

## 解 說

大韓 熔接學會誌  
第4卷, 第1號, 1986年 3月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol. 4, No. 1, Mar., 1986

# 아크용접시 금속이행현상 연구에 관하여

정 재 필\*·강 희 재\*\*·이 보 영\*·황 선 효\*

## 1. 서 론

금속이행이란 소모성 전극을 이용한 arc 용접에서 금속이 용융된 와이어로부터 모재로 이동하는 현상을 말하며 넓게는 용적의 이행 뿐만 아니라 스패터 등과 같은 불필요한 이행까지도 포함하는 의미이다.<sup>1),2)</sup>

용접시 스패터와 흠(fume)발생, 용입형상, 용접자세, 용융지안정성 및 용접부의 기계적 성질 등이 금속이행현상에 의해 많은 영향을 받기 때문에 효과적인 용접을 위해서는 이 금속이행현상을 적절히 조절해야 한다<sup>3)</sup>. 이를 위해서는 금속이행현상, 금속이행기구, 금속이행에 미치는 여러가지 변수 등에 대하여 알아야 할 필요성이 있으며, 이러한 필요성 때문에 많은 사람들이 오래 전부터 금속이행현상에 관한 연구를 수행하여 왔다. 그러나 용적이 고온의 arc속에서 짧은 시간내에 고속으로 이행하기 때문에 금속이행현상의 연구에는 많은 어려움이 있으며, 현재까지도 정확한 금속이행현상에 관한 이론은 밝혀지지 않고 있다. 따라서 금속이행에 관해서는 앞으로 많은 연구가 필요하며 본 해설은 현재까지 연구발표된 금속이행에 관한 자료들을 종합정리하였다.

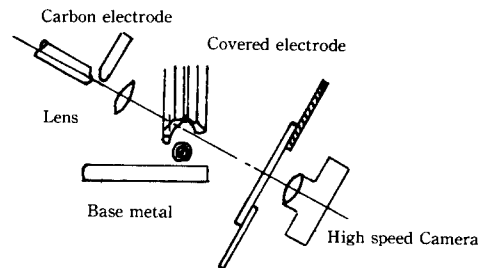
## 2. 금속이행현상 연구를 위한 技術

용접시 용적은 강력한 빛을 발하는 고온의 arc속에서 고속으로 이행하기 때문에 이를 육안으로 관찰하기는 매우 어렵다. 따라서 금속이행현상 연구시에는 이러한 난점을 극복하기 위해 고속카메라, 오실로그래프, 스트로보스코프 등의 장비가 필요하다.

## 2.1. 고속카메라

금속이행현상을 연구하기 위해서는 용접시 금속이 이행하는 모습을 촬영 할 필요가 있다. 촬영을 위해서는 강력한 arc 빛을 극복해야 하며 또한 용적이 고속으로 이행하기 때문에 빠른 속도로 찍어야 한다. 이 경우에 필수적인 것이 고속카메라이며, 화면의 분할 없이 용접현상을 촬영할 때의 최대 촬영속도는 16mm film의 경우, 대략 6000fps(frame per sec)이다.

고속카메라 촬영을 위한 조명방법은 대략 3가지가 차례로 발달해왔으며 가장 오래된 조명방법은 촬영시 또다른 arc를 일으켜 이 빛을 배광(背光)으로 사용하는 경우이다<sup>4)</sup>(Fig. 1, Table 1). 또한 현재 가장 널리 사용하는 조명방법은 크세논(Xe) 램프나 할로젠 램프를 사용하는 방법<sup>5)</sup>(Fig. 2, Table 2)이며, 레이저를 이용한 조명방법은 최근에야 사용되기 시작한 것으로서 양호한 사진을 얻을 수 있는 방법이다<sup>6)</sup>(Fig. 3, Table 3).



**Fig. 1.** High-speed cine-photography from slantingly looking up direction to observe the phenomena inside the sheath of welding electrode.

\* 한국기계연구소, 정희원

\*\* 한양대 금속과출

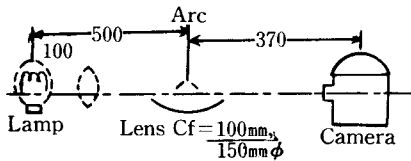


Fig. 2. Photographing method of high-speed photographs

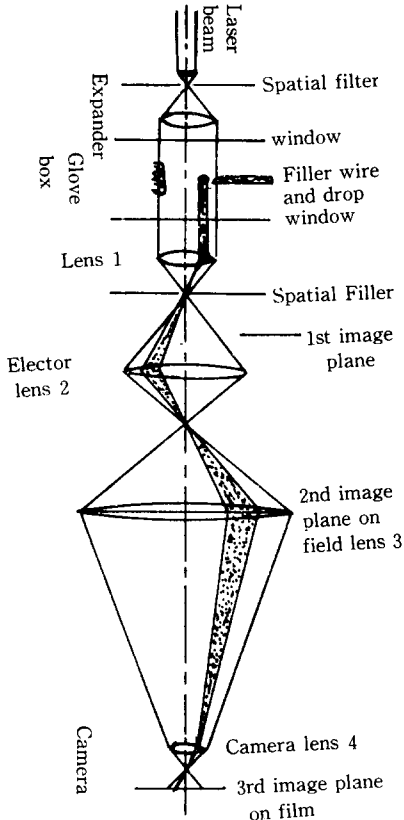


Fig. 3. Complete optical layout. The interference filter has been removed to allow enough arc light through the optical train for the film to record the arc path. An erector lens and a field lens have been added.

Table 1. Data in high speed cine photography

camera;	'Hitachi' rotating prism type
film;	Kodak 16mm Tri-x negative
filter;	N. D. filter (ND-8)
frame speed	3000 frame/sec
aperture	f 22
back lighting;	carbon arc. DC 150 Amp.
welding current;	AC 160 Amp. 50 cycle

Table 2. Photographic parameters of high-speed photographs

Parameters	Values
Camera	HIMAC-16HM(Hitachi)
Lamp	6kw·Xe lamp
Picture speed	2000 fps
Lens	f = 135mm(52mm $\phi$ )
Filter	ND8 + ND4 + R60 + L39
Iris	22
Film	7224 - AXN430 kodak

Table 3. Equipment Specifications

Laser:	Spectra Physics, 2mW He-Ne Model 145-02
Expander with spatial filter:	Spindler & Hoyer 258 Model 038655
Lens 1:	f 150mm, 6 elements, self-designed <sup>(a)</sup>
Neutral density filter:	ND 0.5, OPCO Labs, Leominster, Mass.
Erector lens:	Mamiya/Sekor 1:2/50
Diaphragm:	NRC Model 1D-1.5 opened 1.5 mm
Interference filters:	633nm, Andover Corp., Lawrence, Mass.
Field lens:	f 200mm bi-converse simple lens, 40mm diameter
Camera lens:	Schneider Tele-Xenar 1:2.8/75
Spacer ring:	10mm
Camera:	Redlake Hycam, model 41
Optical benches and accessories:	Klinger Scientific

(a) This lens may be replaced by a commercial f 150mm photographic or reproduction lens with a clear aperture of 25mm or more.

일반 아아크 용접법에서는 이상과 같은 빛을 이용한 고속카메라가 이용되나 서브머지드 아아크 용접등의 경우에는 X-선을 이용하는 X-선 고속카메라를 사용한다.

## 2.2. 오실로그래프

이 기기는 용접시 전류 및 전압의 전기적 특성을 기록하는 것으로서 보통은 고속카메라와 연결하여 촬영과 기록을 동시에 행하는데 사용되며, 금속이행 연구하는데 큰 도움을 준다.

오실로그래프로 기록한 전류 및 전압특성과 금속이행형태와의 관계는 Fig. 4와 같다.

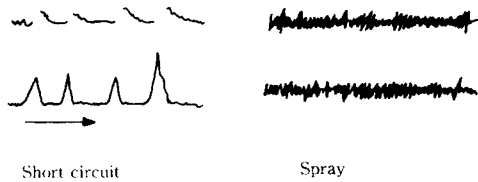


Fig. 4. Typical oscillograms of different type metal transfer mode

그 외에 스트로보스코프로도 있으나 사용빈도가 위 두 경우에 비해 낮은 편이다.

