한국공작기계학회지 Vol.18 No.5 2009. 10. pp. 529~535
Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers

선박용 Al 합금의 레이저 절단시 표면 특성에 관한 연구

김성일*

(논문접수일 2009. 6. 9, 심사완료일 2009. 9. 26)

A Study on the Surface Characteristics of Al Alloy Plate used in Shipbuilding in LASER Cutting

Seong-Il Kim*

Abstract

One of the most important things in shipbuilding is to select light and high tensile strength materials. Therefore, the use of Al alloy in shipbuilding become an increase. In cutting the aluminum plate, the quality of the cut surface is strongly influenced by the cutting conditions such as cutting speed, kerf width, plate thickness, cutting materials, and applied gas pressure. The cutting experiment of Al alloy plate(5083) were carried out using LASER cutting machine. The upper and lower of kerf width, the surface roughness(Ra, Rmax) of cut surface were measured under various cutting conditions. The morphologies of cutting surface were also monitored at various cutting conditions. The optimum cutting conditions of Al alloy among tested were indicated.

Key Words : cutting speed(절단속도), kerf width(절단폭), LASER cutting machine(레이져 절단기), surface roughness(표면거칠기)

1. 서 론

강판의 절단이 필요한 공정 중 특히, 조선소에서의 강판의 절단은 입열 관리가 어렵고 변형요인도 복잡해 절단정도 관리에 대한 필요성이 대두되고 있다. 특히 절단 품질 및 생산성의 향상이 요구되면서 현장에서 CNC 가스절단기, CNC 플라즈마 절단기가 유용하게 사용되고 있다[1~5]. 최근 선박의 경량화가 요구되면서 강 외에 알루미늄 합금의 사용이 증대되고 있는 실정이다. 이는 알루미늄 합금이 가볍고 높은 인장력을 가지기 때문이다. 알루미늄 합금의 절단은 열영향으로 인해 가스나 플라즈마 절단기를 사용하지 못하고 레이저나 워터젯을 이용하여 절단하고 있다. 레이저 절단은 절단부 폭이 좁아 정밀가공에 유리하며, 고속절단이 가능하고 재료의 종류에 구애 받지 않는 등 타 절단법에 비해 품질 및 생산성에 우수한 것으로 평가되고 있어 이에 대한 연구가 이루어지고 있다[6~8]. 레이저 절단기는 주로 연강, 스테인레

* 대불대학교 기술교육과 (sikim@db.ac.kr)
주소: 526-702 전남 영암군 삼호면 산호리 72-1

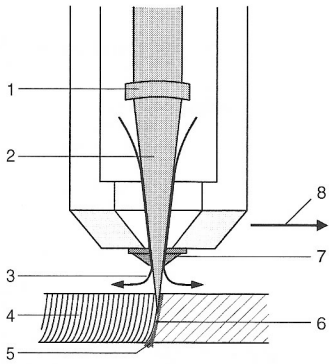
스강, Al 합금의 절단에 사용되는데 연강이나 스테인레스강의 절단에 대한 연구[7-9]는 어느 정도 진행되고 있다. 그러나 경량화를 위해 사용되고 있는 Al 합금(5083)의 피로파괴에 대한 연구[10-11]가 있지만, 절단에 대한 연구가 적어 이에 대한 연구가 요청되고 있다.

절단에 영향을 끼치는 변수로는 절단재료와 두께, 절단속도, 가스종류, 가스압력, 초점 포인트와 레이저 출력 등을 들 수 있다. 이 중 절단속도는 소재의 종류 및 두께에 따라 달라져야 하며, 속도가 너무 높거나 너무 낮으면 표면거칠기의 변화 및 들쭉날쭉한 흠집이 생기므로 적절한 절단속도를 선정해야 한다. 또한 절단에 이용되는 가스의 압력도 절단품질에 영향을 미치므로 적절한 가스압력도 선정해야 한다. 본 실험에서는 절단에 관련된 내용에 집중하기 위하여 레이저 및 기계 파라미터, 공작물 파라미터는 고정하였다.

