

이종 금속의 아크 스폿 용접성 및 접합부 형상 예측에 관한 연구

김기순* · 장경복* · 강성수**

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

** 부산대학교 기계기술연구소

A Study on Weldability and Prediction of Nugget Shape in Dissimilar Metal Arc Spot Weld

Ki-Soon Kim*, Gyoung-Bok Jang* and Sung-Soo Kang**

*Dept. of Mechanical and Precision Engineering, Graduate School, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

**Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

Abstract

In this study, the lap welding between austenitic stainless steel and carbon steel was carried out using arc spot welding process and weldability of welded specimens was estimated. From the tensile-shear strength test, micro Vickers hardness test, and microstructure observation, specimen of $\phi 6.5\text{mm}$ (hole of upper plate) showed the best results in terms of tensile-shear strength and nugget shape. And there was an unmixed zone in fusion boundary between the carbon steel base metal and bulk weld metal. This zone had very thin width with the hard microstructure.

The shape of weld nugget in arc spot welding of dissimilar metal welds was predicted by searching thermal history of a weld joint through a three-dimensional finite element model. From the numerical analysis, predicted the shape of weld nugget showed good agreement with the experiment

(Received August 24, 1999)

Key Words : Dissimilar metal welds, Arc spot welding, Nugget shape, FEM(Finite element method)

1. 서 론

산업의 다양화·복합화로 인하여 구조물의 경량화, 고성능화, 경제성면의 장점 때문에 이종금속간의 접합이 많이 요구되고 있는 실정이다. 특히, 오스테나이트계 스테인리스강은 내식성이 우수하기 때문에 원자력·화학 플랜트·차량 차체 등에 널리 사용되며 탄소강, 저합금강과 이종금속 용접되는 경우가 많다. 이와 같은 이종금속 용접의 경우 용접접합부는 서로 다른 모재와 용접금속의 세 가지로 이루어지며 용접금속의 조성은 모재의 판두께, 용접방법, 용접조건, 그 밖의 다른 조건에 따라 크게 변화하고 모재의 물리적,

화학적, 기계적성질의 차이로 인해서 용접 중 혹은 용접 후에 문제가 발생할 경우가 많다^{1~4)}. 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 오고, GMAW(Gas Metal Arc Welding)의 연구에는 맞대기이음에 대한 연구^{5~7)}가 이루어져 왔으나, 박판의 아크 스폿 용접에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 각종 차량 차체의 외판에 대한 적용이 확대되고 있는 오스테나이트계 스테인리스강과 구조용 재료로 널리 사용되고 있는 저탄소강을

차체 접합법으로서 적용이 확대되고 있는 아크스폿용접을 시행하여 용접성을 평가하였다. 이를 위해, 용접부 단면 미세조직을 검토하여 접합성능을 평가하고 인장전단시험, 미소경도시험을 통하여 사용성능을 평가하였다. 또한, 이전에 발표된 바 있는 수치적 모델⁸⁾을 이중금속의 경우에 적용시켜 아크 스폿 용접부 강도에 가장 큰 영향을 미치는 접합부 너그의 직경을 예측하여 수치적 모델의 타당성을 검토하였다.

2. 용접재료 및 실험방법

2.1 용접재료

본 연구에서는 산업용 재료로 다양하게 적용되고 있는 오스테나이트계 스테인리스강(STS304, 두께 2mm)과 저탄소강(SPCC, 두께 2mm)을 사용하였다. 실험을 위한 용접시험편은 반자동 아크 용접기인 Miller사의 Millermatic 250MP를 이용하여 제작하였으며 용접 와이어는 KS D 7026에 규정되어 있는 Y309을 사용하였다. Table 1은 피용접재와 용접 와이어의 화학성분을 나타내며 Table 2는 피용접재의 물리적 성질을 나타낸다. 용접조건은 전류 155A, 전압 26V, 용접시간 2.4초로 하였으며 보호가스로는 Ar(95%)과 CO₂(5%)의 혼합가스를 사용하였다. 이 조건은 다양한 용접조건으로 여러차례 용접을 시행한 결과 외관상, 강도상 가장 적합한 용접조건이다. 그리고, 아크 스폿 용접 시험편 상판 구멍크기와 접합부 강도와의 관계를 조사하기 위하여 구멍 직경을 6, 6.5, 7mm의 세가지 종류로 하였으며 시험편의 형상과 용접공정의 모식도는 그림 1에 나타내었다. 그림에서 상판을 오스테나이트계 스테인리스강으로 한 이유는 차체 적용시 외판으로 사용되기 때문이다.

