

GMAW Narrow Gap Welding을 활용한 전차 용접방법 개선에 관한 연구

강승주^{1*}, 손민구¹, 김록한¹, 정연호²
¹국방기술품질원, ²현대로템

A Study on the Improvement of Combat Engineer Vehicle Armor Steel Welding Method Using GMAW Narrow Gap Welding

Seung Ju Kang^{1*}, Min Gu Son¹, Rok Han Kim¹, Yun Ho Jung²
¹Land Systems Center, Defense Agency for Technology and Quality(DTAQ)
²Hundai Rotem

요약 이 연구의 주된 목적은 OO전차의 양산 용접공정에 GMAW Narrow Gap Welding을 활용한 용접방법 적용에 초점을 맞추었다. 전차와 같은 지상 전투차량의 경우 탑승인원의 생존을 보장하기 위해 균질압연장갑강이 사용되며, 용접 이음 설계 MIL-HDBK-21에 따라 용접부의 경사각이 넓게 정해져 있어 판재의 두께가 두꺼워 질수록 용접량이 증가한다. 증가한 용접량은 취성 및 잔류응력 증가 등 용접품질 저하의 원인이 되어 OO전차의 용접 시 용접량을 줄일 필요성이 제기되었다. 이를 해결하기 위한 방법으로 용접부 경사각을 좁혀 용접변형을 최소화하는 NGW가 있으며 원자력, 선박 설비 등 용접 두께가 두껍고 용접횟수가 많은 산업에서는 이미 적용 중에 있다. 하지만 현재까지 전차와 장갑차와 같은 지상전투 차량의 용접공정에서는 NGW가 적용된 사례는 없다. 따라서, 본 연구에서는 지상전투 차량 중 하나인 OO전차의 용접공정에 NGW 적용을 위한 연구를 수행하였다. NGW 용접 적용부의 건정성과 안정성을 확인하기 위해 기존 X-groove 용접부와 NGW를 적용한 U-groove 용접부의 비교시험(인성시험, 저온충격시험, 경도분포 시험, 미세조직분석, 피로시험 등)을 진행하였다. 그 결과 X, U-groove 용접부에 대한 기계/금속학적인 특성 평가 결과가 유사하고 기준을 만족함을 확인하여 OO전차 현업 용접공정에 NGW 적용하고자 한다.

Abstract This study aimed to apply the GMAW narrow gap welding (NGW) to the welding process of OOTank manufacturing. Generally, high-hardness armor steel is used in a tank to ensure the survival of the passengers in the tank. In addition, the weld groove angle for the plates used in the tank components manufacturing is set wide according to the welding joint design MIL-HDBK-21, so the welding volume increases as the plate thickness increases. However, high welding volumes cause poor welding qualities, such as increased brittleness and residual stresses of the welded part. Meanwhile, the NGW minimizes welding deformations by narrowing the weld groove angle of the parts being welded. Also, the NGW has already been used in industries to weld thick parts under different welding times. Therefore, this study applied the GMAW NGW to the welding process of OOTank manufacturing. In particular, this study confirmed and compared the soundness of the chosen X- and U-groove welded parts of the GMAW NGW, respectively, through a comparative test (involving microstructure analysis, tensile test, low-temperature impact test, etc., of the welded parts). The above confirmation and comparison showed that there was no significant difference between the X-, U-groove welded parts, and the NGW could be applied to the welding process of OOTank mass production.

Keywords : Narrow Gap Welding, Fatigue Test, Hardness Test, Impact Test, Tensile Test

*Corresponding Author : Seung Ju Kang(Defense Agency for Technology and Quality, DTAQ)

email: ksj11576@dtaq.re.kr

Received February 24, 2022

Accepted May 6, 2022

Revised March 30, 2022

Published May 31, 2022

1. 서론

OO전차는 기계화 부대의 신속한 작전 수행을 위해 굴삭팔과 같은 개척 장비로 지뢰 및 각종 장애물 제거 임무를 수행하는 장비다. 차체 구조물은 탑승인원의 안전과 생존을 보장하기 위해 높은 경도와 내충격성을 보유한 균질압연장갑(Rolled Homogeneous Armour, 이하 RHA)이 용접되는데 위치와 구조적 중요성에 따라 00~000 mm의 두꺼운 장갑 강이 적용된다.

