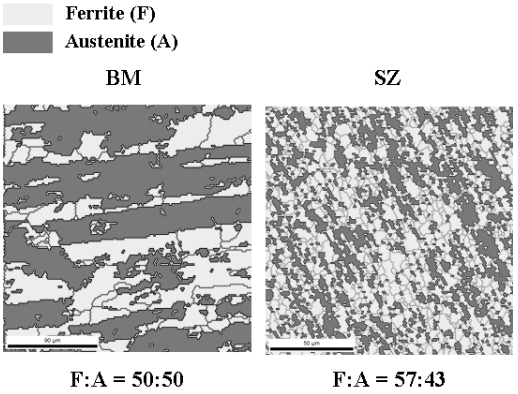

Fig. 8 EBSD map in the weld of friction stir welded SAF2205 : (a) BM, (b) SZ

용하여 분석한 결과를 나타낸다. 분석 결과에서도 볼 수 있듯이 접합부가 모재에 비해서 페라이트의 비율이 약간 더 높은 것으로 나타났다. 이러한 페라이트 상의 분률 증가는 앞에서 기술한 바와 같이 페라이트 상과 오스테나이트 상의 각기 다른 재결정 거동 때문에 나타난 결과로 생각된다.

또한 기존 연구 결과에서 보고된 바에 의하면 2상 스테인리스강의 접합부의 경우 페라이트의 함량이 약 35~65%의 범위가 적정하다는 연구 결과[20]가 있으며 이러한 기준을 고려할 때 마찰교반접합된 2상 스테인리스강에서의 페라이트-오스테나이트 상분률은 적정 수준에 있다고 볼 수 있다.

4. 마찰교반접합된 2상 스테인리스강의 기계적 특성

마찰교반접합된 2205 2상 스테인리스강의 마찰교반접합재의 인장시험후의 파단형상 및 인장시험결과를 Fig. 9 및 Fig. 10에 각각 나타낸다. 인장 시험 결과에서 볼 수 있듯이 파단은 모재부에서 발생하였으며 항복 강도 및 최고 인장 강도 또한 모재와 유사한 것을 확인할 수 있다. 이러한 인장 시험 결과를 고려할 때 마찰교반접합된 2205 2상 스테인리스강의 접합부는 매우 신뢰성 있는 접합부임을 알 수 있다.

Fig. 11은 접합 속도를 변수로 마찰교반접합된 2205 2상 스테인리스강의 인장 강도를 경도 값과비교한 것을 나타낸다[23]. 접합 속도가 증가함에 따라 접합부의 인장

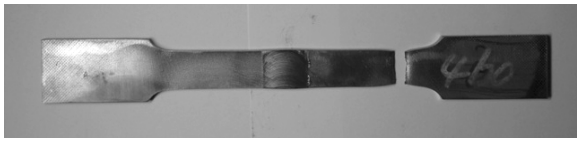

Fig. 9 Fractured tensile specimen of the friction stir welded 2205 duplex stainless steel

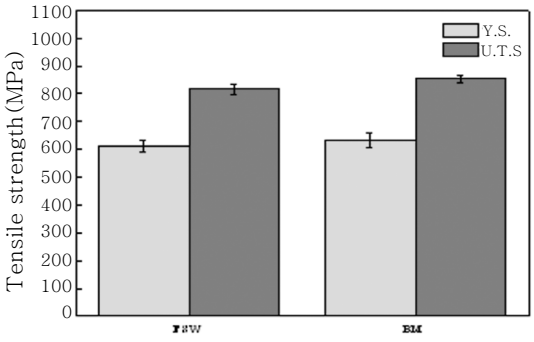

Fig. 10 Tensile properties of the friction stir welded 2205 duplex stainless steel: (a) Y.S and U.T.S, (b) elongation

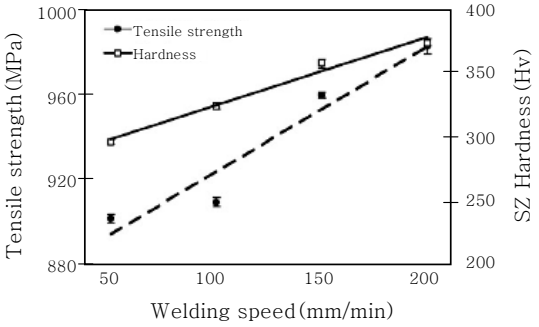

Fig. 11 Effect of FS welding speed on mean hardness value and the tensile strength of the SZ in SAF 2205[23]

강도 및 경도는 증가하는 경향을 나타낸다. 접합부의 강도 및 경도 증가는 앞에서 기술한 바와 같이 접합 속도가 증가함에 따라 접합부 내 결정립 크기가 작아지기 때문에 나타난 결과로 해석된다.

