

아연도금강판의 CO₂ 용접특성(3) - 용접결합의 발생에 미치는 시공조건의 영향 -

이종봉* · 안영호* · 박화순**

* 포항제철 기술연구소

** 부경대학교 재료공학과

CO₂ Weldability of Zn Coated Steel Sheet(3) - Effect of Process Condition on the Generation of Weld Defects -

Jong-Bong Lee*, Young-Ho An* and Hwa-Soon Park**

* Technical Research Lab., Pohang Iron & Steel Co., Ltd., Pohang 790-785, Korea

** Dept. of Materials Science Engineering, Pukyong University, Pusan 608-739, Korea

Abstract

Formation of the weld defect, such as a blowhole and a pit in lap-jointed fillet arc welds has been a serious problem in arc welding of Zn-coated steel sheet. In this study, the relationship among welding conditions, welding materials and defect formation was investigated in order to minimize these defects in the CO₂ welds. In addition, the arc stability of the commercial welding wires was evaluated for revealing their effects on defect formation.

Main conclusions obtained are as follows :

1) There was no difference between shear tensile strength of the sound welds and that of the welds with blowholes whose diameters are less than 0.5mm. However, the welds with blowholes whose diameters are equal or larger than 0.5mm and pits exhibited tensile strength 10~20% and 30~40% lower than that of the sound welds respectively.

2) The optimum welding condition to effectively prevent or reduce the weld defects formation are as follows:

- The welding variables of 220A-23V-100cm/min and 120A-19V-30cm/min were recommended for minimizing the weld defects.

- The gap between the two sheets at the lap-joint should be controlled to more than 0.2mm

- Solid wire was less susceptible to the formation of the weld defects than the flux-cored wire.

- The low welding current condition produced less weld defects than the high welding current condition.

3) One of the reason why the amount of the defect was reduced at the low welding current was the gas discharging by the active agitation of the molten pool, due to an increasing in the number of the short circuit.

(Received September 27, 1999)

Key Words : Zn coated steel sheet, CO₂ welding, Lap-joint fillet welding, Welding condition, Weld defect, Blowhole, Pit, Arc stability

1. 머리말

아연도금강판의 아크 용접부에서 발생하는 용접결함을 근본적으로 방지하기 위해서는 결합의 형성기구를 파악하는 것이 매우 중요하다. 이러한 관점에서 이미 다수의 연구가 수행되었고¹⁻⁵⁾, 본 저자도 도금량이 비교적 적은 전기아연도금강판을 CO₂ 용접법으로 겹치기 필릿용접하는 경우, 겹침부에 존재하는 아연이 용접 열에 의해 증기화됨으로써 blowhole 및 pit를 생성시키고, 이들 결합의 성장은 가스압과 용융금속의 온도와 상관성이 있으며, 그 형성과정에서 용융금속의 재충진현상을 동반함을 확인하였다^{6,7)}. 이러한 기본적인 연구 외에도 종래부터 아연도금강판의 용접시공조건에 대한 검토⁸⁻¹²⁾, 전용 용접재료¹³⁻¹⁵⁾ 및 도포제의 개발^{16,17)} 등 다방면에 걸친 다수의 연구가 수행되어 결합발생의 최소화를 도모하고 있지만 아직 용접현장에서의 결합발생 문제가 완전히 해결된 것은 아니다. 특히 용접현장에서는 생산성을 향상시키기 위하여 용접전류 및 용접속도를 점차 높이려는 경향이 있기 때문에 이들 결합의 발생 가능성은 더욱 증가할 수 있다.

따라서 본 연구는 용접결합의 발생을 최소화시키기 위하여, 이들 용접결합이 품질에 미치는 영향을 조사하고, 용접조건 및 용접재료 등 실제 시공조건과 용접결합 발생의 상관성에 대하여 검토하고자 하였다.

2. 시험재 및 실험방법

2.1 시험재

시험에는 전보⁶⁾에서와 같이 SECC에 상당하는 전기도금한 두께 1.6mm의 아연도금강판을 사용하였으며, 이 시험재의 아연도금량은 20/20g/m² 정도이다.

한편 사용한 용접재료는 KS D7025 YGW11에 상당하는 직경 1.2mm인 네 종류의 시판재료로서, CO₂ 용접용 solid wire(SN-KH, SS-JK) 및 flux-cored wire(FN-KA, FS-KA)를 각각 두 종류씩 선정하여 그 특성을 상호 비교하였다. 각 재료별로 선정한 두 종류는 통상재(SN-KH, FN-KA)와 아연도금강판용으로 특별히 생산된 제품(SS-JK, FS-KA)으로 구분하였으며, 이들 용접재료의 용착금속에 대한 화학조성 및 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다.