본 연구는 선박건조 현장에서 많이 사용중인 Al합금(5083)의 레이저 절단시 절단속도, 가스압력 등의 변화에 따른 절단 폭, 표면거칠기 등을 측정하고, 절단면의 관찰 및 각 조건에 따른 절단 표면 특성을 비교, 검토하여 절단 현장에 유용하게 사용하고자 한다.

2. 레이저 절단

오늘날 레이저는 절단, 용접, 열처리, 마킹 등 여러 분야에 이용되고 있다. 레이저 절단(Laser Amplification by Stimulated Emission of Radiation, LASER) 원리는 발진기내에서 레이저 빛을 방출한 후, 집광, 증폭에 의해 고밀도화 되고, 필요한 곳에 집중적으로 주사함으로써 목적하는 기능을 수행하게 된다.



1 Focusing optics
2 Laser beam
3 Gas jet work gas
4 Drag lines
5 Melting or slag
6 Cutting edge on the workpiece
7 Nozzle
8 Cutting direction

Fig. 1 The principle of laser cutting[6]

레이저 절단은 Fig. 1과 같이 절단과정에서 높은 출력밀도로 신속한 가열을 가능하게 하며, 소재의 부분적 또는 완전한 기화를 가능하게 한다. 소재는 레이저빔과 함께 공급되는 가스 분사를 통해 절단 틈으로부터 분리된다. 절단 틈과 공작물의 절단 끝단은 초점장치나 공작물의 이송속도 등에 따라 달라진다. 절단 방향으로 이동하면서 절단이 시작되면 드래그 라인(Fig. 1의 4)들이 생성되며, 절삭속도가 더 빨라지면 이 드래그라인의 간격이 넓어지고 휘어지는 각도도 커지게 된다.

레이저 절단은 재료에 직접 접촉하지 않고 힘을 가하지 않은 상태에서 공작물을 절단할 수 있고, 절단속도가 높으며, 에너지 밀도가 높고 열영향부가 적어서 공작물의 비틀림이 최소화되며, 절단끝단의 거칠기가 낮아 재연마가 불필요하기에 연강, 공구강, 스테인레스 스틸, 알루미늄 및 알루미늄 합금 외에 비철재료도 절단할 수 있다.

레이저절단에 영향을 미치는 변수로는 레이저 출력 등을 포함하는 레이저 파라미터, 절단속도, 가스압력 등의 가공 프로세스 파라미터, 공작물의 두께, 소재 등의 공작물파라미터, 초점렌즈 등의 기계 파라미터 등을 들 수 있다.

고압 절단이란 6bar 이상의 압력으로 절단하는 것을 말하며, 높은 가스 압력이 용해된 소재가 빠르게 절단 틈에서 빠져 나올 수 있게 해주는 절단이다. 고압절단은 특히 스테인레스 스틸이나 알루미늄 합금의 절단작업에 적합하며 절단 끝단의 산화방지작용, 두께가 3mm를 초과하는 알루미늄합금에서 들쭉날쭉하게 절단되는 것을 최소화하며, 공작물의 재 연마 불필요, 금속판의 두께에 따라 초점 포인트가 달라지는 특징을 가지고 있다.

3. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용된 장비는 Fig. 2의 레이저절단기(LASER cutting machine), 표면 거칠기 측정기(Surftest 301, Mitutoyo), 디지털카메라(Cannon), 절단폭을 측정하기 위한 윤곽투영기 등이며 자세한 사양은 Table 1과 같다. 사용된 시편은 선박에 사용되는 알루미늄 합금(5083)이며, 판 두께는 10mm를 사용하였다. 시편의 크기는 200mm ×170mm(W×L)이고, 화학적 성분은 Table 2와 같다.

레이저 절단기의 출력은 4,000W, 주파수는 10,000Hz, 노즐 간격 0.7mm로 고정하였으며, 가스는 질소를 사용하였다.

