

CO₂ 용접의 단락이행영역에 있어서 스파터 발생특성

안영호* · 이종봉* · 최원규*

* POSCO 기술연구소 후판선재연구그룹 용접연구팀

Characteristics of Spatter Generation in the Short Circuit Transfer Region of CO₂ Arc Welding

Young-Ho An*, Jong-Bong Lee* and Won-Kyu Choi*

* POSCO Technical Research Lab. Plate, Rod & Welding Research Gr. Welding Research Team, Pohang 790-785, Korea

Abstract

The characteristics of spatter generation in the short circuit transfer region of CO₂ welding was investigated. Spattering phenomena could be classified into three types : Type I generated due to the abrupt increase of arc voltage in arcing duration, Type II by the gas ejection from molten metal, and Type III generated by the arc instability at the moment of arc re-ignition just after short circuiting. Main observed types were dependent on the chemical composition of welding wires. The case of YCW12 wires was mainly composed of spatters generated by Type I and Type II, while most spatters in YCW11 wires were generated by Type II and Type III.

(Received May 24, 2001)

Key Words : CO₂ arc welding, Spatter generation, Short circuit transfer region, Arc instability, Welding wire

1. 서 론

탄산가스 아크 용접(이후 CO₂용접)은 용접의 자동 및 반자동화에 따라 적용률이 늘어나고 있으며, 보호가스의 특성상 용접능률 및 경제성이 우수한 용접방법이다. 그러나 100%CO₂ 가스를 사용함으로써 보호가스 특성상 용접중 다량의 스파터 발생이 문제점으로 지적되고 있다¹⁾. CO₂용접중 발생하는 스파터에 관하여는 많은 연구자에 의하여 스파터 발생기구 규명^{2,3)}, 스파터 감소를 위한 용접전원⁴⁾ 및 용접재료⁵⁾ 등에 관한 연구결과가 보고되고 있으며, 현재에도 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 스파터 발생현상 및 기구에 관한 연구는 주로 安藤 등²⁾에 의하여 이루어졌으며, 고속카메라를 이용하여 스파터 발생현상 및 기구를 제안하였다. 또한 伊藤 등³⁾은 펄스 CO₂용접에서 발생하는 스파터 발생형태를 분류하고 고속카메라로서 형태별 발생 경향을 분석하여 스파터 저감 대책을 제안하였다. 용접재료의 연구로서 荒井 등⁵⁾은 스파터 발생에

미치는 솔리드 와이어의 주요성분들의 영향을 평가하여 보고하였다.

용접중 스파터 발생을 최소화할 수 있는 저스파터 CO₂용접을 위하여는 용적이행 형태별 아크 특성 분석과 스파터 발생현상에 대한 정밀한 관찰은 물론 이들 상호 관련성에 대한 이해가 요구되지만, 현재까지 발표된 연구들은 대부분 단락이행 및 반발형 입상용적이행 형태가 혼재하는 영역에 대한 연구결과로서, CO₂용접의 전형적인 이행 형태인 단락이행 및 반발형 입상용적이행 영역에서 스파터 발생 현상의 분석 및 이해는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 CO₂용접의 전형적인 단락이행 영역에서 스파터 발생 특성을 정량적으로 평가하고, 또한 고속카메라에 의한 스파터 발생 현상 관찰은 물론 아크 신호와 동조하여 스파터 발생 현상을 분석함으로써 발생 특성별로 스파터 현상을 구분하였다. 또한 CO₂용접재료로서 시판되고 있는 와이어 종류에 따라 스파터 현상별 발생 특성을 규명하여 와이어 종류별 문제점을 제시함으로써 CO₂용접의 저스파터 용접기술 개발에 기여하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 시험재

시험재는 시판재인 직경 1.2mm의 CO₂ 용접용 와이어로서 AWS ER70S-6, G(KS YCW11, 12)에 상당하는 용접재료를 사용하였으며, Table 1에 시험재의 화학성분을 나타내었다.