2.2 실험방법

2.2.1 용접시험 및 결합의 정량화

용접시험에서 사용한 시험편의 형상 및 용접과정은 전보와 동일하게 하였다. 용접은 용접전류, 용접속도, 두 시험편의 겹침부 gap 및 용접재료 등을 변화시켰다. 시험용접을 완료한 시험편에 대해서는 상부로부터 X-ray를 사용하여 용접부의 결합발생 정도를 검사하였다. X-ray 검사를 위한 개략적인 구성도와 조건을 Fig.1에 나타내었다. 이러한 검사결과로부터 확인된 용접부의 blowhole은 0.5mm 크기를 기준으로 하여 그 이상 및 이하의 결합수로 구분하여 정량화 하였다. 이 때 용접개시부 및 용접 크레이터부는 결합이 비정상적으로 발생할 수 있기 때문에, 시험편의 좌우 15mm 범위는 측정범위에서 제외시켰으며, 중앙부 270mm의 용접길이에서 발생하는 결합수만을 측정하여 상호 비교하였다.

2.2.2 용접부 인장시험

용접부에 발생한 결합이 용접품질에 미치는 영향을 조사하기 위하여 전단인장시험을 실시하였다. 시험편의 형상은 규격에 구애받지 않고 겹치기 필릿용접한 상태에서 120Lx20W의 크기로 가공하였다. 결합부의 선정은 편의상 결합의 종류와 크기만을 고려하였으며,

Table 1 Chemical composition and mechanical property of deposited metals used (1.2mm ϕ)

Welding wire	Chemical composition(wt.%)					Tensile property			vE J(°C)	Remarks
	C	Si	Mn	P	S	YP (MPa)	TS (MPa)	El (%)		
SN-KH*	0.09	0.52	1.07	0.015	0.009	450	560	30	140(-29)	SM-70G
SS-JK*	0.08	0.28	1.31	0.009	0.011	430	540	31	110(0)	MG-1Z
FN-KA**	0.04	0.61	1.27	0.015	0.010	520	520	29	64(-20)	DS7100 (FCW)
FS-KA**	0.05	0.75	1.56	0.014	0.011	540	600	27	49(-20)	CW111RB (FCW)

*:Solid wire, **:Flux cored wire

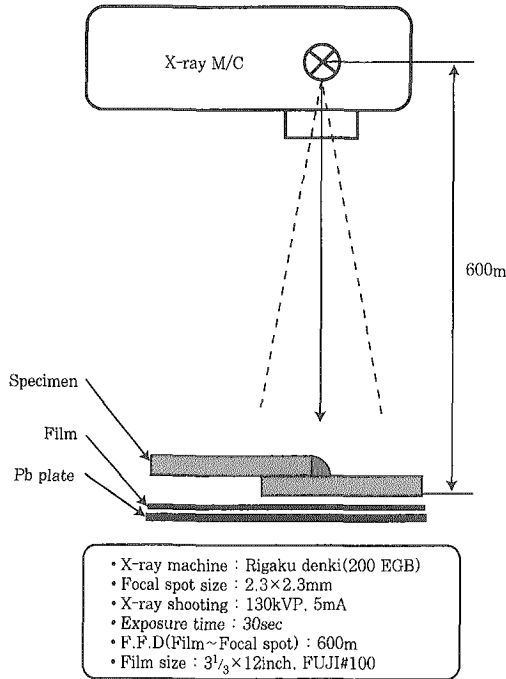


Fig.1 Schematic illustration for the investigation of weld defects by X-ray

정확한 결합수의 영향은 무시하였다. 즉 결합의 종류는 blowhole과 pit로 구분하고, blowhole은 0.5mm 크기를 기준하여 그 이상 및 이하로 구분하였다. 그러나 결합수의 경우에도, 시험편에 따라 결합의 크기별로 결합수가 동일하게 분포되도록 할 수는 없었지만, X-ray 검사결과를 근거로 하여 가능한 한 크기가 비슷한 결합들의 수가 비교적 균일하게 존재하는 부위가 선정될 수 있도록 배려하였다. 이러한 결합부의 시험결과와 비교하기 위하여 결합이 없는 건전부에 대해서도 동일한 방법으로 시험을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접결합이 인장특성에 미치는 영향

Fig.2는 결합의 종류 및 크기에 따른 전단인장시험에 의한 파단강도의 변화를 나타낸 것으로, 0.5mm 이하의 비교적 작은 blowhole이 존재하는 부위의 파단강도는 결합이 없는 건전부와 비슷함을 알 수 있다. 그러나 크기가 0.5mm 이상인 blowhole이 존재하는 부위의 파단강도는 건전부에 비해 10~20%, 또 pit가 존재하는 부위는 30~40% 정도 감소하고 있다. 또한 시험편의 파단위치를 조사한 결과, 0.5mm 이하의 blowhole이 존재한 시험편은 모재에서 파단되었지만, 그 외에는 용접부에서 파단됨을 확인할 수 있었다. 따라서 용접부에 0.5mm 이상으로 큰 blowhole 또는

pit가 잔존하면 파단강도가 크게 저하하여 용접품질에 나쁜 영향을 미칠 수 있다고 판단됨으로써, 이하에서 기술하는 결과에서는 편의상 주로 0.5mm 이상의 blowhole에 한정하여 정리하였다.

