

스테인리스강(STS304)과 알루미늄합금(AI6351) 마찰용접부의 기계적 특성에 관한 연구

김의환*, 민택기**

A study on the mechanical properties of STS304-AI6351 friction welding zone

Eui-Hwan Kim*, Taeg-Ki Min**

Abstract

This study deals with the mechanical properties of STS304-AI6351 friction welding zone. Main results are as follows ; under the condition of upset pressure 75MPa, the tensile strength of STS304-AI6351 friction weld interface was higher than that of AI6351 base metal, and the highest tensile strength(290MPa) was obtained at upset pressure 125MPa. The hardness profile across the weld interface shows that the hardness of both STS304 and AI6351 is higher around the weld interface, and sharply increased hardness on the STS304 side is related with the plastic deformation of micro volume. As the result of analyzing the tensile fracture, it showed perfect soft fracture.

Key Words : Friction welding(마찰용접), Upset pressure(업셋압력), Plastic zone(소성유동영역), Friction time(마찰시간), Diffusion bonding(확산접합)

1. 서론

마찰용접은 두 재료에 압력을 가한 상태에서 상대운동을 주어 발생하는 마찰열을 이용하여 고상태(solid state)로 접합하는 방법이다. 마찰용접은 동종재료는 물론이고 이종재료의 접합에도 용이한 용접법으로 일반 용접에 비하여 열영향부(HAZ)의 범위가 좁고, 여러 가지 장점을 가지고 있어 자동차, 전기, 조선, 화학, 원자력, 기타 공학분야와 건축 산업에서도 성능이 우수한 특성을 활용 광범위하

게 사용되고 있다. 또한 마찰용접은 주조조직을 만들지 않기 때문에 기계적성질이 우수하고, 공정변수가 축하중, 회전속도, 업셋량등으로 비교적 제어가 간단하여 자동화가 가능하다. 본 연구에서는 내식성, 내 산화성이 우수한 STS304 오오스테나이트 스테인리스강과 내식성과 인성이 풍부한 AI6351 합금의 이종재료에 대한 마찰용접 특성을 평가하였다. 스테인리스강과 순알루미늄의 마찰용접에 관한 연구는 지금까지 몇몇 연구가 수행되어 왔으며, Yashan 등¹⁾과 Chemenco 등²⁾의 연구결과는 훌륭한 기계

* 충남대학교 대학원 기계공학과

** 충남대학교 기계공학과

적 이음을 얻을 수 있음을 보여준다. 그러나 스테인리스강과 알루미늄 합금의 마찰용접에 관한 연구는 드물고, Okawa 등³⁾의 연구에 의하면 만족할만한 강도를 얻기 어려운 것으로 알려졌다. 본 연구의 목적은 STS304와 알루미늄 합금의 마찰용접 특성에 대해 고찰하고 기계적 강도를 향상시키는 용접조건을 선정하여, 극저온용, 원자력 분야, 인쇄용 Copy roller 등⁴⁾에 적용시킴에 있다.

2. 실험재료 및 실험기기

2.1 실험재료

본 실험에 사용된 재료는 STS304 오오스테나이트 스테인리스강과 Al-Si-Mg계열의 합금인 Al6351이다. 두 재료 모두 직경 20mm, 길이 100mm의 환봉형태로서 용접 이전에 모든 시험편의 용접면을 선삭가공하였고, 기름과 같은 이물질의 영향을 배제하기 위하여 용접면을 아세톤으로 세척하였다. 이들 재료의 화학조성과 기계적 성질을 Tables 1, 2에 각각 나타내었다.

Table 1 Chemical Composition of Materials (wt%)

Material	C	Cr	Ni	Mn	P	S	Si	Fe	Al
STS304	0.08	18.7	9.2	2.1	0.04	0.03	0.9	Bal.	-

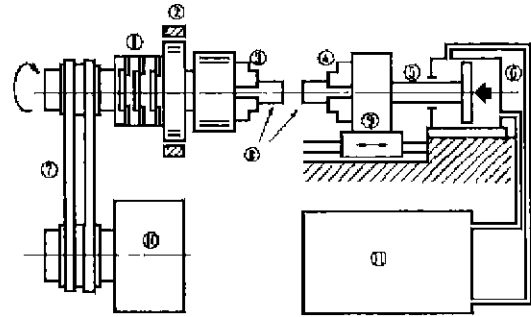
Material	Mn	Si	Mg	Cu	Zn	Fe	Al
Al6351	0.57	0.91	0.69	0.48	0.13	0.16	Bal.

