

알루미늄 합금의 레이저-아크 하이브리드 용접공정

이 경 돈

Laser-Arc Hybrid Welding Process of Aluminum Alloy

Kyoung-Don Lee

1. 서 론

최근 레이저-아크 하이브리드용접에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁻⁴⁾. 이미 고출력 CO₂ 레이저가 보편화되면서 레이저용접이 차체제작에 널리 사용되고 있으며 고출력 Nd:YAG 레이저의 출현으로 알루미늄 레이저용접의 적용 가능성이 크게 증가하였을 뿐만 아니라 광화이버를 통하여 빔을 전달할 수 있어 좀 더 복잡하고 입체적인 물체를 용접할 수 있는 로봇 레이저 용접을 구현할 수 있게 되었다⁵⁾. 그러나 레이저용접은 용접전 소재의 정밀가공을 요구하는 경우 그 적용에 제한을 받고 있어 이의 해결책으로 레이저-아크 하이브리드 용접이 주목을 받게 되었다. 특히 알루미늄은 대표적인 경량 금속으로 고급 금속제품에 널리 쓰일 뿐 아니라 차체나 구조물의 경량화를 위해 확대 적용되고 있으나 그 용접법은 철강재료에 비하여 까다로와 레이저-아크 하이브리드용접의 적용의 중요한 분야로 고려되고 있다^{6,7)}.

본 논문은 차체 등의 구조물에 많이 사용하는 두께 2mm의 열처리형 6000 계열의 알루미늄 합금 박판의 Nd:YAG 레이저-아크 하이브리드 용접 공정의 예를 들어 알루미늄의 레이저-아크 하이브리드 용접의 의미와 공정현상을 살펴보기로 한다. 현재 이들 대부분은 아크 용접에 의해 생산되고 있으며 이에 따른 열변형과 낮은 생산속도가 문제 되고 있다. 이러한 문제점은 고밀도 열원에 의한 레이저 용접과 접합부의 갭(gap)의 허용오차가 큰 아크용접의 각각의 장점을 모두 갖춘 레이저-아크 하이브리드 용접을 적용함으로써 쉽게 해결할 수 있을 것이다.

2. 본 론

2.1 알루미늄 레이저-아크 하이브리드 용접

레이저-아크 하이브리드 용접 공정을 좀 더 체계적으로 이해하기 위해서는 양 극단의 경우를 기준으로 생각해 보는 것이 도움이 될 것이다. 알루미늄의 레이저-아

크 하이브리드 용접의 두개의 기준으로 용접와이어를 사용한 레이저 용접(이후 용접와이어 레이저용접)과 아크용접을 선택하는 것이 타당할 것이다. 하나의 기준으로 용접와이어 레이저용접을 선택한 이유는 알루미늄 합금은 용접비드의 강도가 모재에 비하여 일반적으로 저하되어 비드의 불룩한 형상이 요구되며 결합부에서의 갭을 고려할 때 용접와이어의 사용이 좀 더 자연스럽다고 판단되기 때문이다⁸⁾.

주어진 알루미늄에 대하여 용접와이어 레이저용접의 적절한 레이저용접의 공정 윈도우(process window)가 존재할 것이다. 또한 아크용접에 대하여도 적절한 아크 용접의 공정 윈도우가 존재할 것이다. 이 때 레이저-아크 하이브리드 용접의 적절한 공정 윈도우는 어떤 것이며 어떻게 결정할 수 있을 것인가. 이 질문에 대한 답은 단순하지는 않을 것이다. 구체적인 알루미늄 하이브리드 용접 현상을 살펴보기 전에 하이브리드용접을 그 레이저와 아크 각각의 공정현상의 상호작용의 중요성에 따라 분류하고 그 특징을 고찰해 본다.