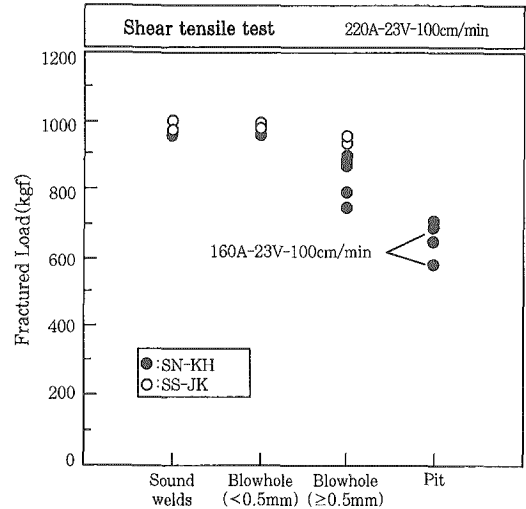


Fig. 2 Change of fractured load with weld defects and its size

한편 아연도금강판을 대상으로 피로시험한 결과⁴⁾에 의하면, 150mm 길이의 용접부에 기공이 열 개 정도 존재하면 피로강도가 10~25% 정도 저하하며, 이들 기공은 피로균열의 발생보다는 전파에 영향을 미치는 것으로 보고되었다. 따라서 파단강도에는 별다른 영향을 미치지 않는 0.5mm 이하로 작은 blowhole도 장시간에 걸쳐 반복하중이 연속적으로 부가되는 피로환경에서는 용접부의 특성을 저하시키는 요인이 될 수도 있을 것으로 생각된다.

3.2 용접조건과 결합과의 상관성

3.2.1 용접전류의 영향

Photo.1은 용접 생산성을 향상시키기 위하여 용접속도를 비교적 빠른 100cm/min로 일정하게 유지시킨 상태에서 용접전류를 고전류 범위인 160~260A로 변화시킨 용접부의 X-ray 검사결과를 나타낸 것이다. 이 결과로부터 모든 조건에서 다수의 결합이 발생되고 있으며, 이들 결합의 발생위치 및 크기가 일정하지 않음을 알 수 있다. 또한 비드외관이 비교적 양호했던 220A 이상의 용접전류 범위 중 260A인 경우에는 비교적 큰 blowhole이 잔존함을 볼 수 있다.

이와 같은 X-ray 검사결과에 근거하여, 각 용접부에 잔존하는 크기 0.5mm 이상의 결합수를 용접전류에 따라 정리한 결과를 Fig.3에 나타내었다. 발생된 결합수는 220A의 조건에서 약 50개 정도로 가장 적으며,

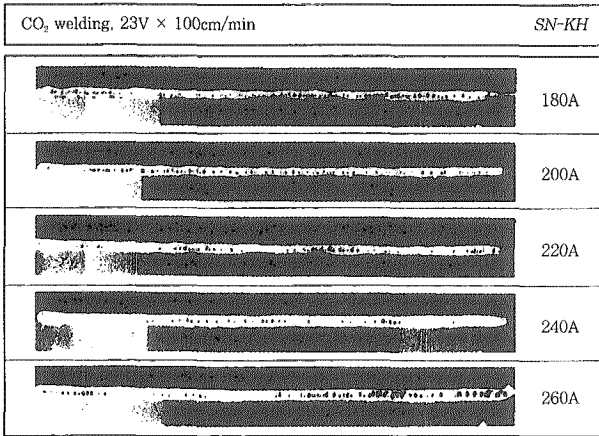


Photo.1 Comparison of weld defects in bead with welding current (23V-100cm/min)

그 이상 및 이하의 전류범위에서는 결함수가 다소 증가하는 경향을 나타내었다. 특히 180A의 저전류 조건에서는 pit가 발생되었고, 260A의 고전류 조건에서는 비교적 큰 크기의 blowhole이 관찰되었다. 그러나 240A의 조건도 비교적 양호한 것으로 판단하였기 때문에 이 부분에 대해서도 용접속도 범위를 확대하여 추가로 조사하였다.

한편 용접전류가 비교적 낮고 느린 용접속도를 적용하면 발생 결함수가 현저히 저하하였으나, 이 결과에 대해서는 후에 기술한다.

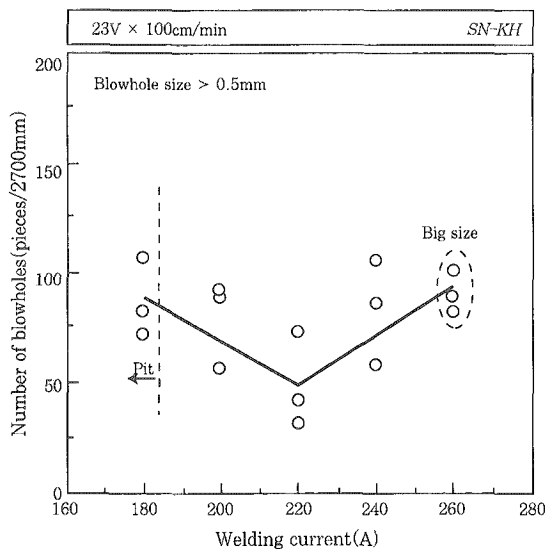


Fig. 3 Effect of welding current on the generation of over 0.5mm blowholes in size under the constant welding speed as 100cm/min

