

실험계획법에 의한 스테인레스강의 TIG용접특성 TIG Welding Characteristics of Stainless Steel by Design of Experiment

정중교* · 박경도** · 강대민***†

Joong gyo Chung*, Kyoung do Park**, Dae min Kang***†

(접수일 : 2014년 02월 27일, 수정일 : 2014년 05월 13일, 채택확정 : 2014년 05월 14일)

Abstract: Welding is very popular method for joining two or more metals. However, welding causes residual stress and distortion and these give a bad influence to the structure strength. In this paper, TIG welding technique was performed to investigate the joint characteristics of AISI321 steel. For its evaluation, the orthogonal array method and variance analysis were applied with three factors of electric current, travel speed and argon gas and also three levels of each factor to tensile tests for optimum design. From the results, the increaser weld speed the narrower bead width and the lower weld penetration. The increaser electric current the brighter argon gas and the wider bead width. Also weld speed influenced most on the tensile strength and presumption range of tensile strength at optimal condition from reliability 95% was estimated to 635.02±14.64. In addition the increaser weld speed and electric current the fracture occurred around bead vicinity.

Key Words : TIG Welding, Stainless Steel, Orthogonal Array Method, Tensile Strength, Variance Analysis

1. 서 론

아크용접 중 TIG (Tungsten inert-Gas arc welding) 용접은 우주·항공, 조선, 철도, 자동차, 반도체, 전자전기제품, 원자력발전설비, 방산기계 등 아주 광범위하고 다양한 산업분야에 적용되고 있다.^{1,2)} 특히 항공 산업분야에서의 용접은 열과 함께 진동이 발생하는 항공기 엔진배기관 부분과 각종 튜브나 밸브 등에 사용되며 배기관 장착 부위인 롤러의 잦은 진동이나 제작 시 용접이 원활

이 이루어지지 않으면 항공기 배기관의 용접부위의 주요 균열이 발생하고 이러한 균열이 발생 할 경우 항공기체의 균열을 복원하는데 주로 TIG용접이 사용되어 지고 있다.

이러한 TIG 용접에 대한 연구로는 S. H. Choi 등³⁾에 의해 금속조직관찰을 통하여 TIG 용접한 AZ31 마그네슘 합금에 대해 기계적 성질에 미세조직영향을 고찰하였고 J. H. Cho 등⁴⁾에 의해 국산 AC TIG 용접 전원을 이용하여 5052 알루미늄 합금 판재의 적정 용접 조건을 도출하는 실험을

***† 강대민(교신저자): 부경대학교 기계공학과

E-mail : dmkang@pknu.ac.kr

*정중교 : 부경대학교 기계공학과 대학원

**박경도 : 부경대학교 기계공학과 대학원

***† Dae-Min Kang(corresponding author) : Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University.

E-mail : dmkang@pknu.ac.kr

*Joong-Gyo Chung : Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University.

**Kyoung-Do Park : Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University.

행하였다. 또한 E. G. Na등⁵⁾에 의해 고온고압용으로 많이 사용되고 있는 스테인레스 강을 대상으로 부식특성을 평가함과 동시에 저변형률시험법을 이용하여 인공해수 중에서 용접재와 모재 등의 부식특성을 파악하였고 J. B. Ko등⁶⁾에 의해 유한요소 상용프로그램을 이용하여 STS304 TIG 용접시 발생하는 열응력과 잔류응력을 측정하였으나 용접부의 특성 변화에 대한 논리적인 인과관계를 제시하고 있는 연구는 많지 않다. 게다가 용접부의 기계적 특성에 영향을 미치는 TIG 용접의 공정 변수들 간 민감도 분석은 거의 이루어지고 있지 않는 상황이다.

따라서 본 논문에서는 항공기용 스테인리스강의 TIG 용접 시 용접 공정의 중요한 변수인 전류와 용접속도, 가스유량이 용접 강도 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 최근 최적설계분야에 적용하고 있는 실험계획법⁷⁻⁸⁾을 이용하여 수행된 통계적인 분산분석을 바탕으로 최적의 용접 공정 조건을 도출하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 실험재료

실험에 사용된 재료는 항공기 엔진 출력이후 발생하는 증기가스를 제거하기 위하여 설치된 항공기 배기관에 사용되는 오스테나이트계 스테인리스 AISI321강으로 이것은 AISI304 강종에 카본을 포함해서 안정화 요소인 티타늄을 첨가하여 내열성이 우수하고 항공기 배기관, 보일러 부품, 파이프, 열교환기 등에 사용할 목적을 개발된 것이다.

