

이종 금속의 아크 스폿 용접성 및 접합부 형상 예측에 관한 연구

Study on Weldability and Prediction of nugget shape in arc spot weld of dissimilar metal

김기순*, 장경복*, 강성수**

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

** 부산대학교 기계기술연구소

1. 서론

최근 산업의 다양화·복합화에 대응하여, 경제성과 기능성을 얻을 수 있다는 장점 때문에 이종금속간의 접합이 많이 요구되고 있는 실정이다. 특히, 스테인리스강은 내식성이 우수하고 외관이 깨끗하기 때문에 각종 차량 차체의 외판에 대한 적용이 확대되고 있는 실정이다. 즉, 차량 차체의 내판은 페라이트계 탄소강으로 외판은 오스테나이트계 스테인리스강으로 용접하여 접합할 필요가 있는 것이다. 그러나, 이러한 이종금속간의 용접은 물리적·화학적·기계적성질의 차이로 인해서 용접 중 혹은 용접 후에 문제가 발생할 경우가 많다. 따라서, 우수한 성능을 갖는 접합부를 얻기 위해서는 다양한 연구와 충분한 검토가 있어야 할 것으로 판단된다. 그런데, 이러한 이종금속간의 접합기술에 관한 연구는 주로 육성용접 또는 브레이징기술에 대해 많이 수행되어 왔으며, GMAW(Gas Metal Arc Welding)의 연구에는 맞대기이음(Butt joint)에 대한 연구가 이루어져 왔으나, 박판의 아크 스폿 용접에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

그러므로, 본 연구에서는 차량 차체의 접합에 그 적용이 확대되고 있는 아크 스폿 용접(Arc spot welding)을 이용하여 오스테나이트계 스테인리스강과 페라이트계 탄소강의 아크 스폿 용접성을 평가하였다. 이를 위해, 용접부 단면 미세조직을 검토하여 접합성능을 평가하고 인장전단시험, 미세경도시험을 통하여 사용성능을 평가하였다. 또한, 유한요소모델링(Finite Element Modeling)을 이용하여 아크 스폿 용접부 강도에 가장 큰 영향을 미치는 너트 직경을 예측하기 위한 수치적 모델을 정립하여 이종 금속간의 아크 스폿 용접에 적용시켜 타당성을 검토하였다.

2. 용접재료 및 실험방법

본 연구에서는 산업용 재료로 다양하게 적용되고 있는 오스테나이트계 스테인리스강(STS304, 두께2mm)과 탄소강(SPCC, 두께2mm)을 사용하였다. 실험을 위한 용접시험편은 반자동 아크 용접기(Gas Metal Arc Welder)인 Miller사의 Millermatic 250MP를 이용하여

Table 1. Chemical composition of base metal and consumable

	C	Si	P	S	Ni	Cr	Mn	Al
STS304	0.051	0.57	0.025	0.004	8.65	18.24	1.11	
SPCC	0.12	-	0.04	0.045	0.026	-	0.5	0.05
Y308(wire)	0.08	0.65	0.03	0.03	9~11	19.5~22	1~2.5	

제작하였으며 용접 와이어는 KS D 7026에 규정되어 있는 $\phi 0.9$ Y308을 사용하였다. Table 1.은 피용접재와 용접 와이어의 화학성분을 나타내며 Table 2.는 피용접재의 물리적 성질을 나타낸다. 용접조건은 전류 155A, 전압 26V, 용접시간 2.4초로 하였으며 보호가스로는

Ar(95%) + CO₂(5%)의 혼합가스를 사용하였다. 이 조건은 아크 스폿 용접성에 대하여 기존에 보고된 바 있는 실험결과이다. 아크 스폿 용접 시험편 상판 구멍크기와 접합부 강도와와의

Table 2. Physical properties of base metal

	Melting Point (°C)	Thermal Conductivity (w/m°C)	Thermal Expansion Coefficient (10 ⁻⁶ /K)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Strain(%)
STS304	1450	20.1	17.3	210	600	50
SPCC	1482	65	6.1	165	270	39

관계를 조사하기 위하여 구멍 직경을 6, 6.5, 7mm의 세가지 종류로 하였으며 시험편의 형상과 용접공정의 모식도는 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 상판을 오스테나이트계 스테인리스강으로 한 이유는 차체 적용시 외판으로 사용되기 때문이다.

용접부의 접합성능을 평가하기 위해서 단면을 연마한 후 부식하여 광학현미경으로 단면 미세조직을 관찰하였다. 또한, 사용성능을 평가하기 위하여 각 시험편에 대해서 인장전단강도시험을 하였다. 그리고, 경도 측정은 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 측정하였으며 측정 위치는 판 간의 경계면에서 0.5mm떨어진 위치에서 0.5mm간격으로 측정하였다. 이때 측정하중은 200g으로 하였다. 또한, 단면 미세조직을 관찰하였을 때, 용접금속과 탄소강 사이의 본드부(Bond)에 얇은 띠가 생성되었는데, 이 구역의 경도를 측정하였다. 이 구역은 나비가 0.022~0.025mm로서 매우 좁기 때문에 압흔의 크기가 작은 50g의 하중으로 측정하였다.

