

## 내면 용접부재의 전자세 레이저-아크 하이브리드 용접 연구

안 영 남\* · 김 철 희\*<sup>†</sup> · 김 정 한\*

\*한국생산기술연구원 용접접합연구그룹

## Position welding for internal welded specimen using laser-GMA hybrid welding

Young-Nam Ahn\*, Cheolhee Kim\*<sup>†</sup> and Jeonghan Kim\*

\*Welding &amp; Joining Research Group, KITECH, Incheon 406-840, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : chkim@kitech.re.kr

(Received December 2, 2014 ; Accepted February 24, 2015)

## Abstract

Laser-arc hybrid welding has been considered as an effective pipe girth welding process since early 2000's. Tolerance for fit-up offsets such as gap and edge misalignment is one of most important requirements in pipe girth laser-arc hybrid welding, and several approaches using parameter optimization, a laser beam scanning and an arc oscillation have been tried. However the required offset tolerance has not been fully accomplished up to now and laser-arc hybrid welding has not been widely applied in pipeline construction than expected, despite of its high welding speed and deep penetration. In this study, internal welding was adopted to ensure the offset tolerance and sound back bead. The effect of welding parameters on bead shape was investigated at the flat position. Also tolerances for gap and edge misalignment were verified as 0.5 mm and 2.0 mm, respectively. The position welding trials were conducted at several welding positions from the flat to the overhead position in a downward direction. With the fixed welding speed, arc current for gas metal arc welding current and laser output power, adequate welding voltages for gas metal arc welding were suggested for each position.

Key Words : Laser-Arc hybrid welding, Internal welding, Root pass welding, Pipe girth welding

## 1. 서 론

레이저-아크 하이브리드 용접공정은 1970년대 후반 W. M. Steen에 의해 제안되었으며 레이저와 아크용접의 이점이 모두 구현가능하다. 즉, 레이저용접의 깊은 용입과 빠른 용접속도를 활용하면서도 아크용접의 갭(gap) 대응력, 용가재 공급에 따른 용착금속의 개질이 가능한 특징을 가지고 있다<sup>1-3)</sup>. 레이저-아크 하이브리드 용접에서는 열원으로 레이저와 아크가 동시에 적용되기 때문에 용접현상, 비드형상의 모델링, 레이저-아크 간 거리나 아크용접공정변수, 보호가스 등 다양한 공정변수에 따른 용접특성에 대한 연구가 진행되었다<sup>4-9)</sup>.

해저의 유정이나 가스전으로부터 자원을 운송하기 위하여 육지와와의 거리에 따라 자원수송선을 이용하거나 해저 파이프라인을 이용하고 있다. 바지선 상에서 해저

파이프라인을 건설하는 경우 파이프의 회전이 불가능하여 5G 용접자세가 이용되고 있는데 현재 자동화된 가스메탈아크(GMA) 용접이 주로 사용되고 있다<sup>10)</sup>. 육상 파이프라인 건설과 달리 해저 파이프라인 건설 시에는 토목 공사가 요구되지 않고 바지선을 운용하기 위한 선단 운용비용이 상당히 높기 때문에 용접공정의 품질 및 생산성이 공사의 수익성을 결정한다. 이에 따라 GMA 용접에 비해 생산성이 높은 레이저-아크 하이브리드 용접을 해저파이프라인에 적용하고자 하는 연구가 진행되었으며<sup>11)</sup>, 다양한 용접자세에 대한 레이저-아크 하이브리드 용접에 대한 연구도 진행되었다<sup>12)</sup>.

그러나 파이프 치구 시에 갭이나 높이단차(edge misalignment)의 치구 오차(fit-up offset)가 발생하여 레이저-아크 하이브리드용접 적용에 어려움이 있다. 레이저-아크 하이브리드 용접이 레이저 단독 용접에 비해 치구오차에 대응력이 높기는 하나 아크용접에 비해

