

아연도금강판의 CO₂ 용접특성(2) - 용접결합의 형성기구 -

이종봉* · 안영호* · 박화순**

* 포항제철 기술연구소

** 부경대학교 재료공학과

CO₂ Weldability of Zn Coated Steel Sheet (2) - Mechanism of Weld Defect Formation -

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 and Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

Abstract

The mechanism of the blowhole and the pit formation in lap-jointed fillet CO₂ arc welds of Zn-coated steel sheet was established by the direct observation of the gas behavior in the molten pool with the high speed camera system.

Main conclusions obtained are as follows :

- 1) Some blowholes were formed by incomplete back-filling to the pits at the last stage of the solidification. This type of blowhole was formed through four stages of gas in the molten pool, incubation, explosion, back-filling and completion of back-filling stage.
- 2) Most of the pits was back-filled at the last stage of their formation.

(Received September 27, 1999)

Key Words : Zn coated steel sheet, CO₂ welding, Lap-joint fillet welding, High speed camera, Weld defect, Blowhole, Pit

1. 머리말

종래부터 용접결합의 형성기구에 대한 검토 결과¹⁻³⁾를 비롯하여 결함이 발생하는 원인에 대해서도 보고^{4,5)}된 바 있지만 아직 명확히 정리된 것은 아니며 관련 연구가 지속되고 있는 실정이다. 본 저자도 이미 보고한 바와 같이, CO₂ 용접법으로 겹치기 필릿용접시에 발생하는 결함의 형태를 상세히 관찰하여 결함의 생성 및 형성과정에 대하여 검토하였다⁶⁾. 즉 blowhole은 두 판재의 겹침부에서 아연의 증기와 같은 가스가 고압으로 분출됨으로써 형성되기 시작하며, 가스압이 증가함에 따라 주로 주상정의 성장방향을 따라 성장함을

확인하였다. 또한 이러한 결함의 성장과 함께 가스량 및 압력이 저하하고, 또한 용융금속의 표면장력 및 온도도 저하함으로써 blowhole은 성장을 멈추게 된다. 그리고 이 때 blowhole의 내부에 잔존하는 소량의 저압가스는 최상부로 몰려 회전하면서 그 중 일부는 확산 등을 통해 외부로 방출되는 것으로 추정할 수 있었다. 그러나 이러한 결과도 용접부에 잔존하는 결함의 형태로서 추측하였기 때문에 실제와는 다소 상이할 수도 있을 것으로 생각한다.

따라서 본 연구에서는 용접 중 결함형성에 지배적인 영향을 미치는 용융지 내에서의 가스거동을 고속 카메라로 촬영하여 그 과정을 직접 관찰하고 검토함으로써 그 형성기구를 명확히 정립하고자 하였다.

2. 시험재 및 실험방법

시험에 사용한 모재 및 용접재료는 이미 보고한 바 있는 제1보⁶⁾와 동일하게 하였다.

Photo.1 및 Fig.1은 용접 중 용융지 부근에서의 가스 거동을 고속 카메라로 관찰하기 위한 시스템의 전경 및 장치들의 개략적인 구성도를 나타낸 것이다. 이때 사용한 시험편의 형상 및 용접방법도 전보와 동일하게 하였다. 즉 CO₂ 용접법을 사용하여 아래보기 자세로 겹치기 필릿용접을 하였으며, 용접조건은 200A-23V-100cm/min을 기준으로 하였다. 또 용접시 두 판재 사이의 gap은 상부에서 가압하여 영으로 유지하였다. 한편 조명을 위해서는 1kW의 xenon lamp를 사용하고, 촬영속도는 2,000frames/sec로 하였으며, 촬영결과는 P/C 또는 video로 분석하였다.



