고주파 유도가열을 이용한 철강재의 마찰교반용접 특성평가

천현필* · 박태순* · 윤진영* · 김철희*,**,†

*한국생산기술연구원 용접접합그룹

**포틀랜드주립대학 기계재료공학과

Evaluation of a High-Frequency Induction Heating Assisted Friction Stir Welding Process on Carbon Steel Sheets

Jason Cheon*, Taesoon Park*, Jin-young Yoon* and Cheolhee Kim*,**,†

*Joining R&D Group, KITECH, Incheon, 21999, Korea

**Department of Mechanical & Materials Engineering, Portland State University, Portland, OR 97201, USA

†Corresponding author : chkim@kitech.re.kr

(Received July 27, 2019 ; Revised September 2, 2019 ; Accepted September 4, 2019)

Abstract

Friction stir welding of carbon steel causes tool wear and system deformation issues because of its relatively high strength compared to aluminum. As a countermeasure, additional high-frequency induction heating is suggested to solve this problem. An inline high-frequency induction heating assisted friction stir welding process was studied on 450 MPa and 980 MPa grade carbon steel sheets. As a pre-experiment, the heating performance of the high-frequency induction heating system was quantified. Then the effective welding speed range, vertical load history, and weldment performance were investigated to evaluate the characteristics of the process. Those results were compared with a conventional friction stir welding process conducted under equivalent process conditions. For the 440 MPa steel, about 40% faster maximum welding speed was achieved by applying the 4 kW induction heating. No tensile strength degradation of the weldment was found. Also, the maximum vertical load was decreased by 26% compared to the conventional friction stir welding process. No significant degradation of hardness was observed in the welds on 440 MPa and 980 MPa steel.

Key Words : High-frequency induced heating, Friction stir welding, Carbon steel, Welding speed, Vertical load

1. 서 론

마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)은 고상용접의 일종으로 용융용접의 응고과정에 발생하는 기공 및 균열, 변형 등을 저감할 수 있는 용접방법이다. FSW공정은 초기에 장비의 강성 및 소재에 삽입되는 톨의 한계로 주로 알루미늄 합금에 사용되었으나 점차 다양한 재료로 적용이 확대되고 있다^{1,2)}.

고강도재료에 FSW를 적용할 경우 시스템의 변형이 발생하여 삽입깊이의 부족이 발생하므로 삽입공정에서

모재의 저항력을 충분히 이겨내고 지시한 삽입깊이를 달성 할 수 있는 높은 입력하중을 가진 고강성 시스템을 적용하거나 다양한 제어시스템을 이용하여 변형을 보상하려는 연구가 수행되었다^{3,4)}. 기존의 위치제어시스템에 비하여 하중제어를 이용한 제어시스템이 변형 보상에 유리하였으며, 온도를 동시에 감안한 제어모델 등도 개발되었다⁵⁾. 보다 최근에는 저자들은 동축 하중측정 및 변형모델개발을 통해 온도에 따른 소재의 강성변화를 고려한 적응제어 모델을 제안하였다^{6,7)}. FSW 톨의 재료로 초기에는 가공성이 우수한 공구강을 이용하였으나 고강도 모재에 대응하기 위해 텅스텐 카바이드,

Si3N4, pCBN 등 고경도 재료가 개발되었으며, 이를 통해 툴의 마모를 최소화하려고 있다^{8,9)}.

고강도재료 중 가장 중요한 소재인 강¹⁰⁻¹⁴⁾이나 Al/Fe 이종재료조합¹⁵⁻¹⁷⁾에 FSW를 적용하기 위하여 다양한 연구가 수행되고 있다. 그러나 철강재료는 알루미늄에 비해 높은 온도에서 항복강도가 저하되므로¹⁸⁻²¹⁾, FSW를 적용 시에 시스템의 변형이 크고⁶⁾, 툴의 마모 혹은 파손이 발생하기 용이하다²²⁾. 이에 대한 대비책의 하나로 FSW공정 중 마찰을 통한 모재의 가열을 보조하여 부가적 열원을 사용하는 하이브리드 FSW(Hybrid FSW, HFSW)기술이 제안되었다. 초기단계에서는 제어가 용이한 레이저를 이용한 방법이 제안되었으나^{23,24)}, 전기적 에너지²⁵⁻²⁸⁾, 초음파에너지²⁹⁻³¹⁾, 아크 에너지^{32,33)} 등이 계속 소개되었다.

