

# 대형 용접구조물의 스마트제조를 위한 변형예측 알고리즘의 활용

성 우 제\*<sup>†</sup> · 유 재 석\* · 윤 광 희\*

\*대우조선해양 산업기술연구소

## Deformation Prediction Algorithm for Smart Manufacturing of Large Welded Structures

Woo-Jae Seong\*<sup>†</sup>, Jae-Seok Yoo\* and Kwang-Hee Yun\*

\*Industrial Application R&D Institute, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd., Geoje, 53302, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : wjseong@dsme.co.kr

(Received December 10, 2019 ; Revised January 16, 2020 ; Accepted February 17, 2020)

### Abstract

In this study, an algorithm for predicting welding deformation in the fabrication of large structures was proposed. The major factors affecting the structural deformation were identified and the relationship between them was derived through a bead-on-plate welding experiment. Constraint and offset were introduced to flexibly adapt to environmental changes as well as to reflect actual structures. The amount of angular distortion and its trend during multipass welding can be estimated from the measured deformation and the deposition data from the smart welding machine. Also, the final deformation is diagnosed, and a new welding sequence can be presented if the estimation exceeds the reference value. The identified factors and proposed method will be a first step toward smart manufacturing.

Key Words : Algorithm, Welding deformation, Large structures, Degree of constraint, Smart manufacturing

## 1. 서 론

전세계적으로 4차 산업혁명과 더불어 스마트공장또는 스마트제조(Smart factory or manufacturing)에 많은 관심이 집중되고 있다. 통용적으로 스마트라함은 대상물이 사람다워지는 경우로 감지(sensor), 판단(control), 수행(actuator) 등의 세 가지 특징적 요소를 수반함을 의미한다<sup>1)</sup>. 스마트공장이란 이러한 요소들이 유기적으로 연계되어 변화에 유연대처하여 신뢰성 있는 제품을 생산하기 위한 공장이라 불릴 수 있겠으나 명확히 합의된 정의보다는 국제적으로 미래 제조업의 비전을 제시하는 목표로서 자주 활용되고 있다. 국내에서는 스마트공장의 핵심 실현 기술로 정보통신기술(IT)을 들고 있

으며 구체적으로는 사물인터넷, 빅데이터, 인공지능, 사이버물리시스템, 클라우드 컴퓨팅 등이 이에 포함되어 있다<sup>2-4)</sup>. 하지만 스마트공장에 대한 접근 방향이 작업 또는 작업자 관점에서의 생산시스템을 구축하기보다 신기술 위주의 기술적인 접목이 시도되고 있어 원치 않는 결과를 나타낼 가능성이 제기되기도 한다<sup>1,3)</sup>.

스마트공장의 성공여부는 정보기술의 활용도 중요하지만, 제품과 재료 및 생산에 대한 깊이 있는 공학적 이해가 선결 조건이라 할 수 있다. 예를 들어 제품 제조 시 생산성이나 품질 등에 영향을 미치는 인자와 수준을 규정할 수 있으면 많은 데이터 중 가치 있는 데이터만을 추출하여 효율적이고 유연한 스마트제조가 가능할 것이다.

본 연구는 스마트공장의 생태계 중 제품의 제작을 중점으로 다루고 있다. 구체적으로 조선소에서 생산되는

대형 구조물의 스마트제조를 위해 용접 공정 중 수집되어야 할 필수 인자들을 규명하고 이들을 활용하여 변형 제어 관점에서 유연한 대처가 가능한 알고리즘을 제안한다. 이러한 인자들과 방법론은 향후 정보기술과의 접목을 통해 스마트공장으로의 확장을 위한 단초가 될 수 있을 것이다.

대다수의 대형 구조물은 용접장(weld length)이 일정하고 작업 중 재질이나 형상의 변화가 없으므로 거의 같은 용접 조건으로 반복적 용접이 수행된다. 반면 두께에 따라 수습에서 수백 패스 이상이 적층되므로 유한요소해석이나 실험으로 변형량을 예측하기에는 매우 많은 시간과 노력이 소요된다. 이러한 한계를 극복하고자 국내를 중심으로 수치적 접근방법<sup>5)</sup>이나 간이해석 방법<sup>6)</sup>이 연구되고 있다. 본 연구에서는 수치적 접근방법을 활용하였다.

