특 집 : 레이저빔을 이용한 하이브리드 용접기술(1)

레이저-아크 하이브리드 용접의 원리와 특징

김 종 도 · 카타야마 세이지

Fundamentals and Characteristics of Laser-Arc Hybrid Welding

Jong-Do Kim and Seiji Katayama

1. 서 론

최근, 레이저-아크 하이브리드 용접[1-5]은 용입이 깊고[1], 갭(gap)의 허용 범위가 넓으며[1,2] 기공이 적다[2,3]는 점에서 많은 주목을 받고 있다. 레이저-아크 하이브리드 용접시의 용입특성과 기공발생에 미치는 용접변수의 영향에 관한 내용들이 많이 보고되고 있다[2,3,5]. 그러나 YAG 레이저를 이용한 하이브리드 용접시의 용입특성에 대해서는 자세히 보고되지 않고 있으며, 그리고 물리적 현상에 대해서도 잘 이해되지 않고 있는 실정이다.

그러므로, 본 연구에서는 하이브리드 용접시에 YAG 레이저 빔 또는 TIG 토치가 각각 선행하는 위치에서 용접부 용입깊이와 기공발생에 미치는 용접변수, 즉 레이저 출력, 아크전류, 용접속도 및 빔축과 전극간 거리의 영향에 대하여 조사하였으며, 그리고 그 결과는 TIG 아크 또는 YAG 레이저만을 이용하여 얻어진 용접 결과와 비교하였다. 하이브리드 용접현상과 용입특성에 미치는 영향인자를 이해하기 위해서, 아크와 하이브리드 용접을 행하는 동안 레이저 조사위치와 TIG 아크만에 의해 형성된 용융지(weld pool, molten pool) 간의 관계뿐만 아니라 아크 플라즈마와 레이저 유기 플룸의 거동을 CCD 카메라와 고속도 카메라를 이용하여 관찰하였다. 더욱이 기공 감소 메카니즘과 하이브리드 용접현상을 규명하기 위해서, 용융지에서의 키홀거동과 융액흐름을 미소초점을 가진 X선 실시간 관찰 시스템을 이용하여 관찰함으로서 레이저-아크 하이브리드 용접현상에 대하여 조사하였다.

2. 사용재료와 실험 절차

본 실험에서 사용한 재료는 18.35%Cr-8.56%Ni-0.05%C-0.51%Si-0.89%Mn-0.027%P-0.001%S의 화학조성을 가진 두께 5mm의 304 오스테나이트계 스테인리스강을 이용하였다. 강 중에서 소량의 S성분은 용융지내의 고온부에서 저온부로 융액의 흐름을 유발하는 표면장력을 형성하게 하는 것으로 사료된다. 소량의 S성분으로 말미암아 용입깊이는 일반적으로 얕게 된다.

본 연구에서는, YAG 레이저 장치(최대 출력 P_0 =1.8kW)와 TIG 용접기(최대 전류 300A)를 사용하였으며, TIG 전극은 2%Ce_2O_3를 함유하는 직경 3.2mm의 것을 이용하였다. Fig. 1에 레이저 빔과 TIG 토치의 실험 장치를 나타낸다. 플레이트 재료에 수직으로 레이저 빔을 조사하고, TIG 토치 노즐로부터 Ar 실드가스를 공급하였다. 하이브리드 프로세스에 있어서는, DCEN 모드로 용접하였다. 용접성과 용입깊이를 평가하기 위해서 레이저 출력, 아크 전류 및 용접속도와 같은 용접조건을 변화시켰다. 주된 용접조건은 플레이트 재료의 경우, 레이저 출력: P_l=1.7kW (cw), 비초점거리: f_d=0mm, 용접 속도: v=8 또는 10mm/s, 아크 전류: I_a=100A, 전극 높이: h=2mm, 빔축과 전극간의 거리: d=2mm, 각도: α=55도(deg.), 그리고 Ar 실드가스의 유량: R_g=5.0×10^{-4} 또는 6.7×10^{-4}m^3/s 이다. 본 보고에서, YAG 레이저 빔이 뒤따르는 후진용접을 편의상 TIG-YAG 용접이라 부르기로 하고, YAG

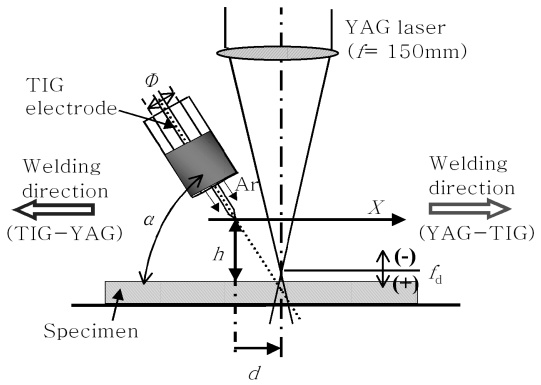


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

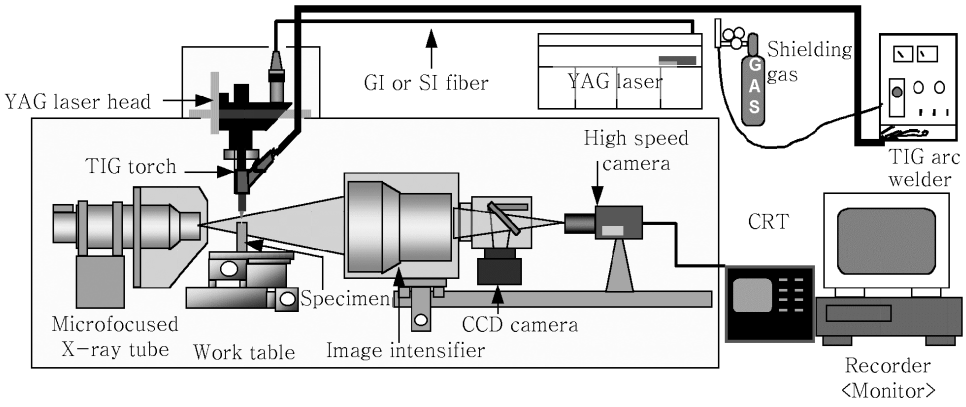


Fig. 2 Experimental set up of X-ray transmission imaging system for observation of phenomena during hybrid welding

