

# STS 박판 벨로우즈의 마이크로 TIG용접 특성

김 용\*† · 박 기 영\*

\*고등기술연구원 로봇생산기술센터

## Micro TIG Welding Characteristics of Stainless Steel Bellows

Yong Kim\*† and Ki-Young Park\*

\*Institute for Advanced Engineering

†Corresponding author : welding@iae.re.kr

### 1. 서 론

벨로우즈(bellows)는 밸브, 자동차 부품, 반도체장비, 유량 및 압력센서, 항공기용 부품 등 산업용 기계의 요소부품으로서 널리 사용되고 있다. 벨로우즈는 Fig. 1 과 같이 주름을 갖는 하나의 다이어프램(diaphragm)을 중첩시켜 여러 개의 파형(convolution)을 갖는 유연한 셸(flexible shell) 구조로 이루어져 있다. 이와 같은 형태를 갖는 벨로우즈의 제작을 위해서는 압, 수의 다이어프램을 겹쳐 그 사이에 Cu 합금으로 된 냉각링(chill ring)을 삽입하고 내경을 용접하여 날개의 파형 셸을 만들어 낸 후 다시 이들을 꿰어 회전시키며 외경을 용접한다. 작업자는 용접이 진행되는 동안 현미경을 통해 용접토치 팁(tip)과 용접부위와의 거리를 일정하게 유지해야 하며, 또한 용접선을 정확히 따라가도록 조종하는 작업을 하게 되며 한 개의 파형 셸에 대한 용접이 끝나면 다음으로 옮겨 반복된 작업을 계속하는 상당히 숙련된 기술을 필요로 한다<sup>1-3)</sup>. 벨로우즈는 사용 환경의 특성 상 매우 까다로운 용접품질이 요구되는데 보통 작업 과정에서 토치 위치, 입열량, 갭 등 일반적인 공정변수에 의해 용접불량이 발생할 수 있으며, 실제 제품에서는 하나의 미세 불량도 용납되지 않는다.

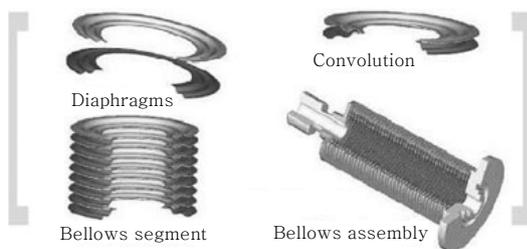


Fig. 1 Components of weld metal bellows

이에 따라 일부 선진기업에서는 용접품질의 철저한 관리를 위해 클린룸에서 작업하는 경우도 있으며, 어떠한 경우에도 용접 전 불순물 제거를 위한 세척작업과 용접 후 전수검사를 통해 그 품질을 보증한다.

벨로우즈 용접에서 고려할 수 있는 모든 변수는 총 12가지가 있으며<sup>4)</sup>, 이는 하드웨어적인 변수와 공정조건에 관련된 변수로 구분할 수 있다. 우선 시스템적 변수로는 이음부를 중심으로 한 토치 팁의 상하좌우 위치 공차 및 벨로우즈의 정렬 불량과 그에 따른 갭, 그리고 용접각도 및 Cu 냉각 링의 상태, 마지막으로 성형 중 발생된 버(burr) 등이 있다. 한편 공정조건 변수로는 용접 전류, 전압 및 속도에 따른 입열량과 함께 보호가스, 텅스텐 봉 끝단의 관리정도, 용접부 오염정도 및 용접 극성 등이 고려된다. 본 연구에서는 이에 따라 벨로우즈 용접에서 발생할 수 있는 12가지의 변수 중에 주요 인자를 선정하여 그 중 정량적 평가가 가능한 5가지의 변수에 대해 비드형상에 미치는 영향을 살펴보았다.

