FCAW에서의 아크 길이 추정 방법 개발에 관한 연구

배 광 무·조 상 명

大韓熔接·接合學會誌 第27卷 第3號 別冊

2009. 6

연 구 논 문

FCAW에서의 아크 길이 추정 방법 개발에 관한 연구

배 광 무* · 조 상 명**,†

*대우조선해양 산업기술연구소
**부경대학교 신소재공학부 소재프로세스공학전공

A Study on the Development of Arc Length Estimation Method in FCAW

Kwang-Moo Bae* and Sang-Myung Cho**,†

*Daewoo Shipbuilding&Marine engineering, Geoje 656-714, Korea
**Dept. of material processing engineering, Pukyung national university, Busan 608-739, Korea

†Corresponding author : pnwcho@pknu.ac.kr)
(Received November 7, 2008 ; Revised November 14, 2008 ; Accepted April 3, 2009)

Abstract

The flux cored arc welding (FCAW) process is one of the most frequently employed and important welding process due to high productivity and excellent workability. The process is performed either as an automated process or as a semi-automatic process. In FCAW process, welding voltage has been considered as a qualitative indication of arc length. But it is necessary to let welding operators know, maintain and manage the arc length directly by estimating and displaying it. In this study, to develop arc length estimation technique, we measured a welding circuit resistance(R_{sc}) and then we calculated welding circuit voltage drop(V_{sc}). Also, we measured arc peak voltage(V_{ap}). By subtracting V_{sc} from V_{arc}, we can easily calculate net arc voltage drop(V_{arc}). Consequently, we suggested arc length estimating equation and basic algorithm by regressive analyzing the relationship between net arc voltage drop(V_{arc}) and real arc length(Larc) measured by high speed camera. Therefore, arc length can be predicted by just monitoring welding current and voltage.

Key Words : FCAW, Short circuit transfer, Arc length estimation, Welding circuit resistance(R_{sc}), Voltage drop by welding circuit(V_{sc}), Arc peak voltage(V_{ap}), Net arc voltage drop(V_{arc})

1. 서 론

FCAW(Flux Cored Arc Welding)는 SMAW (Shield Metal Arc Welding)나 GMAW(Gas Metal Arc Welding)에 비해 우수한 작업성과 생산성으로 인해 조선을 비롯한 강구조물의 수동 및 자동 용접에서 널리 사용되고 있다. 정전압(Constant voltage) 제어 방식의 FCAW에서의 아크 길이는 용접 전압에 비례한다[1]. 따라서 설정 전압은 용접 시 아크 길이를 나타내는 정성적 지표로 인식되어왔다. 대부분의 FCAW 용접기는 전압 미세 조절 볼륨을 이용하여 원하는 전압을 설정하게 되어 있으며, 용접기 사용자에 따라 그 설정 전압 값을 각자의 작업 방식에 맞추어 지극히 정성적이고 개인 경험적 감각에 의한 방법으로 조절되고 있다.

설정 전압을 적정 전압보다 크게 하여 과도하게 긴 아크 길이로 용접을 할 경우 입열량 과대에 의해 용접 변형량이 증가 할 수 있으며, 그 반대의 경우에는 짧은 아크 길이로 인해 스패터 발생량이 증가할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 용접기 설정 전압으로 아크 길이를 간접적으로 짐작하는 것이 아니라, 인라인에서 용접 파형을 이용하여 아크 길이를 추정·표시함으로써 현장 작업자 및 오퍼레이터로 하여금 직접적으로 아크 길이를 알 수 있게 하여 적절한 아크 길이

를 유지, 관리하게 하는 것이 필요하다.

Alfaro[2] 등은 GMAW에서의 단락 시 저항, 와이어 송급 속도, 용접 전류를 이용한 CTWD(Contact tip to workpiece distance) 추정 회귀 식을 소개하였다. 그리고, Thomsen[3,4]은 솔리드 와이어를 사용한 GMAW에서의 아크 길이 피드백 제어 기술을 제안하였다. 하지만 플럭스 코어드 와이어를 사용한 FCAW에서 아크 길이를 추정하는 기술 개발에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다.

