

조선용 프라이머 코팅강판의 CO₂ 레이저 용접에 있어서 프라이머 코팅 조건과 갭(Gap) 간극의 영향

김종도† · 길병래* · 장지연*

(원고접수일 : 2003년 10월 2일, 심사완료일 : 2003년 12월 10일)

Effect of Primer Coating Condition and Gap Clearance in CO₂ Laser Welding of Primer-coated Steel for Shipbuilding

Jong-Do Kim† · Byung-Lea Kil* · Ji-Yon Jang*

Abstract : The spatter and porosity could be occurred during CO₂ CW laser welding of Primer-coated steel for shipbuilding. This study has suggested an alternative idea by examining of weld-defect formation mechanism. The primer-coated plate induced the spatter, humping bead and porosity and these are main part of the welding defect, attributed to the powerful vaporizing pressure of primer attached on the base metal. The zinc of primer has a boiling point that is the lower temperature than melting point of steel. Zinc vapor will build up at the interface between the two sheets and this tends to deteriorate the quality of the weld by ejecting weld material from lap position or leaving porosity. Therefore introducing a small gap clearance in the lap position, the zinc vapor could escape through it and sound weld beads can be acquired. In conclusion, we suggested the occurred and prevented mechanism of weld defects with searching the factor.

Key words : CO₂ Laser welding(CO₂레이저용접), Primer-coated steel(프라이머 코팅강판), Lap welding(겹치기용접), Weld defect(용접결함), Gap clearance(갭 간극)

1. 서 론

자동차 산업에서는 자동차 내·외관의 내식성, 성형성, 용접성 등을 고려하여 많은 표면처리 강판이 현재 개발되어 이용되고 있다. 자동차 조립 공정에서의 레이저 열원의 적용은 고속 용접과 연

속용접이 가능하다는 것과 용접 열변형이 적다는 점 등을 고려하여 서구를 비롯한 일본 등의 선진국에서는 이미 실용화가 이루어지고 있다^{1~4)}. 국내의 대형 조선소 또한 이러한 세계적인 추세에 부응하여 레이저의 적용을 검토하는 단계에 이르렀으며 가까운 시일 내에 가시화가 이루어질 것으

† 책임저자(한국해양대학교 기관시스템공학부), E-mail : jdkim@mail.hhu.ac.kr, T : 051)410-4253

* 한국해양대학교 기관시스템공학부

로 기대된다.

그러나, 레이저 용접기술은 고정도(高精度)의 고속·저열용접에 따른 용접지배인자의 제어가 어려우며, 프라이머(primer) 코팅 강판의 경우에는 모재에 비해 코팅성분의 낮은 비점 때문에 합금원소의 증발거동과 모재의 용융거동, 그리고 기공 등의 결합형성기구가 일반 강재와 상이하여 그 메커니즘 이해와 용접품질 제어가 어렵기 때문에 용접시 균열과 기공결함 등의 많은 문제점을 안고 있었다^{5~9)}.

본 연구에서는 해양부식환경이라는 특이한 조건 속에서 국내 조선업계가 우선적으로 그 적용을 고려하게 될 조선용 구조용강인 AH36의 프라이머 코팅강판에 대하여, CO₂ CW레이저 빔 열원을 적용하여 용접을 수행하고 그때 발생할 수 있는 스패터(splatter) 현상과 기공(porosity) 등의 용접결함에 대한 발생메커니즘 규명과 그 대책을 제시하고자 하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서 사용된 레이저 용접용 재료는 Zn-riched 프라이머가 코팅된 조선용 구조용강 AH36으로 두께는 6mm^t이며 프라이머 표면 코팅막의 두께는 15와 30 μ m의 2종류를 사용하였다. 레이저 용접성에 미치는 코팅조건에 영향을 비교·검토하기 위하여 비드용접(bead welding) 및 겹치기용접(Lap welding)법을 적용하고, 시험편의 프라이머 성분을 제거하거나 표면 및 겹침부위의 코팅두께를 다양하게 변화시켰다.