3.2.2 용접속도의 영향

앞에서 확인한 바와 같이, 고전류 조건에서 적절하다고 생각되는 220 및 240A의 일정한 전류 하에서 용접속도 범위를 80~120cm/min로 변화시킨 경우,

용접부에 발생한 0.5mm보다 큰 결함수를 정량화한 결과를 Fig.4에 나타내었다. 먼저 220A의 경우, 용접속도가 100 및 110cm/min인 조건에서는 크기가 0.5mm 이상인 결함수가 50개 정도로서, 이들 값보다 다소 느리거나 빠른 조건에 비해 적게 발생됨을 알 수 있다. 한편 240A의 경우에는 용접속도가 110cm/min 이상으로 증가하면 결함수가 약간 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다. 그러나 이 범위에서는 크기가 작은 결함수가 다소 증가하는 것이 확인됨으로써, 이 범위에서 결함수가 감소한 것은 결함의 크기가 상대적으로 커진 때문이라고 생각된다. 따라서 이러한 결과로부터, 약간의 데이터 편차는 인정되지만 고전류 범위에서 용접부의 결함을 최소화시키기 위한 최적의 조건은 220A-100cm/min임을 알 수 있었다.

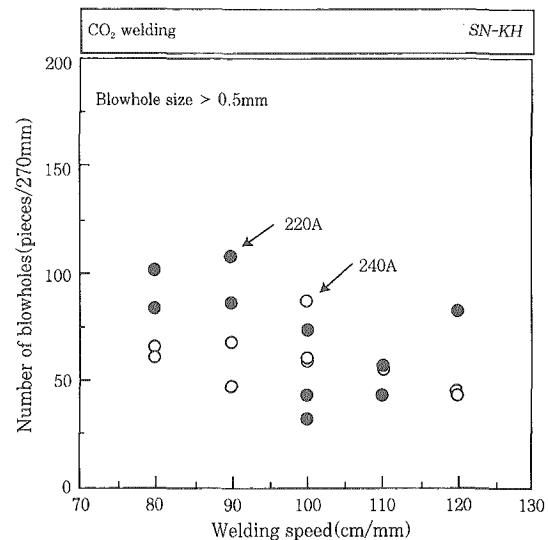


Fig. 4 Comparison of the generation of over 0.5mm blowholes in size with welding speed under the 220A and 240A

한편 비교를 위해 용접전류를 120A로 낮게 유지한 상태에서 용접속도 범위를 30~60cm/min로 변화시켜 비드외관 및 용접부의 결함발생 정도를 조사하였다. Photo.2의 X-ray 검사결과에 의하면, 용접속도가 30cm/min인 경우에는 비드 중앙부 근처에 다소 큰 결함이 소수 존재할 뿐 다른 부위에는 결함이 거의 잔존하지 않지만, 용접속도가 60cm/min로 증가하면 결함이 비교적 많이 잔존하게 됨을 알 수 있다. Fig.5는 이러한 결과에 근거하여 용접속도에 따른 각 용접부의 결함수를 정량적으로 나타낸 것이다. 발생한 결함수는 용접속도가 30cm/min 정도로 느린 경우에 최소값을 보이고, 용접속도가 증가함에 따라 점차 많아지는 경향을 나타내고 있다. 특히 이러한 저전류 적정

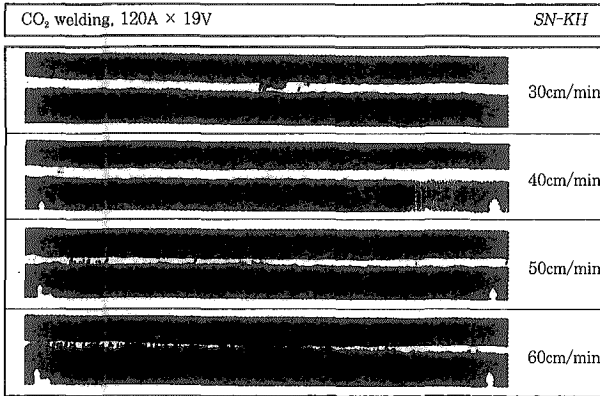


Photo. 2 Comparison of weld defects in bead with welding speed (120A-19V)

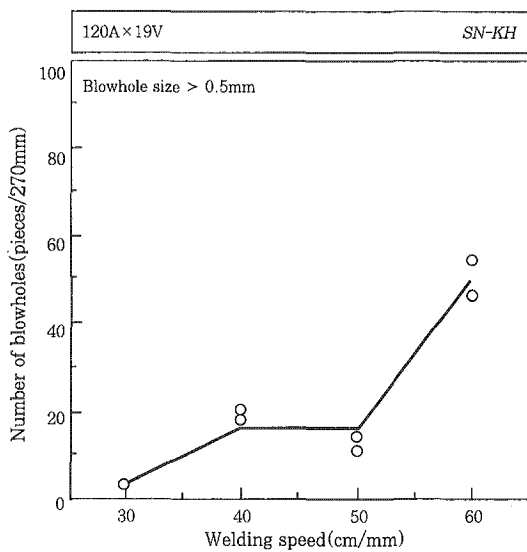


Fig. 5 Effect of welding speed on the generation of over 0.5mm blowholes in size under the constant welding current as 120A

조건에서의 결과는 앞에서 기술한 바 있는 220A 및 240A의 고전류 적정조건에서의 결과에 비해 결함수가 현저하게 감소함을 알 수 있다.

