

레이저-GMA 하이브리드 용접공정에서의 용접현상

김철희 · 채현병 · 김준기 · 김정환

Welding Phenomena in Laser-GMA Hybrid Welding Process with and without Arc Rotation

Cheol-Hee Kim, Hyun-Byung Chae, Jun-Ki Kim and Jeong-Han Kim

1. 서 론

레이저-아크 하이브리드 용접은 레이저와 아크 상호 간 시너지 효과에 의해서 용접속도 증가, 변형 감소, 용입 확보 및 간극 대응력 확보 등의 여러 가지 장점을 가지고 있어 조선 및 자동차 분야를 중심으로 실용화되었으며 현재 다양한 적용 분야에 대한 적용이 이루어지고 있다¹⁻³⁾. 레이저-아크 하이브리드 용접은 적용된 아크 용접공정의 종류 및 하이브리드 공정에서의 아크와 레이저의 역할에 따라서 다양하게 분류되고 있다⁴⁾. 특히 GMA (Gas Metal Arc) 용접 전원을 하이브리드 용접에 이용하는 경우에는 간극 대응력이 우수하고, 용가재의 첨가로 인한 용접부의 개질이 가능한 장점을 가지고 있다. 레이저-GMA 하이브리드 용접에 대한 기존의 연구에서는 용접공정 인자에 따른 용접비드 특성과 간극에 대한 대응력이 평가된 바 있다⁵⁻⁷⁾. 일정한 범위에서 양호한 용접비드를 형성함에도 불구하고 보호가스 조성에서의 CO₂의 함량과 레이저-아크간 거리는 언더컷의 존재를 결정하는 중요한 인자로 규명되었으며, 보다 강건한 공정을 위하여 레이저-회전아크 하이브리드 용접이 제안된 바 있다⁸⁾. 또한 레이저-회전아크 하이브리드 용접시에는 아크의 고속회전을 이용한 아크 센서의 적용이 가능하므로 공정적용시 유리한 점이 있다⁹⁾.

본 논문에서는 레이저-회전아크 하이브리드 용접에서의 용적 이행 및 비드 특성을 기술하고, 기존의 하이브리드 용접에서 용접결합이 발생하는 원인을 고속촬영 및 비드 관찰을 통하여 설명하고자 한다.

2. 레이저-회전아크 하이브리드 용접에서의 용적이행

본 연구에서 사용한 CO₂레이저와 GMA용접과의 하

이브리드용접에서 회전아크를 도입한 하이브리드 용접공정의 개념은 Fig. 1과 같다. 레이저는 모재에 수직으로 조사되고, 회전도치는 모재에 일정한 각도로 기울어져 장착되었다. 아크가 레이저에 일정한 거리로 선행하여 진행하고, 정해진 회전반경과 회전수로 GMA 전극이 회전하도록 장치되었다. 아크가 회전하지 않는 하이브리드 용접실험에서 선정한 공정변수를 기준으로 공정변수의 변화에 따른 용접 현상을 관찰하였으며⁵⁾, 본문에 별도로 언급되지 않은 경우의 용접조건은 Table 1

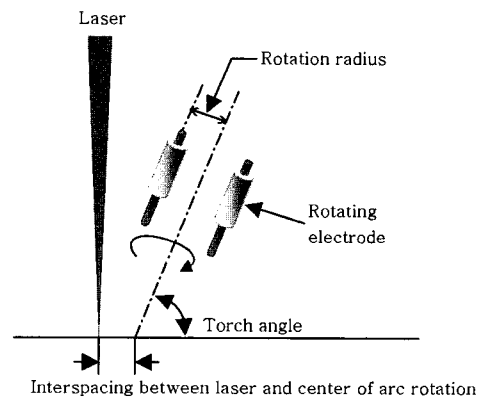


Fig. 1 Schematic diagram of laser-rotating arc hybrid welding process

Table 1 Welding conditions used in experiments

Electrode	1.2mm solid wire
Laser power	8 kW
Shielding gas	He 50%+Ar 38%+CO ₂ 12%
Gas flow rate	50 l /min
Wire feed rate	9.9 m/min
Welding voltage	25 V
Travel speed	1.5 m/min
Torch angle	31 deg.
Interspacing distance	6 mm
CTWD	20 mm
Rotation diameter	3 mm
Rotation frequency	8 Hz

