연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 인코넬 600 합금의 맞대기 용접 특성 연구

송성욱†·유영태*·신호준**

Study of Welding Characteristics of Inconel 600 Alloy using a Continuous Wave Nd:YAG Laser Beam

Seong-Wook Song, Young-Tae Yoo and Ho-Jun Shin

Key Words: Nd:YAG Laser(Nd:YAG 레이저), Inconel 600 Alloy(인코넬 600 합금)

Abstract

Laser beam welding is increasingly being used in welding of structural steels. The laser welding process is one of the most advanced manufacturing technologies owing to its high speed and deep penetration. The thermal cycles associated with laser welding are generally much faster than those involved in conventional arc welding processes, leading to a rather small weld zone. Experiments are performed for Inconel 600 plates changing several process parameter such as laser power, welding speed, shielding gas flow rate, presence of surface pollution, with fixed or variable gap and misalignment between plate and plate, etc. The follow conclusions can be drawn that laser power and welding speed have a pronounced effect on size and shape of the fusion zone. Increase in welding speed resulted in an increase in weld depth/ aspect ratio and hence a decrease in the fusion zone size. The penetration depth increased with the increase in laser power .

Welding characteristics of austienite Inconel 600 using a continuous wave Nd:YAG laser are experimentally investigated. This paper describes the weld ability of inconel 600 for machine structural use by Nd:YAG laser.

1. 서 론

레이저 가공은 현재 성장기의 기술로서 기존 공법의 대체 또는 신공법 등의 응용기술에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 레이저에 의한 소재의 절단공법은 이미 여러 산업 분야에서 하나의 도구로 인정되어 광범위하게 사용되고 있다.

† 조선대학교 대학원 정밀기계공학과
E-mail : lordwme@naver.com
TEL : (062)230-7942 FAX : (062)227-6329
* 조선대학교 기전공학과
** 조선대학교 대학원 정밀기계공학과

그러나 레이저 접합 기술은 아직 일반화 되어 있지 않고 특수한 부품을 접합하는데 국한되어 있다. 인코넬의 레이저 용접에 관한 연구는 발전소 스팀 제너레이터 튜브의 슬리브 보수 작업을 위해 펄스파형 Nd:YAG 레이저를 이용하여 진행되어 왔다.(1)

인코넬 600은 니켈 및 크롬이 다량으로 함유된 니켈 합금강으로, 인성과 Creep 특성이 우수하고, 특히 고온강도가 높고, 화학적으로도 안정하여 고온 부식 환경에도 강한 장점을 가지고 있다. 그래서 고온 내수성, 가스 분위기가 요구되는 핵발전소 스팀 제너레이터 튜브, 열교환기, 화학 및

식품관련설비, 로머풀, 반도체설비부품, 전자부품 등에 사용되고 있다.

이와 같이 인코넬 600은 다양한 부분에 사용되고 있기 때문에 부품의 보수나 가공을 위한 특성을 분석하는 것은 매우 중요한 요소이다. 인코넬 600을 레이저로 최적 상태의 용접을 하기 위해서는 레이저 출력, 레이저 빔 이송속도, 레이저 빔의 파장, 보호 가스의 종류 및 유량 그리고 최적의 용융깊이와 폭을 갖는 작업표면과 초점렌즈사이의 거리를 결정해야 한다.

그래서 본 연구에서는 일정한 이동속도 조건에서 최적의 용입깊이를 얻기 위해 비드 온 플레이트(bead on plate) 용접 방법으로 용접 비드면을 관찰한 다음 맞대기 용접을 실시하였다. 맞대기 용접은 비드 온 플레이트로 실험한 결과를 기초로하여 최적의 용입열량을 나타내는 레이저 출력과 레이저빔의 이송속도를 결정하여 용접하였다. 용접 후 용융풀에서 모재로의 급냉 때문에 발생하는 용접 비드 단면을 관찰하였다.

2. 실 험

2.1 시편

본 연구에 사용된 재료는 판 두께 3mm의 Ni기 오스테나이트계 고용체합금인 인코넬 600으로서 화학조성 및 기계적, 물리적 특성을 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 시험편은 가로 100mm, 세로 30mm로 제작하였다. 비드 온 플레이트(bead on plate)용 시편은 단일판을 사용하였고 맞대기 용접(butt welding)용은 두 개의 시료를 맞댈 수 있도록 준비하였으며 접촉부는 밀링(milling)가공하였다. 용접시 시편 표면의 이 물질을 제거하기 위해 아세톤으로 세척 한 후, 레이저 용접 공정 변수를 변화시키면서 실험하였다.