Photo. 1 Apparatus for the direct observation of gas behavior during welding

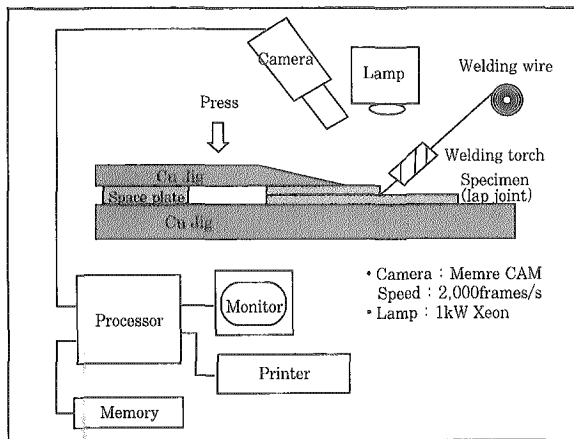


Fig. 1 Schematic illustration for the observation of gas behavior during welding

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용융지에서의 가스거동

Photo.2는 용융지를 상부 근처에서 근접하여 관찰

한 전형적인 예를 나타낸 결과로서, 사진의 오른쪽이 왼쪽보다 고온측에 해당한다. 이 결과에 의하면 고온측에서는 다수의 가스들이 용융지 내부로부터 배출되고 있으며, 용융지의 일부가 응고를 진행하고 있는 약간 저온측에서는 배출된 가스에 의해 형성된 일부의 기공들이 용융금속들에 의해 재충진되는 현상도 관찰할 수 있다. 뒤에서 상세히 기술하겠지만 이러한 재충진 현상은 결합의 형성에 매우 중요한 역할을 한다.

이전부터 알려진 바와 같이, 용융지에서는 응고의 진행과 함께 이와 같이 다수의 가스들이 배출되지만 이들 중에서 일부 배출되지 못한 가스가 용융지 내부에 잔존하는 상태에서 응고가 완료되면 blowhole을 형성하게 될 것이다. 또 고온측에서 배출되는 가스들에 의해 형성되는 기공들은 통상 유동성이 있는 용융금속으로 재충진되어 다시 무결함 상태로 회복되지만, 이러한 가스들이 내부에서 일정압력 이상으로 배출을 계속하여 외부압력보다 높게 되어 기공의 형상이 유지된 상태에서 응고가 완료되거나, 용융금속의 양이 적고 유동도가 낮은 저온측에서 이러한 기공이 형성되면서 동시에 응고가 완료되는 경우에는 pit가 형성될 것이다.

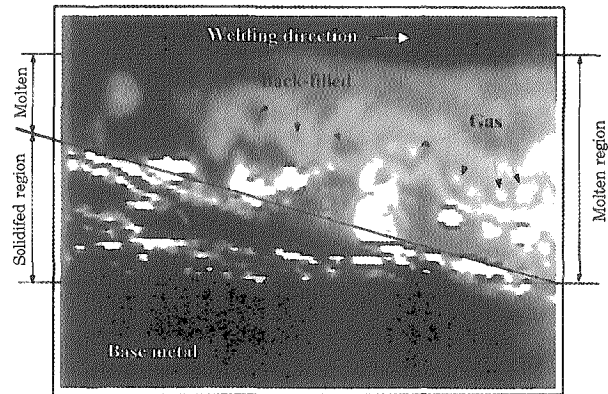


Photo. 2 Typical appearance of the gases in the molten region during welding

3.2 응고 종료부 근방에서의 가스거동

용융지에서의 가스거동을 관찰하는 과정에서, 응고 종료부 근처에서는 종래의 결합형성 개념과는 다소 다른 현상을 관찰할 수 있었다. 특히 가스의 거동에 따른 용융지 표면의 형상이 변화하는 것에 주목하여 비슷한 유형의 특징을 나타내는 현상들을 함께 분류·구분할 수 있었다. 또한 이러한 현상은 용융지의 온도 및 내부의 가스압과 상관성이 있는 것으로 판단되었다. Fig.2는 이들 결과를 종합하여 나타낸 것이다.