이와 같이 저전류 조건이 고전류 조건을 적용한 경우에 비해 결함수가 현저하게 감소하는 것은, 후에 기술하겠지만 저전류 최적조건에서는 단락횟수가 크게 증가하여 용융지 내의 교반이 활발히 이루어짐으로써 용융지로부터 아연증기가 쉽게 부상, 방출되기 때문인 것으로 생각된다.

3.2.3 겹침부 gap 크기의 영향

통상 두 판의 겹침부 gap을 크게 하면 용융지로 한 정되던 아연증기의 이동장소가 gap의 후방으로 분산되는 역할을 함으로써 결함이 저감된다고 보고하고 있다. 그러나 아직 재료에 따라 결함의 저감에 효과적인 한계 gap에 대해서는 그 결과가 다소 상이하다^{8,10,11,18)}. 따라서 본 연구에서는 겹침부의 gap을 0.2mm 간격

으로 1.0mm까지 변화시켜 gap의 크기와 결함발생과의 상관성을 조사하였다. 이 때의 용접조건은 고전류 적정조건인 220A-23V-100cm/min를 적용하였다.

Fig.6은 gap의 크기에 따른 발생 결함수를 정량적으로 나타낸 것으로, 결함수는 그 크기에 관계없이 겹침부의 gap이 0.2mm 이상이 되면 감소하여, gap이 1.0mm 정도까지 증가하여도 감소 정도는 거의 변화없이 일정한 경향을 나타내고 있다. 따라서 결함의 저감에 유효한 한계 gap의 크기는 약 0.2mm인 것으로 판단되며, 특히 이러한 한계 gap 이상에서는 크기가 0.5mm보다 작은 결함들의 감소효과가 현저함을 알 수 있다.

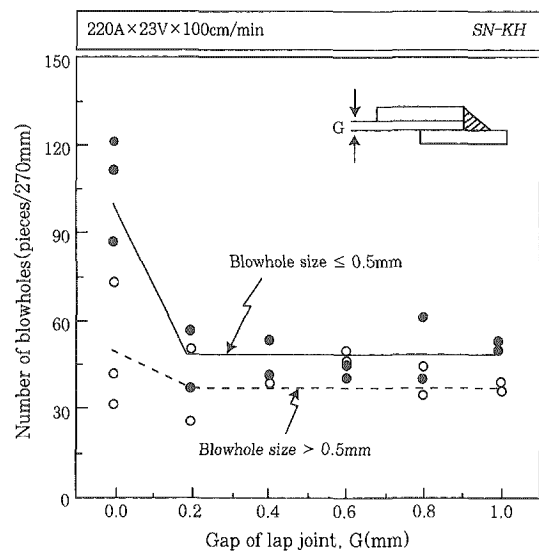


Fig. 6 Effect of gap between sheets on the generation of blowholes under the welding condition of 220A-23V-100cm/min

이와 같이 gap의 크기가 증가함에 따라 결함수가 감소하는 것은, 이미 알려진 바와 같이 겹침부 기점으로 부터 발생하는 가스가 분산됨에 따라 용융지 내부로 침투하여 blowhole의 형성에 필요한 가스량 및 가스압이 저하하기 때문이라고 생각된다. 그러나 강재에 따라 도금량이 많은 경우에는 이러한 한계 gap도 다소 증가할 것이며, 실제 용접시공에서 이와 같이 gap을 설정한다는 것은 작업 효율성을 저하시킬 것으로 생각된다.

3.2.4 용접재료의 영향

현재 국내외에서는 다수의 아연도금강판용 용접재료가 시판되고 있다. 그 중에는 일반 냉연강판용과 동일한 것도 있지만, 회사에 따라서는 용접부의 결함발생을 최소화시키기 위해 특별히 개발된 제품도 있다¹³⁻¹⁵⁾. 본 연구에서는 이들 시판 용접재료 중 몇 종류에 대하여 앞에서 구한 고전류 및 저전류 적정조건에서의 결

합발생 정도를 상호 비교하였다.

Fig.7은 용접부에 발생한 0.5mm 이상의 결함수를 용접재료 및 용접조건에 따라 정량적으로 나타낸 것이다. 먼저 고전류 적정조건인 220A-23V-100cm/min로 시험용접한 경우, 다소의 편차는 있지만 solid wire가 FCW보다 결함 발생률이 비교적 낮으며, 특히 아연도금강판 전용의 solid wire인 SS-JK의 결함발생이 가장 적음을 알 수 있다.