1) 레이저-아크의 상호작용의 영향이 적은 경우

레이저와 아크의 상호작용의 영향이 적은 경우 레이저용접과 아크용접의 특징이 독립적으로 나타날 것이다. 즉, 레이저 용접의 깊은 용입(deep penetration)의 특징과 아크용접의 우수한 갭브리징 능력(gap bridge ability)이 모두 필요하여 두 개의 독립적인 공정조건이 합하여질 경우에도 용접조건이 큰 조정 없이 하이브리드 용접을 진행할 수 있는 경우를 말한다. 이와 같은 경우로 다음과 같은 경우를 생각할 수 있을 것이다.

- 아크용접으로 백비드(back bead)를 생성하기 어려운 정도의 두께를 갖는 동시에 레이저 용접의 한계갭 이상의 갭을 갖는 용접 대상물의 경우
 - 레이저 초점과 아크용접의 지향점이 충분한 거리를 유지하는 경우
- 이와 같은 경우에는 각각의 공정 윈도우 안에서 적절

한 용접공정 조건이 도출되어야 할 것이다.

2) 레이저-아크의 상호작용의 영향이 큰 경우

레이저와 아크의 독립성이 유지되지 않은 그 외의 모든 경우는 이들 간에 상호작용이 있을 것이라 추정할 수 있다. 이들 중 두 가지 특징적인 경우를 고려해 보기로 한다.

- 아크용접으로 백비드를 생성하기 어려울 정도의 두께를 갖는 용접대상물의 경우
- 레이저 용접의 갭 한계 이상의 갭을 갖는 용접 대상물의 경우

아크용접으로 관통하여 용접하기 어려운 두께를 가진 경우의 일례로 맞대기 아크용접에서는 단면형상을 적절한 깊이로 V홈을 만들어 용접와이어로 홈을 메우며 백비드를 형성하도록 공정조건을 선정한다. 이 때 충분한 에너지를 공급해야 하므로 비드폭 또한 넓어지게 된다. 하이브리드용접에서는 아크용접에서와 같이 깊은 V홈이 반드시 필요하지는 않더라도 하이브리드 용접조건은 V홈의 깊이와 일차적 관련이 있음을 알 수 있다. 하이브리드용접의 두께 방향의 용접은 레이저가 담당하게 되므로 V홈의 깊이는 레이저용접의 관통깊이(penetration)와 레이저 공정조건(출력, 속도)으로 결정될 것이다. 다음 단계로 선택된 V홈의 깊이를 채울 수 있는 아크용접의 조건이 선정될 수 있을 것이다. 이 때 레이저와 아크의 상호작용에 대한 고려가 위의 조건들을 수정하게 된다.

레이저용접으로 갭 연결이 어려운 경우의 용접와이어 레이저용접에서는 요구되는 예상 용접와이어 속도에 맞추어 레이저 공정조건을 선정하는 것이 보통이다⁷⁾. 그러나 하이브리드용접을 할 경우는 용접와이어 속도에 맞추어 아크 용접의 조건을 선정하고 관통을 위한 레이저용접 공정을 선택할 수 있다. 이 때 아크의 조건이 정상적인 아크용접조건인 공정 윈도우안에 존재하지 않더라도 아크-레이저 플라즈마의 상호작용으로 인하여 정상적인 하이브리드용접이 가능하며 정상적인 하이브리드용접조건을 위하여 V홈의 해법을 추가할 수 있다.

이런 의미에서 두께가 두꺼운 경우의 하이브리드용접을 레이저 기반-아크 하이브리드 용접 (laser base-arc hybrid welding)이라 말할 수 있다. 즉, 레이저조건을 우선 선정한 후 부가적으로 아크공정조건을 조정한다. 마찬가지로 틈새가 넓은 경우의 하이브리드용접은 아크 기반-레이저 하이브리드용접 (arc base-laser hybrid welding)이라 말할 수 있다. 이 경우 아크공정조건을 우선 선정하고 레이저 공정을 부가적으로 선정한다. 위의 두 경우의 하이브리드용접조건을 선정하기