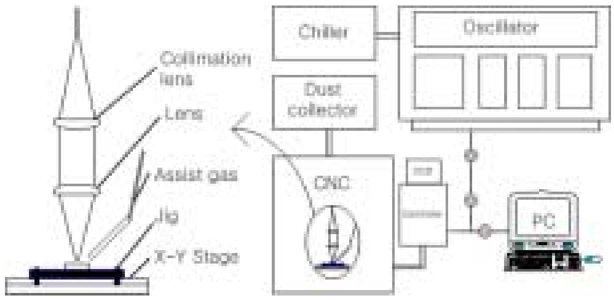

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

2.2 실험 장치

본 연구에 사용된 레이저는 파장이 1064nm, 멀티모드(multi-mode)의 빔으로써 최대출력이 2.8kW인 연속파(continuous wave;CW)형 Nd:YAG 레이저이다. 레이저 빔은 직경 600㎛인 광섬유를 통해 시편에 전달된다. 광섬유로 전달되는 레이저 빔의 초점크기(Spot size)는 0.6mm이다. 레이저 용접헤드의 광학계는 초점거리 F=200mm이고, 렌즈의 직경(D) 60mm인 F#(F number:F/D)가 3.33인 렌즈를 사용하였다. 실험 장치에 대한 모식도는 Fig. 1에 나타냈다.

연속파형 Nd:YAG 레이저 가공기는 독일 Trumpf 사제로 레이저 발진은 아크(arc) 플래시 램프에 의해 광 펌핑(pumping)하여 연속여기 된다.

Table 1 Chemical analysis(Wt. %)

	C	Mn	Fe	S	Si	Cu	Ni	Cr	Al	Ti	Co	P	B
Inconel 600	0.019	0.18	9.72	<0.001	0.13	0.11	73.25	16.12	0.231	0.18	0.050	0.007	0.003

Table 2 Mechanical&Physical properties of Materials

	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Thermal Conductivity (W/m · ℃	Melting Range (℃	Density (g/cm^3)	Specific Heat (J/kg · ℃	Electrical Resistivity (μΩ [illegible])	Hardness (Hv)
Inconel 600	710	40	14.9	1354 ~1413	8.47	13.3	1.03	185

2.3 실험 방법

연속파형 Nd:YAG 레이저 용접을 위해 레이저 빔을 금속 시편에 직접 조사하는 비드 온 플레이트(bead on plate)용접 및 맞대기 용접(butt welding)을 실시하였다. 실험에 사용된 연속파형 Nd:YAG 레이저 용접 파라미터는 용접속도, 초점 위치, 출력의 변화 등으로 하였다. 이 때의 용접 속도를 1.0m/min로 한 후, 초점 위치를 z=-10mm에서 z=+10mm으로 변화시키면서 레이저 출력을 600W, 800W, 1000W로 하여 시편을 비드 온 플레이트 용접하여 최적의 용접공정변수를 결정하였다. 두께 3mm를 관통하는 완전 관통 용접(full penetration welding)에서는 레이저가 빔을 통과하는 빔 강도를 확인하기 위해 용접 대상의 재료에 속도1m/min에서 출력을 1400W, 1500W, 1600W, 1700W로 변화시키면서 Inconel 600을 각각 비드 온 플레이트(bead on plate)용접 후 재료의 뒷 표면의 용융상태 또는 표면변색 및 용융흔적을 관찰하여 평가하였다.

Inconel 600을 Nd:YAG 레이저로 용접시 보호가스로 불활성 가스인 아르곤(Ar)을 사용해 공기와 차단하여 용접시 산화되는 것을 방지하는 한편 플라즈마를 제거하도록 하였다. 아르곤 가스의 유량은 5.5ℓ/min로 하였다.

샤링 절단한 시편의 용접부위에서 이물질을 제거하기 위해 아세톤으로 세척한 후 시편을 지그(Jig)로 단단히 고정시켜 용접중 열팽창에 의한 변형이 발생하지 않도록 하였다. 용접위치의 허용오차는 0.1mm 이하로 유지하였다.