3. 유한요소모델

본 연구에서는 기 연구된 오스테나이트계 스테인리스강에 대한 아크 스폿 용접 공정의 3차원 모델을 이중금속에 적용하였을 때의 수치적 모델의 정확성을 검토하였다. 유한요소 해석은 상용 코드인 Marc를 이용하였으며 열해석(therml analysis)만을 수행하여 용접부에서의 정확한 온도 사이클을 획득하여 오스테나이트계 스테인리스강과 페라이트계 탄소강의 고상선 온도를 넘어서는 절점을 구하고 이 부분이 용접금속을 형성하는 것으로 간주하여 접합부의 형상을 예측하였다. Fig. 2에 열해석을 위한 경계조건을 표시하였다.

4. 실험결과 및 고찰

상판의 구멍 크기에 따른 인장전단강도를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 상판의 구멍이 6mm와 7mm 경우는 데이터의 산포가 넓게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 6mm인 경우에는 용입이 불충분하여 충분한 강도를 지니지 못하는 접합부가 형성되었고 7mm일 때는 과용락(excessive droptthrough)으로 인해서 불안정한 접합부가 형성되었기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 인장전단 시험결과 상판 직경이 6.5mm인 경우가 가장 적당하다고 여겨지며 평균 16.2kN으로서 만족할 만한 강도를 지닌 것으로 판단된다.

Fig. 4에 용접부 단면의 형상과 각 영역의 조직을 관찰하기 위하여 용접부 단면을 연속촬영하여 나타내었다. 용융부와 열영향부 그리고 모재로 이어지는 조직의 변화를 관찰할 수 있으며 하판의 Fusion Boundary를 따라서 대략 0.025mm나비의 띠 모양을 가지는 영역이 형성된 것을 관찰할 수 있다. 각 영역의 상을 자세히 관찰하기 위해서 고배율로 확대하여 Fig. 5에 나타내었다. 오스테나이트계 스테인리스강과 페라이트계 탄소강을 용접할 때, 일반적으로 접합부의 각 요소는 희석에 대해 동등하게 기여하고, 용접부로 약 30%정도의 희석

이 있다고 가정하는 것이 일반적이다. 그리고, 용접금속이 크랙에 대한 저항성을 가지기 위해서는 델타페라이트를 함유해야 하는데 이것을 위해서 오스테나이트계 스테인리스강 와이어를 사용하였다. 이것은 Schaeffler diagram으로부터 예측할 수 있으며 Fig. 5(a)에서 용접금속은 오스테나이트 기지에 델타페라이트가 석출한 전형적인 조직을 나타내고 있다. Fig. 5(b)에서 오스테나이트계 스테인리스강 열영향부의 결정립 조대화 영역을 확인할 수 있으며 Fig. 5(c), (d)는 탄소강의 열영향부와 모재를 나타내었다. Fig. 5(e)는 용접금속과 오스테나이트계 스테인리스강의 열영향부가 만나는 구역인데, Fig. 6의 경도 분포에서도 알 수 있듯이 이곳은 기계적 성질의 변화가 발생하기 때문에 균열이 발생할 가능성이 높다. Fig. 5(f), (g)는 Fig. 4의 ①, ②부분을 500배로 확대하여 촬영하였는데, (f)는 이종금속의 접합부 탄소강 쪽에 Fusion Boundary를 따라서 0.025mm나비의 밴드 모양을 나타내고 있으며 이 영역의 미소경도를 측정된 결과 평균 Hv283.42로 매우 높게 나타났다. 따라서, 미세조직과 경도 값으로 미루어 볼 때, 이 영역은 “Intermediate Mixed Zone”이라고 여겨지며 이 영역에 대해서는 이전부터 현재까지 다양한 연구가 진행되어 오고 있는데, 이종금속이 용접되기 때문에 용접금속에서 용융경계층(molten boundary layer)으로의 mechanical hydrodynamic mixing이 발생하지 않음으로 인해서 생성된다고 보고되고 있다. 또한 실제로 이 영역의 조성은 탄소강과 용접금속의 중간조성을 가지며, Schaeffler diagram의 마르텐사이트 구역에 있다. (g)에서 보면 Fusion Boundary에서의 결함층이 나타났다. 따라서, Fig. 4(f), (g)에서 종합하여 볼 때, 실제 차체에 적용시 이 영역에서 응력집중이 일어나 파괴가 일어날 가능성이 매우 크다고 생각되며 앞으로 피로시험을 통한 검증이 필요하다고 사료된다. 이러한 사실은 Fig. 6의 경도분포를 통해서도 알 수 있는데, 하판에서의 용접금속의 경도는 약 Hv180이고 열영향부의 경도는 약 Hv140으로서 급격한 차이를 나타낸다.