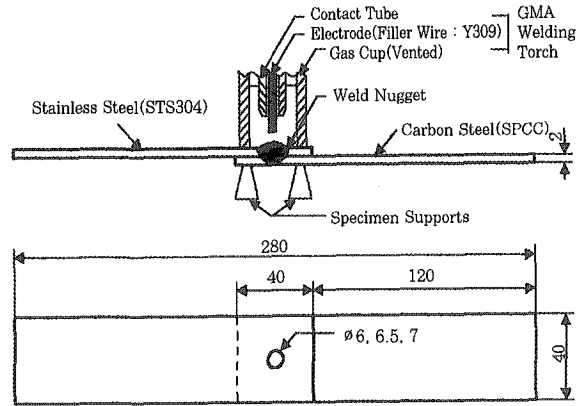


Fig. 1 Specimen configuration and welding setup for arc spot welding process

2.2 실험방법

용접부의 사용성능을 평가하기 위하여 각 시험편에 대해서 인장속도 10mm/min으로 인장전단강도시험을 하였다. 그리고, 경도 측정은 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 측정하였으며 측정 위치는 판간의 경계면에서 0.5mm떨어진 위치에서 0.5mm간격으로 측정하였다. 이때 측정하중은 1.96N으로 하였는데, 하판에 위치한 저탄소강의 용융경계부분에 나타난 불연속부는 그 나비가 매우 좁기 때문에 0.49N의 하중으로 측정하였다. 또한, 용접부의 접합성능을 평가하기 위해서 용접부 단면을 연마한 후 Aqua regia용액(hydrochloric acid 75ml, netric acid 25ml)으로 부식하여 광학현미경으로 단면 미세조직을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장전단시험의 결과

상판의 구멍 크기에 따른 인장전단강도 분포를 그림

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	0.045	-	0.5	0.05
Y309(wire)	0.12	0.65	0.03	0.03	12~14	23~25	1~2.5	

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)
STS304	1450	20.1	17.3	210	600
SPCC	1482	65	6.1	165	270

2에 나타내고 있다. 그림에서 상판의 구멍이 6mm와 7mm 경우에는 데이터의 산포가 넓어 불안정함이 나타나는 것을 볼 수 있는데, 6mm인 경우에는 용입이 불충분하여 충분한 강도를 지니지 못하는 접합부가 형성되었다고 판단되며 7mm인 경우에는 용락에 의해 발생한 후면 비드의 직경을 측정할 결과 6.0mm~6.5mm까지 나옴으로 보아 용접을 시작한 후 접합부를 완전히 형성하기 전에 많은 양의 용융침물이 하판 쪽으로 향하는 것을 유추할 수 있다. 이에 의해 판과 판 사이의 경계면에서 형성된 접합부가 불안정하여 산포가 넓어졌다고 판단된다.

따라서, 인장전단 시험결과 상판의 구멍 직경이 6.5mm인 경우가 가장 적당하다고 여겨지며 평균 16.2kN의 강도를 나타내었는데, 오스테나이트계 스테인리스강 간의 동종금속 용접부 인장전단강도⁸⁾의 약 85%정도로서 만족할 만한 강도를 지니는 것으로 판단된다.

