



DE 알고리즘을 이용한 파이프-플랜지 용접의 최적 공정변수 도출에 대한 연구

윤태종^{a,*}, 나현호^a, 오원빈^a, 조민호^a, 오도원^a, 민후식^a, 윤정인^a, 고경완^b

Derivation of Optimal Process Variables for Pipe-flange Welding Using DE Algorithm

Tae-Jong Yun^{a,*}, Hyun-Ho Na^a, Won-Bin Oh^a, Min-Ho Cho^a, Do-Won Oh^a,
Hu-Sik Min^a, Jeong-In Yun^a, Kyung-Wan Go^b^a Small and Medium Future Ship Headquarters, Korea Marine Equipment Research Institute^b Easy System Co., Ltd

ARTICLE INFO

Article history:

Received 14 October 2024
Revised 5 November 2024
Accepted 15 November 2024

Keywords:

DE algorithm
Optimal process variables
Pipe-flange welding
Gas metal arc welding

ABSTRACT

In piping spools, the pipe-flange welding process accounts for 30%–70% of the piping manufacturing process. The efficiency of the welding process is important for enhancing the competitiveness of products. Moreover, the development of an automated welding technology required for the production of pipe flanges is being promoted in the industrial sector. In recent years, the productivity of the pipe-flange welding process applied in industrial sites has been improved by using a dual torch to simultaneously weld inside and outside the flange. However, studies on the welding process applied to a dual torch for the STPG 370 and DH36 materials and on the development of reliable optimal process variable derivation and weld bead quality prediction algorithms using mathematical methods are insufficient. Herein, an optimization algorithm was developed for the variables of the pipe-flange welding process to satisfy the flange weld criteria of AWS D1.1/D1 and the ASME code criteria.

1. 서론

조선소의 용접 자동화 기술은 발전 진행 중이나 여전히 부분적 자동화 분야이고 타 산업분야(특히 자동차 산업)에 비해 생산성은 낮은 수준이다. 대형 조선소는 60% 수준의 용접 자동화 공정률을 가지며 완전 용접 자동화를 위해 기술개발 투자가 활발히 진행 중이나, 중소형 조선소의 경우 자동화를 위한 기술개발 투자가 어려운 실정이다. 선박 생산공정 중 용접·도장 작업은 전체 공정 50% 이상 차지하며, 대형 조선소는 용접·도장 공정에 자동화 장치를 개발하여 가격 경쟁력 확보를 위해 노력 중이나 중소·중견 조선소

는 인력과 자본력 부족으로 도입이 어려운 실정이다. 국내 용접산업은 기술력뿐만 아니라 전문인력이 부족한 실정이며, 이는 대부분의 용접설비 회사가 중소기업 수준에 머물러 있고, 고급인력 엔지니어들의 용접 관련 업종에 대한 기피 현상 때문이다^[1].

기존의 경우 용접사의 기량에 따라 용접을 수행하는 환경에서, 신규 인력 대체 시에 용접기의 설정된 공정변수에 따른 파이프-플랜지 용접부의 품질 차이가 크게 발생한다. 대부분 파이프-플랜지 용접은 숙련용접사의 기량에 의존하여 용접하고 있으며, 대형 조선소의 경우 단순 기능 위주의 2축 용접로봇 혹은 조선용으로 특수 개발된 고기능 자동용접 로봇을 이용하여 일부 자동화하고 있으나

* Corresponding author. Tel.: 82-61-240-5036

E-mail address: tjyun@komeri.re.kr (Tae-Jong Yun).

보편화되지 못하고 있는 실정이다.

파이프-플랜지 용접에 대한 연구로 Kim^[2]은 SUS Flange와 Pipe 연결 용접부위에서 발생하는 모멘트 데이터를 분석하고, 레인플로우 집계법을 이용하여 각 단계의 굽힘 모멘트 진폭과 횡수를 구하였으며, 이것을 선형손상법칙에 적용하여 손상률을 구하였다. Youn et al.^[3]은 플랜지의 3차원 공간 상에서 임의의 위치와 자세를 바로잡기 위해 3차원 정밀 계측장치에 대해 개발하였으며, Lee^[4]는 DE 알고리즘을 이용한 변수에 따른 최적화에 대한 연구를 수행하였다. Monomo et al.^[5]은 파이프 플랜지를 감지하기 위한 GPR 방법 및 고정 오프셋 방법론을 사용하여 파이프라인을 따라 파이프 플랜지의 품질을 판단하는 연구를 수행하였다.

파이프-플랜지 용접 품질을 확보하기 위하여 위와 같은 다양한 연구와 더불어, 용접 품질 확보를 위한 연구가 필요하며, 용접 품질 확보를 가장 손쉽게 향상 시키는 방법으로는 비드형상을 제어하는 것이다. 위와 같이 파이프-플랜지 용접의 품질 확보를 위해 다양한 기법들이 연구되고 있으나 대형 파이프-플랜지의 용접시 용접 순서(파이프-플랜지의 접합면인 외부 용접후 내부 용접 진행)에 따라 발생하는 변형에 의한 용접부 Gap이 발생한다. 최근에는 용접에 의한 변형으로 발생하는 Gap 차이를 줄이기 위한 2개의 Torch를 적용한 동시 용접 적용한 파이프-플랜지 용접방법이 개발되고 있으나 품질 향상을 위해 최적 용접 공정변수 제시에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 듀얼토치를 적용하여 용접 변형에 의한 Gap 차이를 줄이고, 파이프-플랜지 용접부 품질향상을 위한 최적 용접 공정변수를 도출하고자 한다.

