

## CO<sub>2</sub> 레이저-GMA 하이브리드 용접부의 용입깊이에 미치는 용접변수의 영향

홍 승 갑 · 이 종 봉

### Effects of Welding Parameters on Penetration Depth in CO<sub>2</sub> Laser-GMA Hybrid Welding

Seung-Gab Hong and Jong-Bong Lee

#### 1. 서 론

하이브리드(Hybrid) 용접이란, 두 종류의 서로 다른 용접법을 동일 시간, 동일 공간에서 접목함으로써 서로의 장점은 살리고, 단점은 보완하여 시너지효과를 얻기 위한 용접법이다. 하이브리드 용접법의 가장 큰 장점이 각 용접법의 장·단점을 서로 보완할 수 있다는 것이므로, 시너지 효과가 가장 큰 레이저와 아크를 병용하는 방법이 하이브리드 용접의 대부분을 차지하고 있다. 즉, 레이저 용접의 경우 고밀도의 열원을 사용하므로 용접 속도가 매우 빠르며, 자동화 프로세스가 가능할뿐만 아니라, 용접 열영향부가 좁고 변형량이 적어 용접후 재작업이 필요없다는 장점을 가지는데 반해 후판용접에 요구되는 고출력 레이저의 경우 장비 투자비가 높고 이음부 관리가 까다롭다는 단점이 있다. 이에 비해 아크 용접은 느린 용접속도, 많은 변형량, 넓은 열영향부 등의 단점을 가지고 있으나, 장비투자비, 이음부 관리 등에 있어서는 레이저 용접에 비해 상대적 우위에 있으며, GMA의 경우 용접재료를 사용하므로 용접부 조직을 제어할 수 있다는 장점이 있다. 두 용접법의 장단점을 비교해보면, 레이저 용접법의 장점은 아크 용접법에 있어서 단점에 해당하고, 아크 용접법의 장점은 레이저 용접법의 단점에 해당됨을 쉽게 알 수 있다. 따라서, 레이저와 아크를 접목함으로써 서로의 단점은 각각의 장점으로 보완하여 용접효율 및 용접특성을 극대화시킬 수 있는 용접법이 레이저-아크 하이브리드 용접법(Fig. 1)이라 할 수 있다<sup>1)</sup>.

하이브리드 용접법은 1978년 영국의 임페리얼 대학 Steen교수가 주석 도금강판의 CO<sub>2</sub>레이저 용접의 효율을 향상시키기 위해 2kW CO<sub>2</sub> 레이저와 250A TIG 용접기를 접목한 연구<sup>2)</sup>가 시초가 되어, 그 이후로 다양한 종류의 레이저 및 아크 용접법을 결합한 수 많은 형

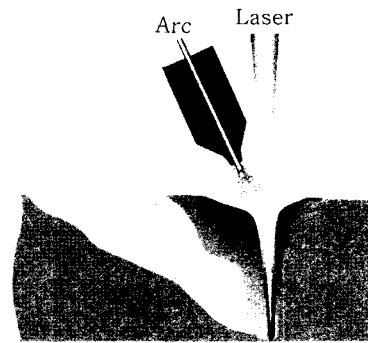


Fig. 1 Hybrid welding process

태의 하이브리드 용접법이 시도되었으며, 최근에는 일체화된 하이브리드 용접기 헤드가 상업적으로 생산되고, 자동차<sup>3)</sup>, 조선<sup>4)</sup>, 라인파이프<sup>5)</sup>, 오일 탱크<sup>6)</sup> 등의 산업분야에 적용되기에 이르렀다. 레이저-아크 하이브리드 용접법은 적용 소재의 특성 및 용접환경 등에 따라 CO<sub>2</sub> 및 Nd:YAG 레이저와 GTA, GMA, PA 등의 아크 간의 다양한 조합이 가능하다. 특히, 조선산업과 같이 후판강재를 사용하고, 주로 공장용접을 하는 분야에 있어서는 좀더 깊은 용입을 얻을 수 있는 CO<sub>2</sub> 레이저와 GMA를 조합한 하이브리드 용접을 많이 사용되고 있다<sup>4)</sup>.