먼저 용융지의 표면 형상의 변화를 관찰한 결과에 의하면, 초기에는 [I]와 같이 용융지 표면 상태가 특이한

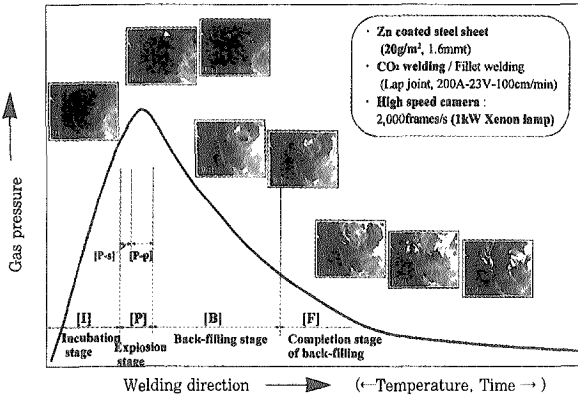


Fig. 2 Sequence of the gas behavior in molten pool near the last stage of solidification

변화를 나타내지 않기 때문에 내부의 가스 거동을 추측하기가 곤란하였다. 그러나 다음 단계에서는 [P-s]에서 볼 수 있는 바와 같이 용융지 표면에 작은 기공이 형성되기 시작하고, 이 기공은 순식간에 커지면서 선단의 형상이 병의 주둥이와 같은 형태를 나타낼 수 있었다[P-p]. 그러나 이 과정이 지나면 [B-1] 및 [B-2]에 나타낸 바와 같이, 용융지 표면에 형성되었던 기공이 용융금속 속으로 빨려 들어가는 형상으로 변화하며, 기공의 크기는 시간이 경과함에 따라 점차 감소하여 결국 외관상 용융지 표면에서는 기공의 형상을 볼 수 없게 된다. 이러한 단계가 지난 후에도 [F-1]~[F-3]에 나타낸 바와 같이, 이전에 기공이 형성되었던 용융지 표면의 형상은 잠시동안 변화가 계속되고 있음을 볼 수 있었다.

이상과 같은 관찰결과로부터, 용접 중 어떠한 원인으로 용융지 내부에서 가스가 발생하여 배출된 후, 이로 인해 형성된 기공이 다시 충전되는 일련의 과정을 크게 잠복단계[I], 폭발단계[P], 재충진단계[B] 및 재충진 완료단계[F]의 네 단계로 분류할 수 있었다. 또한 이러한 각 단계는 가스압과 용융금속의 온도와 상관성이 있음을 추정할 수 있었다.

잠복단계는 용융지 내에서 아연증기가 발생하여 가스화 되고, 이 가스는 압력이 증가함에 따라 용융지 표면 근처까지 이동하지만 외부로 배출되지 않고 내부에 잔존하는 시기에 해당한다. 그 후 압력이 더욱 증가하면 가스가 용융지 표면을 뚫고 폭발하는 폭발단계로 이행된다. 이 단계에서는 가스의 배출이 시작과 동시에 절정에 도달하게 된다. 즉 가스압이 최대가 되는 단계이며, 기공의 형상으로부터 초기 가스압의 증가폭도 대단히 크다는 사실을 추정할 수 있다. 이러한 폭발단계를 통하여 지나고 내부의 가스공급이 저하되면 가스압이 점차 감소하여 외부압력에 비해 낮아지게 된다. 그러나 이 때의 용융금속은 아직 응고가 완료되기 전으로, 온

도가 높으며 유동성도 좋기 때문에 가스의 배출에 의해 형성된 기공은 재충진될 수 있다. 이 단계가 재충진단계이며, 외관상 용융지 표면의 기공이 용융금속에 의해 재충진되어 결함이 없는 표면형상을 회복하는 과정까지를 이 단계에 포함시켰다. 그 후, 시간의 경과와 함께 가스압이 더욱 감소하여 기공의 내부까지 재충진이 진행되면서 용융금속의 유동도가 저하하여 응고가 완료되는 최종과정이 재충진 완료단계에 해당된다.