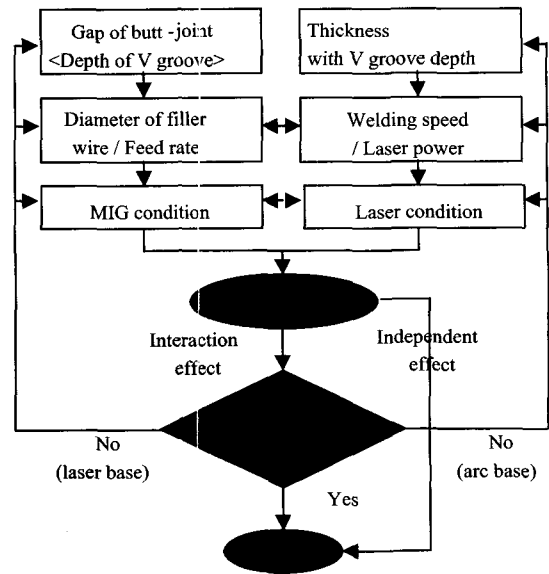


Fig. 1 Flow diagram to determine the process condition of hybrid welding

위한 과정을 간단히 도표로 표시하면 Fig. 1과 같다.

이와 같이 레이저-아크 하이브리드 용접의 공정을 이해하기 위해서 레이저-아크의 상호작용을 이해하는 것이 필수적이다. 아래에 두께 2mm의 열처리형 6000계열의 알루미늄 합금 판재의 맞대기 용접 실험을 실시하여 하이브리드 용접현상 및 공정변수의 영향을 관찰하고 구체적인 결과를 분석하여 레이저-아크의 상호작용을 좀 더 이해하도록 한다.

2.2 아크-레이저 플라즈마의 상호작용

아크 플라즈마와 레이저 플라즈마의 상호작용이 아크 안정과 용적이행에 미치는 영향을 관찰하였다. 우선 레이저-MIG 하이브리드 용접조건을 선정하고 아크-레이저 플라즈마의 상호작용을 살펴보기 위하여 선정된 용접조건에서 MIG 조건만을 작동하여 아크와 전류파형을 관찰하고 이를 하이브리드 용접시의 아크 및 전류파형과 비교하였다.

실험결과 Fig. 2(a)에서와 같이 MIG단독으로는 아크 불안정으로 많은 스파터 발생과 함께 용적이행이 이루어지지 않아 매우 불규칙한 비드외관과 전류파형을 보이고 있다. 반면 Fig. 2(b)에서 동일 MIG조건을 갖는 하이브리드 용접 조건의 결과는 미려한 비드외관과 함께 매우 안정된 패턴의 전류파형을 보여주고 있다.

위 현상의 원인을 분석하기 위해 고속카메라를 이용하여 아크와 하이브리드 용접에서 발생하는 플라즈마를 관찰하였다. 관찰결과 Fig. 3을 보면 하이브리드 용접에서는 아크가 발생할 때 아크 플라즈마가 키홀에서 발생한 레이저 플라즈마와 함께 작용하는 것을 볼 수가

있다.

이는 아크 용접의 낮은 전자밀도 영역에서 아크는 음극점(cathode spot)을 찾기 위해 모재 표면을 이동하기 때문에 작은 외란에도 매우 불안해진다. 그러나 하이브리드 용접에서는 키펀에서 발생하는 약 $10^{17} \sim 10^{20}/\text{cm}^3$ 의 매우 높은 전자밀도를 가진 열영향 영역내로 아크 음극점이 이동되기 때문에 매우 빠른 용접속도에서도 아크가 안정되는 것이다⁹⁾. 따라서 고속카메라 관찰결과 레이저에 의해 발생된 플라즈마가 아크 안정에 매우 중요한 역할을 하는 것으로 관찰되었다. 그러나 이러한 현상은 입열이 작은 박판용접에서는 쉽게 발생되지만 입열이 큰 후판용접에서는 그 영향이 작을 수 있다.

