

研究論文

大韓熔接學會誌
 第11卷第1號 1993年3月
 Journal of the Korean
 Welding Society
 Vol. 11. No. 1, Mar., 1993

GMAW의 금속이행에 영향을 주는 변수연구를 위한 계측 시스템과 조건해석

이 세 현*

Study of variables influencing on the metal transfer in GMAW

S. Rhee*

Key Words : Metal Transfer(금속이행), Shielding Gas(보호가스), Helium-Neon Laser(헬륨-네온 레이저), Electrode Extension(일렉트로드길이), High Speed Motion Analyzer(고속 비디오 카메라), Spray Transfer(스프레이 이행), Globular Transfer(글로블러 이행)

Abstract

The phenomenon of metal transfer has been investigated for different transfer modes using a digital high speed motion analyzer and an arc shadow-graphing system based on a laser source and related optical system. It was observed that the pinch instability phenomenon did not occur for the globular transfer mode, since the liquid globule was then spherical rather than a cylindrical liquid bar. On increasing the ratio of carbon dioxide to argon, the transition current from globular to spray transfer generally increased, but it is interesting that the transition was observed to occur at the lowest current in a 5% CO₂-95% argon gas mixture. For pure carbon dioxide and helium shielding gases, the drop frequency increased slowly with increasing current. At high currents or an argon based shielding gas, the length of liquid bar decreased as the carbon dioxide content increased. The acceleration of a droplet within the arc was determined using the gas drag force theory and was found to be greater than the experimental results.

* 정희원, 생산기술연구원 생산기반기술센터

1. 서 론

GMAW에서는 금속이행의 변화에 따라 비이드의 형상과 용입깊이는 물론, 아크의 안정도, 스파터(spatter) 정도 등이 달라지며, 용접전류, 일렉트로드 길이(electrode extension), 와이어 크기 및 보호가스의 종류에 의해 이행 모드가 영향을 받는다. 아크는 빛이 강하고 온도가 대단히 높으며, 또한 금속이행 속도가 고속이기 때문에 측정에 어려움이 있다. 따라서 고성능 실험장치와 정밀한 실험계측 기술을 필요로 한다. 금속이행 현상은 Lesnewich(1958)¹⁾에 의하여 이론적, 실험적으로 본격적인 연구가 시작되었으며, 고속 카메라(high speed camera)를 통하여 이행현상을 좀더 정밀하게 측정하게 되었다(Needham, 1960)²⁾. Allum(1983)³⁾은 U.V.O.(ultra violet oscillograph)를 이용하여 금속이행을 연구하였으나, 스프레이 이행에 대한 측정은 어려움을 보이고 있다. 한편 압축불안정성(pinch instability) 이론을 이용하여 금속이행 현상에 대한 수학적 모델이 완성되었으며(Lancaster, 1979⁴⁾; Rhee, 1991⁵⁾), Waszink(1983)⁷⁾는 실험을 통해 용적(drop)에 작용되는 외력을 정역학적 힘평형 방법에 의하여 연구하였다. 본 연구에서는 디지털 고속 비디오 카메라와 레이저 및 관련 광학 시스템을 이용하여 여러 종류의 이행 모드에 대한 연구를 수행하였으며, 높은 전류에서의 파동 현상, 즉 액체 기둥에서의 외적 변화에 의하여 파형을 형성하게 되는데 이로부터 압축 불안정성 이론을 용접에 이용하는 것이 가능함을 확

인하게 되었다. 주요 변수를 변화하여 금속이행 주파수(drop frequency)를 측정하여 금속이행에 영향을 주는 인자를 연구하였으며, 천이(transition) 전류와 비이드의 형상에 대한 해석을 통해 탄산가스-아르곤 혼합기체에서의 금속이행 주파수와 용융비이드 형상에 대한 최적조건을 고찰하였다. 또한 실험적으로 가속도를 구한후 일반 drag 이론에 의한 결과와 비교 검토하였다.

