



CFD를 이용한 티타늄 박판 레이저 용접 퍼징장치의 성능예측에 관한 연구

진병주^a, 박민호^a, 윤태종^a, 김일수^{a*}, 박기영^b, 김용^b, 양해진^b**A Study on Performance Prediction of Purging Device using CFD
in Laser Welding of Titanium Sheet**Byeong-Ju Jin^a, Min-Ho Park^a, Tae-Jong Yun^a, Ill-Soo Kim^{a*}, Ki-Young Park^b,
Young Kim^b, Hae-Jin Yang^b^a Dept. of Mechanical Engineering, Mokpo National University,
1666, Yeongsan-ro, Chonggye-myeon, Muan, Jeonnam-do, 58579, Korea^b Institute for Advanced Engineering,
175-28, Goan-ro, 51 beon-gil, Baegam-myeon, Cheoin-gu, Yongin, Gyeonggi-do, 17180, Korea**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	19	August	2017
Revised	31	October	2017
Accepted	4	December	2017

*Keywords:*Laser welding
Purging device
Titanium sheet
Prediction of shielding gas performance
Lap joint
Computational fluid dynamic**ABSTRACT**

As titanium generally combines with oxygen at high temperatures to form a brittle region, the performance of a purging device for shielding welds in titanium welding is an important factor. Therefore, this study is focused on investigating the performance of a purging device. The nozzle length is changed using CFD (Computational Fluid Dynamics) to confirm the shielding performance of the purging device, and the shielding performance is predicted by the volume fraction of the shielding gas at laser beam focus. Next, the quality of the primary welding workpiece is checked. In addition, a hardness test and a tensile test are conducted to confirm the change in mechanical properties according to the nozzle length. A comparison of the calculated and measured results confirmed that a good weld can be obtained when the laser beam focus is more than 67% shielded in the lap-joint welding of a titanium thin plate.

1. 서론

산업구조물 및 제품의 구동환경이 점점 열악해지고 있으며, 이러한 구조물 및 제품의 안정성과 경량화를 위한 고강도 및 내식성의 특징을 갖춘 재료의 선정이 요구된다. 최근, 이러한 요구에 부응하는 재료로서 Ti 소재가 각광받고 있으며, 앞서 언급한 산업구조물 및 제품으로는 화력 발전소, 해양 및 해수담수화 플랜트, 판형열교환기, 열교환기의 튜브 경판, 압력용기 등에 주로 사용되어지고, 강도 및 중량비가 높아서 우주항공,

군사 분야 및 스포츠 및 의료기기 등에서도 이용이 증가되고 있는 추세이다^[1,2].

Ti의 내식성은 표면에 안정한 산화피막이 생겨서 부식을 방지하기 때문에 내식성이 매우 우수하지만, 600°C 이상의 고온에서는 반응성이 아주 좋아서 O₂, N₂, H₂ 등의 원소로 오염 되어 내식성을 저하시키거나 용착금속 내부에 기공(porosity) 등의 결함을 발생시키게 되어 내식성뿐만 아니라 기계적인 성질까지 저하된다^[3-5].

디스크 레이저 용접공정에서 Ti의 용접을 수행할 경우 보호

* Corresponding author. Tel.: +82-61-454-3455

Fax: +82-61-454-6376

E-mail address: ilsookim@mokpo.ac.kr (Ill-Soo Kim).

가스를 이용하여 대기와의 차폐를 하고 이러한 보호가스를 유입시켜주는 역할을 하는 장치를 퍼징장치(purging device)라고 한다. 그러나 퍼징장치의 잘못된 설계 및 운용으로 레이저 빔 초점에서 대기와의 차폐가 이루어지지 않고 불순 가스가 용접부에 잔류되어있으면 용접부의 산화 및 질화가 진행되므로 용접부에서 경화가 진행되어 용접 품질이 저하된다^{6,7)}. 이러한 문제점을 사전에 차단하기 위해 용접공정에서는 보호가스를 토출시키는 퍼징장치의 설계는 중요하지만 사전에 그 성능을 예측하기 어려운 단점이 있다. 그러므로 본 논문에서는 퍼징기의 보호가스 유체유동을 가시화하기 위해 현재 사용범위가 점차 확대되고 있는 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD)을 이용하여 계산하였다⁸⁻¹⁴⁾.

