



HDPE 압출 용접에서 용접 슈 형상이 용접부 강도에 미치는 영향

우수성^a, 권용환^b, 김지선^{a,*}

Effect of Welding Shoe Design on Weld Strength in High-density Polyethyleneextrusion Welding

Suseong Woo^a, Yonghwan Kwon^b, Jisun Kim^{a,*}^a Seonam Technology Application Division, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)^b Fishing Vessel Safety Research Team, Korea Maritime Transportation Safety Authority (KOMSA)

ARTICLE INFO

Article history:

Received	2	June	2025
Revised	14	July	2025
Accepted	21	July	2025

Keywords:

Polymer welding
High-density polyethylene (HDPE)
Extrusion welding
Welding shoe
Tensile strength

ABSTRACT

As international environmental regulations become increasingly stringent, research into eco-friendly alternatives to fiber-reinforced plastic (FRP) has intensified in the shipbuilding industry. High-density polyethylene (HDPE) has emerged as a promising alternative, offering excellent mechanical properties, recyclability, and cost benefits compared to FRP. This study evaluates the influence of welding shoe design—Butt shoe, Round shoe, and Round shoe with an additional press tool—on weld quality and mechanical strength in HDPE extrusion welding. The Butt shoe produced optimal bead geometry with minimal defects, whereas the Round shoe resulted in excessive bead height and various weld defects. Incorporating a press tool slightly improved weld compactness but was less effective than the Butt shoe. The findings highlight the importance of selecting appropriate welding shoes to ensure structural integrity and compliance with industry standards in HDPE shipbuilding.

1. 서론

최근 국제적인 환경 규제가 강화됨에 따라 기존 Fiber reinforced plastic(FRP) 소재로 제작된 선박을 친환경 소재로 대체하기 위해 많은 연구가 수행되고 있다^[1]. 그중 High density polyethylene(HDPE)는 우수한 기계적 강도와 재활용성의 특징과 FRP 선박 대비 낮은 초기 생산 비용과 유지보수성의 장점으로 친환경 선박 소재로 주목받고 있다^[2]. 현재 HDPE를 이용한 선박 건조는 주로 용접 공정을 통해 이루어지고 있다. HDPE 소재의 용접 방식으로는 압출 용접, 열 융착용접, 마찰교반 용접 등이 있다^[3]. 기존 HDPE 용접 기술은 주로 압출 및 열융착 용접 방법

이 배관 및 저장 용기와 같은 분야에서 활용되어 왔으며, 배관 및 저장 용기에 활용하기 위해 내부 유체의 누설 방지를 위한 기밀성 및 열변형 저항성을 확보하는 연구가 중점적으로 수행되어 왔다^[4,5]. 그러나 선박과 같은 구조물에 HDPE 소재를 적용하기 위해서는 기밀성뿐만 아니라 구조적 안정성과 용접부의 기계적 강도가 매우 중요하기 때문에 용접부의 기계적 강도를 높일 수 있는 연구가 지속적으로 수행되고 있다. Lee 등은 HDPE 압출 용접에서 열풍기와 모재 사이의 거리 및 열풍기의 이동속도에 따라 모재의 예열 온도를 측정하였고, 모재의 예열 온도가 용접부 접합강도에 미치는 영향을 보고하였다^[6]. Lee 등은 HDPE 구조물의 용접에 의한 열 변형을 연구하였으며, 용접 구조물에서 발생하는 변형

* Corresponding author. Tel.: +82-62-600-6302

E-mail address: kimjisun@kitech.re.kr (Jisun Kim).

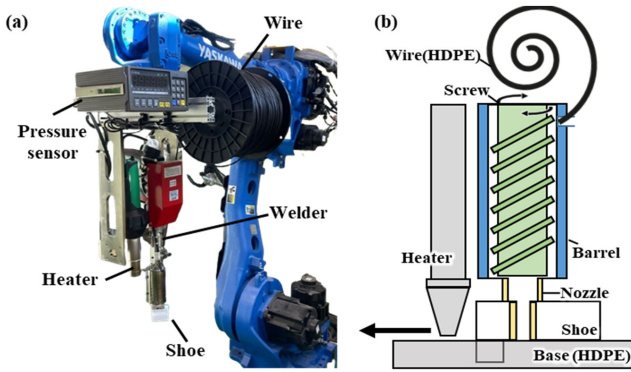


Fig. 1 Configuration of the experimental equipment

패턴을 측정하였다. 또한, 시뮬레이션을 이용하여 용접 변형을 예측 및 검증하였다^[7]. Bai 등은 HDPE 파이프의 모재와 맞대기 용접부의 미세구조를 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였고, 피로 수명이 용접부에 부정적인 영향을 미치지 않는 것을 보고하였다^[8].

