

特輯 : 고속촬영에 의한 용접 현상의 해석

고속 촬영에 의한 GMA 용접 工程에서의 熔滴 移行 現象 解析

上山 智之

Analysis of Metal Transfer in GMAW Process Based on the High Speed Photography

Tomoyuki Ueyama



上山智之/(株)タイ
ヘン(OTC) 研究開
發部/1961年生/熔接
現象解析 및 arc 熔
接 system 開發

1. 緒 言

消耗 電極式 아크 熔接法(Gas Metal Arc Welding, 以下 GMAW)은 熔接 와이어가 熔接棒이면서 전 력 공급을 위한 電極이 된다. 따라서, 와이어는 아 크 열에 의하여 용해된 다음 와이어 先端에서 離脫 되는데, 각각의 熔滴이 移行될 때 마다 단속적으로 아크 길이도 변화한다. 이와같이 移行하는 熔滴의 크기, 形態 및 移行 頻도는 아크 安定성을 支配할 뿐만 아니라 作業성과 熔接 品質에도 影響을 미친다. 즉, 와이어 先端으로 부터 離脫되는 熔滴이 지나치게 크거나 고르지 못하면 熔滴 移行에 수반되는 아크 길이의 변동량이 커지고 그 결과 아크는 不安定하게 된다. 熔滴의 移行이 고르지 않으면 와 이어 先端 또는 용융지로부터 용융 금속이 飛散하 는 스패터 現象이 발생하게 된다. 와이어 先端부에서 모재로의 熔滴 移行 形態는 熔接 電流, 아크 電壓, 極性, 와이어의 材質과 直徑 및 保護 气体的 組成 등에 따라 影響을 받는다. 한편, 熔滴을 와이어

先端으로 부터 離脫하게 하는 요인으로서는 重力, 熔滴과 용융지의 表面張力, 電磁氣的인 핀치력, 아크력, 플라즈마 氣流 또는 熔滴 안에서 생성되는 가스의 爆發 現象 등이 거론 된다. 消耗 電極式 아 크 熔接에서 아크의 特性和 熔滴 移行 現象은 서브 머지드 아크 熔接法(以下 SAW)을 제외하고는 모두 직접 관찰이 가능하다. 특히, 고속 카메라를 이용 하는 아크 現象의 直接 撮影 技法은 熔滴 移行 現象의 研究에 必須 不可缺한 방법으로 인식되고 있으며, 촬영 결과의 解析은 아크 熔接 技術 開發과 實用化에 널리 활용되고 있다. 나아가 이러한 고속 撮影 技術은 熔滴 移行의 安定성을 확보하기 위한 연구 분야로서 保護 气体, 熔接 材料 開發은 물론 熔接 裝置의 高級化에 크게 기여하고 있으며 개발 성과도 매우 높은 것으로 알려지고 있다.

여기에서는 고속 撮影法으로 얻을 수 있는 GM AW에서의 熔滴 移行 現象을 保護 气体, 熔接 電流, 아크 電壓 및 와이어의 觀點에서 고찰 하고자 한다. 또, 고속 撮影技法을 적용함으로써 얻은 情報를 이용하여 熔滴 移行을 적극적으로 제어하기 위

한 용접 전원 장치에서의 전류波形 제어에 관한 최근의 개발成果에 대하여도 部分的으로 記述한다.

2. 용접 熔滴 移行 形態의 分類

Fig 1은 IIW에서 分類하고 있는 GMAW에서의 용접 熔滴 移行 形態를 도식적으로 나타낸 것이다¹⁾. 그림에서 알 수 있듯이 용접의 移行 形態는 8종류로 구분되어 있는데, 현재로서는 이러한 분류가 가장 널리 사용되는 방법이다. 그들 각각에 대하여 간단히 설명하면 다음과 같다.





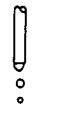

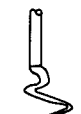

			
Drop Low current GMAW	Repelled High current CO ₂ welding	Short arc GMAW	SMAW Coated electrodes
Globular		Short circuiting	Explosive
			
Projected Intermediate current GMAW	Streaming Medium current GMAW	Rotating High current GMAW	SAW
Spray			Flux-wall guided

Fig. 1 Metal transfer modes based on the IIW classification

2.1 粒狀 熔滴 移行(globular transfer)

粒狀 熔滴 移行은 용접의 직경이 사용된 와이어의 직경보다도 큰 상태로 移行하는 形態를 말하는 것으로, 낮은 용접 電流와 중간 정도의 電流 領域에서 일어나는 드롭형의 移行(droplet transfer)과 비교적 높은 電流로 CO₂ 용접을 실시할 때 발생하는 反撥 移行(repelled transfer)으로 세분 하기도 한다.