2. 실험장치

직경이 1.6mm인 상용 화이어(ER70S-2)가 압축 방식에 의하여 연속적으로 공급되며, 일정한 크기의 일렉트로드 길이 14, 19, 24mm와, 아르곤, 헬륨, 탄산가스, 아르곤-탄산가스 혼합기체 (5, 15, 25% 탄산가스)의 보호가스를 사용하였다. 일렉트로드 길이를 정밀하게 알기는 어렵지만 확대된 모니터 상에서 측정하므로 0.5mm이내의 정밀도는 가능하다. 글로불러 이행의 경우는 용적의 성장 과정을 볼 수 있지만 스프레이 이행의 경우는 작은 용적의 측정이 불가능하다. 일렉트로드 길이는 콘택트튜브(contact tube)로부터 일렉트로드 끝단까지의 거리로 정의함으로써 용적의 성장 과정에서 무관하도록 하였다. 본 실험에서는 금속이행을 일정하게 유지하기 위하여 GMAW 용접시 일반적으로 사용되는 정전압모드(constant voltage mode) 대신에 정전류모드(constant current mode)를 사용하였으며, IBM-AT 마이크로 컴퓨터를 통해 와이어 공급속도와 용접 속도를 제어한다.

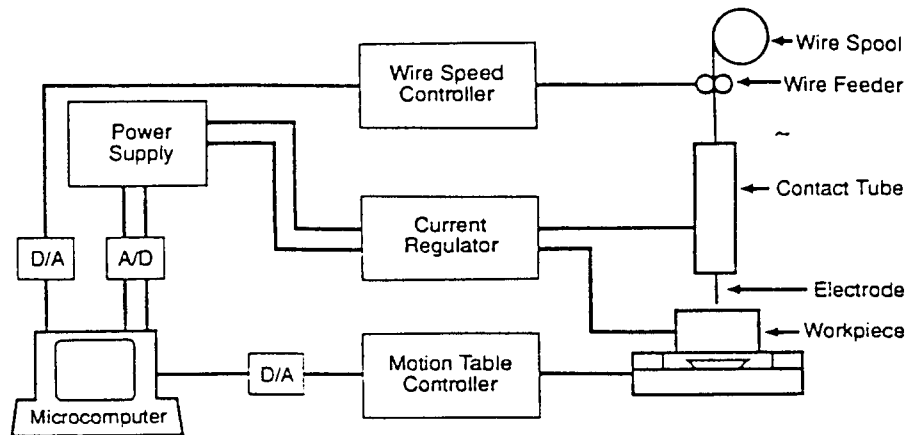


Fig. 1 Schematic of the welding system

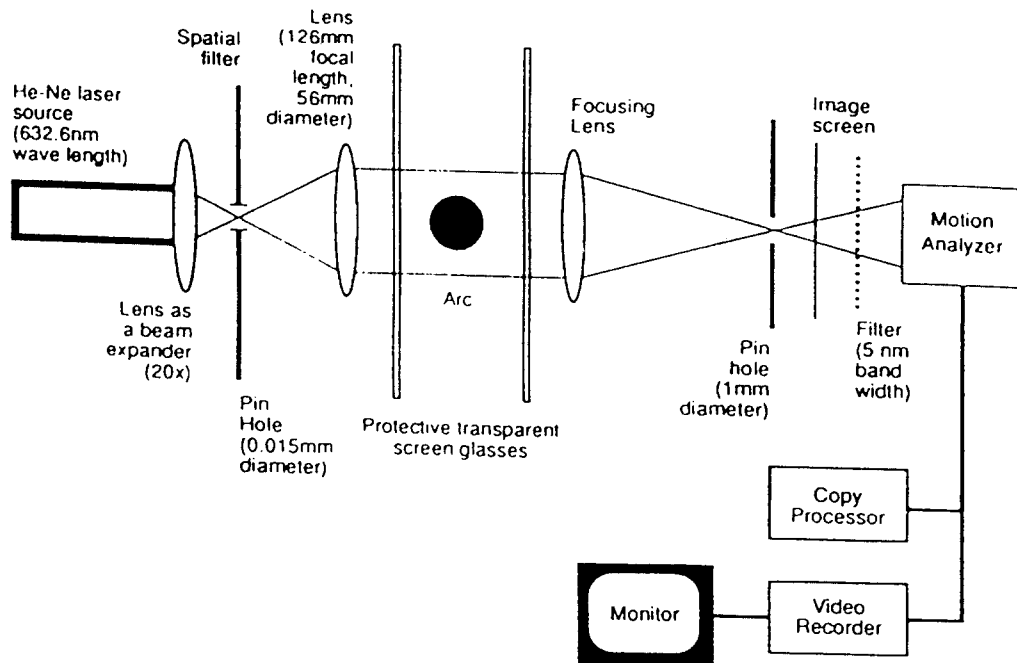


Fig. 2 Set-up of laser optics and high speed camera system

현장에서 주로 쓰이는 150A에서 400A의 전류영역과 1m/min에서 6m/min의 와이어 속도 범위내에서 실험이 수행 되었다. 아크는 열원으로서 이용이 되지만 금속이행을 측정하는데 방해할 주기 때문에 아크빛을 제거하기 위해서 Fig. 2에서 보는 바와 같이 지름 0.8 mm, 파장 632.6nm, 출력 5mW를 갖는 헬륨-네온 레이저와 그와 관련된 광학 장치를 이용 하였다.