## 2. 알고리즘

### 2.1 용접 공정과 열 분포의 이론적 배경

아크 용접은 전기에너지가 열에너지로 변환되는 과정을 겪으며 역극성(DCEP) 와이어는 양극열과 저항열에 의해 용융된다고 알려져 있다. 저항열은 전류의 공급에 비례하므로 용융속도에 가장 큰 영향을 미치는 인자이다. 용접 와이어의 재료와 사이즈가 동일하고 돌출길이와 아크길이가 일정하게 유지된다면 저항열은 전기에너지에 의한 발열이므로 전류와 전압의 곱과 증가적이게 된다. 와이어의 용융속도를 와이어 밀도와 용접 속도로 나누면 다음의 식 (1)과 같이 비드의 단면적을 산출할 수 있다<sup>7)</sup>. 여기서 용접속도는 용접장을 아크의 지속시간으로 나눈 값으로 산출할 수도 있다.

$$A_{bead} = \left(\frac{a_1}{\rho v}\right)I + \left(\frac{a_2}{\rho v}\right)I^2$$

$$= \frac{\dot{M}}{\rho v} = \frac{\dot{M}t}{\rho L} \cong \frac{a_3 VI}{v} + a_4 \quad (1)$$

where

$A_{bead}$ : cross-sectional area of bead ( $mm^2$ )

$\rho$ : wire material density ( $kg/mm^3$ )

$v$ : welding travel speed ( $mm/s$ )

$I$ : electric current ( $A$ )

$\dot{M}$ : wire melting rate ( $kg/s$ )

$L$ : weld length ( $mm$ )

$t$ : arc time ( $s$ )

$V$ : voltage [ $V$ ]

$a_1, a_2, a_3, a_4$ : constant

와이어는 액체상태로 모재에 투하되므로 모재의 에너지는 양극열과 저항열, 음극열을 모두 포함한다. 즉 용접 과정 중 소실된 일부 에너지를 제외한 대부분의 전기에너지가 열에너지로 변환된다고 볼 수 있다.

식 (2)는 점 열원이 전달되면서 판재 내부의 한점에서 겪을 수 있는 최고 온도 분포에 대한 식<sup>8)</sup>이다. 등온 분포의 면적(열원으로부터의 반경의 제곱) 역시 전기에너지로 표현된 입열량에 대한 함수로 구성되어 있음을 확인할 수 있다. 여기서 입열량은 단위 길이당 투입된 에너지( $kJ/mm$ )로 전류와 전압의 곱을 속도로 나눈 값으로 정의된다. 본 식으로부터 최고 도달 온도( $T_{max}$ )를 열영향부(HAZ)의 경계 온도로 가정하면 열영향부의 면적을 유도할 수 있다.

$$r^2 = \frac{2\eta VI}{v\pi e c \rho T_{max}} \quad (2)$$

where

$r$ : radius of boundary at  $T_{max}$

$\eta$ : heat efficiency

$V$ : voltage [ $V$ ]

$I$ : electric current ( $A$ )

$v$ : welding travel speed ( $mm/s$ )

$c$ : specific heat ( $J/kg^\circ C$ )

$\rho$ : material density ( $kg/mm^3$ )

$T_{max}$ : maximum temperature

한편 Satoh and Terasaki<sup>9)</sup>를 비롯한 많은 연구자들의 결과에 따르면 비드 용접(Bead-on-plate welding) 시 횡방향 각변형은 입열량에 비례하여 증가하다가 임계치 이후 감소함을 보인다. 재료와 용접 공정이 동일할 경우 임계치 이하에서는 아래 식 (3)과 같이 각변형은 입열에 비례하고 두께의 제곱에 반비례한다.

$$\theta \propto \frac{VI}{vh^2} \quad (3)$$

$V$ : voltage [ $V$ ]

$I$ : electric current ( $A$ )

$v$ : welding travel speed ( $mm/s$ )

$h$ : thickness

식 (1)과 (2)로부터 비드 사이즈나 열영향부의 면적은 전기에너지에서 비롯한 입열량에 관한 함수이며 식 (3)으로부터 변형량은 입열량에 비례함을 알 수 있다. 이는 비드 사이즈나 열영향부 면적으로부터 변형량을 추정할 수 있는 가능성을 제공한다. 이와 관련된 연구가 Okano<sup>10)</sup>에 의해 수행된 바 있다. 그는 가열 시 재료가 강도와 강성을 급격하게 잃는 온도를 도입하여 이 이상

의 온도를 경험한 부위를 기계적 용융부(Mechanical melting region)로 정의하였으며, 그 면적과 변형량과의 관계를 조사하였다. 그들의 결과에 의하면 용접 공정이 달라져도 이 면적에 따른 변형량의 추세는 동일하게 나타났다. 또한 기계적 용융부는 주변구속과 잔류응력, 소성경화에 의해서도 차이가 발생한다고 언급하였다. 하지만 이 분포 역시 온도의 영향이 가장 지배적이므로 식 (3)에서 최고점 온도를 기계적 용융 온도로 대체하면 면적을 계산할 수 있을 것으로 보인다.

