

고장력 강판(SGAFC780)의 저항 점 용접의 유한요소해석을 통한 너깃 직경 예측

이철호¹, 김원섭², 이종훈², 박상흠^{3*}

¹한국폴리텍대학 산학협력단, ²공주대학교 기계공학과, ³공주대학교 명예교수

A Study on Prediction of Nugget Diameter by Resistance Spot Welding Finite Element Analysis of High Tensile Steel (SGAFC 780)

Cheal-Ho Lee¹, Kim Won Seop², Jong-Hun Lee², Sang-Heup Park^{3*}

¹Korea Polytechnics University Cooperation Foundation

²Division of Mechanical Engineering, Kongju University

³Kongju University Emeritus Professor

요약 본 연구는 고장력 강판 SGAFC 780 소재를 이용하여 저항 점 용접을 실시 하였으며, 조건에 따른 너깃 지름 측정, 유한 요소 해석 비교를 하였다. 너깃 지름 측정 결과 용접 전류 7kVA의 용접시간 18cycle 이상의 용접조건에서는 용접 최소 직경인 4.3mm 이상을 만족하는 것으로 나타났다. 9kVA과 10kVA이상에서 최소 너깃 직경인 4.3mm 이상으로 만족 하였으나, 높은 전류와 시간으로 인해 날림 현상이 발생하였고, 그로 인한 깊은 압흔이 잔류하였다. 용접성 평가 결과 최소 너깃 지름에서는 만족하지만 날림 현상이 발생하여 용접 불량으로 평가되는 구간이 존재함을 확인하였다. 하지만 날림 현상이 일어났음에도 충분한 하중 부담 능력을 가지는 영역도 확인했다. 유한 요소 해석 비교 결과 적정 용접 구간에서의 유한 요소 해석과 실험 결과에서의 너깃 지름을 비교 했을 시 4.2% 미만의 오차율을 확인 했으며, 유한 요소 해석의 신뢰성을 확인 할 수 있었다.

Abstract In this study, resistance spot welding was performed using a high tensile steel plate SGAFC 780. The shear tensile strength, fracture profile, nugget diameter, and simulation were compared according to the conditions. After the nugget diameter calibration, the minimum diameter of welding was more than 4.3mm when the welding current was 8kVA or more. At 9kVA and above 10kVA, the minimum nugget diameter of 4.3mm was satisfied. On the other hand, due to the high current and time, the fly phenomenon occurred and the deep indentation remained. An evaluation of the weldability confirmed that there was an interval that was evaluated as weld failure due to the creep phenomenon, which satisfied the tensile shear strength and minimum nugget diameter. On the other hand, areas that have sufficient load bearing capacity even when drift has occurred were also identified. The simulation results show that the error rate was less than 4.2% when comparing the nugget diameter in the simulation and the experimental results in the appropriate weld zone, and confirmed the reliability of the simulation.

Keywords : Spot-Welding, SGAFC780, Nugget, Simulation, ErrorRate

*Corresponding Author : Sang-Heup Park(Kongju Univ.)

email: weldpark@kongju.ac.kr

Received July 23, 2019

Accepted November 1, 2019

Revised September 5, 2019

Published November 30, 2019

1. 서론

우리나라 국가산업의 근간은 에너지 집약적 산업에 기반을 두고 있으며, 석유, 석탄 및 천연가스 등의 사용에너지 97%를 수입에 의존하고 있는 실정으로 미래에너지 자원의 확보가 곧 국가안보와 직결되는 새로운 요소로 대두되고 있다. 이런 의미에서 현대의 주된 연료 소비원 중 하나인 자동차의 에너지 소비 효율 향상은 자동차 및 관련 소재 산업에서 매우 중요한 화두가 되었다. 이는 비단 연료 소모량 감소에 따른 비용 절감의 문제에만 국한되지 않으며, 20세기 후반부터 조명되고 있는 대기 오염 완화를 위한 노력과도 직결되고 있다. 이러한 자동차의 연료소비 감축을 위해 자동차 무게의 50% 이상을 차지하는 냉연강판을 고강도화 함으로써 두께감소에 따른 경량화와 더불어 알루미늄 또는 마그네슘 등의 비철소재에 대한 채용을 추진 중에 있다. 이러한 시대적 배경을 감안한 최근 자동차 산업에서는 배기가스의 규제와 더불어 차체 경량화 및 충돌 안전성 향상을 위해 고강도 강판의 사용이 점차 증가되고 있는 실정이다.

