# Narrow Gap 맞대기 TIG 용접에서 생산성 향상을 위한 연구

전 재 호<sup>\*</sup>·김 성 률<sup>\*</sup>·조 상 명<sup>\*\*,†</sup>

\*부경대학교 신소재시스템공학과 대학원 \*\*부경대학교 신소재시스템공학과

## A Study on Productivity Improvement in Narrow Gap TIG Welding

Jae-Ho Jun\*, Sung-Ryul Kim\* and Sang-Myung Cho\*\*,\*

\*Dept. of Materials System Engineering, Graduate School, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea \*\*Dept. of Materials System Engineering, Pukyo.ng National University, Busan 608-739, Korea

\*Corresponding author : pnwcho@pknu.ac.kr (Received January 22, 2016 ; Revised February 3, 2016 ; Accepted February 12, 2016)

#### Abstract

Adoption of narrow gap welding shall be increased for the butt joint of thick plate, because the deformation and welding cost is reduced by decrease of cross-sectional area. However, sometimes narrow gap causes defects such as lack of fusion since it has small groove angle and narrow groove width. Therefore, GMAW, GTAW and SAW process shall be adopted to narrow gap welding with small bead hight and low deposition rate.

In this study, Super-TIG welding using C-type strip was applied to semi-narrow gap butt joint in order to increase the welding productivity. High deposition rate 10kg/hr was obtained by high current 600A without undercut, humping bead and other welding defects. Measuring the mean and standard deviation of the melting depth to evaluate the developed processes, the fusion line type was determined by measuring the difference between maximum and minium melting depth. Furthermore, a model on arch fusion line and linear fusion line was suggested in order to prevent LF on groove wall in narrow gap butt welding.

Key Words : Narrow gap, Butt welding, TIG welding, Super-TIG welding, Deposition rate, Melting depth, Fusion line

## 1. 서 론

후판 맞대기 용접 시 기존 GMAW, GTAW, SAW 등에서 용착단면적 감소를 통해 용접비용 감소, 변형량 감소의 장점을 가지는 narrow gap의 적용이 늘고 있 다<sup>1-6)</sup>.

그러나 narrow gap 맞대기용접의 작은 그루브 각으 로 인해서 그루브 벽면 쪽 용입이 부족한 Lack of Fusion(LF) 결함이 빈번하게 발생한다. 이러한 LF를 방지하기 위해 기존의 GMAW, GTAW 등의 용접에서 는 아크가 그루브 벽면 쪽으로 쉽게 도달할 수 있는 기 술들을 개발되었다<sup>1-3,5-9)</sup>. Fig. 1은 GTAW의 narrow gap welding 기술로 써, 비대칭형으로 가공된 텅스텐 전극을 회전시켜 벽면 을 용융시키는 기술이다<sup>1-3)</sup>. 이러한 장치를 사용함으로 써, 그루브 벽면 쪽 LF는 감소할 수 있으나, 별도의 텅스텐 전극 회전 장치가 필요하며, GTAW의 낮은 용 착속도로 인해 생산성이 낮다는 단점이 있다.<sup>2-4,11-14)</sup>

Fig. 2는 GMAW의 narrow gap welding 기술로 써, 소모성 전극을 사용하는 GMAW의 특징을 살린 기 술이다<sup>4-9)</sup>.

- (A) 와이어 송급시 기계적으로 와이어가 그루브 벽을 향해 송급되도록 하는 기술
- (B) 용접 토치의 오실레이션으로 와이어가 그루브 벽
   면으로 향하게 하는 기술

Journal of Welding and Joining, Vol.34 No.1(2016) pp68-74 http://dx.doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.1.68



Fig. 1 Electrode rotating technique applied to narrow gap welding by GTAW



Fig. 2 Wire feeding technique applied to narrow gap welding by GMAW

- (C) GMAW의 컨택트 팁을 각도가 있는 컨택트 팁을 사용하여 와이어가 그루브 벽면으로 향하게 하여 회전하는 기술
- (D) 두 개의 와이어가 감겨져 있는 stranded wire를 사용하여 송급시 두 개의 와이어가 풀리면서 그루 브벽면으로 향하게 하는 기술

이러한 기술들에도 불구하고, 기존 GMAW, GTAW, SAW 등은 융합불량과 같은 용접결함을 방지하기 위해 낮은 용착속도로 용접하고 있는 실정이다.

따라서 높은 생산성을 가지며 narrow gap welding 의 작은 개선각과 좁은 폭으로 인해 발생하는 융합불량 이 발생하지 않는 narrow gap 맞대기용접 공정의 개 발이 필요하다.