특히, 유럽의 조선소들은 용접열에 의한 판변형을 최소화하여 용접 생산성을 향상시키고자 레이저 용접을 가장 적극적으로 도입하여 생산에 활용하고 있으며, 그 대표적인 조선소는 덴마크의 Odense, 독일의 Meyer Werft, 이태리의 Fincantieri 등이다. Meyer Werft의 경우, 90년대부터 CO<sub>2</sub> 레이저-MIG 하이브리드 용접 시스템을 도입하여 여객선 등의 외판 용접에 활용하고 있으며, 향후 선체 제작공정중 전체 용접선의 50% 이상을 하이브리드 용접으로 대체할 계획을 가지고 있

을 정도로 하이브리드 용접적용에 적극적이다<sup>4)</sup>.

이와 같이 CO<sub>2</sub> 레이저-GMA 하이브리드 용접법을 활용한 조선용 후판강재 용접에 있어서는 용입깊이, 갭의 허용오차(gap tolerance), 판변형 및 용접속도를 향상시킴으로서 궁극적으로 용접 생산성 및 용접부 특성을 향상시키려는데 초점을 두고 있다. 그러나, 하이브리드 용접은 레이저와 아크를 접목한 프로세스이므로 수 많은 용접변수를 가지고 있다. 즉, 레이저 및 아크 각각의 용접변수 외에 Fig. 2에서보듯이, 두 용접 프로세스를 접목했을 때 추가적으로 발생하는 용접변수가 있다.

즉, 아크와 레이저간의 간격, 아크토치와 레이저가 이루는 각도 등의 구조적인 변수와 레이저와 아크 플라즈마의 상호작용, 용융지간의 상호작용 등 용접 프로세스간의 상호작용으로 인해 발생하는 물리적인 변수 등이다. 하이브리드 용접이 산업현장에 적용되는 시점이 늦춰진 또 다른 이유 중 하나가 바로 이와 같은 복잡한 용접변수로 인한 작업의 재현성 및 신뢰성 문제가 아직까지 해결되지 않았기 때문이다. 또한 지금까지 많은 연구 논문<sup>7-15)</sup>에서 하이브리드 용접특성에 미치는 용접변수의 영향을 조사하였으나, 제각기 사용한 소재의 종류 및 이음부 형상, 하이브리드 용접조건이 서로 다르고, 조사한 용접변수 또한 서로 달라서 하이브리드 용접특성과 수 많은 용접변수들간의 상관관계를 체계적으로 분석하기가 힘든 실정이다.

따라서, 여기서는 지금까지 발표된 많은 연구논문을 바탕으로 최근 CO<sub>2</sub> 레이저-GMA 하이브리드 용접 적용이 활발히 진행되고 있는 후판강재의 용입깊이에 미치는 하이브리드 용접변수의 영향을 비교 분석하고자 한다.

## 2. 선행 프로세스의 영향

하이브리드 용접은 앞서 언급했듯이 선행 프로세스,

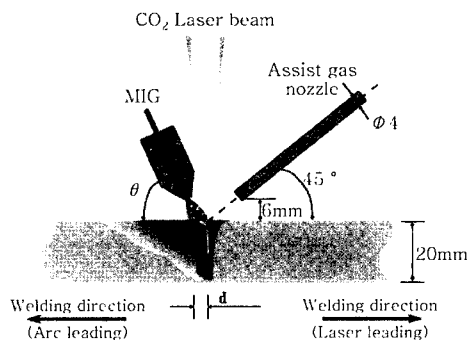


Fig. 2 Experimental setup of CO<sub>2</sub> laser-MIG hybrid welding

레이저 빔과 아크간의 거리, 레이저 및 아크 출력, 보호가스 등 다양한 용접변수가 존재하며, 용입특성 또한 이러한 다양한 용접변수에 의해 영향을 받는 것으로 알려져있다. 많은 용접변수들 중에서 우선 선행 용접법의 종류에 따른 용입깊이 변화를 살펴보면 다음과 같다.