HDPE 압출 용접에서 용접 슈(welding shoe)는 용융된 수지가 토출될 때 발생하는 압력을 모재에 전달하여 압출된 수지와 모재 사이에 충분한 접합압력을 확보하는 핵심적인 역할을 하는 부품이다. 특히 고분자 소재의 용접은 금속 용접과 달리 상변화에 의한 결합이 아닌 온도 상승으로 인한 유동성 증가에 따른 분자 사슬 간의 물리적 결합(entanglement)과 재결정화(crystallization)를 통해 이루어지므로 결합력을 높이기 위해서는 용접 압력이 중요하다^[9-10]. 따라서, German welding society(DVS) 코드에서는 슈의 목적 및 용도를 설명하고 있으나^[11], 실제 작업 현장에서는 작업공간, 용접 자세, 용접부 고정 지그의 한계 등으로 용접 이음의 형상을 고려하지 않고, 작업성이 높은 용접 슈를 사용하여 용접하는 경우가 빈번하게 발생하고 있다. 이에, 본 연구에서는 HDPE 압출 용접에서 목적 외 용접 슈 사용에 따른 접합강도 비교를 통해 적절한 용접 방법에 대하여 제시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 HDPE 압출 용접 시스템

일반적으로 HDPE 압출 용접은 수동으로 구동되며 용접자의 전문성에 따라 용접 품질이 결정된다. 따라서 본 연구에서는 수동 용접기(Extruder D4, Sinwoo 社)를 치수 제어가 가능한 6축 매니퓰레이터(6-axis manipulator robot, Yaskawa 社)에 장착하였고 자동 용접을 수행하여 일관성 있는 용접 공정으로 용접을 수행하였다. 실험에 사용된 HDPE 압출 용접 시스템은 크게 이송부와 압출부로 구성되어 있으며 Fig. 1에 나타내었다. 이송부는 용접기의 6축 움직임과 속도를 정밀하게 제어할 수 있는 헤드를 포함하고

Table 1 Extrusion welding condition

Material throughput (kg/h)	1.80
Melting temp. (°C)	240
Pre-heat temp. (°C)	250
Welding speed (cpm)	25
Welding pressure (kgf)	5~20