광학 현미경상의 조직관찰을 위해 용접 후 용접방향에 수직으로 비드단면을 금속정밀 절단기로 절단한 후 마운팅 프레스(Mounting press)로 마운팅 하였다. 마운팅된 용접시편 비드의 절단면에 대하여 샌드페이퍼(sand paper)로 #400, #800, #1000, #1200번까지 연마 후 최종적으로 diamond suspension 6㎛, 1㎛입도로 폴리싱(polishing)하였다. 에칭은 HNO_3, HCl, 증류수 혼합용액을 사용하였으며 침적 시간은 재료의 부식 상태를 관찰하면서 조절했다.

에칭된 용접비드 경계면은 광학현미경과 금속조직현미경을 사용하여 용접부의 형상과 결함을 관찰했다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 종횡비 관찰과 작업거리 결정

레이저 용접에서 작업표면과 초점렌즈사이의 거리는 시편에 미치는 에너지 밀도와 밀접한 관계가 있다. 그래서 용접 전 출력과 작업표면에서부터 초점렌즈까지의 거리 변화에 따른 용입깊이를 조사했다.

용접 조건을 결정하기 위한 선행 실험으로는 빔이송속도 (1m/min), 보호가스 (Ar 5.5ℓ/min)를 고정시키고, 초점위치(z)를 -10mm 에서 +10mm까지 변화시켜가며, 출력 600W, 800W, 1000W로 비드 온플레이트 용접을 하였다. 용접한 시편의 비드면과 종횡비를 Fig.2에 나타내었다.

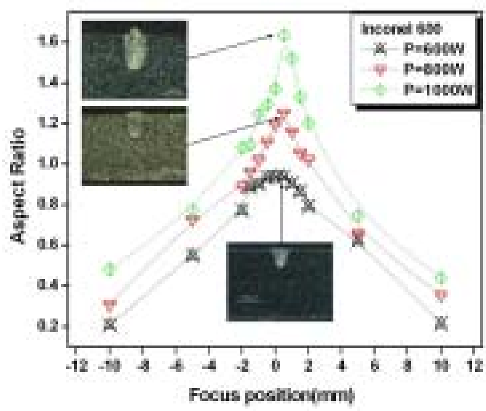

Fig. 2 Relation between position of focus and aspect ratio

Fig.2에서 z=0.5mm일 때 종횡비가 가장 크다는 것을 알 수 있었으며, 용입 깊이는 시편표면인 z=0mm에서 시편 아래 방향인 z=-1mm까지의 실험 결과가 z=0.5mm일 때보다 컸다. 그 이유는 작업 거리를 시편 표면보다 약간 낮게 했을 경우 시편에 대한 열전달 효과가 z=0.5mm일 때 보다 크기 때문이다.[(2),(3)]

출력이 작을 경우 열이 시편 표면으로 전달되는 양이 깊이 방향으로 전달되는 양보다 많아 종횡비가 작게 나타났다. 레이저 출력을 증가시키면 시편 표면으로 전도되는 에너지양보다 시편 깊이 방향으로 전달되는 에너지양이 많아져 종횡비의 변화가 커졌다.

실험한 결과 중 출력을 1000W로 했을 때를 선택해서 종횡비의 관점에서 관찰했다. z위치가 시편 표면(z=0)보다 약간 아래 부분이 가장 큰 것이

아니라 시편 표면보다 약간 높은 위치인 z=0.5mm에서 가장 크게 나타났다.

3.2 출력에 따른 비드면 관찰

선행 실험에서 작업표면과 초점렌즈사이의 거리는 초점위치(z=0.5mm)일 때 종횡비가 가장 컸으므로 초점위치(z)를 z=0.5mm로 고정시키고, 빔이송속도를 1m/min, 보호가스를 Ar 5.5ℓ/min로 한 후, 출력을 1400W, 1500W, 1600W, 1700W로 변화시키면서 각각 비드 온 플레이트(bead on plate)용접 한 결과를 Fig. 3 ~ Fig. 6에 나타내었다. 출력이 1.4kW일 때는 관통 용접이 되지 않았으며, 출력 1.5kW에서부터 관통되었음을 알 수 있었다. 그러나 출력 1.5kW에서 시편의 뒷 표면의 용융 상태를 살펴본 결과 관통이 되지 않는 부분이 간헐적으로 발생하여 불규칙적인 용융상태가 관찰 되었다. 출력을 1.6kW로 하였을 때에는 완전하게 관통 용접이 되었다. 출력을 1.7kW로 하였을 때에는 뒷 표면의 폭이 커졌음을 확인할 수 있었다. 그리하여 관통용접의 최적 출력은 1.6kW임을 알 수 있었고, 위의 실험 결과를 바탕으로 맞대기 용접을 실시하였다. 출력이 작을 때에는 비드 모양이 나사못머리 모양을 하고 있지만, 출력이 증가하면서 모래시계 모양으로 변화했다. 출력이 작을 때에는 표면에서의 용융풀의 용융물이 표면에서 전도됨과 동시에 시편의 깊이 방향으로 레이저빔의 에너지가 전달되지만 모재로부터의 냉각효과가 커서 관통되지 못했다.