과 같다

레이저-회전아크 하이브리드 용접에서 용접부를 고속 촬영한 결과를 Fig. 2에 도시하였다. Fig. 2의 (a)와 (b)에서는 스프레이이행이, (c)와 (d)에서는 입상용적이행이, (e)와 (f)에서는 단락이행이 각각 관찰된다. Fig. 3은 이행모드 변경이 일어나는 메커니즘을 개괄적으로 보여주고 있다. 아크가 레이저에 선행하는 경우 GMA전극이 Cf위치에 존재할 때 팁-모재간 거리가 가장 짧아져 가장 큰 전류값을 갖는다. 전극이 Cf위치에서 Cr위치로 회전함에 따라 용접전류값이 낮아지게 되므로 용적이행은 스프레이이행에서 입상용적이행으로 전환된다. 그러나 전극이 Cr위치를 지나 Cf위치로 회전하는 경우에는 보다 복잡한 용접현상이 관찰된다. 아크의 회전이 고속이므로 아크의 자기제어가 충분히 일어나지 못하고, 아크 길이가 짧아지게 된다. 이에 따라 입상용적이행에서 스프레이 이행이 아닌 단락이행 형태로 전환되고 잦은 단락이 관찰된다. 본 연구에서는 레이저를 수직으로 조사하고 GMA 전극이 모재에 기울어져 회전하기 때문에 이러한 현상이 발생한 것으로 판단되며, GMA 전극을 모재에 수직으로 설치한 형태의 하이브리드 용접에서 용접현상도 관찰할 필요가 있다고 생각된다.

단락이행의 발생은 아크의 길이와 밀접한 관계가 있기 때문에 회전주파수와 용접전압에 따른 스패터의 발생량을 조사하였다. Fig. 4에서와 같이 회전주파수의 증가에 따라 스패터가 더 많이 발생함을 알 수 있는데 이는 아크의 고속 회전에 따라 아크의 자기제어가 충분히 일어나지 못하기 때문에 단락발생률이 높아지기 때문이다. Fig. 5는 용접전압에 따른 용접덧살의 면적을 보여준다. 실험에 이용한 공정조건에서는 25V에서 스패터의 발생이 최소화되었으며, 용접전류가 낮아지거나 높아질 때 스패터 발생량이 증가함을 알 수 있다. 용접

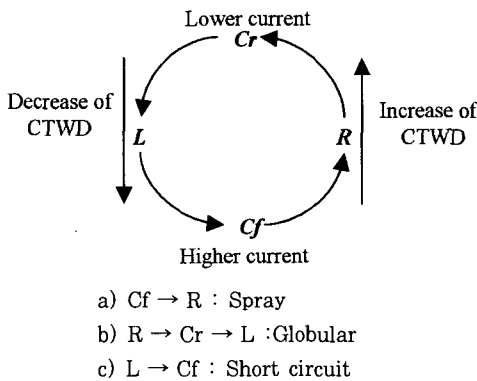


Fig. 3 Schematic diagram of various metal transfer modes in laser-rotating arc hybrid welding process