본 연구에서는 티타늄박판에서 CFD를 이용한 퍼징장치 성능을 예측하는 기초연구로 수행되었으며, 퍼징장치의 구성은 시험편 전면과 후면에서 보호가스 유입이 가능할 수 있도록 설계하였고, 설계된 장치를 3D모델링 후 격자를 생성하여 유동해석을 수행하였다. 수행된 유동해석 결과를 검증하기 위해 해석모델링과 동일한 조건에서 레이저 용접실험을 하여 검토하였다.

2. 수치해석 방법 및 용접 실험

2.1 CFD 해석법

본 연구에서 사용되는 퍼징장치는 전면과 후면에서 보호가스 유입하여 용접부를 차폐 할 수 있도록 구성하여 개념도를 Fig. 1에 나타내었다. 개념도를 토대로 모델링과 격자를 구성하고 유동해석을 수행하여 레이저 빔 초점에서 Ar의 volume fraction 분석결과를 통해 레이저 초점에서의 차폐 성능을 확인하였다¹⁵⁾.

Fig. 2는 디스크 레이저에 사용된 퍼징장치의 상·하부 노즐 유동장에 대하여 작성된 계산격자를 보이고 있다. Tetrahedral 비구조 격자로 생성하였으며, 노즐은 동일한 각도와 시작점으로 고정시키고 노즐의 길이를 160 mm, 135 mm, 110 mm, 95 mm인

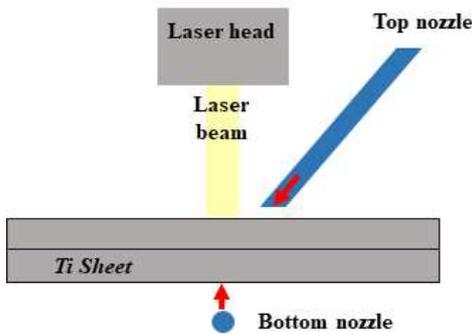


Fig. 1 Schematic of the purging device

4가지 종류의 모델에 대하여 계산격자를 구성하였다. Table 1은 CFD해석을 위한 노즐 길이 및 Ar 보호가스 유량에 따른 경계조건을 보이고 있으며, 보호가스 장치의 경계조건의 도식은 Fig. 3에 나타내었고 경계조건은 Table 2에 나타낸다. 해석설정은 -Z방향으로 중력가속도를 설정하였고 3차원 정상상태(steady state) 유동, 노즐에 투입 유체는 Ar, 대기 기체는 O₂로 설정하였으며,

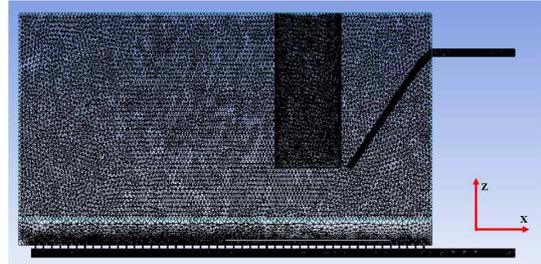


Fig. 2 Numerical grid of shielding gas system

Table 1 Test case parameter for CFD analysis

Case No.	Shielding gas (L/min)		Nozzle length (mm)
	Top	Bottom	
Case 1	30	10	160
Case 2			135
Case 3			110
Case 4			95

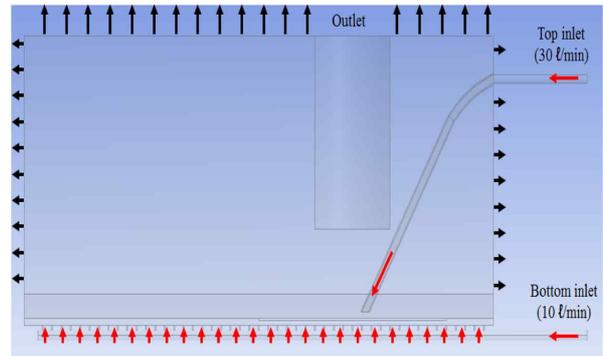


Fig. 3 Schematic diagram for boundary condition

Table 2 Boundary conditions of initial analysis

Analysis setting			
Boundary conditions	Fluid type		Argon
	Gravity	m/s ²	9.81
	Top inlet	L/min	30
	Bottom inlet		10
	Outlet	Pa	0
	Wall		No-slip

대기를 나타내는 표면 outlet은 opening 상태로 설정하여 대기상태와 유사하게 설정하였다. 두 노즐의 입구는 mass flow rate 조건으로 입력하였으며, 보호가스의 유량선정은 선행연구를 바탕으로 상부 보호가스 30 L/min, 하부 보호가스 유량 10 L/min으로 설정하였다.