본 연구는 C형 스트립을 사용하는 Super-TIG 용접 을 narrow gap 맞대기 용접에 적용하여 대전류, 고용 착속도에서 언더컷, 험핑비드 및 기타 용접 결함이 없 는 공정을 개발하고자 한다. 개발된 공정의 평가를 위해 그루브 면으로부터 fusion line까지의 거리인 melting depth의 평균과 표준편차를 측정하였다.

#### Table 1 Chemical composition of SM490A

С	Fe	Si	Mn	Р	S	Cr	Ni	Мо
0.155	Bal.	0.163	0.455	0.0071	0.009	0.019	0.0101	0.0006

Table 2 Chemical composition of carbon steel C-strip

С	Fe	Si	Mn	Р	S	Cu	Ni	Cr
0.074	Bal.	0.617	1.191	0.015	0.008	0.167	0.004	0.026

 Table 3 Chemical composition of STS316

С	Cr	Fe	Mn	Mo	Ni	Р	Si	S
0.05	18.74	Bal.	1.027	2.106	10.88	0.036	0.491	0.004

Table 4 Chemical composition of STS316L C-strip

С	Cr	Fe	Mn	Мо	Ni	Р	Si	S
0.02	17.43	Bal.	1.149	2.051	10.67	0.033	0.571	0.0031

## 2. 실험방법

공정 개발을 위해 탄소강, STS316L 2가지 소재를 사 용하였으며, Table 1,3는 각 모재의 화학조성, Table 2,4에는 각 용가재의 화학조성을 나타내었다. 본 실험 에서 사용하는 탄소강 C형 용가재는 EM12K 원형와이 어, STS316L C형 용가재는 ER316L 원형와이어를 성형하여 제작하였다.

# 2.1 Super-TIG에 의한 Groove angle 20° 맞대기 용접 가스 변경 실험

2.1.1 Groove angle 20° 맞대기 용접 가스 변경 실험 SM490A t20mm, root width 10mm 시험편에 용 접을 실시하였으며, Fig. 3은 시험편 모식도, Table 5는 가스변경 실험의 용접조건을 나타내었다. 용접 실드가스는 100%Ar, Ar+10%He, Ar+30%He, Ar+50%He 으로 변경하여 실험하였다. 총 41ayer를 1pass 11ayer로 적층 설계 하였으며, Pass 1, 2, 3의 설계비드높이는 5.5mm,

 Table 5 Groove angle 20° welding conditions

Base metal	SM490A					
Filler metal	Carbon Steel C-Strip (6.67mm <sup>2</sup> )					
Arc length	5.5 mm					
Shield gas	100% Ar, Ar+10%He, Ar+30%He, Ar+50%He					
Pass	1	2	3	4		
Avg. Current (A)	580	600	620	600		
Welding speed (cpm)	16	19	19	17		
Deposition rate (kg/hr)	5.6	6.8	7.8	7.8		

Base metal	SM490A					
Filler metal	Carbon Steel C-Strip (6.67mm <sup>2</sup> )					
Arc length	5.5 mm					
Shield gas	Ar+30%He					
Pass	1	2	3	4		
Avg. Current (A)	550	520	560	560		
Welding speed (cpm)	16	19	19	17		
Deposition rate (kg/hr)	5.6	6.8	7.8	7.8		

Table 6 Groove angle 15° welding conditions



Fig. 3 Carbon steel 20° groove design



Fig. 4 Carbon steel 15° groove design

Pass 4의 설계비드높이는 6mm로 설정하였다.

2.1.2 Super-TIG에 의한 Groove angle 15° 맞대 기용접 실험

SM490A t20mm, root width 10mm, groove angle 15° 시험편에 용접을 실시하였으며, Fig. 3은 시험편 모식도, Table 6는 실험의 용접조건을 나타내었다. 총 4layer를 1pass 1layer로 적충설계 하였으며, Pass 1, 2, 3의 설계비드높이는 6.0mm, Pass 4의 설계비 드높이는 5.5mm로 설정하였다.