## 2.2 용접 데이터로부터 비드 면적 산출

앞선 내용을 종합하면 용접 변형과 관계되는 인자들은 입열량(입열효율, 전류, 전압, 속도), 비드 면적, 열영향부 면적, 기계적 용융면적, 두께 등으로 나열할 수 있다. 공정 관점에서 입열량의 경우는 실시간 측정이 가능하나 용접 공정 및 작업 조건마다 입열 효율의 차이로 인해 변형량이 달라질 수 있다. 무엇보다도 다층 용접 시 현재 비드가 얼마나 쌓여 있는지 직접적인 정보를 제공해주지 못한다. 열영향부나 기계적 용융부 면적 또한 용접 공정 중 절단 단면을 확인하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 변형에 영향을 주는 인자 중 공정과 직접적 연계가 가능한 비드의 면적 정보를 채택하여 활용하였다. 각변형량 예측에 있어 중요한 또 하나의 변수인 비드에 의해 적용되는 두께를 개선형상과의 기하학적 원리를 통해 산출할 수 있기 때문이다. 또한 용접 공정 중 비드가 얼마나 쌓이고 있는지 직접적인 측정이 가능하다.

비드 면적의 산출은 식 (1)과 같이 와이어의 용융속도와 밀도, 용접 속도에 대한 정보를 알면 구할 수 있다. 용접 속도의 경우 용접기로부터 실시간으로 수집된 데이터 중 아크의 지속시간과 설계상의 용접장(weld length)로부터 산출할 수 있다. 취부 용접이나 작업자의 사전 작업에 의해 발생된 아크 시간 등의 노이즈는 용접시공기준서(WPS)에서 제시하는 최대 가능한 용접속도와 설계상의 용접장으로부터 아크 시간의 하한치를 구하여 제거할 수 있다. 덧살, 가우징 및 그라인딩 후 재용접, 탭피스에서의 용접 등으로 인해 실제 사용되는 와이어의 양이 설계상 예상되는 용착량보다 항상 초과하게 되는 데 이는 기존의 축적된 데이터로부터 얻은 효율을 적용하게 된다.

Fig. 1은 실제 스마트 용접기로부터 실시간 전달된 데이터의 한 부분을 보여준다. 노이즈를 제거한 후 유효 아크 시간과 와이어의 용융속도를 곱한 값, 즉 그래프의 면적이 용착량에 해당된다. 이를 용접된 길이로 나누면 비드 단면적을 추출할 수 있다. 이러한 접근 방

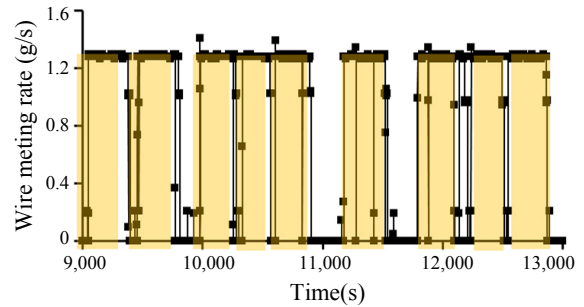


Fig. 1 Data of wire melting rate transmitted in real time from welding machine

법은 용접장이 일정하고 용접 공정이나 재료가 변경되지 않는 다층 용접이 필요한 구조물에 적용될 수 있다.

## 2.3 임의의 구속도를 반영한 변형 예측 알고리즘

비드 면적과 변형량과의 관계를 규명하고자 입열을 달리하여 비드용접(Bead-on-plate welding)을 수행하였다. 실험 조건과 방법은 저자의 이전 연구<sup>11)</sup>와 동일하게 적용하였다. 매 패스마다 각변형을 측정된 후 Fig. 2와 같이 절단 후 해당 입열에서 비드 단면적을 픽셀 계산을 통해 산출하였다.