2. 용접 실험

2.1 Fillet 형상 예비 용접실험

650 A 크기의 파이프-플랜지 용접에 필요한 공정변수 범위 도출을 위해 Plate를 이용한 Fillet 형상의 예비 용접실험을 통해 공정변수의 범위를 설정하였다. 예비 용접실험을 위하여 용접용 캐리지가 사용되었고, 전체 시스템은 Guide Rail, Wire Spool 및 Wire Feeding Motor를 사용하여 Fig. 1과 같이 구성하였다. 용접기는 DWI PF-III 모델 650 A Welding system, Ø1.2의 DW-N709SP 와이어 및 CO₂ 100% 보호가스를 사용하였다. GMA 용접의 용접결함의 원인인 불순물(녹, 스케일, 산화물)과 기공을 제어하기 위해 용접을 수행하고자 하는 시험편 표면을 깨끗이 닦아 내었다.

예비 실험을 위하여 파이프 재질의 STPG 370, 플랜지 재질의 DH 36를 사용하였으며, 200×450×12 mm, 100×450×16 mm 규

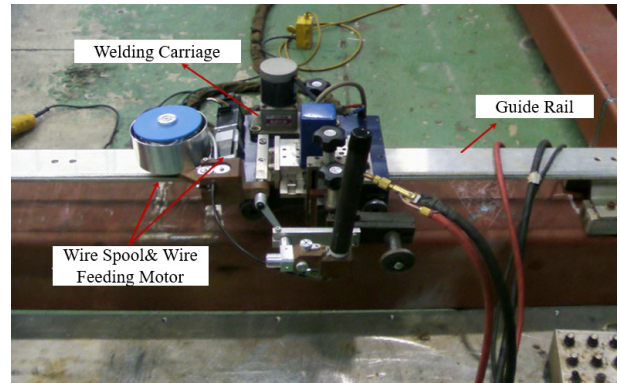


Fig. 1 Configuration of welding carriage for experiments

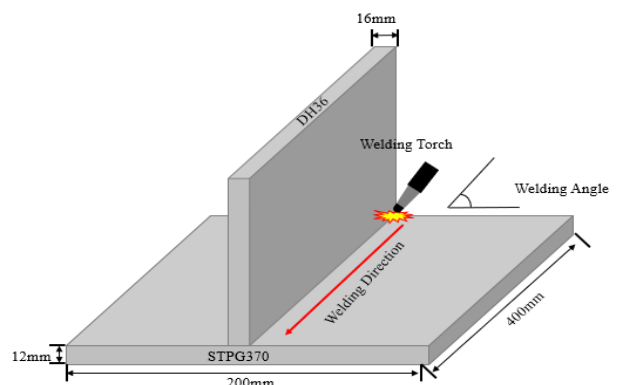


Fig. 2 A schematic diagram for fillet welding

Table 1 Mechanical properties of STPG 370

Tensile strength (MPa, min)	370
Yield strength (MPa, min)	215
Elongation (% , min)	17
Impact (J)	41
Modulus of elasticity (GPa)	948
Test pressure (MPa)	5.0

Table 2 Chemical composition of STPG 370

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	V	Al
STPG370	0.186	0.369	1.089	0.018	0.004	0.030	0.010	0.014	0.013	0.030

격의 Plate 시험편을 제작하였다. 시험편의 안정적인 용접성을 확보할 수 있도록 Fillet 형상의 시험편을 제작하고, Plate를 이용한 Fillet 예비 용접실험을 수행하였다. Fillet 용접공정을 위한 개략도는 Fig. 2와 같으며, 시험편의 기계적 성질 및 화학적 조성은 Tables 1~4와 같다.

용접공정 변수에 따른 비드형상을 확인하고 파이프-플랜지 용접에 적용하기 위한 공정변수 범위 도출을 위한 목적으로 진행되었으며, 비드형상 변화에 주요 요인이 되는 용접전류, 용접전압, 용접속도로 선정하여 용접실험 계획을 수립하였다. 용접 실험계획은 모든

Table 3 Mechanical properties of DH 36

Density (g/cm ³)	7.8
Tensile strength (MPa, min)	490~620
Yield strength (MPa, min)	350
Elongation (% , min)	19
Bulk modulus (GPa)	160
Shear modulus (GPa)	80

Table 4 Chemical composition of DH 36

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	V	Fe
DH 36	0.180	0.100	0.900	0.040	0.040	0.250	0.400	0.350	0.100	96.40