5. 결론

두께 2mm의 오스테나이트계 스테인리스강과 페라이트계 탄소강을 아크스폿용접한 결과 인장전단시험에서는 상판구멍이 6.5mm인 경우가 가장 적합하였으며, 평균16.2kN으로서 만족 할만한 강도를 지니는 것으로 판단된다. 그러나, 미세조직 관찰 결과 용접금속과 페라이트계 탄소강 사이의 Fusion boundary에 “Intermediate Mixed Zone”이 생성함에 따라 경도 불균일 영역이 형성되어, 실 차체 적용시 동적 강도에 문제가 일어날 가능성이 있어 차후 피로시험을 통한 동적 강도의 평가가 필요할 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

1. W.P.BLANKSHIP, R.P.SPRECACE, "Evaluation of GMA Spot Welding for Assembly of High Performance Sheet Steel Structures", Welding Journal, March, (1983), pp27-33.
2. D.J.KOTECKI, V.B.RAJAN "Submerged Arc Fillet Welds between Mild Steel and Stainless Steel" (1997), pp.57-66.
3. THOMAS DOODY, "Intermediate Mixed Zones in Dissimilar Metal Welds for Sour Service", Welding Journal, March, (1992), pp.55-60.
4. 황종근, 장경복, 김기순, 강성수, "유한요소 모델링을 이용한 아크 스폿 용접의 너깃 형상 예측", 대한용접학회지, 제17권, 제2호, (1999), pp.84-90.

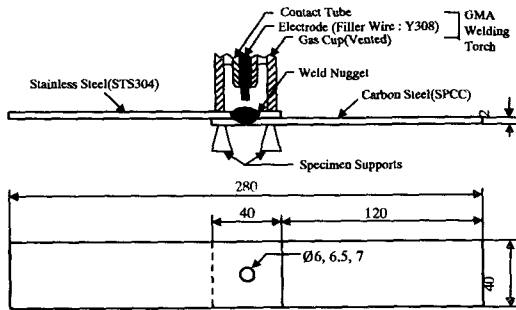


Fig. 1 Specimen configuration and welding setup for Arc spot welding process.

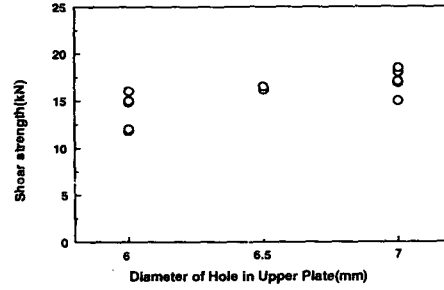


Fig. 3 The relationship between tensile-shear strength and diameter of hole in upper plate.

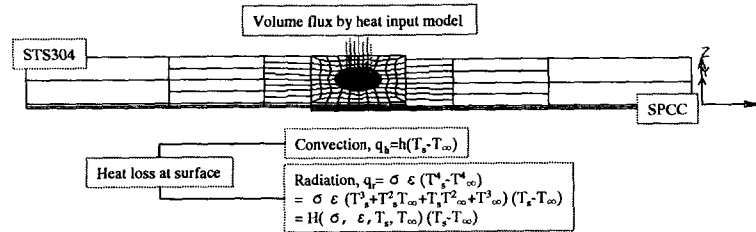


Fig. 2 Boundary condition for heat analysis.

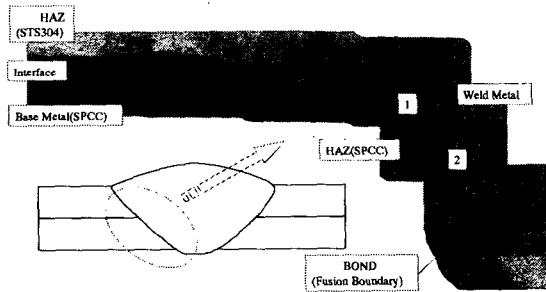


Fig. 4 The microstructure of cross section in arc spot welded specimen; 6.5mm hole diameter (×50)

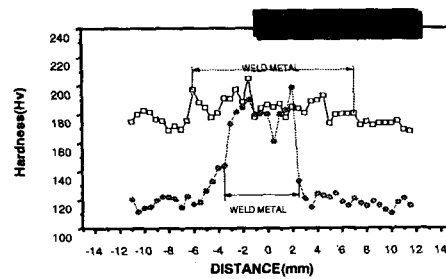


Fig. 6 Distribution of micro vicker's hardness for dissimilar welded metal

(a) WM (×200)	(b) HAZ · STS304 (×200)	(c) HAZ · SPCC (×200)	(d) BS · SPCC (×200)
(e) BOND · UP (×200)	(f) BOND · LP1 (×500)	(g) BOND · LP2 (×500)	STS304 : Stainless steel SPCC : Carbon Steel UP : Upper Plate LP : Lower Plate

Fig. 5 The microstructure of welding zone (×200, ×500)