

Dual Fuel 엔진용 이중관 벨로우즈 제작 공정의 최적화에 관한 연구Ⅱ

- 용접공정의 최적화 -

김평수¹ · 김종도[†] · 송무근²

(Received April 14, 2016 ; Revised May 13, 2016 ; Accepted June 21, 2016)

A study on the optimization of manufacturing processes of double wall bellows for dual fuel engineⅡ

- Optimization of welding process -

Pyung-Su Kim¹ · Jong-Do Kim[†] · Moo-Keun Song²

요약: 이중관 벨로우즈는 우수한 성형성과 내식성을 고려하여 오스테나이트계 스테인리스강인 STS 316L 소재를 사용하여 2겹으로 내부 및 외부 벨로우즈를 각각 제작한 후 다양한 조건과 용접 방법을 적용하여 이중관 벨로우즈를 제작한다. 하지만 제품의 성형 또는 사용시 균열이나 파단에 가장 취약한 부분이 용접부이기 때문에 제품의 신뢰성을 획득하기 위하여 각각의 용접부에 대한 미세조직을 관찰하여 결함 발생 여부를 측정해야 한다. 본 연구에서는 다양한 용접 공정을 거쳐 제작된 벨로우즈의 용접부를 검사하고 미세조직을 분석하여 최적의 용접 조건을 도출하였다. 또한 용접부의 경도 측정을 통해 모재와 용접부 그리고 열영향부 등 용접영역의 기계적 특성을 평가하였다.

주제어: 이중관 벨로우즈, 용접부, 미세조직, 기계적 특성

Abstract: Production processes of double wall bellows can be roughly categorized into two steps. In the first step, inner and outer bellows are made of STS316L in austenite stainless steel due to their excellent formability and corrosion resistance. In the second step, the double wall bellows are manufactured using the welding method with both the inner and outer bellows. The microstructure and defects of each weldment are observed to ensure the reliability of bellows since weldment is a highly vulnerable part, which can crack and fracture when bellows are formed or used. In this study, optimum welding conditions were derived from the analysis of microstructure and inspection of weldment of bellows that were produced using various welding procedure. Moreover, the mechanical properties were evaluated through hardness measurement of substrate, weldment and the heat-affected zone.

Keywords: Double wall bellows, Weldment, Microstructure, Mechanical properties

1. 서 론

배기가스의 배출을 현저히 저감시키기 위해 환경규제가 더욱 강화되고 있다. 그로인해 이에 적합한 DF 엔진의 고압 가연성 가스를 공급할 수 있는 이중관 가스 벨로우즈의 연구 개발에 대한 필요성이 대두되고 있다. 이중관 벨로우즈는 일반적으로 LNG 연료추진선박에 사용되고 있으며 이중관의 내부튜브(inner tube)에는 천연가스, 외부튜브(outer tube)에는 공기가 흐르도록 설계되어 있다. 벨로우즈 손상으로 인해 내부튜브에 흐르는 가스가 누설될 경우 위험한 상황이 발생할 수 있으므로 외부튜브는 이중으로 차단하는 역할을 한다

[1]-[7]. 본 연구에서는 성형성이 우수하고 내식성이 강하고 저온에서도 사용이 가능한 STS316L 소재를 사용하여 용접 공정을 거쳐 벨로우즈를 제작하고, 용접부의 기계적 특성을 분석하여 이중연료 엔진용 이중관 벨로우즈의 시제품에 대한 신뢰성을 확보하기 위한 실험을 수행하였다.

2. 실험 및 분석 방법

2.1 실험 재료 및 방법

파괴인성 개선 및 스프링 강성 확보를 위하여 STS 316L 을 2겹으로 하여 내부 및 외부 벨로우즈를 각각 제작한 후

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2125-0426>): Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan, 49112, Korea, E-mail: jdkim@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4253