수치해석을 위한 solver는 전산유체 상용해석틀인 ANSYS CFX를 이용하였고 해석 수행 전, 수치해석 결과의 계산격자 및 난류모델에 대한 의존성을 검토하기 위해 동일한 경계조건과 형상에서 격자크기를 4 mm, 8 mm, 16 mm, 32 mm로 변경하며 해석하였다. 해석결과 동일한 레이저 빔 초점에서 최대 보호가스의 체적비가 35%, 34%, 32%, 36%로 측정되었다. 격자의 크기에 따라 도출된 체적비와 해석 소요시간의 차이는 미비하고 격자의 크기가 커질수록 contour의 형상이 거칠어지므로, 본 연구에서 보다 정밀한 시뮬레이션 결과를 가시화하여 분석하기 위해서 격자의 크기는 4 mm의 격자를 선정하였다.

본 논문에서 해석하고자하는 유동장 영역의 난류모델 의존성을 확인하기 위해 격자 의존성 검사를 통해 선정된 4 mm 격자 크기로 k-ε model, k-ω model, k-ω SST model의 3개의 유동해석결과를 비교하였다. 그 결과, 각 난류모델에 따라 레이저 빔 초점영역에서 체적비가 35% 수준으로 동일하게 측정되어 각 모델에 따른 체적비 값과 해석시간의 차이는 크게 생기지 않아 k-ε model과 k-ω model의 혼합 모델인 k-ω SST model을 선정하여 추후, 노즐길이에 따른 CFD모델해석에 사용되는 난류모델은 SST model을 선정하였다.

2.2 용접실험장치 및 방법

퍼징 장치의 구성은 Fig. 4에 나타나있는 바와 같이, 상부 보호가스 노즐과 하부 보호가스 노즐로 구성된다. 시험편은 접치기 용접하였으며 용접하는 동안 퍼징장치는 시험편의 윗면과 밑면이 대기와 완전한 차폐된 환경을 조성시킨다.

이러한 퍼징장치를 통하여 앞서 해석한 레이저 초점에서의 보호가스의 체적비율 예측 모델에 대한 신뢰성 검증을 위해 계측을 통해 시험편에 잔류되어지는 대기와 보호가스의 체적비율을 측정하여야하나 실질적으로 대기와 보호가스의 체적비율은 계측의 어려움 때문에 체적비율을 측정하기에는 어려움이 있다. 그리하여 Fig. 5에 나타나있는 4개의 노즐을 이용하여 시뮬레이션 조건과 동일한 위치와 각도로 용접실험을 수행하여 레이저 용접 실험결과를 분석하였다. 분석방법으로는 용접부 표면 육안검사를 통해 비드표면에 유입된 불순가스의 정도를 확인하였고, 경도 측정 통해 용접부의 산화정도를 확인하여 시뮬레이션의 결과와 비교하였다.