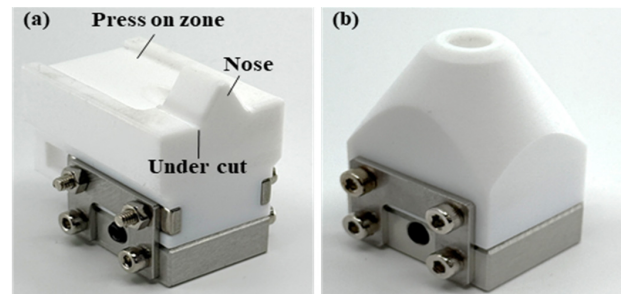


Fig. 2 Photographs of welding shoe: (a) butt shoe, (b) round shoe

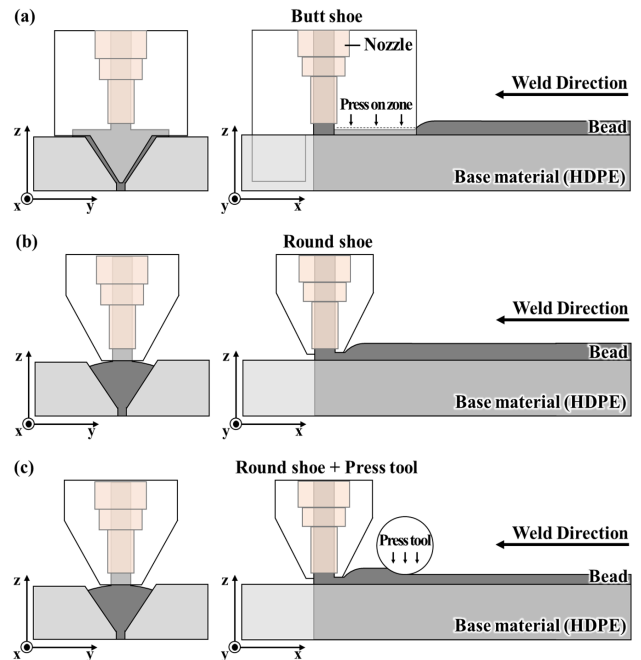


Fig. 3 Diagram of welding using (a) butt shoe, (b) round shoe, and (c) round shoe with press tool

있으며, 압출부에서는 배럴(barrel) 내부의 스크류(screw)가 회전하면서 용접봉(wire)을 공급과 동시에 용융시켜 노즐(nozzle)을 통해 용접 슈(welding shoe)로 압출된다. 압출된 수지는 별도의 열풍기(heater)를 통해 예열된 모재 표면과 접촉하여 접합된다. 공정 조건은 Table 1에 나타내었다.

2.2 용접 슈

용접 슈는 높은 내열성과 비접착성의 특성을 가지는

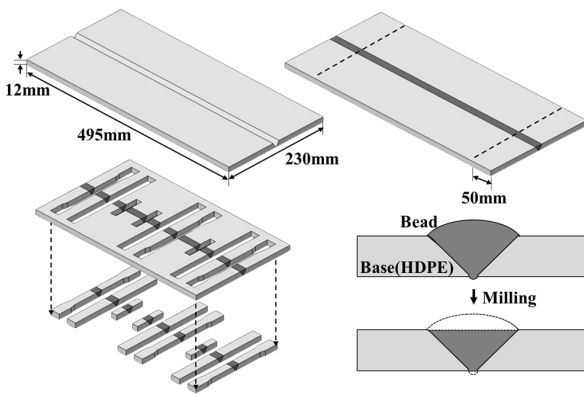


Fig. 4 Preparation of tensile specimens

Polytetrafluoroethylene(PTFE) 소재로 제작되었으며, 용접 슈의 구조는 Fig. 2에 나타내었다. Butt shoe(a)의 구조는 Nose, Under cut, Press on zone 등으로 구분되어 있다. Nose는 용접 진행 방향을 유지하면서 용융된 수지가 용접 진행 방향 앞으로 흘러가는 것을 방지하여 토출압력이 손실되지 않도록 유지한다. Under cut은 용융된 수지가 접합면 외부로 밀려나는 것을 방지하고, 가압 방향을 유지하도록 한다. Press on zone은 용접에 필요한 압력을 모재 표면 및 개선면에 전달한다. Round shoe(b)는 노즐의 형상이 원추형으로 형성되어 있으며, 용접 슈 중에 유일하게 Press on zone 구조가 존재하지 않아 모재와 간섭이 발생하지 않는다. 또한, 개선형상과 무관하게 용접을 수행할 수 있으므로 높은 작업성을 제공한다. 하지만, Butt shoe와 달리 Press on zone 구조의 부재로 압력을 유지하는 시간이 매우 짧은 특징을 가진다. 본 연구에서는 이러한 용접 슈 구조의 차이가 맞대기 용접(butt welding) 상황에서 용접성 및 기계적 물성에 미치는 영향을 평가하기 위해 3가지 용접 Case를 구성하여 용접부의 특성을 평가하였다. Case 1은 맞대기 용접에 전용으로 설계된 Butt shoe를 이용하여 용접을 수행하였다. Case 2는 Round shoe를 이용하여 용접을 수행하였다. Case 3는 Round shoe를 이용하여 용접하되, 용융된 수지가 완전 냉각되기 전에 PTFE 소재로 제작된 압력 도구를 이용하여 용접부에 추가적인 압력을 가하는 방식으로 용접을 수행하였다. 실험에 대한 모식도는 Fig. 3에 나타내었다.