Fig. 3은 이들과의 관계를 보여준다. 각변형은 비드 면적과 두께 제곱의 역수에 선형적으로 증가하다가 임계치(약 0.37) 이후에는 오히려 감소하는 특성을 보였다. 임계치 이하에서 명확한 선형 구간이 존재하므로 2.1절에서 각변형이 비드 면적과 비례한다는 가정이 타



Fig. 2 Bead cross section

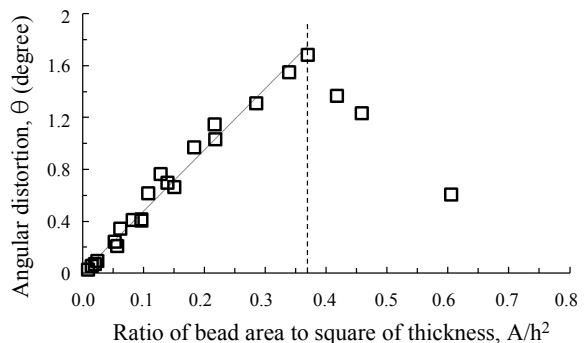
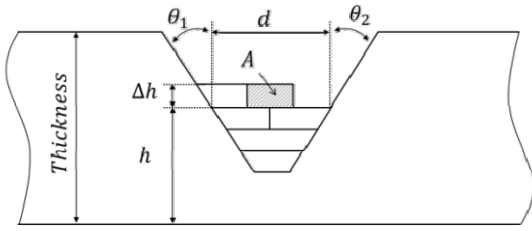


Fig. 3 Experimental results: angular distortion with ratio of bead area to square of thickness



**Fig. 4** Thickness calculation using bead area and groove geometry

당함을 알 수 있다. 단 용접 공정이나 재료, 와이어 사양의 변경 시에는 기울기가 달라질 수 있으므로 이에 맞는 데이터가 필요할 것으로 보인다.

한편 다층 용접에서는 비드가 적층됨에 따라 두께 증가(굽힘 강성 상승)로 인해 변형량의 크기가 감소하므로 비드의 높이로부터 두께를 추정해야 한다. 비드 면적과 개선허상의 기하학적 관계는 Fig. 4를 바탕으로 식 (4)와 같이 정리할 수 있다. 비드의 면적(A)과 베벨각도( $\theta_1, \theta_2$ ), 밑면 길이(d), 현재 층에서의 예상되는 총 패스수(j)를 통해 비드의 두께( $\Delta h$ )를 산출한다. 현재 층에서의 비드 두께는 다음 층에서 총 두께( $h + \Delta h$ )에 합산된다.

$$\Delta h = \frac{-d + \sqrt{d^2 + 2j \cdot A \cdot (\tan\theta_1 + \tan\theta_2)}}{\tan\theta_1 + \tan\theta_2} \quad (4)$$

where

$\Delta h$ : bead height

d: welded layer width

A: bead area

$\theta_1, \theta_2$ : bevel  $\angle$ s

j: total number of pass at current layer

입열량으로부터 비드면적을, 식 (4)로부터 두께를 구하면 Fig. 3의 데이터를 통해 최종적으로 변형각도를 추출할 수 있다. 이는 구속 조건이 고려되지 않은 이상적인 상태에서의 산출 방법이나 실제 구조물은 대부분 가접, 취부, 임시 보강재가 설치 되어 있고 조립 시 주변 구조물과 연결 및 구속되어 있으므로 이를 고려한 정량적 변형량을 예측할 필요가 있다.

구속도와 소성변형량과의 관계를 규명하고자 하는 여러 연구 시도가 있었으나 변수가 다양하고 현상이 복잡하여 아직까지 일반화된 이론은 보고되지 않고 있으며 체계적인 실험 사례도 많지 않다. 본 연구에서는 지금까지 원리적으로 잘 설명되어온 고유변형도법<sup>12)</sup>으로부터 유도된 가정, 즉 고유변형률은 구속도에 반비례한다

는 원리를 알고리즘에 적용하였다. 구속도가 클수록 수축 및 각변형은 감소한다<sup>13)</sup>. 용접부를 바(bar), 용접부 외의 구조를 스프링(spring)으로 가정한 바-스프링 모델에 의하면, 구속도는 구조물과 용접부까지 포함한 총 강성에 대한 구조물의 강성의 비(ratio)로 정의할 수 있다. 여기서 구속도가 0인 경우는 외부 구속이 없음을, 1인 경우는 최대 구속 상태를 의미한다. 본 연구에서도 고유변형률에서의 구속도 범위와 일치시키고 그 원리를 활용하고자 구속도라는 무차원수를 도입하였으며, 이를 정량적으로 계산하는 방법은 참조 문헌과 다를 수 있음을 명시한다.

한편 다층 맞대기 용접 시 일반적으로 두 번째 층(layer)까지는 두께가 얇아 온도 구배가 적고 굽힘력에 비해 모재의 강성이 매우 커 변형량이 작게 나타나게 된다. 뿐만 아니라 주변 구속, 초기 변형, 열전달 환경에 따라 변형 양상이 민감하게 나타나고 온도 구배의 변화나 구속 조건에 따라 역변형이 발생하는 등 일관된 예측이 어려워진다<sup>11)</sup>. 이는 Fig. 3의 실험결과에서 임계치 이상의 범위에 해당하며 비드 면적이 클수록 오히려 변형량이 작아지는 현상과 동일하다. 따라서 본 알고리즘은 예측 가능한 세 번째 층 이상만을 다루었다.