부족하고, 특히 높이단차에 대한 대응력 보다는 겹에 대한 대응력이 부족하다<sup>13)</sup>. 아래보기자세에서 공정변수의 변경 없이 대응이 가능한 겹의 크기는 0.5 mm 내외이고 아크용접변수의 제어를 통해 대응이 가능한 겹이 크기는 1.0 mm 내외로 보고되었다<sup>14)</sup>. 겹의 크기가 1.0 mm 이상인 경우에는 아크용접의 팁-모재간 거리의 조정, 더 큰 직경의 와이어 적용, 회전아크의 적용, 빔 스캐닝의 이용 등이 검토되었으나<sup>14-16)</sup>, 제어 및 시스템의 복잡성으로 인해 연구단계의 검토만 이루어졌다. 부족한 겹 대응력으로 인한 용락 발생이 안정적이면 비드의 형성을 방해함과 더불어 파이프 5G자세의 레이저-아크 하이브리드 용접 시에는 용접 각도에 따른 불완전용입도 해결해야할 과제이다. 해저파이프라인 용접에서는 용접속도를 향상시키기 위하여 5G 자세용접을 하향방향으로 수행하고 있는데 중력으로 인한 용융풀의 흐름이 레이저의 조사를 방해하여 150도와 180도 부근에서 불완전용입을 야기하고 있다<sup>17)</sup>. 본 연구에서는 부재의 치구오차와 전자세 용접에 따른 불완전한 이면비드를 방지하기 위하여 본 용접 전 이면에서의 내부용접을 수행한 후 레이저-아크 하이브리드 용접특성을 평가하고자 하였다. 평가에 사용한 용접 변수는 용접 전류와 전압, 부재의 겹 및 높이 단차, 레이저 초점 위치, 레이저 아크간 거리 및 아크용접모드 특성이며, 표면비드 및 단면 형상을 통해 품질을 평가하였다.

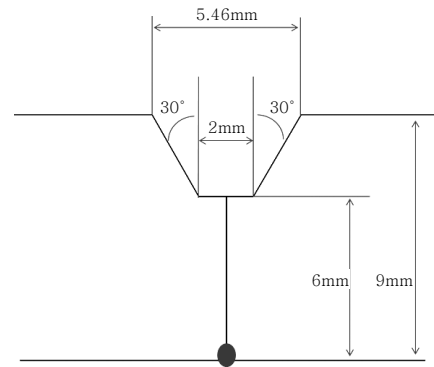
## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용한 소재는 조선용 A grade 강판으로 밀 시트(Mill sheet)상의 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다. 용접 시편의 치수는 100 mm×200 mm, 두께는 9 mm이며 Fig. 1과 같이 그루브를 가공한 후 이면에 가스텅스텐아크(GTA) 용접으로 이면용접을 수행하고 Y 그루브 용접을 실시하였다.

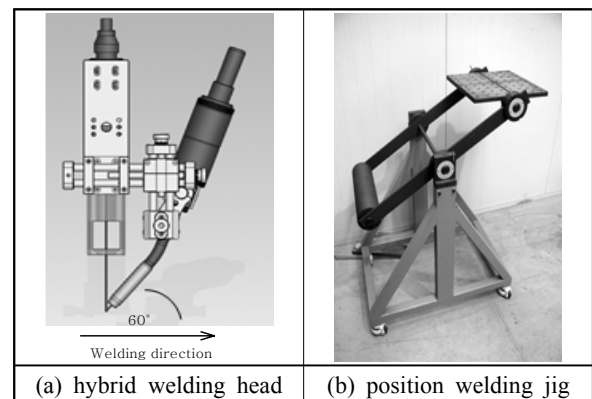
실험에 사용한 레이저는 최대출력 4 kW급 Yb:YAG 디스크 레이저이고 레이저 빔 전송 파이버의 직경은 200 μm, 광학계의 초점거리는 220 mm이며, 이 때 최소 빔 직경은 0.22 mm이다. 아크 용접기로 정전압모드와 펄스모드가 모두 가능한 500 A급 디지털 인버터용접기를 사용하였으며, 푸쉬-풀방식 토치를 사용하여 와이어의 송급성을 향상시켰다. 사용된 용접와이어는 AWS ER70S-

**Table 1** Chemical composition of base metal used (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.1552	0.232	0.706	0.095	0.049	Bal.



**Fig. 1** Joint preparation



**Fig. 2** Laser-arc hybrid welding system for position welding

6으로 직경은 1.0 mm이며 보호가스는 아크용접노즐을 통해 Ar-CO<sub>2</sub> 50% 가스를 20 l/min로 공급하였다.