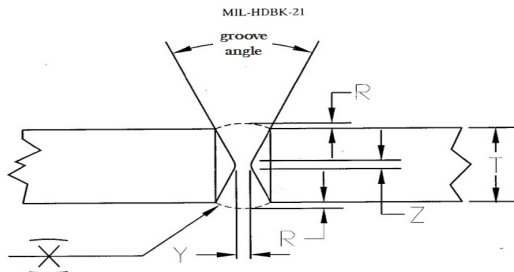


Fig. 1. MIL-HDBK-21 X-groove angle

구조물의 용접 이음형상은 일반적으로 X, V-groove 용접법이 사용되며 Fig. 1과 같이 이음부 경사각(groove angle)은 00 ~ 00° 범위 내에서 크기와 모양이 결정된다. 이 경우 경사각 범위가 고정되어있기 때문에 판재가 두꺼워짐에 따라 용접부의 면적이 넓어지게 되고 용접량이 늘어나서 입열량이 증가하게 된다. 증가된 입열량은 충격 인성 저하, 잔류응력 증가 등의 원인이 되며, 용접 구조물의 품질문제 발생 가능성은 커지게 된다[1,2].

협개선 용접(NGW: Narrow Gap Welding, 이하 NGW)은 전술한 문제점을 개선하기 위해 개발된 용접방법으로 경사각의 범위가 20° 이하로 설정된다. 작은 경사각으로 인해 용접량이 감소하여, 다른 용접 방법보다 변형이 작아 열 변형 및 잔류 응력을 최소화 할 수 있다. 그리고 용접 시 소량의 용착금속만 사용하여 용접을 완료할 수 있으므로, 용접 비용과 시간을 감소시킬 수 있다[3,4].

NGW 관련 연구 확인결과, SM45C 재질에 대하여 경사각 감소에 따른 용접부의 피로수명 비교 시 무한수명 구간이 증대되고, 용접부 폭이 작아질수록 모재에 발생하는 잔류응력이 감소되는 경향이 있었다[5]. 이러한 장점으로 인해 NGW는 용접 두께가 두껍고 용접횟수가 많은 원자력 발전소와 선박 설비 등에 자주 적용된다[6]. 하지만 현재까지 전차와 장갑차 같은 지상 전투차량의 용접공정에 NGW가 적용된 사례는 없다.

따라서, 본 연구에서는 지상전투 차량 중 하나인 OO전차의 용접공정에 NGW 적용을 위한 연구를 수행하였

다. 양산에 사용 중인 용접판재와 동일한 재질과 두께로 시험편을 제작하였고, NGW 적용 시 변경부의 강건성 및 기계적 특성을 검증하기 위해 기존 용접부와 NGW 용접부의 기계적 특성 및 미세조직을 비교 평가 하였다. 그리고 전투차량 운용 중 발생하는 작동하중에 대한 안정성 확인하기 위해 피로시험을 수행하였고 용접부에 실제 하중이 작용되도록 시험방법을 구현했다. 기존 용접부와 비교시험을 통해 안정성을 확인하여 OO전차 양산 용접공정에 NGW를 적용하고자 한다.

2. 본론

2.1 현실태 및 개선방안

OO전차의 용접구조물 이음부 형상은 계열전차가 개발된 1980년대부터 현재까지 동일하며, 경사각이 00°로 고정되어 있다. 고정된 경사각으로 인해 판재 두께가 증가되는 경우 Fig. 2와 같이 용접부 면적 및 용접량이 많아지게 된다.

판재의 두께가 50 mm에서 63.5 mm로 두꺼워질 때 용접면적은 1125.6 mm²에서 2253.6 mm²으로 약 2배 가량 증가하며, 용접량은 28 pass에서 34 pass로 6 pass가 많아짐을 확인할 수 있다.