본 연구에서 적용을 검토한 부가열원은 고주파유도가열로 기존의 시공에서 용접 전 소재 표면을 미리 예열하기 위한 용도로 자주 사용되던 기법이다. 고주파 예열 공정의 생산성을 높이기 위하여 용접열원과 선행하여 이동하면서 인라인으로 예열하는 기술도 제안된 바 있다^{34,35)}. 또한 고주파 유도가열의 경우 Al/Fe 이종재의 HFSW에서 항복강도가 높은 Fe측만 선택적 가열이 가능한 장점을 가지고 있다. 고주파 유도가열 HFSW에 대한 선행연구에서 Alvarez et al.은 FSW 헤드에 선행하는 유도가열 코일에 최대 40 kW의 고주파 유도 가열장치를 연결하였으며, 소재 연화로 인해 최대 35% 적용하중이 감소하는 것을 확인하였다³⁶⁾. Sun et al.은 마찰교반점접합(Friction stir spot welding, FSSW) 전의 철강재를 유도가열을 통해 예열하여 접합강도가 8 kN에서 12.4 kN으로 증가함을 제시하였다²⁴⁾.

본 연구에서는 440 MPa와 980 MPa의 인장강도를 가지는 철강재료를 대상으로 고주파 유도가열 HFSW에 대한 기초 연구를 수행하였다. 고주파 유도가열은 인라인으로 연결되었으며, 부가 열원 적용에 따라 용접공정속도 및 부가 하중 관점에서의 장점을 확인하고 용접부의 물성을 검증하고자 한다.

2. 실험 방법

평가에 사용한 모재는 1 mm 두께의 인장강도 440 MPa급(이하 440 MPa 강)과 980 MPa급(이하 980 MPa 강) 자동차용 냉연강판으로 화학적 성분은 Table 1과 같다.

마찰교반용접기는 3축 직교시스템을 사용하는 전용시스템이고 교반축의 최대 교반 회전수 3000 rpm, 최대 가압하중 30 kN급 장비이다. 실험에서 교반축은 모재

Table 1 Chemical composition of the base materials in this study (wt. %)

440 MPa steel	C	Si	Mn	P	S	Fe
	0.072	0.01	1.33	0.024	0.004	Bal.
980 MPa steel	C	Si	Mn	P	S	Fe
	0.065	0.076	2.4	0.023	0.004	Bal.

에 용접방향으로 2도 기울여서 설정하였으며, 시스템에 내장된 Setech사의 정밀도 0.15%, 30 kN급 로드셀인 YC54-3T을 통하여 수직방향의 가압하중을 측정하였다. 용접툴은 WC-Co 12% 소재로 제작되었으며, 솔더 직경은 10 mm이고 솔더의 면은 오목한 형상으로 가공되었다. 핀의 길이는 0.85 mm, 모재 접촉부의 핀 직경은 3 mm이고, 옆면은 8도의 각도로 테이퍼 가공되어 솔더면에 연결된다. 부가열원으로 사용한 고주파 유도 가열기는 10 kW급 열원으로 주파수는 145 kHz 고정이며, 실험에서 1 kW에서 6 kW까지 출력을 사용하였다.

Fig. 1과 같이 고주파 가열코일은 모재에서 2 mm높이로 설치되었으며, 용접툴의 중심과의 코일의 끝단까지의 거리는 20 mm이다. 코일의 형상은 Fig. 2와 같으며, 코일 주변을 페라이트로 감싸 고주파가열이 아래쪽 모재방향으로 집중될 수 있도록 제작하였다. 코일의 안쪽은 냉각수를 통해 과열을 방지하였다. 고주파 가열 시스템은 용접방향으로 용접툴 보다 선행하도록 설치하였다. 따라서 고주파 가열시스템은 용접툴이 이동될 용

Fig. 1 Setup for induction preheating

Fig. 2 Induction heating coil

접선 부분을 예열하는 효과를 가진다.

고주파 유도가열 특성을 평가하기 위한 실험에서는 열화상 카메라를 이용하여 온도를 측정하였다. 용접부의 경도측정과 단면 관찰을 위하여 용접선의 중심에서 시편을 채취 하였다. 경도는 시편 두께 중심에서 수평방향으로 시험하중 9.8 N, 하중유지시간 10초, 측정 간격 0.3 mm로 총 15 mm구간의 마이크로 비커스 경도를 측정하였다.