1 Hanjo Co., Ltd, Engineering Center, E-mail: pskim2000@chol.com, Tel: 051-416-5266

2 Graduate school, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: mooburi@hanmail.net, Tel: 051-410-4676

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

플랜지와 용접·접합 공정을 거쳐 이중관 벨로우즈를 제작하였다. 용접 구간은 플랜지와 외측 파이프의 용접, 플랜지와 내측 파이프의 용접, 외관의 파이프와 벨로우즈의 용접, 내관의 파이프와 벨로우즈의 용접 그리고 외관의 파이프와 파이프의 용접으로 이루어져 있다. 파이프간의 맞대기 용접은 그루브 각을 45°주었으며, 두 판 사이에 1.0 mm의 갭을 주어 2 pass 용접을 실시하였다. pass 1 용접 조건은 용접전류 100 A, 용접속도 6.0 mm/s, 용가재 직경 ϕ 1.6, STS 316L 이며, pass 2 용접시에는 용접전류 110 A, 용접속도 5.7 mm/s의 조건에서 직경 ϕ 2.4, STS 316L 용가재를 이용하여 용접을 진행하였다.

모든 용접부에 대해서 TIG 용접을 실시하였으며, 파이프와 벨로우즈간의 용접시에는 먼저 벨로우즈와 서포터링을 덧대어 제살용접한 후 파이프와의 용접을 실시하였다.

2.2 분석 방법

이중관 벨로우즈의 5곳의 용접부에 대해서 시험편을 채취하여 그 특성을 분석하였다. 용접된 시험편은 미세조직 분석을 위해 절단되고, 시편 표면을 연마한 후 에칭을 통해 조직을 관찰하였다. STS 316L은 에칭액(60% 질산+10% 염산 수용액)내에서 전압 2 V의 조건에서 전해에칭하였다. 단, 플랜지, 벨로우즈, 서포터링의 TIG 용접부는 STS 316L에서 사용했던 에칭액에서 전압 5 V의 조건에서 전해 에칭하였다. 이후 광학현미경을 이용하여 모재와 용접부의 조직을 관찰하였다.

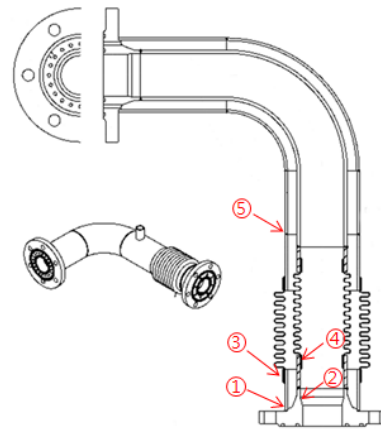
경도측정은 마이크로 비커스 경도기를 사용하였으며, 모든 시험편의 부하하중과 유지시간은 980.7 mN, 10초로 설정하였다. 측정위치는 압흔의 크기 간격을 고려하여 표면에서부터 0.3 mm, 0.5 mm 아래이며, 모두 200 μ m의 간격을 두어 경도를 측정하였다. 벨로우즈 접합부의 경우 서포터링, 상판, 하판의 용접부는 중앙부분을 200 μ m의 간격을 두었으며 플랜지는 상부표면에서부터 0.6 mm의 위치에서 200 μ m의 간격으로 횡방향 경도를 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 이중관 벨로우즈의 용접부 및 미세조직 특성

이중관 벨로우즈의 용접부는 Figure 1과 같이 5군데로 구분할 수 있다. 용접부는 플랜지와 외측 파이프의 용접, 플랜지와 내측 파이프의 용접, 외관의 파이프와 벨로우즈의 용접, 내관의 파이프와 벨로우즈의 용접 그리고 외관의 파이프와 파이프의 용접으로 이루어져 있다.

우선 스테인리스강의 미세조직을 분석하기 위해서는 재료의 당량비(Cr_{eq}/Ni_{eq})와 응고모드를 먼저 이해해야한다. Shaeffler 당량식과 본 연구에 사용된 재료의 조성을 참고하여 도출한 STS 316L의 당량비는 1.48과 1.95의 범위에 속하므로 FA모드로 응고된다. 이를 Shaeffler 도표에 적용해 보면 재료 내부에는 약 7%의 페라이트가 존재함을 예상할 수 있다[8]-[10].