2.3 재료

본 연구에서는 모재와 용접봉의 소재로 HDPE 소재를 사용하였다. HDPE는 높은 내화학성과 우수한 물성 및 재활용이 가능한 특성으로 배관, 저장 용기, 해양구조물 등에 일반적으로 사용되는 소재이다^[12]. HDPE 모재와 용접봉은 어선건조용 압출 공정을 통해 제작되었으며, 모재의 크기는 495 mm × 115 mm × 12 mm이고, HDPE 용접봉의 직경은 4 mm이며, 각 재료의 특성은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Material properties of the HDPE base material and welding wire used in the experiment

	Material	Melt index	T _m	T _c	Tensile strength
		(g/10 min)			
Base	HDPE	0.22	130°C	120°C	26.5 MPa
Wire	HDPE	0.25	130°C	120°C	-

2.4 HDPE 용접부 평가 방법

HDPE 용접부의 강도는 인장 및 굽힘 시험으로 평가하였다. 물성 시험편 제작을 위해 용접된 시험편의 양 끝단 50 mm를 절단하였다. 이는 용접이 시작되고 끝나는 부분에서 용융 재료의 공급이 불안정하여 용접 불량 발생 가능성이 있으므로 재료의 공급이 일정한 용접 시험편 중앙에서 시험편을 취득하기 위함이다. 용접 시험편 제작 공정 모식도는 Fig. 4에 나타내었다. 인장 시험편은 두 가지 종류로 제작하였으며, 용접 비드가 존재하는 인장 시험편(with bead)과 용접 비드가 제거된 인장 시험편(without bead)을 제작하였다. 용접부 비드를 제거하지 않은 시험편은 단면적이 일정하지 않기에 정량적인 비교는 어렵지만, 용접 시험편의 파단 위치 및 파단면 등을 평가하기에 적합하다. 인장시험은 EN 12814-2 규격에 따라 Instron사의 34SC-5 장비를 이용하였다. 50 mm/min 속도로 수행하였으며, 시험편 당 3회 측정하여 평균값으로 결과를 토출하였다^[13]. EN 규격은 일반적으로 플라스틱 재료 시험에 사용되는 ASTM 및 ISO 규격과 다르게 플라스틱 용접부에 대한 평가 범위를 구체적으로 제시하고 있으며, 특히 물성 시험편에 적용 가능한 두께 범위가 타 규격 대비 넓은 범위를 제공하기 때문에 용접 시험편을 평가하기에 적합하다. 굽힘시험은 EN 12814-1 규격에 따라 Instron사의 34SC-5 장비를 이용하였다. 50 mm/min 속도로 수행하였으며, 시험편 당 1회 측정하여 결과를 토출하였다^[14]. 시험 후 용접부의 파단 위치를 관찰하여 용접부의 품질을 평가하였다. 또한, 단면 관찰용 시험편은 비드를 제거하지 않고 취득하였으며, 광학현미경(OM)을 통해 관찰하였다. 용접부 단면 평가는 DVS 2022-1 규격에 따라 평가하였으며 용접 공정에서 발생할 수 있는 결함을 분석하였다^[15].

3. 결과 및 고찰

3.1 용접부 단면 형상

본 연구에서 HDPE 용접 비드 단면 평가는 DVS 2202-1에서 제시하는 기준에 따라 수행되었다. DVS 2202-1에서는 육안검사 방법을 이용하여 열가소성 플라스틱 용접부의 결함을 분류하고 이에 대한 평가 기준을 제시하고 있다. 이 지침에서는 비드 형상(bead shape), 기공(void), 언더컷(undercut) 및 노치(notch) 등에 관한 기준을 제공한다. DVS 2202-1에서 제시하는 비드 높이의

Table 3 Comparison of weld bead height and width depending on the welding

No.	Welding shoe	Height (mm)	Width (mm)
Case 1	Butt shoe	2.43	24.73
Case 2	Round shoe	6.03	
Case 3	Round shoe + Press tool	3	26.4