Fig. 2(a)와 같이 하이브리드 용접헤드에서 레이저와 아크간의 각도는 30도로 설정하였으며, 레이저는 모재에 수직으로 조사되고 아크용접토치와 모재의 각도는 60도이다. 부재의 치구오차에 대한 대응력을 확보하기 위해 아크용접이 레이저용접에 선행하였으며 이에 따라 아크용접은 후진법으로 진행되었다. 파이프 5G 하행 용접을 모사하기 위해 Fig. 2(b)와 같은 포지션용접 지그와 6축 용접로봇을 사용하여 Fig. 3과 같은 각도에서 평판 시험편에 대한 용접실험을 진행하였다. 실험에 사용한 주요 용접변수는 Table 2에 정리하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1 아래보기용접 평가

먼저 아크용접변수에 따른 비드형상을 관찰하기 위해 정전압모드에서 아래보기자세로 그루브용접을 실시하였다. 레이저 출력은 모든 조건에서 4 kW로 고정하였으며, 초점위치는 0 mm, 레이저-아크간 거리는 4 mm

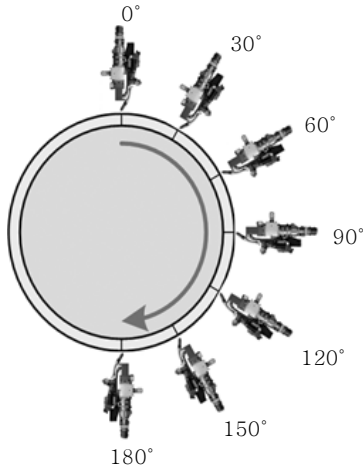


Fig. 3 Welding positions in the experiments

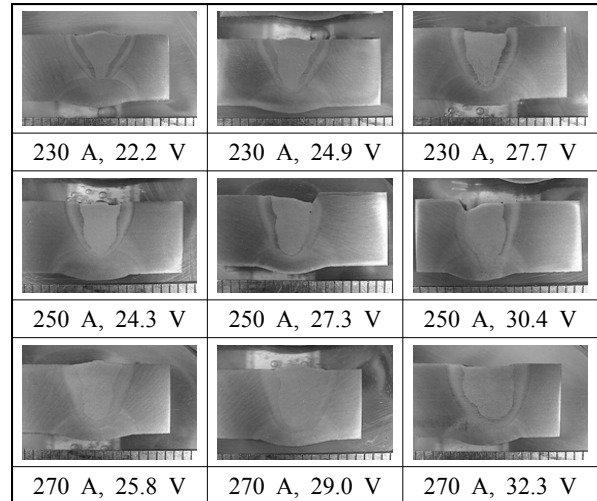
Table 2 Welding conditions used for hybrid welding

Laser power (kW)	4.0
focal position (mm)	-2.0 ~ 0.0
Laser-Arc interspacing distance (mm)	1.0 ~ 5.0
Arc current for GMA welding (A)	230, 250, 270
Welding voltage for GMA welding (V)	22.2~32.3
Welding speed (m/min)	1.0, 1.5
Wire feed rate (m/min)	12.4, 13.9, 15.7
CTWD (mm)	15
Shielding gas flow rate (l/min)	20 (Ar-CO <sub>2</sub> 50%)

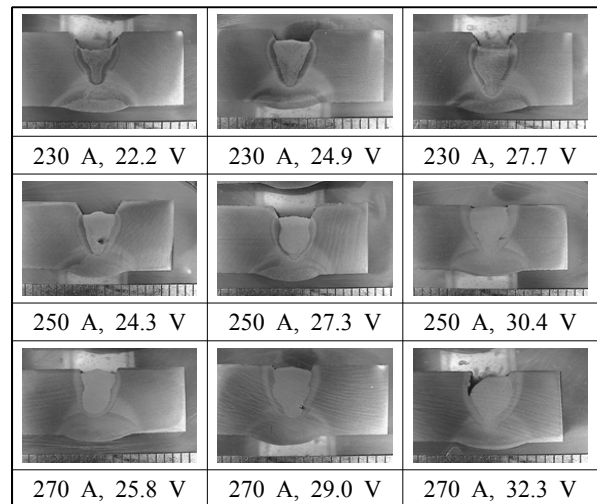
로 설정하였다. 용접속도는 1.0 m/min과 1.5 m/min 두 가지 속도에 대해 실험을 진행하였고 용접전류는 230 A, 250 A, 270 A로 가변하고, 용접전압은 3개의 용접전류에 각각 적절하게 제시된 27.7 V, 30.4 V, 32.3 V의 80%, 90%, 100%로 설정하여 각 용접전류별 3종류의 전압을 사용하였다.