실제 용접작업 공정 확인결과 큰 경사각에 따른 판재의 변형이 일부 확인되고 있었으며, 작업자의 피로 증가 등에 따른 용접품질의 저하가 우려되는 상황이다. 따라서, 용접 경사각을 줄이는 NGW를 OO전차 용접공정에 적용하여 용접면적을 줄이고 용접량을 최소화 하는 개선 방안을 적용하고자 한다.

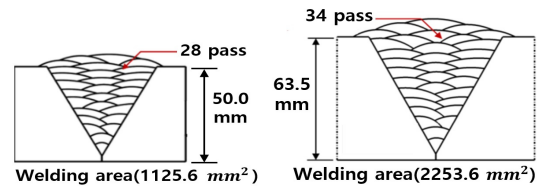


Fig. 2. Comparison of welding area according to plate thickness

Table 1. Tacom 12479550 Prequalified Joint

Welding Process	Groove Angle	Root Face
GMAW	20°	6.35 mm min
SMAW	45°	6.35 mm min

2.2 NGW 용접부 설계

용접 이음부의 설계는 X-groove와 비교하여 경사각을 최소화 할 수 있는 U-groove로 선정하였다. 경사각의 각도는 NGW의 기준과 Table 1에서 볼 수 있는 것처럼 TACOM 12479550에서 권장하는 U-groove의 선제조건 등을 검토하여 경사각을 20°로 이하로 고려하였다. 용입량을 최대한 줄이기 위해 경사각을 더 좁히려 하였지만, 용접토치의 크기를 고려하였을 때 각을 더 좁힐 시 용접토치가 용접부에 도달하지 못하는 제한사항이 있어 20°로 선정하게 되었다.

NGW는 작은 경사각으로 인해 용접부 사이 벽면에 용입부족(LF: Lack of Fusion, 이하 LF) 결함이 빈번하게 발생한다. 이를 고려하여 Fig. 3 (a)에 나타난 양산용접 공정에서 사용 중인 용접토치가 용접면에 닿을 수 있도록 노즐 크기와 전극의 길이를 고려하여 Fig. 3 (b)와 같이 밀면은 8 mm가 되도록 설계하였고 최종 형상은 Fig. 4와 같다.

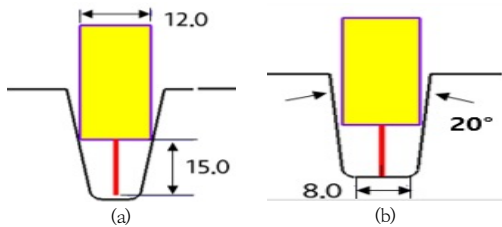


Fig. 3. Welding joint design

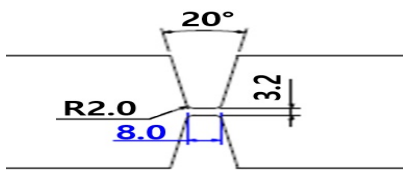


Fig. 4. NGW U-groove Welding joint

설계 시 고려된 판재는 현재 OO전차에 사용중인 MIL-A-00000등급의 장갑 강이 사용되었으며, 두께는 양산 용접공정에서 사용 중인 00.0mm로 선정하였다. GMAW를 적용하였으며, 그 이유는 현재 산업현장에서 가장 빈번히 사용 중인 공정이기 때문에 별도의 장치나 공정을 개발하지 않고 현장에 바로 적용하기 위함이다. 용접시험은 TACOM 12479550 TABLE4.7에 따라 용접사 인증을 완료한 인원이 수행하였으며, 시험용접의 조건은 Table 2와 같다.