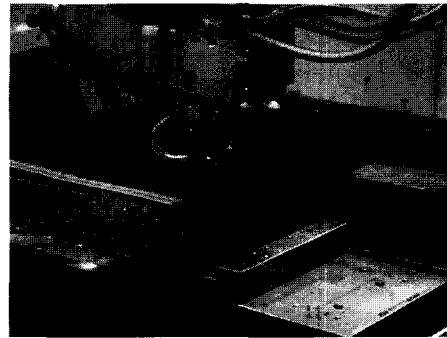
Table 1 Physical constant of Fe and Zn

physical constant Element	Density (kg/m ³)	Melting point (K)	Boiling point (K)	Thermal conductivity J/(m·K) (473K)	Reflectivity (%) R(1.06 μ m)
Fe	7,870	1,808	3,027	61.74	65
Zn	7,130	692	1,176	105	49

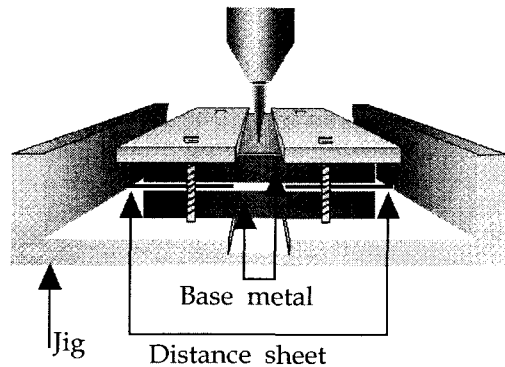
Table 1에 AH36의 주된 원소인 Fe성분과 코팅층의 주요 성분인 Zn에 대한 물리적 성질을 비교하여 나타내었다. Zn의 비점(boiling point)이 Fe의 용점(melting point)보다 낮은 것을 알 수 있는데, 이러한 물성적 차이로 인하여 스패터나 기공이 용이하게 생성될 것으로 판단된다.

2.2 CO₂ 레이저 용접장치와 실험방법

본 연구에 사용된 레이저 용접열원은, 최대출력 6kW의 RF 여기방식 고속축류형(fast axial flow) CO₂ 레이저이다. 동축 실드가스 노즐(coaxial shield gas nozzle)을 사용하여 15 l/min의 He으로 용접부를 실드하였다. 그리고 본 장치에는 용접부에서 비산하는 스패터로부터 광학계를 보호하기 위하여 커팅 에어(cutting air)를



(a) CO₂ laser



(b) Jig

Fig. 1 Photograph of CO₂ laser and schematic illustration of jig

적용하고 있다. Fig. 1은 CO₂ 레이저 장치의 사진과 갭 간극의 영향을 조사하기 위하여 STS304 박판(0.05~0.35mm^t)을 distance sheet개로 삽입하는 실험의 모식도를 각각 보여주고 있다. 용접변형에 의한 갭 간극의 변화를 없애기 위해 볼트를 사용하여 동일한 힘으로 지그에 고정하였다. 단면관찰용 시험편은 비드가 안정적으로 얻어지는 레이저빔 조사 후 30mm진행된시점에서 횡단면(transverse section)을, 그리고 연속하여 용접진행방향으로 18mm의 종단면(longitudinal section)을 각각 채취하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 프라이머 코팅강판에 대한 집광 광학계의 비초점 거리변화에 따른 용접특성

집광빔에 의한 재료의 용입특성을 검토하기 위해 재료의 형상특성과 프라이머의 증발에 의한 영향을 받지 않는 비드용접조건에서 비코팅 강판을 선정하여 비초점거리(f_d)변화에 따른 용입깊이의 변화를 조사하였다. 그 결과를 Fig. 2에 나타내며, 그림상에 표기한 용입깊이는 비드의 스파이킹 현상에 따른 깊이변화의 오차를 줄이기 위해 2.2절에서 언급한 18mm의 비드 종단면에서 측정된 평균값을 사용하였다. Fig. 2로부터, 양(+)과 음(-)의 비초점거리 변화가 커짐에 따라 용입깊이는

얕아지며 비드폭은 다소 넓어지는 경향을 보이고 있다. 특히 용입깊이는 양(+)의 비초점거리보다는 음(-)의 값에서 상대적으로 넓은 범위에서 깊게 나타나는 비드천이 현상(bead transition)을 보여주고 있다.

겹치기용접의 경우에도 이와 유사한 결과를 얻을 수 있었으며, $f_d = -2\text{mm}$ 의 위치에서 가장 깊은 용입을 보이며 전반적으로 양(+)의 값보다 음(-)의 비초점거리에서 깊게 나타났다.

이상의 실험결과로부터 $f_d(\text{mm}) = -2$ 의 위치가 비드의 건전성 확보 측면에서 가장 유리한 것으로 판단되어 이하의 실험에서는 $f_d(\text{mm})$ 를 -2로 공히 적용하였다.