2.2 短絡 移行(short circuiting transfer)

短絡 移行은 와이어 끝에서 만들어진 熔滴이 용

융지에 직접 접촉함으로써 熔滴이 移行하는 形態로, 낮은 용접 電流와 電壓으로 CO₂ 용접을 실시하거나 불활성 가스의 조성을 높인 용접 조건 즉, MAG 또는 MIG 용접에서도 볼 수 있다.

2.3 爆發 移行(explosive transfer)

爆發 移行은 용접 과정에서 어떠한 원인으로 熔滴 내에 생성하여 있던 기체가 고온의 아크 열에 의하여 급속히 팽창함으로써 熔滴을 파괴시킨 다음, 작은 입자로 만들어진 熔滴들이 주위에 비산하는 現象이다. 이 現象은 피복 아크 용접과 CO₂ 용접에서 자주 관찰되나, MAG 또는 MIG 용접에서도 발생한다.

2.4 스프레이 移行(spray transfer)

이것은 용접 와이어의 크기 보다 작은 熔滴이 移行하는 形態로, 비교적 高電流 領域에서 Ar을 주성분으로 하는 保護 가스를 써서 MAG 또는 MIG 용접을 실시할 때 관찰 된다. 스프레이 移行 중에서 熔滴 하나 하나가 규칙적으로 移行하는 것은 특히 프로젝트드 移行(projected transfer)이라고 하고, 뾰족하게 녹아 내린 와이어의 先端에서 작은 입자를 形成하면서 熔滴이 흐르는 形態의 移行은 스트리밍 移行(streaming transfer)이라고 부른다. 또, 용융된 와이어의 先端部가 길게 늘어지면서 고속으로 회전하는 상태로 移行되는 것은 回轉 移行(rotating transfer)이라고 한다.

2.5 壁面 移行(flux-wall guided transfer)

壁面 移行은 SAW에서 발생하는 移行 形態의 하나이다. SAW에서의 熔滴 移行은 프로젝트드 移行 形態를 이루는 것이 支配的이지만, 壁面 移行은 아크를 덮고 있는 용융 플럭스 내의 공간에서 용융 금속이 옆으로 비산하는 모양을 나타내는 것이다.

3. 용접 條件과 熔滴 移行 現象의 關係

熔滴 移行에 影響을 주는 요소들에는 保護 가스의 種類와 組成, 용접 電流 및 용접(아크) 電壓 등이 있다. 이 절에서는 와이어를 이용하는 용접法

즉, MAG, MIG 및 CO₂ 熔接에서 전술한 조건들이 어떻게 影響을 미치는지에 관하여 간략하게 記述하고자 한다. 熔滴 移行에 影響을 주는 또 하나의 요소로서 熔接 電源의 極性 즉, DCEP인가 DCEN인가도 검토의 대상이지만 여기서는 편의상 일반적으로 자주 이용되는 DCEP의 경우에 한하여 記述한다.

3.1 CO₂ 熔接

Fig. 2는 탄산가스를 保護 氣로 사용하는 경우에서 熔滴 移行의 形態를 熔接 電流와 아크 電壓의 관계로서 설명하고 있는 것이다. 低電流 및 低電壓 領域에서 CO₂ 熔接을 실시할 경우, 와이어의 끝 부분에 形成되어 있던 熔滴은 용융지에 직접 접촉하는 短絡 狀態에서 용융 金屬이 移行되는 形態가 支配的이다.