레이저 빔이 선행하는 전진용접을 YAG-TIG 용접이라 부르기로 한다. 전극선단(tip)은 빔축과 전극간의 거리(d) 및 용융지의 위치를 측정하여 정하였다.

하이브리드 용접하는 동안, 아크 플라즈마와 레이저 유기 플룸의 거동을 CCD 카메라(샘플링 속도: 1/30s, 셔트속도: 1/10,000s)와 고속도카메라(프레임 속도: 40,500f/s)를 이용하여 관찰하였다. 또한 키홀의 거동, 버블(bubble)의 발생, 융액의 흐름 및 용융지의 형상을 Fig. 2에서 나타내는 바와 같이 X선 투과 가시화 시스템을 이용하여 관찰하였다. 용융지의 형상을 가시화하기 위해서, 플래티늄 와이어를 STS304 플레이트 강재 표면의 홀(hole)에 삽입하였다. 그리고 또한 용융지내의 융액 흐름을 조사하기 위하여 맞대기 이음면 사이에 텅스텐(W) 입자를 삽입하였다. YAG 레이저 빔은 주로 GI 화이버로 전송하였으며 비디오 프레임 속도는 1,000 (frames/s)로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 레이저-아크 하이브리드 용접 특성과 기공의 발생경향

레이저-아크 하이브리드 용접에 대한 기초적인 현상을 이해하기 위해서, 레이저 출력, 아크 전류, 비초점거리 등을 변화시켜 비드 용접(Bead welding)을 행하였다. 용접 후에 용접성을 평가하고, 용접비드의 횡단면을 조사하여 용입깊이를 측정하였으며, 용접비드에 대한 X선 검사와 횡단면 관찰에 의하여 기공의 발생경향을 평가하였다.

3.1.1 레이저 출력과 아크 전류의 영향

YAG 레이저 단독 또는 0.6~1.7kW 범위에서 TIG 아크 병용의 YAG 레이저로 용접하여 용입특성에 미치는 레이저 출력의 영향을 조사하고, STS304 강의 용접비드 횡단면을 Fig. 3에 나타낸다. 또한 용입에 미치는 아크 전류의 영향을 조사하기 위한 STS304 강의 용접비드의 횡단면을 Fig. 4에 나타낸다.

YAG 레이저나 TIG-YAG 프로세스 중 어느 쪽도, 레이저 출력이 증가함에 따라서 용입은 깊어졌다. 그리고 각 출력조건에서 TIG-YAG 용접에서 얻어진 용입깊이는 YAG 용접의 경우보다 0.5mm 더 깊었다. 한편 Fig. 4에서는, 용입은 깊지 않지만 아크 전류가 증가함에 따라 횡단면적은 증가하였다.

이러한 결과로부터, 하이브리드 용접에서 용입깊이는

STS304(5mm^t), v=10mm/s, f_d=0mm, α=55°, h=2mm, d=2mm, I_a=100A, Shielding gas : Ar(5.0×10^{-4}m^3/s)

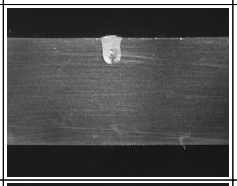
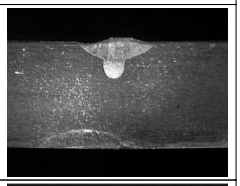
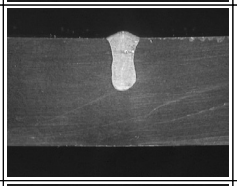
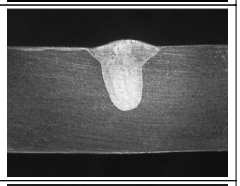
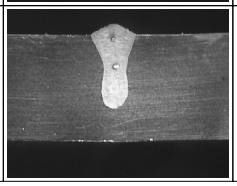
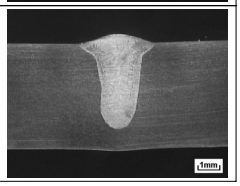
Cross section		
Laser power [kW]	YAG	TIG-YAG
0.6		
1.2		
1.7		

Fig. 3 Cross sections of STS304 subjected to YAG laser only and laser-arc hybrid welding at various laser powers

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

STS304(5mm^t), P_l=1.7kW, v=10mm/s, f_d=0mm, α=55°, h=2mm, d=2mm, Shielding gas : Ar(5.0×10^{-4}m^3/s)

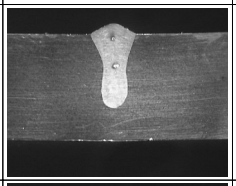
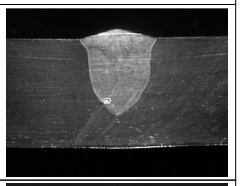
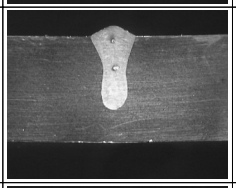
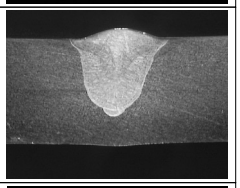
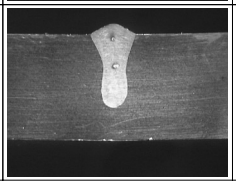
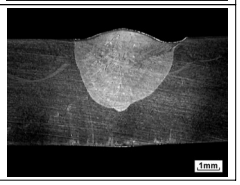
Cross section		
Arc current [A]	YAG	TIG-YAG
100		
150		
200		