Fig. 4는 1drop/1pulse에 따른 용접전류 cycle을 나타낸 것으로, cycle 시간은 약 14~15ms이다. 최대 전류에서 가장 큰 아크가 보였으며 이 때 키펀로부터

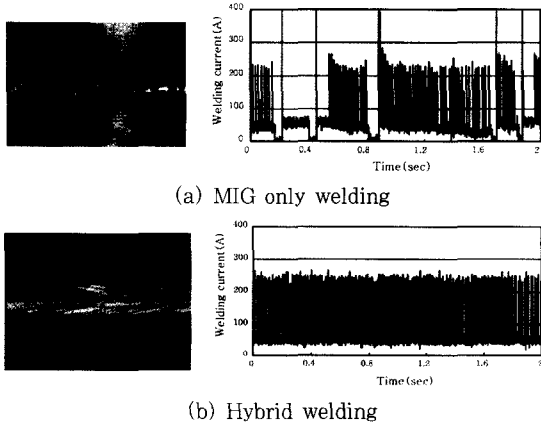


Fig. 2 Bead appearance and current wave form according to welding condition

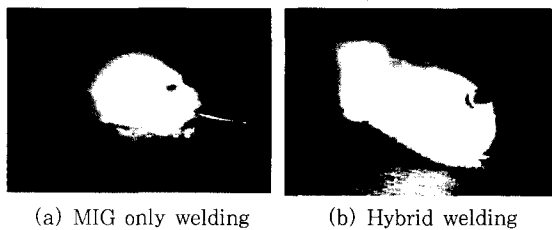


Fig. 3 Interaction of arc and laser plasma

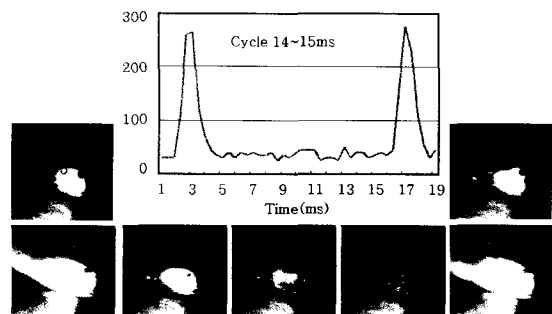


Fig. 4 Welding current change during one cycle

나오는 플룸(plume)을 볼 수가 있다. 그리고 금속용적은 최대 전류 발생 직후 형성되어 용융풀로 입사된다. 이때의 최대 전류는 약 270A 정도이며 그 사이에서는 약 40A의 베이스 전류가 형성되며 아크가 안정적으로 유지되고 있는 것을 알 수 있다.

2.3. 용접방향의 영향

하이브리드의 용접방향은 MIG의 금속용적이 낙하하는 지점과 레이저 초점이 조사된 지점의 선행 여부를 결정한다. 이에 따른 용접현상의 차이를 관찰하기 위하여 고속카메라를 이용하여 관찰하였다. 여기에서 금속용적 낙하점과 레이저 초점의 거리(이후 offset)는 5mm이다.

Fig. 5(a)는 MIG선행으로 레이저 빔에 의한 용융풀과 아크 용적에 의한 연장된 점선의 갭브리징 구간을 볼 수 있다. 레이저 초점에 의한 키펀에서 용융풀의 선단은 offset 5mm 보다 작으며 금속용적의 주기에 따라 용융풀의 선단이 용적의 위치까지 연결되었다 원래로 되돌아 가는 주기적 현상을 관찰할 수 있었다. 따라서 offset의 간격에 따라 현상의 지속 및 주기여부의 차이가 있을 뿐 MIG의 선행은 틈새를 선행하여 연결시키는 역할을 한다.