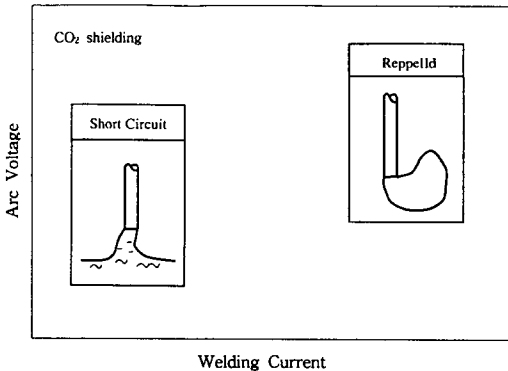


Fig. 2 Effects of welding current and arc voltage on the metal transfer in CO₂ welding

Fig. 3은 이러한 短絡 移行 現象을 고속 카메라로 관찰한 결과를 보여주는 것이다. 와이어 先端에 形成되었던 熔滴은 그 자체의 表面張力에 의하여 둥글게 되지만, 큰 表面張力의 용융지 표면과 접촉한다면 서서히 용융지 쪽으로 빨려들어가게 된다. 그 다음에 熔滴의 형상이 변형되기 시작하면서 熔滴과 용융지의 表面張力 차이는 보다 커지므로 이들 사이에는 완전한 브리지(bridge)가 形成된다. 이렇게 熔滴과 용융지 사이에 브리지가 形成되면, 와이어와 熔滴의 境界部에서는 重力과 함께 電磁氣的인 핀치력이 강하게 작용하게 된다. 그 후, 브리지 상태의 熔滴에서는 중간 부분이 가

늘어지는 네킹(necking) 現象이 발생하는데 그 때 네킹 부분은 가속적으로 성장한 다음 끊어져 短絡 상태가 끝나면서 아크가 再生 된다. 그러나, 熔接 電流와 아크 電壓이 증가하여 높은 電流 및 電壓 領域에서 熔接이 실시될 때 形成된 熔滴은 용융지와 短絡 現象을 일으키지 않는 反撥 移行 形態가 支配的으로 된다.

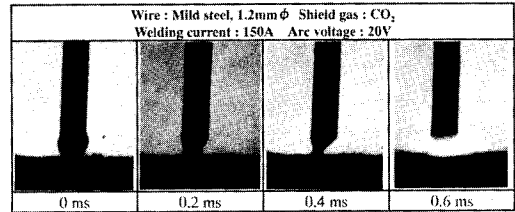


Fig. 3 An example of short circuiting with filming speed of 4,000fps

Fig. 4는 이러한 조건에서 발생하는 反撥 移行 現象을 고속 撮影한 결과를 보여주는 寫眞이다. 탄산가스는 고온에서 CO와 O로 解離되는데, 그 반응은 吸熱 反應이므로 외부에서 에너지를 공급 받아야 한다. 따라서, 이러한 기체를 保護가스로 사용하게 되면, 아크에서의 열 損失이 커지므로 강한 냉각 작용을 받는 것과 같은 결과를 초래하게 되어 아크 기둥의 크기도 수축된다. 이 때문에 아크의 極點은 熔滴의 下端部에 집중적으로 발생하며, 그 때의 아크력은 熔滴을 밀어올리는 작용을 한다. 中電流 또는 高電流 領域에서는 와이어 先端의 용융 金屬에 작용하는 전자기적 핀치력과 전술한 아크력이 熔滴을 밀어 올리는 데 큰 影響을 미친다. 그 결과, 熔滴은 큰 덩어리가 되어도 모재와의 短絡이 없이 와이어 先端으로 부터 離脫하게 되는데 이 때 다량의 스패터가 발생한다. 또, 短絡 移行이 일어

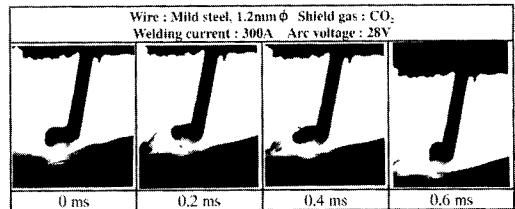


Fig. 4 Repelled transfer in CO₂ welding with filming speed of 4,000fps

나는 小電流 및 低電壓 領域과 反撥 移行이 일어나는 中電流 및 中電壓 領域 사이에서는 앞서 언급한 移行 形態들이 섞이는 구간이 된다.

3.2 Ar 및 Ar계 混合 가스

Fig. 5는 Ar을 주성분으로 하여 CO₂, O₂ 및 He 등 다른 가스가 혼합된 保護가스를 사용하였을 경우의 熔滴 移行 形態를 熔接 電流과 아크 電壓의 관계로 정리한 것이다. 低電流 및 低電壓 領域에서는 CO₂ 熔接에서와 같이 短絡 移行을 보이고 있다. 그러나, 熔接 電流가 높아짐에 따라 비교적 높은 아크 電壓 領域이 되면서 CO₂ 熔接에서 볼 수 있던 反撥 移行과는 다른 드롭 移行으로 바뀐다.