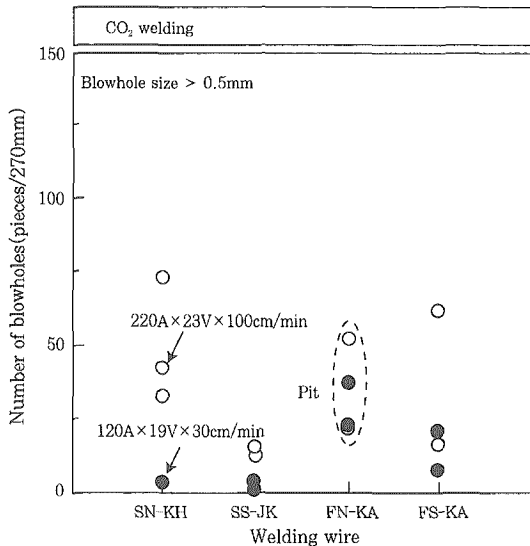


Fig. 7 Comparison of the generation of over 0.5mm blowholes in size with welding wire and welding conditions

한편 저전류 적정조건인 120A-19V-30cm/min로 시험용접한 경우에도 용접재료에 따른 결함발생은 고전류 조건과 거의 유사한 경향을 나타내지만, 모든 용접재료가 고전류 조건에 비해 결함 발생수가 적으며, solid wire인 경우에는 두 재료간의 차이가 거의 없음을 볼 수 있다. 그러나 FCW의 경우에는 두 용접조건 모두에서 약간의 pit가 발생됨을 볼 수 있었다.

이상과 같이 용접재료에 따라 결함 발생정도가 상이한 것은 재료 및 조건 등에서 많은 요인들이 복합적으로 작용하고 있기 때문에 단정하기는 곤란하다. 그러나 solid wire의 경우 Si과 같은 합금성분의 변화에 따른 표면장력의 차이가 영향을 미친 것으로 생각된다. 또한 FCW에서는 적정조건 및 용적이행 현상 등이 solid wire와 다소 상이하고, 아크 안정성 등도 일부 영향을 미친 것으로 생각된다.

3.3 용접조건에 따른 결함발생률의 변화에 대한 검토

앞에서 기술한 바와 같이, 용접부의 결함발생 특성은 용접조건, 특히 용접전류 및 용접속도에 따라 크게 상

이함을 알 수 있었다. 통상 용접부의 결함발생은 아크의 안정성과 상관성이 있기 때문에 이러한 원인을 아크 안정성의 관점에서 검토하였다. 아크 안정성은 아크현상 분석 시스템(Arc Phenomena Analysis 1.0)^{19,20}을 사용하여 용적이행 현상을 이루는 단락현상, 아크현상 등을 비교함으로써 각 조건에 대한 상대적인 평가를 실시하였다.

GMA용접의 경우 단락이행 영역에서의 아크 안정성은 통상 아킹시간, 단락시간, 용적이행의 주기성, 재아크시의 아크특성 및 아킹신호의 변동정도 등으로 평가할 수 있지만, 본 연구에서는 편의상 아킹시간의 조사에 의한 단락주기 및 단락횟수를 비교하고, 아킹전류의 표준편차로 나타낼 수 있는 아킹특성의 관점에서 검토하였다.

Fig.8 및 Fig.9는 각각 SN-KH 및 SS-JK 와이어를 사용하여 고전류와 저전류 최적조건에서 용접한 경우, 용접시간에 따른 아크전압의 변화를 나타낸 것이다. 먼저 이들 결과로부터 시험한 용접조건 범위에서는 이행모드가 단락이행 형태임을 확인할 수 있다. 또한 500ms의 단위시간 내에서의 단락주기를 비교하면, 두 용접재료 모두 저전류 조건에서의 단락주기가 고전류 조건에 비교하여 현저하게 증가하고 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 전류의 증가에 따라 아크에 의한 반발력이 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

한편 이러한 결과로부터 각 용접재료별로 고전류 및 저전류 조건에서 1초당 평균 단락횟수를 정량적으로 조사한 결과, SN-KH가 44 및 96회, SS-JK가 50 및

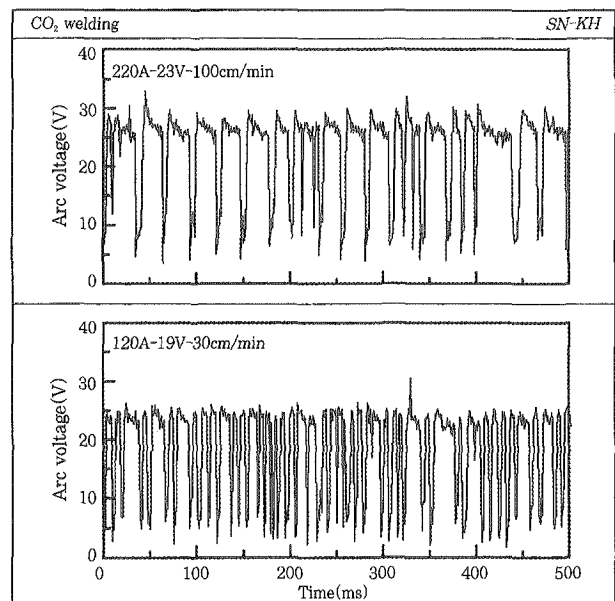


Fig. 8 Comparison of the arcing characteristics with welding condition using the SN-KH wire