기준은 $0.1\text{ s} \leq \text{Height} \leq 0.3\text{ s}$ (s =모재 두께)으로 실험에 사용한 12 t 모재 기준 $1.2\text{ mm} \leq \text{Height} \leq 3.6\text{ mm}$ 범위 기준에 비드 높이가 부합해야한다. 용접 비드의 폭은 치수적으로 제한을 하고 있지 않으나, 비드가 완만해야 하며, 노치(notch)가 없어야 한다. 실험 결과, HDPE 용접에 사용된 용접 슈의 형상에 따라 비드의 높이와 폭 차이가 나타났다. 용접부 표면과 비드 단면은 Fig. 5에 나타내었고, 비드의 높이와 폭의 치수는 Table 3에 나타내었다 이러한, DVS 규정을 실험 결과에 적용하였을 경우 Case 1과 Case 3은 기준을 만족하고 있으나, Round shoe를 사용한 Case 2의 경우 과도한 비드 높이(6.03 mm)로 인해 결함으로 판정된다. 과도한 비드 높이는 용접 슈의 구조인 Press on zone의 부재로 압출된 수지에 압력이 가해지지 않아 발생하는 현상이다.

본 연구의 용접 비드 단면에서 관찰된 용접 결함은 기공, 언더컷, 노치 등이 있다. 용접부 기공은 모든 시험편에서 약 2 mm 크기로 나타났다. 특히, Case 3에서는 용접부가 냉각되는 도중 추가적인 가압 공정으로 인해 비드 내부의 기공이 압축되어 기공의 면적이 상대적으로 감소하는 것을 관찰하였다. 이러한, 용접부 기공은 용접봉 품질, 압출 속도, 용접부의 보관 상태 등 여러 요인에 기인할 수 있으며, HDPE 재료적 특성상 이러한 기공의 존재가 기계적 물성의 현저한 감소로 이어지지 않는 것으로 보고된다^[16]. HDPE 용접에서 언더컷과 노치는 용접부에서 집중 응력을 발생시켜 기계적 취약점을 형성하는 원인이 된다^[17]. 이에 DVS 2202-1 규정에서는 노치 및 언더컷의 측면이 가파르지 않은 경우 국부적으로 허용되지만, 1 mm를 초과할 수 없음을 제시하고 있다. Butt shoe를 사용한 Case 1에서는 언더컷 및 노치와 같은 결함이 발생하지 않았다. 반면, Round shoe를 사용한 Case 2와 Case 3에서는 언더컷 및 노치가 발생하였다. 이는, Round shoe는 Press on zone의 부재로 용접 압력을 유지하는 시간이 짧으며, 이로 인해 용융된 수지와 모재 표면 간의 충분한 압력이 형성되기 어렵기 때문에 언더컷 및 노치가 발생한 것으로 판단된다. Case 3에서는 추가 압력 도구를 이용하여 언더컷 및 노치를 줄이고자 하였으나, 압력 도구를 사용하였을 때 용접 표면 품질이 감소했으며, 용접부 길이가 증가할수록 초기에 용융된 수지의 냉각이 빠르게 진행되어 가압으로 인한 접합 성능의 저하가 우려된다. 따라서, DVS 규정에 적합한 용접 비드를 형성하기 위해서는 용접 이음형상에 적합한 용접 슈를 사용하는 것이 중요하다.

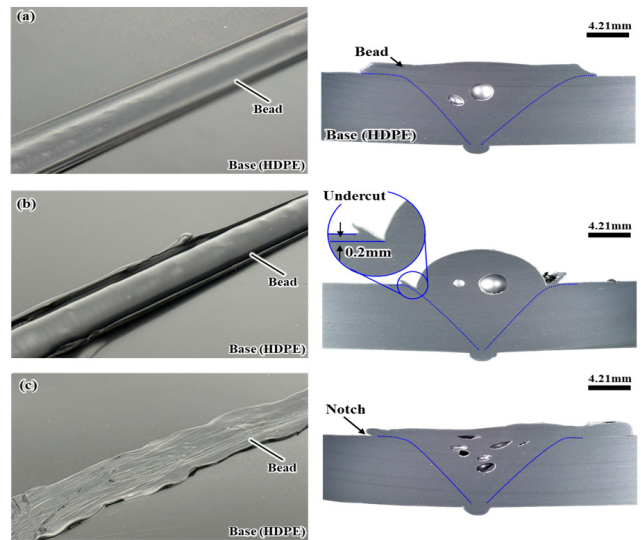


Fig. 5 Bead surface and weld cross-section results: (a) butt shoe, (b) round shoe, and (c) round shoe with press tool