### 2. 실험 방법

실험 장치의 전체 형상은 Fig. 2와 같고 실험 대상 벨로우즈는 오스테나이트계 304 스테인리스 스틸 박판을 사용하였다. 이의 두께는 0.15t, 외경은 145mm, 내경은 123mm이다. 용접기는 0.1A 단위로도 가변이 가능한 마이크로 GTAW 용접기를 사용하였으며, 회전 지그로는 소형 선반을 이용하였다. 토치 끝 단 팁 위치는 실제현미경을 사용하여 10배 확대하여 정밀 제어하였으며, 용접용 보호가스로는 아르곤을 적용하였다.

Table. 1에 제시된 양산 조건을 최적 조건이라 가정

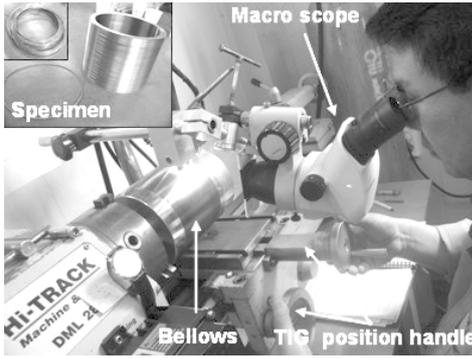


Fig. 2 Overall experimental setup

Table 1 Standard welding conditions

Parameter	Value
Arc current	5.0A
Arc voltage	12.5V
Welding speed	0.6m/min
Shielding gas flow	Ar 15 ℓ/min
Tungsten tip distance	2.5mm

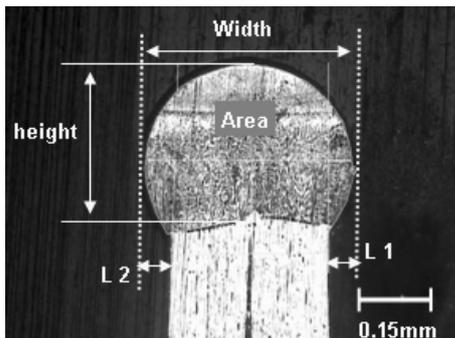


Fig. 3 Image analysis of welded bellows

하여 이를 중심으로 각 공정 변수 별 3~4 수준의 실험을 하였으며, 회전 중 와블링으로 인한 오차를 최소화 하고 결과의 재현성을 확보하기 위해 1/4 영역만을 용접하였다. 용접 결과의 분석을 위해 에폭시 마운팅을 통해 각 용접시편의 단면을 확보하고 이를 Fig. 3과 같은 기준을 갖고 이미지 분석을 통해 그 크기를 정확히 측정하였다.

통상적으로 벨로우즈 용접부의 품질은 용접비드 형상 분석을 통해 이뤄지며, 비드 좌우 대칭성의 경우 L2의 값이 높은 곳을 기준하여, L2와 L1의 비가 두 배 이하여야 한다(Fig. 3 참조). 또한 비드 넓이는 thickness × 2.2~2.8 사이, 비드 높이는 thickness × 1.2 이상이 되어야 한다. 본 실험에 사용된 벨로우즈의 두께는 0.15t로서 이와 같은 품질기준에 따라 높이는 0.18mm

이상, 넓이는 0.33~0.42mm 범위 내에 들어와야 한다. 이를 바탕으로 이상적인 비드형상을 CAD로 계산할 경우, 높이 0.293mm, 폭은 0.37mm, 이에 따른 전체 용융면적은 0.101mm<sup>2</sup> 이 되어야 한다. 본 실험에서는 이상과 같은 품질 기준을 통해 각 공정 변수에 따른 민감도에 대한 확인과 함께 벨로우즈 용접 품질에 영향을 미치는 최대 변수에 대해 파악하고자 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 팁 좌우 조준 위치에 따른 영향