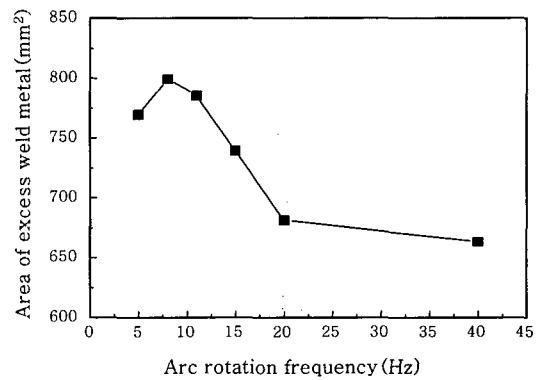


Fig. 4 Area of excess weld metal according to the rotation frequency

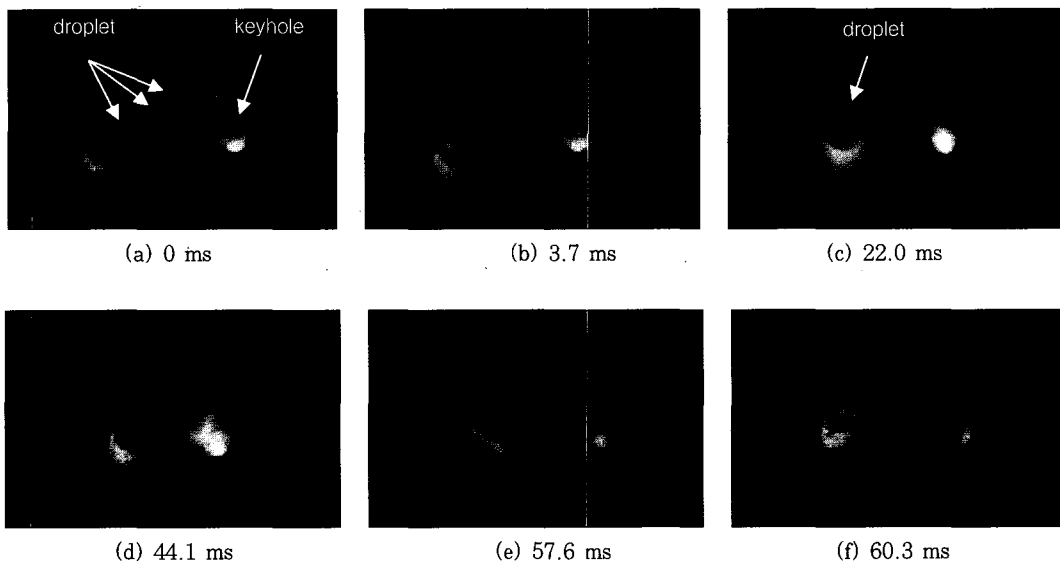


Fig. 2 High speed images of welding phenomena in laser-rotating arc hybrid welding process

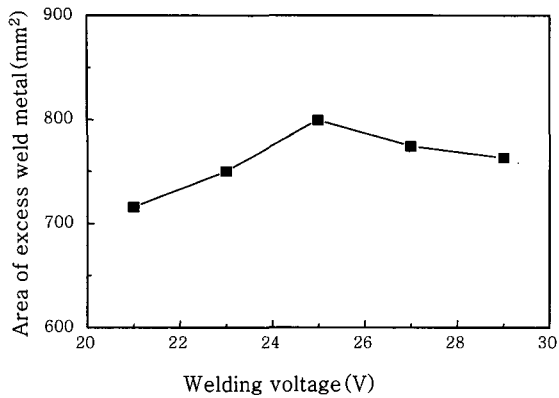


Fig. 5 Area of excess weld metal according to the welding voltage

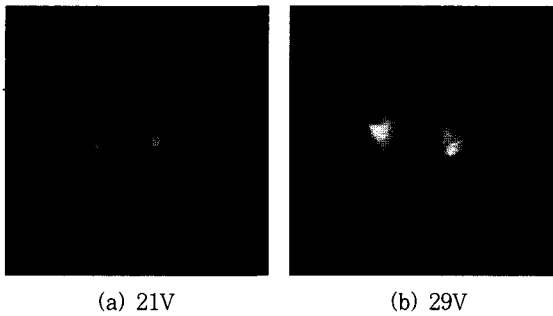


Fig. 6 Arc lengths for various welding voltages

전압이 21V, 29V일 때의 아크 길이를 고속촬영하여 Fig. 6에 나타내었는데 25V에서 촬영한 Fig. 2와 비교하면 용접전압이 증가하면서 아크 길이도 증가함을 알 수 있다. 용접전압이 낮은 경우 아크 길이가 짧아져 단락의 발생률이 높아 스패터의 발생이 증가한 것으로 판단되며, 용접전압이 높은 경우에는 아크 길이가 길어 지지만 와이어의 끝단에서 분리된 용적이 이행되는 과정에서 모재로 이행하지 못하고 용융풀 외부로 날리는 현상이 발생하여 스패터 발생의 원인이 된다.