## 2.2 Super-TIG에 의한 STS316 맞대기용접 적용

## 2.2.1 t16 STS 316 맞대기 용접 실험

STS316 t16mm, root width 10mm, groove angle 20°에 용접을 실시하였으며, Fig. 3은 시험편 모식도, Table 6는 실험의 용접조건을 나타내었다. 총 4layer를 1pass 1layer로 적충설계 하였으며, 각Pass의 설계비

Table 7 t16 STS316 welding conditions

Base metal	STS316					
Filler metal	STS316L C-Strip (5.0mm <sup>2</sup> )					
Arc length	5.0 mm					
Shield gas	Ar+7%H <sub>2</sub>					
Pass	1	2	3	4		
Avg. Current (A)	430	490	490	490		
Welding speed (cpm)	25	31	28	25		
Deposition rate (kg/hr)	5.0	7.0	7.0	7.0		

Table 8 t25 STS316 welding conditions

Base metal	STS316							
Filler metal								
Filler metal	S1S316L C-Strip (5.0mm <sup>-</sup> )							
Arc length	6.0 mm							
Shield gas	Ar+7%H <sub>2</sub>							
Pass	1	2	3	4	5	6		
Avg. Current (A)	520	600	600	600	600	560		
Welding speed (cpm)	35	38	34	31	28	28		
Deposition rate (kg/hr)	8	10	10	10	10	10		



Fig. 5 t16 STS groove design



드높이는 4.0mm로 설정하였다.

2.2.2 t25 STS 316 맞대기 용접 실험

STS316 t25mm, root width 10mm, groove angle 20°에 용접을 실시하였으며, Fig. 3은 시험편 모식 도, Table 7는 실험의 용접조건을 나타내었다. 총 6layer 를 1pass 1layer로 적층설계 하였으며, 각Pass의 설 계비드높이는 4.5mm로 설정하였다.

# 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 Super-TIG에 의한 탄소강 맞대기용접 적용

3.1.1 Groove angle 20° 맞대기 용접 가스 변경 실험 Table 9는 실드가스 100%Ar일 때의 비드외관이다. 비드외관 사진에서 알 수 있듯이 험핑비드가 발생하였 고. 그루브 벽면과 정상적인 융합이 이루어지지 않았다. Table 10은 실드가스 Ar+10%He일 때의 비드외관이 다. Pass 1은 시험편 엔드부에서 약간의 험핑비드가 발생하였고 Pass 2에서는 전 구간에서 험핑비드가 발 생하였다. 실드가스 100%Ar, Ar+10%He의 실험에 서 발생한 험핑비드는 아크압력과 용융풀 깊이와의 상 관관계에 따라 발생하는 현상이다. Fig. 7은 험핑비드 발생 모식도와 험핑비드 부등식을 나타낸다. 험핑비드 부등식에 따르면 용융풀의 깊이보다 압입깊이가 더 클 때 험핑비드는 발생하게 되며. 압입깊이는 아크 최대 압력에 의해 결정되게 된다. Fig. 8은 전류 300A에서 실드가스에 따른 아크압력 분포를 나타낸 그래프이다 <sup>13)</sup>. He의 혼합비가 증가할수록 전극 직하의 최대 아크 압력이 분산되는 것을 확인 할 수 있으며, 이는 험핑비

 Table 9
 100%Ar bead appearance



 Table 10
 Ar+10%He bead appearance



Fig. 7 Schematic of humping bead formation

드 발생을 감소시키고, 그루브 벽면 용입을 증가시킬 수 있는 방안이 될 수 있다<sup>13-14)</sup>.

Table 11은 실드가스 Ar+30%He의 비드외관이고, Table 12는 실드가스 Ar+50%He의 비드외관이다. 두 시험편 모두 Pass 1부터 Pass 4까지 험핑비드 없 이 양호한 비드외관을 형성하였다. 비드 토우부도 둔각 을 형성하여, 그루브 벽면과 융합이 잘 된 것을 알 수 있다. He가스의 비용은 Ar가스에 비해 약 5배 가량 비 싸기 때문에 혼합량을 줄일수록 용접비용을 감소시킬 수 있다.



Fig. 8 Arc pressure distribution for different shield gas at 300A

 Table 11
 Ar+30%He bead appearance



 Table 12
 Ar+50%He bead appearance



3.1.2 Super-TIG에 의한 Groove angle 15° 맞대 기용접 실험

Table 13은 실드가스 Groove angle 15° 시험편의 비드외관이다. Pass 1부터 Pass 4까지 험핑비드 없이 양호한 비드외관을 형성하였다. 비드 토우부도 둔각을 형성하여, 그루브 벽면과 융합이 잘 된 것을 알 수 있다. Fig. 9는 횡단면으로 LF 없는 양호한 횡단면을 확인하 였다. Fig. 10은 capping pass를 제외한 영역에서 melting depth를 측정한 그래프이다. 평균 0.88mm, 평균 표준편차 0.27로 얻어졌다.