5. 맺 음 말

최근 Ni 등 원자재 가격의 폭등으로 인하여 스테인리스강의 원가 부담이 증가되고 있으며 동시에 스테인리스강의 소비 비율도 증가하는 추세이다. 이에 따라 기존의 오스테나이트 스테인리스강에 비해 우수한 품질 및 가격 경쟁력을 지니고 있는 2상 스테인리스강의 수요는 점차 증가할 것으로 예상이 되며 이에 관한 연구 및 산업계에서의 적용이 점차 증가할 것으로 예상된다.

2상 스테인리스강 용접은 종래의 아크 용접기술로도 충분히 가능하지만 점차 2상 스테인리스강의 고합금화 및 하이퍼 2상 스테인리스강이 개발됨에 따라 특수한 경우에는 2상 스테인리스강에 대한 본 기술의 적용 가능성이 점차 높아질 것으로 생각된다. 또한 지금까지는 동종재 용접 위주의 연구가 진행되어 왔지만 향후에는 2상 스테인리스강과 이종재료와의 접합에 있어서도 연구 및 적용이 기대가 된다.

2상 스테인리스강의 마찰교반접합은 주로 접합부의 미세 조직 분석을 중심으로 연구 결과가 보고되었다. 하지만 접합부의 내부식성 및 충격 특성 등의 신뢰성에 관한 연구 결과는 현재 보고된 바가 없다. 실질적으로 산업계에서의 2상 스테인리스강은 부식 분위기 및 저온 분위기에서 사용이 되고 있으므로 접합부의 내부식성 및 충격 특성 등 신뢰성에 관한 연구 및 이에 따른 문제점 해결은 매우 중요하다고 생각된다. 따라서 향후 2상 스테인리스강의 마찰교반접합에 있어서 접합부의 내식성 및 충격 특성 등의 신뢰성은 반드시 연구가 되어