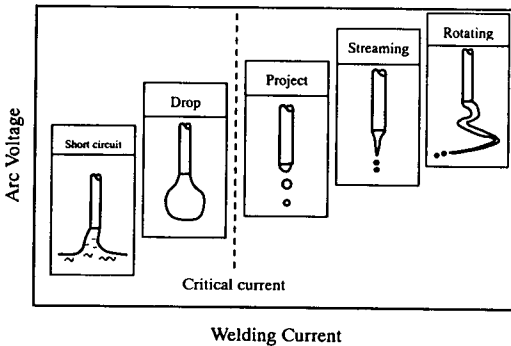


Fig. 5 Effects of welding current and arc voltage on the metal transfer in GMA welding with mixed gas

한편, Fig. 6은 이러한 드롭 移行 現象을 高速 撮影한 결과이다. Ar은 불활성 기체로서 CO₂의 경우와 같은 해리가 없으므로 아크 기둥으로 부터의 열 손실이 비교적 적으며 열전도를 또한 작다. 따라서, 아크가 熔滴 전체를 감싸는 形態를 나타내며 熔滴을 밀어 올리는 힘 또한 분산 된다. 이러한 이유로 熔滴이 重力 方向으로 길게 늘어지는데 전자기적 핀치력은 그러한 現象을 더욱 加速 시킨다. 또, 이 조건에서는 熔滴 표면에서 플라즈마 기류에 의한 마찰력도 작용하여 와이어 끝으로 부터의 熔滴 離脫이 원활하게 된다. 粒狀 移行에서 스프레이 移行으로 바뀌는 臨界 電流에 達하면 와이어 직경과 비슷한 직경의 熔滴들이 규칙적으로 용융 지 쪽으로 移行하는 프로젝트드形을 취하게 된다.

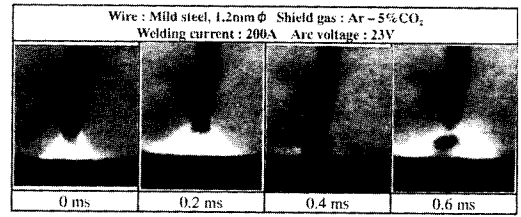


Fig. 6 High speed (4,000fps) photographs showing drop transfer

Fig. 7은 프로젝트드 移行 現象을 高速 撮影한 결과의 하나이다. 프로젝트드 移行의 移行 機構는 전술한 드롭 移行과 같으나, 熔接 電流의 증가에 따라 핀치력과 熔滴 表面에 작용하는 플라즈마 기류의 마찰력이 커지는 것이 다르며 또, 熔滴이 와이어 직경 보다 커지기 전에 비교적 규칙적으로 離脫하는 것이다. 高電流 및 高電壓 領域에서는 Fig. 8에 제시한 것처럼 스패터 발생과 아크 길이 변동이 거의 없는 스트리밍 移行이 되므로 작업성도 좋아진다. 스트리밍 移行에서는 높은 熔接 電流에 의하여 프로젝트드 移行 보다도 핀치력과 플라즈마 기류에 의한 마찰력의 影響을 더 많이 받기 때