## Table 13 Groove angle 15° bead appearance





Fig. 9 Groove angle 15° macro section



Fig. 10 Groove angle 15° melting depth

## 3.2 Super-TIG에 의한 STS316 맞대기용접 적용

#### 3.2.1 t16 STS316 맞대기용접 실험

Table 14는 t16 STS316, Groove angle 20°의 비드외관이다. Pass 1부터 Pass 4까지 험핑비드 없이 양호 한 비드외관을 형성하였다. 비드 토우부도 둔각을 형성하여, 그루브 벽면과 융합이 잘 된 것을 알 수 있다. Fig. 11은 횡단면으로 LF 없는 양호한 횡단면을 확인 하였다. Fig. 12는 capping pass를 제외한 영역에서 melting depth를 측정한 그래프이다. 평균 0.78mm, 평 균 표준편차 0.21로 양호한 값이 얻어졌다.

#### Table 14 t16 STS316 bead appearance





Fig. 11 t16 STS316 macro section



Fig. 12 t16 STS316 melting depth

Journal of Welding and Joining, Vol. 34, No. 1, 2016

## 3.2.2 t25 STS316 맞대기용접 실험

Table 15는 t25 STS316, Groove angle 20°의 비 드외관이다. Pass 1부터 Pass 4까지 험핑비드없이 양 호한 비드외관을 형성하였다. 비드 토우부도 둔각을 형

Table 15 t25 STS316 bead appearance





Fig. 13 t25 STS316 macro section



Fig. 14 t25 STS316 melting depth

성하여, 그루브 벽면과 융합이 잘 된 것을 알 수 있다. Fig. 11은 횡단면으로 LF 없는 양호한 횡단면을 확인 하였다. Fig. 14는 capping pass를 제외한 영역에서 melting depth를 측정한 그래프이다. 평균 1.05mm, 평균 표준편차 0.33으로 양호한 값이 얻어졌다.

## 3.3 Fusion line 형상에 대한 모델링

Narrow gap 맞대기용접은 작은 그루브 각으로 인해 LF 결함이 빈번하게 발생한다. LF의 발생은 그루브 벽면 쪽 용입인 melting depth의 평균과 표준편차 값 에 따라 영향을 받게되며, 평균값은 높을수록, 표준편 차는 낮을수록 LF 발생 가능성은 줄어든다. 이러한 정 보를 토대로 narrow gap 맞대기 용접에서 형성되는 fusion line은 2가지 형태로 구분할 수 있다.

- Arch fusion line : 원호의 형태를 띄는 fusion line

- Linear fusion line : 선의 형태를 띄는 fusion line

Arch fusion line은 비드 높이 5~7mm 정도로 비 드높이를 높게 적층할 때 주로 나타나는 형태이다. 비 드 높이를 높게 적층하면 총 layer수를 감소시킬 수 있 으나, 최대 melting depth와 최소 melting depth의 차이가 커 LF(Lack of Fusion) 발생 가능성이 높다.

Linear fusion line은 비드 높이 1.5~2mm 정도로 비드높이를 낮게 적층할 때 주로 나타나는 형태이다. 비드 높이를 낮게 하여 적층하기 때문에 총 layer수는 증가하지만, 최대 melting depth와 최소 melting depth의 차이가 작아 LF 발생 가능성이 낮다.

△MD는 패스 내 최대-최소 용입 편차로 정의하였고, 이 값이 0.5mm 이하일 때를 linear fusion line으로



Fig. 15 Arch fusion line



Fig. 16 Linear fusion line

판단하였다.

탄소강과 STS316에 C형 용가재를 사용하는 Super-TIG를 적용하여 용접한 시험편의 △MD를 측정한 결과 탄소강 groove angle 20°, Ar+30%He 시험편은 0.19mm, groove angle 15°시험편은 0.29mm, STS316 t16 시험편은 0.48mm, STS316 t25 시험편은 0.38mm 로 얻어졌으며, 전체 linear fusion line에 해당된다.

Super-TIG를 narrow gap 맞대기 용접에 적용하였 을 때 높은 용착속도로 비드 높이를 5~7mm로 적층하 였음에도 불구하고 전체 단면에서 linear fusion line 이 형성되었다. 이는 C형상의 용가재가 대전류의 높은 아크압력으로 인해 용융풀이 압입되는 것을 막아주는 역할을 하여 벽면 용입의 편차를 줄인 것으로 판단된다.

# 4. 결 론

Narrow gap 맞대기 TIG 용접에서 용착속도 향상을 위한 연구 결과는 다음과 같다.

1) Narrow gap 맞대기 용접에서 형성되는 fusion line을 Arch fusion line과 Linear fusion line으로 모델링하였다.