- ① weldment : flange-outer pipe
- ② weldment : flange-inner pipe
- ③ weldment : outer pipe-bellows
- ④ weldment : inner pipe-bellows
- ⑤ weldment : outer pipe-outer pipe

Figure 1: Section diagram of double wall bellows

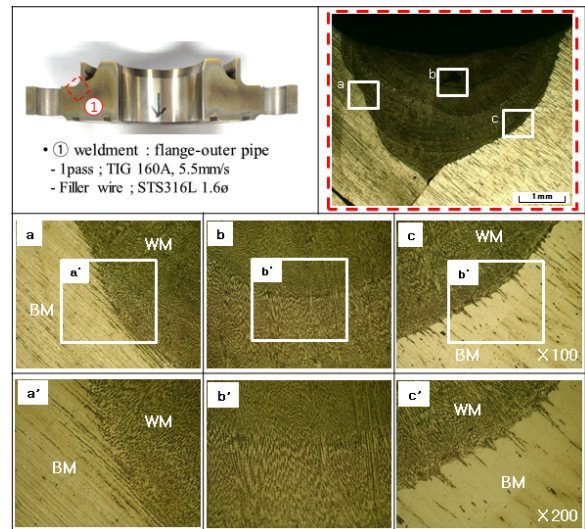


Figure 2: Microstructure of ① weldment

Figure 2는 용접부 ①의 사진과 용접부 및 모재와 용융부의 경계부분에 대한 미세조직을 나타낸다. 플랜지 부분과 외측 파이프를 용접한 용접부 ①은 TIG 열원을 이용하여 용접전류 160 A, 용접속도 5.5 mm/s의 조건에서 직경 1.6 ϕ 의 용가재를 사용하여 1 pass 필릿 용접을 진행하였다. Figure 2 (a)는 플랜지 부분의 용융경계부 확대사진이며, (b)는 용융부 중앙부분이고 (c)는 외측 파이프 측의 용융경계부이다. (a) 및 (c)의 용융경계부에서는 용융부 중앙부분으로 성장하는 기지상의 덴드라이트 조직이 관찰되며, 국부적으로 acicular 페라이트를 관찰할 수 있다. 또한 용융부 중앙부분인 (b)에서는 상부쪽으로 갈수록 기지상에서 셀상의 덴드라이트 조직이 관찰되고 있다. 이는 응고시 열류 방향의 반대방향으로 조직이 성장하고, 응고속도가 상대적으로 느린 중앙부에서는 셀상의 조직이 성장하기 때문에 이러한 미세조직을 나타내는 것이다.

Figure 3은 플랜지부와 내측 파이프를 용접한 용접부 ②

의 미세조직을 나타낸 것이다. 용접부 ②는 2 pass 용접을 실시한 것으로, 1 pass시에는 용접전류 100A, 용접속도 6 mm/s, 용가재 직경 1.6 φ의 조건에서, 2 pass 용접은 110A, 5.7mm/s, 2.4 φ 조건에서 모두 TIG 용접을 진행하였다. 용융경계부와 중앙부를 확대하여 살펴보면 파이프 부분의 용융경계면인 (a)에서 기지상의 덴드라이트가 모재에서 용융부 방향으로 에피택시얼(epitaxial) 성장하는 것이 뚜렷하게 관찰되고 있다. 하지만 플랜지 부분의 용융경계부 (c)에서는 (a)의 조직보다 미세한 덴드라이트 구조를 보이고 있다. 이는 각 부분의 응고속도에 따른 것으로, 플랜지 부분은 파이프보다 넓고 외부와의 접촉면이 커서 응고속도가 상대적으로 빠르기 때문에 비교적 미세한 조직을 나타낸다고 사료된다. 용융부 중앙부분인 (b)는 전체적으로 미세한 셀상의 덴드라이트 조직이 나타난다.