### 3. 금속이행형태의 분류

금속이행은 용접법과 용접조건에 따라 여러가지 형태로 나타난다. 이 여러가지 형태들은 short circuit-MIG용접의 경우처럼 단순하게 나타나기도 하지만 어떤 경우에는 복잡한 형태로 나타난다. 즉 두가지 이상의 이행형태가 빠른 속도로 연속해서 일어나는 경우, 혼합되어 동시에 일어나는 경우 또는 두가지 이행형태의 중간형이 나타나는 경우 등이 있다.

이제까지 논의되어온 분류방법으로는 이행을 지배하는 힘에 의한 분류방법과 용적의 크기나 이행빈도수와 같은 이행하는 모양에 의한 현상학적 분류방법이 있다. 이행을 지배하는 힘에 의한 분류방법은 학문적인 견지에서 의의가 있을 수는 있으나 그동안의 많은 연구에도 불구하고 여러가지 힘의 세기 및 효과 등에 관하여는 정확하게 밝혀지지 않았기 때문에 이에 따른 분류에는 아직 많은 어려움이 있다.<sup>2)</sup> 최근의 IIW분류방법은 분류하기가 비교적 쉽고 앞으로의 이행현상과 arc의 물리학적 연구에 많은 도움을 줄 수 있는 현상학적 분류방법을 채택하고 있다.

#### 3.1. 분류의 예

전술한 바와 같이 금속이행형태의 분류에는 두가지 방법이 있다. 이 방법들에 의한 분류가 70년대 초에 W. Ruckdeschel, J. C. Needham, JIW<sup>7)</sup>에 의해 시도되었으며, 76년에 이르러 IIW에서 이것들을 서로 수정보완한 분류방법을 발표하였다(Table 4)<sup>2)</sup>.

이행형태의 분류는 주로 IIW에 의해 주도적으로 수행되어왔기 때문에 76년 이후론 대개 이 분류방법에 따르고 있다.

Table 5는 현상학적 방법에 의한 W. Ruckdeschel의 분류방법<sup>1)</sup>이고, Table 6은 이행을 지배하는 힘에

Table 4. IIW classification of metal transfer

Designation of transfer type	Welding processes(examples)
1. Free flight transfer	
1.1 Globular	
1.1.1 Drop	Low-current GMA
1.1.2 Repelled	CO <sub>2</sub> shielded GMA
1.2 Spray	
1.2.1 Projected	Intermediate-current GMA
1.2.2 Streaming	Medium-current GMA
1.2.3 Rotating	High-current GMA
1.3 Explosive	SMA(coated electrodes)
2. Bridging transfer	
2.1 Short-circuiting	Short-arc GMA, SMA
2.2 Bridging without interruption	Welding with filler wire addition
3. Slag-protected transfer	
3.1 Flux-wall guided	SAW
3.2 Other modes	SMA, cored wire, electroslog

Table 5. Ruckdeschel's classification of metal transfer

- 1A. Droplet transfer
- 1B. Irregular droplet transfer
2. Normal spray transfer
3. Filamentary spray transfer
4. Rotating spray transfer
5. Dip transfer
6. Pulsed transfer

Table 6. Needham's classification of metal transfer

1. Gravity transfer
2. Electromagnetic transfer
  - 2.1 Projected transfer
  - 2.2 Streaming transfer
  - 2.3 Torque transfer
  - 2.4 Lateral (alternative) transfer
  - 2.5 Pulse transfer
  - 2.6 Magnetic transfer
  - 2.7 Short circuit transfer
3. Mechanical transfer
4. Transfer by vaporization or explosive forces transfer

의한 J. C. Needham의 분류방법<sup>8)</sup>이다.

#### 3.2. 각 금속이행형태별 설명

##### 3.2.1. IIW분류에 따른 금속이행형태의 설명 (Fig. 5)

금속이행에는 여러가지 이행형태들이 있으나 최근

대부분의 논문들이 IIW가 분류한 이행형태에 따라 기술하고 있으므로 우선 IIW가 분류한 각 이행형태별 특징을 설명하고자 한다.

#### Free flight transfer

용융물과 와이어끝(tip) 사이에 물리적인 접촉없이 arc를 통해 용적이 이행된다.

#### Globular transfer

와이어의 직경보다 큰 용적이 초당 수 개씩 이행하며 중력이 이행에 큰 영향을 미치는 힘이다.

#### Drop transfer

용적의 무게가 이행을 저해하는 힘을 초과하는 순간까지 용적이 성장한 다음, 중력에 의해 분리된다. 이 형태는 저전류 밀도의 용접에서 발생한다.

#### Repelled transfer

주로 탄산가스용접법을 이용하여 강을 용접할 때 나타나는 이행형태로써 용적하단부의 좁은영역에 arc가 집중되며, 이로 인한 전자기적 반발력 때문에 커다란 용적이 형성된다. 용적은 전자력과 중력등 용적에 작용하는 힘의 비대칭성 때문에 옆으로 치우쳐 이행한다.

#### Spray transfer

이 이행형태는 고전류밀도의 용접시에 발생하며 와이어의 직경보다 작은 일련의 용적들이 많은 빈도수로 이행한다. 전자기력이 이 형태에 큰 영향을 미치는 힘이지만 기계적 힘이나 기계역학적힘도 spray이행을 유발시킬 수 있다. 이 이행형태는 globular 이행형태의 전류범위보다 높은 전류에서 발생한다.

#### Projected transfer

둥글고 작은 용적이 중력에 의해 이행될 때보다 훨씬 빠른 속도로 모재로 방출된다. 이 형태에서는 전자기력이 가장 큰 영향을 미치며 와이어의 끝은 뾰족하지 않다.

#### Streaming transfer

Projected이행의 특별한 형태로써 용적이 뾰족한 와이어 끝으로부터 액체가 흐르듯이 연속적으로 이행한다.

#### Rotating transfer

Plasma-MIG용접시 또는 와이어 extension이 긴 경우와 고전류밀도를 사용하는 용접에서 발생하는 이행형태이다. 저항열, arc열 또는 다른 부수적인 열원에 의해 가열되어 부드러워진 와이어끝이 전자기

력에 의해 이리저리 휘게되며 용적은 빠른속도로 흰 와이어의 접선방향으로 이행한다.

#### Explosive transfer

몇몇 피복 arc용접시에서와 높은 압력하의 Al-MIG 용접에서 관찰되는 이행형태이다. 용접시 용적내부에 기포가 형성되며, 이것이 폭발하면서 용적이 비산되어 이행한다.

#### Bridging transfer

와이어에 매달린 용적이 용융물과 접촉하여 이행한다.

#### Short circuiting transfer

용융지와 용적의 접촉으로 인해 전기적 단락이 일어나는 bridging transfer의 한 종류이며, 전자기력과 표면장력이 용적을 이행시키는 힘이다.

#### Bridging transfer without interruption

부가적인 소모성 와이어 (additional consumable wire)를 사용하는 용접시 나타나는 이행형태로써 저항열에 의해 뜨겁게 가열된 와이어가 arc를 발생시

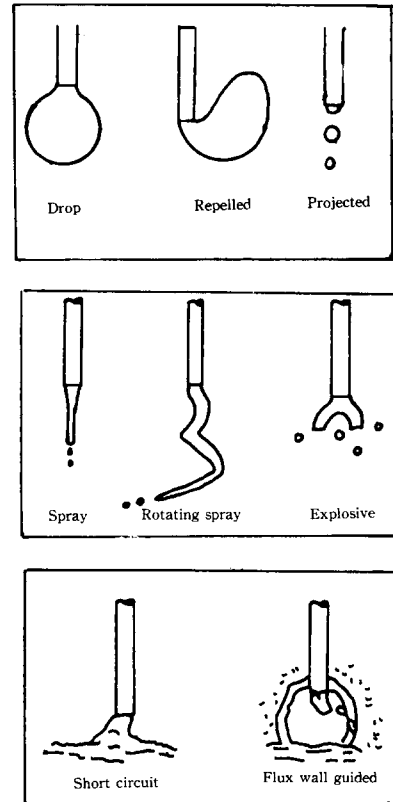


Fig. 5. Schematic representation of metal transfers

키지 않고 액체처럼 죽 흘러서 이행한다.