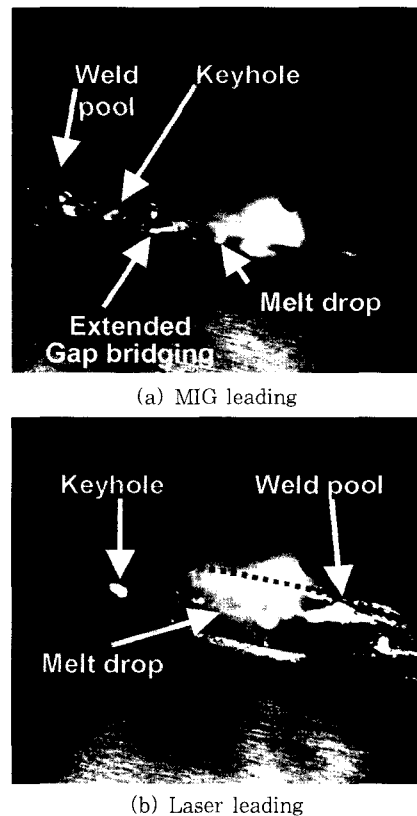
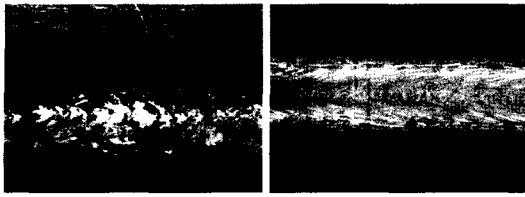


Fig. 5 Hybrid welding phenomenon according to leading type



(a) MIG leading (b) Laser leading

Fig. 6 Surface defect due to leading type at hybrid welding

Fig. 5(b)는 레이저 선형으로 레이저 빔에 의해 키홀의 뒤로 용융풀이 길게 형성되고 이곳 중앙에 금속 용적이 입사되기 때문에 상대적으로 넓은 용융풀을 형성하며 넓은 비드폭을 형성하게 된다.

하이브리드 용접에서 MIG토치와 용접대상 판재가 이루는 각도에 따라 용접품질에 영향을 받는다. MIG선형으로 용접판재의 수직선에 대한 MIG토치의 각도가 어느 정도를 넘어 기울어지면 Fig. 6(a)에서와 같이 용접비드의 표면의 그을음 발생이 관찰되었다. 이는 MIG선형의 경우 용융풀의 연장된 갭브리징 부위에서 불충분한 용융풀의 발달과 관련이 있는 것으로 판단된다. 표면의 그을음은 아크 용접시 산화피막의 청정작용의 차이에서 오는 영향으로 해석하여 레이저 빔과 아크 토치사이에 copper curtain을 설치하여 청정효과를 얻은 연구결과도 있다¹⁰⁾.

2.4 갭브리징 능력(Gap bridging ability)

하이브리드 용접공정에서 갭브리징 능력을 관찰하기 위하여 Fig. 7과 같은 시편에 서로 다른 offset에 따른 MIG선형과 레이저선형의 갭브리징 능력을 제살 (autogenous) 레이저용접의 경우와 비교하였다.

제살 레이저용접은 빔 직경이 0.6mm로 0.72mm의 갭까지 연결 하였는데 이는 출발점부터 키홀을 형성하였기 때문이며 균일한 갭 조건에서는 0.4mm까지 키홀 용접이 가능하다. 하이브리드 용접에 있어 offset 0과 2에서는 거의 차이가 없으며, MIG선형에서는 offset 5mm에서 한계갭이 증가하였으나 레이저 선형공정에서는 offset에 무관하게 유사한 값을 보였다.

2.5 Offset 영향

아크와 레이저 빔의 상대적 위치변화에 따른 영향을 관찰 하였다. offset 0mm는 키홀에 금속용적이 낙하하는 경우로 용접비드의 변화는 본 실험 조건에서는 뚜렷이 관찰하지 못하였으나 키홀의 연속성에 좋지 않은 영향을 줄것으로 판단된다. 그러나 Fig. 8의 실험결과 용접비드는 상하비드 모두 크게 관찰되었다. 또 offset 3, 5mm에서는 용접비드 크기가 거의 비슷하였다. 그

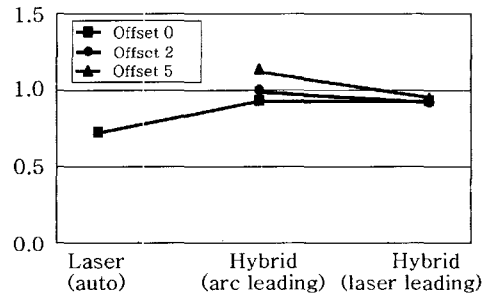
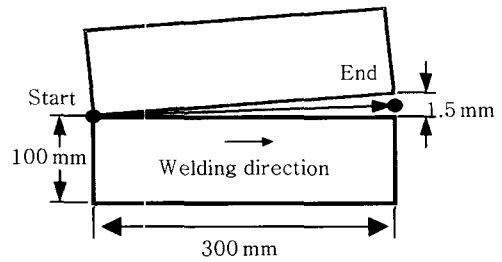