이와 같은 일련의 가스거동으로부터, 잠복단계에서 폭발단계까지는 급격히 진행되지만, 그 이후의 움직임은 비교적 느리게 변화하고 있음을 알 수 있었다. 또 재충진이 완료되는 단계에서 용융금속의 유동도가 충분히 높다면 초기에 형성되었던 기공의 내부까지 완전히 재충진됨으로써 무결함 상태로 회복될 것이다. 그러나 온도의 저하와 함께 응고가 상당히 진행되어 용융금속의 유동도가 저하된다면, 이미 형성되었던 기공의 일부가 재충진되는 과정에서 완전하게 충전되지 않은 상태에서 응고가 완료될 수도 있으며, 이 경우에는 미충진된 부분이 blowhole로 잔존하게 될 것으로 쉽게 추측할 수 있다.

Photo.3은 용접 종료부 근방에서 관찰된 결함의 예를 나타낸 것이다. 이 결함은 용접부 내부에 갇힌 상태로 존재하는 blowhole로서, 그 형상은 하부가 좁고 상부가 넓으며, 상부의 형태도 통상 볼 수 있는 타원형이 아니고 거의 평면에 가까운 형태를 나타내고 있다. 이러한 형상의 특징으로부터 이 blowhole은 두 판재의 접침부를 기점으로 생성되어 상부로 성장하였으며, 결함이 성장하는 과정에서 응고가 완료된 것이 아니고, 용융지 표면까지 성장하였으나, 용융금속에 의해 표면으로부터 재충진되는 과정에서 미처 기공의 내부까지 완전하게 충전되지 않은 상태로 응고가 완료됨으로써 형성된 것이라고 판단된다. 즉 이러한 형태의 결함은, 위에서 기술한 용융지의 가스거동을 관찰한 결과로부터 제기한 재충진 현상을 동반하는 과정에서 발생할



Photo. 3 Cross-section of the blowhole formed near the last stage of solidification

수 있는 결합에 상당한다고 생각된다. 그러나 이러한 형상의 blowhole은 용접 종료부 근방의 한정된 부위에서 일부 관찰되었으며, 발생빈도도 그다지 많은 편은 아니었다.

이와 같이 용융지 내에서의 가스거동은 결합의 형성과 밀접한 관계가 있기 때문에 용접 중 가스가 생성 또는 혼입이 되지 않도록 항상 주의하여야 한다. 그러나 가스의 생성이 불가피한 경우나 부주의로 가스가 혼입되는 경우에는, 용융금속의 유동도를 증가시킬 수 있는 방안을 강구하여 용융지 중의 가스가 외부로 쉽게 배출되어 용접부 내에 잔존하지 않도록 배려하여야 한다.

3.3 Blowhole의 형성기구

종래부터 아연도금강판의 아크 용접시 발생하는 blowhole은 크게 두 가지 원인에 의해 생성된다고 알려져 있다. 첫째는 용접 중 대기의 혼입에 기인한다는 것으로서, 아연의 폭발적인 연소 및 아연증기에 의해 아크 분위기가 산란됨으로써 대기가 아크분위기 중에 혼입되어 기공이 발생한다고 보고되었다⁴⁾. 두 번째는 강 중의 수소에 기인한다는 보고로서, 이것은 아연도금강판의 Zn-Fe 합금층 중의 수소가 용접아크에 의해 급속히 가열·용융되어 용융금속 중으로 용해하고, 큰 스파터의 발생 및 용락 등에 의해 용융지가 열적으로 불안정하게 되면, 응고가 불안정하게 되어 수소가 안정하게 방출되지 못하기 때문에 용접금속 중에 기공이 발생한다는 것이다¹⁾.

이미 앞에서 보고하였지만, 본 연구에서 결합의 형상 관찰 및 결합 내면을 분석한 결과로부터 아연도금강판의 아크용접부에 발생하는 결합은 접침부에서 기화된 아연증기가 직접적으로 영향을 미친다는 것을 확인하였다⁶⁾. 그러나 일부 결합의 형상으로 미루어 볼 때, 위에서 기술한 종래의 보고에서 언급된 바 있는 대기의 혼입에 의해서도 조장될 가능성도 크다고 생각되었다.