용접속도 1.0 m/min일 때 모든 조건에서 표면 비드는 양호하게 형성되었으며, Fig. 4에서와 같이 단면검사에서도 결함은 보이지 않았다. 용접전류가 증가할수록, 즉 와이어 송급속도가 증가할수록 용착량이 증가하는 경향이 확인되었다. 용접전압이 낮은 경우 불룩한 비드가 형성되고, 용접전압이 높은 경우에는 비드퍼짐성이 개선됨을 알 수 있다. 용접속도가 1.5 m/min일 경우 용접속도 1.0 m/min과 유사한 경향을 보여주었지만 용접전류와 용접전압이 높은 경우 단면검사에서도 언더컷 결함이 발견되었다.

Fig. 5는 용접전류 230 A, 용접전압 27.7 V, 용접속도 1.0 m/min에서 초당 2000 프레임의 속도로 용



(a) Welding speed: 1.0 m/min



(b) Welding speed: 1.5 m/min

Fig. 4 Bead cross-sections for various arc welding parameters

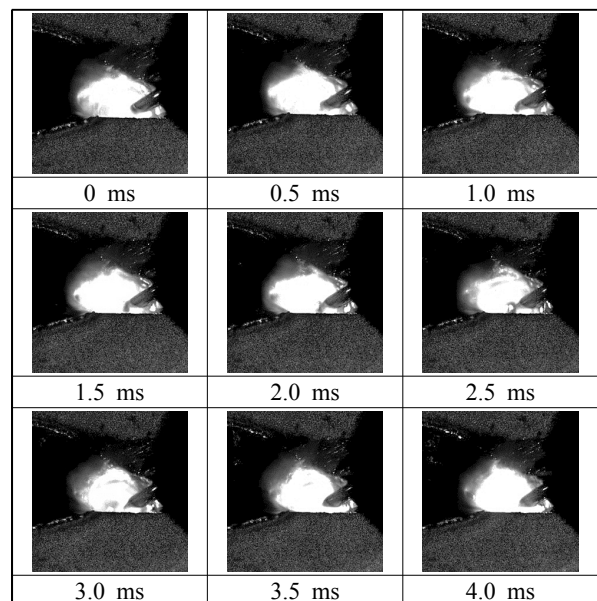
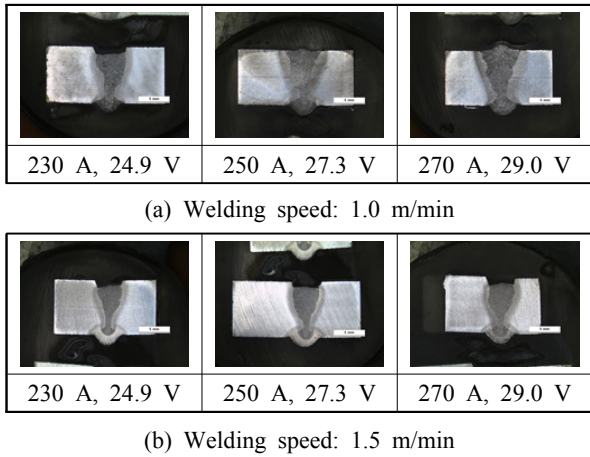


Fig. 5 High-speed images for hybrid welding



**Fig. 6** Cross-sections for hybrid welds with a joint gap of 0.5 mm

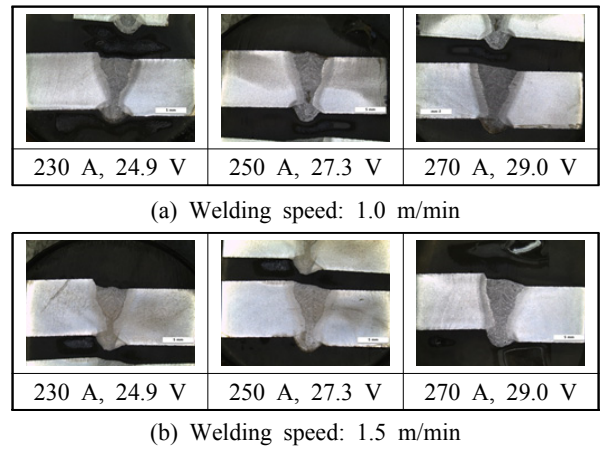
접현상을 고속촬영한 이미지로 레이저-아크 하이브리드 용접 적용 시 스패터의 발생이 거의 없이 안정된 용적이 행 및 용융풀형성이 관찰되었다.

아래보기 용접결과를 바탕으로 0.5 mm 갭과 2.0 mm 높이단차에 대해 용접 속도 1.0 m/min과 1.5 m/min 으로 설정하여 평가를 진행하였다. 아래보기 용접조건 중 용접전압을 적정전압의 90%로 설정하여 평가를 수행한 결과는 Fig. 6과 같다.