Table 2. Fatigue test specimen manufacturing conditions

Welding rod	MIL-100S-1	Welding rod size	φ 1.2 mm
Protective gas	Ar 98% + O ₂ 2%	Amount of Protective gas	16 ~ 20 L/min
Welding position	1G	current/voltage	20 ~ 30A/ 200 ~ 240V

2.3 용접 건전성 확인 및 미세조직 비교

시험편의 용접 건전성 확인 및 용접방법 변화에 따른 미세조직의 변화를 확인하기 위해 Macro 단면 분석 및 Micro 미세조직 분석을 수행하였으며, 기존 X-groove 용접 시험편과 비교 평가하였다. 용접부를 관찰하기 위해 5% 질산 알코올 용액에 에칭한 후 광학현미경(OM: Optical Microscope, 이하 OM)을 통해 단면과 미세조직을 관찰하였으며, Macro 단면 분석 결과 Fig. 5와 같이 기존 X-groove, NGW U-groove 비교시험편 모두 용접부 내부에 결함(LF, 언더컷, 균열, 기공 등) 그리고 재료적 결함은 없음을 확인하였다. 그리고 Fig. 6과 같이 기존 X-groove 시험편은 26 pass, NGW U-groove 시험편은 20 pass로 NGW U-groove 시험편의 용접패스수가 6 pass 감소함을 확인하여, NGW 적용 시 절대적인 용접량이 적어지는 것을 확인하였다.

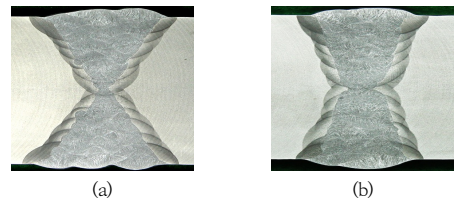


Fig. 5. Macro test result
(a) X-groove (b) NGW U-groove

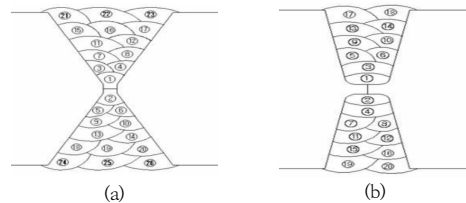


Fig. 6. Welding pass comparison
(a) X-groove (b) NGW U-groove

미세조직 관찰을 위해 Fig. 7과 같이 OM ×500으로 촬영하여 Micro 조직 분석을 하였고 (1) 용접부+열영향

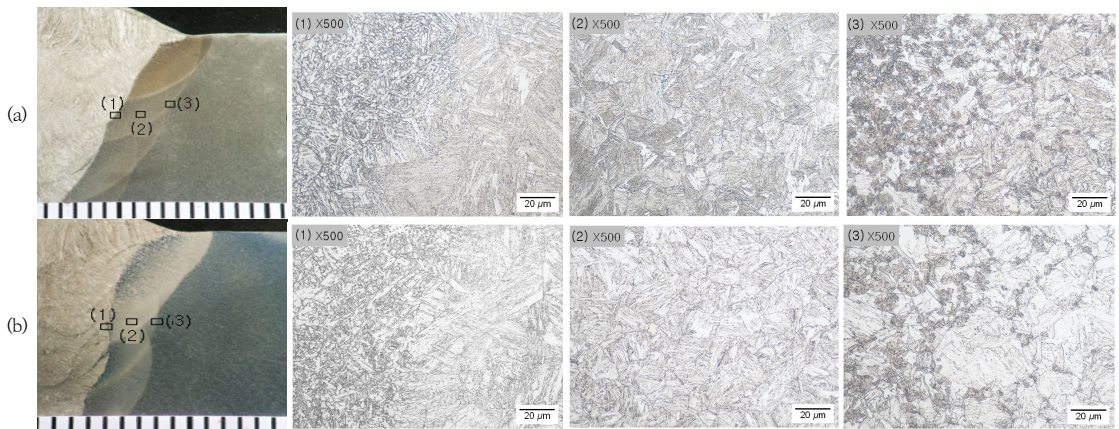


Fig. 7. Optical micrographs of the weld metals
(a) X-groove (b) NGW U-groove

부, (2) 열영향부, (3) 열영향부+모재부 3영역으로 구분하여 미세조직을 관찰하였다. 2가지 시험편 관찰 결과, 기존 X-groove 시험편이 더 높은 입열량으로 열영향부의 크기도 크게 형성됨을 확인할 수 있었고 영역별 미세조직 비교 관찰 결과 두 시험편 모두 용착금속부(W/M: Welded Metal, 이하 W/M)는 일반적인 용접금속에서 전형적으로 확인할 수 있는 침상형 페라이트(Bainite) 응고조직이 관찰되었다[7]. 열영향부와 모재부(B/M: Base Metal, 이하 B/M)는 RHA 장갑강의 미세조직인 Tempered Martensite 조직이 관찰되었다[8]. 기존 X-groove와 비교하여 NGW 적용에 따른 큰 조직변화는 관찰되지 않았고, 검사부위 전체에서 Micro-crack, 비금속 개재물 편석 등을 포함한 재료적인 결함은 관찰되지 않았다.