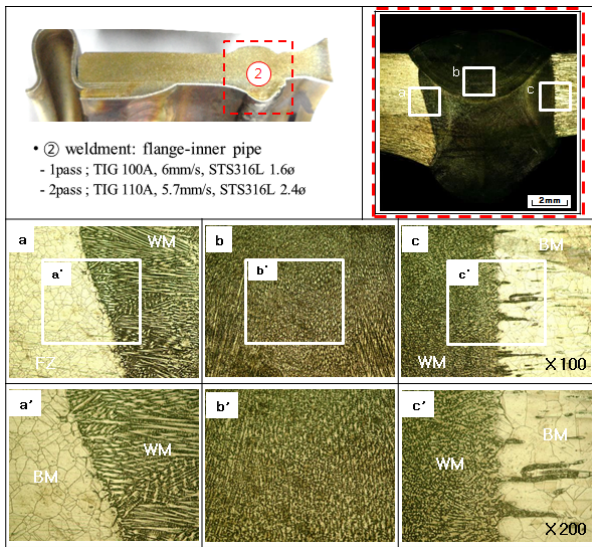


Figure 3: Microstructure of ② weldment

외측 파이프와 벨로우즈를 용접한 용접부 ③의 미세조직은 Figure 4에 나타낸다. 용접부 ③과 용접부 ④와 같이 벨로우즈를 파이프에 용접할 경우에는 서포터링, 상판 및 하판 벨로우즈를 우선 용접한 후 파이프와의 용접을 진행하였다. 즉 서포터링, 상판, 하판은 TIG 열원을 이용하여 용접전류 220 A, 용접속도 2.6 mm/s의 조건에서 재살 용접을 실시한 후 파이프와 같은 용접조건에서 직경 2.4 φ의 용가재를 첨부하여 2차 용접을 실시하였다. Figure 4 (a)와 (b)는 서포터링 부분의 용융경계부를 관찰한 것으로 기지상의 덴드라이트가 용융 중앙부를 향하여 성장하고 있는 것이 관찰되며, 상판과 하판 벨로우즈의 용융경계부를 관찰한 (c) 및 (d) 역시 에피택시얼 성장의 덴드라이트 구조가 관찰된다. 용융부 중앙부분인 (e)는 하부에는 상부쪽으로 성장하는 조직이 관찰되며 상부쪽에 셀상의 조직이 위치하고 있는 것을 볼 수 있다.

Figure 5에 나타낸 내측 파이프와 벨로우즈를 용접한 용접부 ④의 미세조직은 용융부 중앙부분인 (e) 영역이 더욱

선명한 셀상의 덴드라이트 구조를 나타낸다는 것 외에는 Figure 4와 거의 같은 미세조직을 보이고 있다.

Figure 6은 외측 파이프와 파이프간의 맞대기 용접을 실시한 부분의 미세조직을 나타낸 것으로 1 pass 용접부인 하부의 중앙부는 미세한 셀상의 덴드라이트를 나타내고 있으며, 2 pass 구간인 상부는 응고 방향이 더욱 상부쪽으로 향하여 조직들이 성장하고 있는 것을 보이고 있다.

이상의 이중관 벨로우즈에 대한 용접부를 관찰한 결과, 용융부 중앙부분과 함께 용접결함이 발생하기 쉬운 용융경계부에도 역시 결함이 발생하지 않는 매우 건전한 용접부가 형성되었음을 확인하였다.

