인코넬 713C 합금의 레이저 용접성 평가

강 민 정^{*,**} · 김 철 희^{*} · 김 영 민^{*,†}

^{*}한국생산기술연구원 용접접합그룹

^{**}서울대학교 재료공학부

Evaluation of the Laser Weldability of Inconel 713C alloy

Minjung Kang^{*,**}, Cheolhee Kim^{*} and Young-Min Kim^{*,†}

^{*}Joining R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 21999, Korea

^{**}Dept. of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

[†]Corresponding author : ymkim77@kitech.re.kr

(Received September 27, 2016 ; Revised October 19, 2016 ; Accepted November 8, 2016)

Abstract

During welding of Ni based superalloy, hot cracking was usually happen in the fusion zone of a weld. In this study, the laser weldability of Inconel 713C alloy for the turbocharger wastegate valve (WGV) was evaluated with various welding conditions, such as laser power, welding speed, shielding gas. Welding conditions were optimized by bead-on-plate (BOP) and butt joint welding. For the evaluation of laser weldability, bead shapes and weld microstructures were investigated and tensile test was conducted. The fracture surfaces were investigated for the understanding the cause of the fracture.

Key Words : Laser welding, Inconel 713C alloy, Hot cracking, Solidification cracking

1. 서 론

세계적으로 유해가스 및 온실가스 배출에 대한 환경 규제가 강화되면서 유해 가스 배출을 줄이려는 노력이 많은 산업 분야에서 이루어지고 있다. 특히 자동차 산업에서는 터보차저를 이용한 연비향상 및 이산화탄소 배출을 줄이려 하고 있다¹⁻³⁾. 터보차저란 내연기관에서 필연적으로 발생하는 엔진의 배출가스 압력을 이용해 터빈을 돌린 후, 이 회전력을 이용해 흡입하는 공기를 대기압보다 강한 압력으로 밀어 넣어 출력을 높이기 위한 기관이다. 자동차 터보 차저 제품의 경우, 고내열성, 고내구성 및 동시에 경량화가 요구됨에 따라 니켈계나 알루미늄계의 특수 내열합금을 적용하고 있다. 특히 가솔린 터보차저의 핵심 부품 가운데 하나인 웨이트 게이트 밸브는 내열주강(SCH22 계열)에서 Inconel 713C 등의 초경도 합금으로 대체하려고 한다⁴⁾.

니켈계 합금 중 하나인 인코넬 합금은 용접 시 Laves phase, NbC carbide 등이 생기며, 이로 인하여 고온 균열 감수성이 높다고 알려져 있는 금속이다⁵⁻¹⁰⁾. 때문에 인코넬 합금을 이용한 제품 제작 시, 고온균열 방지를 위해 저입열 공정인 레이저 빔 용접을 사용하여 제품을 제작하려고 시도하고 있다.

본 연구에서는 레이저 출력, 용접속도, 보호가스 등의 용접변수에 따른 인코넬 713C 합금의 레이저 용접성을 평가하고자 하였다. 터보 차저 제품 적용을 고려하여 모재대비 60~80 %의 부분용입 조건에서 10 kN 이상의 용접부 하중을 확보하는 것을 목적으로 하였다. 비드온 플레이트(bead-on-plate, BOP)용접을 수행하여 기초실험을 실시하였으며, 맞대기 레이저 용접을 통해 최종 용접조건을 확보하였다. 제작된 시험편을 대상으로 파단하중을 평가하였으며, 용접부 단면 및 조직분석을 통해 균열의 원인을 분석하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 실험조건

본 연구에서 적용한 인코넬 713C 합금의 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다. 용접에 사용한 시험편은 300 mm × 900 mm × 3 mm 이다.

최대출력 4kW의 Yb:YAG 디스크레이저를 열원으로 사용하였으며, 빔은 초점거리 220 mm에서 0.22 mm의 빔 직경을 가지는 광학계를 통해 시험편으로 조사되었다. 시험편은 BOP와 맞대기 이음형상으로 제작되었으며, 변수로 레이저 출력, 용접속도, 초점위치, 보호가스, 이음부 갭을 선정하였다. 인장시험편의 폭은 ASTM E8-standard에 의거하여 12.5 mm로 가공하였다. 인장시험은 5 mm/min의 속도로 시험편이 파단될 때 까지 하중을 인가하여 파단하중을 측정하였다. 용접부 균열 및 미세조직 관찰을 위해 용접시험편의 계면을 광학현미경과 SEM을 이용하여 관찰하였다. 단면 관찰은 표면을 1 μ m까지 연마한 후, 에칭액(90%의 HCl과 10%의 H₂O₂)을 사용하여 에칭하고 진행하였다.