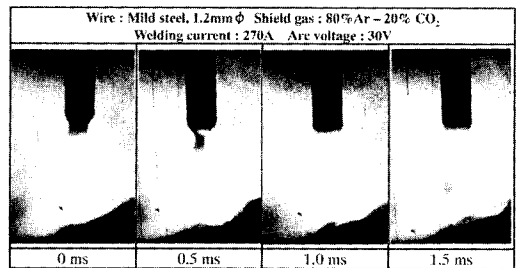


Fig. 7 Typical frames of projected transfer with filming speed of 2,000fps

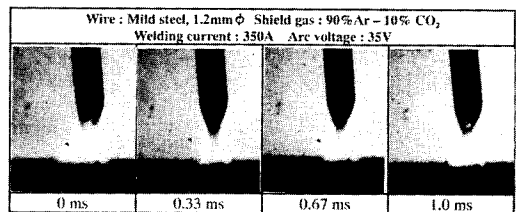


Fig. 8 Streaming transfer with filming speed of 3,000fps

문에, 와이어 先端部는 더욱 뾰족하게 되면서 미세한 熔滴이 연속적으로 낙하하게 된다. 스트리밍 移行 電流 보다 熔接 電流를 더 높이면 용융 금속이 와이어 끝에서 길게 늘어지면서 회전하는 이른바 回轉 移行으로 바뀐다. Fig. 9는 이러한 回轉 移行 現象을 관찰한 것이다. Ar에 CO₂를 혼합한 2元系 保護 氣스로 대표되는 MAG 熔接에서는 回轉 移行 領域에서 안정한 回轉 移行을 얻을 수 없으며, Fig. 10과 같이 가늘고 긴 용융 금속의 熔滴이 비산하는 現象을 쉽게 관측할 수 있다. 이러한 現象을 개선하기 위하여 개발 된 것이 T. I. M. E. 法으로 Ar, CO₂, O₂ 및 He 등을 혼합한 3元系 또는 4元系 保護 氣스를 씌우므로써 高電流 MAG 熔接이 가능하도록 하고 있다²⁻⁵⁾. T. I. M. E. 法을 사용하면

안정된 回轉 移行을 얻을 수 있으므로, 종래에는 직경이 1.2mm의 와이어로 400A 이하의 熔接 電流에서 15mpm 정도였던 와이어 송급 속도를 크게 높일 수 있다. Fig. 11은 Ar계 혼합 氣스를 이용하여 스프레이 移行 領域 및 回轉 移行 領域에서 熔接을 행한 시험편들의 단면 사진으로서 移行 形態에 따른 熔接부의 모양을 잘 구분할 수 있다.

4. 와이어의 種類와 熔滴 移行 現象

이 절에서는 DCEP 조건으로 鐵系 플럭스 코어드 와이어를 이용하는 CO₂ 熔接과 Ar 분위기에서 Si 합금의 MIG 熔接시 나타나는 熔滴 移行 現象을 중심으로 記述하고자 한다.

4.1 鐵系 플럭스 코어드 와이어 CO₂ 熔接

鐵系 플럭스 코어드 와이어는 슬래그系와 메탈系로 나눌 수 있고, 그 각각은 다시 CO₂ 熔接用과 Ar과 CO₂ 혼합 氣스用으로 나뉘어 진다. 플럭스 코어드 와이어는 고능률이며 아크 安定性도 우수하고 스패터 발생량도 낮으므로 작업성이 양호한 특징이 있다. 슬래그系 플럭스 코어드 와이어는 그 밖에도 熔接 비드의 品質이 양호하다. 한편, 메탈系 플럭스 코어드 와이어는 통상의 솔리드 와이어와 같은 방법으로 사용되지만 熔接 能率이 매우 높다. 이 熔接 材料는 低電流 및 低電壓 領域에서 사용되는데, 熔滴의 移行 形態는 솔리드 와이어와 같이 短絡 移行을 나타낸다. 熔接 電流와 電壓이 높아지면 슬래그系, 메탈系 다같이 粒狀 熔滴 移行을 보이지만, 솔리드 와이어 熔接에서 나타나는 것과 같이 큰 熔滴 粒子가 아크력에 의하여 위로 밀어올려지는 反撥 移行과는 다르다. Fig. 12에서는 용융 금속이 와이어의 외피(금속) 쪽으로 모이는 形態를 보이며 그 크기가 와이어의 직경 정도로 성장하면 모재 표면의 용융지로 移行하는 것을 볼 수 있다. 또, 이 사진에서 알 수 있는 것과 같이 와이어 끝에서 뾰족한 용융 플럭스의 기둥이 形成되어 있는 것도 플럭스 코어드 와이어의 移行 特性이라고 할 수 있다. 이러한 熔滴 移行 形態는 스테인리스강의 플럭스 코어드 와이어 熔接에서도 유사하게 나타난다.