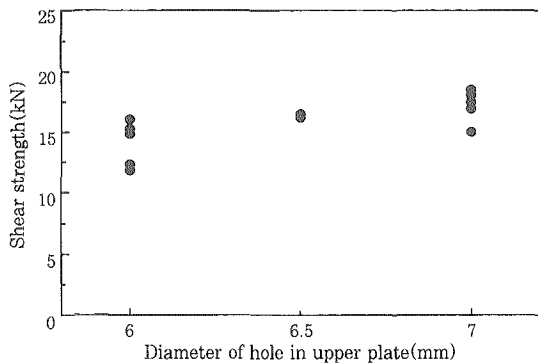


Fig. 2 Relationship between tensile-shear strength and diameter of hole in upper plate

3.2 용접부의 미세조직 관찰과 경도측정 결과

인장전단시험에서 가장 만족할 만한 강도를 지니는 상판의 직경을 6.5mm로 하여 아크 스폿 용접한 시험

편의 용접부 단면을 그림 3에 연속 촬영하여 나타내었다. 용융부와 열영향부 그리고 모재로 이어지는 조직의 변화를 관찰할 수 있으며 하판에 위치한 저탄소강의 용융경계선(fusion boundary)을 따라서 대략 0.025mm 나비의 밴드 모양을 가지는 영역이 형성된 것을 관찰할 수 있다. 각 영역의 상을 자세히 관찰하기 위해서 고배율로 확대하여 그림 4에 나타내었다.

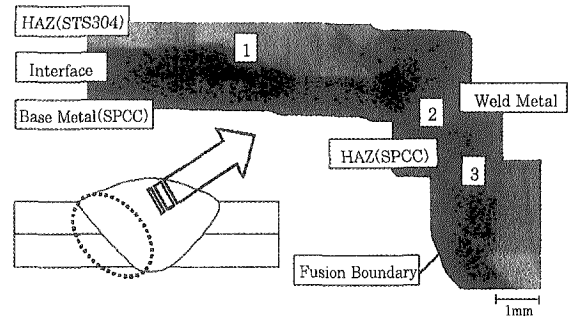


Fig. 3 Microstructure of cross-section in arc spot welded specimen; 6.5mm hole in upper plate

일반적으로 저탄소강과 오스테나이트계 스테인리스강을 용접할 때 STS309 또는 309L 용접와이어를 사용하면 용접금속에 적은 양의 델타 페라이트가 함유된다고 보고^{9~11)}되고 있는데, 그림4(a)는 오스테나이트 기지에 델타 페라이트가 미세하게 분포된 조직이라고 생각된다. 이와 같이 용접부에 발생한 델타 페라이트는 고온균열 저항성을 증가시키는 작용을 한다고 보고되고 있다.^{12),13)} 그림 4(b)에서 상판에 위치한 오스테나이트계 스테인리스강 열영향부의 결정립 조대화 영역을 확인할 수 있으며, 그림 4(c)와 (d)는 하판에 위치한 저탄소강의 열영향부와 모재를 나타낸다. 그림 4(e)~(g)에 그림 3의 상판과 하판의 용융경계선 위치한 [1]~[3]을 확대하여 나타내었다.