Flux-wall guided transfer

전극과 용융지가 후락스로 보호되는 용접법에서 발생하는 이행형태로서 용적은 후락스의 空洞속에서 이행하며 용적과 후락스사이의 wetting 또는 표면장력이 가장 큰 영향을 미친다.

3.2.2. 기타

본질에서는 IIW분류에 속하지 않는 이행형태에 관해서 설명하기로 한다.

Drop spray transfer<sup>(10),(11)</sup>

연강—MIG(Ar-5%O<sub>2</sub>) 용접시 globular와 streaming이행 사이의 좁은 임계전류영역(약 20A)에서만 나타나는 이행형태로서 금속이 이행하는 모양은 IIW분류의 projected형태에 속한다. 하지만 drop spray는 비금속—MIG용접에서 나타나는 projected형태와는 이행형태의 발생영역을 고려할 때 Fig. 6과 같이 구별된다.

Drop spray이행은 globular와 streaming 이행에 비해 스패터와 흠(fume) 발생량이 적고(Fig. 7), 와이

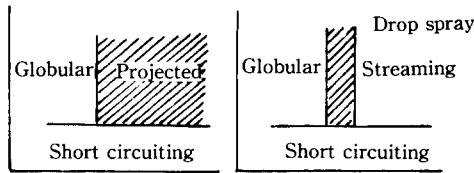


Fig. 6. Schematic diagram of relationships between metal transfer, welding current, and arc voltage

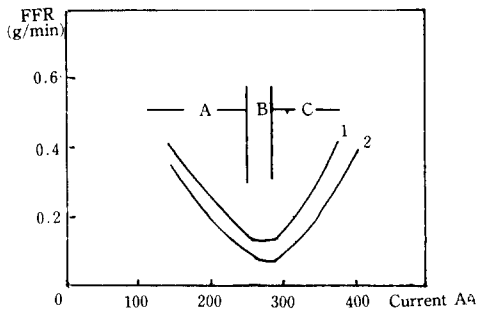


Fig. 7. Fume formation rate of different metal transfer modes; A, globular; B, drop spray; C, streaming spray

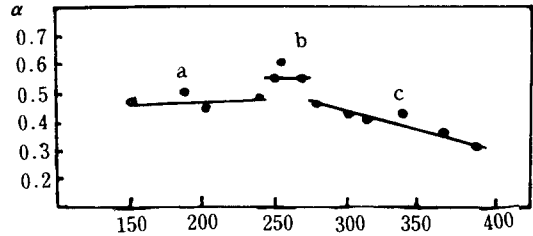


Fig. 8. Variation of wire melting efficiency,  $\alpha$ , with welding current, (a) globular transfer (b) drop spray transfer (c) streaming spray transfer

어 용용효율은 더 좋은 장점(Fig. 8)등이 있기 때문에 이 이행형태의 발생영역을 넓힐 수만 있다면 현장에서 매우 유용하게 사용될 수 있는 이행형태이다.

Meso spray transfer<sup>(12)</sup>

Al-MIG용접에서는 arc길이가 감소함에 따라 단위 용접전류당 와이어의 용용속도가 증가하는 현상(intrinsic self-regulating effect of arc length)이 있는데 이 현상이 일어나는 전압범위 내에서의 이행형태를 meso spray이행이라고 한다. 이것은 전압과 와이어 용용속도의 단계만을 고려했을 경우의 이행형태로서 Fig. 9는 이 이행형태가 전류에는 거의 관계없이 단락이 일어나지 않는 낮은 전압범위에서 발생함을 보여준다.

Fig. 10은 Al-MIG용접에서 나타나는 각 이행형태에 따른 전극끝과 arc모양에 대한 모식도로서 그 모양이 서로 다름을 보여준다. meso spray이행의 “intrinsic self-regulating effect of arc length”는 arc형상에서 기인하는 열유입형태의 변화 때문으로 알려져

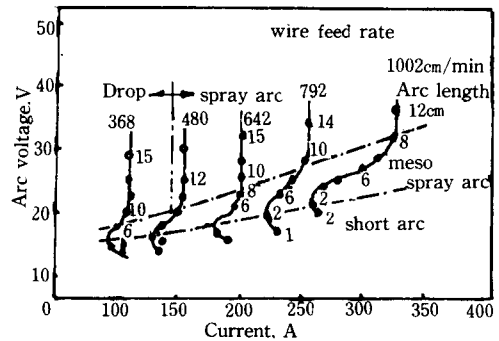
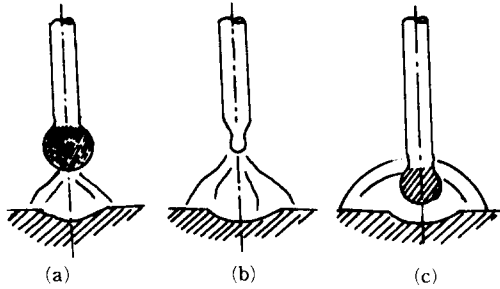


Fig. 9. Voltage/Current relationships for various wire feed speed in MIG-welding aluminum. Material: 1.6mm diameter A5183 wire in argon.

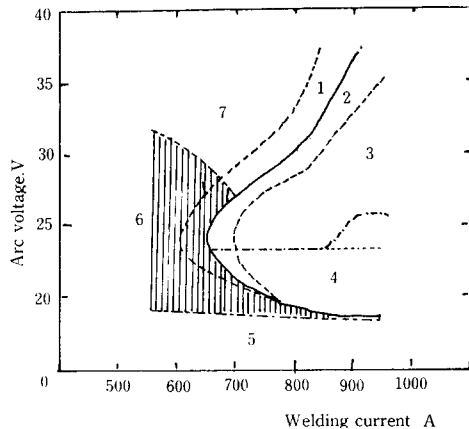


**Fig. 10.** Schematic illustrations of shapes of arcs and electrode ends for three typical transfer modes: (a) droplet (b) spray (c) mesospray

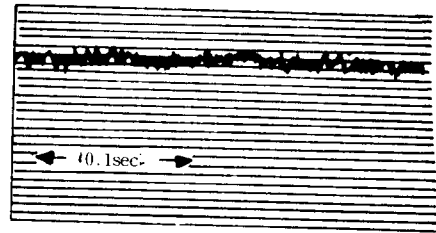
져 있다.

Instant short circuit transfer<sup>13)</sup>

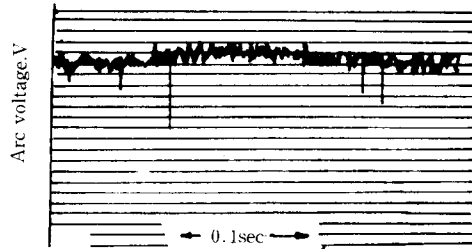
소위 buried arc라고 하는 저전압 고전류의 MIG용접에서 발견되는 이행형태로써 외형적인 모양은 streaming형태지만 용적이 물의 흐름처럼 연속적으로 이행하다가 가끔 순간적으로 단락이 일어나는 이행형태며 그 발생영역은 Fig.11과 같다. 이 형태는 워낙 짧은 시간에 일어나기 때문에 오실로그래프에 의해서만 관찰이 가능하며 만일 단락이 일어나지 않는다면 streaming형태와 비슷하다(Fig. 12).