Fig. 7 Gap bridging ability according to welding type

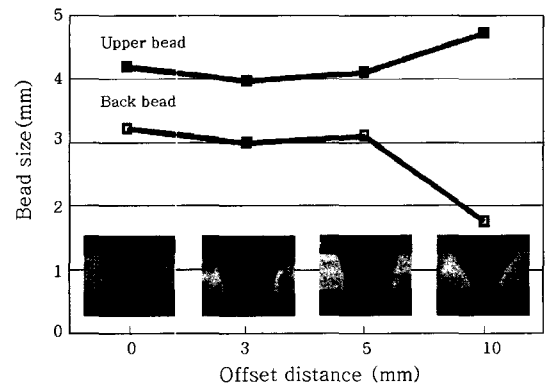


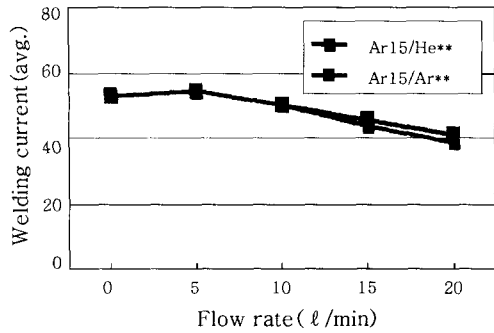
Fig. 8 Bead size from offset changes

리고 offset 10mm인 경우 아크가 용입에 영향을 거의 주지 못하고 상부비드로 넓게 분포하였으며 하부비드는 레이저에 의한 용입과 유사한 크기로 좁은 비드를 형성하였다. 이 결과 하이브리드 용접의 상호작용이 영향을 주는 offset 구간은 약 5mm 이내인 것으로 관찰 되었다.

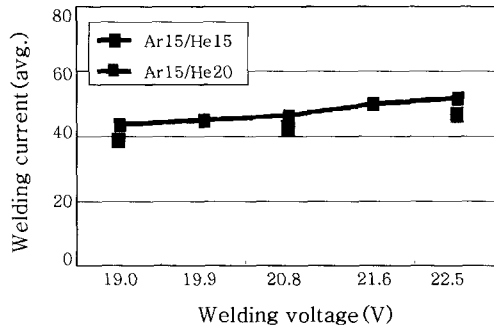
2.6 보호가스의 영향

레이저 용접에는 발생하는 플라즈마를 제거하기 위해 보호가스를 공급하며 MIG용접에서도 보호가스를 공급한다¹¹⁾. 이들은 서로 충돌에 의하여 교란이 발생할 것이므로 여기서는 레이저 보호가스 Ar과 He의 유량이 아크 안정에 미치는 영향을 MIG의 용접전류를 관찰하여 판단하였다.

Fig. 9의 관찰결과 Ar/He이 0~10 l/min까지는 동일한 전류값과 안정된 용접비드를 형성하였으나 Ar/He이 15 l/min 이상부터는 유량 증가와 함께 평균전류 값이 작아지며 많은 스파터 발생과 함께 용접비드



(a) Change from laser gas flow rate



(b) Change from welding voltage

Fig. 9 Welding & laser shielding gas (48A, 19V, feed rate current due to arc 3m/min)

형성이 안 되었다. 이와 같이 레이저 보호가스는 아크 안정에 커다란 영향을 주는 것으로 관찰되었다.