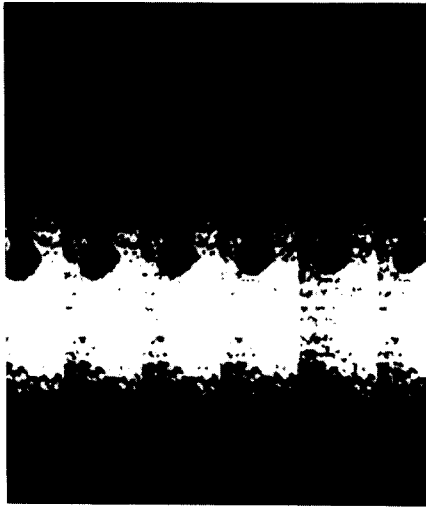
빔의 크기는 3차원으로 조절되는 공간 필터(spatial filter) 내의 0.015mm 직경인 핀구멍(pin hole)을 통과한 후 20배로 증폭이 되며, 아크빛은 1mm의 구간 차단필터(band pass filter)에 의해서 여과된다. 1mm 직경의 또 다른 핀구멍을 통과한 후 디지털 고속 비디오 카메라(digital high speed motion analyzer [Kodak Ektapro 1000])에 의하여 고속으로 기록되는데 (최대 6000 frames/s), 이 속도는 금속이행을 측정하고 분석하는데 충분한 속도이다. 실험은 10초 단위로 수행 하였으며, 각각의 수행때마다 일정한 와이어 속도를 입력한후 전류조정버튼(current knob)을 통해 일렉트로드 길이를 일정하게 유지하도록 전류를 조정한다. 일렉트로드 길이 변화에 대한 결과를 얻기 위하여 일정한 아크길이를 유지하면서, 팁-모재간 거리를 단계적으로 변화시켰다.

3. 실험결과와 토의

3.1 금속이행 주파수(drop frequency)

보호가스로서 아르곤을 이용할 경우, 낮은 전류영역에서는 구 모양의 용융된 액체 금속이 와이어 끝에 붙어 있으며 전류가 증가하게 되면 용융금속이 액체 기둥(liquid column) 형상이 되며, 전류가 액체기둥과 아크에 동시에 흐름으로써 자기장이 발생하며 이에 따라 파동 현상이 나타나는데, 때때로 여러개의 용적이 동시에 형성된다.(Photo 1) 액체기둥이 형성될 경우 적은 외적 변화에 의하여 진동하게 되는데 어떤 파장 이상이 될 경우 더 이상 안정되지 못하고 파단(break)이 이루어진다.