그림 4(e)는 상판인 오스테나이트계 스테인리스강에서의 용융경계선을 나타내는데, 아크열에 의해 용융된

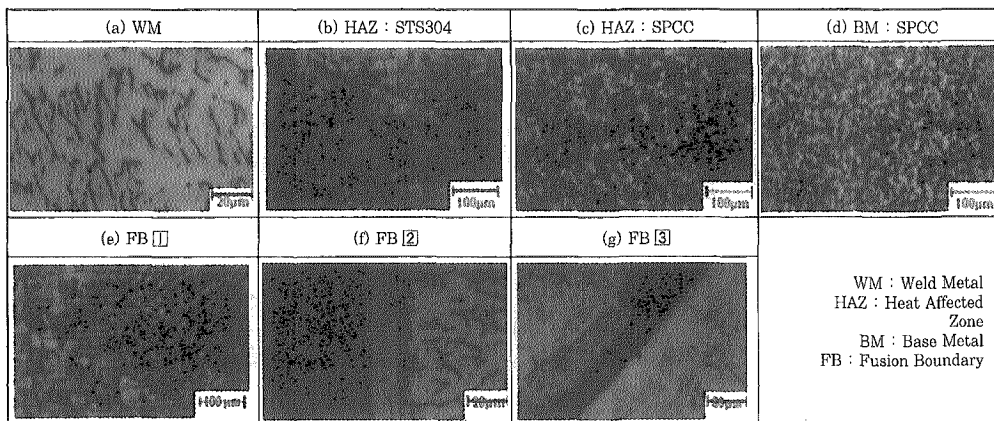


Fig. 4 Microstructure of weld zone

모재가 용접와이어와 완전히 혼합되지 않고 그대로 응고한 부분으로서 용착금속의 외측에 존재하고 있는 미혼합구역(unmixed zone)이라고 생각되며 (f)와 (g)는 하판인 저탄소강에서의 미혼합구역이라고 생각된다. 특히, 그림 4(f)는 접합부의 저탄소강 쪽에 용융경계선을 따라서 0.025mm나비의 밴드 모양을 나타내고 있는데, 이 영역의 미소경도를 측정하중 50g으로 측정 한 결과 평균 Hv283.42로서 매우 높은 경도를 나타내었다. Savage¹⁴⁾, Baeslack¹⁵⁾에 의하면 이 영역은 물리적, 화학적 성질이 다른 이종금속이 용접됨에 의해서 용융부에서 용융경계층(molten boundary layer)으로의 기계적·유체적 혼합(mechanical hydrodynamic mixing)이 충분히 발생하지 못함으로서 생성되며 용접금속과 저탄소강의 중간조성인 마르텐사이트상을 가진다고 보고되고 있다^{16),17)}. 또한 그림 4(g)는 용융경계선을 따라 발생한 결함을 나타낸다. 따라서, 저탄소강의 용융경계선은 결함을 포함한 매우 취약한 구역으로 생각되며 실차체에 적용되어 동적하중을 받는다면 이 영역이 균열 발생원으로 작용하여 응력집중이 일어나 파괴가 발생할 가능성이 크다고 판단되므로 피로시험을 통한 검증이 필요하다고 생각된다. 이러한 사실은 그림 5의 경도분포를 통해서도 알 수 있는데, 하판에서의 용접금속의 경도는 약 Hv180 이고 열영향부의 경도는 약 Hv140으로서 기계적 성질의 급격한 차이를 나타내고 있다.

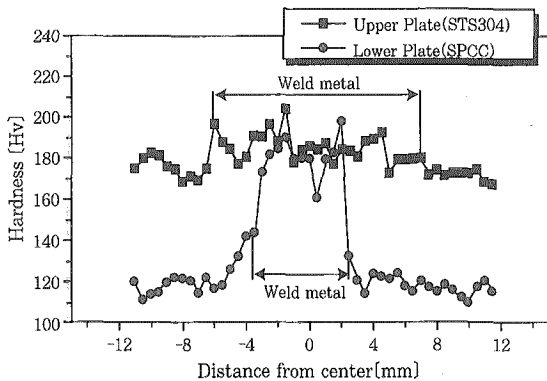


Fig. 5 Distribution of micro-vickers hardness for dissimilar weld metal

4. 유한요소해석 및 결과

4.1 유한요소해석

본 연구에서는 기 연구⁸⁾된 오스테나이트계 스테인리스강에 대한 아크 스폿 용접 공정의 3차원 모델을 이종금속에 적용하였을 때의 수치적 모델의 정확성을 검토하였다. 유한요소 해석은 상용 코드인 Marc를 이용

하였으며 열전달해석을 수행하여 용접부에서의 정확한 온도 사이클을 획득하여 오스테나이트계 스테인리스강과 저탄소강의 고상선 온도를 넘어서는 절점을 구하고 이 부분이 용접금속을 형성하는 것으로 간주하여 접합부의 형상을 예측하였다. 유한요소해석을 위한 입열량(Q)은 3차원 해석이므로 체적입열(volume flux)을 적용하여 계산하였다.