본 연구에서는 회로 전압 강하(V_{sc})를 제외한 순수 아크 전압 강하(V_{arc})를 이용한 FCAW에서의 아크 길이 추정 방법 개발에 관한 연구를 하였다. 싸이리스터 제어 방식의 용접기를 사용한 FCAW에서의 회로 전압 강하(V_{sc})를 계산 하였고, 아크 피크 전압(V_{ap})과 V_{sc} 값의 차로 얻어 진 순수 아크 전압(V_{arc})과 실측 아크 길이(L_{arc})와의 관계를 회귀 식으로 나타내어 아크 길이를 추정 할 수 있는 기본 알고리즘을 제안하였다.

2. 실험 방법

2.1 용접 회로저항(Rsc) 측정

본 연구에서는 용접 회로 저항을 제외한 순수 아크 저항만을 고려하여 아크 길이 추정을 하기 위해 용접 회로 저항 측정 실험을 하였다. 이를 위하여 길이 120mm×폭 40mm×두께 6mm의 연강(mild steel)에 Φ1.2mm flux cored wire(AWS A5.20)를 사용하여 비드 온 플레이트(bead-on-plate) 용접 하였다. Fig. 1은 본 실험에서 검토한 2가지의 회로 저항 측정 방법을 나타낸다. Cho는 용접 케이블의 저항으로 인한 에너지 손실을 고려하여 용접 시 아크 효율과 용융 효율을 검토하기 위해 Fig. 1의 (a)와 같이 용접 케이블 측정법을 사용하여 용접 케이블 저항(R_{wc})을 측정하였다[5]. 이는, 컨택팁을 모재에 접지한 상태로 용접 신호를 주어 그 때의 용접 저항을 계측하여 회로 저항을 측정하는 방식이다. Fig. 1의 (b)와 같은 단락저항 측정법의 경우, 전류 250A, CTWD를 15mm로 하여 용접 시 단락 저항(R_{sc})을 측정함으로써 회로저항을 구하였다. 단락이 발생하면, 용접 전압이 급격히 하강하며 대부분의 단락에서는 그 값이 10V이하가 된다. 따라서 본 연구에서는 용접 전압이 10V 이하가 되는 구간을 단락 구간으로 간주하였다. Kam[9] 등의 연구에서도 10V 이하의 전압 구간을 단락 구간으로 정의하였다. 용접 파형의 계측에는 Monitech HIWELD 계측 장비가 사용되었으며 계측 주파수는 7500Hz로 하였다.

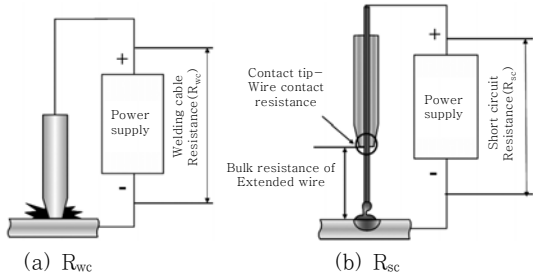


Fig. 1 Schematics of circuit resistance measuremen

2.2 전압 변경에 따른 아크 피크 전압(Vap) 및 아크 길이 변동 측정

설정 전압 변경 실험의 용접 조건을 Table 1에 나타내었으며, 설정 전압을 22V에서 34V까지 2V단위로 증가시키며 실험을 수행하였다.

Fig. 2와 Table 2에 각각 실험 모식도와 고속카메라 촬영 조건을 나타내었다. 고속 카메라 촬영을 통한 아크 길이 측정을 위해 TIG 백라이트와 고속카메라가 사용 되었고, 그 사이에 고정 되어있는 FCAW 토치와 60cpm의 속도로 직선 이동하는 모재를 위치시켰다. TIG 백라이트와 FCAW 토치, 고속카메라는 일직선상에 놓이게 배치하였으며 각각의 거리를 200mm, 400mm로 하였다.

Table 1 Welding condition

Welding machine	TAESIN KRⅢ - 500
Base metal	Mild steel 120*40*t6
Welding wire	Flux cored wire Φ1.2mm (AWS A5.20)
Joint type	Bead on plate
Shield gas	100% CO_2 (20ℓ/min)
Welding current	250A (WFR = 12.4m/min)
Welding speed	60cpm
CTWD	15mm
Setting voltage	**22, 24, 26, 28, 30, 32, 34V**