Fig. 2 The laser cutting machine

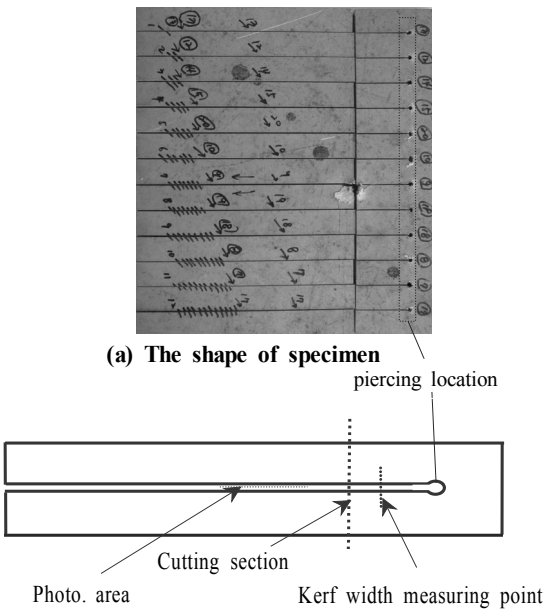
Table 1 The specifications of experimental apparatus

LASER cutting machine	- Model : TCL 4030(TRUMPF) - Working range : 6,000×2,000×115mm - Positioning accuracy : ± 0.1mm - Repeatability : ± 0.03mm - Maximum cutting thickness : STS : 15mm, steel : 20mm aluminium: 8 mm - Cutting gas: nitrogen - Power : 4 Kw
Portable surface roughness tester	- Model : Surftest 301 - Mitutoyo Co. - measuring range * Ra : 0.05～40㎛ * Rmax(Ry) : 0.3～160㎛ - Cutoff length(λc) : 0.25,0.8,2.5mm - Sampling length(L) : 0.25, 0.8, 2.5, 8mm
Digital camera	- Model : Cannon - Pixel : 8.0 Mega pixels

Table 2 Chemical compositions of Al-5083 alloy(wt. %)

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zr	Ti	Al
Al-5083	0.08	0.19	0.02	0.57	4.45	0.06	0.01	0.02	bal

절단속도와 압력은 현장에서 주로 사용하고 있는 영역에서 실험하고자 하여, 절단속도는 0.6, 0.7, 0.8, 0.9m/min 4단계로 하였고, 압력은 16, 17, 18 bar 3단계로 변화시켜 절단하였다. Fig. 3의 (a)는 절단 실험한 시편의 사진이고, (b)는 각 측정부의 위치를 더 상세한 그림으로 나타낸 것이다. 절



(a) The shape of specimen

(b) Locations of each measurements

Fig. 3 The shape of specimen and locations of the measurements

단면과 절단단면을 보기 위해 피어싱 시작 부위(Piercing location)에서 90mm 떨어진 부위를 디지털카메라로 촬영하였다. 또한 절단면의 표면거칠기 측정은 이동형 표면거칠기 측정기로 Fig. 3(b)의 Photo. area의 정해진 3곳의 위치에서 중심선 표면 거칠기(Ra)와 최대 높이 표면 거칠기(Rmax)를 절단 표면이 양호한 부분인 윗부분(upper)과 거친 부분인 아래 부분(lower) 2 곳을 측정하여 평균하였다. 표면거칠기 측정 시 cut-off는 0.8mm, 측정반복상수(n)는 3으로 설정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 절단면 및 절단 단면의 특성

Fig. 4는 절단면을 확대한 사진으로 레이저 빔의 속도에 따른 드래그라인(Drag lines)과 드래그라인의 굴곡 현상을 볼 수 있다. 절단의 시작인 A부위에서는 드래그라인이 일정하나 일정두께를 지나면서 절단속도의 증가에 따라 B와 같이 드래그라인의 간격이 넓어지면서 굴곡이 심해진다. C부분은 압력에 의해 퍼지는 현상이 발생하여 표면거칠기는 더욱 거칠어진다. D부분은 절단된 슬래그가 모재에서 떨어지지 않고 부착되어 있는 드로스를 보여주고 있다. 드로스의

길이에 따라서 절단 후 가공공정이 필요하기도 한다. 드로스가 없는 조건에서 절단해야 후처리공정이 생략되기에 적절한 절단조건을 선택하는 것은 품질 및 생산성 향상에 중요한 요소이다.