Table 5 Welding parameters and their levels

Parameter \ Level	-1	0	1
Welding current (A)	200	220	240
Welding voltage (V)	25	27	29
Welding speed (cm/min)	15	20	25
Fixed variable	- Shielding gas flow rate : 15 l/min - Welding angle: 45°		

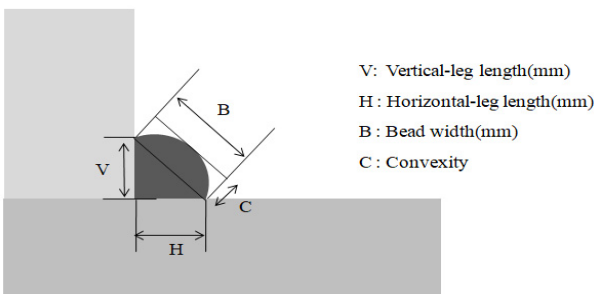


Fig. 3 A schematic diagram of bead geometry for fillet welding

실험계획법 중에 가장 중요하고 최적화 및 인자 선별 목적으로 사용되는 완전요인실험계획법(full factorial design)으로 구성하였다. 요인설계(factorial design)의 경우 각각의 입력변수들의 수준을 일정 간격으로 배치하여 모든 입력변수들간 수준(level)의 조합에 의해 실험이 이루어지게 된다. 각각의 공정변수가 비드형상에 미치는 영향을 파악하기 위해 적정 범위 값을 바탕으로 입력변수의 실험변수 및 수준은 Table 5와 같이 설정하였다. 27개의 실험조건을 사용하여, 순차적으로 3회 반복 실험을 실시하였다.

앞에서 기술한 바와 같이 입력변수는 용접전류, 용접전압, 용접속도이며, 이에 따른 출력변수로는 비드 형상(수직 각장, 수평 각장, 비드 폭, 볼록)으로 선정하였다. Fig. 3은 비드형상의 측정을 위한 모식도를 나타내며 Fig. 4는 본 용접공정의 입력변수 및 출력변수를 포함한 용접공정의 상관관계를 나타내고 있다.

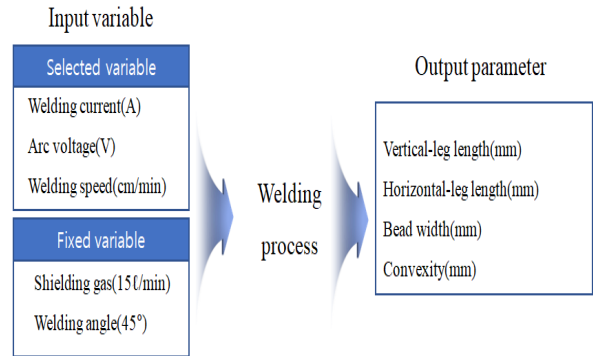


Fig. 4 Input and output variables of fillet welding

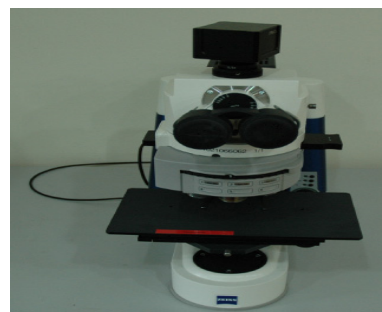


Fig. 5 Device for bead measurement

Plate를 이용한 Fillet 용접실험 결과 용접조건에 따라 Fillet 용접부의 비드형상에 미치는 영향을 판별하기 위해 광학 현미경을 이용한 용접부 단면형상(macro)을 촬영하여 용접공정변수의 특성을 분석하고자 하였다. 용접부의 비드형상을 측정하기 위하여 Fillet 시험편의 용접부 가로축 중간부분을 레이저 절단기(laser cutting machine)를 사용하여 60×60 mm의 크기로 절단하고 폴리싱(polishing)을 수행하기 위하여 단면부를 연삭하였다.

절단한 시험편의 단면 비드형상을 착색하여 잘 나타내기 위해 에칭(etching) 작업을 수행하였으며, 에칭을 통해 비드형상(수직 각장, 수평 각장, 비드 폭, 볼록) 측정 위치 기준을 정하였다. 에칭에 사용된 부식액(etchant)은 질산, 에탄올을 각각 1 : 9의 비율로 혼합하여 사용하였다. 단면부에 대해 용입 형상을 측정하기 위하여 광학 현미경 시스템을 이용하였으며, 27회 실험조건 단면 비드형상을 측정하였다.

GMA 용접공정에는 일반적으로 제품 품질, 생산성 및 비용 효율성에 영향을 미칠 수 있는 많은 수의 용접 매개변수가 포함된다. 본 연구에서는 Dual torch를 이용한 파이프-플랜지 이음 용접의 최적의 용접조건을 결정하는데 중요한 역할을 하는 비드형상을 용접품질 연구에 적용하였다.