2.2 스패터 및 아크신호 측정방법

스패터 발생 특성은 스패터 발생률과 스패터 입도별 발생비율로서 평가하였으며, 용접중 발생하는 스패터는 구리로 만들어진 반 실린더형 포집장치⁶⁾를 사용하였다. 스패터 포집을 위하여 길이 400mm, 폭 50mm, 두께 20mm 크기의 SS400 강재 표면에 길이방향으로 300mm가 되도록 비드 용접을 실시하였다. 스패터의 발생률은 (1)식과 같이 용착금속에 대한 스패터의 중량비로서 구하였고, 입도별 발생비율은 포집된 스패터를 직경에 따라 D₁(D<0.25mm), D₂(0.25≤D<1.0mm) 및 D₃(D≥1.0mm)로 분류하여 각 입도별 무게를 측정한 후 (2)식으로부터 각각의 상대적인 비율로서 평가하였다.

$$\text{Spattering ratio}(\%) = \frac{W_s}{W_w} \times 100 \quad (1)$$

W_w: 용착금속의 중량 (g)

W_s: 스패터 중량 (g)

$$\text{Ratio of } D_i (\%) = \frac{D_i}{D_1 + D_2 + D_3} \times 100 \quad (2)$$

(i = 1, 2, 3)

D₁: D < 0.25

D₂: 0.25 ≤ D < 1.0

D₃: D ≥ 0.25

D : Diameter(mm)

용접 중의 스패터 발생 현상을 분석하기 위하여 용접아크해석 장치⁷⁾에 의하여 아크 신호를 측정하고, 이와 동시에 고속카메라를 사용하여 용접현상을 관찰하였다. 아크 신호는 전류 및 전압을 측정하였으며, 전류 및 전압신호는 1초당 각각 1000번 측정하였으며, 고속카메라의 촬영속도는 1000frames/s로 하였다.

용접조건은 전형적인 단락이행 현상이 나타나는 140A-22V로 하였으며, 용접속도는 30cm/min로 하였다.

Table 1 Chemical compositions of commercial wires used

Wire	Spec. (KS)	C	Si	Mn	P	S	Ti
SM	YCW12	0.02	1.24	1.49	0.021	0.016	-
SMT1		0.04	0.89	1.53	0.014	0.021	0.09
SMT2	YCW11	0.04	0.70	1.60	0.013	0.011	0.18
SMT3		0.05	0.66	1.50	0.016	0.010	0.25

3. 실험결과 및 고찰

3.1 스패터 발생 특성

Fig. 1은 140A-22V의 용접조건에 스패터 발생률을 시험재 별로 나타낸 것이다. 스패터 발생률은 와이어의 종류에 따라 큰 차이는 없지만, 탈산원소가 많이 첨가된 YCW11계의 와이어가 YCW12계 와이어들에 비하여 스패터 발생률이 감소하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 2는 포집된 스패터를 입도별로 분류하여 각각의 상대적인 발생비율을 나타낸 것이다. 용접중 발생하는 스패터는 비산되는 과정에 응고되는 것과 비산되는 중에 응고가 이루어지지 못하고 모재에 응착되는 스패터로 크게 구분할 수 있으며, 전자에 해당되는 스패터 군은 직경 1.0mm 이하인 D₁, D₂ 스패터이며, 후자에 해당되는 스패터 군은 직경 1.0mm이상인 D₃ 스패터이다. YCW12계의 경우는 비교적 미세한 스패터 군인 D₁ 및 D₂ 스패터 발생률이 전체의 90% 이상을 차지하고 있다. 반면에 YCW11계의 경우는 와이어에 따라서 차이를 나타내고 있다. 즉 SMT2 와이어는 전체의 90%이상이 D₁ 및 D₂ 스패터로 이루어지지만, SMT3 와이어의 경우는 D₁ 및 D₂ 스패터의 비율이 약 80%로 감소하며 대립인 D₃ 스패터 발생비율이 약 20%로 증가하였다.