3. 실험결과

3.1 BOP 레이저 용접

변수가 미치는 영향을 파악하기 위해 BOP 용접을 수행하였다. Table 2에 BOP 용접에서 채택한 레이저 용접변수를 나타내었다. 레이저 출력을 3 kW와 4 kW

Table 1 Chemical composition of used material (wt.%)

Inconel 713C	Cr	Al	Ti	Nb	W
	12.89	6.05	0.98	2.43	0.27
	Co	Mn	Zr	N	Ni
	0.31	0.02	0.06	0.014	Bal.

Table 2 Welding condition for bead on plate welding

No	Laser power (kW)	Welding speed (m/min)	Focal position (mm)	Shielding gas
1	3	6	0	N ₂
2	3	6.5	0	N ₂
3	3	4.5	-2	N ₂
4	3	5	-2	N ₂
5	4	7.5	0	N ₂
6	4	9	0	N ₂
7	3	6	0	without
8	3	6	0	Ar

를 선정하였으며, 용접속도는 출력에 따라 4.5 m/min 부터 9 m/min까지 변경 적용하였다. 초점위치는 0 mm 와 2 mm, 보호가스는 N₂, Ar, 가스공급을 하지 않는 경우 등으로 바꾸어가며 용접을 수행하였다.

실험에 적용한 인코넬과 같은 내열합금은 고온강도를 높일 목적으로 Al, Ti, Nb 등의 함유량을 점점 증가시키고 있기 때문에 고온균열 감수성이 현저하게 증가하게 된다. 응고균열, 열영향부 입계균열 외에 후열처리 시 발생하는 변형시효 균열 등이 존재할 수 있다고 알려져 있기 때문에 비드외관 및 단면을 확인하였다.

비드외관 검사 결과 모든 조건에서 Fig. 1과 같이 표면균열은 확인되지 않았다. 용접속도가 증가함에 따라 입열이 감소하기 때문에 비드 폭은 감소하는 결과가 나타났다. 초점거리를 증가시킨 경우에는 입열량이 증가하였음에도 용입깊이가 감소하고 비드 폭이 증가하는 결과가 나타났다. 이것은 0.22 mm이었던 빔직경이 초점위치 변화에 따라 0.41 mm까지 증가하였기 때문이다. 4 kW의 출력을 적용하는 경우(용접조건 5, 6) 비드 주변으로 스패터가 다량 부착되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 과도한 출력으로 인해 금속이 비등점 이상으로 급격히 가열되면서 나타난 현상으로 판단된다. 보호가스를 적용하지 않은 경우에도 표면비드가

Fig. 1 Front bead appearance of BOP laser weldments

No	Penetration depth	Section image
1	2.55 mm (84.8 %)
2	2.31 mm (77.0 %)
3	1.93 mm (64.2 %)
4	1.36 mm (45.5 %)
5	> 3 mm (pull pen.)
6	2.05 mm (68.5 %)
7	2.45 mm (81.8 %)
8	2.58 mm (86.1 %)

Fig. 2 Macro-section images and measured penetration depth depend on BOP welding conditions

산화되지 않아 인코넬 합금의 레이저 용접에서 보호가스는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

각 용접조건 별 용입깊이는 Fig. 2와 같다. 실험 결과, 2, 3, 6번 조건에서 모재 두께 대비 60~80%의 용입달성이 가능하였다. 그러나 조건 6의 경우 용접 중 스파터가 다량 발생되었기 때문에 적합하지 않은 것으로 판단하였다. BOP 시험편의 단면을 고배율에서 관찰하고 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 용접부를 관통하는 종방향의 균열은 확인되지 않았으나, 노란 화살표로 나타난 바와 같이 용융부의 하부에서 횡방향으로의 균열 및 기공이 확인되었다.

인코넬 713C는 약 6 wt%의 Al을 포함하고 있는데 용접입열에 의하여 이와 같은 비등점이 낮은 금속이 기화되면서 용접부 내부에 기공이 형성되었을 것으로 예측된다. 그러나 단면분석 결과 기공보다 균열의 발생빈도가 높은 것으로 나타났다. 참고문헌 등에서 균열이

Fig. 3 High magnification images of laser welds. Yellow arrows indicated the defects as like porosity and crack. (a: No. 6 specimen (4 kW laser power, 9 m/min welding speed with N₂ shielding gas), b: No. 8 specimen (3 kW laser power, 6 m/min welding speed with Ar shielding gas))

응고 직후 용접부의 자기수축 및 외부구속 등에 의해 발생할 수 있다고 언급되고 있다⁸⁾. Fig. 3 (a)와 같이 주조조직의 경계를 따라 전파되는 균열이 다수 확인되었는데, 이것은 결정립계가 자기수축 및 외부구속으로 야기되는 변형과 균열에 민감함을 의미한다.