**Fig. 11.** Relationship between droplet transfer, welding current, and arc voltage. Shielding gas —Ar+25%CO<sub>2</sub>; welding speed —60. mm/min; L—20mm. 1—globular+projected; 2—projected+streaming; 3—streaming; 4—instant short circuiting; 5—stubbing; 6—short circuiting; 7—globular



Streaming

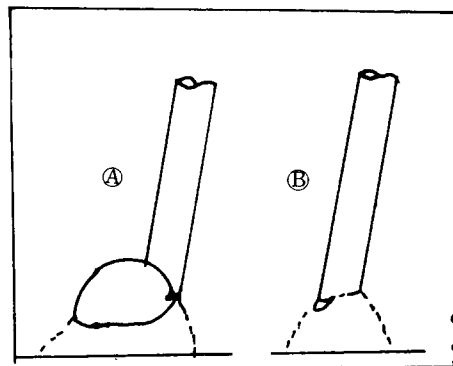


Instant short circuiting

**Fig. 12.** Appearance of oscillogram

Nonaxial projected transfer<sup>14)</sup>

와이어의 직경보다 작은 용적이, 그림13과 같이, 예각을 형성한 와이어의 한쪽 끝에서 분리하지만, 용적들의 대부분이 arc영역 내에서 이행하는 형태이다. 이 이행형태는 selfshielded flux cored와이어 (E 70T-4)로 용접할 때 관찰되며 IIW분류의 어느 이행형태에도 속하지 않는다.



**Fig. 13.** Schematic diagram showing the main features of:

- A—the globular repelled mode,
- B—the nonaxial projected spray mode

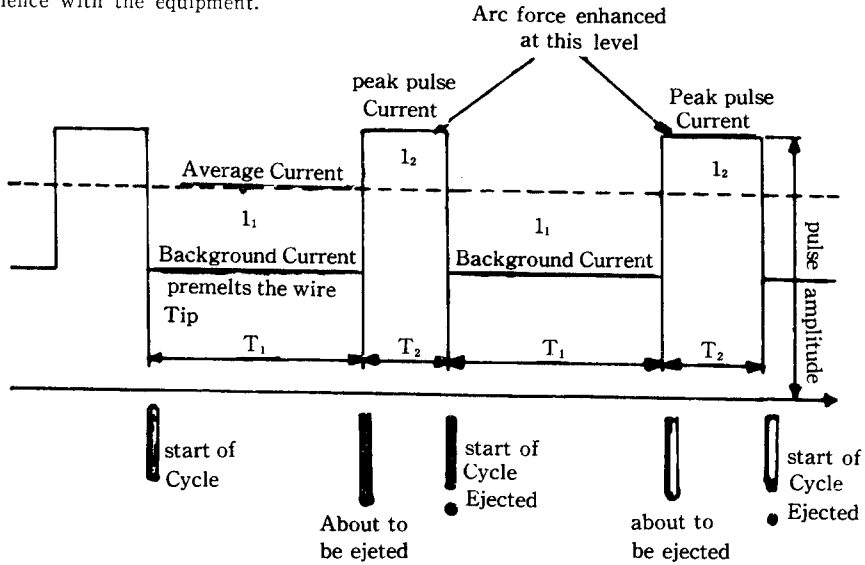
Pulse transfer<sup>15)16)</sup>

Spray 이행의 변환형태로써 저전류(background

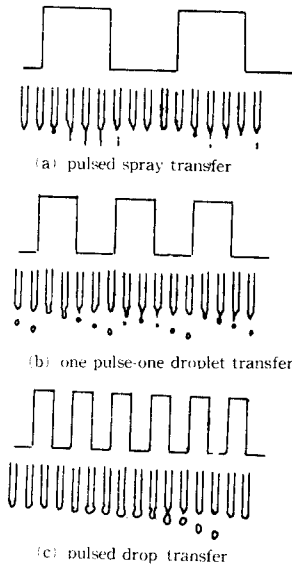
**Table 7.** Typical operating ranges for four diameters of electrode wire. (in MIG)

Wire diameter (mm)	Short circuiting		Semi-shorting		Spray arc	
	A	V	A	V	A	V
0.3	45-150	16-22	150-200	24-26	150-250	26-35
1.0	75-175	16-22	175-230	23-26	230-300	26-35
1.2	100-200	16-22	200-280	24-28	250-400	30-35
1.6	120-200	16-22	200-280	24-30	250-450	30-45

Note: The voltage indicated by the Rower source meter will generally be greater than the true mean arc voltage by an amount determined by the position of the meter in the circuit and the voltage drop in the leads. For this reason voltage ranges have been given and the indicated value used should be chosen from experience with the equipment.



**Fig. 14.** MIG pulsed arc welding



**Fig. 15.** Schematic representation of metal transfer made in pulsed MIG welding

current)에서 용적이 drop이행에서와 같이 성장한다. 이 용적이 와이어의 직경보다 크게 성장하기 전에 펄스전류(peak current)에 의한 전자기력에 의해 조그만 크기의 용적이 분리하는 이행형태이다(Fig. 14) 이 이행 형태는 pulse전류의 조작법에 따라 Fig. 15 처럼 3가지 형태로 나타난다.

이외에 Instant short circuit 이행 형태와 비슷한 semi short circuit 형태<sup>17)</sup>, 모재로 이행 중인 용적의 내부로부터 폭발이 일어나는 형태<sup>18)19)</sup>, 또는 와이어 내부의 후락스(flux)가 금속(sheath)보다 늦게 녹음으로써 생기는 독특한 이행형태<sup>20)</sup>등이 관찰되었으며 이러한 이행형태들도 모두 IIW분류에 속하지 않는 것들이다.

### 3.3. 금속이행형태 용어정리

금속이행형태에 관한용어는 통일되지 않고 서로 다른 용어로 사용되어 왔기 때문에(예 : drop과 gravitational, short circuiting과 dip) 똑같거나 비슷한

**Table 8.** (작용어 다음에는 transfer가 생략됨)

IIW 용어	그외의 용어
1. Free flight	
1.1 Globular	
1.1.1 Drop	globular, droplet, axial droplet, gravitational, sub-threshold,
1.1.2 Repelled	nonaxial, nonaxial globular, irregular droplet, axial spray
1.2 Spray	
1.2.1 projected	spray, axial spray, free flight, normal, normal drop, fine drop
1.2.2 streaming	spray, axial spray, filamentary spray
1.2.3 Rotating	rotating spray, rotating arc
2. Bridging	dip, short circuit arc
2.1 Short circuiting	
2.2 Bridging transfer without interruption	
3. Slag-protected transfer	
3.1 Flux-wall guided	
3.2 Other modes	

\*) 이러한 비교는 1971년 Ruckdeschel<sup>1)</sup>에 의해 시도된 바 있음.

이행형태임에도 불구하고 그 용어에 따라 서로 다른 형태로 이해될 우려가 있다. 따라서 본절에서는 이러한 용어들을 정리하여 IIW에서 분류한 이행형태의 용어들과 대조하였다(Table 8).

#### 4. 금속이행을 지배하는 힘 및 기구

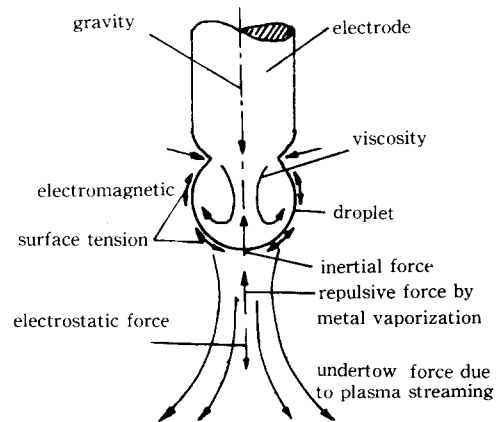
금속이행을 지배하는 힘이란 용접시 용적의 형성 및 분리 그리고 arc를 통한 용적에 작용하는 힘으로써 이제까지 알려진 힘들에는 다음과 같은 것들이 있다. 2)9)10)21)22)23)

- 가) 중력
- 나) 표면장력
- 다) 전자기력
- 라) Plasma Jet
- 마) 금속의 기화에 의한 반발력
- 바) 기타

이러한 힘들이 서로 복합적으로 작용하여 금속이행을 지배하며 Table 9<sup>24)</sup>에 표시된 바와 같이 금속이행 형태에 따라 이행에 가장 큰 영향을 미치는 힘은 각기 다르게 나타난다.