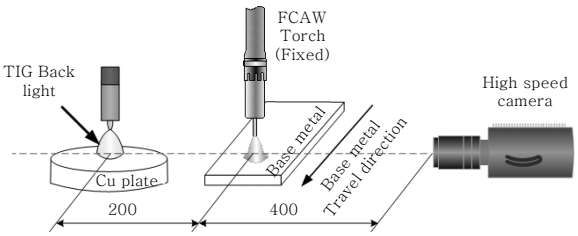


Fig. 2 Schematic of experiment

Table 2 Condition of high speed camera photographing

High speed camera body	Phantom v7.2
Lens	Nikon 105mm micro F2.8D
Filter	TOPAZ UV 52mm HOYA IR R72 52mm
Sampling frequency	5000fps
Exposure time	180μsec

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 용접 회로 저항 측정으로 인한 회로 전압 강하(V_{sc})계산

용접 케이블 저항 측정법으로 인해 200, 300, 400A의 전류로 각각 3회의 반복 실험으로 얻어진 케이블 저항은 설정 전류에 관계없이 거의 동일했고[5], 평균값은 6.43mΩ으로 나타났다.

Fig. 3은 용접 저항의 파형이며, 본 연구에서 정의한 각각의 저항에 대한 명칭과 R_{sc}를 구하는 방법에 대해서 나타내었다. 단락 시간(t_{sc}) 동안의 저항을 평균하여 R_{sc}를 측정했고 이를 회로 저항으로 간주하였다.

Fig. 4는 단락저항 측정법으로 측정한 회로 저항, 즉 R_{sc}를 나타낸다. 설정 전압을 22V에서 28V까지 1V 단위로 증가시켰으며, 각 설정 전압 조건 당 30개의

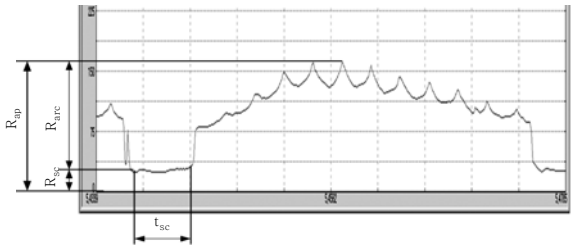


Fig. 3 R_{sc} Measurement at short circuit

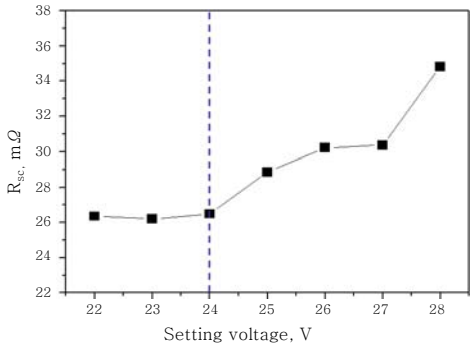


Fig. 4 Result of circuit resistance(R_{sc}) measurement

R_{sc} 값을 평균하여 하나의 점으로 나타내었다.

22~24V 조건에서 SCR(Short Circuit Ratio ; 단락 시간 / 전체 아크 시간)이 약 3~13%로 정상 단락 구간이 안정적으로 존재하여 R_{sc} 값이 설정 전압에 관계없이 평균 26.34mΩ으로 일정했다. 따라서 이 값을 회로 저항으로 볼 수 있다. 반면 25V 이상의 설정 전압 조건에서는 SCR이 3% 이하로 낮아 정상 단락 저항에 도달하기 전에 단락이 해소되었다. 설정 전압의 증가에 따라 단락 해소 시간이 더욱 빨라졌고, 이로 인해 R_{sc}가 증가하는 경향을 나타내었다.

Hermans[6] 등은 단락 주파수, 즉 단락이 발생하는 빈도가 WFR, 용접 전압에 의존한다고 보고하였고, 용접 전압을 일정하게 하고 와이어 송급속도(WFR)만을 변경하여 단락 주파수를 측정하였다. 하지만 본 연구에서는 단락 주파수 대신 SCR(단락 시간비)을 단락의 양을 나타내는 지표로 사용하였으며, WFR을 일정하게 하고 용접 전압을 변경하여 그에 따른 R_{sc}를 측정하였다.