기타 용접조건은 Table 1과 같이 놓고, 용접선을 기준으로 텅스텐 봉 끝단의 조준 위치만 Fig. 4와 같이 변화시켜가며 용접한 결과, Fig. 5와 같이 한 쪽으로 치우칠수록 비드 좌우 대칭성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 좌우 대칭성은 앞선 Fig. 3과 같이 L2와 L1 값을 기준하여 판단하며, 그 값이 2 이상이면 품질 기준을 벗어난다. 본 실험에서 비드 폭과 높이는 범위 내에서 벗어날수록 점점 감소하다가 완전히 벗어난 4번 조건에서 다시 증가되는 현상을 나타냈으며, 예상과 같이 아크 슐림으로 인해 좌우 비드가 대칭성의 문제로 인해 용접 불량 발생하였다. 이에 따라 0.15t 벨로우즈의 모서리 이음에서의 허용 가능 영역은 센터 기준 ±0.15mm 이하로 정밀한 위치 고수가 요구되는 것을 확인하였다.

#### 3.2 팁 높이에 따른 비드형상 변화

마이크로 TIG 용접을 수행함에 있어서 팁의 높이는 용접 품질을 결정하는 주요 인자가 된다. 동일 입열량에서도 팁 높이에 따라 용융량이 달라지는 것은 아크 용접의 기본 원칙이 된다. 본 연구에서도, 이와 같은

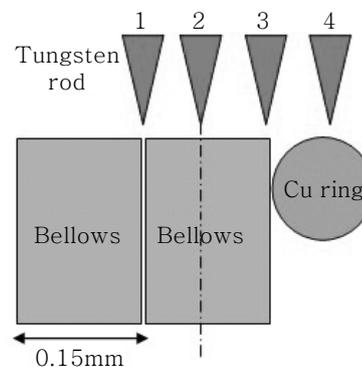


Fig. 4 Schematic diagram of tip position balance test

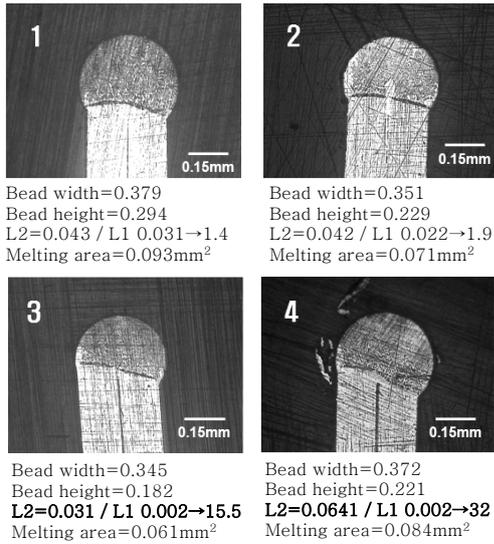


Fig. 5 Bead geometry of tungsten tip position balance test

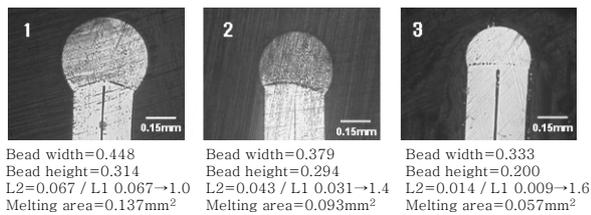


Fig. 6 Image analysis of welded bellows bead geometry depend on tip height from base metal

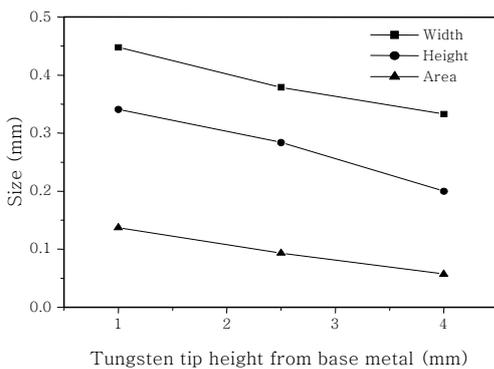


Fig. 7 Variation of bead geometry with tip height from base metal

일반적 사실을 바탕으로 정상 높이 2.5mm를 기준하여 1mm 및 4mm 높이에 대해 실험하여 그 영향에 대해 확인하였다.