일반적으로 전류가 커지면 금속이행 주파수가 점점 증가하게 되고 어떤 임계 전류영역(280A 부근)에서는 증가율이 급격히 커지게 되는데, 이는 이 영역에서 글로불러 이행이 스프레이 이행으로 바뀌기 때문이다. 이 전류 영역을 천이전류(transition current)라 부른다. 그렇지만, 보호가스가 헬륨과 탄산가스를 이용할 경우



(a) Globular transfer
 (Shielding gas : Argon, Current : 192A,
 Wire speed : 2.5m/min
 Electrode extension : 14mm)



(b) Spray transfer
 (Shielding gas : Argon, Current : 320A
 Wire speed : 4.2m/min
 Electrode extension : 14mm)

Photo. 1 Typical metal transfer mode

항상 글로불러 이행이 나타나며, 스프레이 이행으로의 변화는 거의 일어나지 않는 것을 알 수 있다. 왜냐하면, 이들은 이온화 에너지가 높거나, 해리 에너지를 요구함으로써 아크가 용적 전체를 감싸지 못하고 밀부분에 존재하기 때문이다. 그런데 5% 탄산가스-95% 아르곤 혼합기체의 경우에 순수 아르곤을 이용할 경우보다도 낮은 전류에서 스프레이 이행이 일어나는데, 이는 탄산가스에 의한 산화를 통해 용융된 금속의 표면장력이 줄어들었기 때문이다. 일반적으로 산화물이 증가하면 반력(repelling force)이 증가하지만 표면장력이 감소하면 용적을 떼어내려는 작용이 일어나는데, 이 결과로부터 후자의 영향이 더 큰 것을 알 수 있다.

예를 들어 와이어속도가 3.4m/min, 일렉트로드 길이가 14mm 일때 5% 탄산가스-95% 아르곤의 경우 전류가 272A, 금속이행 주파수가 91 drops/s인데 비해 아르곤에서는 전류가 276A에서 오직 37 drops/s 밖에 되지 않는다(Fig. 3). 한편 일렉트로드 길이도 영향을 주는데 길이가 증가함에 따라 천이전류가 줄어드는 것을 알 수 있다. 그것은 길이가 증가 함으로써 용융되기 시작하는 경계부근에서 주울열에 의하여 온도가 상승하여 고체 상태를 유지하기가 어렵게 되며

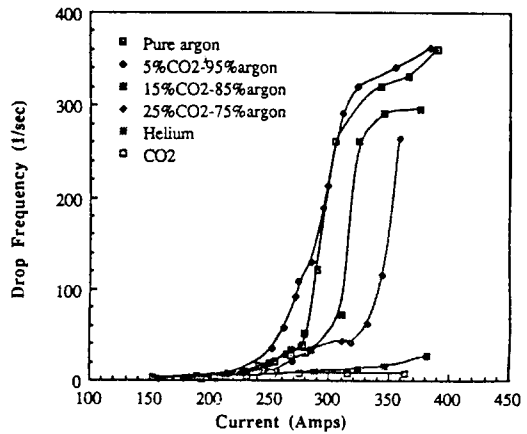


Fig. 3 Shielding gas effect on the drop frequency
 (Electrode extension=14mm ; Arc Voltage=Argon (26-31V), Helium(38-47V), CO₂(38-48V), 95% argon-5% CO₂(29-34V), 85% argon-15% CO₂(34-38V), 75% argon-25% CO₂(36-43V)

따라서 necking 현상이 발생하여 이행을 방해하는 힘이 감소하기 때문이다. 일렉트로드 길이 효과는 천이영역 부근에서 더욱 현저하게 나타난다(Fig. 4).

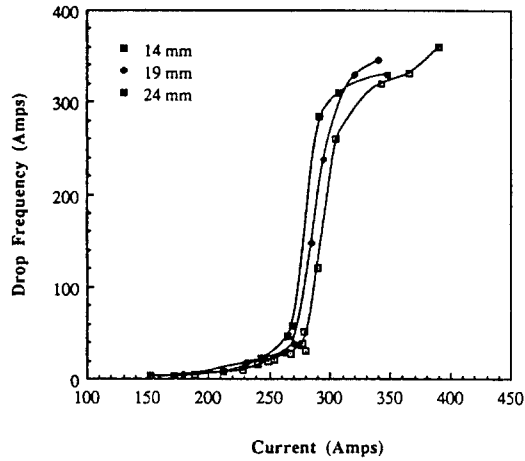


Fig. 4 Electrode extension effect on drop frequency (Shielding gas=argon, Arc voltage=26-34V)

3.2 안정성, 휴움(FUME), 비이드 형상

보호가스로써 아르곤-탄산가스 혼합기체를 사용하게 되면, 고전류에서 스프레이 이행이 나타나는데, 탄산가스와 아르곤의 혼합비율에 따라서 형상이 달라지며, 탄산가스 비율이 증가할수록 액체기둥 길이가 짧아지는 것을 알 수 있다. 그 이유는 탄산가스가 증가함에 따라 금속의 산화에 의하여 휴움생성이 증가하기 때문이다(Photo 2).