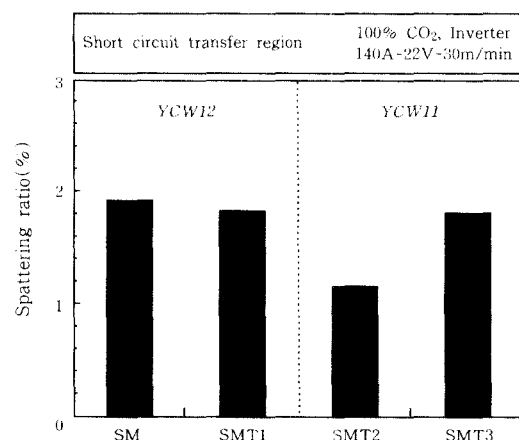


Fig. 1 Spattering ratio in the region of short circuit transfer

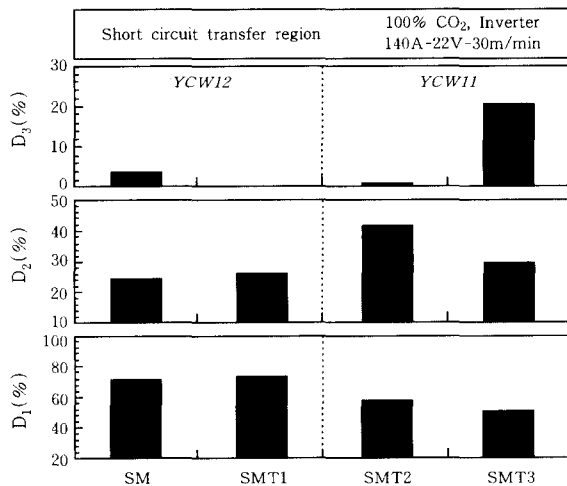


Fig. 2 Size distribution of collected spatters in the region of short circuit transfer

한편 D₁ 및 D₂ 스패터의 분포에 있어서도 YCW12 및 YCW11에 따라서 큰 차이를 보이고 있다. 즉 YCW12계 와이어에서는 0.25mm 이하인 D₁ 스패터 발생비율이 약 70% 이상이며 D₂ 스패터 비율이 20~30%를 차지하고 있으나, YCW11계 와이어에서는 D₂ 스패터 비율이 30~40%, D₁ 스패터 비율이 50% 정도로서 YCW12계 와이어에 비하여 발생하는 스패터가 대립화되는 경향을 나타내고 있다.

이와 같이 전체적인 스패터의 총량을 나타내는 스패터 발생율은 YCW11계 와이어가 YCW12계 와이어에 비하여 감소하는 경향을 보이지만, 발생 입도별 특성에서는 YCW12계 와이어가 YCW11계 와이어에 비하여 미세한 특징을 나타내었다.

3.2 용적이행 특성

Fig. 3은 140A-22V의 용접조건에서 용접시간에 따른 아크전압의 변화를 와이어별로 나타낸 것이다. 시험재 모두 용적이행은 아킹과 단락으로 이루어지는 전형적인 단락이행 형태를 보이고 있으나, 아킹구간과 단락구간의 특징은 와이어마다 다소 차이를 보이고 있다. 즉 YCW12계 와이어에 비하여 YCW11계 와이어의 아킹시간 및 단락시간이 길어지는 경향을 보이고 있다.

Fig. 4는 평균 아킹시간과 단락시간을 와이어별로 정리한 것으로 Ti의 첨가가 많은 와이어일수록 아킹시간 및 단락시간이 길어짐을 확인할 수 있다. Ti함량과 거의 직선적인 상관성을 보이리라 판단된다. 또한 단락시간이 증가하면 단락기간중에 전류가 상승함에 따라 단락과파 후 강한 아크력이 와이어 및 용융지의 용융금속에 작용하여 불안정한 재아크 현상을 보이리라 생각된다.