이미지 분석 결과 팁 높이는 Fig. 6과 같이 벨로우즈 용접부의 품질에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. Fig. 7은 팁 높이에 따른 비드 폭, 높이 및 용융면

적 변화에 대한 경향을 그래프로 나타내 것으로서 팁 높이가 변화에 따라 동일 용접 조건에서도 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 팁이 모재와 매우 근접한 1mm 거리에서는 전체적으로 비대한 비드를 형성하였고 점점 멀어질수록 그 크기는 전체적으로 감소된 결과를 나타내었다. Fig. 6의 1번 조건은 품질 규정에서 비드 폭이 0.42mm 이하의 조건을 만족하지 못하였으며, 3번 조건에서는 불안정한 아크로 인해 약간의 험핑 비드가 발생되었다. 이에 따라 벨로우즈의 용접에서는 전 영역에 걸쳐 팁 높이가 균일하게 고수되어야 함을 알 수 있었다.

### 3.3 입열량(전류)의 영향

용융용접에서 입열량(전류, 전압 및 속도)은 공정 중 최우선 변수로서 고려된다. 이에 따라 기준 조건인 5A 전류를 기준으로 ± 3A 까지 용접 후 비드형상 변화를 측정하였다. 결과는 앞서 제시된 비드 폭과 높이의 품질기준을 적용하여 적정범위를 산정하였으며, 그 결과 Fig. 8과 같이 4A 이상에서는 모두 품질기준을 만족하였다. 최소 입열인 2A 적용 시에는 비드 폭과 높이가 모두 기준치를 만족하지 못하였으며, 3A의 전류에서도 비드 폭이 0.33mm 이상을 초과하지 못하였다. 반면 7A 이상에서는 품질기준은 만족하였으나 약간 비대한 비드의 형성과 함께 품질 기준의 상한에 근접하였다. Fig. 8을 살펴보면 5A의 기준 전류 값 이상에서는 비드(폭, 높이) 크기가 거의 변하지 않으며, 실제 용접 시에는 6.25J/cm 정도의 입열량으로 용접을 수행하는 것이 가장 이상적인 용접품질을 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 또한 입열량은 비드형성에 어느 정도 영향을 미치긴 하지만 적정 조건이 유지될 경우 범위 내에서는 품질 기준을 좌우하는 최대 인자는 아닌 것으로 사료된다.

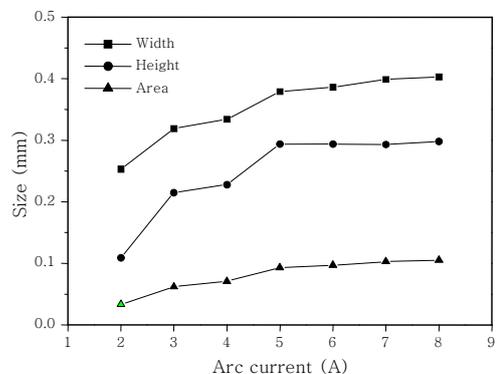


Fig. 8 Variation of bead geometry with heat input energy

### 3.4 기타 변수에 따른 영향 평가

#### 3.4.1 갭에 의한 영향

모든 용접에 있어서 이음부 관리는 주요 변수로 작용하며 특히 박판에 대한 정밀용접의 경우에는 더욱 세심한 주의가 요구된다. 본 연구에서도 이에 따라 0.1mm의 갭을 임의로 발생시켜 정상조건에서 용접 후 정상상태와 비교 분석하였다. Fig. 9 및 Fig. 10은 그 결과로서 비드 폭은 갭 발생량에 비례하여 증가하였으며, 전체적인 용융면적은 동일하였다. 이에 따라 비드 높이가 약간 줄어들긴 하였지만 예측과 달리 갭에 의한 품질 민감도는 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 실제 양산에서도 지그의 기계적 압착력 때문에 갭은 최대 0.1mm를 넘지 않으며, 따라서 벨로우즈 용접에서 갭은 품질에 영향을 주는 주요인자가 되지 않음을 확인하였다.