**Table 9.** Dominant forces in metal transfer

Transfer type	Dominant force or mechanism
1 Free flight	
1.1 Globular	
1.1.1 Drop	Gravity and electromagnetic pinch
1.1.2 Repelled	Chemical reaction generating vapour
1.2 Spray	
1.2.1 Projected	Electromagnetic pinch instability
1.2.2 Streaming	Electromagnetic
1.2.3 Rotating	Electromagnetic kink instability
1.3 Explosive	Chemical reaction to form a gas bubble
2 Bridging transfer	
2.1 Short-circuiting	Surface tension+electromagnetic forces
2.2 Bridging transfer without interruption	Surface tension+(hot wire) electromagnetic forces
3 Slag-protected transfer	
3.1 Flux-wall guided	Chemical and electromagnetic
3.2 Other modes	Chemical and electromagnetic

**Fig. 16.** Different forces acting on metal transfer

즉, 각 이행형태에는 그 세기와 방향이 서로 다른 여러힘들이 작용하고 있으며 이 작용력들을 정확히 이해 함으로써 용접시 원하는 이행형태를 얻는데 많은 도움이 될 것이다.



4.1. 각 힘의 설명

가) 중력(Fg)

하향 용접시에는 용적의 분리에 도움을 주지만 상향 용접시에는 분리를 저해하는 힘으로써 drop이행에서는 이 힘이 가장 큰 영향을 미친다. 실제로 무중력 상태에서 용접을 하게되면 용적이 분리하지 못하고 매우 크게 성장하게 된다(그림 17)<sup>25)</sup> 이 힘의 크기는 아래 식으로 표시된다.<sup>3)</sup>

$$F_g = \rho g v$$

- $\rho$ ; 용적의 밀도
- $v$ ; 용적의 부피
- $g$ ; 중력가속도

나) 표면장력(Fs)

액체표면을 가능한 한 작은 면적으로 축소시키려고 하는 힘으로써, 용접시 용적형성 초기에는 용적을 와이어 끝에 부착시키는 힘, 즉 분리를 저해하는 힘으로 작용하지만 분리 직전에는 오히려 분리를 돕는 힘이다(Fig. 18).

이 힘의 크기는 다음 식들로 표시된다.

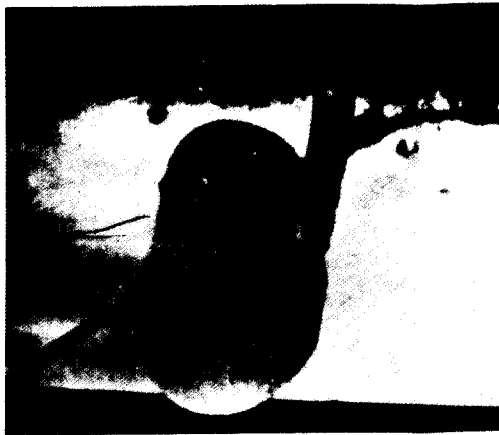


Fig17. Droplet at zero gravitational force.

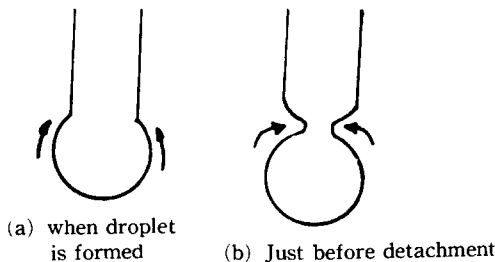


Fig. 18. Surface tension acting on droplet

$$F_s = \pi d \gamma (T)^{10}$$

- $d$ ; 와이어 직경
- $\gamma$ ; 단위길이당 표면장력
- $T$ ; 온도(°C)

또는

$$F_s = 2\pi \gamma a \varphi(a/c)^3$$

- $a$ ; 와이어 반경
- $\gamma$ ; 단위길이당 표면장력
- $c^2$ ; 모세관현상의 상수(=  $\gamma/g\rho$ )
- $g$ ; 중력가속도
- $\rho$ ; 용적의 밀도

$\varphi(a/c)$ 는 복잡한 함수이지만 일반적인 금속에 대해서는 다음식으로 계산된다.

$$\varphi(a/c) = 1.0 - 2.5a [a < 0.15]$$

$$\varphi(a/c) = 0.625 [0.15 < a < 1.0] \text{ (단위 : cm)}$$

다) 전자기력(Fm)

도체에 전류가 흐르게 되면 전자기적 효과에 의해 상호간에 힘이 작용하게 되는데 이 힘을 전자기력이라고 하며, 도체의 단면적이 변하게 되면 전극 축에 직각인 힘(제1 pinch력)과 축방향의 힘(제2 pinch력)으로 나뉘어 진다<sup>26)</sup>(Fig. 19).

용접시 축에 직각인 힘(제1 pinch력)은 주로 용적을 잘라주는 힘으로 작용하며 그 크기는  $\frac{1}{2} k I^2$  <sup>27)</sup>이다.

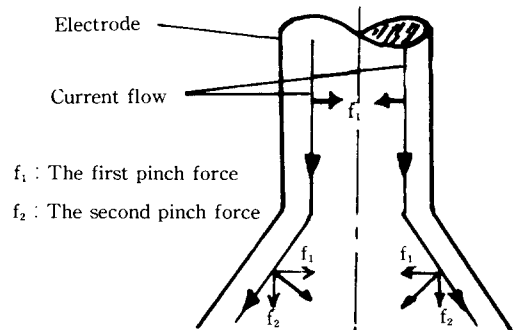


Fig. 19. Two types of electromagnetic force

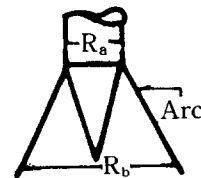


Fig. 20.\* Schematic of melting and tip formation (shaded area represents molten metals)

\*  $R_a, R_b$  값은 전극 끝과 arc 발생 모양의 모델화에 따라 각각 다름<sup>10), 13), 27), 29), 30)</sup>

축방향의 힘은 용접조건에 따라 다양한 영향을 미치며 그 크기는 다음과 같다.

$$F_m = kI^2 \log \frac{R_b}{R_a} \quad (28), (29)$$

- $k$ ; constant
- $I$ ; current
- $R_a$ ; electrode diameter
- $R_b$ ; active area diameter

위 식에서 만일  $R_a > R_b$ 이면  $F_m$ 이 음수가 되어 이행을 저해하는 힘 즉 전극쪽으로 작용하는 힘이 되며(저전류 용접시),  $R_a < R_b$ 이면 반대로 힘이 모재 쪽으로 작용하여 이행을 돕는 힘으로 작용하게 된다(대전류 용접시)<sup>13)</sup> → Fig. 21).

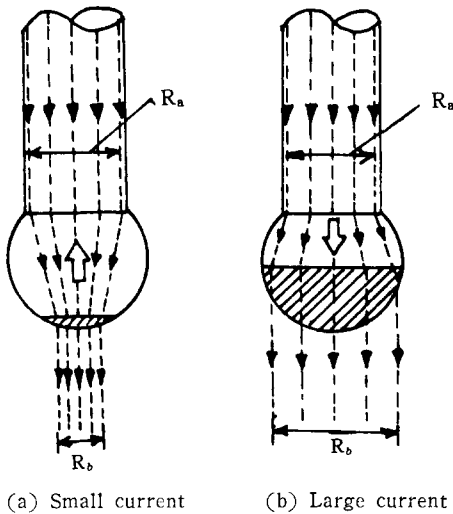


Fig. 21. Effect of arc size on droplet detachment force; active area and direction of axial force

라) Plasma Jet

용접시 arc기둥은 다)에서 설명한 바 있는 전자기력에 의해 압축되며 그 압력은 전류의 제곱에 비례한다.<sup>23)</sup> 또한 용접시 전극 쪽의 전류밀도가 모재 쪽보다 높기 때문에 전극에 가까운 쪽의 압력이 먼 쪽보다 커지게 된다. 이 압력차에 의해 plasma가 모재 쪽으로 흐르게 되는데 이것을 plasma jet라고 한다. 이 plasma jet는 spray이행형태에서 나타나는 원추형의 arc에서 현저하게 나타나며, 그 속도는 중력가속도의 60배에 달한다.<sup>31)</sup> 이 기류의 속도는 아래와 같이 구할 수 있다.