Table 2 Mechanical Properties of Materials

Material	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_v (MPa)	Vickers hardness (Hv)
STS304	690	407	281
Al6351	216	158	65

2.2 실험기기

본 실험에서 사용한 마찰용접기는 Fig. 1과 같이 NSF-30H의 브레이크 타입(Brake type)으로서 회전축과 고정축, 업셋압력이 작용하기 이전에 회전을 급정지시키기 위한 브레이크 장치, 가압력을 얻기 위한 유압장치 등으로 구성되어 있다. 마찰용접부의 인장시험은 인장시험기(Model : INSTRON, UK)로 하였으며, 인장시험편은



- ①cluch ②brake ③rotation chuck ④fixed chuck
- ⑤piston ⑥hydraulic cylinder ⑦drive velt
- ⑧specimen ⑨reciprocal table ⑩electric motor
- ⑪hydraulic system

Fig. 1 Schematic diagram of conventional brake type friction welding machine

Yashan 등³⁾이 사용했던 방법과 같이 용접경계면에서 멀리 떨어진 알루미늄 모체에서 파단이 일어나는 것을 방지하고, 접합면에 인접한 Al의 소성변형을 제한하여 정확한 인장강도를 얻어내도록 설계하였다. 경도시험은 마이크로 비이커스 경도시험기(Model : MVK-H1, Mitutoyo, Japan)를 사용 하였으며, STS304 측은 하중 300g으로, A6351 측은 하중 100g으로 측정하였다. 측정위치는 용접시험편의 중심의 원주의 중간 (R/2)이었으며, 용접계면에 수직인 방향이었다.

용접시험편의 매크로시험은 불산을 10%로 희석하여 부식액으로 사용하였다. 용접부의 조직은 금속광학현미경을 이용 관찰하였으며, 용접경계면에서의 확산 여부를 조사하기 위하여 EDAX (Energy Dispersive of X-Ray)로 정성 분석을 하였다.

2.3 실험방법

본 실험에서는 용접부의 강도를 향상시키기 위하여 최적조건을 찾을 수 있는 시간 규제법을 사용하였다. 예비 실험을 통해서 적정한 용접조건을 선정한 다음, Table 3에서 보여주는 바와 같이 마찰시간 t_1 을 0.5초에서 2.5초까지 0.5초 간격으로 변화시키고, 또한 업셋압력 P_2 를 25MPa에서 150MPa까지 25MPa 간격으로 증가시키면서 회전수 2000rpm에서 마찰용접을 실시하였다. 회전축에는 스테인리스강을, 고정축에는 알루미늄 합금을 물리

Table 3 Friction Welding Conditions

Items	Conditions	Items	Conditions
Friction pressure P1(MPa)	25	Upset pressure P2(MPa)	25~150
Friction time t_1 (sec)	0.5~2.5	Upset time t_2 (sec)	3

고, 양 쪽으로부터 돌출된 재료들의 길이는 30mm가 되도록 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접합면의 형상

Photo 1 은 마찰용접부의 매크로사진으로 업셋압력변화에 따른 용접부의 플래시형상, 소성유동형태를 나타낸 것이다. Photo 1에서 알 수 있듯이 용접경계면 근처에서 외곽쪽으로 Al6351합금이 소성 유동되고 있음을 관찰할 수 있다. 특히 업셋압력의 증가에 따라서 소성 유동되는 플래시의 양도 거의 비례적으로 증가됨을 알 수 있다. 업셋압력이 25MPa 미만에서는 용접한 시험편에서 용접경계면의 Al6351 합금층 중앙의 일부분을 제외하고는 볼록렌즈(Convex lens regions)가 형성되었으며, 업셋압력이 증가함에 따라서 이영역은 플래시로 배출되어서 폭이 점점 좁아져 용접경계면에 균일하게 분포되고 있음을 알 수 있다.