#### 3.4.2 보호가스 유량에 따른 용접성

아크 용접에서 보호가스의 역할은 용접 시 용융 풀을 대기로부터 보호하고 산화를 방지시키는 역할을 한다. TIG 용접은 일반적으로 불활성가스인 아르곤을 많이 쓰는데, 이는 He보다 가격이 저렴하면서도 이온화 에너지가 높아 우수한 차폐효과를 기대할 수 있기 때문이다. 이에 따라 본 실험에서는 5~25 l/min 까지 보호

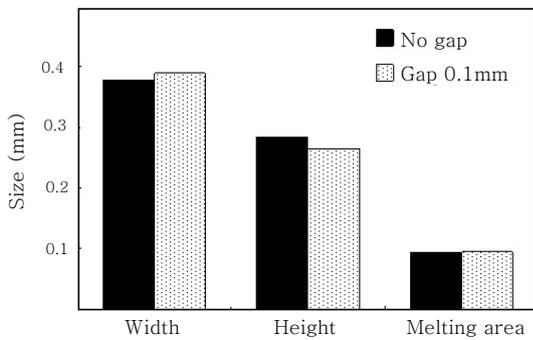


Fig. 9 Variation of bead geometry with gap condition

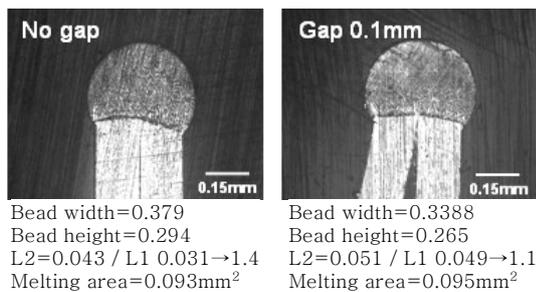


Fig. 10 Comparison of bead depend on gap condition

가스 적용단계를 달리하여 용접하여 비드형상에 미치는 영향을 확인하였다. 그 결과 Fig. 11과 같이 우선 보호가스를 사용치 않는 경우 단면 형상뿐만 아니라 비드 외관에서도 산화를 유발하여 심각한 불량을 초래하게 된다.

한편 가스가 5 l/min 이상 적용된 용접시편에서는 유량에 따른 비드형상의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 보다 확실한 차폐를 위해서는 15 l/min 수준이 요구되며, 이 때 외관상 품질도 가장 우수하게 나타났다.

#### 3.4.3 기타 용접변수에 따른 품질영향

실험방법 및 결과를 정량화시킬 수 없는 기타 용접변수에 대해 그 영향을 객관적으로 확인하였다. 벨로우즈는 앞서 언급한대로 정밀용접이 요구되어 실제현미경을 이용하여 용접하게 되는데, Fig 12는 그 화면을 보여주고 있다. Fig. 12의 Cu 냉각 링은 용접부 주변산화를 방지하고 열의 방출을 도와줄 뿐만 아니라 지그의 역할도 겸하게 된다. 이러한 냉각 링을 적용하지 않고 용접할 경우, 일단 앞서 언급된 효과를 전혀 기대할 수 없을 뿐만 아니라 기계적 장착력을 최대로 해도 와블링 현상으로 인해 용접이 거의 불가능한 상태가 된다.

