

회전아크를 이용한 수평필릿 용접에 관한 연구 (II)

- 고속용접공정의 개발 -

김철희* · 나석주** · 이현철*** · 김세환***

*펜실바니아주립대학교 재료공학과

**한국과학기술원 기계공학과

***삼성중공업 생산자동화연구파트

A Study on Horizontal Fillet Welding by Using Rotating Arc (II)
- Development of High-speed Welding Process -

Cheolhee Kim*, Suck-Joo Na**, Hyun-Cheol Lee** and Se-Hwan Kim***

*Dept. of Materials Science and Engineering, PSU, University Park, PA 16802, US

**Dept. of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

***Production Automation Research Dept., SHI, Geoje 656-701, Korea

Abstract

The horizontal fillet joint is one of the most important weld joints in the shipbuilding industry. High-speed rotating arc welding, which can increase the leg length, is an effective way to improve the weld productivity and quality for the horizontal fillet welding. Based on the Taguchi method, the effects of welding parameters on bead characteristics - leg length, asymmetry, undercut, overlap - are investigated for high-speed welding process. As a result, the adequate welding parameters are selected for the required leg length, symmetric bead and no undercut. Besides, considerably consistent leg length is observed for the horizontal fillet welding with gap variation up to 3mm.

(Received November 5, 2002)

Key Words : GMA welding, High-speed welding, Rotating arc, Horizontal fillet welding, Taguchi method, Root gap

1. 서 론

산업현장에서 용접공정의 생산성을 향상시키기 위하여 공정의 자동화와 효율화가 진행되고 있으며 특히 조선분야에서 80%이상의 용접장을 구성하는 필릿 용접부의 자동용접에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다. 이러한 연구의 결과로 필릿 용접부의 용접선 자동추적 및 용접조건적의 적응제어 방법 등이 현장에 널리 이용되고 있으며 또한 생산성을 더 향상시키기 위하여 탠덤(tandem) 용접이나 회전아크용접을 이용한 고속용접 방법 등에 대한 연구가 국내 조선업종에서 활발히 진행되고 있다¹⁻²⁾. 이 중 회전아크 용접방법은 평평한 비드를 형성하여 비드의 오버랩과 언더컷을 방지하고, 각장

을 증가시켜 용접의 고속화를 가능하게 하므로 수평필릿용접분야의 우수한 용접품질을 확보하고 생산성을 향상시킬 수 있는 유력한 방법으로 이용되고 있다. 그러나 아크 회전기술은 선진국의 관련 특허로 보호되고 있으며 고가의 장비를 국내로 도입시에도 공정변수 선정 등의 축적된 기술이 부족하여 국내에서는 많이 이용되지 못하고 있는 실정이다.

본 논문의 1편에서는 수평필릿용접에 GMA와이어를 이용한 회전아크를 적용할 때 공정변수에 따른 비드특성을 고찰하여 우수한 용접비드특성을 가짐을 확인하였으며, 또한 용착량을 증가시켜 루트간격(root gap)이 4mm인 경우에도 양호한 용접비드를 형성함을 알 수 있었다. 조선 산업의 현장 용접에서는 용접부재의 치수 오차나 용접시 열변형, 가접부 등으로 인하여 루트간격

이 불가피하게 존재하게 된다. 이 때 루트간격이 과도한 경우에는 1패스용접이 불가능하므로 현장 용접시 루트간격을 2mm이하로 유지하고 있다. 그러나 일반적인 용접방법에서는 2mm이내의 루트간격을 가지는 경우에도 간격의 크기에 따라 용접비드형상이 변하여 용접품질 유지에 어려움이 있으며, 회전아크 용접방법을 적용하는 경우에도 루트간격에 따른 용착량의 조절은 간격의 크기를 감지하는 것을 전제로 하기 때문에 관련센서가 추가로 필요하다³⁾. 본 연구에서는 2mm이내의 루트간격을 가진 용접부에 회전아크를 적용하여 기준 각장 길이 5mm 이상을 확보하기 위한 고속용접방법을 개발하였다. 이를 위하여 실험계획법을 통해 공정변수가 각장과 언더컷의 유무, 비대칭각장에 미치는 영향을 검토하고, 용착량을 조절하지 않고 용접품질을 확보하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험계획

본 연구에서 이용한 아크회전장치 및 토치 이송장치는 1편과 같다⁴⁾. 고속 용접을 구현하기 위하여 1.4mm 직경 와이어를 이용하는 FCA용접으로 용접실험을 수행하였으며, 용접기 및 용접변수는 Table 1과 같다.