본 연구결과에 근거하여, 이러한 요인들이 작용하여 blowhole이 생성되는 과정의 모식도를 Fig.3에 나타내었다. 여기에서는 넓은 의미의 blowhole의 범주에 wormhole도 포함시켰으며, 접침부를 기점으로 발생하는 blowhole에 한정시켜 생성과정을 크게 세 가지 경우로 구분하였다. (a) 및 (b)는 각각 wormhole과 blowhole의 생성과정을 나타낸 것으로, 아연증기에 의해 blowhole이 접침부에서 발생한 후, 가스압의 증가에 따라 점차 성장한다는 종래의 개념과 동일한 것이다. 단 가스압의 크기, 연속적인 공급여부 등에 따라

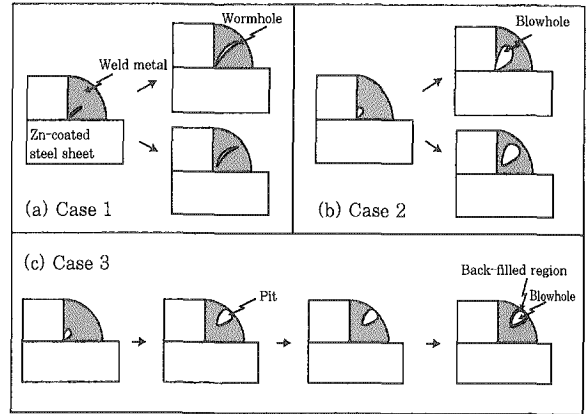


Fig. 3 Schematic illustration of the blowhole formation during welding

blowhole의 성장시에 그 생성 개시점이 접침부의 기점으로부터 쉽게 이탈될 수도 있다. 한편 (c)는 용융지에서의 가스거동을 관찰한 결과에서도 기술한 바와 같이, 재충진과정에서 나타날 수 있는 blowhole의 생성과정을 나타낸 것이다. 먼저 접침부에서 발생한 blowhole이 성장하여 pit를 형성한다. 그 후, pit가 유동성이 양호한 용융금속에 의해 재충진되는 과정에서 용융지 표면만이 원상태를 회복하고, 그 내부의 일부가 미처 완전히 재충진되지 못한 상태에서 응고가 완료된 경우, 이 미충진된 부분이 blowhole로서 잔존하게 되는 것이다.

3.4 Pit의 형성기구

Fig.4는 본 관찰결과에 근거하여 pit가 생성되는 과정을 모식도로 나타낸 것이다. 위에서 기술한 blowhole의 생성과정과 마찬가지로 pit의 생성과정에서도 용융금속의 재충진 현상이 고려되어야 할 것이다. 그림의 횡축은 용접 후 경과시간으로서, 동일한 용융지라도 선단부, 중앙부, 후단부와 같은 미소한 차이

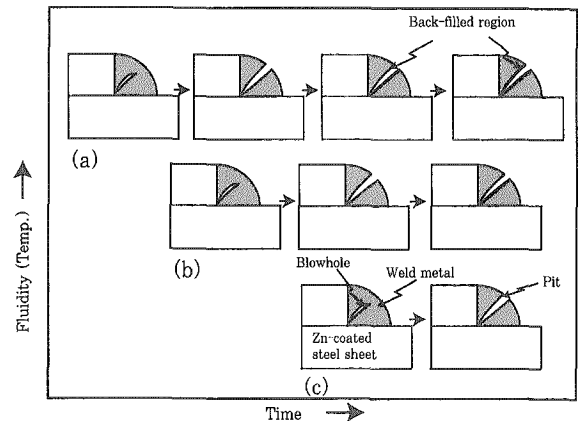


Fig. 4 Schematic illustration of the pit formation during welding

를 의미하며, 종축은 용융금속의 유동정도 또는 온도를 의미한다. 지금까지 알려져 있는 pit의 생성과정은 blowhole이 성장하여 용융지 표면까지 도달한 상태에서 응고가 완료된다는 것이다. 즉 이 개념은 본 모식도의 (c)에 해당하는 것으로, 용접 후 시간이 다소나마 경과하고 용융지의 온도 및 유동정도가 비교적 낮은 경우에 pit의 생성과 함께 응고가 완료된다는 것이다.