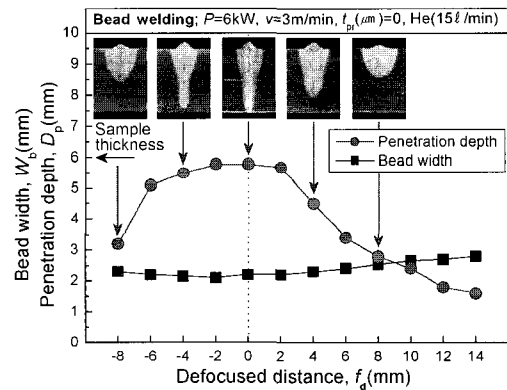


Fig. 2 Variation of penetration depth and front bead width by defocused distance(No coated-steels, bead welding)

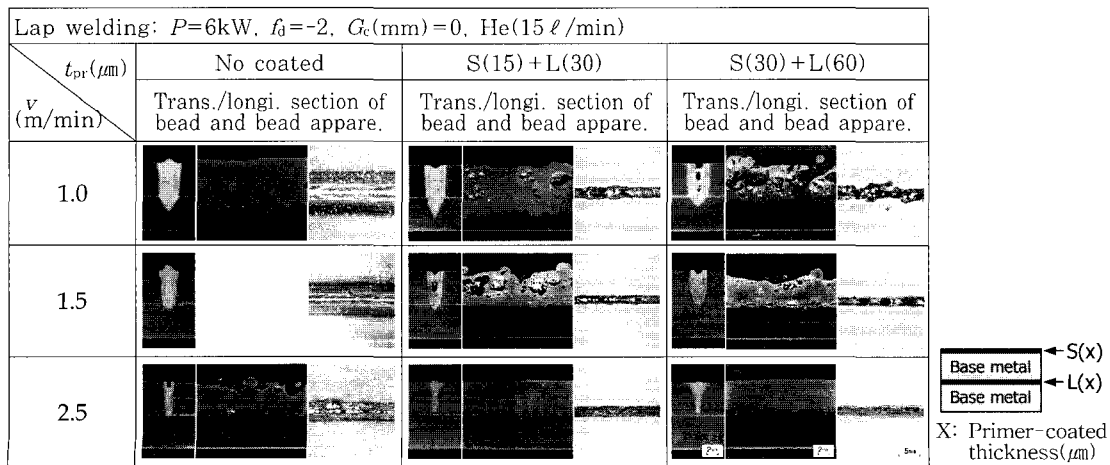


Fig. 3 Variation of bead shape by weld speed and primer coated thickness

3.2 겹치기용접에 있어서 용접속도 및 프라이머 코팅조건에 따른 용접 특성

Fig. 3에 겹치기용접시 겹침부에 별도의 갭 간극을 두지 않은 상태($G_c=0$)에서, 프라이머의 코팅두께(t_{pr})별 용접속도에 따라 형성된 용접비드의 횡단면, 종단면 및 전면비드의 형상을 나타내었다. 그림 중 $t_{pr}(\mu m)=S(15)+L(30)$ 은 시험편의 표면 및 겹침부위(겹친 부위)에 프라이머가 $15\mu m$ 및 $30\mu m$ 씩 코팅되어 있음을 나타낸다.

이 결과로부터, 용접속도가 증가함에 따라 용입 깊이가 얕아지며, 비드폭은 또한 좁아지는 경향을 보였다. 특이한 현상은 키크의 하부 선단이 겹침부위에 닿을 정도의 용접속도에서 기공 및 스패터의 발생량이 두드러지게 증가하여 심한 험핑비드(humping bead)가 형성된다는 것이다. 이것은 Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 겹침부위로부터 기공이 다량으로 발생되며, 코팅강판의 경우 낮은 비점을 가진 프라이머의 증발에 기인하여 이러한 현상은 더욱 현저하게 발생하게 되는 것으로 생각된다.

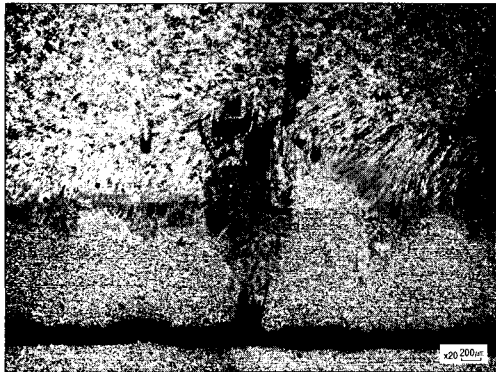


Fig. 4 Example of porosity-formation in lap position(A of Fig.3)

3.3 프라이머 코팅위치 및 코팅두께에 따른 용접특성 비교

“시험편의 표면(S)”, “겹침부위(L)”, 그리고 “표면과 겹침부위 양측(S+L)”의 제각기 다른 프라이머 코팅위치에서, 코팅두께를 $15\mu m$ 에서 $30\mu m$ 로 증가시켰을 때의 용입특성을 비교하고 기공과 스

패터의 발생여부에 미치는 지배정도를 검토하였다. Fig. 5에 프라이머 코팅위치에 따른 횡단면, 종단면 사진을 나타내었다.