실험계획법에서 고려한 용접변수는 용접비드에 영향을 크게 미치는 인자들로 용접전류, 용접전압, 용접속도, 오프셋 크기, 회전속도, 회전직경이고 잡음인자로 루트간격의 크기를 이용하였다. 본 연구에서 이용한 직교 배열은 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 으로 18회의 실험을 통하여 한 개의 2수준 인자와 최대 7개의 3수준 인자의 영향을 평가할 수 있으며 각각의 조건에서 2수준의 루트간격에 대해 실험하여 잡음인자의 영향을 고려하였다⁵⁻⁶⁾. 예비 실험을 통하여 60~80cpm의 고속용접이 가능한 용접 조건을 선정하였고 각각의 인자수준을 Table 2에 나타내었으며 오프셋의 방향은 1편과 동일하다⁴⁾. 실험인자의 배치는 Table 3과 같으며 이에 따라 총 36회의 실험이 수행되었고 시각센서로 각각의 시편에서 2회씩 용접비드형상을 측정하여 각장과 비대칭각장, 언더컷과 오버랩 유무를 조사하였다. 평균 각장, L_{mean} 은 식 1과 같이 양쪽 각장, L_1 , L_2 의 기하평균값을 이용하였고 비대칭각장, L_{diff} 는 식 (2)와 같이 각장차의 절대값

로 정의하였다.

$$L_{mean} = \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (1)$$

$$L_{diff} = |L_1 - L_2| \quad (2)$$

3. 비드형상의 분석

실험결과로부터 각장과 비대칭각장의 크기의 인자별

Table 2 Levels of control parameters

| | Level 0 | Level 1 | Level 2 |
|-------------------------|---------|---------|---------|
| Welding current (A) | 350 | 375 | 400 |
| Welding voltage (V) | 32 | 34 | 36 |
| Travel speed (cpm) | 60 | 70 | 80 |
| Offset (mm) | -2 | 0 | 2 |
| Rotation frequency (Hz) | 20 | 35 | 50 |
| Rotation diameter (mm) | 2 | 3 | - |
| Gap (mm) | 0 | 2 | - |

Table 3 L_{18} design matrix

| No | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | (1) | (2) |
|----|-------------------|-----------------|-----------------|--------------|--------|--------------------|-----|-----|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 3 | 0 | 0 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| 4 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 5 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| 6 | 0 | 1 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 7 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 1 |
| 8 | 0 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 9 | 0 | 2 | 2 | 0 | 2 | 1 | 0 | 1 |
| 10 | 1 | 0 | 0 | 2 | 2 | 1 | 0 | 1 |
| 11 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 1 |
| 12 | 1 | 0 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 13 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 |
| 14 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 15 | 1 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 |
| 16 | 1 | 2 | 0 | 2 | 1 | 2 | 0 | 1 |
| 17 | 1 | 2 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 |
| 18 | 1 | 2 | 2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| | Rotation diameter | Welding current | Welding voltage | Travel speed | Offset | Rotation frequency | Gap | |

Table 1 Welding parameters for FCA welding

| | |
|---------------|----------------------------|
| Wire | YFW-C50DR |
| Wire diameter | 1.4 mm |
| Shielding gas | CO ₂ , 20 l/min |
| Torch angle | 45 Deg. |
| CTWD | 15 mm |
| Welder | 600A SCR |

평균값을 구하여 Table 4와 5에 나타내었으며 각 인자 수준별로 비교한 그림을 Fig. 1에 나타내었다. 이 때, Fig. 1에서는 각장은 기준 각장 5mm에 대한 상대값으로 표시하였다.

각 인자들이 특성치에 미치는 영향을 평가하기 위하여 분산분석을 수행하였다. 어떤 인자의 수준차이가 특성치 변화에 주는 영향을 크기를 평가하기 위하여 쓰이는 F_0 값은 실험인자의 분산값을 에러의 분산값으로 나누어 구할 수 있다. 이 때, 인자의 F_0 값과 기각치 $F(\alpha)$ 을 비교하여 특성치에 대한 인자의 유의성을 평가할 수 있으며 $F_0 > F(\alpha)$ 이면 유의수준에서 유의함을 뜻한다. 분산분석 결과로부터 영향이 아주 작은 인자들을 에러항으로 합산(pooling)한 후 다시 분산분석하여 Table 6과 7에 나타내었다.

