

위상잠금 초음파 적외선열화상에 의한 접착기 마찰교반용접부의 결함 평가

Defects Evaluation at Lap Joint Friction Stir Welding by Lock-in Ultrasound Infrared Thermography

최만용*, 박희상*[†], 박정학*, 강기수**

Manyong Choi*, Heesang Park*[†], Jeonghak Park* and Kisoo Kang**

초 록 접착기 마찰교반용접은 새로운 고상접합법이다. 알루미늄 합금 6061-T6는 좋은 내식성과 중량 대비 높은 기계적 강도로 인해 넓은 분야에서 경량부재로 사용되고 있다. 본 논문에서 사용한 검사 방법인 위상잠금 초음파 적외선열화상기법은 넓은 면적을 동시에 검사할 수 있으며, 결함부와 건전부 사이의 위상차로부터 결함의 유무를 판단할 수 있다. 본고의 연구로부터, 위상잠금 적외선열화상기술을 이용하여 용접부의 열영상을 검출하여 기계적 강도와 비교 평가하였다.

주요용어: 접착기 마찰교반용접, 위상잠금 적외선열화상, 결함 크기, 결함 위치, 진단위상기법

Abstract Lap joint friction stir welding(LFSW) is an relatively new solid state joining process. A6061-T6 aluminium alloy has gathered wide acceptance in the fabrication of light weight structures requiring a high strength to weight ratio and good corrosion resistance. Test methods used in this paper, lock-in thermography, a phase difference between the defect area and the healthy area indicates the qualitative location and size of the defect. In this paper, the defects detected from the thermal image of mechanical properties for weld were evaluated and compared by the lock-in infrared thermography technique.

Keywords: Lap Joint Friction Stir Welding, Lock-in, Infrared Thermography, Defect, Shearing Phase Technique

1. 서론

최근 탄소배출규제 등 세계적으로 지구온난화에 대한 해결책이 강구되는 시점에 수송부재를 이루고 있는 재질의 경량화도 큰 관심을 받고 있다. 현재 기존의 철을 대신하여 많은 새로운 소재들이 등장하고 있지만 현재까지 각광을 받으며 가장 널리 사용되는 재질은 알루미늄 합금 재질이다. 이러한 알루미늄 재질은 무게의 경량화와 기계적 강도가 우수하며 다른 비철금속에 비하여 값이 저렴한 장점

이 있다. 현재 산업현장에서 활용하는 가장 흔한 접합법으로 TIG, RSW(resistance spot welding) 등과 같은 용융용접법을 현재는 많이 사용하고 있지만 열전도도가 높아 열확산이 빠르고, 이에 따라 모재의 팽창이 일어나 열변형을 유발하며, 산화피막은 그 내부에 함유된 결정수가 아크용접중 분해되어 수소를 방출함으로써 기공이 발생하여 부도체로 저항용접시 전도성을 방해하는 등의 문제를 발생시킨다. 또한 철에 비해 4배 정도 큰 전기전도도에 따라 저항용접시 대전류를 사용해야 하는 등의

문제점이 발생하고 있다[1]. 이와 같은 알루미늄 합금의 용융용접과정에서 발생하는 단점을 극복하는 기술로 고상접합방법인 마찰교반용접법(friction stir welding: FSW)이 활용되고 있다. FSW는 1991년 영국의 TWI에서 개발된 최신 용접법으로 모재를 용융점 아래에서 고상용접시키는 방법으로 용융에 따른 열변형과 흠가스(hume gas)와 스패터(spatter)를 억제시켜 주는 친환경적인 용접법이다[2,3,4]. 이러한 마찰교반용접부의 결함 검출에는 UT, RT 등이 활용되고 있으나 박판의 재질에서는 쉽지 않은 상황이다. 이에 본 연구는 마찰교반용접방법 중 겹치기용접부의 결함을 평가하기 위하여 초음파 적외선열화상 출기법을 통하여 그 가능성을 연구하였다.