Table 1 Chemical composition of AISI321

Grade	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Ti
321	0.08	1.00	2.00	0.045	0.03	17.2	9~13	-	5×C% =<

Table 2 Mechanical properties of AISI321

Grade	Strength (N/Mm ²)	Si Tensile Strength (N/Mm ²)	Ductility (%)	Degree of Hardness		Density
				HRB	HV	
321	205 =<	621 =<	40=<	90=<	200=<	7.93

본 실험에서의 AISI321강 100mm × 100mm × 1.5mm로 가공되었으며, AISI321강 재료의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었고, 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

2.2 실험장치 및 조건

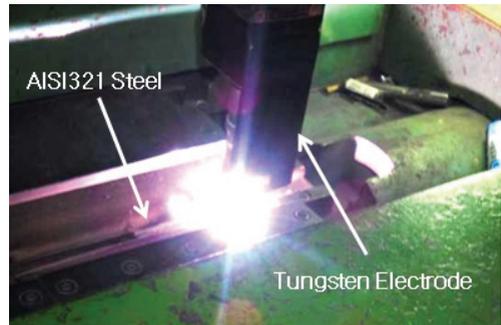


Fig. 1 TIG welding of AISI321

TIG 용접은 일반적으로 보호가스를 불활성가스인 아르곤이나 헬륨 등을 사용하여 아크열로 모재를 용융하여 접합하는 용접으로 용접 입열의 조정이 용이하기 때문에 박판용접에 매우 좋으며 텅스텐 전극봉이 비소모성이므로 용가재의 첨가 없이도 아크열에 의해 모재를 녹여 용접할 수 있어 거의 모든 금속의 용접에 이용할 수 있어 항공기 배기관의 접합에 TIG 용접을 사용한다. 실험을 위해 사용된 TIG 용접실험장치는 국내 B사에서 개발된 자동용접장치로서, 이송속도, 전압 및 가스유량 등을 제어할 수 있고 본 실험에서는 용가와이어의 사용없이 자동용접 수행에 의해 AISI321강의 100mm × 100mm × 1.5mm 크기로 아래보기 자세의 맞대기 TIG 용접을 실시하였다.

Fig. 1의 사진은 TIG 용접중에 촬영한 것으로 AISI 321강 아래엔 작업대와 고정대를 받쳐서 맞대기 용접 시의 시험편의 간격과 흔들림을 고정하여 용접 작업을 견고하게 하였으며 텅스텐 전극내에 전극팁을 둘러싼 실드가스가 나오게 되어 있다.

Table. 3은 실험에 사용하기 위하여 TIG 핸드북에 기록된 자동용접 기준을 참고로 하여 적용한

전류, 이송속도, 가스유량의 수준조건을 나타내었다. 용접은 AISI 321강의 두께 15mm 판재의 자동용접을 기준으로 하여 전극경을 2.4mm으로 하였고, 다른 변수는 용접이 될 수 있는 범위내의 최소에서 최대를 설정하여 운용하였다.

Table 3 Factors and each levels for experiment

	level 1	level 2	level 3
Electric Current (Ampere)	100	110	120
Welding Speed (cm/min)	90	120	150
AR Gas (l/min)	6	8	10

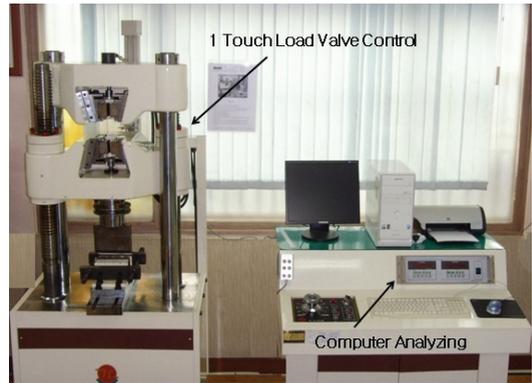


Fig. 3 Tensile testing machine(KDMT-120)

인장실험을 위해 용접 변수는 전류, 용접속도 (이송속도), 가스유량 3가지로 하여 반복이 없는 삼원배치법의 원리를 이용하여 총 27회의 실험을 실시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 인장실험

인장실험편은 Fig. 2와 같이 ASTM E8 표준 규격을 적용하였으며 인장실험편 절단으로 인한 용접부의 열 변형을 방지하기 위하여 소디사에서 제작된 A500W(500×350×270) 와이어컷팅기를 이용하였다.