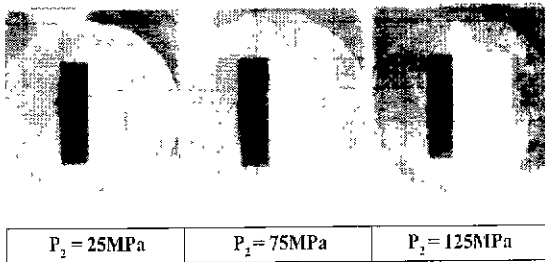


Photo 1 Welding surface of STS304-Al6351 Specimens

3.2 마찰용접부의 인장시험

마찰용접부에 대한 인장강도를 평가하기 위하여 Fig 2 와 같이 인장시험편을 가공하였다. 인장과단되는 단이 용접 경계면에서 파단이 일어나게 하여 정확한 인장강도를 측

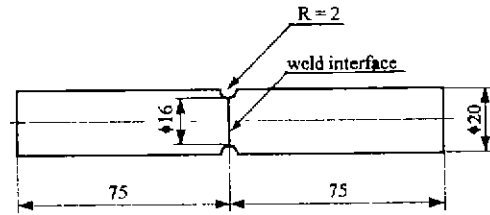


Fig. 2 Specimen for tensile test of friction-welded interface

정할 수 있도록 용접경계면에 반지름이 2mm 되게 홈을 내어 인장시험을 하였다. Fig. 3은 인장시험결과로써 업셋압력을 25MPa에서 150MPa까지 증가시키면서 마찰용접 후에 업셋압력과 인장강도와의 관계를 나타낸 것이다. 또한, 마찰시간은 각각의 업셋압력에 대해 0.5초에서 2.5 초까지 변화시켰다.

Fig. 3에서 알 수 있는 것처럼 접합부의 인장강도가 업셋압력의 증가와 더불어 증가하다가 업셋압력이 100MPa 이상에서는 증가폭이 둔화되었다. 특히, 업셋압력이 75MPa 이상인 경우에는 적용된 마찰시간에 관계없이 접합부의 인장강도가 Al6351 모재(216MPa)를 능가하였다.

마찰시간 1.0초, 업셋압력이 100MPa 이상인 조건에서는 접합부의 인장강도가 Al6351 모재 인장강도의 약 130% 수준이었다. 또한, 접합부의 인장강도가 Al6351 모재의 인장강도를 능가했던 모든 시험편들은 인장시험 후 접합면에서 균열(Crack)이 발생되지 않았다. Potapov 등⁶⁾에 의하면 스테인리스강과 알루미늄 합금은 용융점의 차이가 매우 크고, 접합부의 온도는 일반적으로 두 재료 중 연한 재료의 용융점 온도 이하이므로 마찰열에 의해 스테인리스강이 변형되기는 어렵고 하였다. Chemenco 등⁹⁾에 의한 "강과 알루미늄의 마찰용접에 관한 연구"에서는 접합을 용이하게 하기 위해 취성의 금속간 화합물의 생성을 방지하거나 줄이기 위한 단시간 내의 용접과 강의 표면이 최소한의 미소체적 정도는 변형이 되어야 함을 보여주고 있다. 업셋압력을 125MPa 까지 증가시키에 따라서 파단면의 딩플이 차지하는 면적은 증기되었으며 중심부의 일부분을 제외한 파단면의 대부분에서 딩플이 나타났다. 중심부의 용접이 불완전한 것은 중심부로 갈수록 상대속도가 거의 0에 가까워 마찰열 발생이 적었기 때문으로 생각된다.