3. 보호가스 조성에 따른 용접현상

8kW CO₂레이저 출력에서 플라즈마 억제력을 확보할 수 있도록 헬륨의 비율을 50%로 고정하고, 아르곤과 CO₂의 조성을 변화시키면서 용접을 수행하여 Fig. 7에 도시하였다. 회전아크 하이브리드 용접에서는 모든 조성에서 언더컷이 발생하지 않았는데, 기존의 방법에서는 CO₂ 함량이 8%이하에서는 언더컷이 관찰되었으며, CO₂ 함량이 16%이상에서는 모재에 부착된 스패터를 관찰할 수 있었다. 과소한 CO₂함량에서 언더컷의 존재는 CO₂ 조성에 따른 젖음성의 문제로 판단된다.

Fig. 8은 CO₂ 함량이 4%에서 용접부의 고속촬영 결과이며, Fig. 9는 Fig. 8의 고속촬영사진을 개략도로서 나타낸 것이다. 이때, 용접부 옆벽면에서 용융금속이 젖음성이 부족하여 옆벽면을 채워주질 못하고 젖음이 부족한 영역(unwetted zone)이 관찰되었는데 이로 인해 응고시 부분적으로 언더컷이 발생하는 것으로 사료된다. 보호가스내 CO₂ 함량을 12%로 증가시킨 경우 나타나는 용접현상의 고속촬영 결과를 Fig. 10에서 보여주고 있다. 이 때는 아크 길이 및 스프레이 용적이 행이 안정되고, 키흔에서 분출되는 플라즈마 플룸이 용적이행에 영향을 주지 않아 양호한 비드를 형성하였다. Fig. 11은 20%의 CO₂를 첨가한 경우의 고속촬영결과로서 아크 길이가 Fig. 10의 경우에 비해 짧아지고, 용적의 반발이 발생하면서 키흔의 바로 윗부분으로 용적이행이 일어나게 되며 플라즈마 플룸의 분출에 의하여 용적이 용융풀로 이행되지 못하고, 스패터발생으로 이어지는 것을 알 수 있다.

회전아크 하이브리드 용접에서는 아크의 회전에 용융풀의 유동이 강제적으로 일어나게 된다. 이에 따라 CO₂ 함량이 부족한 경우 발생하는 젖지 않는 영역을 제거하여 CO₂의 조성과 무관하게 언더컷이 발생하지

CO ₂	Without arc rotation	With arc rotation
4 %		
8 %		
12 %		
16 %		
20 %		

Fig. 7 Bead surfaces for various shielding gas composition (He 50%, Ar bal.)