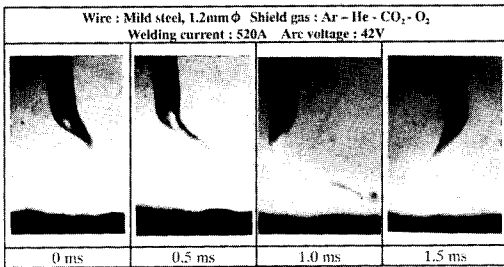


Fig. 9 Rotating transfer (2,000fps)

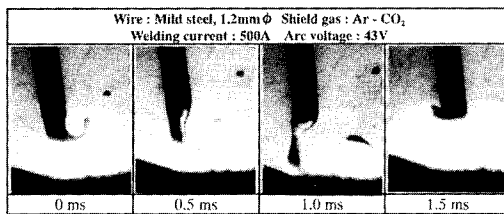


Fig. 10 Unstable rotating transfer (2,000fps)

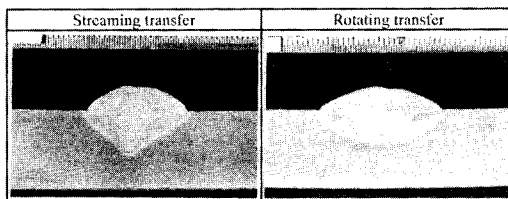


Fig. 11 Bead cross-section change with metal transfer modes

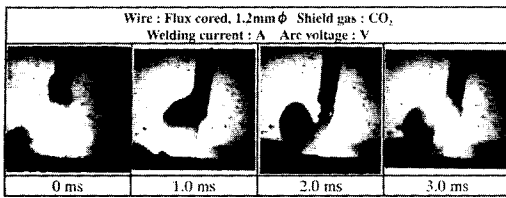


Fig. 12 High speed (1,000fps) photographs showing metal transfer in flux cored arc welding

4.2 Al 및 Al합금 와이어의 MIG 용접

이 종류의 와이어의 경우, 低電流 및 低電壓 領域에서는 鐵系 슬리드 와이어와 같이 短絡 移行을 보이지만, 스프레이 移行의 臨界 電流 이상인 中電流 또는 高電流 領域에서는 와이어의 재질에 따라 熔滴 移行 形態가 달라진다. Fig. 13은 스프레이 移行 조건에서 純 Al 와이어와 Al-Mg 합금 와이어의 熔滴 移行 形態를 비교한 것이다. 純 Al 와이어의 경우는 熔滴의 離脫이 규칙적인 프로젝트드 형을 보여준다. 한편, Al-Si 합금 와이어도 純 Al 와이어와 같은 移行 形態를 나타낸다. Al-Mg 합금 와이어의 경우는 전체적으로는 프로젝트드 移行을 보이지만, 일부는 사진에서 알 수 있듯이 熔滴의 移行 직전 또는 직후에 爆發을 수반하는 것이 있다. 이것은 고온 상태의 熔滴 중에 존재하는 Mg의 고속 증발에 기인하는 것으로 생각되는데, 그 이유는 와이어의 Mg 함량을 증가시키에 따라 이와 같은 爆發 現象이 자주 관찰되기 때문이다.

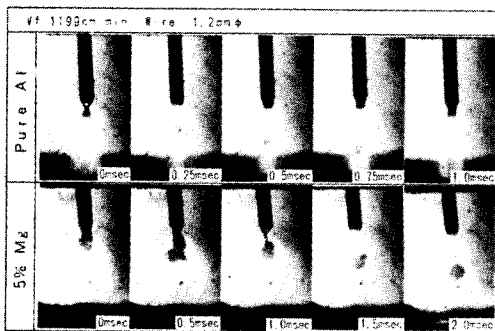


Fig. 13 Effect of alloy addition on the metal transfer in GMA welding with aluminum wire