3.3 인장파단면의 분석

Photo 2는 STS304와 Al6351의 인장파단면의 STS304

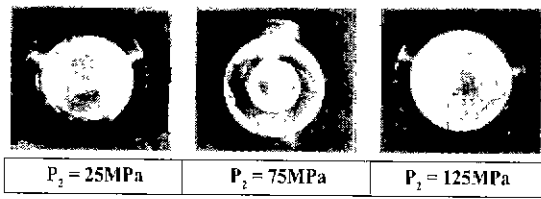


Photo 2 Fracture surface of STS304-Al6351 alloy welding specimens

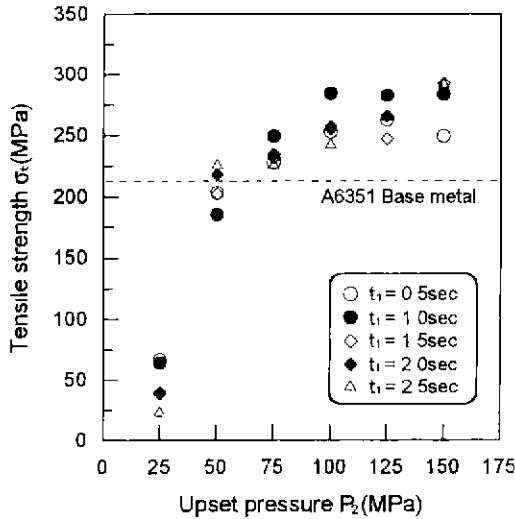


Fig. 3 Tensile Strength of STS304-Al 6351 Weld Interface

측을 나타낸 것이다. 마찰시간 1.0초, 업셋압력 25MPa, 75MPa, 125MPa인 조건으로 마찰용접한 STS304-Al6351 파단면 형상이다. 업셋압력이 25MPa 조건에서는 파단면이 비교적 평활한 접합면을 보이고있으며, 상대적으로 업셋압력을 증가시킨 125Mpa 시편에 비하여 인장강도 역시 낮게 나타났다. 이것은 Al6351 소재가 업셋압력의 증가에 따라서 어느정도는 확산유동이 점차 증가되어 Al6351의 재질에 비하여 경한 STS304 시편에 금속간확산이 활발했던 것으로 판단된다. 이러한 결과는 EDAX로 정성분석한 Fig. 5에서 같이 접합면에 근접한 STS304측에서 Al 원소가 미소하게 나타난 것을 관찰할수 있었다. Sada와 Bahrani⁶⁾는 기계적 특성이 매우 다른 이종금속의 마찰용접에서 고경도 금속의 표면은 연질금속의 피막에 의해 용접과정 초기에 완전히 덮여지며, 이러한 현상은 마찰이 진행되는 과정에서 떨어져 나온 연질재료가 경질금

속에 확산 이동되기 때문이라고 하였다.

비교적 업셋압력이 작은 25MPa 조건의 파단면은 평활한 단면을 보여주고 있다. 이것은 업셋압력의 부족으로 Al6351이 STS304 쪽으로 충분한 확산유동이 일어나지 못한 것으로 사료된다.

75MPa 로 업셋압력을 높인 파단면은 중심으로부터 2/1거리만큼은 확산유동이 증가된 것으로 나왔지만 125MPa 시편과 비교할 때 역시 확산유동이 부족한 것으로 나타났다.

Rich와 Robert⁶⁾의 이론적 해석에 의하면 소성유동영역 (Plastic zone)내의 어느 한 점에서 원주방향에 대한 속도 V_p 는 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$V_p = \frac{y}{h} V_u \left(1 - \frac{x}{h}\right)$$

여기서 V_u 는 업셋속도, h 는 소성유동 영역의 폭, y 는 재료의 중심에서 원주방향으로의 거리(단 $y \leq r$) x 는 접합부에서 수직방향으로의 거리(단 $x \leq h$)이다. 단 소성유동 영역의 폭은 단면에서 일정하고 원주방향에 대한 속도는 접합부로 가면서 증가하며, x 는 h 일 때 0이라고 가정한다. 위 식에서 보면 소성유동 영역내에서 원주방향에 대한 속도는 접합면에 가까울수록, 원주방향으로 갈수록 커진다. 또한 마찰압력이 증가함에 따라 h 가 감소되고, V_u 는 증가하게 되므로 접합면에 인접한 곳에서의 V_p 는 대단히 크게 증가한다. 그러나 마찰압력증가에 따라서 접합력이 일시적으로 증가할수 있지만 접합부에 인접한 소성유동영역에서 원주방향의 유동속도가 크게 증가함으로 접합부에 수직으로 작용하는 성분 즉, 결합력은 감소하게 된다.