추가적으로 셋업에 의한 초기 변형과 두 번째 층까지 발생한 변형량을 보정하기 위해 오프셋을 도입하였다. 식 (5)는 구속도와 오프셋을 적용한 각변형 예측함수를 나타내며, 임의의 N번째 패스에서 측정된 각변형량(이 예측된 각변형량과 일치되도록 알고리즘은 구속도와 오프셋을 조정하게 된다. 구속도와 오프셋은 미지수이므로 최소한 두 개의 샘플링 정보가 필요하게 된다.

$$\theta_m(N) = (1 - \beta) \cdot \theta_e(N) + R \quad (5)$$

where

N: pass number  $\theta_m(N)$ : Measured angular distortion

$\theta_e(N)$ : Estimated angular distortion function

$\beta$ : degree of constraint,  $0 \leq \beta \leq 1$

R: offset

본 연구에서 제안한 방법을 Fig. 5의 알고리즘 흐름도로 나타내었다. 요약하면 용접기로부터 수집된 용착량 정보를 비드 면적으로 환산(Fig. 1)하고 기하학적 원리를 통해 해당 두께(Fig. 4)를 계산하여 용접 변형량(Fig. 3)을 예측한다. 다층 용접 시 최소 두 지점에서 측정된 변형량 정보로부터 알고리즘은 식(5)의 구속도와 오프셋을 조절하여 각변형 예측함수를 도출하게 된

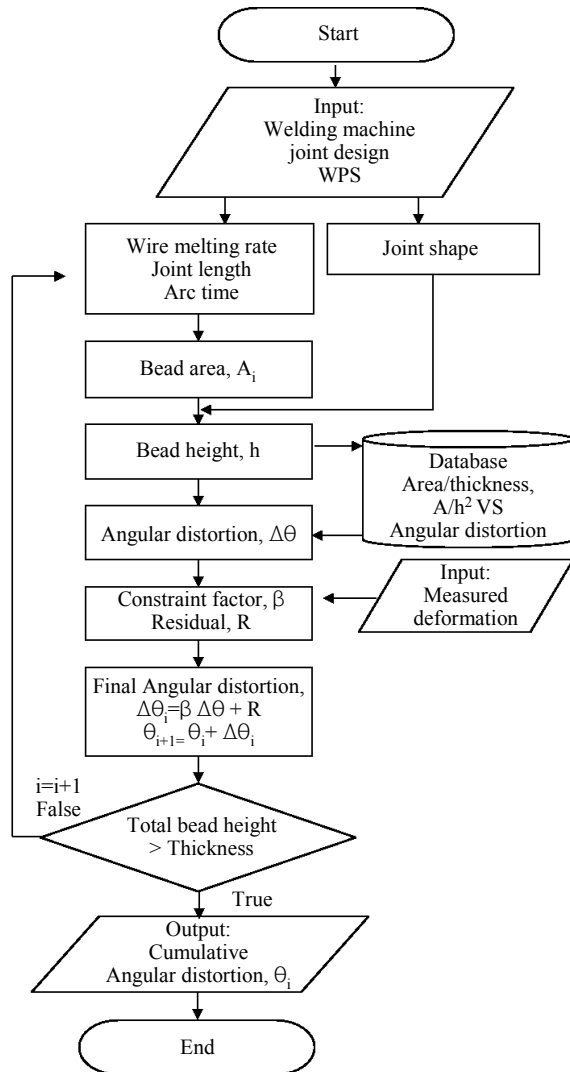


Fig. 5 Flow chart of the algorithm for prediction of angular distortion

다. 작업 중 구속조건이나 변형량이 변할 경우에도 이후 두 지점 이상의 측정값이 입력되면 새로운 예측함수가 출력된다.

### 3. 결과 및 적용

#### 3.1 알고리즘의 검증

제안한 방법과 가정들을 검증하기 위해 맞대기 V개선 용접 실험을 수행하였다. Fig. 6은 시편 치수와 개선행상을 보여준다. AH32의 모재에 직경이 1.2mm인 와이어로 Flux-Cored-Arc welding (FCAW)을 수행하였다. 용접 전류는 285A, 전압은 29V, 토치 속도는 30cm/min이 적용되었다. 모든 패스마다 각변형량을 측정하였다.