레이저 출력이 증가하여 시편이 관통될 경우 시편의 밑부분에서의 표면장력과 열전도 때문에 모래시계 모양으로 용접비드의 단면이 형성된 모양을 Fig 6.에 나타내었다.

용접된 모든 시편에서 균열이 발생되지 않았다. 이것은 모재와 용접된 시편의 용융구역 모두 상변태가 일어나지 않고 연성이 큰 오스테나이트 상태로 존재하기 때문이다.

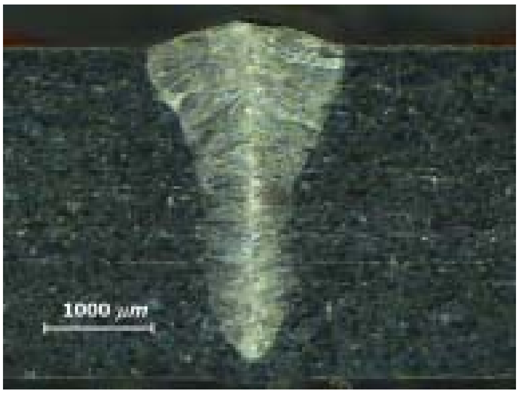

Fig. 3 Cross-sectional area of bead on plate welding at P=1.4kW, v=1.0m/min and z=0.5mm

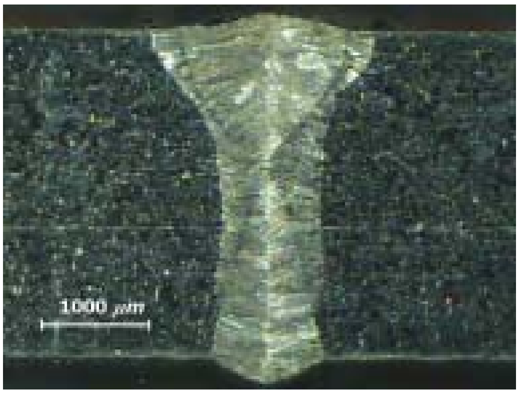

Fig. 4 Cross-sectional area of bead on plate welding at P=1.5kW, v=1.0m/min and z=0.5mm

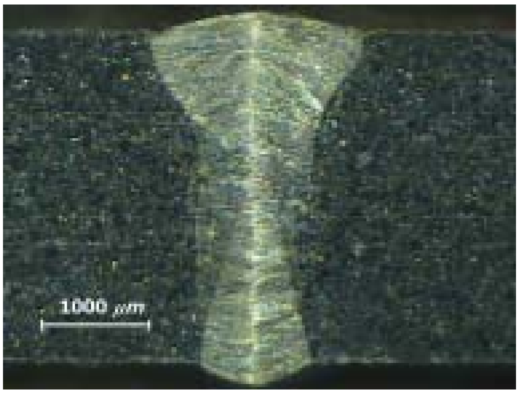

Fig. 5 Cross-sectional area of bead on plate welding at P=1.6kW, v=1.0m/min and z=0.5mm

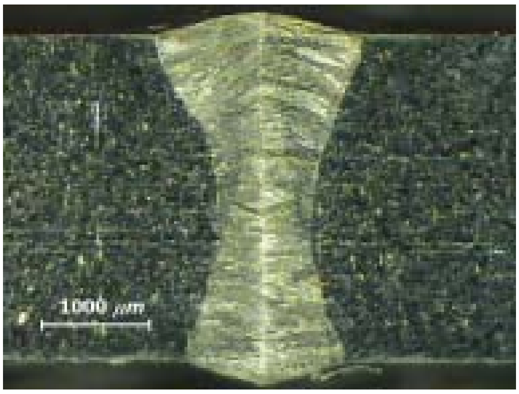

Fig. 6 Cross-sectional area of bead on plate welding at P=1.7kW, v=1.0m/min and z=0.5mm