3.4 접합부 부근의 경도분포

Fig. 4는 마찰시간 1.0초, 업셋압력 150MPa인 조건으로 마찰용접한 시편의 중심축으로부터 원주방향으로 R/2만큼 떨어진 위치에서 접합부를 가로질러 측정된 경도를 나타내고 있다. 알루미늄 모재(Hv65)와 비교할 때, 알루미늄 열영향부의 경도는 접합면쪽으로 갈수록 상승하여 Hv90까지 경도가 증가하였다.

또한 스테인리스강 측의 접합면에 인접한 곳에서도 모재 경도(Hv281)보다 훨씬 높은 경도(Hv388)를 나타내었다. 접합면에 인접한 알루미늄에서 경도가 증가하는 것은 높은 업셋압력에 의한 재료의 열간단조 효과⁷⁾로 생각되며, 스테인리스강은 가공경화성이 크기 때문에 용접계면에 인접한 영역에서 경도가 예리하게 상승되었음을 알 수

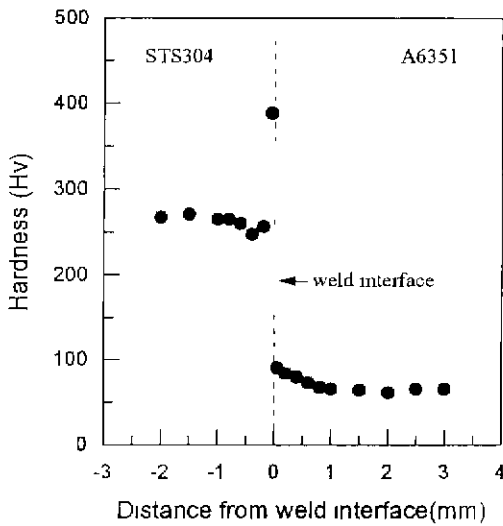


Fig. 4 Hardness Distribution in Weld Interface

있다. 하지만 용접경계면을 지나서부터는 변화폭이 적게 나타났는데 이것은 정합시 발생하는 마찰열에 대한 내열성이 큰 물리적 성질에 기인한다고 생각된다.

3.5 현미경 금속조직

Photo 3 에서 알 수 있는 바와 같이 용접계면을 중심으로 Al6351재료의 조직이 미세화된 현상을 관찰할 수 있으나, STS304에서는 상대적으로 미세화현상이 미소한 것을 알 수 있다.

이러한 현상은 용침이 훨씬 높고, 경한 STS304는 소성변형이 일어난 영역의 폭이 50 μ m 정도로 Al6351측보다 훨씬 좁게 나타났기 때문이다.

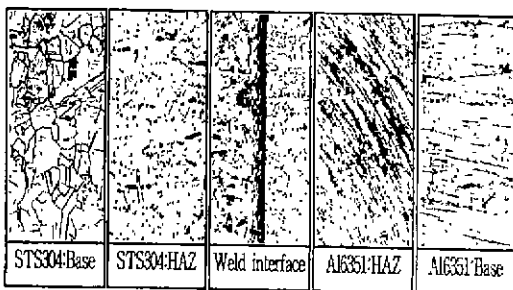


Photo 3 Macrostructures of STS304-Al 6351 Weld Interface ($\times 200$)

특히 Al6351의 소성변형은 STS304 재질에 비하여 연질재료로서 소성변형이 용이하기 때문에 모재에서 볼 수 없는 소성유동 현상이 용접경계면을 지나 열영향부(HAZ)에서 광범위한 영역에 걸쳐 빈번히 이루어졌다. 한편 이중재의 마찰용접에서 자주 발생되는 혼합층(Mixed layer)은 본 연구의 범위 내에서 발견되지 않았다.

3.6 EDAX 정성 분석

Fig. 5는 STS304와 Al6351합금을 엇셋압력 150MPa 조건으로 마찰용접한 시험편을 SEM으로 500배 확대하고 사진내에 표시된 1 (STS304)에서 2 (Al6351)까지 Line Cleaning해서 EDAX로 정성분석한 것으로 두 시험편의 주성분인 Al, Fe, Ni, Cr 성분을 나타낸 것이다.