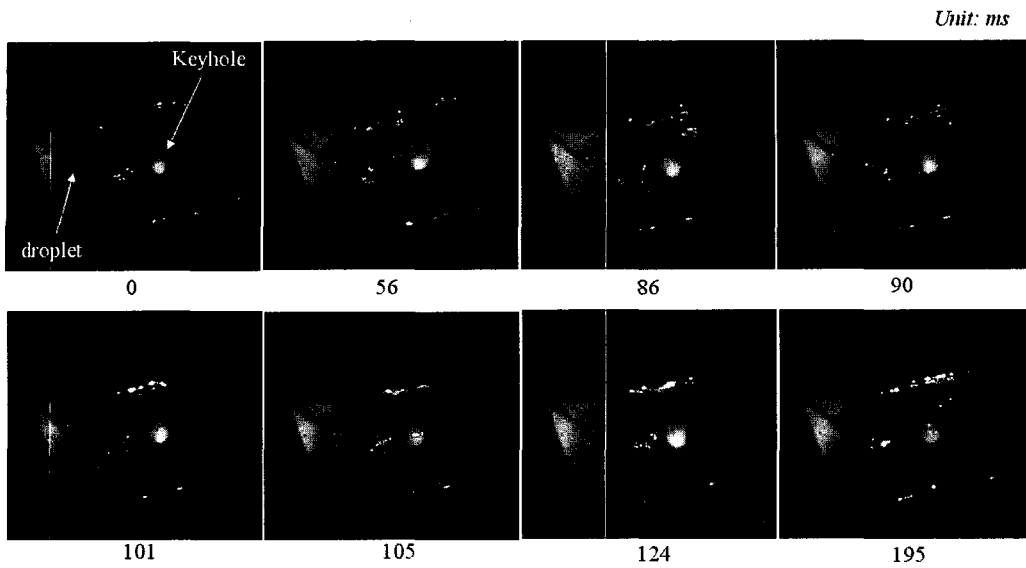


Fig. 8 High speed images for 4% content of CO₂ in shielding gas

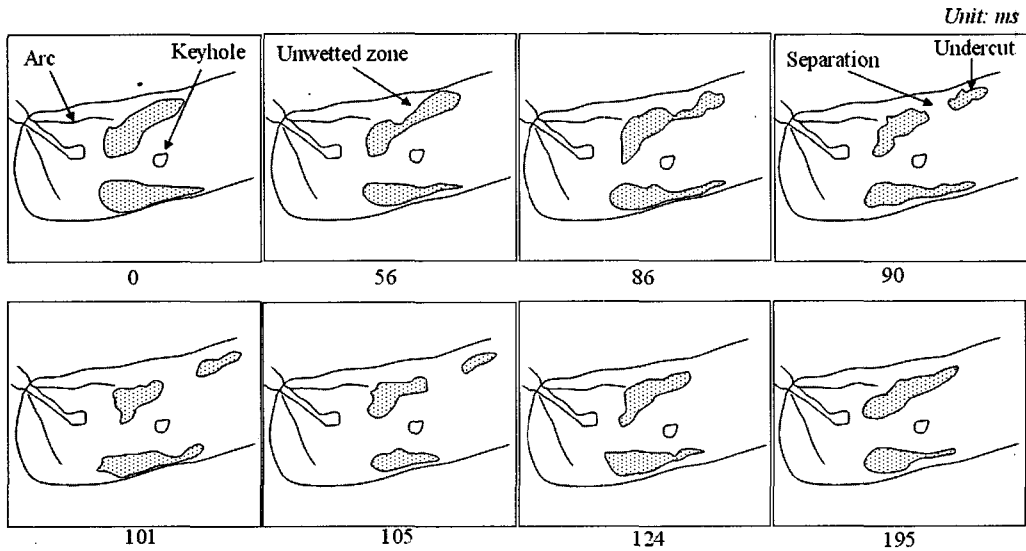


Fig. 9 Schematic sketches of Fig. 8

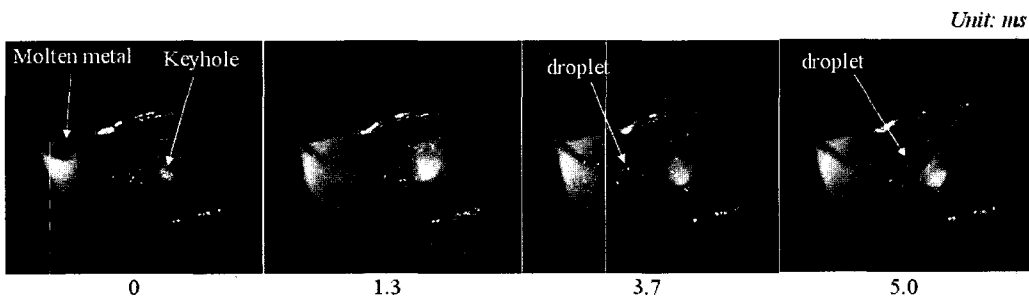


Fig. 10 High speed images for 12% content of CO₂ in shielding gas

않았다. 그러나 앞 절에서 기술한 것과 같이 GMA 전극이 모재에 기울어져 설치되어 있으므로 전 조건에서 스패터가 발생하여 모재 표면에 부착되어 있음을 확인하였다.