대부분의 자동차 공정에 적용되는 저항 점용접에서는 고강도 강판의 합금 원소와 높은 강도 그리고 아연도금 강판의 도금층 등이 용접성을 저하시키는 원인이 된다. 특히 아연 도금강판에서 저항 점용접은 도금층의 영향으로 인해 일반냉연강판보다 발열량이 부족하므로 높은 전류조건 사용이 일반적이다. 이러한 높은 용접 전류, 도금층으로 인한 전극의 열화 그리고 도금층 표면과 전극의 합금화는 저항 점용접에서 Cu-Cr 전극의 수명을 단축시키는 원인으로 작용한다[1-6].

본 연구에서는 SGAF780소재를 이용하여 통전전류, 시간에 따라 저항 점용접을 실시하였고, 너깃 직경을 측정 후 기계적 특성을 통한 최적의 저항 점용접 조건을 도출하였다. 그리고 유한요소해석을 통해 저항 점용접의 너깃 직경을 예측하였으며 실제 용접과 비교하여 오차를 알아봄으로써 저항 점 용접부를 포함한 용접 구조물의 품질에 대한 신뢰성 향상과 제품 개발비용 절감에 이바지 하고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 현재 자동차 차체에 사용되고 있는 780MPa급 고장력 강판으로써 SGAF780 강판을 사용하였으며, 실험 재료의 기계적 특성과 화학적 성분을 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

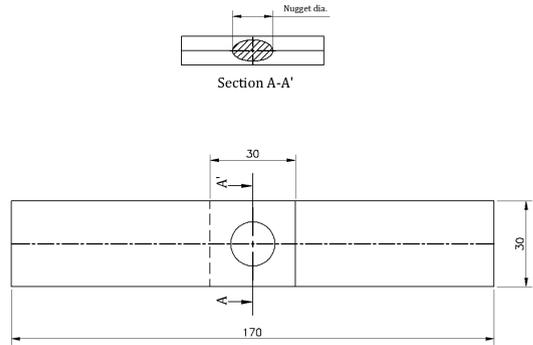


Fig. 1. Schematic drawing of nugget diameter

Table 1. Chemical compositions of materials used (wt. %)

Materials	C	Si	Mn	P	S
SGAF780	0.0892	0.164	2.28	0.012	0.002

Table 2. Chemical compositions of materials used (wt. %)

Materials	Yield strength [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]
SGAF780	547	818	18

본 연구에서는 용접전류 및 용접시간에 따른 용접성 평가를 위하여 저항 점 용접을 실시하였고, 사용된 저항 용접 장치는 인버터 저항 점 용접기(Model: MIT-A1000)를 사용하여 ISO18278-2 규격에 의하여 6, 7, 8, 9, 10kVA의 전류를 사용하여 실험 하였으며, 12, 18, 24 cycle의 용접시간을 변경하여 실험하였다.그로 인한 용접 조건은 Table 3과 같다.

Table 3. Chemical compositions of materials used (wt. %)

Variables	Unit	Levels
Welding current	kVA	6, 7, 8, 9, 10
Welding force	kN	3.0
Welding time	cycle*	12, 18, 24
Squeeze time	cycle*	20
Hold time	cycle*	20
Water flow rate	ℓ /min	8

* 1 cycle ÷ 0.0167 sec.