3. 고주파 가열 성능평가

실험에 사용한 고주파 가열기의 성능을 평가하기 위하여 먼저 이동없이 코일을 고정한 상태에서 출력을 1.0 kW에서 6.0 kW까지 가변하면서 코일 바로 아래 쪽 모재의 온도를 측정하였다. 이 실험은 FSSW을 위한 예열 특성을 평가하거나 FSW 공정에서 톨이 삽입되는 시기에 모재가 받는 온도 특성을 평가하기 위하여 수행되었다. 실험에서 고주파 가열기는 3초간 작동되었으며, 고주파 가열기의 출력에 따라 최대 도달 온도는 Fig. 3과 같이 74도에서 674도까지 변화였다.

FSW공정에서 인라인 예열효과를 확인하기 위하여 고주파 코일을 10 mm/s에서 14 mm/s의 속도로 정속으

(a) Example of thermal image

(b) Maximum temperature according to output power of induction heating

Fig. 3 Measured temperature for stationary induction coil (base metal: 440 MPa steel)

(a) Example of thermal image

(b) Temperature according to output power of induction heating

Fig. 4 Measured temperature for moving induction coil (base metal: 440 MPa steel)

로 이동하면서 정상화된 상태의 온도를 기록하였다 (Fig. 4). 출력 6 kW, 이송속도 10 mm/s일 경우 고주파가열만으로도 가열온도가 철강재의 항복강도가 저하가 시작되는 400도 이상으로 상승함을 확인하였다¹⁸⁾.

4. 용접결과

4.1 용접부 형상 및 물성

440 MPa 강을 대상으로 톨 회전속도를 400 rpm으로 고정하고 용접속도에 따른 비드 형상 및 인장강도를 측정하였다(Fig. 5). FSW 단독 실험에서는 용접속도 6 mm/s ~ 10 mm/s 범위에서 양호한 용접이 가능하였고 인장시험에서 모재 파단이 발생하였다. 그러나 12 mm/s의 용접속도에서는 터널 결함이 발생하면서 양호한 용접이 되지 못하였고, 인장 시험에서 용접부 파단이 발생하였다. 4 kW의 고주파 가열을 부가적으로 적용한 하이브리드 FSW 실험에서는 10 mm/s ~ 14 mm/s의 용접 속도에서 양호한 용접비드의 형성이 가능하였으며, 인장시험에서 모재 파단이 발생하였다. 용접속도 16 mm/s에서는 터널 결함이 발생하였고, 인장시험에서 용접부 파단이 발생하였다.

Travel speed (mm/s)	Bead appearance	Cross-section	Tensile strength (MPa)
6	Advancing side	RE AD	445
	Retreating side		
8			441
10			446
12			124

(a) FSW

Travel speed (mm/s)	Bead appearance	Cross-section	Tensile strength (MPa)
10	Advancing side	RE AD	447
	Retreating side		
12			443
14			446
16			119

(b) Hybrid FSW

Fig. 5 Bead shapes and tensile strength of welded specimens (base metal: 440 MPa steel, tool rotation speed: 400 rpm, induction heating: 4 kW)

4.2 인가하중

440 MPa 강에 대해 톨 회전속도 400 rpm, 용접속도 6 mm/s에서 마찰교반용접을 단독 및 4 kW 고주파 가열과 함께 실시하면서 인가되는 하중을 Fig. 6와 같이 측정하였다. 마찰교반용접을 단독으로 적용할 경우 초기 하중 15.6 kN에서 서서히 하중이 감소하여 용접 마지막 구간에서는 15.1 kN의 하중이 측정되었다. 그러나 하이브리드 FSW에서는 초기 삽입 후에 11.6 kN의 하중이 측정되었으나 약 5초 이후 서서히 하중이 감소하여 7.5 kN의 하중에서 안정화되어 용접이 종료되었다. 용접툴 보다 선행하는 고주파 가열시스템은 톨의 삽입 및 일시정지시간동안 모재를 예열함으로써 열적연화를 통해 전체적인 하중감소에 기여한 것으로 판단된다.