2. 실험 재료

본 실험에서는 열처리 경화형 A6061-T6 알루미늄 압출재를 길이 200 mm, 너비 80 mm 두께 3.2 mm로 제작한 후 공구강 재질을 이용하여 길이 4.5 mm, 미터나사의 크기인 M5×0.8의 오른나사 핀을 제작한 후 핀의 나사산의 양옆을 평면으로 가공한 17 mm의 직경을 갖은 틀을 이용하여 시편의 움직임을 막을 수 있는 고정장치에 시편을 고정시켜 설치한 후 겹치기용접이 가능하도록 수평을 맞춘 후 양단을 일정간격으로 고정하여 움직이지 못하게 한 후 용접하였다. 판재에 가해지는 고정압은 일정할 수 있도록 나사의 회전비율을 맞추었으며 실험재료의 화학성분과 기계적 물성치는 Table 1, 2와 같다.

3. 실험 방법

3.1. 실험 방법

Table 3의 조건으로 Fig 1과 같이 밀링머신의 베드위에 장착된 고정틀에서 틀을 반시계 방향으로 회전시켜 알루미늄 합금을 겹치기 마찰교반용접하여 검사시편편을 제작한 후 Fig. 2와 같은 방법으로 초음파 적외선열화상 검출을 통하여 영상신호를 분석한 후 검사시편을 가공하여 인장시편을 제작한다. 가공시편의 인장강도를 측정하여 마찰교반용접부에서 검출된 적외선열화상에서 신호와 인장강도와의 상관관계를 파악하였다.

Table 1 Chemical composition of materials (Wt. %)

Materials	Si	Mn	Mg	Cu	Cr	Fe	Al
A6061-T6	0.60	0.15	1.0	0.22	0.20	0.35	Bal.

Table 2 Mechanical properties of materials

Mechanical properties	Tensile strength (MPa)	Yield strengt (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
A6061-T6	359	330	16	125

Table 3 FSW lap joint condition of A6061-T6

Aluminum	Pres-sing depth (mm)	Rotation	Tilting Angle (°)	Welding speed (mm/min)	Spindle (rpm)
A6061-T6	0.6	Count-erc lockwise	2.5	600	1800

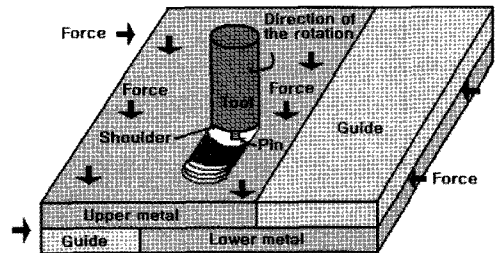


Fig. 1 Typical weld tool and process parameters used in the FSW process

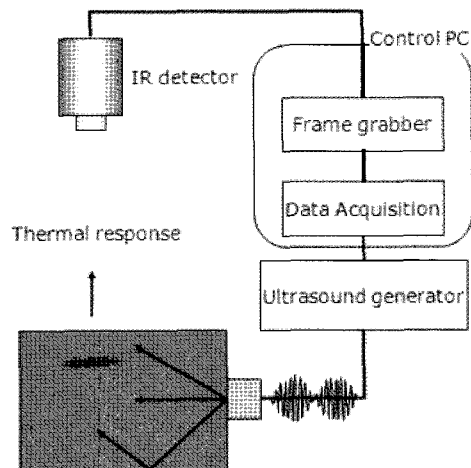


Fig. 2 Configurations of ultrasound excited thermography system

3.2. 적용 이론 및 실험

3.2.1. 초음파 열화상검사기법

초음파 열화상검사기법은 Fig. 2와 같이 고에너지 초음파가진을 이용한 열영상검사 기법은 짧은 초음파 펄스(펄스 폭: 50~300 ms, 주파수: 20~40 kHz)를 검사시편에 인가하여 결함 부위에서 국부적인 열이 발생되도록 한다. 적외선열영상 카메라는 초음파 펄스인가 전후의 시간 경과에 따른 결함 부위의 발열 현상의 진행 상황을 기록 저장하고 이를 영상 처리하여 검사시편의 결함을 찾아낸다[5]. 초음파에 의한 단성파가 결함부위에 도달함과 동시에 발열현상이 나타난다. 즉, 초음파가진시 진동 에너지를 구조물에 인가한 후 수십 ms 이내 열점(hot spot)이 열화상 카메라에 의해 관측된다.