Lap welding; $P=6kW$, $v=1m/min$, $f_d=-2$, $G_c=0$, He($15\ell/min$)		
X(μm)	X=15	X=30
Coated position		
S(X)+L(0)		
S(0)+L(X)		
S(X)+L(X)		
	Trans./longi. section of bead	Trans./longi. section of bead

Fig. 5 Effect of primer-coated position and thickness on weld-defect formation

겹침위치에만 코팅되어 있는 경우(S(0)+L(X)), $15\mu m$ 의 코팅조건에서는 험핑현상이 일어나지 않았으나 $30\mu m$ 로 코팅두께를 증가시킬 경우 심한 스패터를 수반하며 다량의 기공과 험핑비드가 발생하였다. 반면, 표면에만 코팅되어 있는 경우(S(X)+L(0))에는 용입형상에 큰 차이를 찾아볼 수 없었다. 그러나 시험편의 표면과 겹침위치의 양측에 코팅된 경우(S(X)+L(X))에는 $15\mu m$ 의 코팅조건에서도 스패터에 의한 험핑비드가 형성되어 있으며 $30\mu m$ 로 증가시키게 되면 스패터 현상이 더욱더 심해지고 있었다. 이 결과로부터, 표면부에서의 프라이머는 용융금속에 유입되기 전에 많은 에너지를 흡수하여 대부분 대기 중으로 증발하는 반면, 겹침부위의 프라이머는 용융금속으로 직접 유입되기 때문에 기공과 스패터의 발생거동에 지대한 영향을 미치는 주 인자임을 알 수 있었다. 또한 표면과 겹침부위의 양측에 코팅된 경우 이러한 현상은 더욱 가속화됨을 확인할 수 있었다.

3.4 겹치기용접에 있어서 용접특성에 미치는 갭 간극 및 프라이머 코팅조건 영향

지금까지의 실험결과에서 겹치기용접시 기공과 스패터발생의 주된 지배인자는 겹침부위에 코팅된 프라이머의 증발에 의한 것임을 확인하였다. 따라서, 본 실험에서는 겹침부위에 형성하는 프라이머의 증발압력을 누출시키기 위하여 갭 간극을 두므로서 용융금속에 미치는 영향을 최소화 하고자 하였다.

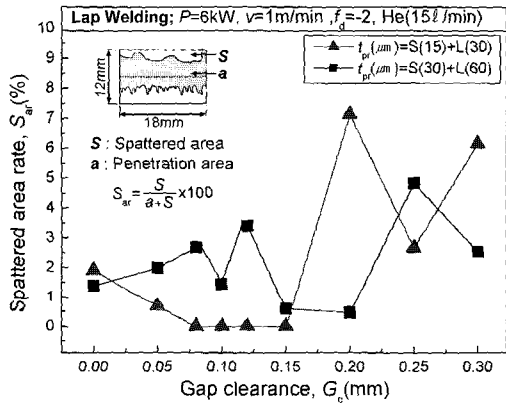


Fig. 6 Spatter area rate by gap clearance in primer coated steels

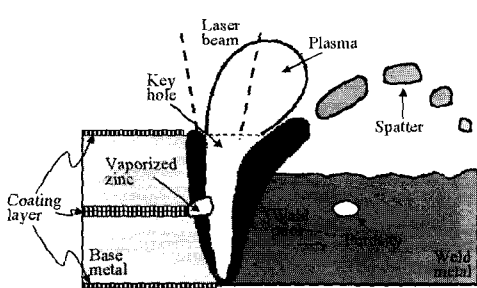
갭 간극에 따른 스패터의 발생면적 비율을 Fig. 6에 비교하여 나타내었다. 발생면적 비율의 정의를 그림의 그래프 좌측 상단에 도시하였다. 갭 간극에 따른 기공의 발생은 스패터의 발생에 비하여 현저한 차이를 보이지 않았다. 그래프에서 확인할