Fig. 3의 갭이 없는 경우보다 갭이 존재하는 경우 더 많은 용착량이 요구되므로 동일 용접전류에서 용접할 경우 언더필이 발생하는 경우가 관찰되었으나 용접속도 1.0 m/min과 용접전류 270 A와 같이 용착량이 충분할 경우에는 언더필 없이 덧살의 형성이 가능하였다. 그러나 용접조건과 무관하게 용입부족, 융합불량 등의 결함은 발견되지 않았으며, 본 연구에서는 파이프용접 시 초층용접을 모사한 실험이므로 언더필의 경우 다층 용접 시 후속패스용접으로 극복이 가능할 것으로 사료된다.

갭 실험과 동일한 조건에서 높이단차실험을 수행한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 비드형상에서 용입부족, 융합불량 등의 결함은 발견되지 않았으나, 높이단차의 존재에 따라 이면비드형상이 비교적 양호하지 못하므로 내면용접에서 비드형상개선이 요구된다. 단차가 있는 양쪽 부재 중 높이가 높은 쪽 부재까지 비드가 형성되지 못한 경우가 발생하였으나 이 경우에도 갭이 존재하는 부위의 언더필과 마찬가지로 다층용접의 후속 패스용접으로 극복이 필요하다.

레이저 초점위치 및 레이저-아크간 거리에 따른 용접 비드 형상에 대한 실험을 수행한 결과는 아래와 같다. 평가 실험에서 아크 모드는 정전압모드와 펄스모드 두



**Fig. 7** Cross-sections for hybrid welds with an edge misalignment of 2.0 mm

Mode Focal Position	Mode	
	constant voltage	pulse
0 mm		
-1 mm		
-2 mm		

**Fig. 8** Bead cross-sections for various laser focal positions

가지를 사용하여 실험을 진행하였으며 용접전류와 용접속도는 250 A와 1 m/min으로 각각 고정하였다. 용접전압의 경우 정전압모드 용접에서는 적정용접전압의 90%인 27.3 V를 사용하였으며, 펄스모드 용접에서는 적정용접전압인 28.3 V를 이용하였다. 각 아크용접모드별 레이저초점위치에 따른 비드단면형상과 하이브리드용접부의 용입깊이는 Fig. 8과 9와 같다. 정전압모드 아크용접을 이용한 하이브리드용접에서는 레이저 초점위치가 모재쪽으로 깊어짐에 따라 레이저-아크 하이브리드 용접에 의한 용입깊이가 깊어지는 경향을 보였으나 펄스모드 아크용접을 이용한 하이브리드용접에서는 초점위치에 따른 하이브리드 용접에 의한 용입깊이의 차이가 상대적으로 크지 않다. 각 아크용접모드별 레이저-아크간 거리에 따른 비드 단면형상은 Fig. 10과 같으며, 아크용접모드나 레이저-아크간 거리와 무관하게 거의 일정한 비드가 형성된다.