2.4 기계적 특성 비교

NGW를 적용한 U-groove 용접물의 기계적 성질을 X-groove 용접물과 비교하였다. 기계적 물성은 인장시험 통해 확인하였고, 용접 접합 효율은 충격시험을 통해 확인하였다. 그리고 용접부 경도분포를 비교 평가하였다.

2.4.1 인장 시험

NGW를 적용한 U-groove 용접물과 X-groove 용접물의 인장 특성을 비교하기 위한 인장 시험을 수행하였고 인장시험편은 AWS D1.1/D1.1M : 2020에 따라 준비되었다. Table 3에 나타난 결과는 6개 표본의 평균이며, X-groove와 U-groove의 인장강도는 결과 값에서 큰 차이를 보이지 않았다.

Table 3. Comparison of tensile test results.

Identification	Tensile Strength(N/mm ²)	Fracture Location & Type
x-groove	683.6	weld & ductile fracture
u-groove	680.7	weld & ductile fracture

2.4.2 저온 충격 시험

충격시험은 AWS D1.1/D1.1M : 2020에 따라 샤르피 V-notch 2 mm의 시험편을 준비하고, -40℃에서 시험을 수행하였다. 용접부의 저온인성을 확인하기 위해 V-notch의 배치는 3곳으로 설정하였다.

(1) Fusion Line(용접부), (2). Fusion Line +1 mm (국부취성영역), (3). Fusion Line +5 mm(모재 부) Table 4에 나타난 결과는 9개의 시험편을 각각 시험한 결과의 평균값이며 NGW U-groove는 X-groove 대비 저온 충격 인성이 더 우수했다. 이는 용접 열 에너지 입력이 적기 때문이며[9], NGW는 외부 충격에 더 강한 것으로 나타났다.

Table 4. Comparison of Charpy notch impact test results at -40℃

Identification	Fusion Line (J)	Fusion Line + 1 mm(J)	Fusion Line + 5 mm(J)
x-groove	155	177	241
u-groove	185	185	234

2.4.3 경도 분포 시험

비커스경도 시험을 통해 시험편에 대한 경도값 분포를

확인하였다. Hv 1의 하중으로 시험을 진행하였으며, 기존 X-groove 시험편과 NGW U-groove 시험편의 분석 결과는 Fig. 8에 나타내었다. 결과를 비교해보면 최고경도 값의 경우 충격시험 결과와 유사하게 입열량이 적은 U-groove가 높게 나왔다. 하지만 용접부(W/M), 열영향부, 모재부(B/M) 경도값의 경우 두 시험편 모두 유사한 경도 분포를 가지는 것을 확인할 수 있었다.

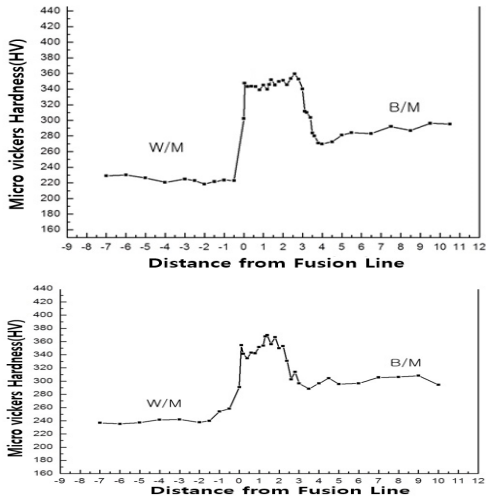


Fig. 8. Vickers hardness distribution
(a) X-groove (b) NGW U-groove

2.5 피로시험

NGW 적용 용접부의 내구성 및 피로수명을 확인하기 위해 기존 용접부와 비교 피로시험을 진행하였다. 인장 피로시험기를 사용하여 시험할 수 있도록 시험편(Fig. 9)을 아크용접이음의 한쪽 인장피로시험 방법(KS B 0825)에 따라 설계, 제작하였고 실제 용접부 두께 00.0 mm를 그대로 반영하였다.