그러나 GMA 용접 Process에서 용접 매개변수와 비드형상 간의 관계는 여러 용접 매개변수가 관련되어 있기 때문에 복잡하다. 용접기의 사양, 와이어, 보호가스, 재료 치수 및 구성과 같은 용접

Table 6 Standard on AWS D1.1

Base metal thickness (mm)	AWS D1.1	
	Minimum size of leg length (mm)	
T<6	3	
6 ≤ T<12	5	
12 ≤ T<20	6	
20 ≤ T	8	

Table 7 Standard on ASME Code

Base metal thickness (mm)	AWS D1.1	
	Bead width (mm)	Max Convexity (mm)
T<6	-	-
6 ≤ T<12	8	2
12 ≤ T<20	8~25	3
20 ≤ T	25	5

매개변수는 상대적으로 고정될 수 있는 반면, 매개변수인 용접전류, 용접전압 및 용접속도는 GMA 용접공정 중에 변경될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 용접전류, 용접전압 및 용접속도를 용접시험을 위한 입력변수로 선정하였다. 본 연구를 통해 용접부 품질을 확보하고자 하였으며, 해당 Base metal thickness는 파이프 12 T, 플랜지 16 T에 해당하는 기준을 선정하였다. 따라서 Tables 6~7에 나타난 것과 같이 AWS D1.1, ASME Code에서 요구하는 비드형상이 도출되는지 확인하였다.

파이프-플랜지 용접공정의 비드형상에 미치는 공정변수(용접전류, 용접전압, 용접속도)의 영향을 분석한 결과 용접전류가 증가함에 따라 수직 각장, 수평 각장, 비드 폭, 불록이 증가함을 확인하였다. 용접전압이 증가할수록 수직 각장, 수평 각장, 비드 폭이 증가함을 확인하였으며, 반대로 용접속도가 높을 경우 수직 각장, 수평 각장, 비드 폭은 감소함을 확인하였다. 불록의 길이는 용접전류에 의해서 길이가 증가함을 확인하였으며, 위와 같이 공정변수의 따라 비드형상이 결정되는 것을 확인하였다.

Plate를 이용한 예비 용접시험 결과 대부분의 실험조건에서 매우 안정적인 비드형상이 형성됨을 확인하였으며, Weld Defects 조건을 제외고 파이프-플랜지 용접공정에 적용하기 위한 용접범위를 재산출하였다.

2.2 파이프-플랜지 용접시험

예비시험을 통해 재산출된 공정변수 범위를 적용한 파이프-플랜지 용접시험을 위해 Fig. 6과 같이 Turning roller, Welding manipulator, Automatic wire feeder, Monitoring system 등 GMA 용접 시스템을 사용하였다. 용접기는 D社 DWI PF-III모델 650A Welding System, Ø1.2의 PREMIARC社 DW-N709SP 와이어 및 CO₂ 100% 보호 가스가 사용하였다.



Fig. 6 Configuration of welding system in pipe-flange

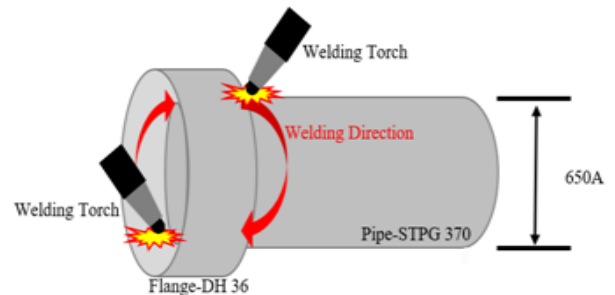


Fig. 7 A schematic diagram for pipe-flange weld process

본 실험을 위해 650A 파이프 STPG 370, 플랜지 DH 36 재질을 사용하였으며, 파이프-플랜지 시험편을 제작하였다. 파이프-플랜지 용접시험도 마찬가지로 Plate를 이용한 예비 용접시험과 같이 시험편에 용접결합의 원인이 되지 않도록 표면부 이물질은 Stainless wire-brush 및 Sand paper로 시험편을 깨끗이 닦은 뒤 용접을 수행하였다.

본 장에서는 예비시험에서 도출한 용접공정 변수에 비드형상을 확인하여 비드형상의 영향을 미치는 적정 범위를 도출하여 파이프-플랜지 용접 실험계획을 재수립하였다. 파이프-플랜지 용접 개략도는 Fig. 7과 같이 나타내며, 실험 수준은 Table 8과 같이 나타낸다. 위에서 기술한 바와 같이 입력변수는 용접전류, 용접전압, 용접속도이며, 이에 따른 출력변수로는 비드형상으로 선정하였다. Fig. 8은 비드형상의 측정을 위한 모식도를 나타내며 Fig. 9는 파이프-플랜지 용접공정의 입력변수 및 출력변수들의 상관관계를 나타낸다.