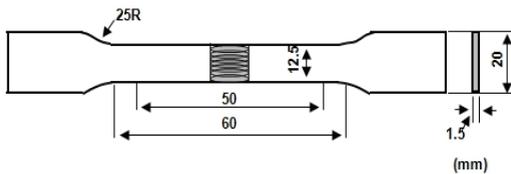


Fig. 2 Tensile specimen for FSW

인장 실험을 위해 Fig. 3과 같이 만능시험기 (MODEL: KDMT - 120)를 이용하였고 이것은 최대랩 행정은 150mm으로서 모든 인장속도는 2mm/min으로 하여 하중밸브와 컴퓨터 해석 장치에 의해 데이터가 기록된다.



a)90cm/min b)120cm/min c)150cm/min

Fig. 4 Welding results at various welding speed



a)100A b)110A c)120A

Fig. 5 Welding results at various electric curen

Fig. 4는 전류를 100A, 가스유량을 6l/min으로 일정하게 하여 용접속도를 변수로 용접한 것이고 Fig. 5는 가스유량을 6l/min으로 용접속도를 150cm/min으로 일정하게 하여 전류를 변수로 용

접한 것이다. 여기서 보면 대체적으로 속도가 증가할수록 비드 폭이 좁아지고 용입이 얇아졌고 전류를 증가시킬수록 아크기둥이 밝아지고 비드 폭 또한 증가하였다.

Table 4 Tensile strength results at various conditions

No.	Factors			Tensile strength (MPa)
	Electric current (A)	Travel speed (cm/min)	Argon gas (l/min)	
1	100	9	6	586.85
2	100	9	8	597.59
3	100	9	10	592.01
4	100	12	6	597.15
5	100	12	8	571.41
6	100	12	10	592.00
7	100	15	6	572.02
8	100	15	8	585.10
9	100	15	10	592.02
10	110	9	6	601.03
11	110	9	8	604.68
12	110	9	10	597.15
13	110	12	6	592.49
14	110	12	8	602.30
15	110	12	10	589.85
16	110	15	6	586.85
17	110	15	8	590.46
18	110	15	10	585.02
19	120	9	6	580.01
20	120	9	8	610.02
21	120	9	10	628.04
22	120	12	6	635.69
23	120	12	8	641.94
24	120	12	10	627.42
25	120	15	6	594.34
26	120	15	8	580.42
27	120	15	10	560.68

Table 5 ANOVA for tensile strength before pooling

	SS	Ø	MS	F0	F(0.10)	F(0.05)	F(0.01)
A	1691.72	2	845.86	3.76	3.11	4.46	8.65
B	2473.93	2	1236.96	5.50*	3.11	4.46	8.65
C	77.93	2	38.96	0.17	3.11	4.46	8.65
A×B	2722.72	4	680.68	3.03	2.81	3.84	7.01
A×C	222.94	4	55.73	0.25	2.81	3.84	7.01
B×C	523.28	4	130.82	0.58	2.81	3.84	7.01
E	1798.15	8	224.77	1.00			
T	9510.66	26					

Table 6 ANOVA for tensile strength after pooling

	SS	Ø	MS	F0	F(0.10)	F(0.05)	F(0.01)
A	1691.72	2	845.86	5.64*	2.62	3.55	6.01
B	2473.93	2	1236.96	8.25**	2.62	3.55	6.01
A×B	2722.72	4	680.68	4.54*	2.29	2.93	4.58
E	2622.29	18	145.68	1.00			
T	9510.66	26					