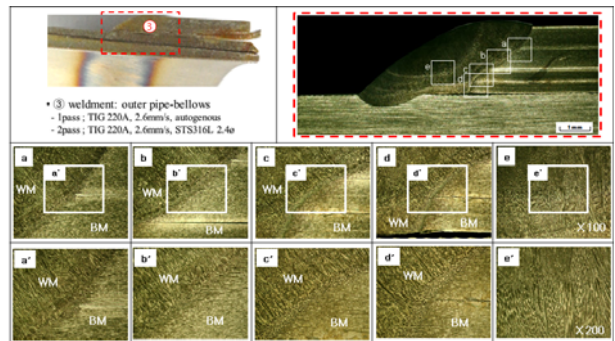


Figure 4: Microstructure of ③ weldment

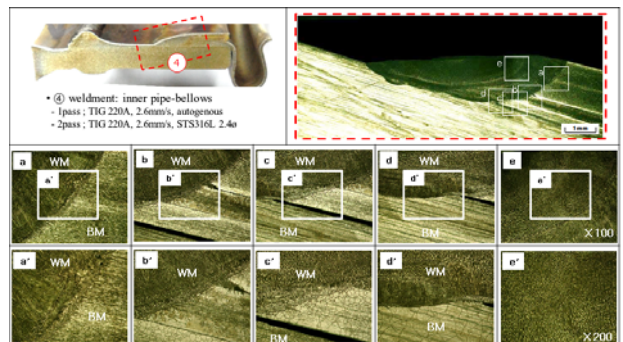


Figure 5: Microstructure of ④ weldment

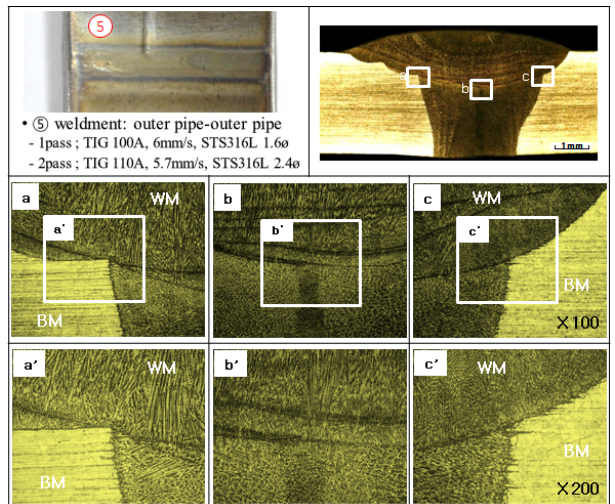


Figure 6: Microstructure of ⑤ weldment

3.2 용접부 경도분포

이중관 벨로우즈의 각 용접부에 대한 기계적 성질을 평가하기 위해 경도측정을 실시하였다. 경도측정은 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 용접부, 열영향부 및 모재의 경도를 측정하여 각 부위의 기계적 성질을 파악하였다.

Figure 7은 용접부 ①의 경도 분포를 나타낸 것으로, 필릿 용접부 중앙 표면에서부터 깊이방향으로 0.5 mm, 1.5 mm의 위치에서 200 μ m 간격으로 경도를 측정하였다. 모재의 경도는 플랜지 부와 파이프 부 모두 180~190 Hv의 범위를 나타내었으며 용접부와 열영향부 모두 모재와 거의 같은 경도값을 나타내었다. 다만 상부 용접부의 중앙부분에서 약간의 경도 상승이 나타나는데, 이는 미세조직의 차이로 인한 것으로, 앞서 미세조직 결과를 확인한바와 같이 용접부 중앙부분은 미세한 셀상의 덴드라이트 구조로 되어 있어 다른 부분에 비해 약간의 경도 상승이 나타났다. 하지만 큰 차이를 나타내지 않기 때문에 모재와의 기계적 특성에서 차이를 나타낸다고 보기는 어렵다.

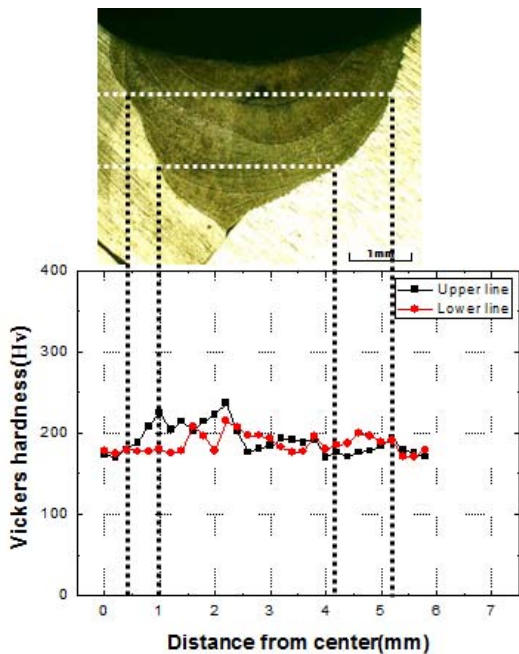


Figure 7: Hardness distribution of ① weldment

Figure 8은 용접부 ②에 대한 경도분포로써, 하부의 1 pass 구간과 상부의 2 pass 구간으로 나누어 경도를 측정하였다. 2 pass 용접으로 인해 입열량이 상대적으로 커서 용접부가 모재 및 열영향부에 비해 약간 낮은 값을 나타내고 있다. 이는 용접 조건을 조정함에 따라서 충분히 제어할 수 있다.

Figure 9와 Figure 10은 용접부 ③과 용접부 ④의 경도 측정 결과를 나타낸 것으로, 각각 서포터링, 상판, 하판 그리고 플랜지 부분을 측정하였다. 각 모재의 경도는 170~200 Hv이며, 용접부의 경도는 150~190 Hv의 범위로 용접부의

경도가 약간 감소한 값을 나타내었다. 이는 서포터링과 상판, 하판이 먼저 1 pass 제살용접된 부분이 2 pass 용접에 의해 재가열되면서 연화되었기 때문으로 판단된다.