STPG 370, DH 36 재질의 파이프-플랜지 용접시험을 통해 용접 공정변수에 따라 용접부의 형상에 미치는 영향을 판별하고자 하였으며, 파이프-플랜지 용접시험 결과 전반적으로 양호한 비드를 형성하고 외관을 확인한 결과 결함이 발생되지 않음을 확인하

Table 8 Welding parameters and their levels

Parameter \ Level	-1	0	1
Welding current (A)	220	230	240
Welding voltage (V)	26	27	28
Welding speed (cm/min)	20	22	24
Fixed variable	- Shielding gas flow rate : 15 l/min - Welding angle : 45°		

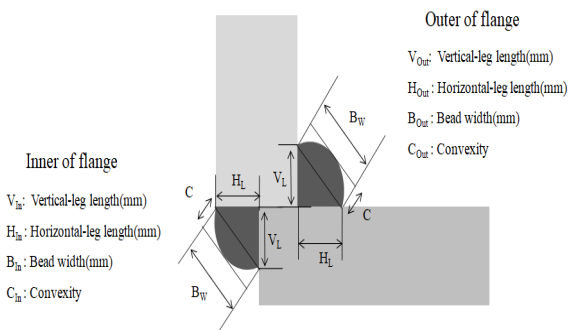


Fig. 8 A schematic diagram of bead geometry for pipe-flange welding

였다. 또한, 용접부의 절단부 단면형상을 촬영하여 용접부 특성을 분석하고자 하였으며, 단면의 비드형상의 크기를 측정하였다. 위에서와 같이 27회의 실험조건 및 3회 반복 용접의 조건에 따른 플랜지 외부 비드형상(수직 각장, 수평 각장, 비드 폭, 볼록), 플랜지 내부 비드형상(수직 각장, 수평 각장, 비드 폭, 볼록)을 측정하여 AWS D1.1 요구하는 필렛 용접 각장 길이 6 mm 이상, ASME Code에서 요구하는 비드 폭 8 mm 이상 25 mm이하, 볼록 3 mm 이하의 길이가 도출됨을 확인하였다.

3. 최적 공정변수 도출

3.1 최적화 알고리즘

종래의 용접공정 최적화는 작업자의 직관, 경험 그리고 선행조사를 바탕으로 하는 대상 시스템을 기초로 시행 착오법을 적용하였다. 그러나 비드형상에 따른 공정변수를 최적화하기 위해 비드형상에 대한 용접전류, 용접전압, 용접속도 등 복잡하고 상호작용이 매우 크기 때문에 시행 착오법의 사용은 부적절한 최적값을 유발시켜 부정확한 값을 예측할 수 있다.

특히 시행 착오법은 반복적인 과정에서 소모되는 많은 시간과 노력을 필요로 한다는 매우 비경제적인 문제점이 발생 된다. 기존의 방법이 가지는 단점을 극복하기 위해서 최적화 알고리즘을 사용하며, 최적화 알고리즘은 기존의 방법이 가지는 경험적인 측면을 제거하는 대신 수학적으로 표현된 알고리즘을 사용하여 시스템

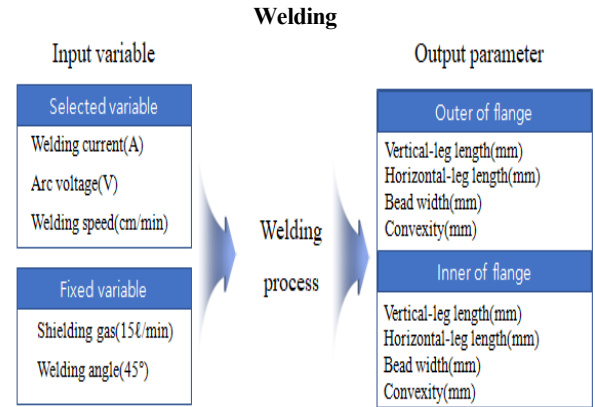


Fig. 9 Input and output variables of the pipe-flange welding

의 변수들을 수정함으로써, 시스템이 최적값을 가지도록 하는 일련의 과정을 말한다. 최적화 알고리즘을 이용하여 공정을 최적화하는 과정은 크게 목적함수와 제약 조건의 두가지 요소로 구성된다. 목적함수는 시스템의 특성을 수학적으로 모형화한 것이며, 제약조건은 시스템의 변수들이 가질 수 있는 조건을 나타낸다. 따라서, 식 (3.1)과 식 (3.2) 그리고 식 (3.3)은 각각 x 를 변수로 가지는 임의의 시스템의 목적함수 $f(x)$ 와 이 함수를 최적화시키는데 필요한 제약조건 및 범위를 나타낸다^[5-7].

$$Optimize f(I, V, S) \tag{3.1}$$

$$g(I, V, S) = 0 \tag{3.2}$$

$$V_{Lo} \leq V \leq V_{Up}, H_{Lo} \leq H \leq H_{Up}, B_{Lo} \leq B \leq B_{Up}, C \leq C_{Up} \tag{3.3}$$

여기서 I, V, S 는 파이프-플랜지 용접공정이 가지는 n개의 변수들을 나타내는 벡터이고, $V_{Lo}, V_{Up}, H_{Lo}, H_{Up}, B_{Lo}, B_{Up}, C_{Up}$ 는 각각의 도출결과인 하한경계와 상한경계를 나타내는 벡터이다.