Fig. 4 Cross sections of STS304 subjected to YAG laser only and laser-arc hybrid welding at various arc currents

200A이하의 아크 전류에서는 영향을 받지 않지만 레이저 출력에는 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

3.1.2 비초점 거리의 영향

YAG 레이저와 하이브리드 열원을 사용하는 용접에서 용입특성과 기공의 발생 경향에 미치는 비초점 거리의 영향에 대하여 조사하였다. Fig. 5와 Fig. 6에는 YAG 레이저와 TIG-YAG 용접에서 얻어진 횡단면과 X선 검사 결과를 각각 나타낸다. YAG 및 TIG-YAG 용접에서 모두 초점 위치 부근에서 용입이 가장 깊었고, 그리고 -2~2mm의 비초점 거리에서는 YAG 레이저 용접의 경우보다 TIG-YAG 용접에서 얻어진 용입이 더 깊었다. -2~0mm의 비초점 거리에서는 두 용접 프로세스에서 모두 기공이 관찰되었으며, 또 기공(pore)의 수는 일정 비초점 거리에서 용입깊이에 관계없이 YAG 레이저 용접의 경우보다 TIG-YAG 용접에서 적게 나타났다.

이러한 결과로부터, 레이저-아크 하이브리드 용접에서는 기공의 수와 크기가 감소한다는 것을 확인하였다. 또한 높은 파워 밀도에서는 기공의 발생을 완전히 억제할 수 없다는 것도 알 수 있었다.

3.1.3 용접속도의 영향

TIG, YAG 레이저 및 하이브리드 용접에 있어서 용입에 미치는 용접속도의 영향을 조사하였다. 용접속도는 6~14mm/s로 변화시켰다. Fig. 7에서 용접비드의 횡단면 사진을 나타내고. Fig. 8에는 용입깊이에 미치는 속도의 영향을 나타내었다. Fig. 7에서, 하이브리드 용접부의 횡단면적은 TIG 아크 용접부와 YAG 레이저 용접부의 전체 면적보다 넓다. 그리고 Fig. 8의 6~12mm/s 용접속도 범위에서는 YAG 레이저 용접부와 TIG 아크 용접부의 용입과 비교할 때 하이브리드 용접부의 용입이 가장 깊다는 것을 알 수 있다. 용접속도가

STS304(5mm^t), P_l=1.7kW, v=10mm/s, Shielding gas : Ar(5.0×10^{-4}m^3/s)

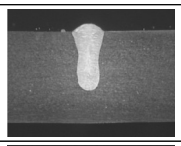
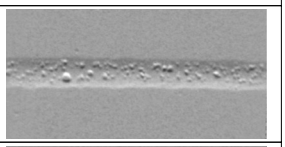
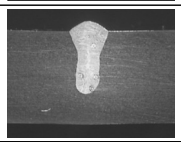
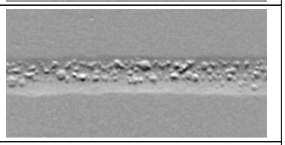
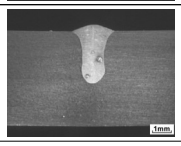
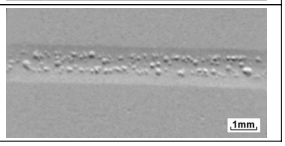
YAG		
f_d(mm)	Cross section	X-ray inspection
-2		
0		
2		

Fig. 5 Cross sections and X-ray inspection results of STS304 subjected to YAG laser welding at various defocused distances

STS304(5mm^t), P_l=1.7kW, v=10mm/s, α=55°, I_a=100A, h=2mm, d=2mm, Shielding gas : Ar(5.0×10^{-4}m^3/s)

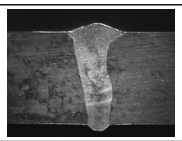
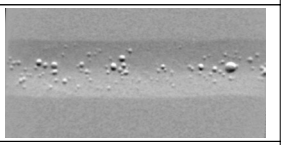
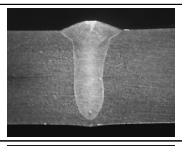
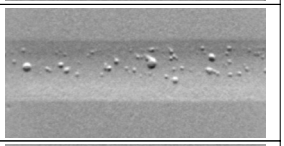
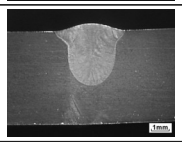
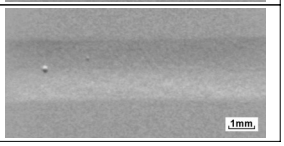
YAG		
f_d(mm)	Cross section	X-ray inspection
-2		
0		
2		

Fig. 6 Cross sections and X-ray inspection results of STS304 subjected to laser-arc hybrid welding at various defocused distances