3.2 맞대기 레이저 용접

균열 감수성 지수 (RPF : $m_L = (1 - 1/k)$)를 통해 응고온도 범위가 작을수록, 고액계면에서의 조성적 분균일이 작을수록 균열이 적을 것을 예측할 수 있다. 특히 합금원소와 불순물 원소들의 함량이 높을수록 응고 온도 범위($T_L - T_S$)가 증가하기 때문에 고온균열 감수성에 악영향을 미친다고 알려져 있다⁸⁾. 인코넬 합금에도 Ti, Nb 등의 원소들이 포함되어 있기 때문에 균열이 쉽게 발생되었다고 판단하여 BOP 용접보다 낮은 출력과 용접속도를 채택하였다. 맞대기 용접실험조건을 Table 3에 나타내었다. 맞대기 용접 조건은 BOP 용접 조건에서 60~80% 용입을 만족하는 조건의 입열을 계산하여 기준으로 채택하였다. 레이저 출력은 2.5 kW로 고정시켰으며, 용접속도는 5.5~6.5 m/min, 이음부 겹은 0, 0.05 mm로 변화시켰었다. 앞선 BOP실험을 통해 보호가스의 영향이 없는 것을 확인하였기 때문에, 보호

Table 3 Welding condition for butt joint laser welding

No	Laser power (kW)	Welding speed (m/min)	Gap (mm)	Shielding gas
9	2.5	5.5	0	N ₂
10		6.0	0	
11		6.5	0	
12		6.0	0.05	
13		7.0	0.05	

No	Bead appearance	Section image	Penetration depth
9			2.63 mm (90.9%)
10			2.08 mm (71.8%)
11			1.97 mm (68.2%)
12			2.89 mm (pull pene.)
13			2.46 mm (85.1%)

Fig. 4 Front bead appearances, Macro -section images and measured penetration depth depend on butt joint laser welding conditions

가스는 고정하여 진행하였다.

맞대기 레이저 용접을 수행 후 비드 외관을 Fig. 4에 나타내었다. 비드외관 검사 결과 BOP 결과와 마찬가지로 표면균열은 확인되지 않았으나, 갭이 형성되어 있던 조건에서는 용융풀의 손실로 인한 결함인 언더필이 확인되었다. 동일 입열조건(10, 12번)에서 갭이 있는 경우 용입이 더 깊게 형성되었다. 각 조건별 용입 깊이는 Fig. 5에 나타낸 바와 같다. 맞대기 용접조건 중 10과 11번 조건에서 모재 두께 대비 60~80 %의 용입 깊이를 얻을 수 있었다.

단면을 SEM을 활용하여 Fig. 4에 나타낸 붉은색 테두리 안을 관찰하고 Fig. 5에 나타내었다. 속도가 낮은 9번 조건의 경우 종방향의 중심부 균열이 발생한 것을 확인하였으나, 맞대기 레이저 용접부의 주된 균열은 BOP 용접부와 마찬가지로 횡방향으로 형성된 균열이었다. BOP 용접과 마찬가지로 주조조직의 경계를 따라서 전파되는 균열이 확인되었는데, 균열이 용접부를 넘어 부재 조직으로까지 연장되는 경우 또한 존재하였다. 균열이 파단강도에 미치는 영향이 크기 때문에 인코넬 모재의 결정립을 미세하게 형성시키는 경우, 균열 전파 기구를 복잡하게 만들 수 있어서 균열 형성 및 전파로 인한 강도저하 방지에 유리할 것으로 판단된다.

Fig. 6은 용융부 중심을 SEM을 활용하여 관찰한 것

Fig. 5 SEM images of butt joint laser weldment with various welding conditions

Fig. 6 SEM images of fusion zone with various welding conditions (a: 5.5 m/min welding speed; b: 6 m/min welding speed; c: 6.5 m/min welding speed)

이다. 그림에서 보듯이 용접속도가 빨라짐에 따라 용융부 중심선은 직선에 가까워지고, 수직상 조직 사이의 석출물의 크기는 작아지며 분산도는 커진다. 속도가 빨라짐에 따라 낮은 용융점을 가진 합금이 이동할 수 있는 여유가 없기 때문으로 판단된다.

Table 4 Failure load with various welding conditions

No	Failure load (N)
9	30,348
10	24,879
11	19,836
12	30,091
13	30,531

인장실험을 실시하고 결과를 Table 4에 나타내었다. 파단은 모든 경우에서 용융부에서 발생하였으며, 내부 균열이 존재함에도 불구하고 목표인 10 kN보다 높은 하중을 획득할 수 있었다. 입열의 증가로 용입 깊이가 깊어지면 하중이 높게 측정되었으나, 모재의 60~80% 두께까지 용입된 시험편의 평균 하중은 22,357 N으로 측정되었다.