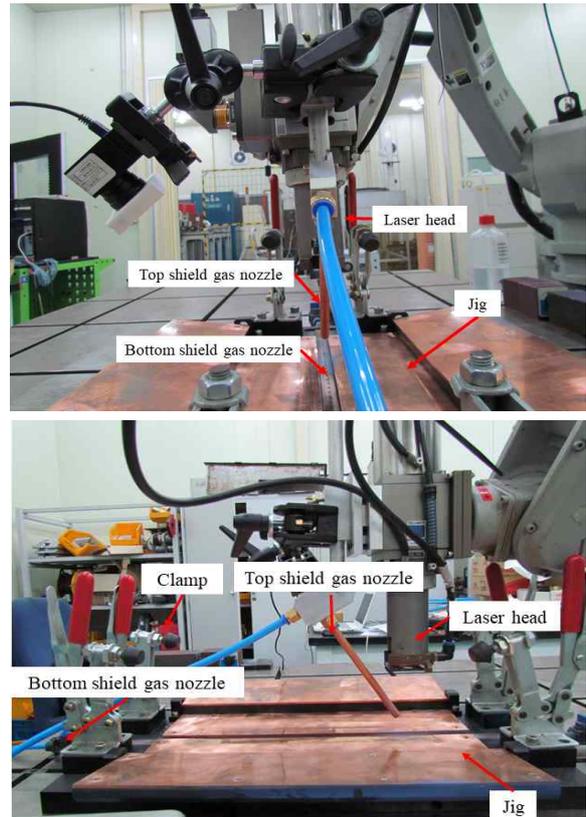


Fig. 4 Image of experimental setup



Fig. 5 Top nozzles with various lengths

3. 결과 및 고찰

3.1 CFD 해석 결과 분석

CFD 후처리 과정은 ANSYS의 CFD-POST툴을 사용하여 수행하였다. 용접부에 유입되는 보호가스의 체적비를 확인하기 위해서 Fig. 6에 나타나있는 바와 같이 용접시험편에 가해지는 보호가스의 체적비를 XZ평면에서 contour를 통해 확인하였다. 레이저 초점에서 산출되어지는 Ar의 최대 체적비는 Table 3에 나타난다. 여기서 체적비는 측정위치의 Ar의 부피율을 의미한다. 각 케이스

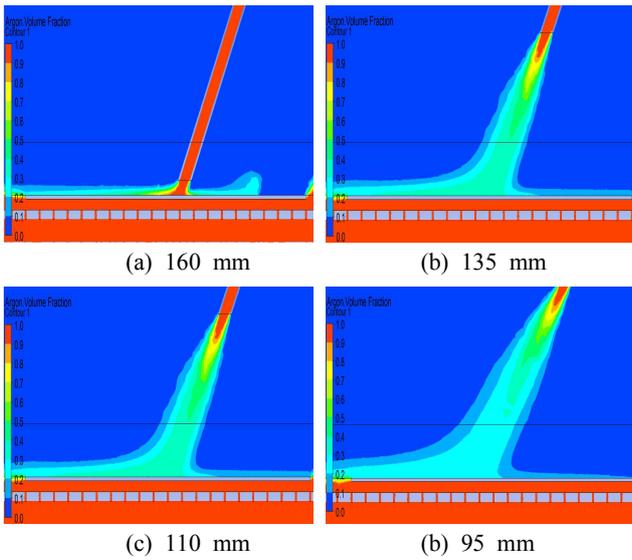


Fig. 6 Volume fraction contour by different nozzle distance

Table 3 Results of CFD analysis output for maximum volume fraction

Case No.	Maximum volume fraction (%)
Case 1	99
Case 2	62
Case 3	37
Case 4	35

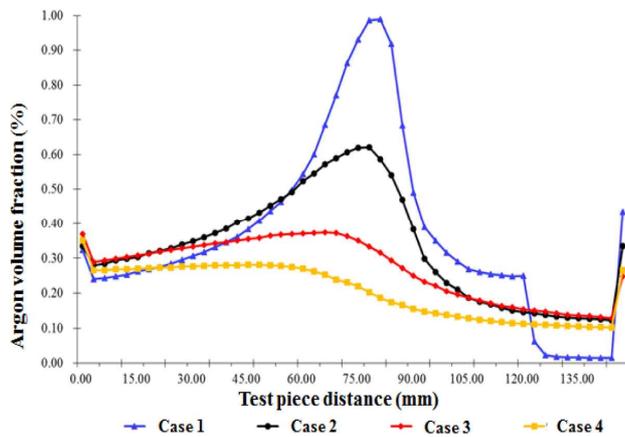


Fig. 7 Results of maximum volume fraction on test piece

별로 보호가스 Ar의 부피율이 99%, 62%, 37%, 35%로 측정되었다. 즉, 각 길이에 따라 1%, 38%, 63%, 65% 레이저 빔 초점 영역에서 대기가 잔류되는 것을 확인하였다. 레이저 빔이 이동되어지는 용접이송방향과 위치를 기준으로 시편의 시작점부터 끝점까지 보호가스의 체적비율을 검출하였고 그 결과를 Fig. 7 그래프로 나타내었다. 그래프를 통해 노즐의 길이에 따라 용접 시험편 윗면에 존재하는 불순가스의 변화를 확인 할 수 있었다. 노즐의 길이가 160