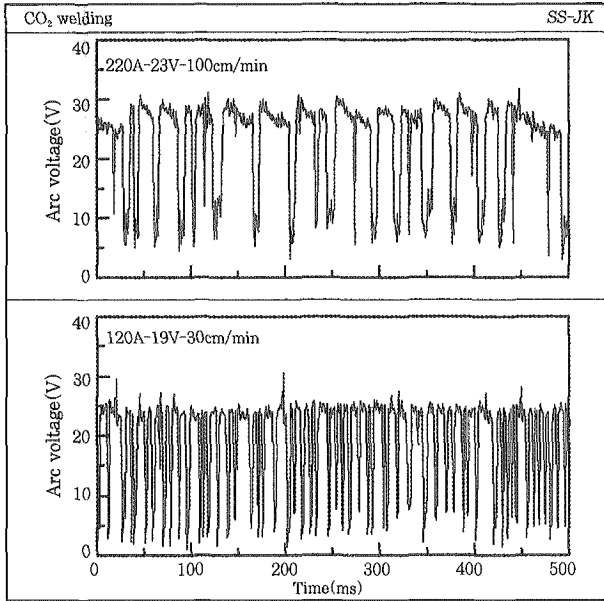


Fig. 9 Comparison of the arcing characteristics with welding condition using the SS-JK wire

116회 정도임을 확인할 수 있었다. 즉 두 재료 모두 저전류 조건에서는 고전류 조건에 비해 단락횟수가 2배 이상으로 증가하였다. 또한 동일한 용접조건 범위에서 재료별로 비교하면, 두 용접조건 모두 SS-JK가 SN-KH에 비해 단락횟수가 증가함을 알 수 있다. 이러한 용접재료에 따른 차이는 Si 함량의 저감에 따른 표면장력의 감소가 일부 영향을 미친 것으로 생각된다.

이상과 같은 용접조건 및 용접재료에 따른 단락횟수의 변화 경향은 앞에서 기술한 결합 발생률의 경향과 잘 일치하고 있다. 즉 단락횟수의 증가는 용융지의 교반이 더욱 원활하게 될 수 있도록 조장하여, 내부에 있는 가스를 쉽게 배출시킴으로써 결합발생이 감소하는 것으로 생각된다. 따라서 용접부의 결합발생을 최소화시키기 위해서는 용융지에 존재하는 가스가량이 동일하다면 단락횟수를 증가시켜 가스를 외부로 많이 방출시키는 것이 매우 효과적인 수단이라고 판단된다.

한편 아크가 불안정한 경우에도 외부가스의 혼입 등에 의해 용접결합의 발생이 조장될 수 있기 때문에 아킹전류의 변동정도를 표준편차로서 조사한 결과, 저전류 및 고전류 조건에서의 표준편차가 각각 40 및 45A 임이 확인되었다. 이 결과는 저전류 조건에서의 아크안정성이 고전류에 비해 양호하다는 것을 의미하는 것으로, 이러한 아크안정성도 결합 발생률의 저감에 다소 기여한 것으로 생각된다. 또한 앞에서 기술한 바와 같이, 고전류 조건이 저전류 조건에 비하여 아킹시간이 현저하게 길어짐에 따라 고전류 조건에서는 용적이

크게 성장하고, 큰 용적이 이행됨에 따라 단락 후 재아크가 발생할 때 강한 아크전류에 의해 불안정한 아크현상을 초래될 수 있을 것이다. 이러한 아킹시간의 증가에는 아연증기도 영향을 미치는 것으로 생각되며, 이를 명확히 하기 위해서는 아연증기에 의한 아크내의 이온화 경향, 부력의 작용 등에 대한 상세한 검토가 필요할 것이다.

4. 결 론

본 연구는 자동차를 중심으로 여러 산업분야에서 사용범위가 점차 확대되고 있는 아연도금강판을 대상으로 먼저 CO₂ 용접시 발생하는 결합과 파단강도와와의 상관성을 조사하였다. 또한 결합발생을 최소화하기 위하여 용접전류, 용접속도, 용접재료 등 용접조건에 따른 결합 발생특성을 조사하고, 이들 조건에 따라 결합발생이 상이한 원인에 대해서도 검토하였다.