식(1)의 우변에 나타 낸 용접 케이블 저항(R_{wc}), 컨택팁-와이어 접촉저항(R_{con}), 와이어 돌출 길이만큼의 와이어 벌크 저항(R_{wire})을 모두 측정하기는 곤란하다. 따라서 R_{wc}, R_{con}, R_{wire}를 모두 고려한 단락저항 측정법으로 회로저항을 측정하였고, 이로 인한 CTWD 15mm 조건의 전체 용접 회로 저항은 26.34mΩ이며, 회로 전압 강하는 약 6.6V로 무시할 수 없을 만큼 크게 나타났다[7]. 또한 회로 저항 측정을 위한 시험 용접은 SCR 5% 또는 그 이상의 용접 조건으로 행해지는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

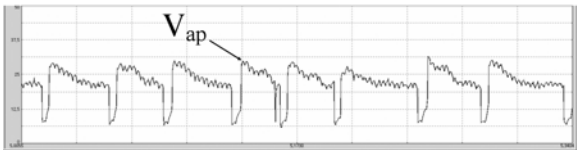
$$R_{sc} = R_{wc} + R_{con} + R_{wire} \tag{1}$$

단락 저항 측정법으로 인해 측정 된 R_{sc}와 단락시간(t_{sc})동안의 단락 전류 평균 값(I_{sc})을 곱하는 옴의 법칙을 이용하여 식 (2)와 같이 회로 전압 강하(V_{sc})를 구할 수 있다.

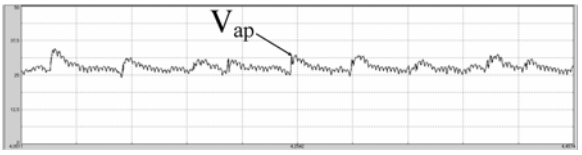
$$V_{sc} = R_{sc} \times I_{sc} \tag{2}$$

3.2 아크 피크 전압(V_{ap}) 측정에 따른 순수 아크 전압 강하(V_{arc}) 계산

Fig. 5에는 단락 이행 모드와 입상 용접 이행 모드인 경우의 용접 전원의 출력 단자(+,-)에서 측정한 전압 파형을 나타내었으며, 전압 파형에서의 V_{ap}를 정의하였다. 하나의 용적 이행 주기 동안의 최대 전압, 즉 용적 이행 후 전압의 기울기가 +에서 -로 바뀌는 지점에서의 전압을 V_{ap}로 정의하였다. 본 연구에서는 Fig. 5와



(a) V_{ap} in the case of short circuit transfer mode



(b) V_{ap} in the case of globular transfer mode

Fig. 5 Definition of arc peac voltage(V_{ap})

같은 실제 용접 전압 파형을 이용하여 각 설정 전압 조건 당 30개의 아크 최대 전압 값을 직접 측정하여 평균함으로써 V_{ap}를 구하였다.

하지만 아크 길이 추정 방법의 실제 현장 적용 시, 전압의 기울기가 +에서 -로 바뀌는 지점의 전압 값을 V_{ap}로 자동으로 판단해야 하는데, Fig. 5나 Table 3의 이동평균 되지 않은 원본 전압 파형을 보면, 싸이리스터 출력 주파수 특성을 가지는 미세한 리플이 전압의 기울기라는 수학적 파라메터로 V_{ap}를 판단함에 있어서 노이즈로 작용할 것이다. 이러한 리플을 제거하기 위해 전압을 이동 평균하였고, 이동평균점의 개수에 따른 전압 파형을 Table 3에 나타내었다. Table 3의 맨 위부터 아래로 각각 이동평균 전의 원본 전압 파형, 15점, 21점, 27점 이동평균 전압 파형을 나타낸다. Table 3에 나타난 바와 같이 350Hz의 싸이리스터 출력 특성으로 인한 불필요한 미세 리플을 제거하면서도 원본 전압 파형의 패턴을 크게 왜곡 시키지 않는 21점 이동평균법이 가장 합리적일 것으로 판단된다. 이는 본 연구에서의 용접 파형 계측 주파수가 7500Hz로 싸이리스터 출력 주파수의 약 21배이기 때문이다. 다시 말해, 하나의 싸이리스터 신호로 인한 전압 파형의 변동을 나타내는 미세 리플 하나는 약 21개의 데이터 점으로 이루어져 있으며, 이를 다시 하나의 데이터 점으로 바꾸기 위해서는 21점 이동평균이 가장 합리적이라고 할 수 있다.