Figure 11에 파이프간 맞대기 용접한 용접부 ⑤의 경도 분포를 나타낸다. 경도는 하부의 1 pass 구간과 상부의 2 pass 구간으로 측정하였다. 모재와 열영향부에 비하여 용접부의 경도가 약간 감소하였지만 큰 차이를 보이지 않았다.

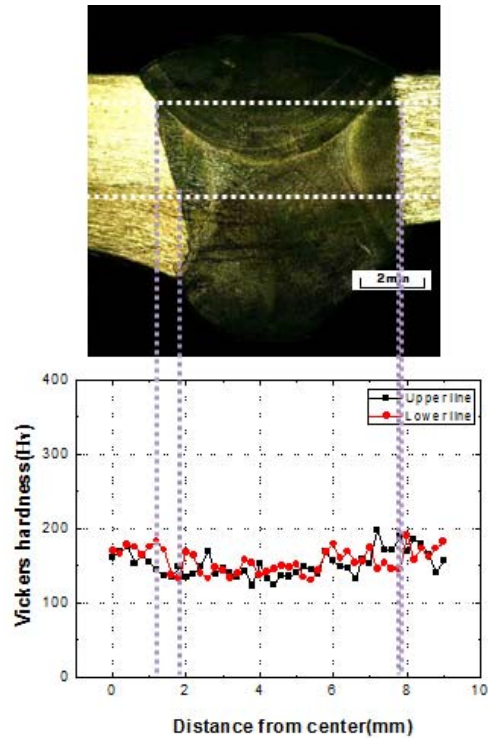


Figure 8: Hardness distribution of ② weldment

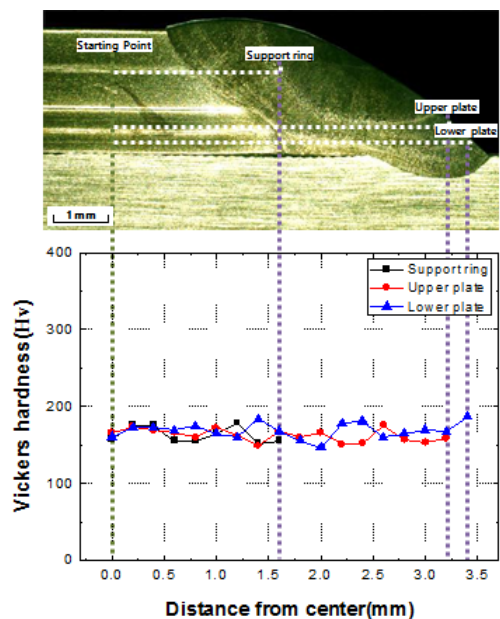


Figure 9: Hardness distribution of ③ weldment

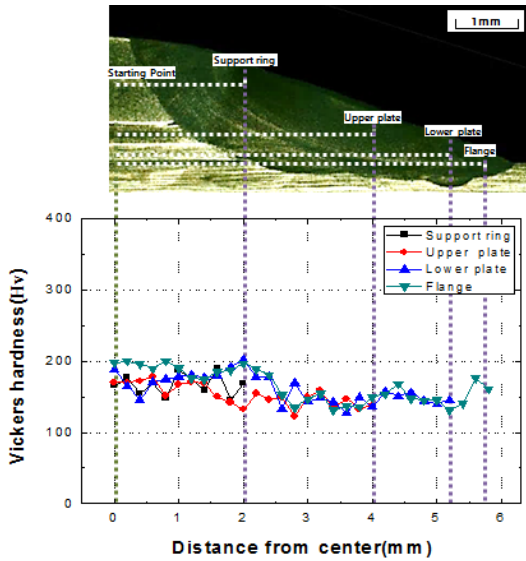


Figure 10: Hardness distribution of ④ weldment

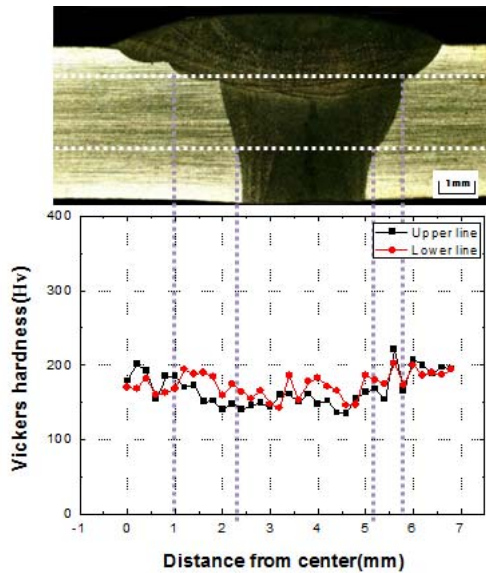


Figure 11: Hardness distribution of ⑤ weldment

4. 결 론

제작된 이중관 벨로우즈에 대하여 용접부 5군데를 채취하여 미세조직 및 경도측정을 통해 용접부를 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 용접부의 미세조직은 용접부 중앙부분에서 성장하는 수지상 조직이 나타나고, 모재와의 용융경계부에서는 에피택시얼 성장조직이 관찰되었다.
- 2) 용접부 전반적으로 기공이나 균열과 같은 결함이 없는 건전한 용접부를 얻을 수 있었다.
- 3) 경도 특성은 일반적으로 용접부의 경도가 모재에 비하여 약간 감소하는 경향을 나타내었지만 그 차이가 크지 않는 경향을 나타내면서 대체적으로 모재와 비슷한 기계적 특성을 보인다고 판단된다.

후 기

본 과제(결과물)는 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구결과이며, 또한 해양수산부의 지원으로 수행한 해양에너지 전문인력 양성사업의 연구결과입니다.

References

- [1] P. S. Kim, H. Y. Choi, S. Y. Choi, Y. S. Kim, and J. D. Kim, "Fundamental study on the weldability and formability of INCOLOY 825 alloys and STS316L alloys," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 38, no. 6, pp. 698-703, 2014 (in Korean).
- [2] Y. S. Kim and S. C. Kil, "Latest welding technology for storage and transportation facilities of liquified natural gas," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 40, no. 1, pp. 17-27, 2016 (in Korean).
- [3] J. D. Kim, C. J. Lee, and M. K. Song, "Characteristics of fiber laser welding on STS304L for GTT MARK III membrane," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 36, no. 8, pp. 1069-1075, 2012 (in Korean).