벨로우즈는 또한 사용 환경 특성상 우수한 진공특성

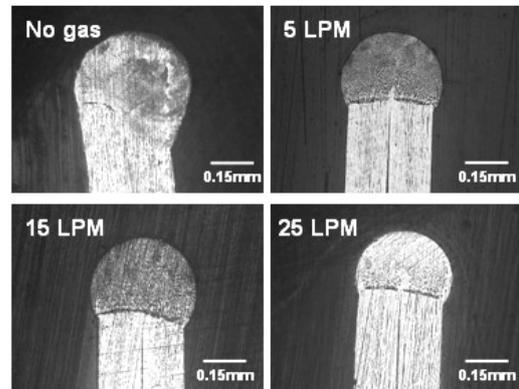


Fig. 11 Effect of Shielding gas flow rate

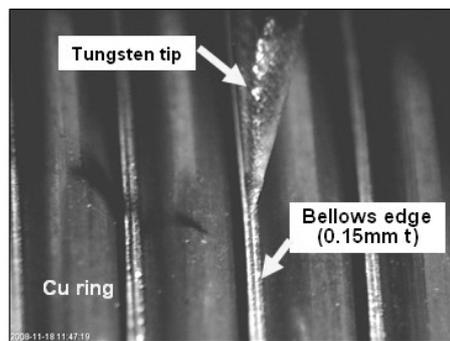


Fig. 12 Stereoscopic view of bellow weld joint

을 지녀야 하며, 이에 따라 모든 용접 벨로우즈는 누수에 관한 전수검사를 통해 품질을 보증하게 되어 있다. 그러나 용접부가 이물질로 오염되어 있는 경우 그 부위에 산화가 발생하게 되고 결함으로 나타나 누수에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 벨로우즈 용접 환경은 청결하게 유지되어야 하며 경우에 따라 클린룸에서 용접이 이뤄지는 경우도 있다. 따라서 용접품질 확보를 위해서는 최소한 이물질 방지를 위해 각 공정별 세척작업이 요구된다.

한편 텅스텐 봉 끝단 상태는 Fig. 12와 같이 항상 첨단을 유지하여 미세부위의 정밀용접이 가능토록 되어야 하며, 마지막으로 박판 프레스 성형을 통해 제작되는 벨로우즈는 버 발생을 최소화시켜 용접부 정렬에 문제가 없도록 하여야 한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 박판 벨로우즈 용접에서 고려되어야 하는 변수 중 정량적 평가가 가능한 5 가지의 변수를 선정하여 비드형상에 미치는 영향을 확인하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 벨로우즈 용접 품질에 영향을 미치는 최대 인자는 하드웨어적인 변수와 관계되며, 텅스텐 봉 끝단의 상하 좌우 위치에 매우 민감하게 반응함을 알 수 있었다.

2) 0.15t 벨로우즈 용접에서는 6.25J/cm의 입열조건이 가장 이상적인 비드를 형성하는 것으로 확인되었으며, 기타 용접공정 변수는 적정 범위에서는 품질에 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

3) 벨로우즈 용접 시 용접 공정변수보다는 지그시스템 등 하드웨어적인 변수가 품질과 직결되므로, 균일한 품질을 얻기 위해서는 시스템 관리가 무엇보다 중요하다.

#### 참 고 문 헌

1. S. K. Lee, C. D. Yoo and S. J. Na : Journal of KWS **17-3** (1999), 219-226 (in Korean)
2. R. R. Larsen : "Optical Micro Tracking of Edge Welds on Welded Metal Bellows", Welding Journal, **63-5** (1984), 19-23
3. R. K. Holbert, et al. : "Laser Beam Welding of Stainless Steel Sheet", Welding Journal, **66-8** (1987), 21-25
4. R. K. Holbert, et. al. : "Fabricating and Testing Stainless Steel Bellows", Welding Journal, **68-5** (1989), 49-55



- 김 용
- 1979년생
- 고등기술연구원 로봇/생산기술센터
- 용접가공
- e-mail : welding@iae.re.kr



- 박 기 영
- 1962년생
- 고등기술연구원 로봇/생산기술센터
- 아크 및 레이저
- e-mail : young@iae.re.kr