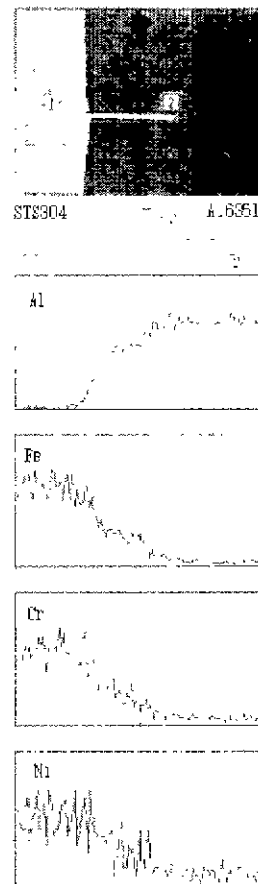


Fig. 5 Macrostructures of STS304-Al 6351 Weld Interface ($\times 500$)

용접계면에 인접한 모든 Al6351 합금층에서 STS304의 구성성분이었던 것으로 여겨지는 Fe, Cr, Ni 성분등이 나타났다

따라서 이들 원소들은 Al6351합금층으로 확산된 것으로 생각된다. 그러나 STS304층에서는 Al6351합금을 구성하고 있는 원소들의 확산은 발견할수 없었다. 이것은 Yashan등의 결과와도 일치하며, 기계적 물리적 접촉이 활발한 용접계면에 높은 열압력을 가해줌으로서 금속간 확산을 촉진시켜 확산접합(Diffusion bonding)이 이루어지도록 하는 것이다

4. 결 론

본 연구에서는 STS304 스테인리스강과 알루미늄 합금(Al6351)을 마찰용접하여 접합부의 기계적 특성을 고찰하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) STS304-Al6351 접합부의 최고 인장강도는 회전수 2000rpm, 마찰시간 1.0sec, 마찰압력 25MPa의 고정조건에서 열압력에 비례하여 증가하였으며, 열압력 75MPa 이상에서는 접합부의 인장강도가 모재의 인장강도보다 높게 나타났다. 또한 열압력 125MPa에서 인장강도가 290MPa로 최고치에 달했다.
- (2) 인장파단면을 분석한 결과 완전한 연성파단면을 나타내었고 열압력이 낮을수록 평활한 면을 보였다.
- (3) 실험에 사용된 두 재료는 모두 접합면 부근에서 경도가 가장 높았는데, 접합면에 인접한 스테인리스강에서 경도의 예리한 상승은 미소체적의 변형과 접합강도와의 상관성을 잘 보여주고 있다.
- (4) STS304-Al6351 마찰용접부의 현미경 조직은 두 재료 모두 용접계면 근처에서 미세화된 현상을 관찰할 수 있으며, 혼합층은 형성되지 않았다.
- (5) 용접부의 EDAX 분석결과 STS304의 구성성분이 Al6351 합금층으로 확산된 것을 확인할수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) D. E. Spindler, "What Industry Needs to Know about Friction Welding Welding Journal". March, pp. 37~42, 1994.
- (2) Yashan D., Tsang S., Johns W. L. and Doughty M. W. "Inertia Friction Welding of 1100 Aluminum to Type 316 Stainless Steel", Welding Journal, pp. 27~37, August, 1987.
- (3) I. A. Chernenco, "Friction welding AD1 aluminium to 12Kh18N10T steel", Welding International, No. 7, pp. 586~590, 1989.
- (4) K Ogawa, H Ochi, Y Yamamoto, M Habe, T Iwamoto, Y Suga : Friction welding of 2017 aluminium alloy and S45C carbon steel using an insert, Welding International, Vol. 8, No. 6, 1994, pp 445~451
- (5) 박화순, 김우열, 강정윤, "강/비철금속 이종금속 간의 용접 및 접합", 대한용접학회지, 第14卷, 第6號, 1996.
- (6) Yu. D Potapov et al., "Scope for Temperature Regulation in the Friction Welding of Dissimilar Materials", Svar. Proiz., No 2, pp. 1~3, 1971.
- (7) Thomas H. Hazlett, "Prooerties of friction Welds Between Dissimilar Metals" Welding Research Supplement pp. 448~450, October, 1962.
- (8) T. Rich, R. Robert, "The Forge Phase of Friction Welding" Welding Research Supplement, March, pp 137s~145s, 1971