최적화 공정 개발 단계에서는 가중치를 부여할 수 있는 최적화 기법, 활성 함수의 선택, 함수 공차(function tolerance)등을 선정하여 고효율의 분석요인을 선정하여야 하며, 최적화 기법을 적절히 구동시키기 위해서는 다양한 함수 공차들을 무작위로 설정한다. 최적화 알고리즘을 실행할 때마다 결과가 달라지므로 함수 공차에 따른 가장 좋은 해답이 최적화 결과로 제시된다. 이러한 방법들을 통해 최적의 공정변수를 도출하는 비드형상을 확인하여야 하며, 다양한 기법에 따라 분석되는 동안 요인들이 수렴되지 않으면 함수 공차들을 재선정이 요구된다. 최적화 Work flow는 목적함수에 주어진 문제에 대해서 결정되며, 상이한 분석 상황에 적합한 단일 도출 함수 공차값은 없으므로 시행착오를 통해 제한조건과 목적함

수 결과를 상호·비교하여 함수 공차값을 선택한다.

작업자가 요구하는 비드형상을 도달하기 위한 용접 공정변수 최적화를 위해 AWS D1.1 및 ASME Code에서 요구하는 수직 각장, 수평 각장, 비드 폭, 볼록의 품질 기준을 선정하였다. 파이프-플랜지 용접부를 형성하기 위해 용접 공정변수를 기준으로 용접부의 품질 즉, AWS D1.1 및 ASME Code 기준을 예측할 수 있는 수학적 모델을 개발하고 이를 품질평가에 반영하고자 한다. 따라서 비드형상을 예측하기 위해 반응표면분석법을 이용하여 수학적 모델을 개발하여 DE알고리즘에 적용하였다.

3.2 DE(differential evolution) 알고리즘

DE 알고리즘은 Multi-dimensional real-valued 함수의 최적화를 위해 쓰지만 Gradient를 사용하지 않기 때문에 목적 함수가 미분 가능하지 않아도 되는 특징이 있다. DE 알고리즘은 기본적으로 유전 알고리즘(genetic algorithm)과 유사한 구조를 가지고 있으며, Population이라고 하는 초기 Candidate solution 집합을 생성하고, Mutation, Crossover, Selection의 과정을 통해 Population이 최적해를 가지도록 Candidate solution들을 진화시키는 방식을 사용한다.

각 개체간의 벡터 차이를 이용하는 알고리즘으로써 현재 널리 사용되는 휴리스틱 탐색법인 유전 알고리즘과 유사한 알고리즘으로써 초기 개체군을 생성하고 이들을 교배, 변이 선택 과정을 거쳐 적합도가 개선되는 새로운 개체들을 추출해 낸다는 공통점이 있다. 하지만 기존의 유전 알고리즘은 표현형을 유전형으로 바꾸는 코딩 과정이 필요한 반면 차분진화 알고리즘은 개체를 벡터로 표현하기 때문에 이러한 과정이 필요 없으며 새로운 개체를 생성할 때 산술적 연산을 통해서 생성한다는 차이점이 있다.

DE는 간단한 구조를 갖으면서도 전역 최적해에 대한 수렴성이 뛰어나고 다른 진화 알고리즘들에 비해서 컴퓨팅 시간이 짧은 장점을 지닌다. DE는 해 집단 기반의 병렬탐색을 수행하며 다른 진화 알고리즘과는 달리 차분 진화는 확률분포에 기반한 변이이산자 (mutation operator)에 의존하지 않는다. 차분진화에서 사용되는 연산자는 주로 임의로 선택된 개체들 사이의 차이를 사용한다^[8].

DE 알고리즘은 진화 과정을 기반으로 후보 솔루션을 반복적으로 개선하여 전역 최적화 문제를 해결하기 위한 진화 알고리즘이며, 이 알고리즘은 Storm과 Price^[9]에 의해 도입되었다. 휴리스틱은 최적이지 아닐 수 있지만 고전적인 방법이 정확한 솔루션을 찾을 수 없거나 너무 느릴 때 충분한 솔루션을 생성하기 위해 실용적인 방법을 사용하는 문제 해결에 대한 접근 방식이다.

DE는 후보 솔루션 모집단을 초기화하고 현재 솔루션을 결합하여 새로운 후보 솔루션을 생성한 다음 교차하여 조건에 따라 최상의 솔루션을 선택하여 문제를 최적화한다^[10].

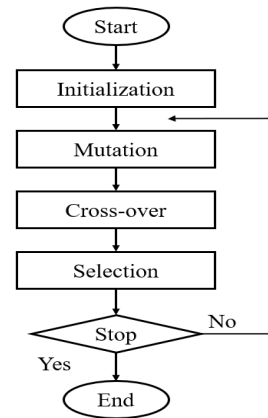


Fig. 10 The structure of the DE algorithm

Table 9 Parameters and their values for a DE algorithm

Optimal algorithm		DE (differential evolution)
Function tolerance (population size)		10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100
Dimensions of the vector		30
Mating probability		0.5
Reference probability		0.2
Weight (f)		0.95
Range of parameter	Min. value	220 A, 26 V, 20 cm/min
	Max. value	240 A, 28 V, 24 cm/min
Range of constraint value	Leg length	$L \geq 6 \text{ mm}$
	Bead width	$8 \text{ mm} \leq B \leq 25 \text{ mm}$
	Convexity	$C \leq 3 \text{ mm}$
Solver		DE global optimization
Algorithm		Differential evolution algorithm