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

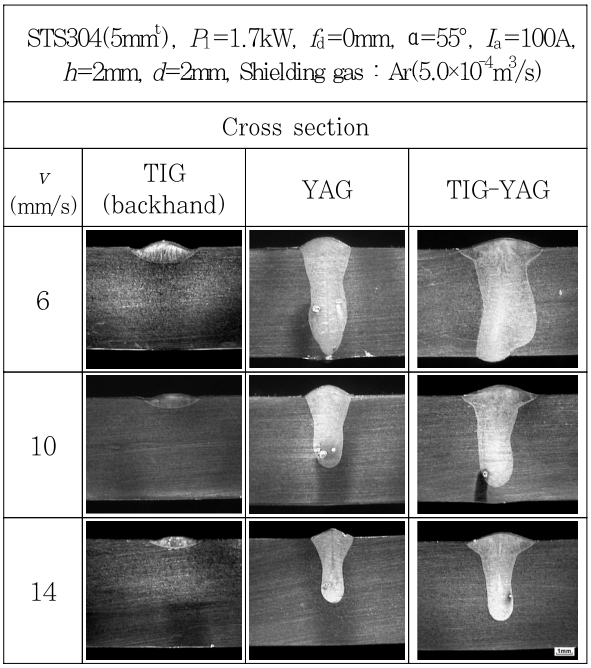


Fig. 7 Cross sections of STS304 subjected to YAG laser, TIG arc and laser-arc hybrid welding at various welding speeds

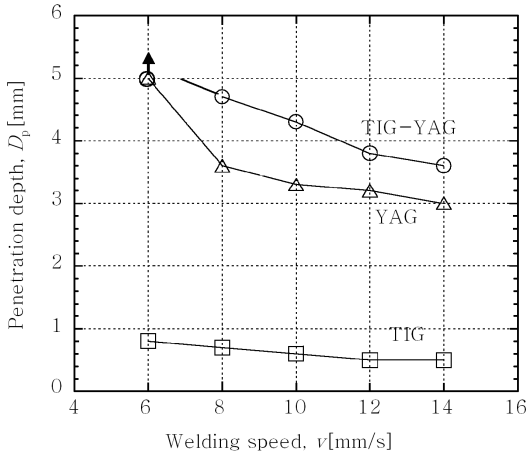


Fig. 8 Influence of welding speeds on penetration depth in laser-arc hybrid welding of STS304

빨라짐에 따라서 하이브리드 용접부와 레이저 용접부와의 용입깊이 차이는 보다 적게 나타났다.

3.1.4 빔축과 전극간 거리의 영향

용입특성에 미치는 빔축과 전극간 거리(d)의 영향에 대하여 조사하였다. Fig. 9에는 TIG-YAG 또는 YAG-TIG 용접에 의해서 만들어진 용접부의 횡단면 사진을 나타내고, Fig. 10에서는 전극과 빔축간의 거리(d)에 따른 용입깊이 변화를 각각 나타낸다. TIG-YAG 용접에서, 거리 d가 5mm 이내일 때 용입은 깊

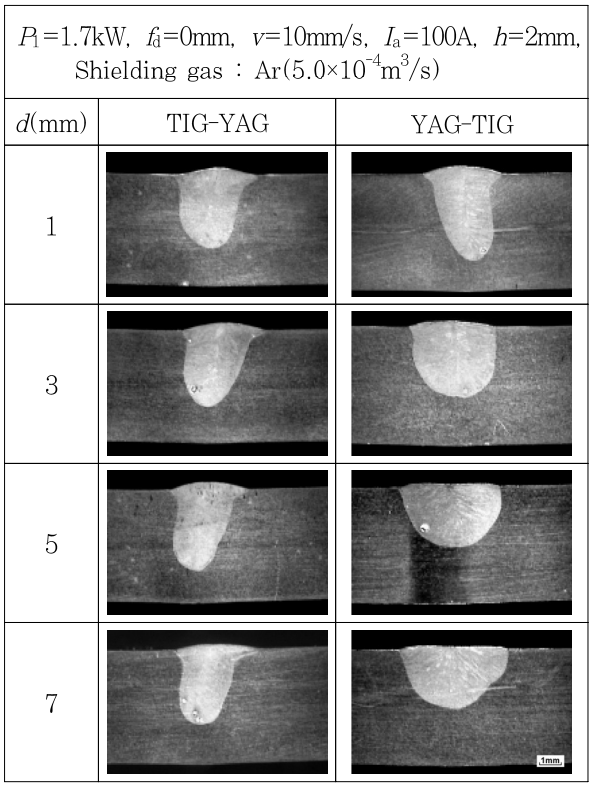


Fig. 9 Cross sections of STS304 subjected to laser-arc hybrid welding at various distance d

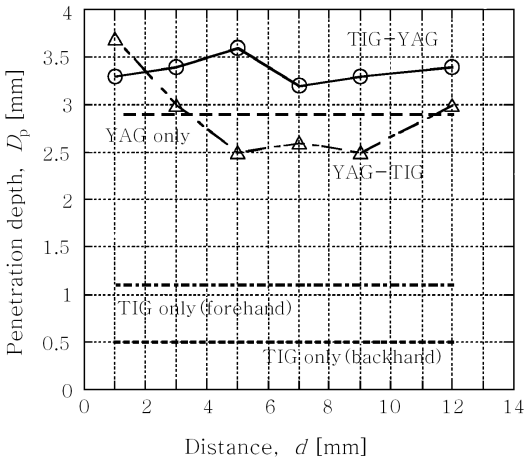


Fig. 10 Influence of distance d on penetration depth in laser-arc hybrid welding of STS304

어지며 비드폭은 좁아진다. 한편, YAG-TIG 용접의 경우에는, d=1mm에서 용입이 가장 깊고 5~9mm의 거리에서 가장 얕다.

이러한 결과로부터, 보다 깊은 용입을 형성하기 위한 레이저 빔축과 전극간의 최적거리가 존재하며, 그리고 TIG-YAG와 YAG-TIG 용접간의 프로세스에서도 차이가 있음을 알 수 있었다.