Fig. 7은 실험과 예측 결과를 보여준다. '채워진 마

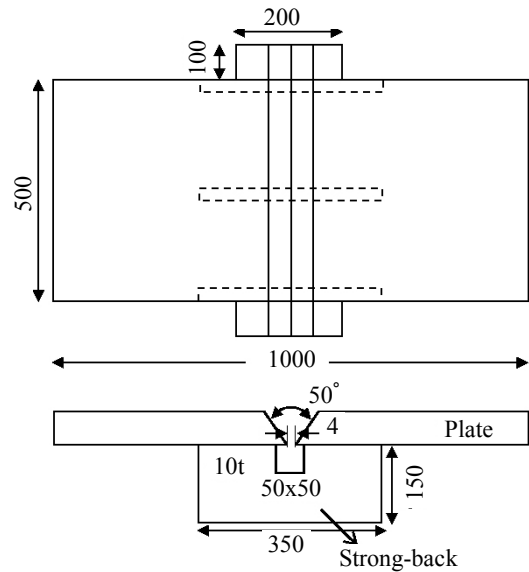


Fig. 6 Specimen of single-V butt welding

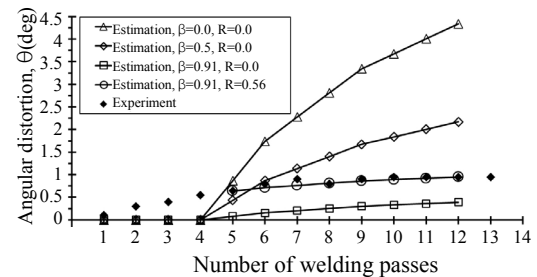


Fig. 7 Experimental and estimated results

름모 형상'의 표식은 실험결과이며 그 외 '선'으로 표기한 결과는 구속도와 오프셋을 조절한 예측 결과를 나타내고 있다. 실험 결과에서 '0'패스에서 변형량이 -0.3도로 표기된 것은 용접 전 스트롱백 및 탭피스 설치와 개선부 가접 후 측정된 초기 셋팅에 의한 변형량이다. 부호가 마이너스(-)인 경우는 역변형을 의미한다.

알고리즘에 의해 구속도를 0.91, 오프셋은 0.56을 적용한 경우 각변형량은 이후 모든 패스에서 실험 결과와 일치함을 보였다. 이는 미지의 구속 조건에서 최소 두 지점 이상에서의 측정 결과가 주어지면 구속도와 오프셋을 역추정할 수 있고 다시 이를 활용하여 이후 변형량까지 예측할 수 있음을 보여주었다.

#### 3.2 변형 예측 진단을 활용한 스마트 생산

본 절에서는 대형 후판 구조물에 적용 가능한지에 대한 평가를 위해 두께가 145 mm인 X개선에 대해 유한요소법으로 용접 변형 해석을 수행하였다. 개선각은 윗면 40°, 아랫면 60°이며 개선 높이 비율은 2:1이다. 용접시공기준서(WPS)에서의 용접 조건 중 한 조건을

택하여 일정한 입열을 부가하였다. 따라서 용착되는 비드 면적 역시 동일하게 적용되었다. 하면에서 스트롱백을 부착한 후 상면에서 12번째 패스까지 용접한 후 스트롱백을 제거하고 31패스까지 하면을 용접한 후 다시 최종 패스까지 상면 용접하는 순서로 해석하였다.

Fig. 8은 29번째 패스까지 진행된 계산 결과로 17번째 패스에서 각도는 0°, 29번째 패스에서의 각도는 -0.3°를 보였으며 이 두 지점에서의 변형량 정보를 추출하여 알고리즘에 적용하였다. 12번째 패스를 기준으로 스트롱백이 제거되고 이후 구속도는 일정하므로 12번째 이후의 변형량을 추출하였다.

Fig. 9은 알고리즘에서 계산된 여러 예측함수이며, 구속도와 오프셋에 따라 결과가 달라짐을 확인할 수 있다. 구속도와 오프셋을 조절하여 Fig. 8에서 추출된 두 점에서의 데이터와 완전히 일치할 경우의 예측함수가 최종적으로 채택된다. 구속도가 0.87, 오프셋은 0.49일 경우일 때 최적 예측 함수가 도출되었다.