5. 熔接 電流 波形 制御에 의한 熔滴 移行 現象의 改善

前述한 바와 같이 熔滴 移行의 形態는 熔接 電流, 아크 電壓 또는 保護 가스의 종류와 조성 및 와이어의 재질과 직경에 따라 다르다. 그러나, 移行 形態의 적극적 제어 수단으로서 熔接 電源에 波形 制御 概念의 機能을 賦與하는 방법도 개발되고 있다. 이러한 波形 制御 技術의 대표적인 실시 예는 펄스 MIG/MAG 熔接法이라고 하여도 좋을 것이다. 펄스 MAG 熔接法은 높은 펄스 電流 (I_p)와 낮은 베이스 電流 (I_b)를 주기적으로 와이어에 공급하는 전력 제어법으로, 이미 오래 전부터 이 방법을 이용하여 臨界 電流 이하의 熔接 電流 領域에서 스프레이 移行을 실현하고 있다. Fig. 14는 펄스 MAG 熔接에서 1펄스-1熔滴 移行 制御의 실현 예를 보이고 있다. 펄스 電流 期間(T_p)에는 熔滴의 形成과 동시에 I_p 에 상응하는 펀치력으로 熔滴이 와이어에서 離脫할 수 있는 네킹을 일으킨다. 이와같이 펄스 電流에 同期시킨 熔滴은 용융지에 접촉하지 않고 移行하기 때문에 스패터가 거의 없는 프로젝트드 移行을 구현할 수 있다. 한편, 펄스 MAG 熔接法으로 고속 熔接을 실시할 때, 용융지가 아크를 따라오도록 하기 위하여는 아크 전압을 낮추어 아크의 길이를 짧게하는 경우가 있다. 이

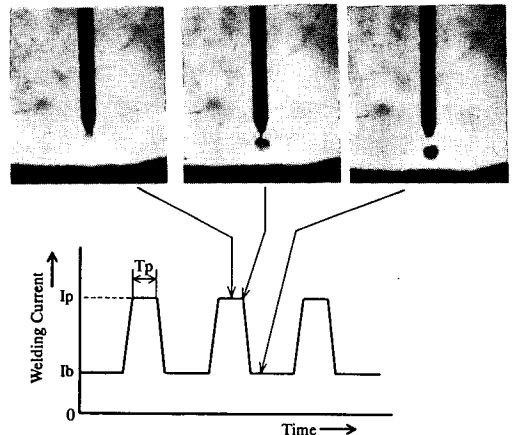


Fig. 14 An example of power source design concept for one-pulse one-drop transfer in GMAW process

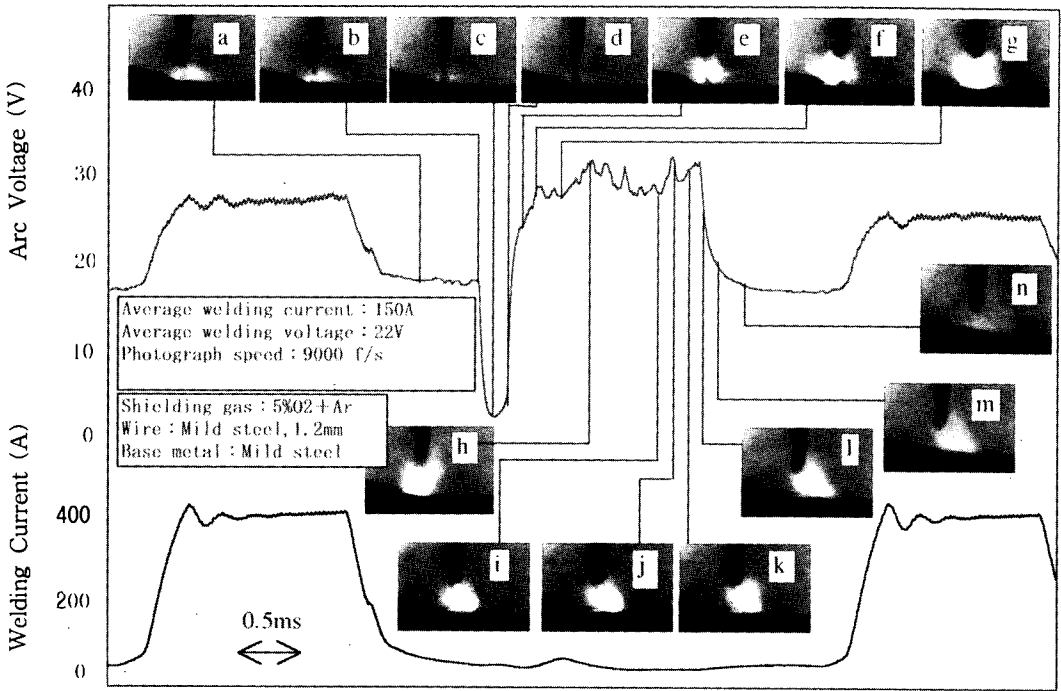


Fig. 15 Effect of instantaneous short circuiting on the arc voltage change. The voltage-time traces demonstrate sharp rise of arc voltage just after the short circuiting takes place while the welding current remains stable