Table 4 Results of disk laser welding for bead surface

Case No.	Inspection of bead surface		Color of bead
	Top	Back	
Case 1			Silver white
			Silver white
Case 2			Gold
			Silver white
Case 3			Dark grey
			Silver white
Case 4			White
			Silver white

mm일 때 99%의 차폐가 이루어지고 동일한 조건에서 용접을 실험할 경우 용접시험편에서 산화가 거의 발생되지 않을 것으로 예상된다.

3.2 용접실험 결과 분석

3.2.1 용접비드 표면 육안검사

Ti의 경우 850°C 이하까지는 대기에 의한 산화속도가 그다지 크지 않으나 850°C내지 900°C의 범위에서는 산화속도가 급격히 증가되고 그 이상의 온도가 되면 국부적으로 산화되어 입상의 산화 피막이 형성하게 되어 Ti의 내식성이나 기계적 성질에 크게 손상을 주게 된다. 가열온도의 상승과 동시에 금색, 주홍색, 청색 등의 순서로 표면비드의 색이 변함을 알 수 있다. 그리고 그 이상의 고온으로 가열되면 금속광택이 없는 청색, 회색, 백색 또는 황백색으로 변하게 되는데, 일반적으로 금속광택이 없어진 청백색부터 불건전한 표면비드로 판단한다^[3].

노즐 길이에 따라 레이저 용접을 수행하여 용접비드의 표면의 색상은 측정하였고 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 육안검사를 통해 시편의 표면과 후면비드를 확인한 결과, Case 1에서의 전면 및 후면비드는 은백색으로 나타내어 가장 건전한 용접부를 획득하였고 Case 2는 전면비드는 금색 후면비드에서 은백색을 나타내었다. 그러나 Case 3에서는 전면비드는 흑백색, 후면비드는 은백색, Case 4에서는 전면비드는 백색, 후면비드에서는 은백색으로 전반적으로 전면비드에서 산화층이 두텁게 형성된 것을 확인할 수 있었다.

전산유체해석 결과와 용접실험 결과를 비교·분석하였을 때 시뮬레이션 결과에서 보호가스의 체적비율이 높을수록 불순가스의 차폐가 이루어 용접실험결과와 비드표면에 색상을 통해 확인하였다. 보호가스의 체적비율이 99%로 확인된 Case 1에서 표면비드 색상이 은백색으로 검출되어 가장 양호한 용접부를 확보하였고 해석상에서 보호가스 체적비율이 62%나오는 Case 2까지 양호한 용접부를 확보할 수 있었다. 그러나 보호가스의 체적비율이 37% 이하가 되면 표면비드에서 산화 및 질화가 두텁게 형성되는 것을 Case 3, Case 4를 통해 확인할 수 있었다.

3.2.2 용접부 경도 시험

디스크 레이저 용접으로 인한 강도저하 또는 상승으로 인한 영향을 비교·분석하기 위하여 용접공정 변수의 변화에 따라 용접을 수행한 시험편의 일부를 절단(2 mm×2 mm) 하여 경도시험을 실시하였다. Wire cutting으로 절단된 시편은 모재부, 용융부, 열영향부를 포함하고 있으므로 이를 확인하기 위해 비커스경도계