순수 아르곤, 헬륨, 탄산가스를 이용할 경우의 금속 용융 상태가 Photo 3에 나타나 있다. 비이드의 높이와 퍼짐성(wetting characteristic)도 보호가스에 따라 변하는데, 혼합기체에서 탄산가스의 비율이 증가할수록 퍼짐성이 향상된다. 산화물의 비율이 증가하게 되면 재료의 특성상 표면장력이 감소하기 때문에 퍼짐성이

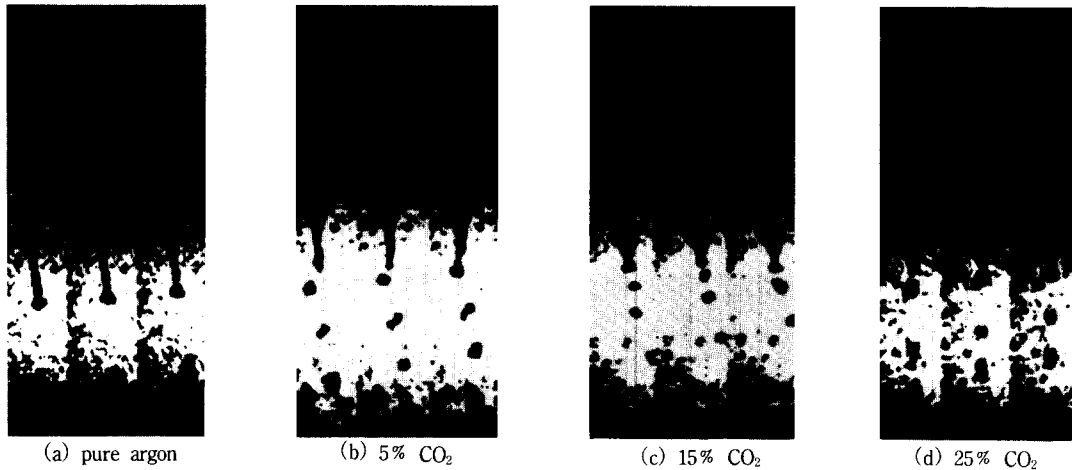


Photo. 2 Break-up length for spray transfer

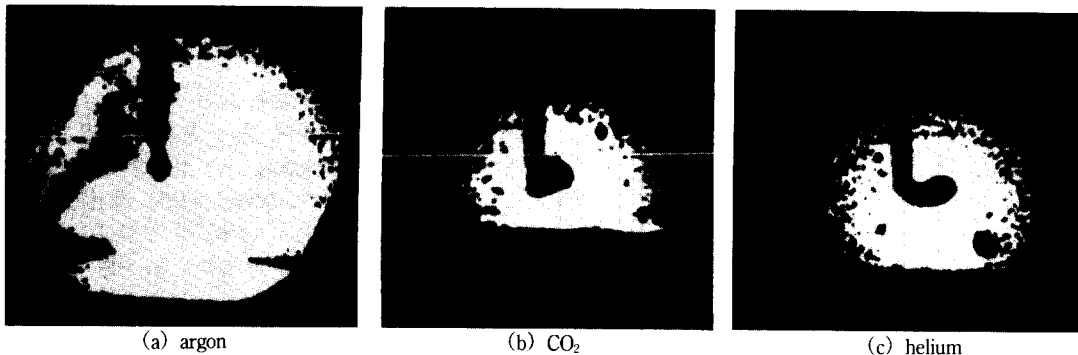


Photo. 3 Shape of molten droplet for different shielding gas

향상되는 것이다. 반면에 스패터가 증가하여 깨끗치 못한 비이드가 얻어지게 된다. 그러나 5% 탄산가스-95 아르곤을 사용하였을 경우 순수 아르곤에 비하여 퍼짐성이 좋은 반면 스패터가 적어서 최적의 비이드를 얻게 된다(Photo 4).