Table 4. Analysis of nugget diameter according to welding conditions

Variables	Welding Current (kVA)				
	6	7	8	9	10
12	3.69	4.22	5.18	5.56	5.08
18	4.01	4.62	5.29	5.94	5.13
24	4.08	4.97	5.48	5.51	5.07

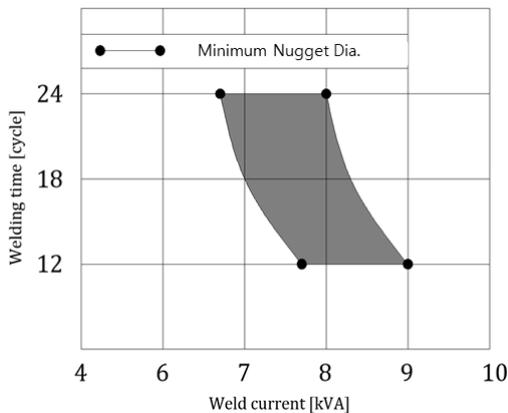


Fig. 2. Schematic of a typical weld ability lobe

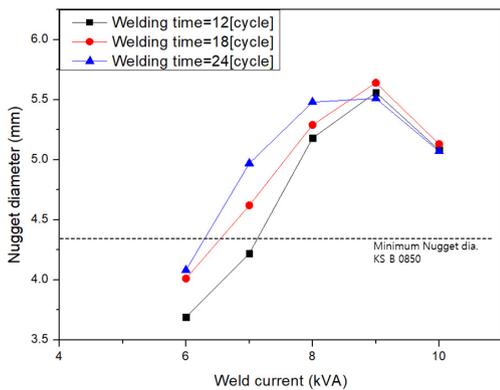


Fig. 3. Nugget diameter according to the welding current as electrode=3.0 kN

용접 판단면 관찰을 위해 용접 조건별 실험 후 파괴 실험을 실시하였으며, 너깃지름 관찰을 하기 위하여 KS B 0850에 의거하여 판두께 1mm일 때 최소 너깃지름 4.3mm를 기준으로 정하고, 일반적인 시험편 준비과정에 의거해 절단, 마운팅, 미세연마, 에칭을 수행하였다.

절단 방법에 있어서는 열이 전달되지 않도록 냉각수를 이용한 절단을 Fig. 1과 같이 실시하였으며, 연마는 #100, #300, #600, #1000, #1500 입도를 사용하여 연

마를 실시하였고, 1 μ m의 알루미늄과 함께 거시경면연마를 수행하였다. 화학 부식으로는 피클린 산(Picric acid)을 이용해 에칭을 실시하였으며, 저배율 현미경(YJO-201)을 이용하여 너깃부를 관찰, 측정 하였다.

유한요소해석을 위하여 각각의 파트는 전극의 형상과 시편의 치수와 동일하게 전극과 시편을 원통형 대칭 모델의 형태로 구성하였으며 메쉬 모델은 4각 메쉬를 사용하였다. 전극은 냉각수가 흐르도록 Cu-Cr 합금 재질의 돔 타입으로 설계하였다. 소재의 물성정보는 항복강도, 영률 등 기계적 물성과 열 전기 해석을 위한 비열, 전기 전도, 밀도, 비저항 등의 물성이 추가로 설정되었으며 SORPAS에 내장되어있는 물성정보를 적용하였다.

3. 실험결과

최소 너깃지름과 날림현상이 발생한 구간을 제외 한 로브곡선을 Fig. 2에 나타내었다. 최소 너깃 지름인 4.3mm를 만족하지만 날림 현상이 발생하여 용접 불량으로 평가되는 구간이 존재함을 확인하였다. 하지만 날림 현상이 일어났음에도 충분한 하중 부담 능력을 가지는 영역도 확인하였으며 용접 판단에 있어서 기존 연강과는 다른 기준이 제시되어야 할 것으로 사료된다.

Table 4는 너깃 지름 측정결과를 나타내었다. 용접 품질 평가를 위한 상한영역을 짙은 회색으로 표현 하였으며, 적정 용접구간으로서 옅은 회색으로 표시하였다. 측정결과 용접 전류와 용접 시간이 늘어날수록 비례적으로 너깃 직경이 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 이는 전류와 시간이 늘어날수록 저항에 의한 입열량이 증가하기 때문에 너깃의 용융 및 성장을 증가시키는 것으로 판단된다. 그리고 KS B 0850 점용접부의 검사방법에 의거하여 Fig. 3에서와 같이 용접 전류 7kVA에 용접시간 18cycle 이상에서는 용접너깃 최소 직경인 4.3mm 이상을 만족하는 것으로 나타났다.