파단이 용접부에서 발생되었기 때문에 파단면 분석을 실시하였다. 용접조건 10번과 11번 시험편을 대상으로 SEM을 통해 파단면을 분석하고 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 파단면은 전형적인 취성파단의 형태를 취하고 있었으며, 파단면에 상당히 많은 균열이 형성되어 있었다. 용접속도가 느린(10번 시험편) 조건보다 상대적으로 용접속도가 빠른(11번 시험편) 조건에서 파단면 상 균열이 적었으나, 파단면의 거칠기는 용접속도가 낮은

Fig. 7 SEM images of fracture surface depend on welding speed **Fig. 8** Elements mapping of crack into the fusion zone by using SEM-EDS

경우에서 보다 거칠게 나타났다. 파단면을 확대해서 살펴본 결과 주상정 조직으로 구성되어 있는 클리프가 확인되며, 일부 영역에서는 벽개파단면이 확인되기도 하였다. 그러나 SEM-EDS를 통해 살펴본 결과, Fig. 8과 같이 특정 원소의 편석은 확인되지 않아 Inconel 용접 시 생성되기 쉬운 Laves phase나 NbC 등의 카바이드 형성에 의한 균열은 아닌 것으로 확인되었다.

인코넬을 대상으로 레이저 용접을 적용하여 목표로 하였던 12 kN 이상의 파단하중을 확보할 수 있었다. 그러나 균열이 강도에 미치는 영향이 지대한 만큼 균열의 형성 및 파단거동에 대해서 추가적인 연구 및 고찰이 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

인코넬 713C 합금의 맞대기 용접부의 용접변수에 따른 레이저 용접성을 비교한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 레이저 출력 2.5 kW, 용접속도 6.0~6.5 m/min, 보호가스 N_2 적용시 모재두께 대비 60~80% 용입 깊이를 얻을 수 있었다.
- 2) 레이저 용접부 내부의 균열은 종방향의 균열보다 횡방향 균열이 주로 관찰되었다. 균열 주변에서 특정성분의 집중은 확인되지 않았으며, 레이저 용접의 특징인 빠른 용접속도로 인해 확산시간이 짧아 수지상 조직 사이의 석출물의 크기가 작고 분산되어 있었다.
- 3) 용접부 인장하중은 내부균열이 존재함에도 불구하고 모든 조건에서 목표하중을 넘었으며 용입깊이가 모재두께의 60~80% 조건에서 22 kN이상의 하중이 측정되었다.

- 4) 용접부 파단면은 전형적인 취성파단의 형태를 취

하고 있으며, 주상정 조직으로 구성되어 있는 클리프가 파단부를 구성하고 있음을 확인하였다.

References

1. J. W. Chung, N. H. Kim, C. H. Lim and K. Y. Kim, Development of an EGR Model for a WGT Diesel Engine, *KSAE Annual Conference Proceedings*, (2014), 276-277,
2. J. Y. Huh, J. E. Chung, Y. W. Jin, W. Kang and J. W. Chung, Coordinated Control of EGR and VGT in the Diesel Engine, *Transactions of KSAE*, 16 (4) (2008), 159-164
3. D. J. Park, C. H. Kim and Y. B. Lee, A Study on the Characteristics of Oil-free Turbocharger for Diesel Engine Vehicles, *Transactions of KSAE*, 16 (4) (2008), 47-55
4. B. G. Park, S. W. Park, D. K. Park, S. Y. Kim, J. O. Jeong and J. K. Jang, Metal Injection Molding Analysis of WGV Head in a Turbo Charger of Gasoline Automobile, *Transactions of KSAE*, 23 (4) (2015), 388-395
5. W.A. Baeslack III, S.L. West and T.J. Kelly, Weld Cracking in Ta-Modified Cast Inconel 718, *Scripta Metall.* 22 (1988) 729-734
6. N.L. Richards, X. Huang and M.C. Chaturvedi, Heat Affected Zone Cracking in Cast Inconel 718, *Mater. Charact.* 28 (1992) 179-187
7. I.S. Woo and K. Nishimoto, Metallurgical Factors Contributing to HAZ Cracking Susceptibility in Cast Alloy 718 Welds and Its Improvement by Cerium Addition, *Met. Mater. Int.* 7 (2001) 241-249
8. Welding and Joining Handbook, Vol. 1, *Korean Welding and Joining Society*, (2008), 35-41 (in Korean)
9. B- I. Yang, J- T. Kim, K- S. Park, Y- B. Shin, Y- S. Ahn, H- S. Park, Hot cracking behavior in inconel 690 overlay welds on Mn-Ni-Cr-Mo steel for pressure vessels, *Journal of KWS*, 20 (2), (2002), 82-89 (in Korean)
10. B- I. Yang, B- H. Chi, J- T. Kim, K- S. Park, H- S. Choi, H- S. Park, The influence of chemical compositions of weld metal and welding conditions on hot cracking by hot cracking test, *Journal of KWS*, 20 (3), (2002), 74-83 (in Korean)