(a) FSW

(b) Hybrid FSW

Fig. 6 Measured load during FSW (base metal: 440 MPa steel, tool rotation speed: 400 rpm, travel speed: 6 mm/s, induction heating: 4 kW)

4.3 경도분포

용접공정에서 부가열원을 적용할 경우 일반적으로 냉각속도를 낮춰 균열을 저감할 수 있지만 냉각속도 저하가 용접부 연화를 발생시킬 가능성이 있다. 이를 확인하기 위하여 440 MPa 강과 980 MPa 강에 단독 FSW 및 하이브리드 FSW를 실시하고 경도 분포를 비교하였다. 이 때, 톨 회전속도와 고주파 가열출력은 각각 400 rpm과 4 kW이었다. 용접속도는 440 MPa 강과 980 MPa 강에 대해 각각 10 mm/s와 8 mm/s이다. Fig. 7a와 같이 440 MPa 강은 용접부의 경화가 발생하였으며, HFSW의 경우 용접부의 경도가 단독 FSW에 비해 낮게 측정되었다. 그러나 모재보다 높은 경도를 확인하였으며 열영향부에서 연화가 관찰되지 않아 HFSW에 의한 접합강도 저하가 예상되지 않는다. Fig. 7b와 같이 980 MPa 강은 용접부에서 경화가 더 심하게 발생하였으나 소재가 충분한 경화능을 가지고 있기 때문에 단독 FSW와 하이브리드 FSW에서 거의 동일한 용접부 경도가 확인되었다. 또한 단독과 하이브

Fig. 7 Measured hardness profile Measured load during FSW (tool rotation speed: 400 rpm, induction heating: 4 kW, travel speed: 10 mm/s for 440 MPa steel, 8 mm/s for 980 MPa steel)

리드 FSW용접부에 대해 거의 동일한 열영향부 크기 및 연화도가 확인되어 고주파 가열을 하는 경우에는 단독 FSW에 비해 접합강도 저하가 예상되지 않는다.

5. 결 론

인라인 고주파 유도가열을 마찰교반용접 공정에 적용하는 기법에 대한 특성평가를 위하여 440 MPa 강과 980 MPa 강을 대상으로 HFSW 공정에 대한 기초 연구를 수행하였다. 고주파 유도가열 장치의 예열효과를 먼저 정량화하였으며, 단독 FSW 기법과 하이브리드 FSW 기법의 실험결과에 대하여 유효공정속도, 인장강도, 인가하중, 용접부 단면 경도분포를 통하여 비교하였으며 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 정지조건에서 고주파 유도가열장치는 4 kW 출력에서 3초 이내에, 이송조건에서는 6 kW 출력, 10 mm/s 이송속도에서 시편 표면온도 400도를 달성하였다. 정

지 및 이송조건에서의 재료표면온도는 출력에 비례하였으며, 이송조건에서는 이송속도에 반비례 하였다.

2) 440 MPa 강에 대해 동일한 공정 조건에서 단독 FSW 기법의 최대 용접가능속도는 10 mm/s로 확인되었으며 4 kW 고주파 가열을 이용한 HFSW 기법의 경우 14 mm/s로 확인되었다. 용접부의 인장강도는 유사한 수준을 기록하였으며, 용접속도 및 기법에 따른 경향성은 확인 되지 않았다. 최대 용접 속도 기준으로 HFSW 기법은 약 40% 수준의 공정 속도 향상을 기대할 수 있다.

3) 440 MPa 강에 대해 동일한 공정 조건에서 4 kW 고주파 가열을 이용한 HFSW 기법의 최대 인가하중은 단독 FSW 기법대비 약 26% 감소된 최대 인가하중을 기록하였다.

4) 두 기법에 대해서 440 MPa 강의 단면경도분포는 HFSW 용접부에서 전반적으로 약간 낮은 경도를 가지나 모재 보다 높은 경도를 확인하였다. 980 MPa 강에 대해서는 두 공정의 단면경도분포에서 유의한 차이를 확인할 수 없었다.

철강재에 대해 고주파 유도가열 마찰교반용접 기법은 기존의 마찰교반용접 기법 대비 동등한 수준의 용접부 품질을 확보하면서 낮은 인가하중 조건에서 용접속도를 높여 생산성을 향상시킬 수 있는 가능성을 보여주었다. 그러나 인라인 방식의 적용을 위한 추가적인 공간의 확보가 필요하며 곡선형태의 용접선에 대한 적용이 어렵다. 이러한 단점은 고주파 유도가열 장치가 용접툴과 동축으로 구성됨으로써 해소될 수 있다. 동축 고주파 유도가열 장치는 링 형태의 코어를 코일로 감싸고 용접툴 반경의 외측에 장착된다. 이 장치를 구성함으로써 본 논문에서 확인한 인라인 방식의 고주파 유도가열 장치의 장점을 취함과 동시에 공정유연성을 향상시킬 수 있다. FSW 공정에 대한 동축 고주파 유도가열 방식에 대한 연구결과는 차기 논문에서 서술될 예정이다.