Table 4 Average effect on leg length

| Level | Rotation diameter | Welding current | Welding voltage | Travel speed | Offset | Rotation frequency |
|-------|-------------------|-----------------|-----------------|--------------|--------|--------------------|
| 0 | 6.176 | 6.162 | 6.143 | 6.635 | 6.274 | 6.199 |
| 1 | 6.470 | 6.382 | 6.218 | 6.294 | 6.359 | 6.412 |
| 2 | - | 6.427 | 6.609 | 6.041 | 6.338 | 6.359 |

Table 5 Average effect on asymmetry

| Level | Rotation diameter | Welding current | Welding voltage | Travel speed | Offset | Rotation frequency |
|-------|-------------------|-----------------|-----------------|--------------|--------|--------------------|
| 0 | 1.199 | 1.271 | 0.903 | 1.325 | 2.553 | 1.281 |
| 1 | 1.308 | 1.368 | 1.392 | 0.974 | 0.439 | 1.259 |
| 2 | - | 1.120 | 1.464 | 1.460 | 0.768 | 1.220 |

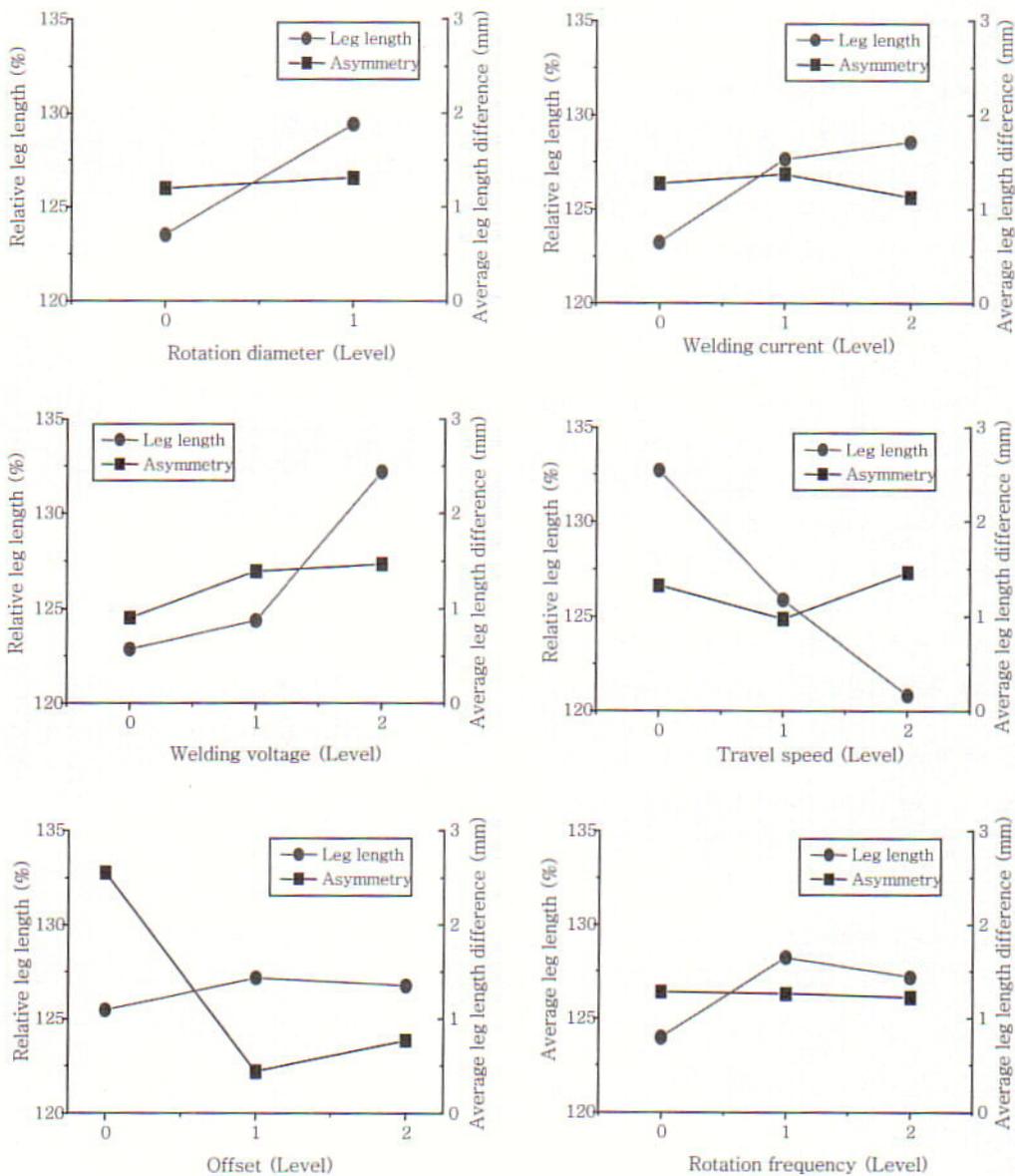


Fig. 1 Effect of welding parameters on leg length characteristics