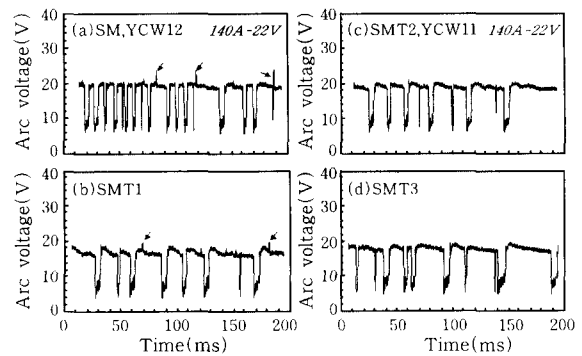


Fig. 3 Behavior of arc voltage in the region of short circuit transfer

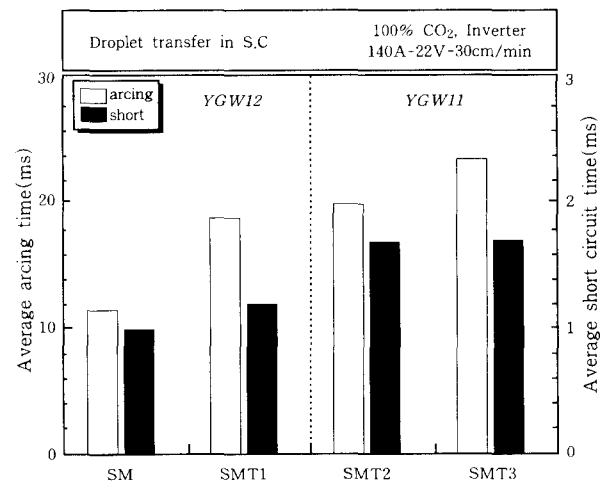


Fig. 4 Effect of wires on arcing time and short circuit time

Fig. 5는 재아크시 전류의 평균값을 나타낸 것으로 Ti이 많이 첨가된 와이어일수록 높은 전류값을 보이고 있어, YCW11계 와이어는 YCW12계에 비하여 재아크시 아크가 불안정하여지리라 판단된다. 이와같이 와이어에 첨가된 Ti함량에 따라서 아킹시간 및 단락특성이 변화하는 것은 Ti첨가에 의한 아크 길이의 증가에 기인한 것으로 보고되고 있다^{6),8)}. 즉 Ti이 첨가된 와이어의 경우 고온의 아크중에서 용적 및 용융금속에 산화물이 증가하고, 이는 고온의 아크중에서 전자방출을 용이하게 하기 때문에 전위경도가 감소하게 된다. 따라서 전위경도가 감소하면 동일 전압에서 아크길이가 길어지고, 이로 인하여 아킹시간이 증가하며 용적이 크게 성장하게 된다. 이와 같이 큰 용적이 형성되면 단락시 이행에 필요한 단락시간이 길어져 궁극적으로 재아크시 최대 전류치가 증가하게 되는 것으로 판단된다.