레이저 절단은 가스와 플라즈마 절단과 마찬가지로 절단조건에 따라서 위와 아래의 폭이 다르지만, 강의 가스절단인 Fig. 5의 (a), 플라즈마 절단인 Fig. 5의 (b)와 레이저 절단인 Fig. 5의 (c)를 비교하여 보면 가스 절단인 (a)는 절단속도가 저속일 경우에 윗면의 폭이 넓고 아래면의 폭이 좁으며, 절단속도가 빨라지면 폭이 같아지고, 절단속도가 더 빨라지면 윗면의 폭보다 아래면의 폭이 넓어진다[12]. 플라즈마 절단인 (b)는 절단속도의 증가에 따라서 절단 단면의 형태가 V 홈의 형상을 하고 있으며, 절단속도가 너무 빠르면 절단이 되지 않는다[13]. 본 논문에서의 레이저절단은 상용 절단 조건에서의 실험이기에 절단이 되지 않는 속도까지 절단을 하지 않았지만, 절단 단면은 아주 홈이 좁은 V홈의 형상이며, 절단속도가 너무 빨라지면 절단이 되지 않는다는 다른 문헌과도 같은 경향을 보이고 있다[1]. 절단속도가 증가함에 따라 표면거칠기와 직각도, 드로스를 포함한 표면 형상이 좋은 가스절단의 적정속도라 판단되는 경우의 절단폭이 3.3mm(upper), 2.5mm(lower)정도이나, 레이저 절단의 절단폭은(0.4mm(upper), 0.25mm(lower))로 가스절단에 비해서 직각도, 재료이용, 정밀도 면에서 상당히 우수함을 볼 수 있다. 본 실험조건에서는 윗면이 넓고 아래면의 폭 치수 차이가 적은 V 형태로 생성되었으며, 절단폭은 크게 차이나지 않았고, 형태는 Fig. 5의 (c)와 같다.

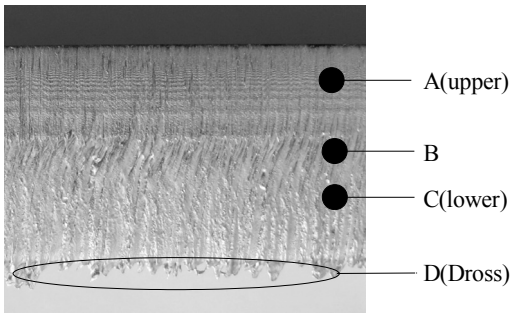
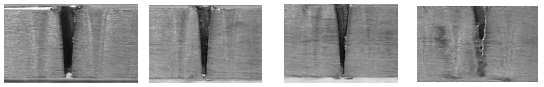


Fig. 4 Photo. of laser cutting section

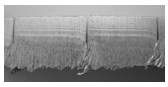
0.2m/min **0.6m/min** **0.8m/min**

(a) The CNC gas cutting with various cutting speed (t=12mm, mild steel)



1.3m/min **1.6m/min** **1.9m/min** **2.1m/min**

(b) The CNC plasma cutting with various cutting speed (t = 20mm, high tensile steel(AH36))



(c) The laser cutting (t=10mm, Al 5083)

Fig. 5 Kerf shapes and width of cutting section at various cutting speed

Fig. 6은 절단압력에 따른 절단속도와 절단폭(Kerf width)과의 관계를 보여주는 것으로, 절단속도가 증가함에 따라 약간의 변화를 보이기는 하지만 미세한 치수의 변화이다. 절단 윗면의 폭(kerf)이 넓고 아래면의 폭이 좁아짐을 볼 수 있는데 이는 절단치수와도 관련이 되고, 절단 직각도와도 관련되지만, 가스절단이나 플라즈마 절단과 다르게 레이저 절단은 정밀절단이므로 본 실험조건에서는 거의 차이가 없었다.