Lap welding: P=6kW, v=1m/min, f_d=-2, He(15ℓ/min)

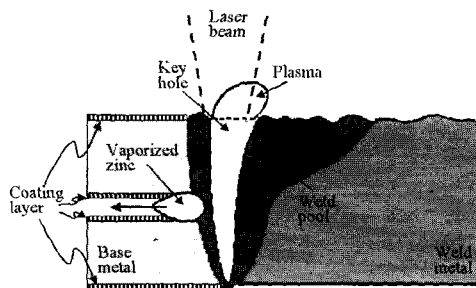
G _g (mm)	t _{pr} (μm)	Weld bead	Trans. section and Surface appear. of bead	Longi. section of bead	Weld defect
			0	No coated	
0.15	S(30)+L(60)	S(30)+L(60)			

Fig. 7 Effect of gap clearance and coated condition on weldability in lap welding <S(30)+L(60)>

수 있듯이 각 프라이머 코팅 두께에 대하여 스패터의 발생이 비교적 감소한 영역이 있음을 확인할 수 있다. 즉, t_{pr}(μm)=S(15)+L(30)의 경우에는 갭 간극이 0.08 및 0.10mm에서, t_{pr}(μm)=S(30)+L(60)의 경우에는 갭 간극이 0.15 및 0.20mm에서 험핑 등의 결함이 적고 표면비드는 미려한 전반적으로 양호한 것을 알 수 있다. 그러나 과도한 갭 간극을 들 경우에는 심한 스패터 발생 등으로 험핑비드가 생성되었다. 이것은 용액의 일부가 스패터 및 갭 간극을 통해 소실한데 기인하는 것으로 판단된다.



(a) Schematic of weld-defect formation



(b) Effect of gap clearance

Fig. 8 Formation mechanism of weld defects by Zn evaporation and gap-effect in lap welding on primer coated steels

Fig. 7에 30 μ m의 프라이머 표면코팅 두께에서 얻어진 건전한 겹치기용접 결과를 매크로 조직사진과 더불어 결합의 발생 상황을 비교하여 나타내었다. 갭 간극(G_c)이 0인 경우 비코팅 강판에 비하여 30 μ m의 코팅조건에서 다량의 기공과 스패터가 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 프라이머 코팅 두께에 따라 적절한 갭 간극을 유지한 경우에는 미려한 비드 외관과 기공 및 스패터가 거의 발생하지 않은 양호한 용접비드를 보이고 있다.

이상의 실험결과로부터, 겹치기용접시 용접결합의 발생 메커니즘과 갭 간극의 효과를 Fig. 8에 도식화하여 나타내었다. Fig. 8(a)는 겹침부위에 코팅된 프라이머의 증발에 기인하여 스패터 및 기공결합이 발생하는 메커니즘을 설명하고 있다. 즉 Fe의 용점보다 낮은 비점을 가진 Zn성분이 겹침부위로부터 다량으로 증발하여 좁은 키홀을 통로로 하여 급속히 빠져 나옴으로서 스패터가 비산하게 되며 그 결과 험핑비드가 형성된다. 또한 증발원소와 불안정한 키홀의 거동에 의해 형성된 bubble이 부상도중 용융금속의 응고벽에 트랩되어 기공으로서 잔류하게 된다.

Fig. 8(b)는 겹침부위에 적절한 갭 간극을 들 경우 건전한 용접결과를 얻을 수 있었던 메커니즘을 설명하는 것으로서, 용접결합의 근본적인 원인을 제공하던 프라이머 증발원소와 그 압력이 갭 간극을 통하여 누출됨으로써 용융금속 내부로의 유입이 방지되어 미려한 용접비드가 형성되는 것으로 판단된다.

4. 결 론

프라이머 코팅강 AH36의 CW CO₂ 레이저 겹치기용접시, 용접특성에 미치는 프라이머의 코팅 두께, 코팅위치 및 갭 간극의 영향에 대하여 검토한 결과를 다음에 정리한다.

(1) 집광법에 의한 재료의 용접특성을 검토하기 위해 비코팅 강판에서 비드용접을 행하여 용융깊이의 변화를 조사한 결과 비초점거리 변화가 커짐에 따라 용입깊이는 알아지며 비드폭은 다소 넓어

졌다. 겹치기용접의 경우도 이와 유사한 결과를 얻었으며 $f_d(\text{mm})=-2$ 의 위치에서 가장 깊은 용입을 보였다.