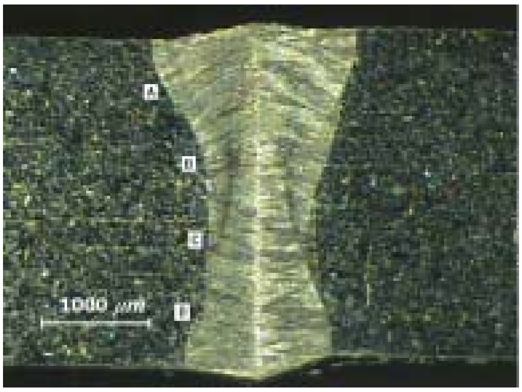

Fig. 7 Butt welding Cross-sectional area of the laser beam power at P=1.6kW, v=1.0m/min and z=0.5mm

3.3 맞대기 용접

출력 1.6kW, 용접속도 v=1.0m/min, 초점 위치 z=0.5mm로 맞대기 용접한 시험편의 비드 모양과 조직 사진을 각각 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다.

그리고 초점 위치에 따른 맞대기 용접 특성을 비교하기 위해 출력과 용접속도는 1.6kW와 v=1.0m/min로 같게 하고, 초점 위치는 -0.5mm로 하여 맞대기 용접한 시험편의 비드 모양을 Fig. 9에 나타냈다.

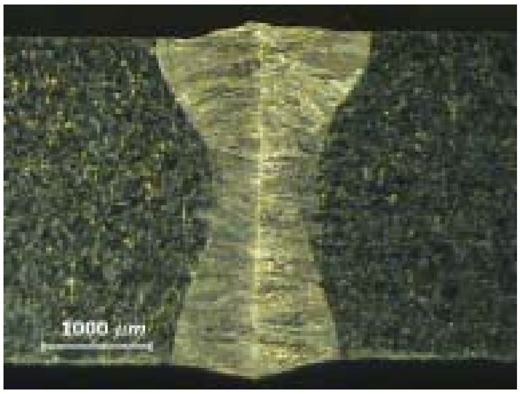

Fig.9 Butt welding Cross-sectional area of the laser beam power at P=1.6kW, v=1.0m/min and z=-0.5mm

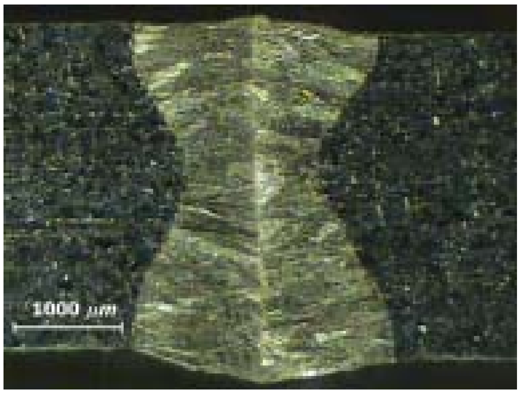

Fig.10 Butt welding Cross-sectional area of the laser beam power at P=2kW, v=1.0m/min and z=-0.5mm

비드면의 상부 폭은 각각 1893㎛와 1974㎛, 중간부 폭은 987㎛와 1001㎛, 하부 폭은 1348㎛와 1510㎛로 z=5mm일 때가 z=-0.5mm일 때 보다 상부, 중간부, 하부의 비드폭 각각 5%, 1%, 15% 증가했음을 알 수 있었다. z의 위치를 -0.5mm로 했을 때, 용접 단면의 중앙부의 증가는 크지 않았고 시편 하부의 비드 폭은 가장 크게 증가하였다. 이는 시편하부면의 용융물이 표면장력 때문에 시편에서 분리되지 않고, 열이 주변으로 전달

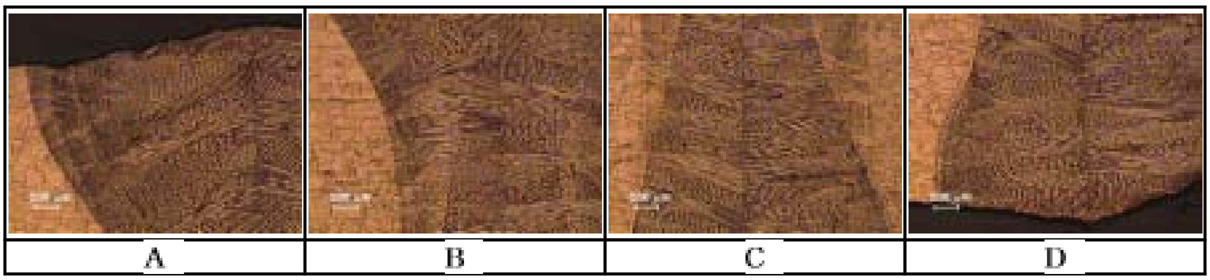

Fig. 8 Photographs showing laser butt welding(P=1.6kW, v=1.0m/min, z=0.5mm)

되었기 때문이다.