전자기력에 의한 압력

$$P = \delta I \quad (1)$$

- $\delta$ ; 전류밀도
- $I$ ; 전류

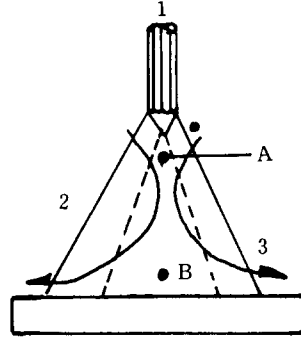


Fig. 22. Schematic of plasma gas flow generation and measurement of dynamic pressure

Fig. 22에서, A, B점에서의 압력과 기류의 속도를 각각  $P_A, P_B, V_A, V_B$ 라고 한다면, 베르누이 정리에 의해

$$P_A + \frac{1}{2} \rho V_A^2 = P_B + \frac{1}{2} \rho V_B^2 \quad (\rho : \text{plasma 밀도}) \quad (2)$$

$V_A \approx 0$ 이므로

$$V_B = \sqrt{2\Delta P / \rho} \quad (\Delta P = P_A - P_B) \quad (3)$$

그런데 spray arc가 형성될 때  $P_A \gg P_B$  이므로

$$\Delta P \approx P_A \quad (4)$$

또한 전류밀도

$$\delta_A = \frac{I}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{4I}{\pi d^2} \quad (5)$$

$$\therefore \Delta P \approx P_A = \delta_A \cdot I = \frac{4}{\pi} \left(\frac{I}{d}\right)^2 \quad (6)$$

(6)식을 (3)식에 대입하면

$$V_B = \sqrt{\frac{8}{\pi \rho} \left(\frac{I}{d}\right)^2}$$

최근에는 좀 더 진보하여,  $\alpha$ (taper index)로 전류 밀도값을 보정하여 plasma가 전자기력에 의해 모재 쪽으로 받는 힘( $F_P$ )의 크기를 계산한 식도 있다.<sup>29)</sup>

( $\alpha = R_B / R_A$ )

$$F_P = \begin{cases} \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \left\{ \frac{\alpha(\alpha-2)(\alpha^2-2\alpha+2)}{(\alpha-1)^4} \right. \\ \left. \ln \alpha - \frac{3\alpha^3 - 13\alpha^2 + 23\alpha - 25}{12(\alpha-1)^3} \right\} & (\alpha \neq 1) \\ 0 & (\alpha = 1) \end{cases}$$

마) 금속기화에 의한 반발력( $F_R$ )

용접시 arc가 발생하는 양극점은 대개 전극물질의 비등점 보다 높은 온도로 가열되므로 전극물질은 이 양극점 주변에서 산화물의 기체상태(예; FeO, SiO)로 기화하게 된다. 이로 인해 로케트의 추진력과 같은 반발력이 발생하는데 이힘을 금속기화에 의

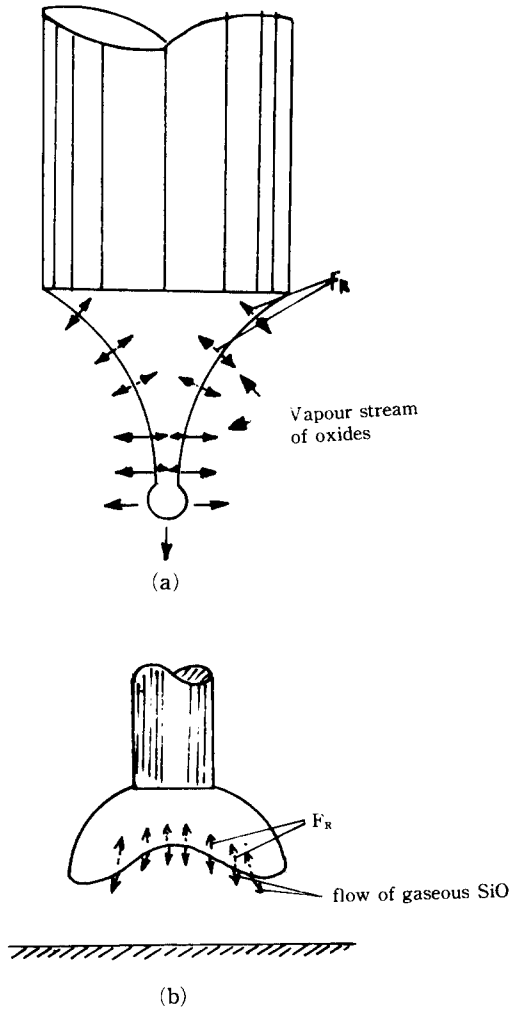


Fig. 23. Schematic of molten metal on electrode tip; (a) streaming (b) repelled conditions

한 반발력이라 한다. 이 힘은 Fig. 23 처럼 repelled 형태에서는 용적을 크게 형성되게하고 용적의 분리를 저해하지만<sup>32)</sup> streaming 형태에서는 용적의 크기를 작게하는 힘으로 작용 할 수도 있으며 분리를 저해하진 않는다.

용적이 분리할 때 용적에 영향을 미치는 힘을 대략 중력, 전자기력, 표면장력, 그리고 반발력이라고 한다면, 이 힘들의 합이 영이 될 때 용적이 분리하게 되므로 반발력( $F_R$ )은 다음 식으로 간단히 구할 수 있다.<sup>13)</sup>

$$m_g + ki^2 \log \frac{R_b}{R_a} - \pi d \gamma - F_R = 0$$

$m_g$ ; 중력

$$ki^2 \log \frac{R_b}{R_a}; \text{ 전자기력}$$

$$\pi d \gamma; \text{ 표면장력}$$

윗 식에서 실제로 그 값을 구해보면 repelled 형태에서는 반발력이 매우 크게 나타나지만 streaming 형태에서는 작게 나타난다. 즉 이는 반발력이 repelled 형태에서 보다 큰 영향을 미침을 의미한다.

바) 기 타

전술한 힘들 외에 가스폭발에 의한 힘<sup>23)</sup>이나, 용접시 원하는 이행형태를 얻기 위하여 외부에서 인위적으로 가하는 힘들이 있다. 즉 보호가스의 압력을 높이거나(Fig. 24)<sup>29)</sup> 특별히 고안된 토치(Fig. 25)<sup>33)</sup>를 사용하여 보호가스 속도를 주기적으로 조절하는 기체역학적인 힘 또는 arc주위에 걸어주는 자장<sup>26)</sup>등이 그것들이다.

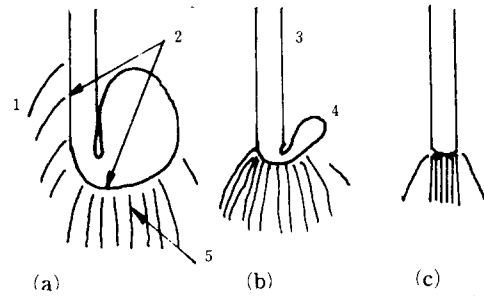


Fig. 24. Cathode spot behaviour in MIG-welding with electrode negative at increasing pressure.  $\rho =$  (a) 1atm, (b) 3atm, and (c) 5atm. 1—weak arc; 2—cathode spot wandering region; 3—wire; 4—droplet; 5—intense arc

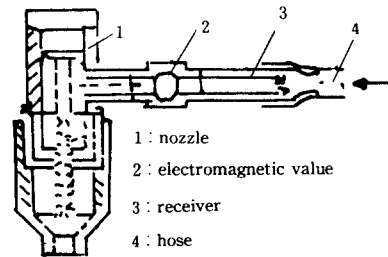


Fig. 25. Diagram of device for the short-term increase in velocity of the shielding gas

4.2. 금속이행 기구

이행기구는 아직 정확하게 밝혀지지 않고 있기 때문에 발표논문의 저자에 따라 약간씩 그 견해를 달리하고 있다. 따라서 본절에서는 비교적 정확한 것으로 생각할 수 있는 최근 논문들을 중심으로 IIW의 이행형태분류에 맞추어 각 이행형태들이 생기게 되는 조건들에 관해 간략히 설명하고자 한다.