ORCID: Jason Cheon: <http://orcid.org/0000-0003-2271-2511>

ORCID: Jin-young Yoon: <http://orcid.org/0000-0001-6362-3086>

ORCID: Cheolhee Kim: <http://orcid.org/0000-0003-4127-3171>

References

1. R. S. Mishra and Z. Ma, Friction stir welding and processing, *Mater. Sci. Eng. R. Rep.* 50(1-2) (2005) 1-78. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>
2. R. Nandan, T. Debroy and H. Bhadeshia, Recent advances in friction-stir welding-process, weldment structure and properties, *Prog. Mater. Sci.* 53(6) (2008) 980-1023. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.05.001>
3. B. T. Gibson, D. H. Lammlein, T. J. Prater, W. R. Longhurst,

- C. D. Cox, M. C. Ballun, K. J. Dharmaraj, G. E. Cook and A. M. Strauss, Friction stir welding, Process, automation, and control, *J. Manuf. Process.* 16(1) (2014) 56-73.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.04.002>
4. Y. P. Kim, C. H. Kim, Y. G. Kim and S. M. Joo, Trends of technology development of friction stir welding machine, *J. Weld. Join.* 34(3) (2016) 1-5.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.3.1>
5. A. Fehrenbacher, C. B. Smith, N. A. Duffie, N. J. Ferrier, F. E. Pfefferkorn and M. R. Zinn, Combined temperature and force control for robotic friction stir welding, *J. Manuf. Sci. Eng.* 136(2) (2014) 021007(15 pages).
<https://doi.org/10.1115/1.4025912>
6. J. Yoon, C. Kim and S. Rhee, Compensation of vertical position error using a force-deflection model in friction stir spot welding, *Met.* 8(12) (2018) 1049.
<https://doi.org/10.3390/met8121049>
7. J. Yoon, C. Kim and S. Rhee, Performance of plunge depth control methods during friction stir welding, *Met.* 9(3) (2019) 283.
<https://doi.org/10.3390/met9030283>
8. R. Rai, A. De, H. K. D. H. Bhadeshia and T. Debroy, Review, Friction stir welding tools, *Sci. Technol. Weld. Join.* 16(4) (2013) 325-342.
<https://doi.org/10.1179/1362171811Y.0000000023>
9. K. J. Lee, S. H. Kim, H.G. Park and I. H. Oh, Development of the tool for friction stir welding of high temperature materials, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 29(5) (2011) 54-57.
<https://dx.doi.org/10.5781/KWJS.2011.29.5.552>
10. W. M. Thomas, P. L. Threadgill and E. D. Nicholas, Feasibility of friction stir welding steel, *Sci. Technol. Weld. Join.* 4(6) (1999) 365-372.
<https://doi.org/10.1179/136217199101538012>
11. T. J. Lienert, W. L. Stellwag, B. B. Grimmer and R. W. Warke, Friction stir welding studies on mild steel - Process results, microstructures, and mechanical properties are reported, *Weld. J.* 82(1) (2003) 1s-9s.
12. Y. Hovanski, M. L. Santella and G. J. Grant, Friction stir spot welding of hot-stamped boron steel, *Scr. Mater.* 57(9) (2007) 873-876.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.06.060>
13. G. Cam, Friction stir welded structural materials, beyond Al-alloys, *Int. Mater. Rev.* 56(1) (2013) 1-48.
<https://doi.org/10.1179/095066010X12777205875750>
14. M. Santella, Y. Hovanski and T. Y. Pan, Friction stir spot welding (FSSW) of advanced high strength steel (AHSS), *SAE Int. J. of Mater. and Manuf.* 5(2) (2012) 382-387.
<https://doi.org/10.4271/2012-01-0480>
15. K. Kimapong and T. Watanabe, Friction stir welding of aluminum alloy to steel, *Weld. J.* 83(10) (2004) 277s-282s.
16. A. A. M. da Silva, E. Aldanondo, P. Alvarez, E. Arruti and A. Echeverria, Friction stir spot welding of AA 1050 Al alloy and hot stamped boron steel (22MnB5), *Sci. Technol. Weld. Join.* 15(8) (2013) 682-687.
<https://doi.org/10.1179/136217110X12785889549462>
17. J. Y. Yoon, C. Kim and S. Rhee, Effect of circumferential tool path control on friction stir spot welding of Al/Fe Dissimilar metal joint, *J. Weld. Join.* 34(3) (2016) 6-11.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.3.6>
18. J. Outinen and P. Makelainen, Mechanical properties of structural steel at elevated temperatures and after cooling down, *Fire Mater.* 28(2-4) (2004) 237-251.
<https://doi.org/10.1002/fam.849>
19. K. H. Chang and C. H. Lee, Characteristics of high temperature tensile properties and residual stresses in weldments of high strength steels, *Mater. Trans.* 47(2) (2006) 348-354.
<https://doi.org/10.2320/matertrans.47.348>
20. J. Chen, B. Young and B. Uy, Behavior of high strength structural steel at elevated temperatures, *J. Struct. Eng.* 132(12) (2006) 1948-1954.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2006\)132:12\(1948\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:12(1948))
21. E. Ufuah, Characterization of elevated temperature mechanical properties of butt-welded connections made with HS Steel Grade S420M, *Proceedings of the World Congress on Engineering* (WCE 2012), London, UK (2012).
22. B. T. Thompson and S. S. Babu, Tool degradation characterization in the friction stir welding of hard metals, *Weld. J.* 89(12) (2010) 256s-261s.
23. G. Kohn, Y. Greenberg, I. Makover and A. Munitz, Laser-assisted friction stir welding, *Weld. J.* 81(2) (2002) 46-48.
24. Y. F. Sun, Y. Konishi, M. Kamai and H. Fujii, Microstructure and mechanical properties of S45C steel prepared by laser-assisted friction stir welding, *Mater. Des.* 47 (2013) 842-849.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.078>
25. W. A. Ferrando, The concept of electrically assisted friction stir welding (EAFSW) and application to the processing of various metals, *Naval Surface Warfare Center*, West Bethesda, MD, USA (2008).
26. X. Liu, S. H. Lan and J. Ni, Electrically assisted friction stir welding for joining Al 6061 to TRIP 780 steel, *J. Mater. Process. Technol.* 219 (2015) 112-123.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.12.002>
27. X. Long and S. K. Khanna, Modelling of electrically enhanced friction stir welding process using finite element method, *Sci. Technol. Weld. Join.* 10(4) (2013) 482-487.
<https://doi.org/10.1179/174329305X46664>
28. J. Luo, X. J. Wang and J. X. Wang, New technological methods and designs of stir head in resistance friction