3.2 HDPE 용접부 인장 및 굽힘 강도

인장시험 결과는 Fig. 6에 나타내었다. Butt shoe(case 1)를 사용한 용접부의 최대 인장강도는 약 23.06 MPa로 나타났다. 이는 모재의 인장강도 26.5 MPa 대비 약 13.21% 감소하였지만, DVS 2203-1 Supplement 1에서 제시하는 모재 대비 용접부 강도 기준 (80% 이상)을 만족하는 결과이다^[18]. DVS 2203-1 Supplement 1은 열가소성 재료에 따른 용접 계수(welding factor)를 제시하고 있다. 용접 반면, Round shoe(case 2)를 사용했을 경우 인장강도가 Case 1 대비 약 4% 감소하는 것을 확인하였다. 또한, Round shoe 용접에서 추가적인 가압 공정(case 3)을 적용했을 때는 Round shoe만 단독으로 사용했을 경우보다 약 2% 인장강도가 증가하였다. 굽힘 강도 측정 결과, Case 1의 굽힘 강도는 36.5 MPa로 나타났으며, 모재의 굽힘 강도 32 MPa 대비 약 14.06% 증가하였다. Case 2의 굽힘 강도는 32.9 MPa으로 Case 1 대비 9.86% 감소하였지만, 모재와 유사한 굽힘 강도 수준으로 나타났다. Case 3의 굽힘 강도는 35.9 MPa이며, 가압 공정을 통해 용접부의 굽힘 강도가 약 9.12% 개선되었다. 본 실험을 통해 HDPE 압출 용접에서 용접에 사용하는 용접 슈에 따라서 용접부 강도가 변화하는 것으로 나타났다. 이는, HDPE 용접 과정에서 모재 표면이 열풍기에 의해 용융되고, 압출된 용융 수지가 모재와 접촉하여 개면에서 확산 및 사슬 얽힘이 발생한다. 이러한 과정에서 압력은 모재에 용융된 수지가 깊게 침투할 수 있도록 하며, 이를 통해 고분자 사슬 간의 물리적 거리 감소 및 접촉 면적을 증가시켜 결합 강도를 확보한다^[19]. 따라서, Round shoe를 사용하여 용접했을 때 충분한 용접 압력이 형성되지 않아 압력을 가한 Case 1 및 Case 3에 대비하여 인장 및 굽힘 강도가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