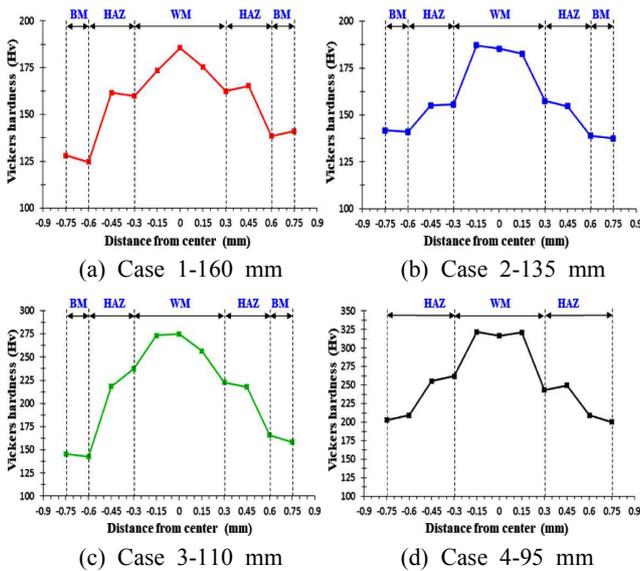


Fig. 8 Hardness distribution by different nozzle length

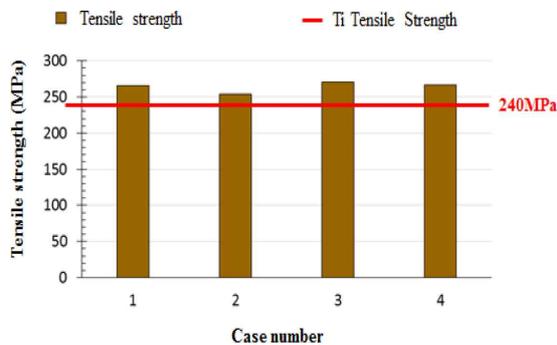


Fig. 9 Tensile strength of test pieces result according to nozzle length

(Shimadzu 社)를 사용하여 관측지점에서 경도를 측정하였다. 이 때 사용된 하중은 0.1 N이었으며, 제어변수에 따른 용접부의 경도 특성을 비교하기 위해 시험편 중앙으로부터 0.15 mm 간격으로 측정하였다. Fig. 8 그래프에 나타난바와 같이 Ti에서는 일반적으로 용접부에서 경도 값이 가장 크고 열영향부, 모재로 경도 값이 낮아지는 경향이 나타나는 것을 확인하였다. Case 1, Case 2에서는 충분한 차폐가 이루어져 용접부의 불순가스의 함유량에 0%에 가까워 건전한 용접부에서 얻을 수 있는 경도 값인 170-190 Hv로 측정되었고 Case 3, Case 4에서는 산화에 대한 영향으로 경화도가 증가하여 용접부에서 경도 값이 270-320 Hv로 측정되었다.

3.2.3 인장 시험

인장시험 결과 노즐의 길이에 상관없이 모든 시험결과에서 모재의 인장강도 이상의 값이 도출되었음을 시험을 통해 확인하였고 인장시험 결과를 Fig. 9에 그래프로 나타내었다. 티타늄 박판의 겹치기 용접에서는 용접부의 경화에 따라 인장강도의 차이가 거의 발생되지 않음을 확인 할 수 있어 다른 주요 용접공정 변수인 레이저 출력과 이송속도가 동일할 경우 불순가스가 용접부에 영향을 미치더라도 인장강도에 영향은 미비한 것으로 판단 할 수 있었다.

4. 결론

디스크 레이저를 이용하여 티타늄 박판을 겹치기 용접시 레이저 초점에서 발생하는 온도로 인해 고온에서 대기와 반응성이 높아지는 Ti의 특성은 용접부의 품질저하의 원인이 된다. 본 논문에서는 전산유체역학을 선행하여 퍼징기의 차폐성능을 예측하고 동일한 조건에서 용접실험을 하여 결과물들을 비교하여 검증하고자 하였다. 그 결과, 용접시험편과 노즐간의 거리가 멀어질수록 시험편에 가해지는 체적비율이 감소하는 것을 contour를 통해 확인하였고, 노즐길이 변화에 따른 체적비율을 확인하기 위해 레이저 용접이 수행되는 용접방향으로 시편의 시작점부터 끝점까지의 체적비율을 구하였다.