Fig. 7은 절단속도의 증가에 따른 절단면의 표면을 보여주는 것으로, 절단속도가 증가함에 따라 절단면이 거칠어짐을 볼 수 있고, 드래그라인은 절단이 양호한 윗부분(upper)은 일정하게 수직선처럼 보이나 아래면(lower)은 절단이 이루어지기 전에 레이저 광선이 지나가면서 녹아 흘러내리기 때

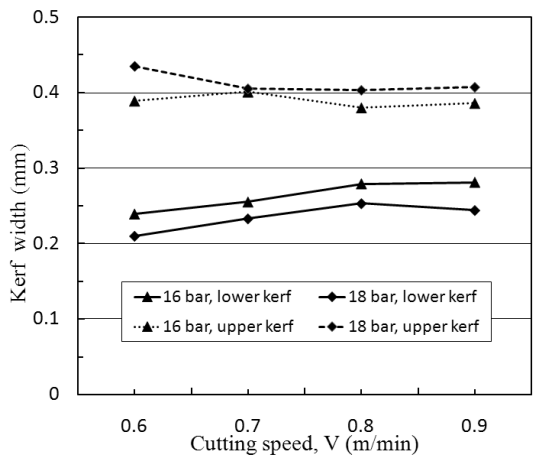
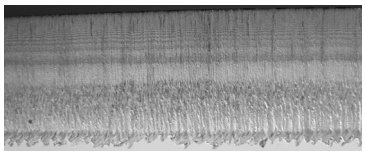
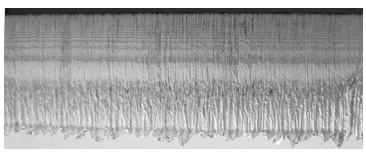


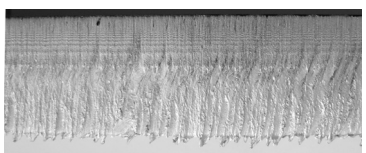
Fig. 6 The kerf width of upper and lower by laser cutting



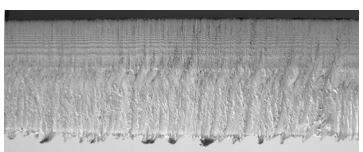
(a) Cutting speed 0.6m/min



(b) Cutting speed 0.7m/min



(c) Cutting speed 0.8m/min



(d) Cutting speed 0.9m/min

Fig. 7 The surfaces of cutting section at various cutting speed (t = 10mm)

문에 드래그라인 간격이 넓어지고 굴곡도 상당히 변하는 것을 볼 수 있다. 절단속도가 빨라짐((a) → (d))에 따라 드래그라인 간격도 넓어지고, 라인의 굴곡도 커질 뿐만 아니라 아래 절단면으로 갈수록 용융물의 유동상태나 점도변화에 따라 불규칙하게 움직이기 때문에 표면이 상당히 거칠어졌다.

4.2 Cutting speed 변화에 따른 표면거칠기 특성

양질의 절단면은 최소한 판의 아래면에 절단 슬래그가 부착되지 않고, 부착되는 경우라면 쉽게 탈락될 수 있어야 한다. Fig. 8은 양호한 절단표면 조건인 상태에서 압력의 변화에 따른 절단속도와 표면거칠기와의 관계를 보인것이다. 가스 압력의 변화나 절단속도의 변화에 표면거칠기는 거의 유사함을 보인다.

Fig. 9는 절단재료의 두께가 두꺼운 경우, 양호한 절단이 안되는 절단면의 아래 부분을 살펴보고자 하는 것이다. Fig. 8과 비교하여 보면 절단속도가 증가함에 따라 중심선 표면

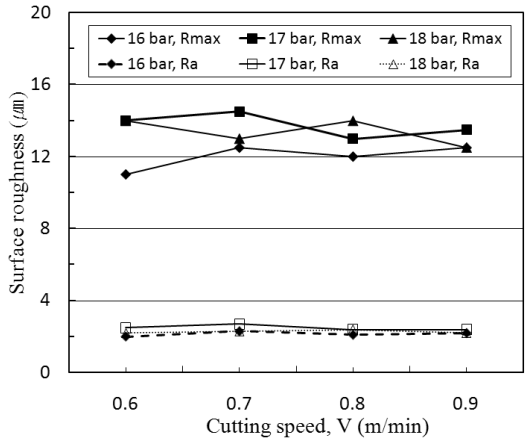


Fig. 8 The surface roughness(Ra, Rmax) and cutting speed with various pressure (A area in Fig. 4)