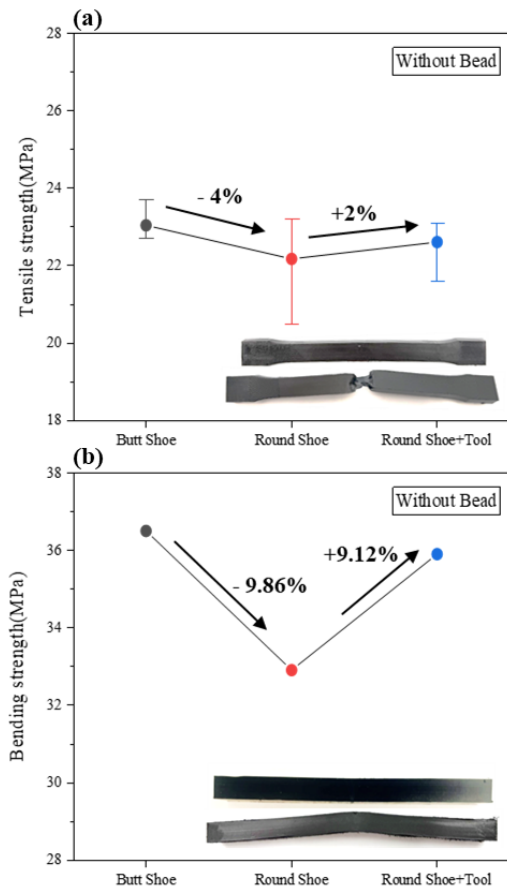


Fig. 6 Results of (a) tensile strength, (b) bending strength

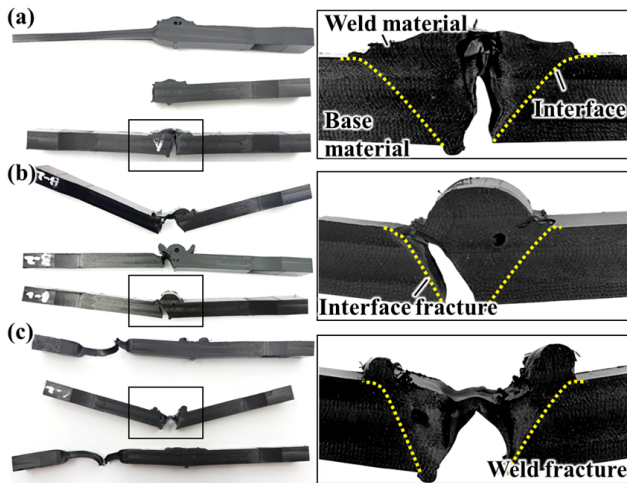


Fig. 7 Fracture locations of tensile specimens without weld bead (a) butt shoe, (b) round shoe, (c) round shoe with press tool

또한, Fig. 7에 나타난 것과 같이 용접 비드를 포함한 인장시험 결과를 통해 용접부의 파단 위치를 확인할 수 있다. Case 1과 Case 3에서는 용접부 내에서 파단이 발생하거나 모재에서 파단이 발생하였지만, Case 2에서는 용접부와 모재의 개면에서 파단이 발

생하였다. 이는 용접 압력이 부족하여 용접부 모재간의 결합이 이루어지지 않았음을 시사한다.

4. 결론

본 연구에서는 HDPE 압출 용접 시 용접 슈의 형상이 용접부의 기계적 성능과 결합 형성에 미치는 영향을 평가하였다. Butt shoe를 사용한 경우 용접 비드 형상이 DVS 기준에 부합하고, 결합이 최소화되어 모재 강도의 87%에 도달하는 최적의 용접 강도를 나타냈다. 반면 Round shoe를 사용한 경우 용접 압력의 부족으로 인해 과도한 비드 높이와 언더컷 등 결합이 발생하였고 용접부의 기계적 강도가 저하되었다. Round shoe에 추가 압력 도구를 적용하면 일부 결합과 기계적 강도가 개선되었으나, 여전히 Butt shoe보다 낮은 수준으로 나타났다. 따라서 HDPE 용접의 구조적 신뢰성을 확보하기 위해서는 용접 이음 형상에 적합한 용접 슈를 선택하는 것이 매우 중요하다.

후기

This study was supported by the Ministry of SMEs and Startups Regulatory-Free Special Zone of “Demonstration of the Reliability test of the HDPE Small Fishing Boat (RS-2024-00461449, KITECH NK250014). This research was financially supported by the Korea Institute of Industrial Technology (KITECH) through the Research and Development “Development of a single-mobility for transportation vulnerables (UR250103)”.

References

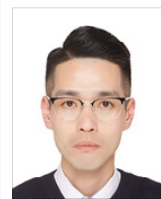
- [1] Wang, Z., Dong, B., Li, M., Ji, Y., Han, F., 2024, Configuration of Low-Carbon Fuels Green Marine Power Systems in Diverse Ship Types and Applications, *Energy Convers. Manag.*, 302 118139, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118139>.
- [2] Le Gué, L., Arhant, M., Davies, P., Vincent, B., Tanguy, E., 2025, Biodegradable Twine for Trawl Fishing: Seawater Ageing and Net Modelling, *Mar. Pollut. Bull.*, 211 117433, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117433>.
- [3] Rudrapati, R., 2022, Effects of Welding Process Conditions on Friction Stir Welding of Polymer Composites: A Review, *Compos. C: Open Access*, 8 100269, <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100269>.