때의 移行은 아크 길이가 짧아졌기 때문에 용융지에 熔滴이 빈번히 短絡되는 경우도 있다. 이렇게 熔滴이 短絡을 이루고 있는 경우 베이스 電流를 제어하여 스패터를 억제하는 것도 高速 撮影 技術의 활용 결과라고 할 수 있다. 최근에는 高速 撮影 결과와 그 때의 熔接 電流 및 電壓 波形을 同期시켜 동시에 기록할 수 있게 되었는데, 이러한 技術은 고성능 熔接 電源 裝置의 개발에 중요한 역할을 하고 있다. Fig. 15는 펄스 MAG 熔接에서 발생하는 熔滴의 瞬間的 短絡 現象을 熔接 電流 波形과 熔接 電壓 波形에 同期시켜 기록한 실험 결과이다. 高速 撮影 結果를 이용하여 熔滴이 용융지에 접촉할 때 발생하는 微小 短絡은 短絡의 해방과 함께 비정상적인 아크 電壓의 상승을 일으킨다는 사실이 관찰되었고, 이러한 아크 電壓의 비정상 상승을 검출할 수 있었기 때문에 熔接機에서 아크 電壓의 제어가 가능하였다. 이러한 결과들을 이용함으로써, 펄스 MAG 熔接에서 熔接 電流와 熔接 電壓 조건들을 자동적으로 설정할 수 있는 기능을 탑재한 高

性能 熔接機도 開發 되기에 이르렀다.

6. 結 言

熔滴의 移行 形態는 熔接 電流, 熔接 電壓, 保護 가스 및 와이어 재질 등 여러 가지 요소에 따라 변화 한다. 本文에서 언급되었던 여러가지 因子 및 그 影響에 관한 내용은 熔接 現象과 制御라는 관점에서 볼 때, 오히려 斷片的이고 定性的인 解説에 지나지 않는다. 그러나, 여기에서 소개하였던 熔滴 移行 現象의 觀察(또는 計測)과 그 解析, 그리고 이 내용에는 포함되지 않았던 熔滴 移行 機構의 數值 解析 등 보다 앞선 技術을 活用한다면 熔接 아크 現象이 좀더 깊이 있게 이해할 수가 있을 것이다. 그러한 결과는 한 단계 더 높은 品質과 能率의 技術을 搭載한 熔接機의 出現으로 이어질 수 있을 것으로 믿는다.

後記

本文 内容의 翻譯과 原稿 整理를 맡아준 浦項産業科學研究院의 金伎徹 博士에게 깊이 感謝드리는 바이다.

參考文獻

1. IIW Commission XII: Classification of Metal Transfer on Electric Arc Welding Process, IIW Doc. XII-636-76 (1976)
2. 今泉, 加藤: 大電流溶接法: T. I. M. E. 프로세스의開發, 溶接技術, 38-2 (1990), pp. 41-47
3. V. Stenke, R. Lahnsteiner, H. Schoenberger: The T. I. M. E. Process Characteristics of New GMAW Technology, IIW Doc. XII-1233-91 (1991)
4. J. R. Mathews, J. F. Potter, J. Church: An Evaluation of T. I. M. E. Welding of HY80 Plate, Welding Jour., 70-2 (1991), pp. 35-41
5. H. Yamamoto, S. Harada: Arc Characteristics and Metal Transfer in High Current MAG Welding, Proceedings of the 5th International Symposium of JWS, Vol. 1 (1990), pp. 115-120
6. M. Ushio, H. Yamamoto, Y. Nishida, T. Mita: Recent Advances in Welding Power Systems for Automated Welding, Trans. of JWRI 23-1 (1994), pp. 1-6
7. H. Yamamoto, S. Harada, T. Yasuda: The Development of Welding Current Control Systems for Spatter Reduction, Welding International, 4-5 (1990), pp. 398-407
8. H. Yamamoto, S. Harada, A. Nitta, T. Nakamata, T. Uezono: Automatic Setting of Welding Conditions by Fuzzy Controlled CO₂/MAG Welding Machine, Automation Technology of Arc Welding, II (1996), pp. 127-132
9. 山本, 中マタ, 上園, 全, 牛尾, 田中: パルス MAG溶接における微小短絡現象, 第126會溶接アーク物理研究委員會資料 (1997)