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

3.2 하이브리드 용접시의 레이저 유기 플라즈마/플룸과 아크의 거동

TIG-YAG와 YAG-TIG 용접시의 용융 특성 차이를 이해하기 위해서, 레이저 유기 플라즈마/플룸과 아크의 거동을 관찰하였다. TIG-YAG 용접 중 CCD 카메라에 의해서 관찰된 결과를 Fig. 11에 나타낸다. TIG 아크 용접하는 동안(t=0s), 아크는 후방으로 팽창하고, 용융지는 레이저가 조사되는 위치의 후부에 형성되었다. 그러나 하이브리드 용접을 시작하게 되면, 레이저가 조사된 위치에 용융지가 형성되었으며, 아크는 이 용융지 부근에서 일정한 거동을 나타내었다. 하이브리드 용접(t=0.3~1s)시에 형성되는 아크는 TIG아크에 비해 키홀의 출구 주위를 다이나믹하면서도 빠르게 움직였다. Fig. 12에는 YAG-TIG 용접시 CCD 카메라에 의한 관찰 결과를 나타낸다. 하이브리드 용접을 시작할 때, 용융지는 레이저가 조사된 위치에 형성되고 아크는 이 용융지로 향하였다. TIG-YAG 용접을 비롯한 하이브리드 용접(t=0.3~s)을 진행하는 동안에는 아크가 키홀의 출구 주변에서 다이나믹하면서도 빠른 거동을 보였다.

TIG-YAG 용접(t=0s)전 TIG 아크에 의해 형성되는 용융지는 X=2~8mm의 위치에서 형성되었으나, YAG-TIG 용접(t=0s)전 용융지는 X=1~3mm의 위치에서 형성되었다. 따라서 TIG-YAG 용접(t=0s)전 TIG 아크에 의해 만들어진 용융지의 형성 위치는 YAG-TIG 용접 전 TIG 아크에 의해 만들어진 용융지

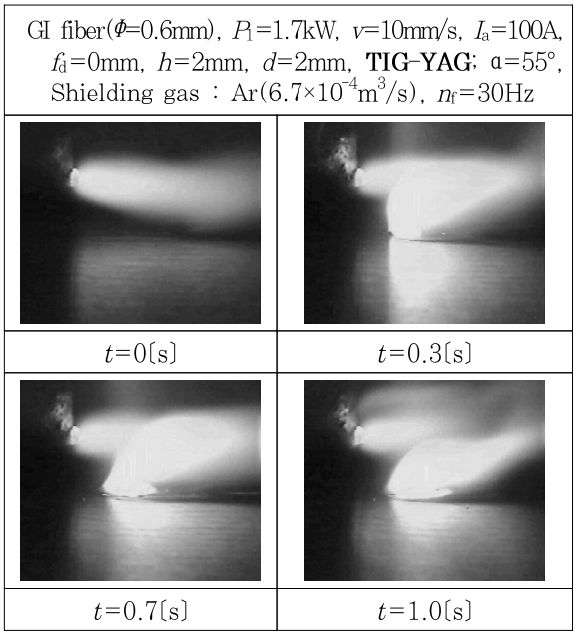


Fig. 11 Observation results of arc behavior during TIG-YAG hybrid welding of STS304

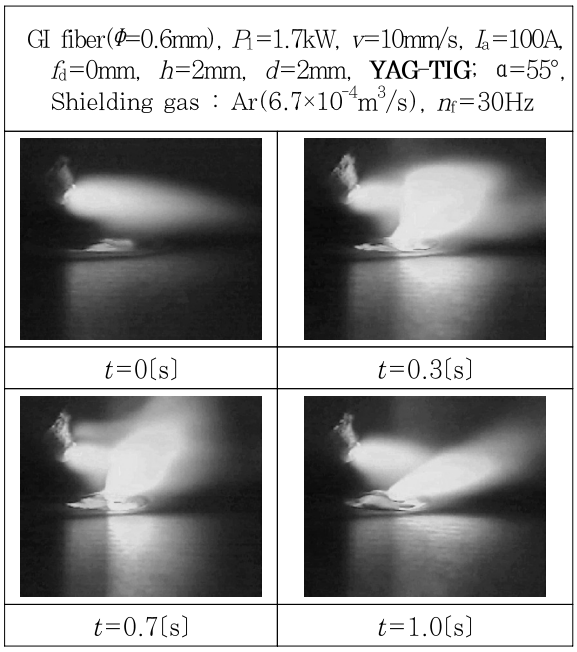


Fig. 12 Observation results of arc behavior during YAG-TIG hybrid welding of STS 304

의 형성 위치와 다르다는 것을 알 수 있다. TIG-YAG 또는 YAG-TIG 용접 전에 TIG 아크에 의해서 형성된 용융지의 위치는 각각의 하이브리드 용접에서 용입이 가장 깊었던 거리 d와 거의 일치하였다. 이러한 결과로부터, TIG 용융지와 레이저 조사 위치간의 거리가 거의 0mm에 위치할 때 용입이 깊어진다는 것을 알 수 있다.

그러므로, 두 위치가 가까이 있을 때 깊은 용입이 얻어지게 되는 이유는 아크의 집중 현상, 형성된 용융지에 의한 레이저 반사광 감소 및 레이저 에너지의 적은 열전도 손실을 고려함으로서 설명 될 수 있다. 한편 YAG-TIG 용접의 경우, d=5~9mm에서 용입깊이는 YAG 레이저 용접의 경우보다 더 얕다. 키홀이 닫히거나 액체의 유동방향이 변화한 것으로 추정된다.