Fig. 10은 용접속도 v=1.0m/min, 초점 위치 z=-0.5mm일 때, 출력을 2kW로 하여 1.6kW일 때와 비교하기 위해 나타낸 것이다.

출력을 2kW일 때, 상부 폭이 2276㎛, 중간부 폭이 1370㎛, 하부 폭이 2430㎛으로 출력 1.6kW에 비해 14%, 37%, 56% 증가하였다. Fig. 9의 결과와 비교했을 때, 출력의 증가에 따라 시편하부 표면의 용융폭의 증가율이 커졌다.

Fig. 8의 조직 사진에서 빔에 의하여 입사된 열이 모재로 전도됨에 따라 응고부위가 결정표면에서 일정한 방향을 가지고 성장하는 epitaxy형태를 나타내고 있다. 모재 중앙부위의 용융선의 각 입자들은 용융부위의 입자들이 성장할수록 성장영역을 제공하고 있다. 조성적 과냉(constitutional supercooling)으로 증가되면 응고속도가 더욱 빨라져 cellular-dendrite 성장되었음을 알 수 있었다.[(4),(5)] 모재로부터 응고가 시작되면서 면선단응고(planar front solidification)가 일어난 후 세포상응고(cellular solidification)가 진행되고 있다.[(6)~(7)]

레이저 용접풀은 표면장력과 대류유동의 영향을 받는다. 인코넬 600의 니켈 성분이 많아 용융풀 표면에서의 대류유동에 의한 열전달 때문에 용융면적이 시편의 중심보다는 크게 나타났다. 전체적으로 모재로부터 급격한 온도구배 때문에 용융부 경계부분에서 용융 중심부쪽으로 길다랗고 얇은 타원형 모양의 Columnar 입자성장이 관찰된다.

4. 결 론

본 연구는 평균 출력 2kW인 연속파형 Nd:YAG 레이저를 이용한 인코넬 600 합금의 맞대기 용접 특성을 알기 위해 수행하였으며, 작업거리, 레이저 출력, 레이저빔 이송속도 등의 용접조건 변화에 따른 용접부의 비드 폭, 용입깊이, 비드 형상 및 금속 조직 등을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 작업표면과 초점렌즈사이의 거리는 초점위치(z=0.5)일 때 종횡비가 가장 크게 나타났다.

2. 레이저 빔 이송속도를 1.0m/min로 하였을 때, 두께 3mm의 인코넬 600판재를 완전용입하기 위해서는 레이저 출력을 1.6kW이상이 되어야 한다.

3. 맞대기 용접시 레이저 출력 1.6kW, 용접 속도 1m/min일 때 양호한 용접 결과를 얻었다.

참고문헌

(1) Jae-Do Kim, Cheol-Jung Kim, Chin-Man Chung, 2001, Repair welding of etched tubular components of nuclear power plant by Nd:YAG laser, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 114, Page 51 ~ 56

(2) Kim T.H, 1996, Laser Manufacturing, Kyung Moon, Page 154~215

(3) S. Gobbi, Li Zhang, J. Norris, K.H. Richter and J.H. Loreau, 1996, HIGH POWER CO_2 AND Nd-YAG LASER WELDING OF WROUGHT INCONEL 718, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 56, Page 333~345

(4) J.G.Byeon, K.S, Park, W.J.Han, 2001, Welding characteristics of the Inconel plate using a pulsed Nd:YAG laser beam, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 113, Page 234~237

(5)Han S.W, 1988, explanation of metal-heat treatment organization, Page 234~235

(6) R. Andreas Matzeit,You-Hee Han, 1994, Laser Material Processing and Their Application for Light Structure, KSME, Vol34, No7, Page 539~545

(7) Y.YAMASHITA, T.YOSHIDA and K.FUJITA, 1997, Investigation of application of friction welding to dissimilar metal joints for eectric power plants, Welding Inernational, Vol. 12, No. 4, Page 6 ~ 12.