Table 3 Voltage waveform with point number for moving average point

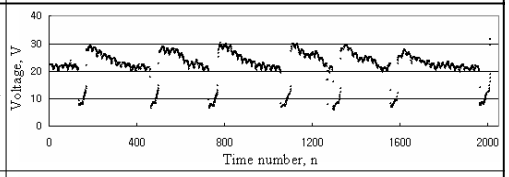
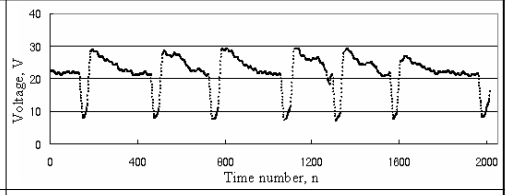
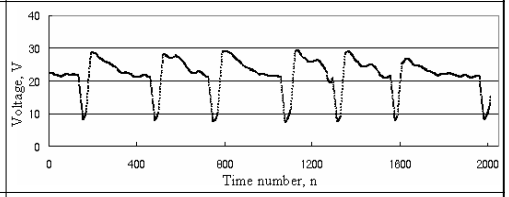
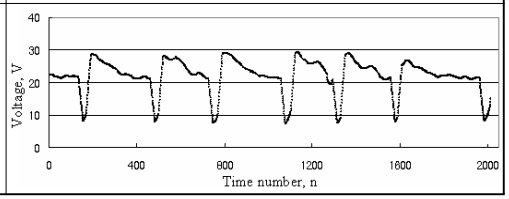
Moving average	Waveform
Original	
15 points	
21 points	
27 points	

Fig. 6에 측정된 용접 전압과 V_{ap} 간의 상관관계를 나타내었다. 용접 전압이 증가 할수록 V_{ap} 역시 증가하는 경향을 나타내었다.

식 (3)과 같이 용접 시 회로 전압 강하와 아크 전압 강하를 모두 포함하는 아크 피크 전압(V_{ap})에 앞서 계산 된 회로 전압 강하(V_{sc})를 뺌으로써 순수 아크 전압 강하(V_{arc})를 계산할 수 있다.

$$V_{\text{arc}} = V_{ap} - V_{sc} \tag{3}$$

3.3 순수 아크 전압 강하(V_{arc})와 아크 길이(L_{arc})의 상관 관계 검토

Table 4에 설정 전압에 따른 용접 비드 표면과 전형적인 아크 길이를 나타내는 고속 카메라 프레임을 나타내었다. 전압이 증가함에 따라 아크 길이가 길어지고, 그에 따른 아크 직경 증가로 용접 비드 폭이 증가하는 경향을 나타내었다.

Fig. 7은 고속 카메라 촬영에 의해 획득 된 영상 분

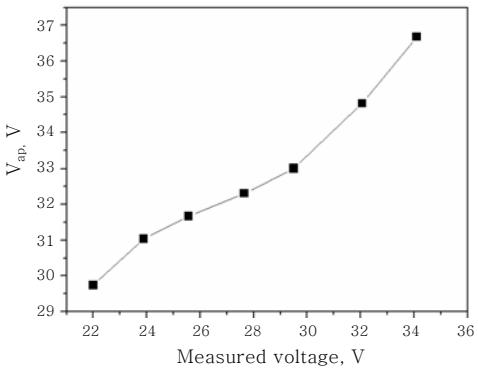
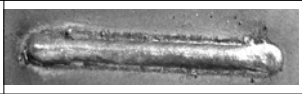
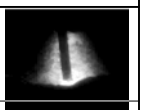
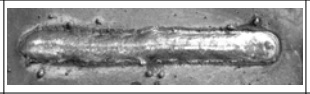
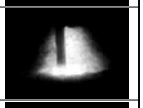
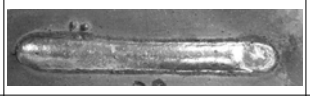
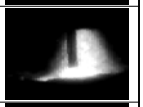
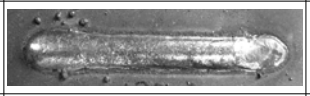
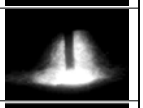
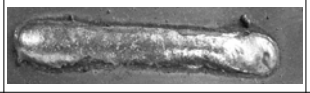
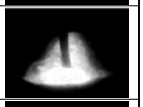
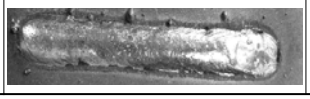
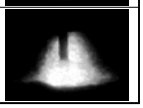