분산분석 결과로부터 각장에 영향을 많이 주는 인자는 용접속도, 용접전압, 회전직경이 있으며, 용접전압, 회전직경이 클수록, 용접속도가 작을수록 더 큰 각장을 갖게 되어 더 큰 접합강도를 가지게 됨을 알 수 있다. $F_{1,12,0.90}=3.18$, $F_{2,12,0.90}=2.76$ 이므로 회전직경, 용접 전압과 용접속도는 유의 수준 $\alpha=0.1$ 에서 통계적으로 유의하다. 또한 Fig. 1에서와 같이 모든 인자들에서 평균적으로 기준 각장보다 20%이상 큰 각장을 가지므로 80cpm과 같이 고속 용접에서도 각장길이를 확보할 수 있어 고속용접이 가능함을 알 수 있다.

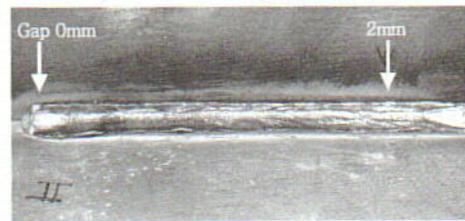
분산 분석 결과 비대칭각장에 가장 크게 영향을 주는 인자는 오프셋의 크기이며 오프셋이 -2mm일때 즉, 모재(base metal)와 보강재(stiffener) 중 모재쪽으로 토치가 편향될 때 비대칭각장이 나타남을 보여주었다. 유의 수준 $\alpha=0.1$ 에서 $F_{1,12,0.90}=2.76$ 이므로 용접 전압과 오프셋크기가 통계적으로 유의하였으나 오프셋의 크기의 분산값이 용접전압에 비하여 상당히 큰 값을 가지고 있다.

비대칭각장에 대한 ISO규격에 따르면 기준각장 5mm인 경우 비대칭각장이 약 2.5mm이하의 조건이 가장 엄격한 조건으로 제시되고 있다⁷⁾. Table 5의 인자별 평균값이 2.5mm이상인 되는 조건은 오프셋이 -2mm일 때이고 다른 조건들에서는 관련 규격을 만족할 수 있음을 알 수 있다.

오버랩은 실험계획상의 실험조건들에서 나타나지 않았으며 보강재쪽 언더컷은 회전수 50Hz, 오프셋 0mm 이상, 루트간격이 2mm 존재할 때 발생하였다. 회전수가 증가하는 경우 용접시 스파터가 많이 발생하고 용접이 다소 불안정해지고, 1편의 연구결과에서와 같이 오

프셋이 0mm이상이거나 루트간격이 존재하는 경우에는 언더컷에 취약한 조건들이므로 언더컷이 발생한 것으로 생각된다^{4,5)}. 모재쪽 언더컷은 회전직경 3mm, 오프셋 -2mm, 용접전류 375A 이하, 루트간격 0mm에서 발생하였다. 용접전류가 작아 용착량이 부족하고, 회전직경이 크고, 오프셋이 음의 값을 가져 모재쪽으로 토치가 편향되면서 모재쪽에서 큰 아크 압력을 가해지므로 모재쪽에서 언더컷이 발생함을 알 수 있다.