열전달 해석에서 복사율(ϵ)과 자연대류계수(h)는 실질적으로 열해석에 있어서 큰 영향을 미치지 못하므로 일정한 값으로 입력하였으며 재료의 열적 물성치인 비열, 열전도도는 열해석에 상당히 큰 영향을 미치므로 해석의 정확성을 위해 온도의 함수로서 입력하였다. 그림 6은 이처럼 온도의 함수로 입력된 비열과 열전도도와 재료의 열적 성질을 나타내었으며^{18),19)}, 고상과 액상의 상변화에 의한 상변태의 효과는 재료의 액상과 고상온도 사이에서 잠열의 형태로 구현하였다.

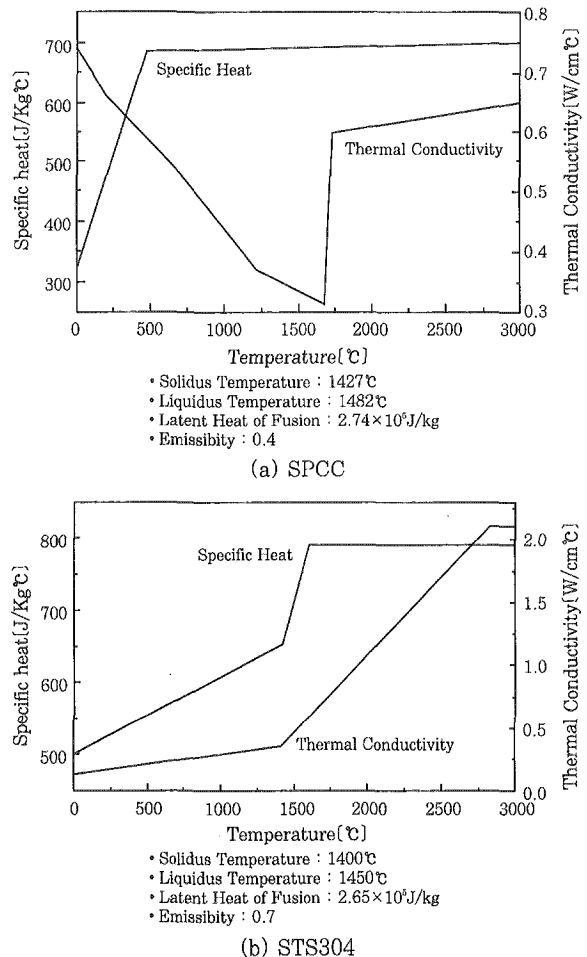


Fig. 6 Thermal properties of base metal

해석을 위한 경계조건으로는 우선 초기에 주어지는 모든 절점에서의 온도를 대기 온도인 20℃로 하였으며 입열 후의 열손실은 주로 자연대류와 복사에 의해 이

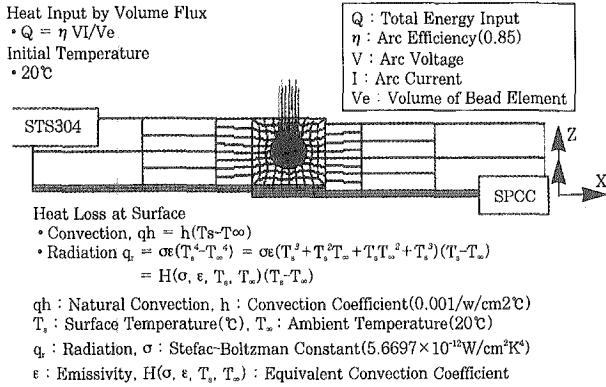
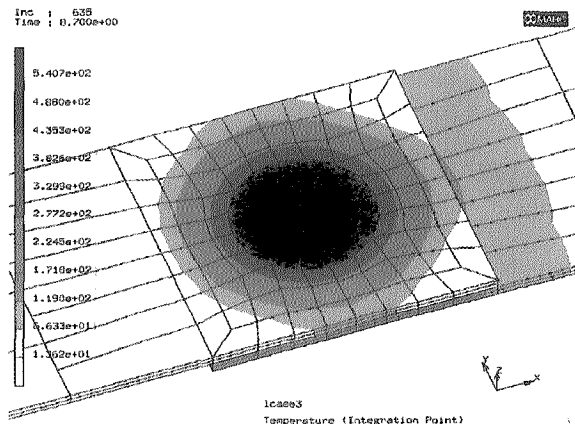