다음으로, 하이브리드 용접 중 다이나믹하게 움직이는 아크의 거동을 조사하기 위해서, 레이저 용접시의 유기 플라즈마/플룸과 TIG-YAG 하이브리드 용접시의 아크 및 플라즈마/플룸의 거동을 고속도카메라(40,500 f/s)를 이용하여 각각 관찰하였다.

Fig. 13에 레이저 용접 중의 유기 플라즈마/플룸을 나타내고, 그리고 Fig. 14에는 하이브리드 용접시의 레이저 유기 플라즈마/플룸과 아크의 거동을 나타낸다. 유기 플룸은 주기적으로 키홀로부터 상부로 분출한다. 이러한 주기적 움직임을 한 사이클로 간주한다면, 레이저 용접 및 하이브리드 용접시의 주기적 변동싸이클은 1~3kH이므로 일정한 싸이클에서 일치하게 된다. 그러

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

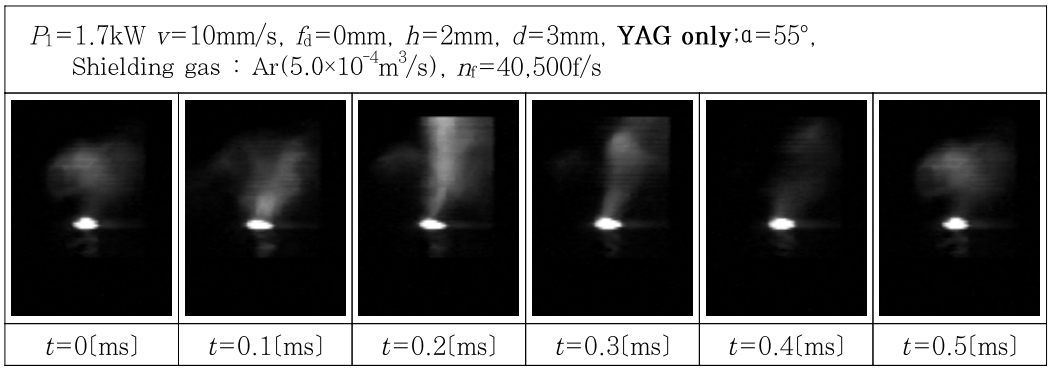


Fig. 13 High speed photographs of laser induced plasma/plume of STS304 during YAG laser welding

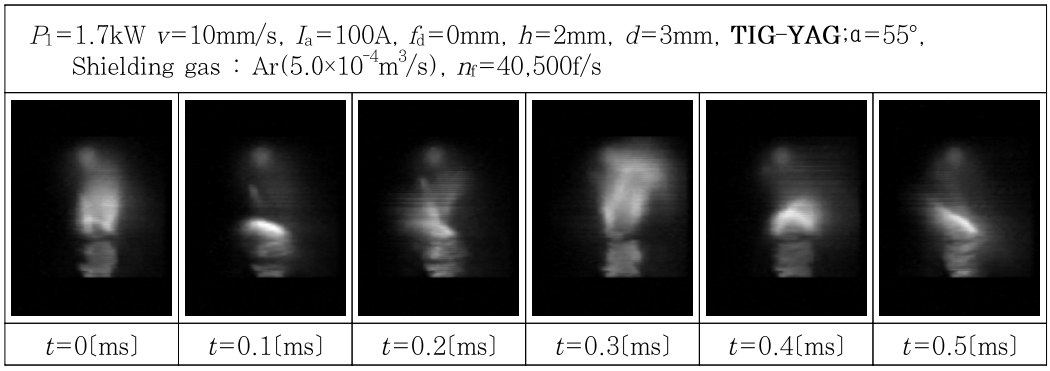


Fig. 14 High speed photographs of arc and plasma/plume of STS304 during TIG-YAG hybrid welding

므로 아크가 키홀로부터 분출되는 플룸의 거동을 따라 움직인다고 가정하면, 아크의 동적 거동은 플룸의 제각기 다른 분출방향에 기인하는 것으로 해석된다.

3.3 X선 투과 가시화 시스템을 이용한 하이브리드 용접 현상의 관찰

TIG-YAG 용접 중 용융지의 형상과 융액의 흐름을 관찰하기 위해서 X선 투과 가시화 시스템을 이용하였으며, 여기에 이용한 시험편에는 Pt 와이어 또는 W 입자를 삽입하였다. 그리고 파워 밀도의 차이를 조사하기 위하여 GI 화이버 및 SI 화이버을 사용하였다.

GI 화이버 사용시의 관찰 결과를 Fig. 15에 나타낸다. 용융지내에서 형성되는 키홀의 깊이는 약 3.5~4.0mm이며 키홀의 직경은 약 0.2~0.5mm이었다. 용입깊이는 키홀의 깊이보다 약 1.0mm 더 깊었다. 하이브리드 용접을 행하는 동안, 키홀의 중앙부와 하부의 직경이 때때로 팽창하였으며 버블이 발생하였다. 그러나 버블이 발생했다하더라도, 대부분의 경우 다시 키홀 내부에서 소실되고, 용융지내부로는 거의 유입되지 않았으며, 전면의 응고벽에도 거의 트랩되지 않았다. 그러므로 키홀은 파워 밀도가 높을 때 변동하지만, 그 거