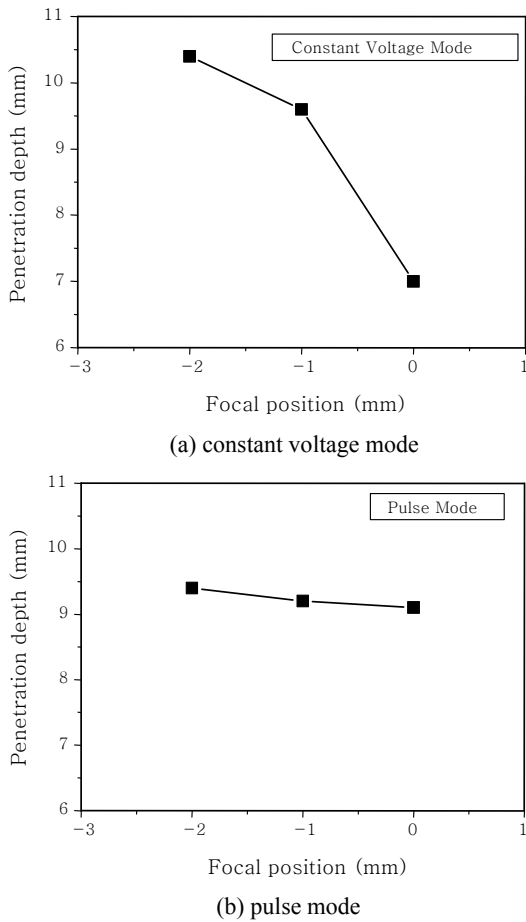


Fig. 9 Penetration depth of the hybrid welds according to focal position

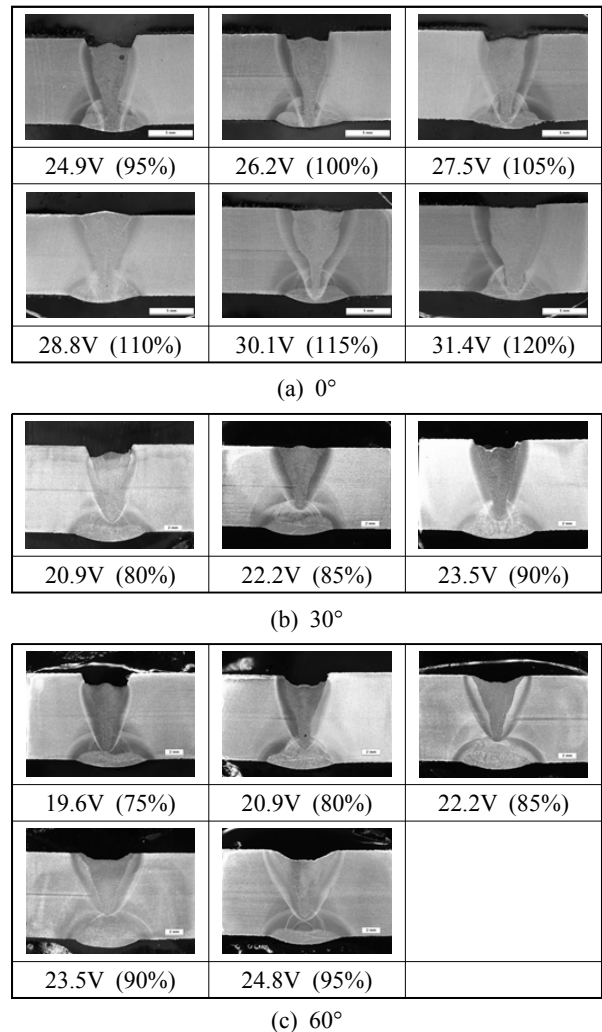
L-A distance \ Mode	constant voltage	pulse
2 mm		
3 mm		
4 mm		
5 mm		

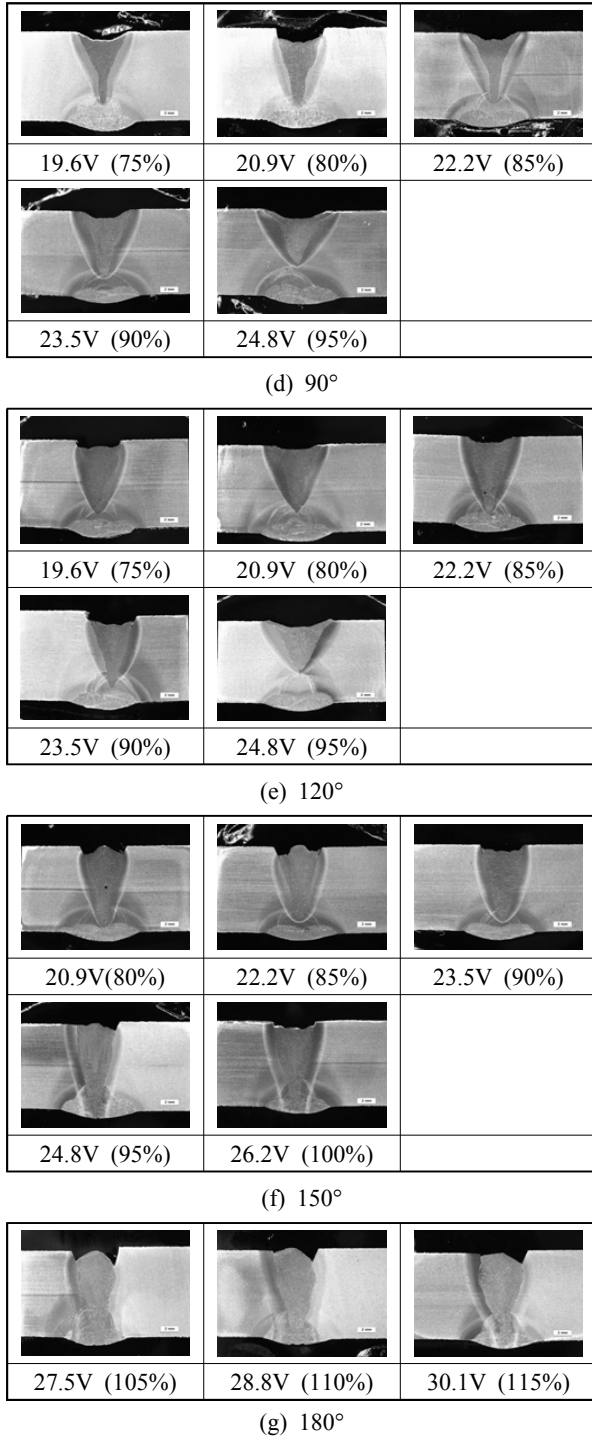
Fig. 10 Bead cross-sections for various laser-arc interspacing (L-A) distances