Fig. 7 Boundary condition and heat input for heat transfer analysis

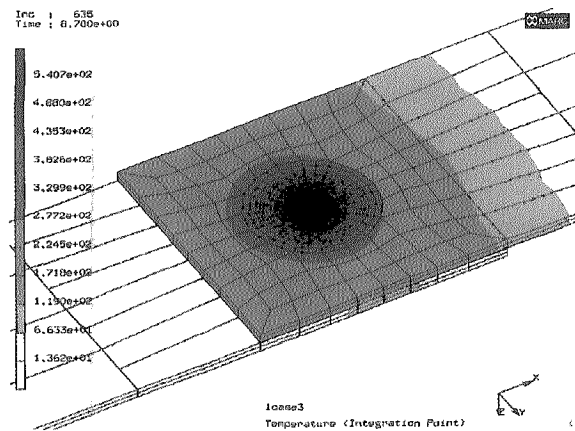
루어지는 것으로 간주하였다. 열전달해석을 위한 입열 조건과 경계조건을 그림 7에 나타내었다.

4.2 유한요소해석 결과

그림 8의 (a)와 (b)는 상판구멍을 6.5mm로 하여 용접을 하고 8.7초 지난 후의 상판과 하판의 온도분포를



(a) Upper plate



(b) Lower plate

Fig. 8 Temperature distribution on upper plate and lower plate after welding

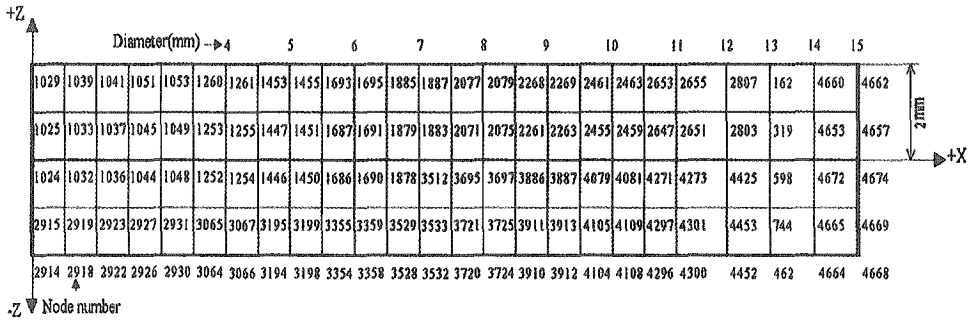
나타내고 있다. 그림에서 하판에 위치한 저탄소강과 상판에 위치한 오스테나이트계 스테인리스강의 열전도도의 차이에 의해서 하판이 상판보다 더 빠르게 온도가 퍼져나가는 것을 관찰할 수 있다.