DE 알고리즘은 매개변수 선택과 개체 수, 벡터의 차원 수, 교배 확률, 참조확률, 가중치를 설정해야 한다. 본 논문에서는 DE 알고리즘을 적용하여 최적공정변수 도출을 위해 사용된 변수는 일반적으로 사용되는 값을 설정하였으며, 개체 수 10~100, 벡터의 차원 수 30, 최대 목적함수 계산 횟수 100,000, 교배 확률 0.5, 참조 확률 0.2, 가중치 f는 0.95로 설정하였다. 설정값 중 개체 수는 최적화 성능에 큰 영향을 가지며, 우수한 성능을 제공하는 DE 파라미터인 개체 수를 변경하여 최적 공정변수를 도출하였다. DE 알고리즘의 Flow chart는 Fig. 10에 나타내며, DE 최적화 기법의 변수들은 Table 9에 나타낸다. 최적화 기법에 의해 산출된 결과는 Table 10에 나타낸다. 이를 토대로 파이프-플랜지 필렛 용접부의 비드형상에 대한 최적 공정변수를 확인하였다.

DE 최적화 기법을 적용하여 Population Size(tolerance size)에 따른 비드형상을 비교하여 목적함수와 제한조건을 통해 AWS D1.1 및 ASME Code를 만족시키는 파이프-플랜지 필렛 용접의 최적 공정변수를 선정하였다.

Table 10 The results of various tolerance size using DE algorithm (outer of flange)

Tolerance size	Variables of optimal			Results of constraint (outer of flange, mm)			
	Welding current (A)	Welding voltage (V)	Welding speed (cm/min)	V _{Out}	H _{Out}	B _{Out}	C _{Out}
10	226.041	27.934	20.132	7.000	7.360	12.35	1.291
20	228.503	27.600	20.780	7.000	7.461	12.61	1.479
30	234.006	27.215	23.830	6.999	7.791	13.50	2.206
40	232.741	26.678	20.124	6.999	7.800	12.96	1.910
50	235.415	26.378	21.831	6.999	7.922	13.37	2.179
60	229.208	27.501	20.970	6.999	7.494	12.69	1.540
70	228.860	27.761	21.904	7.000	7.446	12.76	1.525
80	228.995	27.844	22.348	7.000	7.452	12.83	1.564
90	235.151	26.399	21.621	7.000	7.908	13.32	2.144
100	231.090	27.785	23.590	6.999	7.600	13.21	1.893

Table 11 The results of various tolerance size using DE algorithm (inner of flange)

Tolerance size	Variables of optimal			Results of constraint (outer of flange, mm)			
	Welding current (A)	Welding voltage (V)	Welding speed (cm/min)	V _{In}	H _{In}	B _{In}	C _{In}
10	226.041	27.934	20.132	7.320	7.451	11.52	1.798
20	228.503	27.600	20.780	7.423	7.535	11.32	1.617
30	234.006	27.215	23.830	7.768	7.716	10.93	1.404
40	232.741	26.678	20.124	7.548	7.438	10.76	1.207
50	235.415	26.378	21.831	7.679	7.592	10.57	1.095
60	229.208	27.501	20.970	7.453	7.555	11.23	1.566
70	228.860	27.761	21.904	7.454	7.628	11.36	1.660
80	228.995	27.844	22.348	7.470	7.654	11.37	1.685
90	235.151	26.399	21.621	7.662	7.578	10.58	1.101
100	231.090	27.785	23.590	7.616	7.713	11.24	1.636

DE 최적화 기법의 경우 Tolerance size 10~100에서 모두 AWS D1.1 및 ASME Code 기준인 제약조건을 만족하였고, 내외부 각장 길이의 범위 차가 작은 조건으로 최적 공정변수를 선정하였다. AWS D1.1 및 ASME Code 기준인 제약조건을 만족하는 최적의 공정변수는 Function tolerance 10의 용접전류 226.041 A, 용접전압 27.934 V, 용접속도 20.132 cm/min으로 선정하였다.

4. 결론

본 연구에서는 파이프-플랜지 용접에 적용하기 위한 공정변수 범위 도출을 위해 Plate를 이용한 Fillet 형상의 용접실험을 총 27회 수행하였다. 예비 용접실험 결과 대부분의 실험조건에서 매우

안정적인 비드형상이 형성됨을 확인하였으며, Weld defects 조건을 제외고 최적의 공정변수 범위를 설정하였다. 설정한 공정변수 범위를 적용한 파이프-플랜지 용접실험을 통해 AWS D1.1 및 ASME Code에서 요구하는 품질에 만족 여부를 검증하였다. 측정된 데이터를 기반으로 AWS D1.1 및 ASME Code 기준을 제약조건으로 설정하여 DE 알고리즘을 이용한 최적 공정변수를 도출하였다.