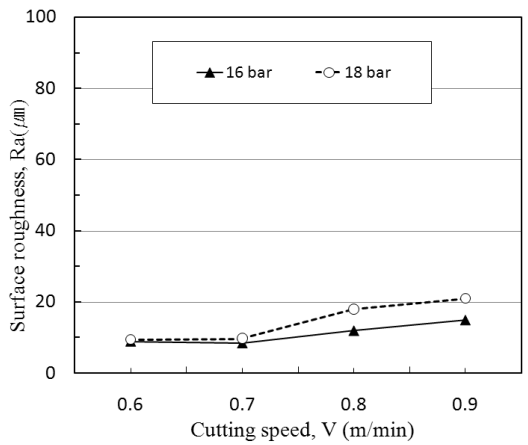


Fig. 9 The surface roughness Ra and cutting speed with various pressure (C area in Fig. 4)

거칠기(Ra)는 상당히 거칠어짐을 볼 수 있다. 이는 절단 재료가 두껍기 때문에 나타난 현상으로 신속한 가열과 높은 압력으로 절단된 용융된 소재가 바로 빠져 나가야 되는데 절단재료의 아래부분(C 부분)에서 용융된 소재가 녹아 퍼지면서 흘러내려 불규칙한 굴곡이 발생하였기 때문이다. 절단한계 두께가 8mm인 레이저 절단기에서 10mm를 절단할 경우의 조건으로 실험한 결과이기에 절단면의 상태와 거칠기 데이터를 분석하여 현장에서 절단할 때 기본적인 데이터로 제공할 수 있을 것이다.

Fig. 10은 절단 가스 압력의 변화에 따른 절단속도와 절단

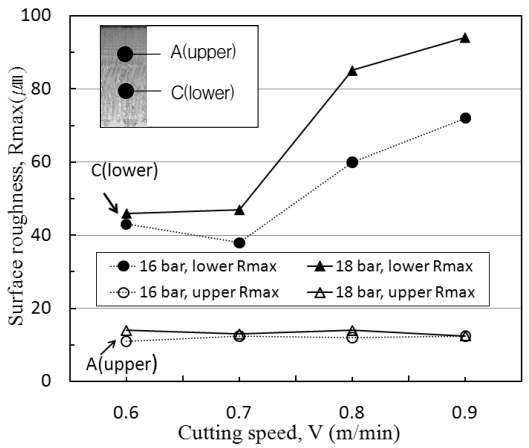


Fig. 10 The surface roughness(upper and lower) Rmax and cutting speed with various pressure (A, C area in Fig. 4)

표면거칠기가 양호한 면 A(upper), 표면거칠기가 거칠은 면 C(lower)의 최대높이 표면거칠기(Rmax)와의 관계를 보인 것이다. 양호한 조건이라 판단되는 부위(upper)의 최대높이 거칠기(Rmax)는 평균 13㎛ 정도로 절단속도의 변화에도 거의 일정하다. 그러나 거친면(lower)의 표면거칠기는 절단속도가 0.7m/min 이하에서는 거의 일정하지만, 0.7m/min 이상에서는 거친면(lower)의 표면거칠기는 급격하게 거칠어졌으며, 절단가스 압력이 높으면 더 거칠어졌다. 절단 표면, 절단폭, 표면거칠기 등을 종합하여 볼 때 절단속도가 0.7 m/min 근처가 가장 양호한 조건이었다. 생산현장에서 절단속도 및 압력을 선정할 때 참고자료가 될 것이다.

5. 결 론

선박의 경량화가 요구되면서 알루미늄 합금의 사용이 증가되고 있고, 정밀절단의 요청이 증대되고 있기에 현장에서 사용하는 범위의 압력과 절단 속도를 설정하여 절단조건의 변화에 따른 실험연구 결론은 다음과 같다.