그림 9의 (a)는 접합부 단면의 절점번호, (b)는 오스테나이트계 스테인리스강의 고상온도인 1400°C와 저탄소강의 고상온도인 1427°C를 넘어서거나 이에 가까운 온도까지 도달하는 절점의 온도사이클을 나타낸 것이다. 그리고 (c)는 실험에 의해 측정된 접합부 단면의 형상과 (b)의 계산에 의한 예측되어진 접합부의 단면의 형상을 나타내는데 거의 7mm에 가까운 너깃경이 형성됨을 알 수 있으며 실험치와 계산치가 좋은 일치성을 보여주고 있다. 그리고, 이 결과를 오스테나이트계 스테인리스강 간의 동종재료일 경우⁸⁾와 비교하면 너깃경이 약 0.5mm정도 작은데, 이것은 저탄소강의 열전도도가 오스테나이트계 스테인리스강의 열전도도보다 약 3배정도 커서 열이 더 빠르게 전도되기 때문이라고 생각된다.

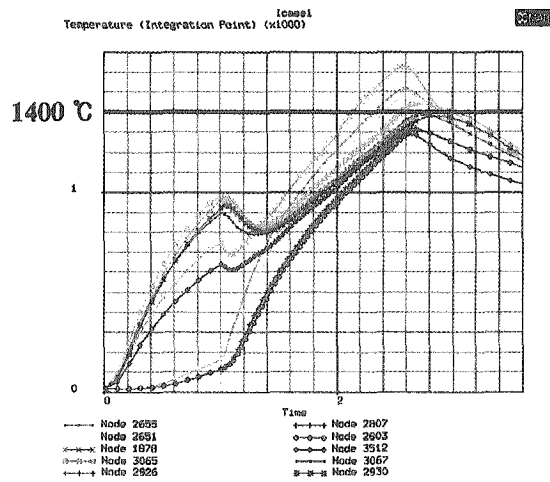
5. 결 론

오스테나이트계 스테인리스강과 저탄소강 간의 이종 금속 아크 스폿 용접성을 평가하고 접합부 형상을 예측하기 위해 실험과 유한요소해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

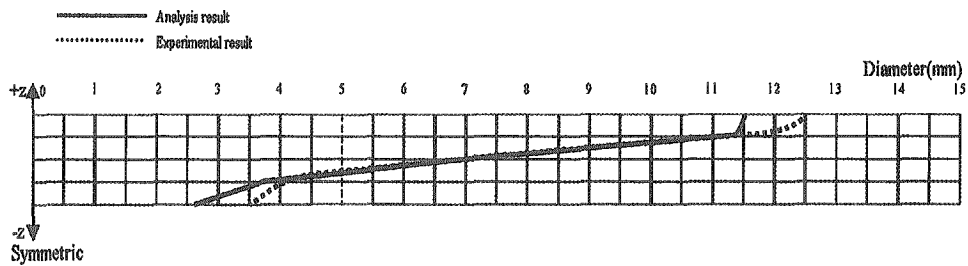
1. 인장전단강도는 상판구멍의 직경이 6mm와 7mm인 경우에 불안정함이 나타나는 것을 볼 수 있는데, 6mm인 경우에는 용입 불충분에 기인한 것으로 판단되며 7mm인 경우에는 용접시작 후 접합부가 완전히 형성되기 전에 많은 양의 용융침물이 하판쪽으로 향함에 의해 안정한 접합부를 형성하지 못했다고 판단된다. 따라서, 상판의 구멍 직경이 6.5mm인 경우가 가장 적당하다고 여겨지며 평균 16.2kN의 강도를 나타내었는데, 이것은 오스테나이트계 스테인리스강 간의 동종금속 용접부 인장전단강도의 약 85%정도로서 만족할 만한 강도를 지니는 것으로 판단된다.
2. 용접부의 미세조직 관찰에서 하판의 용융경계선의 저탄소강쪽에 불연속적이며 고경도(Hv283.42)를 지니는 0.025mm나비의 밴드 모양이 나타났는데, 결합을 포함한 매우 취약한 부분으로서 실차체 적용시 동적하중에 의한 균열발생원으로 작용할 가능성이 크다고 판단되며 피로시험을 통한 검증이 필요하다고 생각된다. 그리고 이 사실은 용접금속과 하판에 위치한 저탄소강의 경도분포의 급격한 차이를 통해서도 알 수 있다.