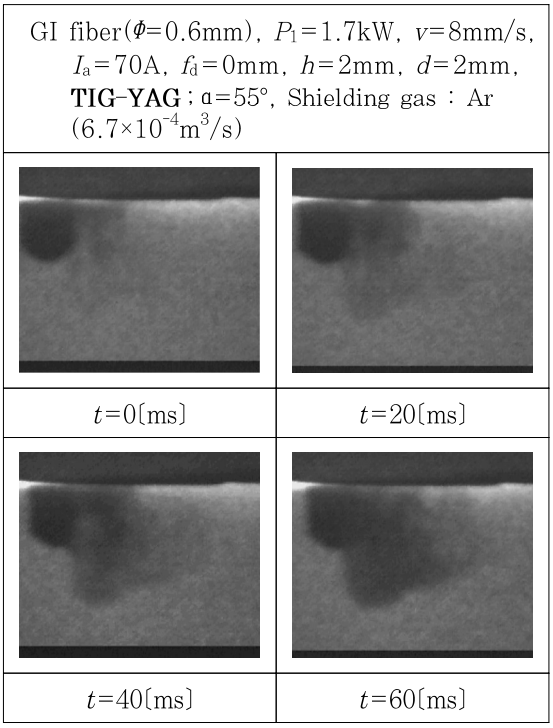


Fig. 15 Typical diffusion of Pt in STS304 molten pool during TIG-YAG hybrid welding with GI fiber(Φ=0.6 mm)

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

동은 YAG 레이저만을 사용할 때의 상황만큼 불안정하지 않았다. 또한, 하이브리드 용접 중에 여러 형태의 융액흐름이 관찰되었다. 그 중 한 형태의 융액흐름은 전방에서 후방으로 키홀 주변을 이동하여 용융지의 하부로 발생하였으며, 그리고 또 한 형태의 융액흐름은 강하지는 않았지만 키홀 선단으로부터 용융지의 후방으로 발생하였다. 후자의 흐름은 주로 용융지의 하부를 깊게 만들고, 전자와 후자의 흐름이 충돌하는 경우에는 용융지를 계단 형상으로 만드는 것으로 사료된다.

Fig. 16에는 SI 화이버를 사용할 때의 관찰 결과를 나타낸다. 용융지내부에서 형성되는 키홀의 깊이는 약 2.6~3.0mm이고 키홀의 직경은 약 0.3~0.6mm이었다. 용입깊이는 약 3.8mm이며 키홀의 깊이보다 1.0mm 더 깊었다. 하이브리드 용접 중에 키홀 상부의 직경은 보다 크게 되지만 중앙부와 하부의 직경은 작아진다. 그러나 이러한 거동은 용융지의 내부에서 보다 안정적이었다. 그러나 소량의 버블이 용융지내에서 발생하였다. 따라서 하이브리드 용접시에 기공이 감소하는 이유는 반드시 키홀 직경의 팽창에 의한 것으로만 볼 수 없다. 그리고 버블의 발생이 억제된 이유는 안정한 키홀의 형성과 키홀 표면부근의 아크 집중에 의해 유기되는 강한 증발에 의해서 실드 가스의 유입이 차단되는데 기인한다. 더욱이 하이브리드 용접 중에는, 키홀 선단으로부터 용융지의 후방으로 강한 융액의 흐름이 있었다. 용융지내의 융액흐름은 용융지의 하부 용융경계를 따라서 후방으로 안정적으로 빠르게 발생하였다.

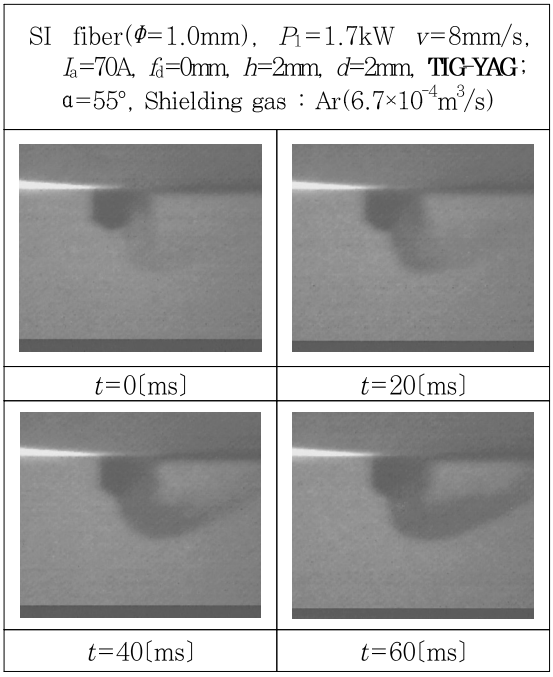


Fig. 16 Typical diffusion of Pt in STS304 molten pool during TIG-YAG hybrid welding with SI fiber(Φ=1.0 mm)

상기의 관찰 결과로부터, GI 화이버와 SI 화이버를 이용한 하이브리드 용접시에 형성되는 키홀의 거동, 융액의 흐름 및 용융지의 형상을 Fig. 17과 Fig. 18에서 각각 도식적으로 나타내었다. GI 화이버 또는 SI 화이버를 이용한 하이브리드 용접시의 키홀은 YAG 레이저만을 이용하였을 때의 상황과 비교하여 안정적이었다. SI 화이버를 이용하였을 경우에는 용융지의 내부에 단지 소량의 버블만이 발생하였다.

GI 화이버 또는 SI 화이버를 사용하는 어느 경우에 있어서도 키홀 선단으로부터 용융지의 후방으로 향하는 융액의 흐름이 있었으며, 이러한 흐름은 SI 화이버를 이용하였을 때 특히 강하였다. 따라서 후방으로의 융액흐름이 열을 후방으로 전달하며, 결과적으로 용융지가 확장되어, 보다 넓은 용접비드를 형성하게 되는 것으로 추정된다. 이러한 안정적인 흐름은 전자기적 대류에 의해서 설명될 수 있다.