Fig. 10은 구속도와 오프셋 결정 (29번째 패스) 이

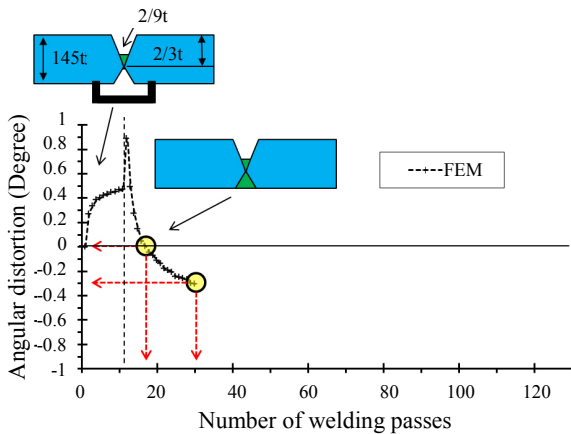


Fig. 8 Data sampling of angular distortion from FEA result, average bead area: 39 mm<sup>2</sup>

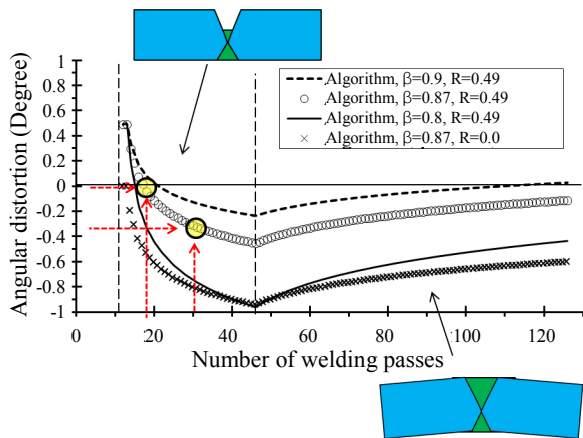


Fig. 9 Estimation of angular distortion with varying degree of constraint ( $\beta$ ) and offset ( $R$ )

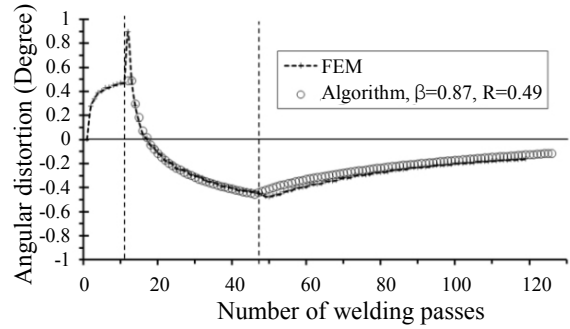


Fig. 10 Comparison of results by FEA and algorithm

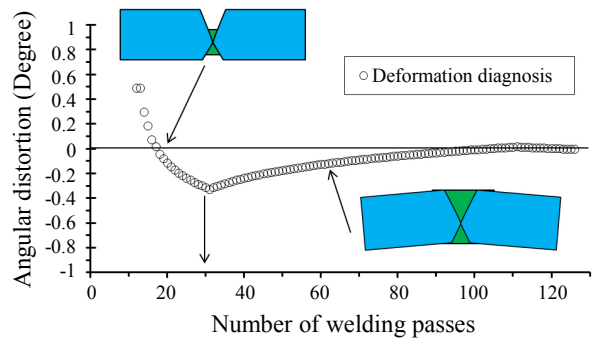


Fig. 11 Recommendation of welding sequence through diagnosis of deformation trend

후 최종 패스까지 알고리즘으로 예측한 결과와 유한요소해석에 의한 예측치를 비교하여 보여준다. 용접 패스수에 따라 변형량이 거의 일치함을 보였다. 유한요소법에 의한 예측치는 실 구조물에서의 실험결과와 다를 수 있지만, 해석상에서는 본 알고리즘의 타당성이 검증되었다. 향후 실험을 통한 알고리즘 검증이 필요하다.

한편 Fig. 8과 같이 현재 29패스까지 용접되어 있다면 알고리즘은 Fig. 9과 같이 최종 변형량을 -0.11°로 예측하게 된다. 정도 기준을 0.05°로 설정할 경우 이 값은 이상 징후로 진단되어 사용자에게 제공된다. 이와 동시에 최종 변형량 0°를 목표로 기존의 용접 순서를 변경하도록 제안한다. 즉 Fig. 11와 같이 31번째 패스에서 이면 부 용접을 시작하도록 새로운 용접 순서를 사용자에게 전달하게 된다.

본 알고리즘은 최소 두 점에서 측정된 변형량을 필요로 하지만 더 많은 수의 데이터가 입력될 경우 정확성은 높아질 것으로 판단된다. 용접 과정 중 용접 조건이나 구속 조건이 변할 경우도 이후 최소 두 지점에서의 변형량 데이터가 주어지면 알고리즘은 자동으로 구속도와 오프셋 값을 조정하여 향후 변형량을 예측하고 진단하여 새로운 용접 순서를 제공할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 대형 구조물의 제작 용접 시 변형 예측과 이를 통한 진단을 통해 스마트제조를 위한 방법과 주요 변수를 제시하였다.