그리고 용접 변경부에 사용 중 발생하는 최대응력을 구조 해석한 결과, 213 Mpa의 최대응력이 발생하는 것을 확인하여 Fig. 10과 같이 피로시험편의 평행부에 550 KN의 인장하중이 부가되었을 때 최대 발생응력이 213 Mpa이 발생되도록 시험편을 설계 하였다.

피로시험은 인장 피로시험기(MTS社, 모델 311.31, 용량 ± 2,500 KN)를 사용하여 Table 5에 나타낸 것과 같이 최대 550 kN, 최소 50 kN의 하중을 10 Hz의 속도로 수행하였다. 피로시험의 결과로는 X, U-groove 2가지 시험편 모두 10⁶ cycle에서 파단 되지 않음을 확인하여 NGW U-groove 시험편이 기존 전차용접 공정에 사

용 중인 X-groove와 유사한 피로수명과 내구성을 가지는 것을 확인하였다.

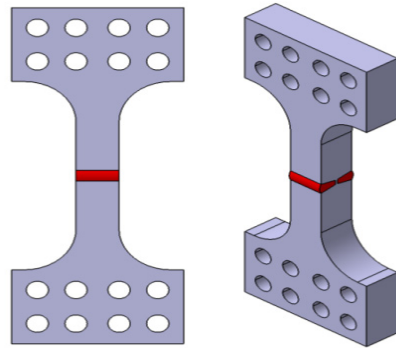


Fig. 9. Fatigue test sample

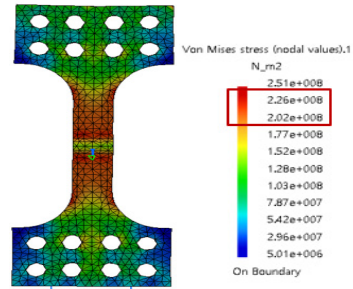


Fig. 10. Fatigue test sample stress distribution

Table 5. Fatigue test condition

Test condition		
Load (kN)	Frequency (Hz)	Note
550 ~55	10	- temperature : R.T. (23 ± 5℃) - Waveform : Sine wave - Stress ratio : R=0.1 - Fatigue limit : 1x10 ⁶ cycles

3. 결론

본 연구에서는 OO전차 장갑 강 용접 시 용접량을 줄이기 위해, 기존 X-groove 용접부를 NGW U-groove 용접부로 변경하는 설계를 진행하였다. 용접 경사각을 최소화하여 용접량을 최대한 줄이려 하였지만, 용접토치의 크기를 고려하였을 때 각을 더 좁힐 시 용접토치가 용접부에 도달하지 못하는 제한사항이 있어 20°로 선정하게 되었다. NGW 용접 적용부의 건정성과 안정성을 확

인하기 위해 기존 X-groove 용접부와 NGW를 적용한 U-groove 용접부의 비교시험(용접부의 기계적 특성 시험과 미세조직 분석시험, 피로시험)을 진행 및 비교 평가하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

X, U-groove 용접부에 대한 기계적 특성 평가를 진행한 결과 인장시험, 경도분포시험에서 두 비교시험편간 유사한 결과가 도출되었고 저온충격시험의 경우 NGW를 적용한 U-groove가 X-groove 대비 적은 입열량으로 저온충격인성이 우수했다.

X, U-groove 용접부에 대한 Micro 미세조직 분석 결과 2가지 용접부는 모두 일반적인 용접금속에서 확인할 수 있는 Bainite 응고조직을 나타냈으며, 열영향부 및 모재는 Tempered Martensite 조직이 관찰되었다.

피로시험 결과 X, U-groove 용접부 모두 동일 조건에서 10^6 cycles 내에 파단 되지 않았다.