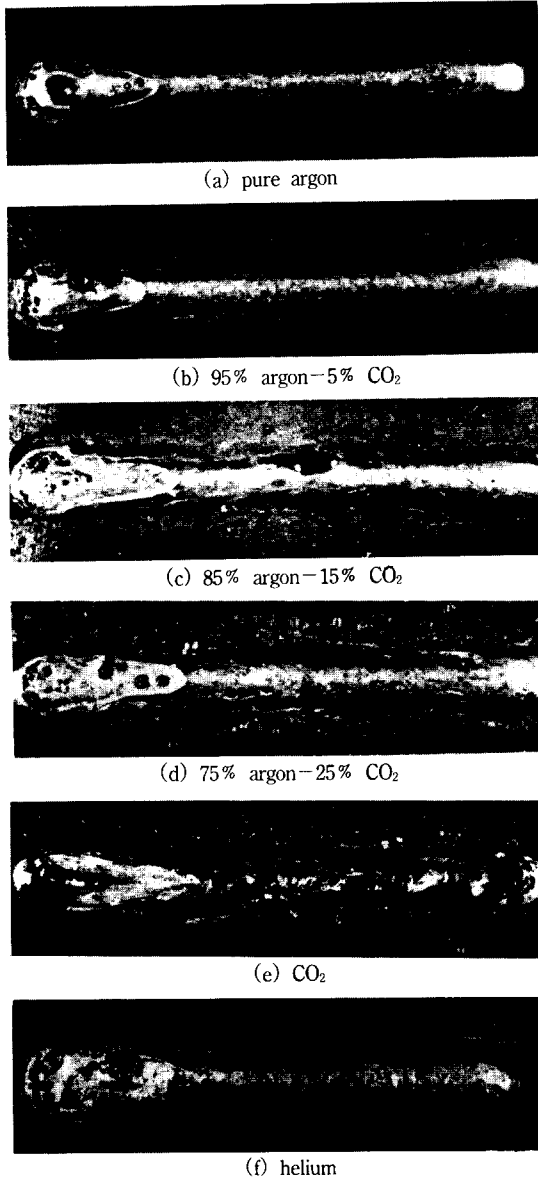


Photo 4 Weld bead from for different shielding gas condition

3.3. 아크에서의 용적의 가속도

용적의 운동량은 곧바로 용융 비이드의 깊이(penetration)에 직접적인 영향을 준다(Essers, 1981)⁸⁾. 따라서 시간에 따라 용적 이행상태를 고속 카메라를 통하여 측정된 후 최소 자승법(least square method)를 이용하여 관계식을 유도하였으며, 가속도를 구하기 위하여 변위를 시간에 대하여 두번 미분하였다. 고속 카메라를 이용하여 측정된 실험 데이터를 검증하기 위하여 용적의 가속도를 drag 이론을 이용하여 구한후 비교 검토하였다(Fig. 5).

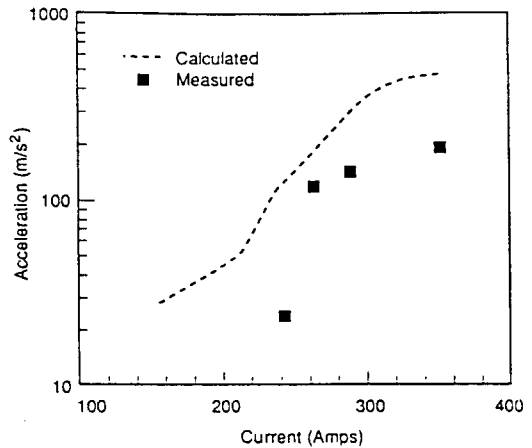


Fig. 5 Drop acceleration within the arc

용적은 구형(spherical form)으로 간주하고 용적내의 유체유동을 없다고 가정하면, 가스 흐름에 미치는 힘 F_d 는 다음과 같이 나타내진다.