4. 레이저-아크간 거리에 따른 용접현상

Fig. 12는 다양한 레이저-아크간 거리에 따른 용접 비드 형상을 보여 주고 있다. 기존 아크회전이 없는 하

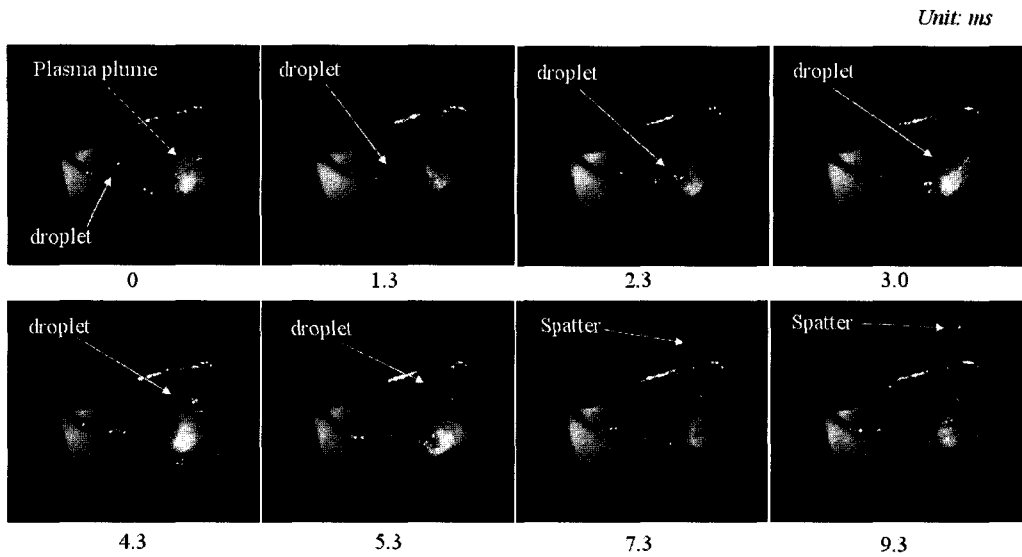


Fig. 11 High speed images for 20% content of CO₂ in shielding gas

Interspacing distance	Without arc rotation	With arc rotation
2 mm		
4 mm		
6 mm		
8 mm		
10 mm		

Fig. 12 Bead surfaces for various interspacing distances between laser and center of arc

이브리드 용접에서는 레이저-아크간 거리가 4mm일 때를 제외하고는 언더컷이 발생함을 알 수 있으나, 회전 아크 하이브리드 용접에서는 전 조건에서 언더컷이 발생하지 않았다.

레이저-아크간 거리가 2mm이하일 때와 6mm이상일 때 언더컷이 발생하는 원인을 고속촬영을 관찰해 보았다. Fig. 13은 레이저-아크간 거리가 0mm일 때 용접 현상을 보여주는데 와이어의 끝단에서 이탈한 용적이 레이저 키홀에서 폭발하는 플라즈마 기둥에 충돌하면서 편향되어 용융지의 한쪽에 치우쳐 이행되는 것을 관찰할 수 있으며, 이는 비드단면의 비대칭을 유발한다. 레이저-아크간 거리가 2mm에서는 Fig. 14와 같이 모재로 이행되던 용적이 키홀에서 폭발하는 플라즈마 플룸에 의하여 용융지로 이행되지 않고 용융지를 벗어나는

현상이 빈번하게 발생하는 것이 관찰할 수 있었다. 이로 인해 용착량이 감소되므로 용접부에 언더컷이 발생하는 것으로 사료된다. Fig. 15는 레이저-아크간 거리가 4mm~10mm까지의 고속카메라 사진을 나타내고 있다. 레이저-아크 간 거리가 4mm일 때는 용적이 키홀의 바로 앞에서 용융플로로 이행되면서 플라즈마 플룸의 영향을 받지 않고 안정적으로 이행하여 언더컷을 발생시키지 않았다. 그러나 레이저-아크간 거리가 6mm 이상인 경우에는 열원사이의 거리가 과도하여 시너지 효과가 줄어들고 이로 인해 언더컷과 같은 용접결함이 발생하였다. 즉, 레이저-아크간 거리가 증가할수록 레이저와 아크의 열원이 서로 멀어지게 되고 그 사이에 나타나는 젓지 않은 영역의 크기가 커짐을 알 수 있는데, 젓지 않은 영역의 면적이 일정이상 초과 하게 되면