3.3 용적이행 및 스패터 발생 현상 관찰

Fig. 6은 140A-22V 용접조건에서 고속카메라에

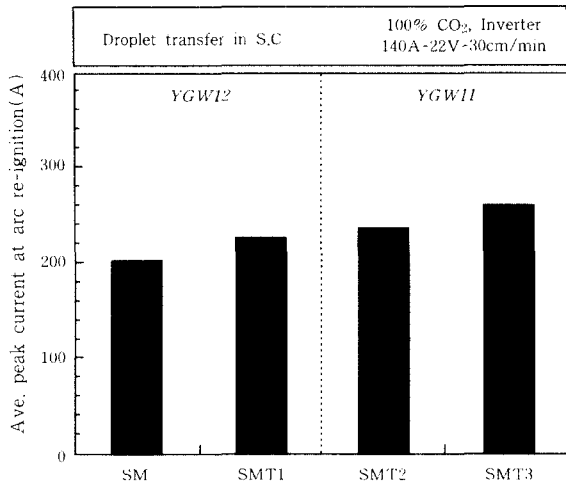


Fig. 5 Effect of wires on peak current at arc re-ignition

의한 용접현상과 아크해석장치에 의한 아크신호(전압, 전류)와를 동조하여 나타낸 것이다. 아킹과정의 예는 그림중 ②, ③, ④ 등이며 단락과정은 ①로서 단락이 파괴되고 재아크가 발생하기 직전의 예를 보이고 있다. 그림중 ②와 ④는 전형적인 아킹현상을 보이고 있으나, ③은 순간적으로 아크전압이 급상승하는 현상을 나타내고 있다. 이때 아크 전류는 큰 변화는 인식되지 않지만, 용접현상에서는 용적에 강한 부력이 작용하여 용적이 급격히 부상되고 있다. 이에 대하여는 명확한 원인은 불분명하지만, 가스의 급격한 팽창/폭발이 원인이라 추측된다. 이러한 현상은 Fig. 3에서(화살표) 나타낸 바와 같이 SM 와이어에서 현저한 양상을 보이고 있으며, SMT1 와이어에서도 동일한 현상이 관찰되지만, 그이외의 와이어에서는 관찰되지 않았다.