4. 결 론

실험 결과와 고찰로부터 다음과 같이 정의하였다.

1) 깊은 용입 용접비드를 얻기 위해서는 아크 전류보

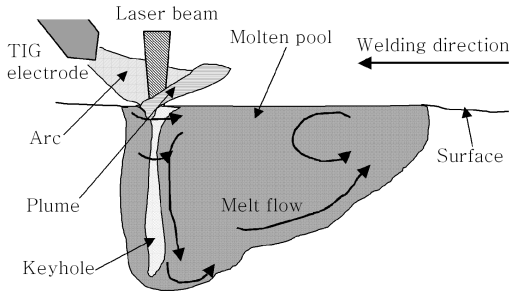


Fig. 17 Schematic representation of keyhole and liquid flow in molten pool observed during TIG-YAG hybrid welding of STS304 with GI fiber

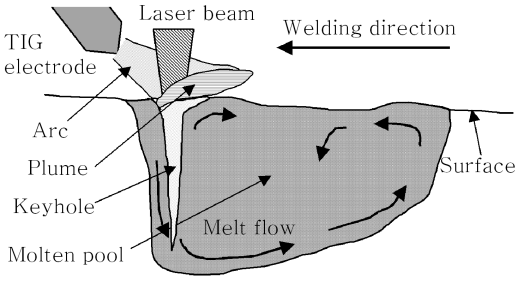


Fig. 18 Schematic representation of keyhole and liquid flow in molten pool observed during TIG-YAG hybrid welding of STS304 with SI fiber

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

다는 레이저 출력을 증가시키는 것이 보다 효과적이었다.

2) 하이브리드 용접에서는 YAG 레이저만을 이용하였을 때와 비교하여 용입은 더욱 깊고 기공의 크기와 수를 감소시킬 수 있었다.

3) 용입깊이를 증가시키기 위해서는 낮은 용접 속도가 효과적이었다.

4) YAG-TIG 및 TIG-YAG 하이브리드 용접에서 레이저 빔축과 전극간 거리를 적절하게 선정함으로서 가장 깊은 용입을 얻을 수 있었다.

5) 하이브리드 용접에서, 레이저의 조사 위치가 TIG 아크로 형성된 용융지의 위치와 일치할 때에 깊은 용입 용접부가 얻어졌다.

6) 하이브리드 용접하는 동안, 아크는 TIG 아크와 비교하여 키홀의 출구주위를 다이나믹하면서도 빠르게 움직였다. 아크가 다이나믹하게 움직이는 이유는, 아크가 키홀로부터 분출되는 플룸의 거동을 따라 움직인다고 가정하면, 불안정한 플룸의 분출방향을 고려함으로서 설명될 수 있다.

7) SI 화이버로 하이브리드 용접을 할 경우, 키홀 상부의 직경은 보다 크게 되지만 키홀 중앙부와 하부의 직경은 작아진다. 그러나 이러한 거동은 용융지의 내부에서 보다 안정적이었지만 소량의 버블이 용융지내에서 발생하였다.

8) SI 화이버로 하이브리드 용접을 할 경우, 용융지내의 융액흐름은 용융지의 하부를 따라서 후방으로 안정적이고도 빠르게 발생하였다. 이러한 후방으로의 융액흐름은 열을 후방으로 전달하며, 결과적으로 용융지가 확장되었다.

참 고 문 헌

1. E. Beyer, U. Dilthey, R. Imhoff, C. Majer, J. Neuenhahn and K. Behler : New Aspects in Laser Welding with an Increased Efficiency, Proc. 13th Int. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, Orlando, 1994, 183-192
2. T. Ishide, Y. Hashimoto, T. Akaba and T. Nagashima : TIG-YAG Laser Welding Coaxial to the Optical Axis, Proc. Natl. Meet. JWS, **No. 61**, 1997, 344-345. (in Japanese)
3. Y. Makino, K. Shiihara, S. Kimura, S. Asai, K. Taki and K. Minam I : Combination Welding between Laser Beam and MIG Arc-High Quality Welding of Stainless Steel (Report 1)-, Proc. Natl. Meet. JWS, **No. 67**, 2000, 118-119. (in Japanese)
4. T. Ooie, A. Utsumi and T. Yano : Laser-hybrid Techniques for Welding and Surface Modification, Proc. 53rd Laser Materials Processing Conf., 2001, 17-24. (in Japanese)
5. N. Abe, Y. Kunugita and S. Miyake : The Mechanism of High Speed Leading Path Laser-Arc Combination Welding, Proc. ICALEO '98, LIA, **Vol. 85**, Orlando, Nov., 1998, Section F, 37-45
6. S. Katayama, N. Seto, M. Mizutani and A. Matsunawa : Formation Mechanism of Porosity in High Power YAG Laser Welding, Proc. ICALEO 2000, LIA, **Vol. 89**, Dearborn, Oct., 2000, Section C, 16-25
7. S. Katayama, Y. Kobayashi, N. Seto, M. Mizutani and A. Matsunawa : Effect of Vacuum on Penetration and Defects in Laser Welding, Proc. ICALEO 2000, LIA, **Vol. 89**, Dearborn, Oct., 2000, Section C, 182-191

· 김종도(金鍾道)
· 1963년생
· 한국해양대학교, 기관시스템공학부
· 레이저용접, 플라즈마해석, 센싱과 가시화
· e-mail : jdkim@mail.hhu.ac.kr

· Seiji Katayama(片山 聖)
· 1951년생
· 일본 오사카대학, 접합과학연구소
· 레이저 재료가공학, 용접재료학
· e-mail :katayama@jwri.osaka-u.ac.jp

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.