(2) 비코팅 및 15와 30 μ m의 프라이머 코팅 조건에 대하여 용접속도(v)를 변화시켜 겹치기용접을 행한 결과 용접속도(v)가 증가함에 따라 용입깊이는 알아지면서 비드폭도 감소하였다. 코팅두께가 증가할수록 용입깊이는 알아지며 비드폭은 넓어지는 경향을 보였다. 키홀의 하부 선단이 겹침부위에 닿을 정도의 용접속도에서는 겹침부위로부터 프라이머 증발 압력이 유입되어 다량의 기공과 스패터가 발생하였으며 코팅두께가 증가할수록 그 경향은 현저하게 나타났다.

(3) 코팅위치와 코팅두께를 변화시켜 실험한 결과, 표면보다는 겹침부위의 코팅조건에서 그 양이 증가함에 따라 스패터와 기공이 다량으로 발생하였으며, 양측모두 코팅된 경우는 그 발생정도가 더욱 심해졌다. 즉 겹침부위에 코팅된 프라이머는 용접결합 발생에 지배적인 역할을 하였다.

(4) 용접결합의 발생 메커니즘은 겹침부위로부터 발생한 프라이머의 증발압력이 좁은 키홀을 통하여 분출되고, 이때 용액을 함께 들어올려 비산시킴으로서 스패터가 발생된다. 또한 용액 내에 형성된 기포(bubble)가 부상도중 응고벽에 트랩되어 기공이 형성된다.

(5) 코팅두께가 S(15)+L(30)일 때는 0.08과 0.10mm, S(30)+L(60)일 때는 0.15와 0.20mm의 갭 간극을 두었을 때 용접결합이 없는 양호한 결과를 얻었다. 이것은 프라이머의 코팅두께에 따라 용접시의 증발량을 고려하여 적절한 갭 간극을 유지함으로써 프라이머의 증발압력을 방출시켜 용융금속내로의 유입을 방지한 결과이다.

참고문헌

- [1] H. Simidzu, F. Yoshino, S. Katayama and A. Matsunawa : Pulsed Nd:YAG Laser Spot Welding of Aluminum Alloys, Proceedings of LAMP'92, Nagaoka (June, 1992), 511-516

[2] I. Norris, T. Hoult, C. Peters and P. Wileman : Material Processing with a 3kW Nd:YAG Laser, Proceedings of LAMP'92, Nagaoka(June, 1992), 489-494

[3] G. Marinoni, A Maccagno, E Rabino : Technical and Economic Comparison of Laser Technologies for Welding, Proc. 6th Int. Cont. Lasers in Manufacturing (1989), 105-120

[4] J. D. Kim and Y. S. Kim : The State of In-Process Quality Monitoring Technology in Laser Welding, The Korean Welding Society vol. 18 No.4 (2000), 433-440 (in Korean)

[5] Hongping Gu : A New Method of Laser Lap Welding of Zinc-coated Steel Sheet, ICALEO(2000), 1-6

[6] R. Akhter, M.M.Gualini : Mathematical Modeling of the Laser Spot Weling of Zinc Coated Steel in Lap Configuration, ICAKEO(1998), 207-216

[7] J. Heyden, K. Nilsson and C. Magnusson : Laser welding of zinc coated steel, Proc. 6th Int. Conf. Lasers in Manufacturing, (1989), 93-104

[8] Katayama Seiji, Wu Yushen, Matsunawa Akira : Laser Weldability of Zinc-coated Steels, ICAKEO(2002)

[9] Susumu Tsukamoto, Isao Kawaguchi, Goro Arakane, Tomoyuki Kamata, Katsuhiko Maekawa : Suppression of Welding Defects in Deep Penetration CO₂ Laser Welding

저 자 소 개



김종도 (金鍾道)

1963년 1월생, 1985년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1993~1997년 일본오사카대학 생산가공공학과 응용고온공학코스(공학석사 및 공학박사), 2003년 1월~현재, 대한용접학회 고에너지연구위원회 위원장, 2004년 1월~한국레이저가공학회 운영이사, 1998년 3월~현재, 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수, 당학회 편집위원, 관심분야 : 레이저용접, 가공현상의 고분해능 계측과 실시간 해석



길병래 (吉炳來)

1957년 11월생, 1981년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 2000년 부경대학교 음향진동공학과(공학석사), 1996년~현재, 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수, 관심분야 : 음향진동



장지연 (張志演)

1947년 11월생, 1970년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1978년 일본 동경공업대학 대학원 정밀기계시스템 수료, 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수, 관심분야 : 기계요소 응력해석