2) SM490A t20, Groove angle 15°, 20°이음부에 최대 7.8kg/hr의 용착속도로 C형 용가재를 쓰는 Super-TIG용접을 실시한 결과, 비드 토우부가 둔각을 이루며 양호한 품질의 용접부를 얻을 수 있었다. Melting depth는 평균 0.88mm, 표준편차 0.27mm로 얻어졌 으며, 패스 내 최대-최소 용입편차는 평균 0.29mm로 Linear fusion line이 얻어졌다.

3) STS316 t25, Groove angle 20° 이음부에 최 대10kg/hr의 용착속도로 Super-TIG용접한 결과, 비 드 토우부가 둔각을 이루며 양호한 품질의 용접부를 얻 을 수 있었다. Melting depth는 평균 1.05mm, 표준 편차 0.33으로 얻어졌으며, 패스 내 최대-최소 용입편 차는 평균 0.38mm로 Linear fusion line이 얻어졌다.

4) Super-TIG용접을 narrow gap 맞대기 이음부에 적용한 결과, 비드 높이를 5~7mm로 크게 적층하였음 에도 불구하고 linear fusion line을 형성하였다.

## 후 기

본 연구는 부경대학교 자율창의학술연구비로 연구되 었습니다.

#### References

 Cicero M.D. Starling, Paulo V. Marques, Paulo J. Modenesi, Statistical modeling of narrow-gap GTA welding with magnetic arc oscillation. Journal of Materials Processing Technology, 51 (1995), 37-49

- Aravinda Pai, Irappa Sogalad, S.K. Albert, Prabhat Kumar, T.K. Mitra, S.Basavarajappa, Comparison of Microstructure and Properties of Modified 9Cr-1Mo Welds Produced by Narrow Gap Hot Wire and Cold Wire Gas Tungsten Arc Welding Processes, *Procedia Materials Science*, 5 (2014), 1482-1491
- D.N.Shim, I.C.Jung, The Characteristic Investigation on Narrow-gap TIG Weld Joint of Heavy wall Austenitic Stainless Steel Pipe, *Proceedings of KSME*, 3 (2003), 670-677(in Korean)
- J.T. McGRATH, R.S. CHANDEL, R.F. ORR, J.A. GIANETTO, Microstructure/Mechanical Property Relationship in Thick-Section C-Mn Narrow-Groove Welds, WELDING RESEARCH SUPPLEMENT, (Sep, 1988)
- 5. T. Nakamura, K. Hiraoka, Ultranarrow GMAW process with newly developed wire melting control system, *Science and Technology of Welding and Joining*, 6 (6) (2001)
- SUMI Hiroyuki, KATAOKA Tokihiko, KITANI Yasushi, Application of Narrow Gap Welding Process with "J-STARTM Welding" to Shipbuilding and Construction, *JFE TECHNICAL REPORT*, 20 (Mar., 2015)
- J.S. Jang, B.W. Lee, Application of GMAW Narrow Gap Welding, *Journal of KWS*, 2(1), (1984), 58-65(in Korean)
- M. Ramakrishnan, K. Padmanaban, V. Muthupandi, Studies on fracture toughness of cold wire addition in narrow groove submerged arc welding process, *Int J Adv Manuf Technol*, 68 (2013), 293-316
- IWATA Shinji, MURAYAMA Masatoshi, KOJIMA Yuji, Application of Narrow Gap Welding Process with High Speed Rotating Arc to Box Column Joints of Heavy Thick Plates, *JFE TECHNICAL REPORT*, 14 (Dec., 2009)
- Inoslav Rak, Arpad Treiber, Fracture behaviour of welded joints fabricated in HSLA steels of different strength level, *Engineering Fracture Mechanics*, 64 (1999), 401-415
- 11. Aravinda Pai, Irappa Sogalad, S.K. Albert, Prabhat Kumar, T.K. Mitra, S.Basavarajappa, Comparison of Microstructure and Properties of Modified 9Cr-1Mo Welds Produced by Narrow Gap Hot Wire and Cold Wire Gas Tungsten Arc Welding Processes, *Procedia Materials Science* 5 (2014), 1482-1491
- G.L.F. POWELL, G. HERFURTH, Charpy V-Notch Properties and Microstructures of Narrow Gap Ferritic Welds of a Quenched and Tempered Steel Plate, *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTION A*, 29A (Nov., 1998), 2775
- Dong-Soo Oh, Yeong-Sik Kim, and Sang-Myung Cho, Derivation of Current Density Distribution by Arc Pressure Measurement in TIG Welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, 10 (4) (2005), 442-446
- Choe, Jun-Tae, Park, Jong-Ryeon, Kim Dae-Sun, Study on Narrow groove TIG welding using Ar-He of shielding gas & hot wire, *Proceedings of KWS*, 44 (2005), 346-348 (in Korean)