1) 용접기로부터 실시간으로 와이어 용융속도와 아크 지속 시간을 획득하고 이를 변형 거동과 연계하면 고품질 대형구조물의 제작이 가능할 것으로 보인다.

2) 비드의 단면적은 와이어 용융속도와 아크 지속 시간의 곱을 설계 상의 용접장으로 나누어 구할 수 있다.

3) 비드 면적과 개선형상으로부터 기하학적으로 해당 두께를 산출할 수 있으며 이를 통해 각변형 예측 알고리즘을 개발하였다.

4) 각변형은 임계점이 존재하며 그 이하에서는 비드의 면적에 비례하고 두께의 제곱에 반비례하는 관계를 보인다.

5) 실제 구조물을 반영하기 위해 예측 함수에 구속도와 오프셋 개념을 도입하였으며 유한요소해석 결과와 일치함을 보였다.

6) 제작 중에 측정된 최소 두 지점에서의 변형량 정보로부터, 향후 모든 패스에서의 변형량이 예측 가능하며, 최종 변형을 최소화하기 위한 새로운 용접 순서를 도출할 수 있다.

7) 작업 중 구속도나 변형량이 변경될 경우, 알고리즘은 구속도와 오프셋을 재조정하여 새로운 예측치를 제공하므로 변화에 유연한 대처가 가능하다.

8) 본 방법은 용접장이 일정하고 조건이 반복으로 발생하는 대형 구조물의 다층 용접에 적용 가능할 것으로 판단된다.

ORCID: Woo-Jae Seong: <https://orcid.org/0000-0002-6421-4986>

#### References

1. 김승택, 김억, 유연 생산 체계를 구현하는 Smart Factory: 생산 전략의 효과적 운용 방안, *Deloitte Anjin Review*, 62-68.
2. Korean Agency for Technology and Standards(KATS), 표준기반 R&D 로드맵-스마트공장, *Korean Standards Association (KSA)*, (2016), 8-12.
3. 이정철, 미래 스마트공장 방향 제시 및 스마트제조산업 발전 방안 연구, *산업통산자원부 연구보고서*, (2016), 96-119.
4. J. Y. Park, H. S. Oh and D. K. Lee, A Study on the Production Process Management Support System for Smart Shipyard Based on Mobile, *J. Weld. Join.* 32-5 (2014), 58-64.  
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2014.32.5.58>
5. S. B. Shin and J. G. Youn, A Study on the Angular Distortion Prediction of Double Sided Multi-pass Butt Weldment, *J. Weld. Join.* 25(1) (2007), 37-41.
6. Y. Ha and J. Choi, A Study on the Thermal Distortion Analysis of Welded Structures having K/X Groove using shell elements, *J. Weld. Join.* 30(6) (2012), 120-125.  
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2012.30.6.120>
7. J. D. You and S. J. Na, Arc Welding, *Korean Welding and Joining Society*, Seoul, Korea, (2011) 93-97
8. J. W. Kim and Y. S. Yang, Welding Residual Stress and Distortion, *Korean Welding and Joining Society*, Seoul, Korea, (2011) 17-62.
9. K. Satoh, Effect of welding conditions on welding deformations in multipass welded butt joint, *J. Japan Weld. Soc.* 45(6) (1976), 50-56.  
<https://doi.org/10.2207/qjjws1943.45.464>
10. M. Mochizuki and S. Okano, Effect of Welding Process Conditions on Angular Distortion Induced by Bead-on-plate Welding, *ISIJ International*. 15, 58(1) (2018), 153-8.
11. W. J. Seong, Prediction and Characteristics of Angular Distortion in Multi-Layer Butt Welding, *Materials*, 12(9) (2019), 1435.  
<https://doi.org/10.3390/ma12091435>
12. H. Murakawa, Y. Luo and Y. Ueda, Prediction of welding deformation and residual stress by elastic FEM based on inherent strain, *J. Soci. Nav. Arch. Japan*, 180 (1996) 739-751.  
[http://dx.doi.org/10.2534/jjasnaoe1968.1997.182\\_783](http://dx.doi.org/10.2534/jjasnaoe1968.1997.182_783)
13. J. U. Park, H. W. Lee and H. S. Bang, Effects of mechanical constraints on angular distortion of welding joints, *Sci. Technol. Weld. Join.* 7(4) (2002) 232-239.  
<https://doi.org/10.1179/136217102225004266>