Fig. 7은 아크신호와 고속카메라에 의한 용접현상을 동조하여 측정된 후 스패터 발생 순간을 아크신호

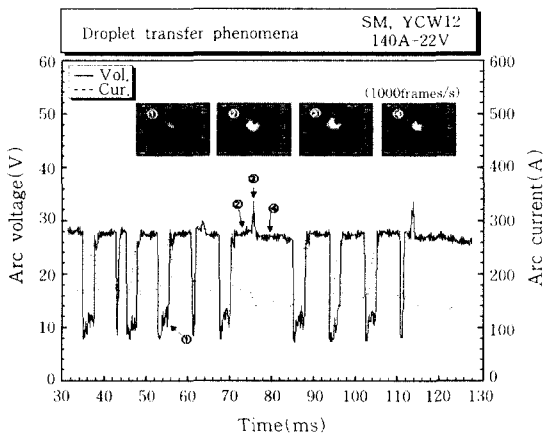


Fig. 6 Droplet transfer phenomena in the region of short circuit transfer

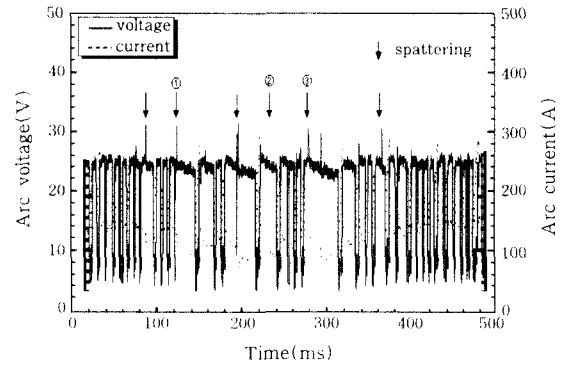


Fig. 7 Spatter generation of SM wire in short circuit transfer region

에 나타낸 것으로, YCW12계인 SM와이어의 예를 나타낸 것이다. 500ms동안의 용접시간중에 스패터 발생 횟수는 총 6회가 관찰되었으며, 발생의 대부분은 전술한 바와 같은 아킹중 아크전압이 급상승하는 순간이었으며, 정상적인 아킹중에 발생하는 스패터도 일부 관찰되고 있으나, 단락파괴후 재아크시에 발생하는 스패터는 거의 관찰되지 않고 있다. 이러한 스패터 발생현상을 고속카메라로 관찰결과를 Fig. 8에 나타내었다. 아킹중 아크전압의 급상승에 의한 스패터 발생 현상은 ① 및 ③에서 보이고 있으며, 정상적인 아킹상태에서 발생하는 스패터를 ②에서 보이고 있다. 아크전압의 급상승에 의한 스패터(①, ③)는 전술한 바와 같이 와이어의 용적에 강한 부력이 작용하여 용적이 부상함은 물론 용융지가 매우 불안정함을 알 수 있으며, 이로 인하여 용적이나 용융지로부터 다량의 스패터가 발생하고 있다. 반면에 정상상태에서 발생하고 있는 스패터(②)는 용융지로부터 발생하는 스패터로 미세한 특징을 보이고 있으며, 용융금속으로부터의 가스분출이 원인으로 판단되며 아크의 불안정성은 관찰되지 않는다.

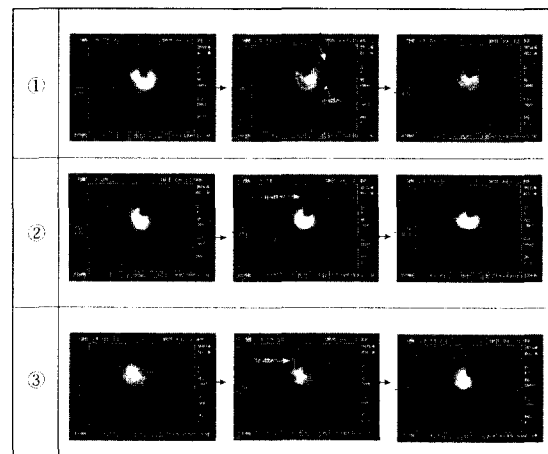


Fig. 8 Spattering phenomena of SM wire in short circuit transfer region

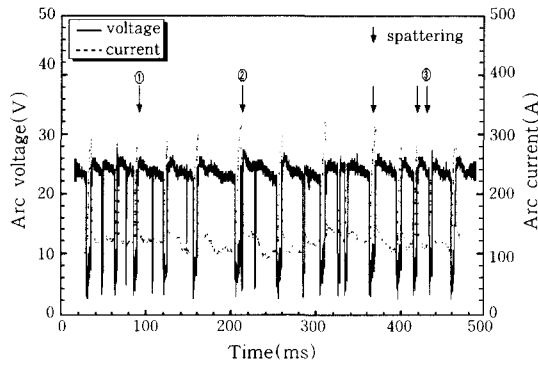


Fig. 9 Spatter generation of SMT2 wire in short circuit transfer region

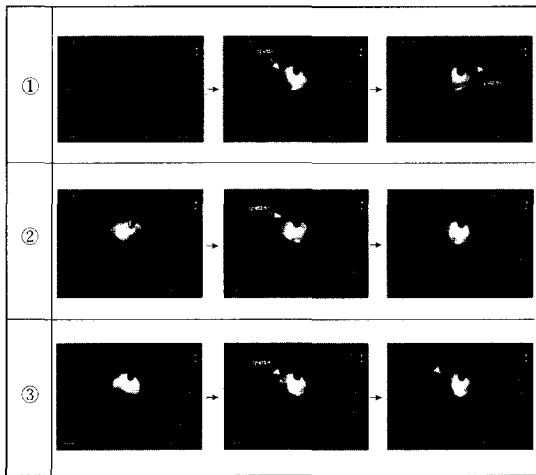


Fig. 10 Spatter phenomena of SMT2 wire in short circuit transfer region

Fig. 9는 YCW11계인 SMT2 와이어의 예를 나타낸 것이다. YCW11계 와이어의 스패터 발생 시점은 전술한 YCW12계 와이어와는 달리 거의 대부분이 단락과괴후의 재아크 순간(①, ②)임을 알 수 있다.