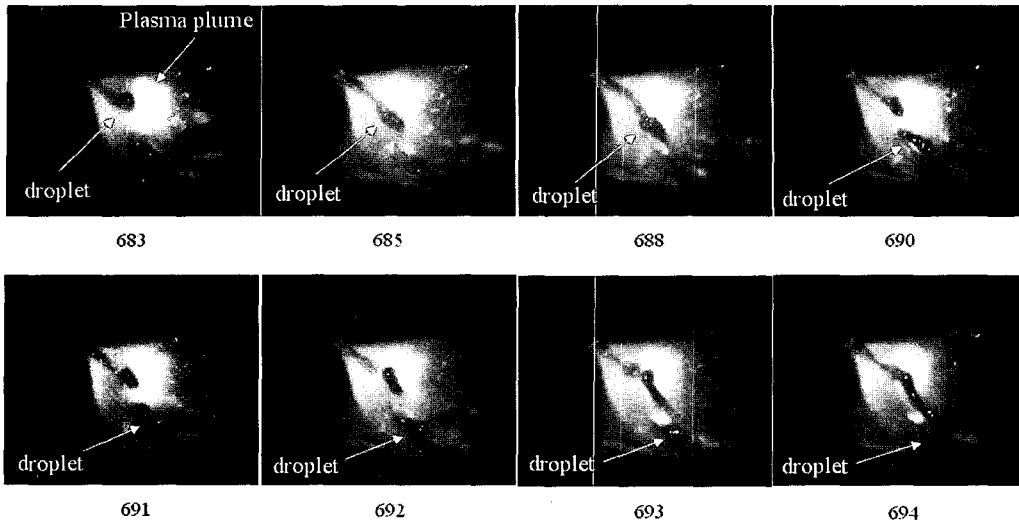


Fig. 13 High speed images for 0mm interspacing distance between laser and arc

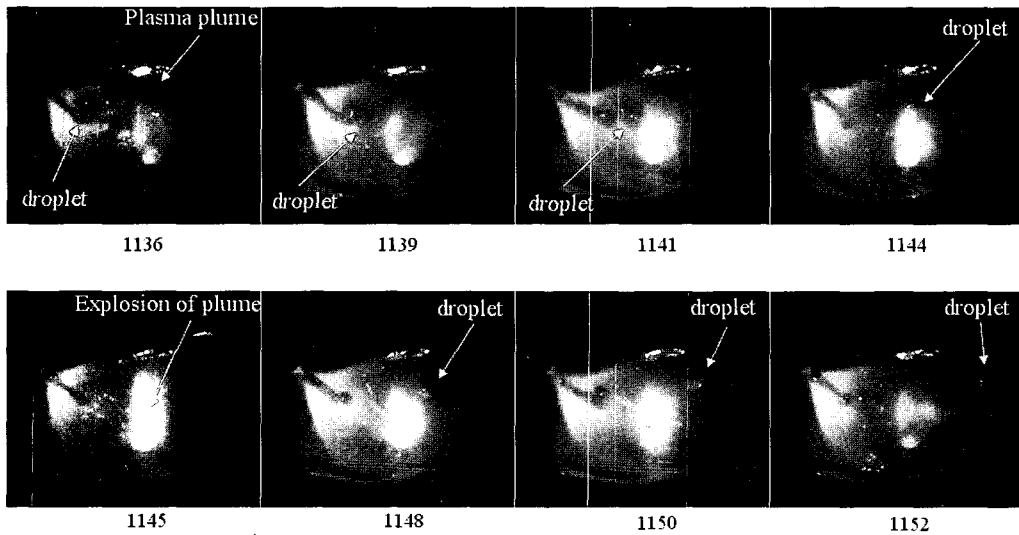


Fig. 14 High speed images for 2mm interspacing distance between laser and arc

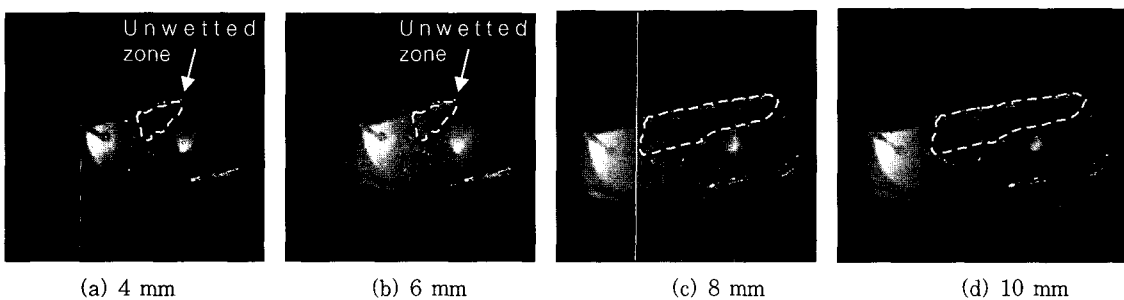


Fig. 15 Weld pool flows according to various interspacing distances from 4mm to 10mm

언더컷이 발생하는 경향이 나타났다.