- [4] Pathak, S., Pradhan, S. K., 2020, Experimentation and Optimization of HDPE Pipe Electro Fusion and Butt Fusion Welding Processes, *Materials Today: Proceedings*, 27:Part 3 2925-2929, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.517>.
- [5] Zakar, F., Budinski, M., 2017, Fracture of a Saddle Fusion (Weld) Joint in High Density Polyethylene (HDPE) Pipe, *Eng. Fail. Anal.*, 82 481-492, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.03.009>.
- [6] Lee, C., Woo, S., Kwon, S., Kim, J., 2024, Effect of Preheating Parameters on Extrusion Welding of High-Density Polyethylene Materials, *Polymers*, 16:21 2992, <https://doi.org/10.3390/polym16212992>.
- [7] Lee, J.-M., 2023, Feasibility Study of Shell Element-Based Elastic FE Approach for Welding-Induced Thermal Distortion Prediction in HDPE Welded Structures, *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, 15 100559, <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2023.100559>.
- [8] Bai, C., Lin, R., Lai, H. S., 2024, Investigation of Creep Behavior of HDPE Pipe Butt Fusion Welded Joints Using a Stepped Isostress Method, *Polymers*, 16:13 1803, <https://doi.org/10.3390/polym16131803>.
- [9] Yokomizo, K., Banno, Y., Kotaki, M., 2012, Molecular Dynamics Study on the Effect of Molecular Orientation on Polymer Welding, *Polymer*, 53:19 4280-4286, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2012.07.042>.
- [10] Pawlak, A., 2019, The Entanglements of Macromolecules and Their Influence on the Properties of Polymers, *Macromol. Chem. Phys.*, 220:10 1900043, <https://doi.org/10.1002/macp.201900043>.
- [11] DVS, 2008, Welding of Thermoplastics - Extrusion Welding of Pipes, Piping Parts and Panels Processes and Requirements, DVS 2207-4, DVS-Verlag GmbH, Germany.
- [12] Gnoffo, C., Arrigo, R., Frache, A., 2025, Mechanical Recycling of HDPE-Based Packaging: Interplay Between Cross Contamination, Aging and Reprocessing, *Polym. Degrad. Stab.*, 236 111290, <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2025.111290>.
- [13] DIN EN, 2021, Testing of Welded Joints of Thermoplastics Semi-finished Products - Part 2: Tensile Test, DIN EN 12814-2, CEN (European Committee for Standardization), Germany.
- [14] DIN EN, 1999, Testing of Welded Joints of Thermoplastics Semi-finished Products - Part 1: Bend Test, DIN EN 12814-1, CEN (European Committee for Standardization), Germany.
- [15] DVS, 2008, Imperfections in Thermoplastic Welded Joints Features, Description, Evaluation, DVS 2202-1, DVS-Verlag GmbH, Germany.
- [16] Lai, H. S., Kil, S. H., Yoon, K. B., 2015, Effects of Defect Size on Failure of Butt Fusion Welded MDPE Pipe Under Tension, *J. Mech. Sci. Technol.*, 29 1973-1980, <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0418-1>.
- [17] Rowe, R. K., Ali, M. M., 2024, Effect of Welding Parameters on Properties of HDPE Geomembrane Extrusion Welds, *Geotext. Geomembranes*, 52:4 355-367, <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2023.12.002>.
- [18] DVS, 2010, Testing of Welded Joints Between Panels and Pipes Made of Thermoplastics Requirements in the Tensile Test Short-time Tensile Welding Factor fz, DVS 2203-1 Supplement 1, DVS-Verlag GmbH, Germany.
- [19] Ge, T., Pierce, F., Perahia, D., Grest, G. S., Robbins, M. O., 2013, Molecular Dynamics Simulations of Polymer Welding: Strength from Interfacial Entanglements, *Phys. Rev. Lett.*, 110 098301, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.098301>.



Suseong Woo

Researcher in Korea Institute of Industrial Technology(KITECH). He is interested in Welding Optimization, Direct Energy Deposition and Polymer Welding.
E-mail: mercury@kitech.re.kr



Yonghwan Kwon

Researcher in Korea Maritime Transportation Safety Authority(KOMSA). He is interested in Strength Evaluation and Verification of Polymer Welds.
E-mail: kyh82@komsa.or.kr



Jisun Kim

Researcher in Korea Institute of Industrial Technology(KITECH). He majored in Welding Engineering and Laser Welding, Resistance Welding, Process Optimization and Wire Arc Additive Manufacturing.
E-mail: kimjisun@kitech.re.kr