하이브리드 용접에 있어서 용입깊이에 미치는 선행 용접법의 영향은 시험편 이음부 형태에 따라서 약간 다른 연구결과를 보이고 있다. 즉, Abe<sup>7)</sup> 등은 V형 이음부를 가지는 시험편의 맞대기 용접에서 레이저가 선행하는 경우가 아크 선행에 비해 더 깊은 용입을 나타내는 것으로 보고하고 있다(Fig. 3).

이에비해 Kutsuna<sup>8)</sup> 등은 아크가 선행할 경우 아크 열에 의한 예열효과, 용융지의 형태(concave), 레이저 플라즈마와 아크 플라즈마의 상호작용으로 인해 용입깊이가 증가하는 것으로 보고하고 있다.

또한, CO<sub>2</sub> 레이저-GMA 하이브리드 용접은 아니나, Nd:YAG-TIG 하이브리드 용접에서 Y. Naito<sup>9)</sup> 등은 용입깊이에 미치는 선행 프로세스의 영향이 레이저 빔과 아크간의 거리에 따라서 다르게 나타난다고 보고하고 있다. 즉, Nd:YAG-TIG 하이브리드 용접에 있어서 레이저빔과 아크의 거리가 3mm이하에서는 Nd:YAG가 선행하는 경우에서, 레이저 빔과 아크의 거리가 3mm이상에서는 TIG가 선행하는 경우에서 더 깊은 용입을 나타낸다고 설명하고 있다.

하이브리드 용접부의 용입깊이에 미치는 선행 프로세스의 영향에 관해 Abe와 Kutsuna가 서로 다른 연구결과를 보이는 것은 다음과 같이 생각할 수 있다. 즉, Abe의 경우는 두 용접열원의 시너지 효과를 활용하기 보다는 레이저가 V 이음부의 루트부만 용접을 하고 이음부 위쪽은 아크의 용접금속이 채움으로써 두 용접 프로세스가 전체 용입에 대해 역할분담을 하는 방식이다. 이에 비해 Kutsuna처럼 BOP 용접을 할 경우에는 선행하는 아크 열원 및 용융지 형상에 의한 시너지 효과

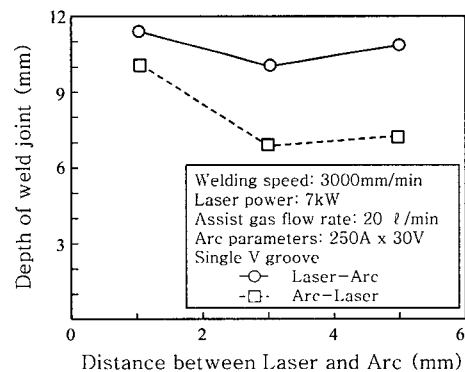


Fig. 3 Effect of leading process on penetration depth in single V groove welding<sup>7)</sup>

로 인해 레이저 빔의 흡수율이 증가하여 전체 용입이 증가하는 방식이다. Abe의 방식과 같이 레이저가 선행하는 경우 레이저가 용접하는 루트부에서의 갭 허용오차가 문제가 될 수 있으나, 레이저와 아크의 거리를 가깝게해서 동일한 용융지만 유지한다면 갭 허용오차는 아크 선행과 비교하여 큰 차이가 없다<sup>10)</sup>. 하지만, 하이브리드 용접을 하기에 앞서 V 이음부를 가공해야 하므로 현장용접 생산성 및 이음부 가공 장비에 대한 투자비 등을 종합적으로 고려하여 하이브리드 용접에서 어떤 프로세스가 선행하는 것이 용입에 유리한지를 결정해야 할 것이다.