(1) 절단의 시작부위인 A부위에서는 드래그라인이 일정하나 일정두께를 지나면서 절삭속도의 증가에 따라 드래그라인의 간격이 넓어지면서 굴곡이 심해지고, C부위에서는 압력에 의해 퍼지는 현상이 발생하여 표면에 굴곡이 생기며 표면거칠기는 거칠어진다.

(2) 플라즈마 절단과 유사하게 절단 윗면의 폭(kerf)이 넓고 아래면의 폭을 좁아지는 형태이지만, 레이저 절단이 훨씬 정밀하며 절단속도의 변화에 따른 절단폭의 치수는 거의 차이가 없다.

(3) 본 실험조건의 양호한 면(upper)의 최대 높이거칠기(Rmax)는 평균 13㎛로 일정하고, 거친면(lower)의 표면거칠기는 0.7m/min이하에서 45㎛로 거의 일정하지만, 절단속도 0.7m/min이상에서는 거친면(lower)의 표면거칠기는 급격하게 거칠어졌으며, 절단가스 압력이 높으면 더 거칠어졌다. 절단 표면, 절단폭, 표면거칠기 등을 종합하여 볼 때 절단속도가 0.7m/min 근처가 가장 양호한 조건이었다.

후 기

이 논문은 2009년도 대불대학교 교내연구비 지원에 의하여 씌어진 것임.

참 고 문 헌

(1) The Korean Welding and Joining Society, 1998, *Welding·Joining Handbook*, Republic of Korea, pp. 706~716.

(2) Kim, J. O., Jung, S. W., and Park, D. H., 1992, "A Study on the Gas Cutting and Cutting Quality," *Technical Hyundai, Hyundai Heavy Industries Co*., Vol. 12, No. 3, pp. 65~74.

(3) The Society of Naval Architects of Korea, 1998, "*Shipbuilding Engineering*," dong myeong sa, pp. 140~149.

(4) Lho, T. J. and Na, S. J., 1987, "Arc Efficiency and Kerf Width in Plasma Arc Cutting Process," *Journal of the Korean Welding Society*, Vol. 5, No. 1, pp. 23~33.

(5) Um, K. W. and Kim, D. J., 1991, "A Study on the Plasma Arc Cutting Phenomena of Plate Materials," *Journal of the Korean Welding Society*, Vol. 9, No. 4, pp. 69~74.

(6) TRUMPF, 1999, "*Technical information Laser processing*," pp. 2-4~2-5.

(7) Ahn, D. G., Byun, K. W., and Yoo, Y. T., 2007,

"Investigation into the Formation of the Cut Section for the Case of Cutting of Inconel 718 Sheet using CW Nd:YAG laser," *Proceedings of the KSMTE spring conference 2007*, pp. 113~118.

(8) Ahn, D. G. and Byun, K. W., 2008, "Investigation of Cutting Characteristics in the Sharp Corner for the Case of Cutting of Inconel 718 Super-alloy Sheet using High-power CW Nd:YAG Laser," *Journal of KWJS*, Vol. 26, No. 5, October, pp. 90~96.

(9) Lee, K. H. and Kim, K. C., 1996, "Process Optimization for the Laser Cutting of Cold Rolled STS Sheet," *Journal of KWS*, Vol. 14, No. 5, October, pp. 59~68.

(10) Kim, H. K., Yang, K. T., and Kim, H. J., 2007, "Fatigue Crack Propagation Behavior of Fine Grained Al-5083 Alloy Produced by Severe Plastic Deformation," *Journal of the KOSOS*, Vol. 22, No. 2, pp. 15~21.

(11) Han, M. S., Ko, S. C., Kim, S. H. Jang, S. K., and Kim, S. J., 2008, "Optimization of Corrosion Protection Potential for Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of 5083-H112 Alloy in Seawater," *METALS AND METERIALS International*, Vol. 14, No. 2, pp. 203~211.

(12) Kim, S. I., 2003, "A Study on the Cutting Surface Characteristics in CNC Gas Cutting of plate steel," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 12, No. 1, pp. 24~31.

(13) Kim, I. C. and Kim, S. I., 2003, "A Study on the Cutting Surfaces in CNC Plasma Cutting of high tensile steel plate," *Proceedings of the KSMTE spring conference*, pp. 149~154.