Fig. 10은 스패터 발생 현상을 고속카메라로 관찰한 결과를 나타낸 것으로, 현상 ①과 ②는 재아크 순간에 발생하는 것이며, 특히 ②의 경우는 Fig. 9에서 나타낸 바와 같이 재아크시 불안정한 아크현상이 동반됨을 알 수 있다. 한편 현상 ③은 용융지로부터의 가스 분출에 기인한 스패터 현상을 나타낸다. 이와 같은 YCW11계 와이어의 스패터 발생 특성은 전술한 YCW12계 와이어와는 차이가 있음을 알 수 있다.

3.4 와이어별 스패터 발생 특성

CO₂용접의 단락이행영역에서 발생하는 스패터는 크게 아킹중에 발생하는 것과 단락과괴후의 재아크 과정에서 발생하는 것으로 나누어지며, 아킹중에 발생하는 스패터에서도 아크전압의 급격한 상승에 의한 것과

용융금속으로부터의 가스방출에 의한 것으로 구분할 수 있다. 따라서 단락이행영역에서 발생하는 스패터는 Fig. 11에서 나타낸 바와 같이 크게 3가지 현상으로 분류할 수 있다. 먼저 Type I 스패터는 아킹과정중에 용적이 순간적으로 부상됨은 물론 이에 대한 반력이 용융지에 작용하여 용적 및 용융지의 거동이 불안정하게 되어 발생하는 것이며 이때 아크 전압의 급상승이 동반되는 것이며, Type II 스패터는 아킹중에 용융금속으로부터 가스방출에 기인한 것으로 미세한 특징을 보이며 아크신호에는 변화가 관찰되지 않는다. 한편 Type III 스패터는 단락과괴후 재아크과정에서 발생하는 것으로 단락에 의하여 용적이 용융지로 이행하고 이러한 단락과정중에 상승한 전류에 의하여 야기되는 재아크시의 불안정성이 주된 원인이다. 이러한 스패터 발생형태를 기준으로 와이어들의 스패터 발생 특성을 분석하면 Fig. 12에 나타낸 바와 같다. 와이어 종류에 따라 스패터 발생 형태는 크게 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 YCW12계인 SM, SMT1 와이어의 경우 Type I과 Type II 스패터가 주체로 되는 반면에 YCW11계인 SMT2, SMT3 와이어의 경우는 Type

Type I	Type II	Type III

Fig. 11 Classification of spattering phenomena in short circuit transfer region of CO₂ welding

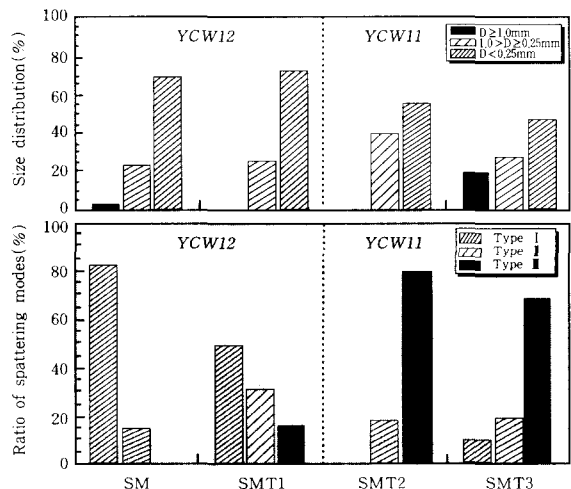


Fig. 12 Effect of spattering modes on the size distribution of collected spatters

Ⅱ와 Type Ⅲ 스파터가 주체로 발생하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 와이어 종류에 따라 스파터 발생 형태가 크게 차이를 보이는 것은 와이어 성분의 영향이라 판단된다. 즉 YCW12계인 SM과 SMT1 와이어의 경우 Ti이 첨가되지 않은 SM와이어의 경우는 Type I 스파터가 80% 이상을 차지하지만 Ti이 약 0.10% 첨가된 SMT1 와이어의 경우에는 Type I의 비율이 감소하고 그대신 Type Ⅲ 스파터 발생이 확인되고 있다. 이는 Ti함량의 증가에 따라 전술한 바와 같이 아킹시간 및 단락시간이 증가하고 이로 인하여 단락과괴후의 재아크 과정이 불안정하게 되기 때문이라 판단된다.