Table 5. Comparative analysis of experimental results and simulations according to welding conditions (welding current =6kVA)

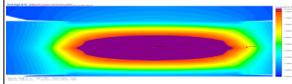
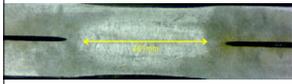
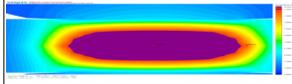
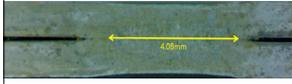
Welding time	Welding current (kVA)	diameter	Error rate
	6		
12		3.69	6.5
		3.93	
18		4.01	5.0
		4.21	
24		4.08	5.9
		4.32	

Table 7. Comparative analysis of experimental results and simulations according to welding conditions (welding current =8kVA)

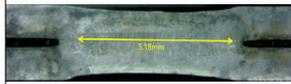
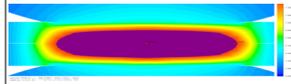
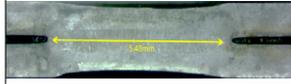
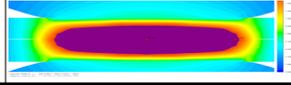
Welding time	Welding current (kVA)	diameter	Error rate
	8		
12		5.18	2.9
		5.33	
18		5.29	2.3
		5.41	
24		5.48	1.5
		5.56	

Table 6. Comparative analysis of experimental results and simulations according to welding conditions (welding current =7kVA)

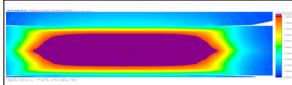
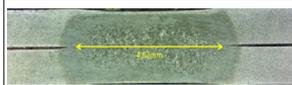
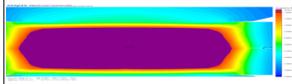
Welding time	Welding current (kVA)	diameter	Error rate
	7		
12		4.22	5.2
		4.44	
18		4.62	3.2
		4.77	
24		4.97	3.0
		5.12	

Table 8. Comparative analysis of experimental results and simulations according to welding conditions (welding current = 9kVA)

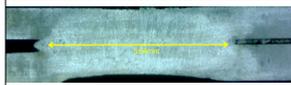
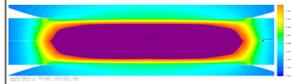
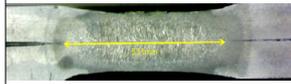
Welding time	Welding current (kVA)	diameter	Error rate
	9		
12		5.56	0.4
		5.58	
18		5.64	1.6
		5.73	
24		5.51	7.3
		5.91	

Table 9. Comparative analysis of experimental results and simulations according to welding conditions (welding current =10kVA)

Welding time	Welding current (kVA)	diameter	Error rate
	10		
12		5.08	12.4
		5.71	
18		5.13	13.6
		5.83	
24		5.07	17.8
		5.97	

Tables 5-9는 용접 가압력이 3.0kN으로 일정할 때 용접시간을 12cycle, 18cycle, 24cycle 용접 전류를 6kVA, 7kVA, 8kVA, 9kVA, 10kVA에서의 실제 측정 데이터 값과 유한 요소 해석의 비교결과를 나타내었다.

Tables 8-9에서와 같이 9kVA과 10kVA 이상에서 최소 너깃 직경인 4.3mm 이상으로 만족 하였으나, 높은 전류와 시간으로 인해 날림현상이 발생하였고, 그로인한 깊은 압흔이 발생하였다. 이러한 압흔은 전류 및 시간에 의해 금속의 용융부가 급속히 발생하고 가압력에 의한 소성변형을 유발하여 발생하는 것으로 용접부에 응력을 집중시킴에 따라 피로파괴를 야기할 수 있기때문에 용접 품질 저하의 요인이 될 수 있다.