Fig. 6 Relationship between measured voltage and V_{ap}

Table 4 Bead appearances and typical frames with set voltage

Set Voltage, V	Bead appearance	Typical frame
22		
24		
26		
28		
30		
32		
34		

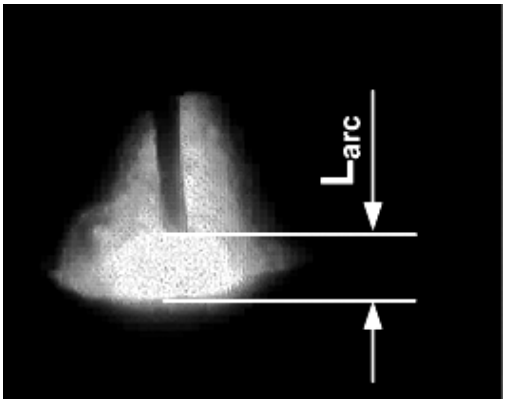


Fig. 7 Arc length(L_{arc}) measurement by high speed camera frame capture

석을 통하여 아크 길이(L_{arc})를 측정하는 방법을 나타낸다. 각 용접 조건 당 30개의 용적 이행 직후 최대 아크 길이 측정 후 평균하여 L_{arc}를 구했다

Fig. 8은 가로축을 측정 번호, 세로축을 L_{arc}로 하여, V_{arc}와 각 V_{arc} 조건 당 30개씩 측정한 L_{arc}의 데이터를 나타낸다. 그리고 Fig. 9는 V_{arc}와 30개의 L_{arc} 값을 각 V_{arc} 조건별로 평균한 값의 상관관계를 나타낸다. V_{arc}가 증가함에 따라 L_{arc}도 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다.

L_{arc}와 V_{arc}의 상관관계에 대한 1차 회귀 분석을 통해

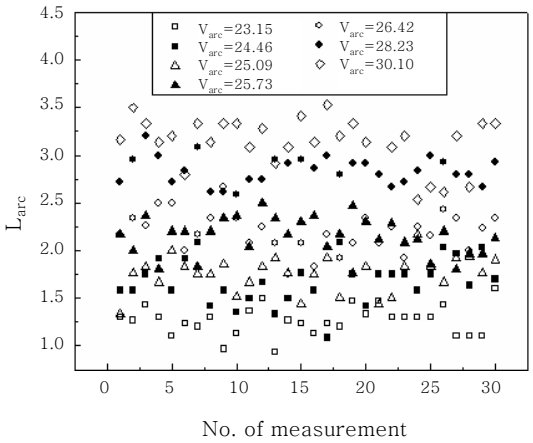


Fig. 8 Relationship between V_{arc} and Larc with no. of measurement

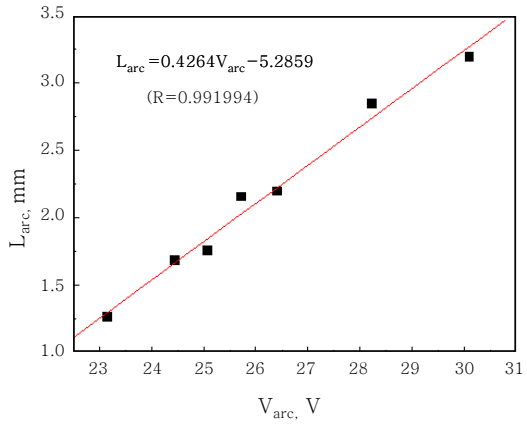


Fig. 9 Relationship between average of V_{arc} and L_{arc}

식(4)와 같은 아크 길이 추정 방정식을 도출하였고, 상관 계수 R은 0.99194로 나타났다.

$$L_{arc} = 0.4264\,V_{arc} - 5.2859 \text{(단, } Varc \approx 12.4) \quad (4)$$

Smartt[8] 등은 식 (5)와 같이 L_{arc}를 용접 회로 저항을 고려하지 않은 용접 전압, 전류의 함수로 정리하였지만, 본 연구에서는 식 (4)와 같이 V_{ap}에서 V_{sc}를 제외한 순수 아크 전압의 함수로 아크 길이 추정 식을 도출하였다. 하지만 본 연구는 용접 전류 250A의 경우에만 국한되므로 차후에는 다양한 전류 영역에서의 실험을 통하여 그 경향을 알아보는 것이 요구된다.

$$L_{arc} = C_0 V + C_1/I + C_2 I \quad (5)$$

여기에서 V는 용접 전압, I는 용접 전류, C_0, C_1, C_2는 상수이다.