야 할 것 으로 생각이 되며 이에 따라 2상 스테인리스강에 대한 마찰교반접합의 적용 가능성 또한 점차 증가할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. T.J. Lienert, W.L. Stellwag, Jr., B.B. Grimmett and R.W. Warke: Friction Stir Welding Studies on Mild Steel. Weld. J., **82** (2003), 1s-9s
2. H. Fujii, L. Cui, N. Tsuji, M. Maeda, K. Nakata and K. Nogi: Friction stir welding of carbon steels. Mater. Sci. Eng. A, **429** (2006), 50-57
3. L. Cui, H. Fujii, N. Tsuji and K. Nogi: Friction stir welding of a high carbon steel. Scripta Mater., **56** (2007), 637-640
4. L. Cui, H. Fujii, N. Tsuji, K. Nakata, K. Nogi, R. Ikeda and M. Mtsushita: Transformation in Stir Zone of Friction Stir Welded Carbon Steels with Different Carbon Contents. ISIJ Intern., **72** (2007), 299-306
5. Y.D. Chung, H. Fujii, R. Ueji, K. Nogi: Friction stir welding of hypereutectoid steel (SK5) below eutectoid temperature. Sci. Technol. Weld. Join., **14** (2009), 233-238
6. Y.S. Sato, H. Yamanoi, H. Kokawa and T. Furuhara: Microstructural evolution of ultrahigh carbon steel during friction stir welding. Scripta Mater., **57** (2007), 557-560
7. Y.S. Sato, H. Yamanoi, H. Kokawa and T. Furuhara: Characteristics of microstructure in ultrahigh carbon steel produced during friction stir welding. ISIJ Intern., **48** (2008), 71-76
8. A.P. Reynolds, W. Tang, M. Posada and J. DeLoach: Friction stir welding of DH36 steel. Sci. Technol. Weld. Join., **8** (2003), 455-460
9. D.H. Choi, C.Y. Lee, B.W. Ahn, Y.M. Yeon, S.H.C. Park, Y.S. Sato, H. Kokawa, S.B. Jung: Effect of fixed location variation in friction stir welding of steels with different carbon contents, Sci. Technol. Weld. Join., **15** (2010), 299-304
10. D.H. Choi, C.Y. Lee, B.W. Ahn, J.H. Choi, Y.M Yeon, K. Song, S.G. Hong, W.B. Lee, K.B. Kang and S.B. Jung, J. Mater. Sci. Tech., In press
11. W.B. Lee, C.Y. Lee, W.S. Chang, Y.M. Yeon, S.B. Jung: Microstructural investigation of friction stir welded pure titanium, Mater. Lett., **59** (2005), 3315-3318
12. A.J. Ramirez, M.C. Juhas: Microstructural Evolution in Ti-6Al-4V Friction Stir Welds, Mater. Sci. For., **426-432** (2003), 2999-3004
13. Y. Zhanga, Y.S. Sato, H. Kokawaa, S.H.C.. Park, S. Hirano: Microstructural characteristics and mechanical properties of Ti--6Al--4V friction stir welds, Mater. Sci. Eng. A, **485** (2008), 448-455
14. S. Mironov, Y. Zhanga, Y.S. Sato, H. Kokawa: Development of grain structure in beta-phase field during friction stir welding of Ti-6Al-4V alloy, Scripta Mater., **59-1** (2008), 27-30
15. S. Mironov, Y. Zhanga, Y.S. Sato, H. Kokawa: Crystallography of transformed beta microstructure in friction stir welded Ti-6Al-4V alloy, Scripta Mater., **59-5** (2008), 511-514
16. Y.S. Sato, P. Arkoma, H. Kokawa, T.W. Nelson, R.J. Steel: Effect of microstructure on properties of friction stir welded Inconel Alloy 600, Mater. Sci. Eng. A, **477/1-2** (2008), 250-258
17. F. Ye, H. Fujii, T. Tsumura, K. Nakata: Friction stir welding of Inconel alloy 600, J. Mater. Sci., 41 (2006), 5376-5379
18. K.H. Song, H. Fujii, K. Nakataa: Effect of welding speed on microstructural and mechanical properties of friction stir welded Inconel 600. Mater. Design, **30** (2009), 3972-3978
19. K.H. Song, K. Nakataa: Microstructural and mechanical properties of friction-stir-welded and post-heat-treated Inconel 718 alloy. J. Alloy Compd., **505** (2010), 144-150
20. S.G. Ahn, J.S. Kim, K.T. Kim: Devolpment Trnds of Duplex Stainless Steels for the Process Industries and It's Weldability. J. KWJS., **28** (2010), 22-33
21. J.R. Davis: ASM Specialty Handbook 'Stainless Steels'. ASM International, Materials Park (1994), 51-54
22. J. Hilkes, K. Bekkers: Welding duplex stainless steel. Weld. J., **74** (1995), 51-54
23. T. Saeid, A. Abdollah-zadeh, H. Assadia, F. Malek Ghainia: Effect of friction stir welding speed on the microstructure and mechanical properties of a duplex stainless steel. Mater. Sci. Eng. A, **496** (2008), 262-268
24. S.H. C. Park, Y.S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano, M. Inagaki: Rapid formation of the sigma phase in 304 stainless steel during friction stir welding. Scripta Mater., **49** (2003), 1175-1180
25. K.H. Song, K. Nakata: Mechanical Properties of Friction-Stir-Welded Inconel 625 Alloy. Mater. Trans., **50** (2009), 2498-2501
26. R. Ohashi, M. Fujimoto, S. Mironov, Y. S. Sato, H. Kokawa: Microstructural Characterization of High-Strength Steel Lap Joint Produced by Friction Spot Joining. Metall. and Mater. Trans. **A 40A** (2009) 2033-2035
27. S.H.C. Park, Y.S. Sato, H. Kokawa, K. Okamoto, S. Hirano, M. Inagaki: Boride Formation Induced by pcBN Tool Wear in Friction-Stir-Welded Stainless Steels. Metall. Mater. Trans. A, **40** (2009), 625-636
28. W.B. Lee: The Status of Friction Stir Welding Applications to Ferrous Materials. J. KWJS., **27** (2009), 491-497
29. Y.S. Sato, T.W. Nelson, C.J. Sterling, R.J. Steelc, C.O. Pettersson: Microstructure and mechanical properties of friction stir welded SAF 2507 super duplex stainless steel. Mater. Sci. Eng. A, **397**

(2005), 376-384
30. W. Reick, M. Pohl, A.F. Padilha: Recrystallizatio - Transformation Combined Reactions during Annealing of a Cold Rolled Ferritic - Austenitic Duplex Stainless Steel. ISIJ Intern., **38**, (1998) 567 - 571
31. T. Saeid, A. Abdollah-zadeha, T. Shibayanagi, K. Ikeuchi, H. Assadi: On the formation of grain structure during friction stir welding of duplex stainless steel. Mater. Sci. Eng. A, **527** (2010), 6484-6488

• 최돈현
• 1982년생
• 성균관대학교 신소재공학부
• 마찰교반접합, 마이크로조이닝
• e-mail : cdh0326@skku.edu

• 안병욱
• 1986년생
• 성균관대학교 신소재공학부
• 마찰교반접합, 마이크로조이닝
• e-mail : wordup1@skku.edu

• 연윤모
• 1953년생
• 수원과학대학 신소재응용과
• 마찰교반접합, 마찰교반 점용접
• e-mail : ymyeon@ssc.ac.kr

• 정승부
• 1959년생
• 성균관대학교 신소재공학부
• 마이크로조이닝, 마찰교반접합
• e-mail : sbjung@skku.edu