결론적으로 NGW 적용 시에도 기존 용접방법과 비교하여 기계/금속학적인 특성 평가 결과값이 유사하고 기준을 만족하여 NGW의 현업 적용에 대한 안정성을 확인할 수 있었다.

References

- [1] K. Kim, H. Bang, H. Bang, A. F. H. Kaplan, J. Nasstrom, J. Frostevarg, "Hot Wire Laser Welding of Multilayer for Narrow Gap - Analysis of Wire Melting/Transfer and Arc Formation Phenomenon by High Speed Imaging -," *Journal of Welding and Joining*, vol. 34, no. 5, pp. 26-32, Oct. 2016. DOI: <https://doi.org/10.5781/jwj.2016.34.5.26>
- [2] S. Z. Han, J. H. Ahn, J. H. Lee, S. S. Kim, "Rotary bending fatigue behavior of narrow gap welded SM45C steel". *Korean journal of metals and materials*, vol. 52, pp.893-897, 2014.
- [3] J. S. Jang, B. W. Lee, "Application of GMAW Narrow Gap Welding." *Journal of the Korea Welding Society*, vol. 2, no. 1, pp. 58-65, 1984.
- [4] K. J. Seong, H. J. Yi. "Characteristics of GMAW Narrow Gap Welding on the Armor Steel of Combat Vehicles" *Applied Sciences* 7, no. 7, pp 658. 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/app7070658>
- [5] JY. Huh, S. Park, I. H. Sin, C. S. Seok, "A Study on the Evaluation of the Fracture Toughness for the Narrow Gap Welding Part of Nuclear Piping," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, vol. 34, no. 1, pp. 67-72, Jan. 2010. DOI: <https://doi.org/10.3795/ksme-a.2010.34.1.67>
- [6] N. H. Soh, J. S. Yang, C. R. Pyo, N. S. Huh, "Effect of Groove Shape on Residual Stress Distribution in

Narrow Gap Welds," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, vol. 35, no. 6, pp. 635-642, Jun. 2011.

DOI: <https://doi.org/10.3795/ksme-a.2011.35.6.635>

- [7] J.-M. Lee et al., "Microstructure and Mechanical Properties of the High-Hardness Armor Steels," *Korean Journal of Materials Research*, vol. 28, no. 8. The Materials Research Society of Korea, pp. 459-465 DOI: <https://doi.org/10.3740/MRSK.2018.28.8.459>
- [8] K.-H. Kim, H.-J. Kim, and M.-Y. Huh, "Technique for Grain Size Measurement of Acicular Ferrite Microstructure," *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, vol. 27, no. 1. *The Korean Welding and Joining Society*, pp. 14-19, 28-Feb-2009. DOI: <https://doi.org/10.5781/KWJS.2009.27.1.014>
- [9] Y.-J. Jo, D.-G. Seo, and Y.-T. Shin, "Effects of Heat Inputs on the Mechanical Properties of FCA Weldment of YP 690MPa Grade Steels," *Journal of Welding and Joining*, vol. 34, no. 6. *The Korean Welding and Joining Society*, pp. 11-15, 30-Dec-2016. DOI: <https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.6.11>

강 승 주(Seung Ju Kang)

[정회원]



- 2018년 2월 : 경상대학교 기계공학부(공학사) 졸업
- 2019년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

국방, 기계, 유압

손 민 구(Min Gu Son)

[정회원]



- 2016년 8월 : 동아대학교 기계공학과(공학사) 졸업
- 2016년 12월 ~ 2018년 8월 : (주)유니크 품질보증부 기사
- 2019년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

국방, 기계, 총포

김 록 한(Rok Han Kim)

[정회원]



- 2014년 8월 : 경상대학교 기계공학부(공학사) 졸업
- 2020년 9월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>
국방, 기계

정 연 호(Yun Ho Jung)

[정회원]



- 2008년 2월 : 부경대학교 신소재공학과 졸업
- 2010년 2월 : 부경대학교 조선시스템공학과 졸업
- 2013년 1월 ~ 현재 : 현대로템 방산생산기술팀 책임매니저

<관심분야>
용접, 구조물