가) Globular

이 이행형태는 GMAW용접시 전류값이 낮을 때 많이 나타나는 것으로서 Fig. 21과 같이 저전류에서는 arc발생영역(active area)이 작아져 전자기력과 금속기화에 의한 반발력이 모두 모재와 반대 쪽으로 작용하여, 용적이 쉽게 분리하지 못하고 크게 성장하게 된다. 따라서 globular이행형태가 되며 대략 중력이 이들 힘의합을 초과할 때 용적이 분리하게 된다<sup>13)</sup>(Drop 형태). 물론 이 이행형태에서도 표면장력이나 보호가스 흐름의 영향이 있는 것으로 믿어진다.<sup>34)</sup>

보호가스 분위기 측면에서, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, 또는 He을

첨가하면 arc의 전위경도(arc potential gradient)가 증가하여, 모재와 반대 쪽으로 작용하던 전자기력(F<sub>m</sub><0)이 모재 쪽으로 작용(F<sub>m</sub>>0)하게 되는 임계 전류값을 높인다(Fig. 26). 따라서 이러한 보호가스 분위기에서는 전자기력이 모재 쪽으로 작용하기 어렵기 때문에 spray화가 어렵다. 또한 탄산가스(CO<sub>2</sub>) 용접에서는 전류가 높아짐에 따라 금속기화에 의한 반발력이 더욱 크게 작용하고<sup>42)</sup> arc가 움직임으로써 전자기력이 비대칭적으로 작용하기 때문에 커다란 용적이 비축방향으로 이행한다<sup>35)</sup>(Repelled 형태).

나) Spray

Ar보호가스 분위기 하의 MIG용접시, 전류값이 높을 때 많이 나타나는 이행형태로써, Fig.21과 같이 고전류에서는 arc발생영역(active area)이 넓어져 R<sub>0</sub> 값이 커지게 되므로, 전자기력이 모재 쪽으로 작용(F<sub>m</sub>>0)하게 되어 spray화가 일어난다. 더불어 plasma jet의 속도가 커져서 이의 이동에 따른 와이어 끝과의 마찰력으로 용적의 spray화가 촉진되며, 일단 분리된 용적은 고속의 plasma jet에 의해 빠른속도로 이행하게 된다.<sup>13)</sup>

이 이행형태의 기구에서 전자기력과 표면장력과의 관계를 고려해볼 때, 만일 와이어 용융 초기에 표면장력이 전자기력보다 크다면 전자기력이 표면장력보다 커져 용적이 분리할 때까지는 조그맣고 둥근 모양의 용적이 형성될 것이다(Project 형태). 그러나 전자기력이 항상 표면장력 보다 크다면 둥근 모양의 용적을 형성할 기회가 없으며, 전자기력에 의해 와이어 끝은 뾰족하게 되어 미세한 용적이 액체가 흐르는 것처럼 연속적으로 이행하게 된다<sup>10)\*</sup>. (Streaming 형태) 와이어 extension 길이의 측면에서는 와이어 extension이 긴 경우, 주열울에 의해 와이어 끝이 휘기 쉽게 되며 와이어가 휜 방향으로 전자기력도 비틀리게 된다. 따라서 와이어 끝이 빙빙돌며 이행이 일어난다<sup>36)</sup>(Rotating 형태).

다) Explosive

피부 arc용접시 많이 발생하는 이행형태로써, arc가 발생했을 때 용적 내부에서는 온도상승으로 인한 가스용해도의 증가 때문에 가스의 함량이 증가하게 된다. 이들 가스로는 특히 산소, 수소, 질소 등을 들 수 있다. 용적의 온도가 떨어지게 되면 가스기포가 발생하며, 이들은 급격히 성장하여 큰 압력 하에 놓

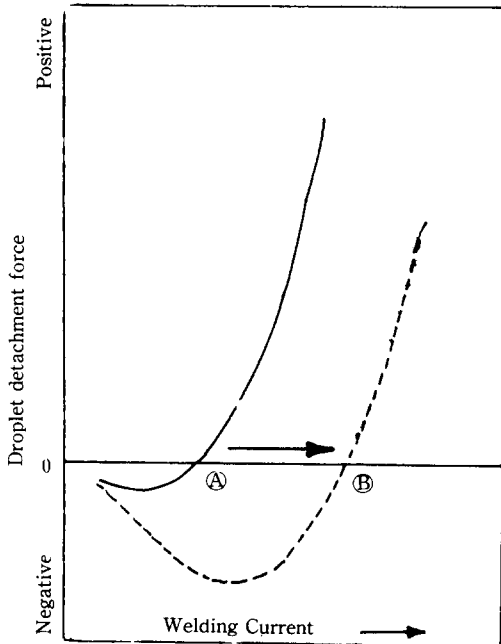


Fig. 26. Correlation between droplet detachment force, current and potential gradient; —low; ...high.

\* 용적형성 초기에 전자기력은 시간의 경과에 따라 증가하고 표면장력은 감소하는 것으로 알려져 있다.<sup>10)</sup>

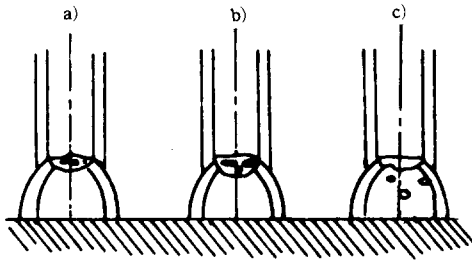


Fig. 27. Explosive droplet transfer (from inside), showery spray (large number of small drop)

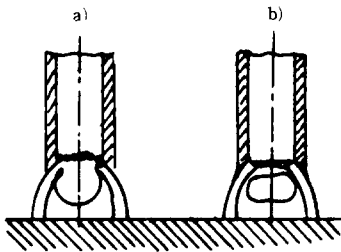


Fig. 28. Explosive droplet transfer (between droplet and shielded flux), globular (massive drops)

이게 된다. 결국 가스폭발의 형태로 이들 가스가 밖으로 방출되며, 이때 용적이 부분적으로 또는 통제로 떨어져 나오게 된다(Fig. 27, 28).

라) Short circuiting<sup>27)</sup>

이 이행형태는 용접시 arc길이가 짧을 때 발생하므로써 용적이 형성될 때는 drop형태와 유사하지만 분리시에는 모재와 접촉하여 이행하는 특징이 있다. Short circuiting이행기구를 나누어 설명하면 다음과 같다(Fig. 29).

- t<sub>1</sub>; 용적이 형성됨에 따라 arc길이가 감소하고 이와 함께 전류강도가 일어나 와이어송급속도가 용융속도 보다 빨라지게 된다.
- t<sub>2</sub>; 단락(short circuit)이 발생하여 전압이 급격히 떨어지며 arc는 꺼진다.
- t<sub>3</sub>; 저항의 감소 때문에 전류가 상승하며, 전자기력과 표면장력의 조합에 의해 접촉부분(bridge)이 잘리게 된다.
- t<sub>4</sub>; arc가 다시 발생하여 전압이 급격히 상승하고 전류는 다시 떨어지기 시작한다. 또한 arc발