### 3. 레이저-아크간 거리의 영향

또한 레이저 빔과 아크간의 거리에 따라서도 용입깊이가 달라질 수 있다. Matsuda<sup>11)</sup> 및 Kutsuna<sup>8)</sup> 등은 아크선행 하이브리드 용접에서 아크에 의해 형성된 용융지의 가장 깊은 곳에 레이저 빔이 조사되도록 레이저 빔과 아크토치 사이의 간격을 유지해야만 가장 깊은 용입을 얻을 수 있다고 보고하고 있다(Fig. 4).

이에 비해 Pace<sup>12)</sup> 등은 MIG/MAG에 의한 용융지 선행에 레이저 빔을 조사할 경우(이때 레이저 빔과 아크간 거리는 약 2~3mm)에 가장 깊은 용입을 얻을 수 있다고 보고하고 있다.

Makino<sup>13)</sup> 등은 16mm두께 판재(V-groove)를 레이저 선행 CO<sub>2</sub> 레이저-MIG 하이브리드 용접을 이용하여 용접할 경우 레이저빔과 아크간의 거리(separation)가 3~6mm 혹은 20mm에서 완전용입을 얻었으나, 3mm이하 혹은 10~15mm 등의 간격에서는 레이저 빔과 MIG 아크 노즐간의 간섭 혹은 아크 플라즈마와 레이저 플라즈마에 의한 레이저 빔 흡수 등으로 인해 완전용입을 얻을 수 없다고 보고하고 있다.

이처럼 용입깊이에 미치는 레이저 빔과 아크간 거리의 영향이 연구자 마다 조금씩 다르긴 해도 한가지 공통점을 발견할 수 있다. 즉, 최대 용입을 얻기 위해서

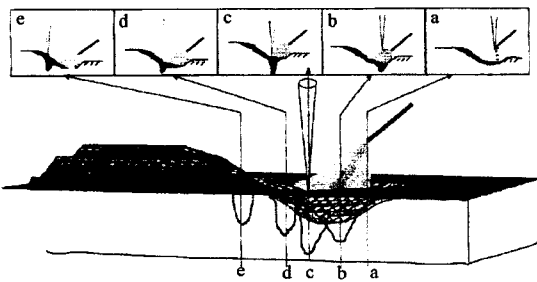


Fig. 4 Schematics of incident location of laser beam into the arc pool<sup>8)</sup>

는 레이저 빔과 아크간의 거리를 너무 가깝게 해서도 안되며, 너무 멀게 해서도 안된다는 것이다. 또한 그 적정거리는 약 3mm를 기준으로 그때 사용한 하이브리드 용접조건에 따라 조금씩 차이가 난다. 즉, 아크 전류 및 전압 조건, 아크 토치각도, 용접속도 등에 따라 용융지의 크기 및 형상이 바뀌고 그때 용융지의 최저점의 위치 또한 바뀌게 되므로 최대 용입을 얻기 위한 레이저 빔의 조사 위치 또한 조금씩 변하게 되는 것이다.

따라서 아크 선행 하이브리드 용접에서는 아크에 의해 형성된 용융지의 가장 깊은 곳에 레이저 빔이 조사될 때 용입이 증가하므로 레이저 빔과 아크간의 거리가 동일하더라도 레이저 빔의 비초점 거리에 따라서도 용입깊이가 변한다<sup>8)</sup>. 즉, Fig. 5에서 보듯이, 레이저 단독 용접에서는 약 -2mm의 비초점 거리를 가지는 경우 최대 용입을 얻었으나, 하이브리드 용접의 경우 아크에 의해 형성된 용융지의 최저점(-4mm)에 레이저 빔이 조사될 때 최대 용입을 나타냄을 확인할 수 있다.