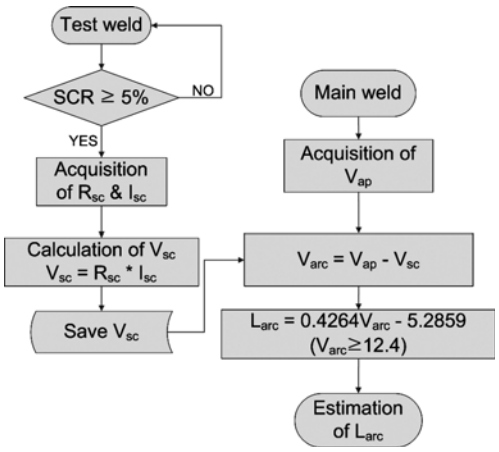


Fig. 10 Basic algorithm of arc length estimation

3.4 아크 길이 추정 알고리즘

Fig. 10은 아크 길이 추정 기본 알고리즘에 대한 flow chart를 나타내었다. 본 연구에서 소개하는 알고리즘은 테스트 용접단계를 통해 R_{sc}측정하여 V_{sc}를 도출한 후 이 값을 본 용접에 적용하는 방식이다.

본 연구에서는 FCAW에서 아크 길이를 추정 할 수 있는 기본 방법과 알고리즘을 제안하였다. 이러한 아크 길이 추정 기술의 다양한 적용과 신뢰성 향상을 위해 추후에는 다양한 용접 케이블 조건, 용접 와이어 종류, 용접 전류 등에 따른 아크 길이 추정 파라메터의 변동에 대한 연구가 필요하다.

4. 결 론

FCAW에서의 아크 길이 추정 기술 개발에 관한 연구 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1) 용접 케이블 저항, 와이어 접촉 저항, 돌출 와이어 벌크 저항을 모두 고려하는 단락저항 측정 방법을 이용하여 회로저항(R_{sc})을 측정하여 회로 전압 강하(V_{sc})를 계산하는 방법을 제시하였다.

2) 아크 피크 전압(V_{ap})에 회로 전압 강하(V_{sc})를 뺌으로써 순수 아크 전압 강하(V_{arc})를 계산하는 방법을 제시하였다.

3) 순수 아크 전압 강하(V_{arc})와 고속 카메라 측정을 통한 실측 아크 길이(L_{arc})에 대한 상관관계 검토 결과, 순수 아크 전압 강하(V_{arc})에 비례하여 아크 길이가 증가하는 경향을 나타내었고 이에 대한 1차 회귀분석을 통해 아크 길이 추정식을 도출하였다. 따라서 용접 시 실시간으로 용접 전류, 전압 파형을 모니터링 하는 것만으로 L_{arc}를 합리적으로 추정할 수 있다.

후 기

본 연구의 실험을 위해 용접기를 기증해 주신 (주)TAESIN G&W와 실험에 많은 도움을 준 부경대학교 석사 과정 김성호님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 용접 접합 편람 - 대한 용접 학회 1998, (518-522)(in Korean)
2. S.C. Absi Alfaro., G.C. Carvalho, S.A. de Melo Junior, "Stand off's indirect estimation in GMAW", Journal of Materials Processing Technology 157-158 (2004) 3 - 7
3. Jesper S. Thomsen, "Feedback Linearization based Arc Length Control for Gas Metal Arc Welding", 2005 American Control Conference, June 8-10, 2005
4. Jesper S. Thomsen, "Advanced Control Methods for Optimization of Arc Welding", Ph.D. Thesis
5. Jin-An Cho, "Development and application of high performance calorimeter to measure the melting efficiency of GTAW", Master's thesis of Pukyung national university Feb. 2007(40)(in Korean)
6. M.J.M Hermans and G. Den ouden, "Process behavior and stability in short circuit gas metal arc welding", Welding Research Supplement, April, 1999 (137 - 141)
7. Joung-hyun Lee, "A study on variation of current, voltage drop and heat input depending on heat condition of welding single cable", Master's thesis of Pukyung national university, Feb. 2008(32-34)(in Korean)
8. Herschel B. Smartt, "Intelligent Control of Modular Robotic Welding Cell", 6th International Conference on Trends in Welding Research, 15-19 April 2002
9. Byoung-Oh Kam, Sang-Myung Cho, Sang-Bong KIM, "A Study on Bead Height Control of GMAW by Short Circuit Time Ratio", Korean society of ocean engineering (2002) 53~59(in Korean)