회전아크 하이브리드 용접에서 언더컷이 발생하지 않는 원인은 두 가지로 사료된다. 먼저 레이저-아크 거리가 짧은 경우에도 용적의 이행모드가 다양하게 존재하

여 용적이 이행도중 날림을 방지할 수 있다. 두 번째로 레이저-아크간 거리가 긴 경우에도 전극의 회전에 따른 용융풀의 강제 유동이 발생하므로 젖음성이 확보되어 언더컷을 방지할 수 있다.

5. 결 론

레이저-회전아크 하이브리드 용접에서는 아크센서를 이용한 용접선 추적이 가능할 뿐 아니라 보호가스의 조성, 레이저-아크간 거리 등의 공정변수의 변화에 강건한 공정이 가능하다. 그러나 GMA전극을 기울인 형태의 회전아크 하이브리드 용접에서 스파터의 발생이 상대적으로 많이 발생하고, 회전아크 메커니즘을 부착함으로써 시스템이 복잡해지며 아크 회전에 따른 진동 문제 등이 아직 해결할 문제로 남아 있다. 향후 레이저-아크 하이브리드 용접의 적용에서 공정의 강건성이나 간극의 대응력을 확보하기 위하여 고속 아크 제어를 도입한 공정 개발에 대한 연구가 적극적으로 검토될 필요가 있다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. C. Bagger and F. O. Olsen: Review of laser hybrid welding, *Journal of Laser Applications*, 17-1 (2005), 2-14
2. H. Staufer.: Laser-hybrid welding of ships, *Welding Journal*, 83-6 (2004), 39-41
3. H. Straufer, M. Ruhrnobl and G. Miessbacher: Laser hybrid welding and laser brazing: State of the art in

technology and practice by the examples of the Audi A8 and VW-Phaeton, *Society of Manufacturing Engineers, Technical Paper*, 2003, MS03-130

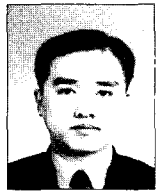
4. N. Abe and M. Hayashi: Trends in laser arc combination welding methods, *Welding International*, 16-2 (2002), 94-98
5. H.-B. Chae, C.-H. Kim, J.-K. Kim, N.-H. Kang, J.-H. Kim and S. Rhee: The Effect of Shielding Gas Composition in CO₂ Laser -MIG Hybrid Welding, Autumn Annual Meeting of Korean Welding Society, 2004, 52-54 (in Korean)
6. C.-H. Kim, H.-B. Chae, J.-H. Kim, S. Rhee: Development of CO₂ Laser-Arc Hybrid Welding Technology in KITECH, 1st KWS-JWS Joint Symposium of Yong Researchers, Seoul, Korea, June 24, 2005, 380-383
7. H.-B. Chae, C.-H. Kim, J.-K. Kim, N.-H. Kang, J.-H. Kim and S. Rhee: Improvement of Gap Bridging Ability in CO₂ LASER-GMA Hybrid Welding, Spring Annual Meeting of Korean Welding Society, 2005, 100-102 (in Korean)
8. C.-H. Kim, H.-B. Chae, C.-W. Lee, J.-H. Kim and S. Rhee: Development of Laser-Rotating Arc Hybrid Welding Process, *Journal of KWS*, 24-1 (2006), 88-92 (in Korean)
9. C.-H. Kim, J.-K. Kim N.-H. Kang and C.-W. Lee: Preliminary Study on Arc Sensor in Laser-Rotating Arc Hybrid Weldng. *Journal of KWS*, 24-1 (2006), 7-9 (in Korean)



- 김철희
- 1973년생
- 한국생산기술연구원, 정밀접합팀
- 용접공정 해석 및 자동화
- e-mail: chkim@kitech.re.kr



- 채현병
- 1969년생
- 한국생산기술연구원, 정밀접합팀
- 하이브리드 용접 및 자동화
- e-mail: hbchae@kitech.re.kr



- 김준기
- 1971년생
- 한국생산기술연구원, 정밀접합팀
- 용접재료, 하드페이싱 용접공정
- e-mail: jkim@kitech.re.kr



- 김정한
- 1956년생
- 한국생산기술연구원, 정밀접합용접팀
- 용접야금, 용접재료
- e-mail: jhkim@kitech.re.kr