이처럼 용입깊이에 미치는 레이저 빔과 아크간의 거리의 영향은 아크 혹은 레이저 플라즈마와 레이저 빔의 상호작용, 레이저 빔이 조사되는 용융지의 위치, 하이브리드 용접 시스템의 구조적인 간섭, 선행 프로세스, 이음부 그루브(groove) 형상 등에 의해 서로 다른 경향을 나타낼 수 있다. 또한 레이저 및 아크 출력에 따라 용융지의 크기 및 형상, 플라즈마 발생량 등도 함께 바뀔 수 있으므로 각각의 하이브리드 용접 시스템 및 사용 용접조건에 맞게 레이저 빔과 아크간 거리를 설정할 필요가 있다.

### 4. 레이저 및 아크 출력의 영향

10mmt 이상의 후판강재를 고속으로 레이저 용접을 하기 위해서는 최소 10kW 이상의 고출력 레이저가 필

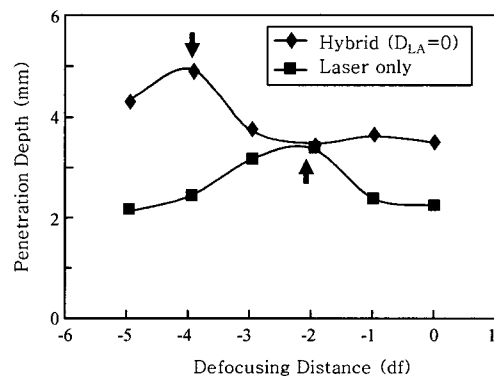


Fig. 5 Effect of defocus distance on penetration depth (Laser: 2kW; MAG:200A, 24V; Welding Speed : 0.6m/min)<sup>8)</sup>

요하며 이와 같은 레이저 출력증가는 장비투자비 상승을 초래하여 산업분야에서 후판강재의 레이저 용접 적용을 늦추고 있다. 현재 45kW CO<sub>2</sub> 레이저가 산업에 적용되고 있기는 하지만 장비투자비에 대한 부담 때문에 적용이 극히 일부분에 한정되어 있다. 따라서, 레이저-아크 하이브리드 용접을 활용하여 레이저 출력은 높이지 않고 아크 출력만 높여서 후판강재의 용입을 향상시키고자 하는 노력이 활발히 진행중이다

아크 출력에 따라 하이브리드 용접부의 용입깊이는 출력범위에 따라 약간 다른 경향을 나타내며, 아크 출력과 용입깊이는 항상 직선적인 관계는 아니다<sup>14)</sup>. 즉, 저출력의 아크에서는 레이저 및 하이브리드 용접부의 용입깊이가 비슷하여 아크 추가열원에 의한 용입깊이 증가를 관찰할 수 없는데 반해, 고출력의 아크에서는 BOP 용접에서도 뚜렷한 용입깊이 증가를 확인할 수 있다(Fig. 6). 특히, Fig. 7에서 보듯이 20mmt 후판강재의 아크 선행 하이브리드 용접 (BOP)에서 아크출력이 약 14kW로 증가함에 따라 용입깊이가 레이저 용접에 비해 약 30%이상 증가하는 것으로 보고된다<sup>14)</sup>.

### 5. 보호가스의 영향

탄소강 및 스테인레스강의 MIG/MAG 용접에서는 보호가스로 Ar-CO<sub>2</sub> 혼합가스를 많이 사용한다. 그 이

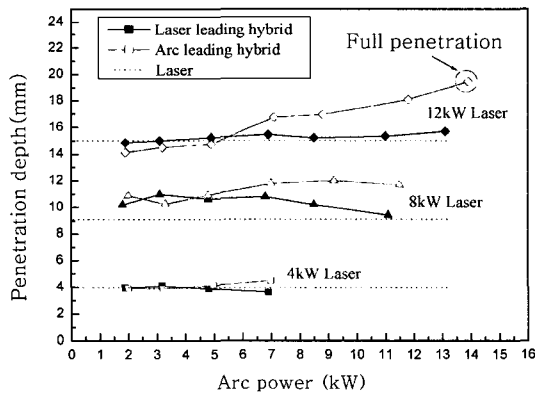


Fig. 6 Effect of arc power and leading process on penetration depth of hybrid welds in 4kW, 8kW, and 12kW lasers<sup>14)</sup>