(a) Node number



(b) Thermal cycle



(c) Nugget shape

Fig. 9 Node number, thermal cycle, and nugget shape for dissimilar metal

3. 이종금속에 대한 유한요소해석을 수행한 결과 실험치와 거의 일치하는 접합부 형상을 예측할 수 있었으며, 기 발표된 "아크 스폿 용접의 접합부 형상 예측을 위한 수치적 모델"에 대한 타당성을 검증할 수 있었다.

참고 문헌

1. 吉田享 : "現場溶接技術のノウハウ", 日刊工業新聞社(1978), pp. 27-29
2. 渡 正紀, 向正喜 : "ステンレス鋼の溶接", 日刊工業新聞社(1981), pp. 145-161
3. 박화순, 김우열, 강성윤 : "강/비철금속 이종금속 간의 용접 및

- 접합", 대한용접학회지, 제14권, 제6호(1996), pp. 1-7
4. E.J.Barnhouse, J.C.Lippold : " Microstructure/Property Relationships in Dissimilar Welds between Duplex Stainless Steels and Carbon Steels", Welding Journal, December(1998), pp. 477-487
5. Thomas Doody : "Intermediate Mixed Zone in Dissimilar Metal Welds for Sour Service", Welding Journal, April(1992), pp. 55-60
6. A.A.Omar : "Effect of Welding Parameters on Hard Zone Formation at Dissimilar Metal Welds", Welding Journal, February(1998), pp86-93
7. Bahaa Zahloul : "Study on Residual Stresses of Dissimilar Welding Joints", Journal of Japan Welding

- Society, Vol. 12, No. 4(1994), pp. 459-467
8. 황종근, 장경복, 김기순, 강성수 : "유한요소 모델링을 이용한 아크 스폿 용접의 너깃 형상 예측", 대한용접학회지, 제17권, 제2호(1999), pp. 84-90
 9. American Welding Society : "Welding Metallurgy", 7th ed., Vol. 4, Chapter 12, pp. 527-528
 10. E.Folkhard : "Welding Metallurgy of Stainless Steels" (1988), pp. 231-235
 11. H.Thielsch : "Stainless-Steel weld deposits on mild and alloy steels", Welding Journal, January(1952), pp. 37-64
 12. T.Takalo, N.Suutala, T.Moisio : "Ferritic-Austenitic Solidification mode in austenitic stainless steel welds", Met. Trans. Vol. 11A, May(1980), pp. 717-725
 13. 이종섭, 김숙환 : "오스테나이트계 스테인리스강 용접부의 금속학적 현상에 관한 연구(I)", 대한용접학회지, 제16권, 제3호(1998), pp. 111-120
 14. W.F.Savage, E.F.Nippes, E.S.Szekeres : "A Study of Weld Interface Phenomena in a Low Alloy Steel", Welding Journal, September(1976), pp. 260-268
 15. W.A.Baerlack, III, J.C.Lippold, W.F.Savage : "Unmixed Zone Foemation in Austenitic Stainless Steel Weldments", Welding Journal, June(1979), pp. 168-176
 16. F.Ornath : "Weld pool segregation during the welding of low alloy steels with austenitic electrodes", Welding Journal, November(1981), pp. 227-230
 17. R.L.Klueh, J.F.King : "Austenitic stainless steel-ferritic steel weld joint failures", Welding Journal, September(1981), pp. 302-311
 18. 이정익, 박일철, 박기영, 엄기원 : "유한요소법을 이용한 CO₂ 아아크 용접부의 용입깊이와 열영향부 크기 예측", 대한용접학회지, 제10권, 제4호(1992), pp. 222-229
 19. T.zacharia, S.A.David, J.M.Vitek, H.G.Kraus : "Surface Temperature Distribution of GTA Weld Pools on Thin-Plate 304 Stainless Steel, Welding Journal, November(1995), pp. 353-361