- stir welding, *Sci. Technol. Weld. Join.* 14(7) (2013) 650-654.
<https://doi.org/10.1179/136217109X12489665059429>
29. M. Ahmadnia, A. Seidanloo, R. Teimouri, Y. Rostamiyan and K. G. Titrashi, Determining influence of ultrasonic-assisted friction stir welding parameters on mechanical and tribological properties of AA6061 joints, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 78(9-12) (2015) 2009-2024.
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-6784-0>
30. X. C. Liu and C. S. Wu, Elimination of tunnel defect in ultrasonic vibration enhanced friction stir welding, *Mater. Des.* 90 (2016) 350-358.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.131>
31. K. Park, Ph. D. Thesis, Development and analysis of ultrasonic assisted friction stir welding process, *Michigan University*, Ann Arbor, USA (2009) 111.
32. H. Bang, H. Bang, G. Jeon, I. Oh and C. Ro, Gas tungsten arc welding assisted hybrid friction stir welding of dissimilar materials Al6061-T6 aluminum alloy and STS304 stainless steel, *Mater. Des.* 37 (2012) 48-55.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.12.018>
33. H. Bang, H. Bang, H. Song and S. Joo, Joint properties of dissimilar Al6061-T6 aluminum alloy/Ti-6%Al-4%V titanium alloy by gas tungsten arc welding assisted hybrid friction stir welding, *Mater. Des.* 51 (2013) 544-551.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.057>
34. A. Jahn, M. Kratzsch and B. Brenner, Induction assisted laser beam welding of HSLA steel sheets, *Proceedings of the International Scientific Colloquium on Modelling for Electromagnetics*, Hannover, Germany (2008) 195-200.
35. M. Mach, H. Schulbe and B. Nacke, Modeling and optimization of induction assisted welding processes, *Proceedings of the International Scientific Colloquium on Modelling for Electromagnetics*, Hannover, Germany (2008) 215-220.
36. A. I. Alvarez, V. Cid, G. Pena, J. Sotelo and D. Verdera, Assisted friction stir welding of carbon steel, use of induction and laser as preheating techniques, *Friction Stir Welding and Processing VII*, *Springer International Publisher*, Switzerland (2013) 117-126.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-48108-1_13