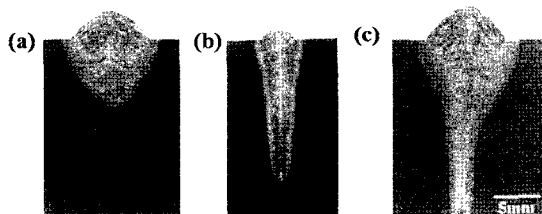


Fig. 7 Bead shape of (a) MIG welding (14.3kW), (b) laser welding (12kW) and (c) MIG (13.9kW)-laser (12kW) hybrid welding<sup>14)</sup>

유는 아크가 안정되고, 강재 두께에 상관없이 우수한 용입을 보이며, 단락(shot circuiting), 스프레이(spray), 펄스(pulse) 등의 다양한 용접속속 이행모드에서도 사용할 수 있기 때문이다. Ar-CO<sub>2</sub> 혼합가스에 He을 첨가할 경우 아크 전압 및 입열량이 상승하여 용접비드 형상이 개선된다. He은 이온화 포텐셜이 높아 플라즈마 생성이 억제되므로 심용입을 얻을 수 있어, CO<sub>2</sub> 레이저 용접의 보호가스로 가장 많이 사용된다. Ar 가스 또한 산화방지에 매우 효과적이지만, 이온화 포텐셜이 He에 비해 상대적으로 낮기 때문에 플라즈마 생성 억제에는 효과적이지 못해서, 용입깊이가 감소한다.

따라서 CO<sub>2</sub> 레이저-MIG/MAG 하이브리드 용접에서는 보호가스로 주로 순수한 He을 사용하거나, He, Ar, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> 등을 혼합하여 많이 사용한다. Fig. 8에서 보듯이 CO<sub>2</sub> 레이저-MIG/MAG 하이브리드 용접에서 보호가스에 따른 용입깊이 변화를 보면, Ar-CO<sub>2</sub> 혼합가스보다는 He을 포함하는 보호가스를 사용할 경우 용입깊이가 증가함을 확인할 수 있다<sup>15)</sup>.

앞에서 설명한 용접변수외에도 아크 토치와 시험편이 이루는 각도 또한 용입깊이에 많은 영향을 미친다. 하이브리드 맞대기 용접의 경우, 레이저 빔은 일반적으로 판재에 수직으로 입사되며, 아크 토치는 판재의 40~75°의 각도를 이루며 용접이 된다. 아크 토치의 경우 시험편에 수직방향으로 가까울수록 용입이 깊어지고 아크 안정성이 증가하므로 구조적인 설계가 허용하는 범위에서 최대한 아크 용접기와 시험편이 이루는 각도를 최대가 되도록 하이브리드시스템을 설계하며, 따라서, 최근에는 이러한 점을 더욱 개선하기 위해 레이저 빔과 아크를 동일측에서 판재에 수직하게 조사할 수 있는 동축 Nd:YAG-TIG, Nd:YAG-MIG<sup>16)</sup>, Nd:YAG-plasma<sup>17)</sup> 하이브리드 헤드가 개발되기도 하였다.