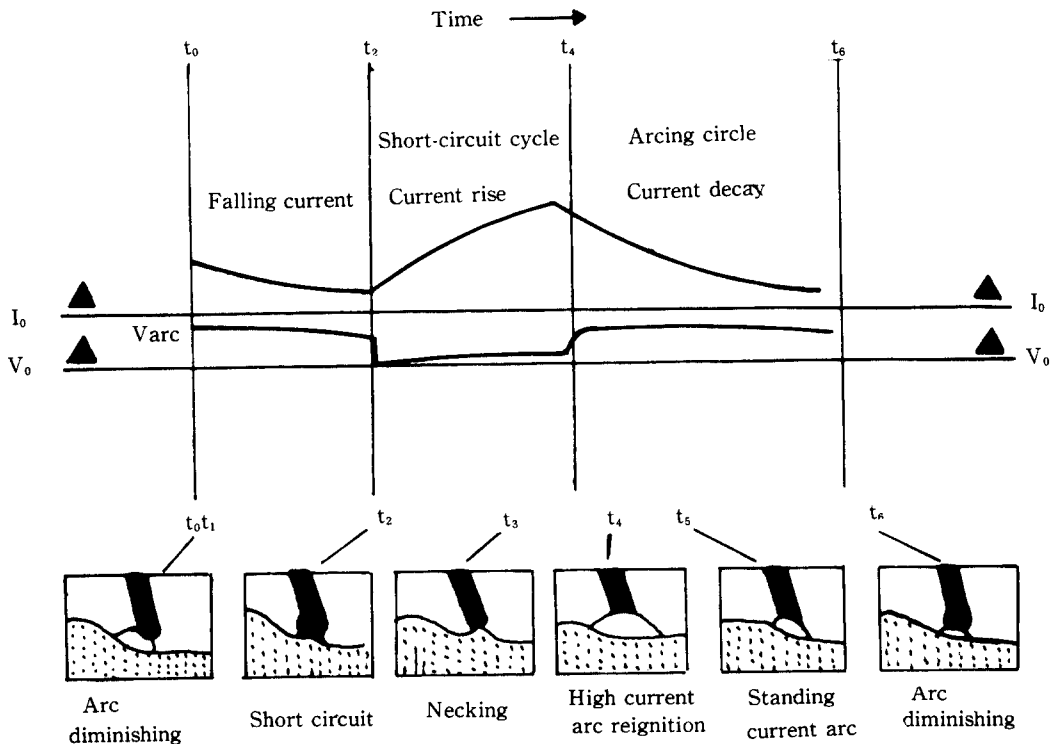


Fig. 29. Short-circuit transfer frequency for steel in CO<sub>2</sub> depends on voltage and wire diameter. (Courtesy, The Welding Institute).

생으로 인한 plasma jet가 분리된 용적을 용융지르 밀어붙인다.

$t_5$ ; 전류강하와 함께 용융지르 미는 힘이 감소한다.

$t_6 \equiv t_1$

## 5. 맺음말

본 해설에서는 각 금속이행형태에 대한 이해를 위해 금속이행형태의 분류, 힘 그리고 기구 등에 관해서 서술하였다.

이행에 작용하는 힘과 기구를 밝히는데 있어서 여기서는 고려하지 아니한 heat flow의 관점에서 연구가 진행되고 있으며<sup>33)</sup>, 또한 변수와 용접성에 대해서는 용접성이 좋은 spray이행형태의 발생영역을 넓히기 위해 pulse전류의 사용, 보호가스 흐름의 조절 또는 그 외의 변수들을 적절히 조절하는 연구도 활발히 진행되고 있다.

금속 이행현상에 대한 연구는 앞으로도 계속되어야 할 과제이다.

## 참고문헌

1. W. Ruckdeschel, Metal transfer with MIG and MAG welding, IIW. DOC. XII-B-97-71, June, (1971).
2. Classification of metal transfer, IIW. DOC. XII-F-173-76.
3. J.F. Lancaster, Metallurgy of welding, brazing and soldering, G. Allen & Unwin Ltd, London, (1974), p. 38.
4. 石崎敬三, 松尾考一郎, 神戸良雄, 公手智氏, 被覆아크溶接棒의 溶滴移行性について, 溶接學會誌, (1966), 12, pp.44-51.
5. 菅哲男, 小林實, 炭酸가스아크溶接용 프락스入りワイヤ의 溶滴移行現象, 溶接學會論文集, 第3卷(1985) 第2號, pp.33-40.
6. C.D. Auemand, R. Schoeder, D.E. Ries, and T.W. Eager, A method of filming metal transfer in welding, W.J. Jan. (1985), pp.45-47.
7. Japen Institute of welding, classification of metal transfer in electric arc welding processes, IIW. DOC. XII-F-146-73.
8. Classification of metal transfer, IIW. DOC.

XII-F-137-72.

9. J.F. Lancaster, Metal transfer in fusion welding, Conf. on Arc Physics and Weld Pool Behaviour, The Welding Institute, London, (1979).
10. Jilong Ma and R.L. Apps, MIG transfer discovery of important to industry, Welding and Metal Fab. Sept. (1982), pp.307-316.
11. Jilong Ma and R.L. Apps, New MIG process results from metal transfer mode, Welding and Metal Fab. May, (1983), pp.168-175.
12. M. Kiyohara, H. Yamamoto, S. Harada, Melting characteristics of a wire electrode in the MIG welding of Aluminium, Conf. on Arc physics and Weld Pool Behaviour, The Welding Institute, London, (1979).
13. I. Watanabe, M Suzuki, T. Kojima, The arc phenomenon in large current MIG arc welding, Conf. on Arc Physics and Weld Pool Behaviour, The Welding Institute, London, (1979).
14. I.E. French, Effect of electrode extension on deposit characteristics and metal transfer of E70T-4 electrode, W.J. June, (1984), pp.167-172.
15. 丸尾大, 平田好則, 野田純孝, パルス MIG溶接における 溶滴の保有熱量と 温度, 溶接學會論文集, 第2卷(1984) 第4號 pp.3-8.
16. F. Matsuda, M. Ushio, Y. Tonaka, Metal transfer characteristics in pulsed GMA welding, Transactions of JWRI Vol.12, No.1, (1983), pp.26-34.
17. E. Wilson, MIG arc welding-Part IV, Welding technology data sheet 60, Welding and Metal Fab. May, (1982), pp.165-172.
18. A.P. Elistratov, G.G. Chernyshev and V.V. Spitsyn, Transfer of electrode metal during in shielding mixtures, Automatic welding, No. 12, (1975), pp.29-30.
19. R.A. Woods, Metal transfer in Aluminium alloys, W.J. Feb. (1980), pp.59-60.
20. F. Matsuda, M. Ushio, T. Tsuji, T. Mizuta, Arc characteristics and metal transfer for flux-cored electrode in GMA Welding (Repor II), Transactions of JWRI, No.1, (1980), pp.39-46.
21. C. Weisman, Fundamental of Welding, American Welding Society, (1976), pp.59-60.

22. H. B. Cary, Modern welding technology, New Jersey, Prentice-Hall, Inc. (1979), p.41.
23. R. Killing, Handbuch der schweißverfahren, pp.14-18.
24. J. F. Lancaster, Metallurgy of welding, Third edition G. Allen & Unwin Ltd, London, (1980), p. 29.
25. B. E. Panton et al. A study of electrode melting and metal transfer in welding under conditions of variable gravitational forces, Conf. on Arc Physics and Weld Pool Behaviour, The Welding Institute, London, (1979).
26. 溶接 아크現象, 安藤弘平, 長谷川光雄, 産報, (1967), pp.153-169, pp.413-416.
27. A. A. Alov, The nature of welding arc, Weld. industry, Sept. (1940).
28. Greene, An analysis of transfer in gas shielded welding arcs, W.J. Trans AIEE, 79(2), July, (1960), pp.194-202.
29. A. Matsunawa, K. Nishiguchi, Arc characteristics in high pressure argon atmospheres, Conf. on Arc Physics and Weld Pool Behaviour, The Welding Institute, London, (1979).
30. Serdjuk, G. B. Magnetic forces in arc welding, Metal transfer symposium, Physics of the welding arc, The Institute of Welding, London, (1962).
31. H. C. Ludwig, Metal transfer characteristics in gas shielded arc welding, W. J. Jan. (1957), pp.23-26.
32. V. Hiltunen, J. Pietiküinen, Investigation and observation on material transfer, Conf. on Arc Physics and Weld Pool Behaviour, The Welding Institute, London, (1979).
33. M. N. Tarasov and V. M. Tulin, Control of the transfer of electrode metal by a short-term increase of the discharge velocity of the shielding gas, Welding Production, Aug. (1982), pp.32-34.
34. S. H. Waszink, L. H. J. Graat, Experimental investigation of the forces acting on a drop of weld metal, W. J. Apr. (1983), pp.108-116.
35. Welding Handbook, Vol.2, 7th edition, AWS, (1978), p.116.
36. Ralph B. G. Yeo, Put your finger on the pulse of MIG welding at WELDEX, Metal construction, No.9, Sept. (1983), pp.20-25.
37. E. Wilson, Metal inert gas(MIG) arc welding- Part 2, Welding and Metal Fabrication, Nov. (1981), pp.518-520.
38. J. H. Waszink, G. J. P. M. Van Henvel, Heat generation and heat flow in the filler metal in GMA welding, W. J. Aug. (1982), pp.269-282.