He은 상대적으로 높은 이온화 에너지를 가지므로 용접전압을 상승하면 가스유량이 증가하여도 아크가 안정되는 현상을 관찰하였다. He 가스를 He15/20 l/min으로 공급하고 용접전압을 5%씩 증가시키며 실험한 결과 전압이 상승함에 따라 안정된 용접전류와 함께 정상적인 용접비드를 형성하였으며 특히, 5% 용접전압을 상승시킨 경우는 큰 효과가 없었으나 10% 이상 상승시킨 경우에는 안정된 아크발생과 함께 정상적인 용접비드를 형성하였다.

3. 결 론

지금까지 알루미늄 레이저-아크 하이브리드용접 공정을 이해하고 적절한 용접 조건을 선정하기 위하여 2mm 두께의 6000계열 열처리형 알루미늄 합금 판재의 맞대기 용접을 한 경우에 대한 공정변수의 영향을 관찰하였다. 특히 레이저-아크 하이브리드 용접에서는 레이저와 아크의 상호작용에 대한 이해가 중요하며 플라즈마의 상호작용, 용접방향에 대한 영향, 레이저 및 아크토키의 선행 방향, 갭브리징 능력, offset 영향, 보호가스 영향 등에 대하여 구체적 실험 결과를 근거로 하여 박판 알루미늄의 하이브리드 용접 적용을 위한 각 공정변수의 영향을 평가하였다.

참 고 문 헌

1. D. petring, C. Fuhrmann, N. Wolf, R. Poprawe : Investigations and Applications of Laser-arc hybrid Welding from Thin Sheets up to Heavy Section Components. Proceedings of ICALEO 2003 on Laser Materials Processing, Laser Institute of America, **301** (2003)
2. T. Jokinen, M. Karhu, V. Kujanpaa : Welding of Thick Austenitic Stainless Steel using Nd:YAG with Filler Wire and Hybrid Process, Proceedings of ICALEO 2003 on Laser Materials Processing, Laser Institute of America, **1103** (2003)
3. E. Schubert, B. Wedel, G. Kohler : Influence of the Process Parameters on the Welding Results of Laser-GMA Welding, Proceedings of ICALEO 2003 on Laser Materials Processing, Laser Institute of America, **1104** (2003)
4. U.Dilthey etc. : Process-technical Investigations on Hybrid Technology Laser Beam-arc Welding. Proceedings of the 6th Int. Conference on Welding and Melting by Electron and Laser Beams. Toulon. France. (1998) .417-424
5. S. Ramasamy, C.E.Albright : CO₂ and Nd:YAG Laser Beam Welding of 6111-T4 Aluminum Alloy for Automotive Application, J. of Laser Applications, **12-3** (2000) 101-115
6. U.Dilthey, F.Lueder : Extended Capabilities in the Welding of Al Alloys with the Laser-MIG Hybrid Process. ALUMINUM, **75** (1999) 64-75
7. K.D.Lee, K.Y.Park : A Study on the Process Robustness of Nd:YAG Laser-MIG Hybrid Welding of Aluminum Alloy 6061-T6, Proceedings of ICALEO 2003 on Laser Materials Processing, Jacksonville FL, USA, **307** (2003)
8. J.W. Yoon, Y.S. Lee, K.D. Lee, K.Y. Park : Effect of Filler Wire Composition on the Laser Weldability of 6xxx Aluminum Alloy, Proceeding of 2003 Annual meeting (autumn) of KSLP, Oct. (2003) 20-23 (in Korean)
9. O. Moriaki, S. Yukio, Y. Akihida and O. Masanori : Development of Laser-arc Hybrid Welding. NKK TECHNICAL REVIEW, **86** (2002) 8-12
10. T. Shida, M. Hirokawa and N. Fujikura : Welding of Aluminum Alloys by using High Power CO₂-laser in Combination with MIG arc. Proceedings of the 6th Int. Conference on Welding and Melting by Electron and Laser Beams. Toulon France. June (1998) 399-406
11. M. Faerber : Gases for Increased Productivity of Laser Processing, Optical and Quantum Electronics **27** (1995) 1449-1455



· 이경돈(李景敦)
 · 1957년생
 · 고등기술연구원 로봇/생산기술센터장
 · 생산 및 로봇 레이저용접 기술
 · e-mail : kdlee@iae.re.kr