### 3.2 각도별 용접특성 및 적정용접영역

아래보기 실험결과를 바탕으로 용접조건을 설정하여 각도별 실험을 수행하였다. 레이저 출력은 4 kW, 레이저 초점위치는 0 mm, 용접속도는 1 m/min으로 고정하였으며, 용융풀의 길이를 짧게 유지하기 위해 1 mm의 레이저-아크간 거리와 230 A의 용접전류를 이용하였다. 레이저-아크간 거리를 0 mm로 설정할 경우 더 짧은 용융풀의 형성이 가능하나 키흔에서 발생하는 플룸으로 인해 용적이행이 방해되고 이로 인한 스패터발생으로 인해 용접조건에서 제외하였다<sup>6)</sup>. 아크용접모드는 초점위치의 영향이 적은 펄스모드로 선정하였다. 실험에서 시편의 각도는 Fig. 3과 같이 총 7개를 고려하였으며, 용접전압을 변경하면서 평가를 수행하고 단면형상을 Fig. 11에 나타내었다.

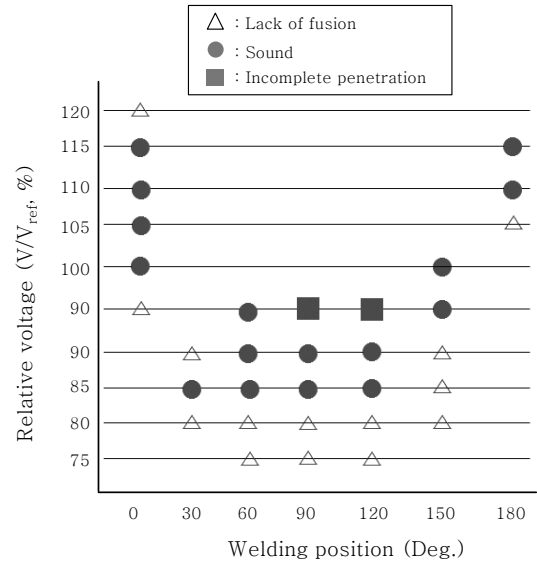
아래보기용접인 0도 각도에서 용접전압의 범위를 적정용접전압의 95%에서 120%까지 설정하고 용접을 수행한 결과 용접전압이 낮은 경우에는 블록비드가 형성되고 그루브내 측면 융합불량이 발생되었으며, 용접전





**Fig. 11** Bead cross-sections for various welding voltages and positions

압이 증가할 경우 비드 퍼짐이 개선되며 측면 최대융합 깊이가 증가한다. 그러나 용접전압이 120%와 같이 너무 높은 경우에는 그루브 모서리 부분을 녹이지 못하고 융합불량의 결함이 발생되었다. 아래보기용접자세와 함께 다른 용접각도에서 비드형상을 정리하여 Fig. 12에 나타내었다. 용접각도가 120도까지 증가할 경우 적절



**Fig. 12** Bead shape evaluation according to welding position and voltage

한 용접전압은 감소하는 경향이 있으나 이후 180도까지는 다시 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 용융풀의 흐름이 심한 90도와 120도에서는 불완전용입이 발생하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 헤저파이프라인 적용을 위한 레이저-아크 하이브리드 용접 기초평가를 통하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 이면에서의 내부용접을 수행한 후 초층용접을 모사하기 위한 레이저-아크 하이브리드 용접을 수행하여 아래보기 용접에서 공정변수의 영향을 평가하였다.
- 2) 레이저-아크 하이브리드 용접 시 치구오차에 대한 대응력을 평가한 결과 0.5mm 갭과 2.0 mm의 높이단차에 대해 대응이 가능하였다.
- 3) 고정 용접속도 및 용접전류, 레이저출력에서 전압을 제어하여 용접각도별 용접비드형상을 평가하였으며, 수직하향방향의 각 각도별로 안정적 용접이 가능한 용접전압의 영역을 도출하였다. 용접위치가 0도에서 90도로 각도가 증가할 경우 적정용접전압은 감소하나 90도에서 180도의 범위에서는 적정용접전압은 다시 증가하는 경향을 보인다.