그 결과, 레이저 초점영역에서 용접부에 미치는 보호가스의 체적비율이 각각 99%, 62%, 37%, 35%으로 확인하였다. 또한, 대기와의 차폐에 따른 용접품질의 변화를 확인하기 위해 해석과 동일한 조건으로 디스크 레이저 용접 실험을 수행하였다. 용접실험 수행 후, 육안검사를 통해 용접부의 상태를 일차적으로 확인하였으며, 그 결과 해석상에서 62% 이상의 보호가스 체적비율이 레이저 빔 초점위치의 용접부에 잔류하게 되면, 산화 및 질화가 방지되었음을 확인하였다. 그러나 해석상에서 보호가스의 체적비율이 37% 이하

에서는 산화 및 질화가 발생되어 37~62% 사이의 세부적인 연구가 필요하다고 사료된다. 끝으로, 보호가스 체적비율에 따라 기계적 성질에 끼치는 영향을 확인하기 위해 인장강도시험과 경도 시험을 수행하였으며, 그 결과 용접부에서 산화 및 질화의 발생은 인장강도에는 영향이 없지만 경도 값은 상승함을 확인하였다.

본 연구의 결과는 노즐의 형상을 변화시켜도 레이저 빔의 초점에서 해석상에서 62% 이상의 보호가스 체적비율이 용접부에 잔류하게 되면 용접공정시 용접부에서 대기와 차폐가 이루어져 건전한 용접부를 획득할 수 있는 것으로 판단된다. 또한, 본 연구는 통해 Ti 소재를 사용한 디스크 레이저 용접공정시 효율적인 차폐방안에 대해 기초 연구 결과로 활용될 것으로 사료된다. 추후, 본 연구에서 제안된 체적비율 외의 범위에서 보호가스 체적비율이 용접부에 미치는 영향을 고려한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1D1A3A01020246).

References

- [1] Kearns, W. H., Weisman, C., 1982, *Welding Handbook: Metals & Their Weldability*, American Welding Society.
- [2] Progress, M., 1977, *Data Book*, PennWell, Japan.
- [3] Leyens C., Peters, M., 2003, *Titanium and Titanium Alloys : Fundamentals and Applications*, John Wiley & Sons, Germany.
- [4] Lee, Y. T., Lee, T. H., 2006, *Titanium Processing Technology*, Korea Metal Journal.
- [5] Korean Welding Society, 1998, *Weld Joint Handbook*, 278-287.
- [6] Casalino, G., Mortello, M., Campanelli, S. L., 2015, Ytterbium Fiber Laser Welding of Ti-6Al-4V Alloy, *Journal of Manufacturing Processes*, 20 250-256.
- [7] Schneider, A., Gumenyuk, A., Lammers, M., Malletschek, A., Rethmeier, M., 2014, Laser Beam Welding of Thick Titanium Sheets in the Field of Marine Technology, *Physics Procedia* 56 582-590.
- [8] Mazumdar, D., Roderick, I. G., 1995, The Physical and Mathematical Modelling of Gas Stirred Ladle Systems, *ISIJ International*, 35:1 1-20.
- [9] ANSYS Inc., 2016, *ANSYS CFX Manual*, ANSYS Inc..
- [10] Gatzen, M., Tang, Z., 2010, CFD-Based Model for Melt Flow in Laser Beam Welding of Aluminium With Coaxial Magnetic Field. *Physics Procedia*, 5 317-326.
- [11] Tani, G., Ascari, A., Campana, G., Fortunato, A., 2007, A Study on Shielding Gas Contamination in Laser Welding of Non-Ferrous Alloys, *Applied Surface Science*, 254:4 904-907.
- [12] Yi, C. S., Yun, H. J., Song, C. K., Suh, J. S., 2011, A Study on Design of High Pressure Injection Nozzle for Avoiding Chip Curling, *Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 20:6 793-798.
- [13] An, I. Y., Lee, Y. L., Jo, W. S., Kim, J. H., 2012, A Study on Development of High Efficiency Toilets With VOF Numerical Analysis, *Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 21:6 946-953.
- [14] Jin, B. J., Park, M. H., Yoon, T. J., Kim, Y. J., Kang, B. Y., Shim, J. Y., Kim, I. S., 2017, Optimization of Classifier Operation Conditions Using Taguchi Method and Multiphase Flow Analysis, *Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 26:3 278-284.
- [15] Lee, J. Y., Kim, I. S., Choi, Y. D., 2012, A Study on the Optimum Tandem Welding Torch Distance for the Reduction of CO₂ Shielding Gas Consumption, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering* 36:2 294-301.