이상의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 크기가 0.5mm 이하의 비교적 작은 blowhole이 존재하는 용접부의 파단강도는 결합이 없는 건전부와 비슷한 값을 나타내었으며, 파단위치는 모재임이 확인되었다. 그러나 크기가 0.5mm 이상인 blowhole이 존재하는 부위의 파단강도는 건전부에 비해 10~20%, 또 pit가 존재하는 부위는 30~40% 정도 감소하며, 파단도 용접부에서 일어났다.

2) 용접비드의 외관 및 용접부의 결합발생 특성과 용접조건과의 상관성은 다음과 같다.

- 용접결합의 발생이 적고, 비드의외관도 양호한 고능률의 적정조건은 220A-23V-100cm/min이었으며, 비교적 저전류의 적정조건은 120A-19V-30cm/min이었다.

- 결합의 저감에 유효한 겹침부의 한계 gap은 0.2mm 이상이었으며, 특히 이러한 한계 gap 이상에서는 크기가 0.5mm보다 작은 결합들의 감소효과가 현저하였다.

- 용접결합의 발생 정도는 전류의 크기에 관계없이 solid wire가 flux-cored wire에 비해 우수하였으며, 그 중에서도 아연도금강판용으로 개발된 제품의 특성이 특히 양호함을 확인하였다.

3) 저전류 조건으로 용접하면 고전류 조건에 비해 단락횟수가 현저하게 증가하였다. 그 원인은 전류의 증가에 따라 아크에 의한 반발력이 증가한 때문으로 생각되며, 이러한 단락횟수의 증가는 용융지의 교반을 원활하게 하여 결합을 감소시키는 원인으로 작용한 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 亞鉛めつき鋼板の溶接手引作成委員会 : 亞鉛めつき鋼板の溶接手引, (社)鋼材俱樂部 (1977)
2. 向井喜彦, 西村 新, 中島淳雄, 奥 清司 : 亞鉛めつき鋼板のCO₂溶接に關する研究, 溶接學會論文集, 7-1(1989), 70-75
3. 石崎敬三, 横谷眞一郎 : 氣孔生成の機構, 溶接學會誌, 50-9(1981), 898-904
4. E.N.Gregory : Welding zinc coated steel, WELDING COATED STEEL, TWI, 5-12
5. 山田忠昭, 小林 實 : パルスMAG溶接におけるブローホールについて, 溶接學會論文集, 3-4(1985), 822-830
6. 이종봉, 안영호, 박화순 : 아연도금강판의 CO₂ 용접특성 (1), 대한용접학회지, 18-1(2000), 91-96
7. 이종봉, 안영호, 박화순 : 아연도금강판의 CO₂ 용접특성 (2), 대한용접학회지, 18-2(2000), 64-68
8. 竹之肉 優, 冷水孝夫 : 表面處理鋼板のアーケ溶接, 溶接學會誌, 60-6(1991), 490-494
9. 松井仁志 : めつき鋼板のアーケ溶接, 溶接學會誌, 66-6(1997), 423-427
10. 松井仁志, 鈴木 弘, 山田幹雄 : 溶融亞鉛めつき薄鋼板の高速アーケ溶接における氣孔の低減, 溶接學會論文集, 15-3(1997), 476-483
11. 松井仁志, 山田幹雄 : 溶融亞鉛めつき薄鋼板のアーケ溶接施工法に關する基礎研究, 溶接學會論文集, 15-3(1997), 484-493
12. 松井仁志, 鹽野谷哲 : 溶融亞鉛めつき鋼板の溶接における溶融池振動による氣孔の低減, 溶接學會論文集, 16-1(1998), 45-50
13. 細井宏一 : 亞鉛めつき鋼板溶接ワイヤ"MG1Z"および"MIX-1Z"について, 技術かいど(神戸製鋼), 32-8(1992), 8-16
14. M.Kamada, Y.Kambe, T.Suzuki and S.Maki : Flux Cored Electrode for Zinc Primer-Painted Steel Plate, Welding Jr., 72-3(1993), 49-54
15. 永田 雅, 平井宏樹 : 亞鉛めつき鋼板用ガスシールドアーケ溶接ワイヤの開発, 溶接學會全國大會講演概要, 58 (1996), 52-53
16. K.Yasuda, S.Nakano, T.Yamaguchi, T.Komatsu and T.Nakajima : Avoidance of Blowhole in Arc Welding of Galvanized Steel Sheets, The 5th International Symposium of the Japan Welding Society, April, Tokyo, (1990), 785-790
17. 安田功一, 中野昭三郎, 小松忠男, 中島 正 : 亞鉛めつき鋼板アーケ溶接用氣孔發生防止劑の開発, 溶接技術, 37-2(1989), 94-98
18. 神戸製鋼所, 溶接事業部 : 亞鉛めつき鋼板のマグ溶接における氣孔防止に關する研究, 溶業資 No.0892-033號, 1-18
19. 안영호, 이종봉 : "단락이행영역에서의 용접 작업성 평가 시스템 개발", POSCO 기술연구소 보고서, (1996)
20. 안영호, 이종봉, 엄동석 : "MAG 용접의 Arc 안정성에 미치는 Si의 영향", 대한용접학회지, 16-6(1998), 503-509