고속 용접을 구현하기 위하여 용접전류 400A의 조건에서 80cpm의 속도로 루트간격이 각각 0mm에서 2mm, 0mm에서 3mm로 변할 때 비드 형상을 Fig. 2에 나타내었고, 루트간격의 크기별로 각장을 구하여 Fig. 3에 나타내었다. 언더컷과 오버랩과 같은 용접불량은 관찰되지 않았으며 각장 5mm이상을 확보할 수 있었다. 또한 루트간격이 변하는 경우에도 각장의 변화는 0.5mm 이내로 안정된 용접품질을 가짐을 확인할 수 있었다.



(a) Gap 0~2mm



(b) Gap 0~3mm

Fig. 2 Test results

Table 6 ANOVA table for leg length

| Factors | S | ϕ | V | F_0 |
|---------|-------|--------|-------|-------|
| Voltage | 0.389 | 1 | 0.389 | 3.837 |
| Offset | 0.753 | 2 | 0.376 | 3.709 |
| Speed | 1.069 | 2 | 0.534 | 5.269 |
| Error | 1.217 | 12 | 0.101 | |
| Totals | 3.428 | 17 | | |

Table 7 ANOVA table for asymmetry

| Factors | S | ϕ | V | F0 |
|---------|--------|--------|-------|--------|
| Voltage | 1.119 | 2 | 0.559 | 3.053 |
| Offset | 15.522 | 2 | 7.761 | 42.374 |
| Error | 2.381 | 13 | 0.183 | |
| Totals | 19.022 | 17 | | |

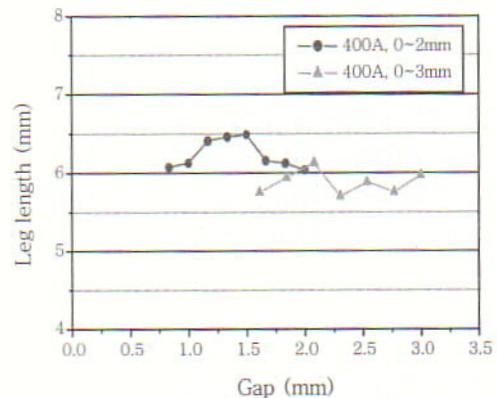


Fig. 3 Leg length measurement for test results

4. 결 론

회전아크 용접을 수평필릿 용접에 적용하여 고속용접을 구현하기 위한 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

실험계획법을 이용하여 용접인자들이 각장 및 비대칭 각장, 언더컷 유무와 같은 비드특성에 미치는 영향을 검토하고 분산분석을 통하여 특성치에 영향을 많이 주는 인자를 선정하였다.

회전아크 용접공정을 통하여 80cpm 정도의 고속 용접에서도 양호한 용접품질을 가지면서 기준각장을 만족하는 용접부를 얻을 수 있어 회전아크 용접공정이 고속 용접에 이용할 수 있음을 알 수 있었다.

회전아크 용접의 경우 비드의 퍼짐성이 증가하므로 3mm까지 루트간격이 변하는 경우에도 용착량을 조절하지 않고 고정된 조건에서 원하는 각장을 얻을 수 있었고, 루트간격이 변하는 경우에도 거의 일정한 각장을 유지함을 확인하였다.

후 기

본 논문은 교육인적자원부에서 주관하는 두뇌한국 21의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 관계자여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Hyeong-Soon Moon *et al.* : A Study on Adaptive Control to Fill Weld Groove by Using Multi-Torches in SAW, Journal of KWS, **17-6** (1999), 445-454 (in Korean)
2. Sung-Won Kang *et al.* : A Study on the Arc Sensor Algorithm for Welding Robot Using Rotating Torch, Proceedings of the 2002 Spring Annual Meeting of Korean Welding Society, May 2-3, **39** (2002), 46-48, (in Korean)
3. C.-H. Kim and S.-J. Na : Basic experiments on Welding Parameters for Developing Automatic Welding System of Curved Weld Seams, KAIST Report, 1997 (in Korean)
4. C.-H. Kim and S.-J. Na : A Study on Horizontal Fillet Welding by Using Rotating Arc -Part 1 : Relation between Welding Parameters and Weld Bead Shape, Journal of KWS, **21-3**(2003),296-301 (in Korean)
5. J. Cornu : Consumable Electrode Process, Advanced Welding Processes, **Vol. 2**, IFS (Publications) Ltd, 1988
6. 박성현 : 응용실험계획법, 영지문화사, 1990 (in Korean)
7. ISO : Arc-welded Joints in Steel-Guidance on Quality Levels for Imperfection, ISO 5817, International Organization for Standardization, 1992