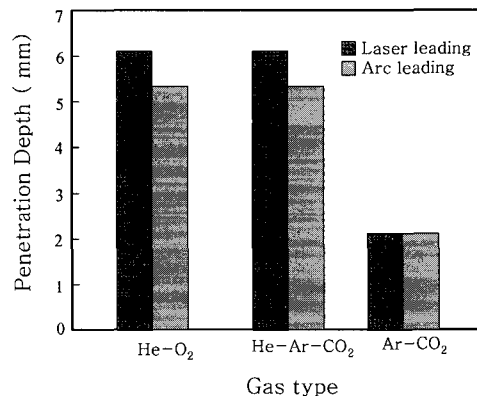


Fig. 8 Effect of gas composition on penetration of approximately 4kW CO<sub>2</sub> laser-3kW MAG hybrid welds, 1.5m/min welding speed<sup>15)</sup>

### 6. 결 론

CO<sub>2</sub> 레이저-GMA 하이브리드 용접은 최근에 후관강재에 적용하고자 많은 연구가 이루어지고 있으나, 산업 현장에서 좀 더 광범위하게 적용되기 위해서는 용접 품질을 결정하는 다양한 용접변수들에 대한 정밀한 제어가 필요하다. 특히, 적용강재의 두께 범위를 확대시키기 위해서는 하이브리드 용접부의 용입깊이를 증가시킬 수 있는 적정 용접변수의 설정이 필요하다.

따라서, 이를 위해서는 적용대상 강종의 종류 및 두께, 용접환경 및 생산성 등에 따라 하이브리드 용접 시스템을 결정하고, 이음부 형상에 따른 선행 프로세스 종류, 레이저 빔과 아크간 거리, 레이저 및 아크 출력, 보호가스 등의 다양한 용접변수들이 용입깊이에 미치는 영향 및 각각의 용접변수들간의 상호작용을 면밀히 검토한 후에 적정 용접조건을 설정해야할 것이다.

### 참 고 문 헌

1. U.Dilthey, and A. Wieschemann : Welding in The World, **44**(3) 2000, 37-46
2. W. M. Steen and M. Eboo : Metal Construction, 1979, 332-335
3. H. Staufer, M. Ruhrnobl, and G. Miessbacher : Industrial Laser Solutions, 2003, 7-10
4. F. Roland and H. Lembeck : 7th International

- Aachen Welding Conference, 2001, 463-475
5. S. Blackman : Welding & Metal Fabrication 2001, 7-10
6. D. Petring: Industrial Laser Solutions, 2001, 12-16
7. N. Abe, Y. Agano, M. Tsukamoto, T. Makino, M. Hayashi and T. Kurosawa : Transactions of JWRI, **26** (1) 1997, 69-75
8. M. Kutsuna and L. Chen : Proceeding of SPIE, **4831** (2003), 341-346
9. Y. Naito, S. Katayama and A. Matsunawa : Proceeding of SPIE, **4831**(2003), 357-362
10. G. Verhaeghe : TWI GSP Report 13782 ,2003
11. J. Matsuda, A. Utsumi and M. Katsmura, M. Hamasaki and S. Nagata : Joining and Materials, **1** (1), 31-34
12. D. Pace : 'Laser Assisted Arc Welding', Proceedings of 4th Robotic Arc Welding Conference, Orlando, Florida, 2000
13. Y. Makino, K. Shiihara, and S. Asai : Welding International, **16** (2) 2002, 99-103
14. 홍승갑, 이종봉 : 제 6회 고에너지 연구위원회 연구발표회 논문집, 2003, 38-44
15. D.L. Downs and S.J. Mulligan : TWI Member Report 739 (2002)
16. T. Ishide, S. Tsubota and W. Watanabe : Proceeding of SPIE, **4831**(2003), 347-352
17. 'Weldone™ Plasma-Laser System Model KY 2004 User Manual'. Issued by Plasma-Laser Technologies Ltd, Israel, 2000



- 홍승갑(洪承甲)
- 1972년생
- POSCO 기술연구소 접합연구그룹
- 레이저용접, 하이브리드용접
- e-mail : sgab@posco.co.kr



- 이종봉(李種鳳)
- 1953년생
- POSCO 기술연구소 접합연구그룹
- 철강용접
- e-mail : jongblee@posco.co.kr