한편 스파터 발생 현상에 따라서 용접중 발생한 스파터 입도 분포에 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다. 즉 Type I 스파터가 주체가 되는 YCW12계 와이어의 경우 미세한 D₁ 스파터의 비율이 70% 이상을 점유하는 반면에 Type Ⅲ 스파터가 주체로 되는 YCW11계 와이어의 경우는 미세한 D₁ 스파터의 비율은 50%정도로 감소하고 중간입도인 D₂ 및 대립인 D₃ 스파터의 비율이 증가함을 알 수 있어, Type I 스파터 현상은 미세한 스파터 발생 및 Type Ⅲ 스파터 현상은 중립 혹은 대립의 스파터 발생과 관계가 있음을 알 수 있다. 따라서 전술한 바와 같이 YCW11계 와이어에서 대립의 스파터가 많이 발생하는 원인은 용접중 발생하는 스파터가 Type Ⅲ로 이루어지기 때문이다.

4. 결 론

1) CO₂ 용접의 단락이행영역에 있어서 스파터 발생 현상은 아킹중에 발생하는 스파터와 단락과괴후 재아크시 발생하는 스파터(Type Ⅲ)로 구분할 수 있으며, 아킹중에 발생하는 스파터는 아크전압의 급상승에 기인한 것(Type I)과 용융금속으로부터의 가스분출에

기인한 것(Type Ⅱ)으로 나누어진다.

2) 아크전압의 급상승을 동반하는 Type I 스파터 발생 현상에는 용적이 급격하게히 부상되므로 아크 및 용융지 거동이 매우 불안정하게 된다.

3) Type I 스파터 현상은 주로 0.25mm 이하인 미세한 스파터를 주로 발생시키지만, Type Ⅲ 현상은 0.25mm 이상의 중립 및 대립의 스파터 발생을 촉진한다.

4) CO₂ 용접용 와이어중 YCW12계 와이어는 Type I 현상이, YCW11계 와이어는 Type Ⅲ 현상이 스파터 발생의 주체가 된다.

참 고 문 헌

1. 木村乾男, 橋口清住 : 炭酸가스아크 용접におけるスパッタについて, 溶接技術, Vol.32, No.2(1984), 76~78
2. 安藤弘平, 長谷川光雄 : 溶接アーク現象, 産報(1967), 288~292
3. 伊藤崇明, 興石房樹, 佐藤正晴, 菅 哲男, 牛尾誠夫 : 炭酸ガスバルスアーク溶接法におけるスパッタ低減に関する検討, 溶接學會論文集, Vol.15, No.3(1997), 432~437
4. 三田常夫 : 스파터はどこまで防止できるか?(1) 溶接電源からのアプローチ, 溶接學會誌, Vol.59, No.2(1983), 177~182
5. 荒井敏夫, 山田忠昭, 菅 哲男 : 炭酸가스아크 용접におけるスパッタの發生, 溶接學會論文集, Vol.1, No.2(1983), 177~182
6. 안영호, 이종봉, 방국수, 엄동석 : CO₂용접시 스파터발생에 미치는 Ti의 영향, 대한용접학회지, Vol.14, No.5(1996), 106~112
7. 안 영호, 방 국수, 이 종봉, 장 래용 : GMAW 용적이행현상에 미치는 Ca의 영향, 대한용접학회지, Vol.12, No.4(1994), 76~84
8. I.Masumoto, A.Sekiguchi, S.Kawasaki : Effect of Titanium in Steel Electrode Wire for CO₂ Arc Welding on the Usability and Mechanical Properties of Weld Metal, IIW Doc. XII-B-135-73