그러나 Photo.4에서 나타난 바와 같이 실제의 용접부에서 발생하는 pit의 대부분은 이러한 형태와는 다소 상이하다. 즉 pit의 형태는 주로 비드 표면부 및 기점부위가 다소 넓고, 비드 표면부 바로 아래쪽은 다소 좁아지는 호로병과 같은 형상을 나타내고 있다. 이러한 형상은 blowhole이 표면까지 성장하여 pit를 형성시킨 다음, 재충진과정을 거친 후 pit의 형태가 마무리됨으로써 나타나는 것으로 판단된다. 이러한 pit는 주로 온도 및 용융금속의 유동정도가 높고, 용융지의 중앙부 근처에서 생성되기 때문에 용융금속이 재충진되는 현상을 동반하는 것으로 생각된다. 물론 이러한 경우에도 Fig.4(a) 및 (b)에 나타난 바와 같이 용융금속의 유동정도에 따라 재충진되는 정도는 상이할 수 있을 것이다.

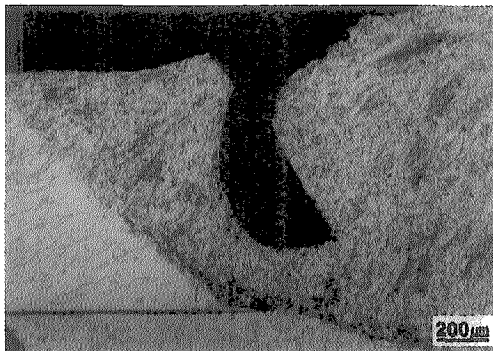


Photo. 4 Cross-section of the typical pit

4. 결 론

본 연구는 자동차를 중심으로 여러 산업분야에서 사용범위가 확대되고 있는 아연도금강판을 대상으로

CO₂ 용접시 발생하는 결함의 형상적 특징을 검토하고, 용접 중 용융지의 가스거동을 고속 카메라로 직접 관찰함으로써, 용접결함의 형성기구를 검토하였다.

연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 용접 중 용융지 표면에는 용융지 내부에서 생성된 가스가 잠복단계, 폭발단계를 거치는 과정에서 기공이 형성되지만, 그 후 이러한 기공은 용융금속의 재충진단계 및 재충진 완료단계를 거쳐 충전됨으로써 표면은 원상을 회복한다.

2) 이상의 4단계는 가스의 발생량 및 압력과 밀접한 관계가 있으며, 잠복단계 및 폭발단계는 그 이후의 단계인 재충진 완료단계에 이르는 과정에 비해 매우 빠르게 진행됨이 확인되었다.

3) Blowhole은 폭발단계에서 pit로 진행된 후 용융금속의 재충진 과정에서 pit의 내부가 미충진 상태로 응고가 완료됨으로써 형성되기도 한다. 이러한 형상의 blowhole은 용접 종료부 근방의 한정된 부위에서 관찰되었으며, 발생빈도도 그다지 많은 편은 아니었다.

4) 대부분의 pit는 용접 중 온도 및 용융금속의 유동정도가 높고 용융지의 중앙부 근처에서 생성되기 때문에 용융금속이 재충진되는 현상을 동반한다고 생각된다.

참 고 문 헌

1. 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
2. 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
3. 杉谷祐司, 佐藤慶和, 後藤直幸 : 防青被覆鋼板溶接における氣孔發生機構, 溶接學會全國大會講演概要, 50(1992), 142-143
4. 亞鉛めつき鋼板の溶接手引作成委員會 : 亞鉛めつき鋼板の溶接手引, (社) 鋼材俱樂部 (1977)
5. 向井喜彦, 西村 新, 中島淳雄, 奥 清司 : 亞鉛めつき鋼板のCO₂溶接に関する研究, 溶接學會論文集, 7-1(1989), 70-75
6. 이종봉, 안영호, 박화순 : 아연도금강판의 CO₂ 용접특성 (1), 대한용접학회지, 18-1(2000), 91-96