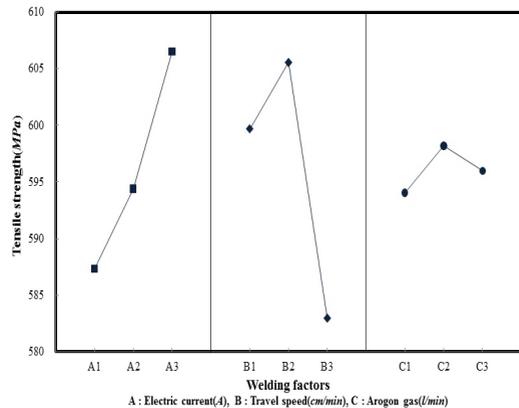


Fig. 6 Tensile strength vs. welding factors

Table 4는 삼원배치법에 적용된 조건과 인장강도의 결과 값을 나타내었다. 이와 같이 용접 변수들이 인장강도 특성치에 미치는 영향을 알아보기 위해 분산분석을 실시하여 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 여기서 SS는 변수의 제곱합이며, Ø는 변수의 자유도, MS는 제곱평균, F0는 제곱 평균비를 나타낸다.

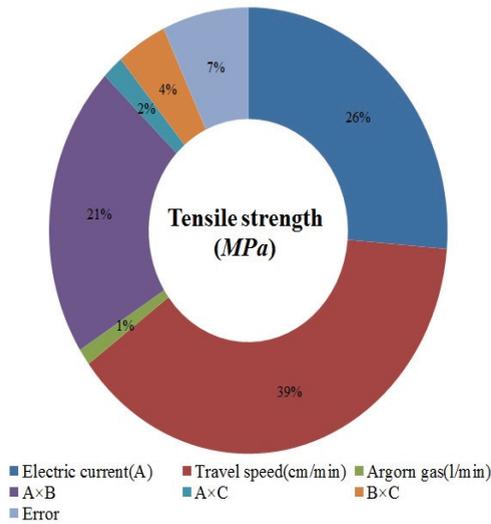
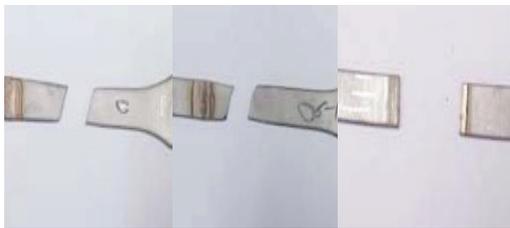


Fig. 7 Graphical illustration of contribution on all factors



a)90cm/min b)120cm/min c)150cm/min

Fig. 8 Welding results at various welding speed



a)100A b)110A c)120A

Fig. 9 Welding results at various electric current

분산분석 결과, 전류(A)는 10% 유의수준에서 유의하며 용접속도(B)는 5% 유의수준까지 유의한 것으로 나타났다. 그리고 전류(A)와 용접속도(B) 간의 교호작용(A×B)도 10% 유의수준에서 유의한 것으로 나타났다. 하지만 가스유량(C), 전류와 가스유량의 교호작용(A×C), 용접속도와 가스유량의

교호작용(B×C)은 인장강도에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 풀링하여 다시 분산분석을 실시한 결과를 Table 6에 나타내었다. 전류(A)는 5%, 용접속도(B)는 1%의 유의수준을 만족함을 알 수 있으며 전류와 용접속도의 교호작용은 1%의 유의수준에는 조금 못 미치지만 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이와 같이 분산분석을 실시한 결과, 용접 변수들의 수준 변화에 따라서 유의한 차가 있음을 알 수 있다. 따라서 스테인리스강의 TIG 용접시 인장강도를 가장 크게 하는 변수들의 조건을 구하기 위하여 용접 변수들의 모평균을 추정한 결과 전류(A) 3수준, 용접속도(B) 2수준의 조합(A₃B₂)에서 가장 높은 인장강도 값을 Fig. 6에 나타내었다. 또한 인장강도를 가장 크게 하는 조합(A₃B₂)에서의 점 추정값과 구간 추정은 95% 신뢰구간에서 635.02±14.64로 나타났다. 그리고 각 변수들이 인장강도 특성치에 미치는 기여도를 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 보면 용접속도(39%)가 인장강도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 전류(26%)와 두 변수 간의 교호작용(21%)이 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 하지만 가스유량(1%)과 전류와 가스유량의 교호작용(2%), 용접속도와 가스유량의 교호작용(4%)은 인장강도 특성치에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 8는 전류를 100A, 가스유량을 10l/min으로 일정하게 하여 용접속도를 변수로 용접한 것이고 Fig. 9는 가스유량을 6l/min으로 용접속도를 150cm/min으로 일정하게 하여 전류를 변수로 용접한 것이다. 여기서 보면 대체적으로 속도와 전류를 증가시킬수록 비드부위에서 파단이 발생하였으며 이것은 빠른 속도와 높은 전류에 의한 용접부의 용융부족으로 생각된다.