$$F_d = C_{ds} \cdot 1/2 \rho_g V_g^2 \pi R_d^2$$

여기서 C_{ds} 는 드래그 상수, ρ_g 는 가스의 밀도, V_g 는 가스의 속도를 표시하며, R_d 는 드롭의 반경을 나타낸다. 아크의 온도를 8000K, 가스 점도를 0.00025kg/m-s, 그리고 가스 밀도는 0.06kg/m³으로 가정하였으며, 가스의 속도는 Needham (1960)의 실험식을 이용하였다. 금속 용접에 대한 동역학적 뉴우톤 방정식은 다음과 같다.

$$F_d + M g = M a$$

이용된 용적의 밀도는 7000kg/m^3 으로 가정하였으며, 이러한 데이터를 이용하여 가속도 a 를 구하게 된다. 그림에서 알수있는 바와같이 대체로 드래그이론에 의하여 이론적으로 구한 값은 실제로 측정에 의한 실험적 데이터에 비하여 높은값을 나타냄을 알수 있는데 이는 휴움에 의한 반력을 계산하여 고려치 않았기 때문이다.

4. 결 론

금속이행은 용융비이드 형상과 아크 안정에 영향을 주고 있으나 아크의 성질때문에 변화가 많다. 따라서, 레이저용용 과학시스템과 고속 카메라 분석기를 이용하여 해석이 가능하여졌으며, 용접전류, 보호가스, 일렉트로드 길이 등의 여러 용접조건하에서 실험에 의하여 연구검토하였다. 실험결과 아르곤에 대한 탄산가스의 비율이 증가할수록 천이전류가 증가하는데, 5% 탄산가스-95% 아르곤을 이용할 경우에 가장 낮은 전류에서 스프레이 이행이 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 헬륨이나 탄산가스를 이용할 경우 전류를 계속해서 증가시켜도 스프레이 이행 현상은 전혀 일어나지 않는다. 아르곤 또는 아르곤-탄산가스 혼합 기체의 경우 높은 전류영역에서 파동 현상이 관찰되며, 압축 불안정성 이론을 용접에 이용할 수 있음이 증명 되었으며, 액체기둥의 길이는 탄산가스의 비율이 증가할수록 줄어드는 것을 알 수 있다. 탄산가스를 아르곤에 혼합함으로써 비이드의 형태가 바뀌는데 5% 탄산가스-95% 아르곤을 이용할 경우 퍼짐성과 스파터 면에서 순수 아르곤에서보다 양호하게 나타난다. 또한 고속카메라를 이용하여 측정된 용적의

가속도는 드래그 이론을 이용하여 구해진 결과에 비하여 낮은 값을 갖는 것을 알았다.

참 고 문 헌

- 1) A. Lesnewich : Control of melting rate and metal transfer in gas shielded metal arc welding, *Welding Journal*, Vol. 37, No. 8, (1958), pp.418a~425s
- 2) J. C. Needham, et al. : Metal transfer in inert gas shielded arc welding, *British Welding Journal*, Vol. 7, No. 2, (1960), pp.101~114
- 3) C. J. Allum : MIG welding-time for a reassessment, *Metal Construction*, Vol. 15, (1983), pp.24~29
- 4) J. F. Lancaster : Metal transfer in fusion welding, *Proc. Int. Conf. on Arc Physics and Weld Pool Behaviour*, (1979), pp.170~174
- 5) S. Rhee and E. Kanatey-Asibu : Arc pressure effect on metal transfer in GMAW, *Journal of Applied Physics*, Vol. 70, No. 9, 1 Nov., (1991), pp.5068~5075
- 6) S. Rhee and E. Kannatey-Asibu : Observation of metal transfer in gas metal arc welding, *Welding Journal*, Vol. 71, No. 10, (1992), pp.381s~386s
- 7) J. H. Waszink and L. H. J. Graat : Experimental investigation of the forces acting on a drop of weld metal, *Welding Journal*, Vol. 62, No. 4, (1983), pp. 108s~116s
- 8) W. G. Essers : Heat transfer and penetration mechanism with GMAW and plasma-GMAW, *Welding Journal*, Vol. 60, No. 2, (1981), pp.37s~42s