- [4] Y. H. Moon and S. D. Huh, "The factors to form delta-ferrite in austenitic stainless steel weldment," The Korean Welding&Joining Society, vol. 5, no. 1, pp. 16-22, 1987 (in Korean).
- [5] H. W. Lee, Y. T. Shin, J. U. Park, J. W. Lee, and C. Y. Kang, "A study of low temperature strength and fatigue strength of austenitic stainless steel for membrane type LNG tank," Journal of Korea Welding Society, vol. 17, no. 3, pp. 50-54, 1999 (in Korean).
- [6] E. A. Trillo, R. Beltran, J. G. Maldonado, R. J. Romero, L. E. Murr, W. W. Fisher, and A. H. Advani, "Combined effects of deformation(Strain and strain state), grain size and carbon content on carbide precipitation and corrosion sensitization in 304 stainless steel," Materials Characterization, vol. 35, no. 2, pp. 99-112, 1995.
- [7] D. A. Butzea, H. J. Cordewiner, C. Stickelmann, H. P. Muller, and R. Hemminger, Manufacturing and Quality Test of the Metal Bellows of the TEXTOR Vacuum Vessel, Report No. JUEL-SPEZ-229, Zentralabteilung Allgemeine Technologie, Germany, 1983.
- [8] A. Laupa and N. A. Weil, "Analysis of U-Shaped Expansion Joint," Journal of Applied Mechanics, vol. 29, no. 1, pp. 115-123, 1962.

- [9] P. S. Korinko and S. H. Malene, "Considerations for the Weldability of Type 304L and 316L Stainless Steel," *Practical Failure Analysis*, vol. 1, no. 4, pp. 61-68, 2001.
- [10] B. S. Rho, H. U. Hong, and S. W. Nam, "The Effect of δ -Ferrite on Fatigue Cracks in 304L Steel," *International Journal of Fatigue*, vol. 22, no. 8, pp. 683-690, 2000.