Table 5-9에서와 같이 낮은 전류와 짧은 용접시간에서 너깃에 비해 열영향부가 넓은 것을 확인 할 수 있었는데, 이는 용접 조건이 낮을 때 충분한 입열이 이루어 않기 때문에 용융되지 않는 계면에서의 발열 때문에 나타난 현상으로 판단된다.

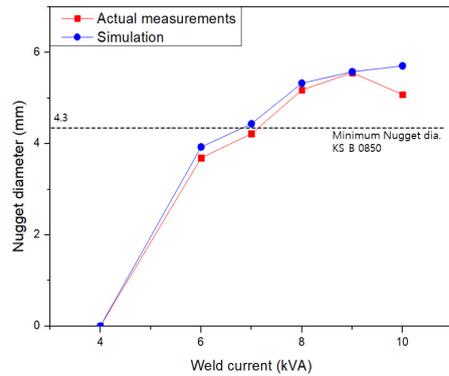


Fig. 4. Comparative analysis of experimental results and simulations according to welding current (welding time =12 cycle)

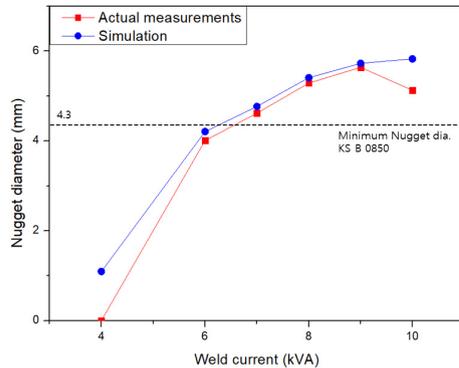


Fig. 5. Comparative analysis of experimental results and simulations according to welding current (welding time =18 cycle)

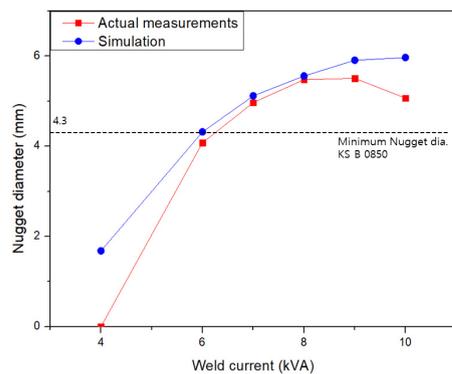


Fig. 6. Comparative analysis of experimental results and simulations according to welding current (welding time =24 cycle)

유한 요소 해석과 실제 실험결과를 비교하였을 때 6kVA의 오차율은 5.8%, 7kVA의 오차율은 3.8%, 8kVA의 오차율은 2.2%, 9kVA의 오차율은 3.1%, 10kVA의 오차율은 14.6%로 나타났으며, 4kVA를 제외한 용접 구간에서의 평균 오차율은 5.9%로 나타났다. Figs. 4-6는 실제 너깃 측정값과 유한요소해석에서 측정된 너깃 지름 값의 비교 그래프이다. 날림현상을 제외한 용접구간이 비교적 비례한지름 값을 나타나고 있는 것을 확인할 수 있었다. 10kVA에서는 유한요소해석에서는 너깃 지름이 점점 더 커지는 너깃을 확인할 수 있었지만 실제 실험에서는 날림현상으로 인한 용융부의 압흔으로 인해 너깃의 지름이 커질 수 없는 조건이 되어 오차율이 많이 벗어난 것으로 판단된다.

이와 같이 적정 용접구간에서의 유한 요소 해석과 로브 곡선을 반영한 용접 범위 내의 너깃 지름을 비교했을 시 2.2% 미만의 오차율을 확인했으며, 유한 요소 해석의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 본 연구는 저항 점 용접의 유한 요소 해석을 통하여 적정용접구간에서의 유한 요소 해석결과를 적용해도 될 것으로 판단되었다.