본 연구의 결과는 파이프-플랜지 용접공정에서 획득한 용접정보를 활용하여 용접부 품질을 보장하기 어려운 부분에 효율적으로 적용될 뿐만 아니라 파이프-플랜지 용접공정의 자동화를 위해 용접 데이터 실시간 계측 및 인텔리전트 시스템 구성에 효과적인 수단으로 이용될 것으로 예상된다. 또한 조선산업, 의장, 배관 스프링 등을 제작하는 공정에서 숙련자가 아닌 용접사도 쉽게 수행할 수 있도록 최적의 공정변수를 선정하였으며, 시행착오로 발생하는 공정손실을 방지하기 위한 시스템으로도 활용이 가능할 것으로 판단된다. 향후 도출된 다양한 용접 공정변수를 추가 적용하고 기계적 강도 및 화학적 성분 등을 포함하여 현장 적용 검증에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다.(2021RIS-002).

References

- [1] Song, S. H., Im, Y. B., Kim, Y. S., Kim, J. S., 2003, Development of the Heating Coil in the Oil Tanker using Oscillating Capillary Tube Heat Pipe, Proceeding of The Society of Airconditioning and Refrigerating Engineers of Korea Summer Annual Conference, 1219-1224.
- [2] Kim, K. M., 2007, Evaluation of the Fatigue Strength of the SUS Flange-Pipe Subassembly in Automotive Exhaust System, Master's thesis, Graduate School University of Ulsan, Republic of Korea.
- [3] Youn, J. W., Yoon, K. S., Lee, S. C., 2003, Pipe Flange Measurement System Using Draw-Wire Sensor, J. Korean Soc. Precis. Eng., 20:8 62-69.
- [4] Lee, M. J., 2022, Optimization of Linear and Nonlinear Braced Steel Frame Structures using Different Evolution Algorithm, Master's thesis, Department of Architectural Engineering The

Graduate School Sejong University, Republic of Korea.

- [5] Bonomo, N., de la Vega, M., Martinelli, P., Osella, A., 2010, Pipe-Flange Detection with GPR, *J. Geophys. Eng.*, 8:1 35-45, <https://doi.org/10.1088/1742-2132/8/1/006>.
- [6] Roh, J. E., Ahn, C. S., Kim, S. J., Jang, D. S., Choi, H. L., 2012, Stochastic Radar Beam Scheduling Using Simulated Annealing, *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, 23:2 196-206, <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2012.23.2.196>.
- [7] Okada, H., Ikeuchi, K., Matsuda, F., Hrivnak, I., 1995, Effects of M-A Constituents on Fracture Behaviour of Weld HAZs: Deterioration and Improvement of HAZ Toughness in 780 and 980MPa Class HSLA Steels Welded with High Heat Input (5th Report), *Welding International*, 9:8 621-628, <https://doi.org/10.1080/09507119509548864>.
- [8] Beck, A., Teboulle, M., 2009, A Fast Iterative Shrinkage-Thresholding Algorithm for Linear Inverse Problems, *SIAM J. Imaging Sci.*, 2:1 183-202, <https://doi.org/10.1137/080716542>.
- [9] Storn, R., Price, K., 1997, Differential Evolution -A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces, *J. Glob. Optim.*, 11 341-359, <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>.
- [10] Storn, R., Price, K., 1996, Minimizing the Real Functions of the ICEC'96 contest by Differential Evolution, *Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, 842-844, <https://doi.org/10.1109/ICEC.1996.542711>.



Tae-Jong Yun

Researcher in Korea Marine Equipment Research Institute.
His research interest is Small and Medium-Sized Future Ship Research.
E-mail: tjyun@komeri.re.kr



Hyun-Ho Na

Principal Researcher in Korea Marine Equipment Research Institute.
His research interest is Small and Medium-Sized Future Ship Research.
E-mail: hyunhona@komeri.re.kr



Won-Bin Oh

Senior Researcher in Korea Marine Equipment Research Institute.
His research interest is Small and Medium-Sized Future Ship Research.
E-mail: wboh@komeri.re.kr



Min-Ho Cho

Lead Researcher in Korea Marine Equipment Research Institute.
His research interest is Small and Medium-Sized Future Ship Research.
E-mail: chomh@komeri.re.kr



Do-Won Oh

Senior Researcher in Korea Marine Equipment Research Institute.
Her research interest is Small and Medium-Sized Future Ship Research.
E-mail: dwoh@komeri.re.kr



Hu-Sik Min

Senior Researcher in the Marine Environmental Equipment Research Team, Korea Marine Equipment Research Institute.
His research interest is Marine Environment Equipment Research.
E-mail: jjanga1234@komeri.re.kr



Jeong-In Yun

Principal Researcher in Korea Marine Equipment Research Institute.
His research interest is Small and Medium-Sized Future Ship Research.
E-mail: jyun@komeri.re.kr



Kyung-Wan Go

President in Easy System Co., Ltd
His research interest is Machine.
E-mail: bibber1@naver.com