#### References

1. W. M. Steen, M. Eboo and J. Clarke, Arc Augmented Laser Welding, *Advances in Welding Processes Proceedings*, 4th International Conference, Harrogate, U. K.,

- May (1978), 9-11
2. N. Abe and H. Hayashi: Trends in Laser Arc Combination Welding Methods, *Welding International*, 16 (2) (2002), 94-98
  3. C. Bagger and F. O. Olsen, Review of Laser Hybrid Welding, *Journal of Laser Applications*, 17 (1) (2005), 2-14
  4. C.-H. Kim, H.-B. Chae, C.-W. Lee, J.-H. Kim and S. Rhee, Welding phenomena in laser-GMA hybrid welding process with and without arc rotation, *Journal of Korean Welding Society*, 24 (3) (2006), 221-227
  5. C.-H. Kim, N.-H. Kang, H.-B. Chae and J.-H. Kim, Modeling of weld beads for laser-GMA hybrid welding, *Key Engineering Materials*, 345-346 (2007), 1481-1484
  6. C.-H. Kim, H.-B. Chae, J.-K. Kim and J.-H. Kim, Optimization of laser-arc interspacing distance during CO<sub>2</sub> laser-GMA hybrid welding by using high-speed imaging, *Advanced Materials Research*, 26-28 (2007), 481-484
  7. H.-B. Chae, C.-H. Kim, J.-H. Kim and S. Rhee, Welding phenomena in hybrid laser-rotating arc welding process, *Materials Science Forum*, 539-543 (2007), 4093-4098
  8. C.-H. Kim, W.-Y. Choi, J.-H. Kim and S. Rhee, Relationship between the weldability and the process parameters for laser-TIG hybrid welding of galvanized steel sheets, *Materials Transactions*, 49 (1) (2008), 179-186
  9. H.-B. Chae, C.-H. Kim, J.-H. Kim and S. Rhee: The effect of shielding gas composition in CO<sub>2</sub> laser-gas metal arc hybrid welding, *Journal of Engineering Manufacture*, 222 (11) (2008), 1315-1324
  10. H.-S. Moon, J.-C. Kim, J.-J. Kim, Y.-B. Kim, D.-S. Yoon and J.-B. Choo, Automatic welding system for offshore pipeline construction, *Proceedings of the 2003 Spring Annual Meeting of Korean Welding Society*, (2003), 135-137
  11. J.H. Shin, Y.-S. Park, Y.-S. Lee, Y.-P. Yoon and H.-S. Kim: Study of hybrid laser welding technology for S-laying, *Proceedings of the 2003 Spring Annual Meeting of Korean Society of Laser Processing*, (2003), 52-55
  12. C.-H. Kim, H.-S. Lim and J.-K. Kim, Position welding using disk laser-GMA hybrid welding, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 28 (1) (2008), 83-86
  13. H.S. Kim, Y.S. Lee, Y.S. Park, J.K. Kim and J.H. Shin, Study on the welding variables according to gap tolerance of butt joint in laser hybrid arc welding of carbon steel, *Proceedings of the second international WLT-conference on lasers in manufacturing*, (2003), 164-170
  14. H.-B. Chae, C.-H. Kim, J.-H. Kim and S. Rhee, Improvement of gap bridging ability in CO<sub>2</sub> laser-GMA hybrid welding, *Journal of Korean Welding Society*, 24 (5) (2006), 277-384
  15. C.-H. Kim, H.-B. Chae, J.-K. Kim and J.-H. Kim, Development of laser-rotating arc hybrid welding process, *Journal of Korean Welding Society*, 24 (1) (2006), 88-92
  16. S. Gook, A. Gumenyuk, and M. Rethmeier. Orbital laser-hybrid welding of pipelines using a 20 kW fibre laser, *Proceedings of the Fifth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing*, Munich, (2009)
  17. A. Gumenyuk, S. Gook, M. Lammers and M. Rethmeier, High power fibre laser welding for pipeline applications, *Proceedings of the 5th international congress on laser advanced materials processing*, (2009), Paper No. 09-145