4. 결 론

본 논문에서는 항공기체에 사용되는 STS321 스테인레스강의 TIG 용접시 용접 공정의 중요한 변수인 전류, 공구의 이송속도 및 가스유량을 변수로 하여 인장강도 특성에 미치는 영향을 삼원배

치법과 분산분석을 이용하여 정량적으로 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 대체적으로 속도가 증가할수록 비드 폭이 좁아지고 용입이 얇아졌고 전류를 증가시킬수록 아크기둥이 밝아지고 비드폭 또한 증가하였다.

2. TIG 용접시 인장강도를 가장 크게 하는 변수들의 조건을 구하기 위하여 용접 변수들의 모평균을 추정한 결과 전류(A) 3수준, 용접속도(B) 2수준의 조합(A₃B₂)에서 가장 높은 인장강도 값을 나타내었으며 인장강도를 가장 크게 하는 조합(A₃B₂)에서의 점 추정값과 구간 추정은 95% 신뢰구간에서 635.02±14.64로 나타났다.

3. 각 변수들이 인장강도 특성치에 미치는 기여도는 용접속도(39%)가 인장강도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 전류(26%)와 두 변수간의 교호작용(21%)이 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 하지만 가스유량(1%)과 전류와 가스유량의 교호작용(2%), 용접속도와 가스유량의 교호작용(4%)은 인장강도 특성치에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다

4. 속도와 전류가 증가할수록 비드부위에서 과단이 발생하였으며 이것은 빠른 속도와 높은 전류에 의한 용접부의 용융부족으로 생각된다.

향후 이상의 연구결과에서 얻은 용접조건을 TIG 용접시 접합강도특성과 미세조직관찰등을 통하여 배기관 용접시 효율적인 용접법을 확립할 예정이다.

Reference

1. K. J. Kim, J. W. Kim, Y. B. Kang and S. M. Cho, 2003, "Heat Transfer Simulation and Temperature Measurement For Heat Input Control In Orbital Welding", The Korea Welding and Joining Society, No. 5, pp. 115 -159.
2. J. W. Kim, and S. M. Cho, 2004, "The Effect of The Arc Pressure Variation on The Penetration by The Filer Wire Feed Rate in Pulsed TIG Welding", Journal of KWS, Vol. 22, No.1, pp. 169-171.

3. A. Jeong, E. Y. Kim, N. Y. Ham, M. Y. Lee, and S. H. Choi, 2011, "Effect of Microstructure on Mechanical Properties of TIG welded AZ31 Mg alloy sheets", Proceeding of Korean Plasticity Working Society-Spring, pp. 215-218.
4. J. H. Cho, J. Lee, and S. H. Bae, 2012, "AC TIG Welding of Al 5052 Alloy Thin Plate", KWJS 2012-Autumn, p. 163.
5. E. G. Na, S. K. Koh, H. Kim, and S. K. Lee, 2012, "Study on Evaluation of Corrosive Characteristics at TIG Weld Region for SUS 316 Stainless Steel", KSME2012R1012, pp. 32-36.
6. J. B. Ko, and H. S. Park, 2008, "A Study on the Analysis of the Thermal Stress and Residual Stress in Process of STS304 TIG Welding", Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 17, No. 5, pp. 1-9.
7. D. M. Kang, K. D. Park, and Y. S. Jung, 2013, "Thermal and mechanical anlysis on friction stir welding of AZ31 magnesium alloy by the finite element method", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 17, No. 4, pp. 64-71.
8. J. H. Lee, and Y. S. Kim, 2013, "Process Optimization for Co-based Self-flux Alloy Coating by Taguchi Method", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 17, No. 6, pp. 108-114.