4. 결론

본 연구는 고장력 강판 SGAF 780 소재를 이용하여 저항 점 용접을 실시 하였으며, 조건에 따른 너깃지름측정, 유한 요소 해석 비교를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 최소 너깃지름은 만족하지만 날림 현상이 발생하여 용접 불량으로 평가되는 구간이 존재함을 확인하였고, 이를 바탕으로 한 로브곡선을 도출하였다.
- 2) 너깃 지름 측정 결과 용접 전류 7kVA 용접시간 18cycle 이상에서는 용접 최소 직경인 4.3mm 이상을 만족하는 것으로 나타났다. 9kVA와 10kVA 이상에서 최소 너깃 직경인 4.3mm 이상으로 만족하였으나, 높은 전류와 시간으로 인해 날림현상이 발생하였고, 그로 인한 깊은 압흔이 잔류하였다.
- 3) 용접성 평가 결과 최소 너깃 지름에서는 만족하지만 날림 현상이 발생하여 용접 불량으로 평가되는 구간이 존재함을 확인하였다. 하지만 날림 현상이 일어났음에도 충분한 하중 부담 능력을 가지는 영역도 확인했으며, 용접성 판단에 있어서 기존 연강과는 다른 기준이 제시되어야 할 것으로 사료된다.
- 4) 10kVA에서는 유한요소해석에서는 너깃지름이 점

점 더 커지는 너깃을 확인할 수 있었지만 실제 실험에서는 날림현상으로 인한 용융부의 압흔으로 인해 너깃의 지름이 커질 수 없는 조건이 되어 오차율이 많이 벗어난 것으로 판단된다.

- 5) 유한 요소 해석 비교 결과 적정 용접 구간에서의 유한 요소 해석과 실험결과에서의 너깃 지름을 비교했을 때 4.2% 미만의 오차율을 확인 했으며, 유한 요소 해석의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

References

- [1] S. M. Lee and Y. D. Park, "A Study on the Resistance Spot Weldability of 590 MPa Grade DP Steel with Modified Electrode Tip", Kor. Inst. Met. & Mater. 48-1, 71, 2010.
- [2] C. Y. Choi, "Evaluation of Fracture Properties in the Resistance Spot Welded Advanced High Strength Steel for Automotive application", Ph.D. Thesis, Pusan National university, pp.8-13, 2012.
- [3] S. W. shin, J. H. Lee D. H. Kim and S. H. Park, "Evaluation of Resistance Spot Weldability of SGAF1180 Steel", Journal of KAIS, Vol.18, No.12, pp.644-649, KCI, 2017.
- [4] D. Y. Choi, "Effects of Phosphorus and in-situ Post-heat Pulse Conditions on Resistance Spot Weldability of High Si DP980 Steel Sheet", Journal of Welding and Joining, Vol.33, No.6, pp.21-26, 2015.
- [5] M. Mimer, L.E. Svensson and R. Johansson, "Process Adjustments to Improve Fracture Behaviour in Resistance Spot Welds of EHSS and UHSS", Welding in the World, 48 , pp.14-18. 2004.
- [6] S. W. shin, J. H. Lee and S. H. Park, "A Study on the Prediction of Nugget Diameter of Resistance Spot Welded Part of 1.2GPa Ultra High Strength TRIP Steel for Vehicle", Journal of KAIS, Vol. 19 No.3 pp.52-60, 2018.

이 철 호(Cheal-Ho Lee)

[정회원]



- 2019년 8월 : 공주대학교 기계자 동차융합전공 (공학석사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 한국폴리텍 대학 산학협력단

<관심분야>

육성용접, 재료분야

김 원 섭(Won-Seop Kim)

[준(학생)회원]



- 2018년 2월 : 공주대학교 기계시스템공학 (공학사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계공학과 (석사과정)

<관심분야>

육성용접, 플랜트용접

이 중 훈(Jong-Hun Lee)

[정회원]



- 2015년 2월 : 공주대학교 기계시스템공학 (공학석사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계공학과 (박사수료)

<관심분야>

육성용접, 용접자동화

박 상 흡(Sang-Heup Park)

[정회원]



- 1986년 2월 : 단국대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2000년 2월 : 홍익대학교 일반대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2005년 3월 ~ 2019년 8월 : 공주대학교 기계자동차공학부 교수
- 2019년 9월 ~ 현재 : 공주대학교 명예교수

<관심분야>

용접시공 및 용접 자동화, 비파괴 검사