3.2.2. 위상잠금 광-적외선열화상

위상잠금 적외선열화상기법은 자극원을 조화함수로 하여 대상체에 입사하고 이때 대상체의 응답신호를 처리하여 위상, 진폭 등의 변화를 구하는 방법이다. 외부 자극원으로는 결함의 종류와 대상체의 재질에 따라 조화함수로 제어가 용이한 광, 초음파, 진동 등이 사용된다. 본 논문에서는 결함 검출을 위해 자극원을 초음파로 하는 위상잠금 초음파-적외선열화상기법을 사용하였다. 이 기법은 Fig. 3과 같이 시스템을 구성하고, 조화함수로 입사되는 초음파(ultrasonic source)에 적외선 검출소자를 동기화시켜 대상체의 응답 신호를 획득하게 된다. 식 (1)로 표현되는 고체내의 1차원 열전도 방정식에서 외부 자극원으로서 초음파를 사용하여 대상체에 조화함수($T = T_0 \cos \omega t$)로 가열하고, 이때 대상체로 침투한 열원의 변화를 관찰하여 결함을 검출하는 방법이다[6].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기에서 T 는 온도, t 는 시간, k 는 열전도계수, ρ 는 밀도, c_p 는 비열, x 는 열유동 방향으로의 거리이다. 조화함수로 가열된 식(1)의 해는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T(x, t) = T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu) \quad (2)$$

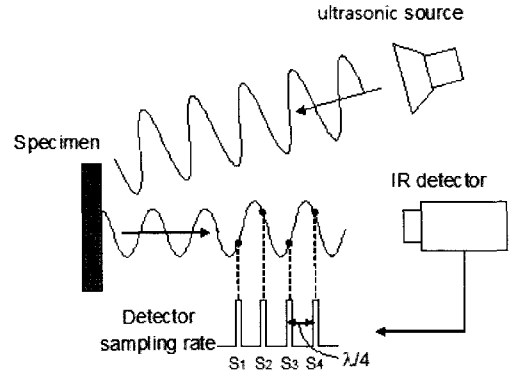


Fig. 3 Signal processing of lock-in infrared thermography

여기에서 침투깊이(thermal diffusion length), $\mu = \sqrt{\alpha/\pi f}$, 열확산계수(thermal diffusivity)는, $\alpha = k/\rho c_p$ 이다. 위상잠금기법에서는 식(2)에서 측정 결과로부터 위상을 추출함으로써 검출 민감도를 향상시킬 수 있으며, 표면방사율의 불균일성에 의한 결함검출 오류를 최소화할 수 있다. 식(2)에서 위상은 외부 자극원과 적외선 검출소자를 동기시켜 자극원의 $\lambda/4$ 주기 간격으로 연속하는 적외선 검출 신호 I_1, I_2, I_3, I_4 를 식(3)과 같이 획득하고, 식(4)를 사용하여 추출할 수 있다[7,8].

$$I_1 = T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu) \quad (3)$$

$$I_2 = T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - \pi/2)$$

$$I_3 = T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - \pi)$$

$$I_4 = T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - 3\pi/2)$$

$$\phi = x/\mu = \tan^{-1} \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (4)$$

3.2.3. 초음파 열화상시험장치 및 시편

초음파가진펄스가 인가되는 순간에 본 초음파-적외선 열영상검사장치는 초음파가진장치와 적외선열영상 카메라로 구성된다. 초음파가진장치는 출력 400 Watt, 주파수 20 kHz이며, 적외선 카메라는 프랑스 Cedip사의 Silver 480 m 모델(noise equivalent temperature difference: NEDT, 25 mK)을 사용하였 흑체와 비슷한 조건을 만족시키기 위하여 검정색 무광페인트로 도포하였으며 초음파 가진horn(horn)과 시편의 가진면(exciting area)은 시편의 단면에 가진

을 하였으며 가진압은 20 kgf의 힘으로 적당하게 압착이 된 상태로 가진하게 된다. 적외선열화상 검출후 시편을 Fig. 5와 같이 1~5로 각 위치별로 절단하여 Instron 4484 만능시험기를 이용하여 인장속도를 2 mm/min로 하여 인장시험을 하였다.

4. 실험 고찰

4.1. 적외선열화상 검출

나사산 양 옆면을 가공한 타원형태 핀을 이용하여 겹치기 마찰교반용접을 하였을 때 용접부의 내부 거동은 Fig. 6과 같은 형태로 나타나게 된다.

이때 위쪽 모재와 아래쪽 모재 사이에 나타나는 경계부가 파단에 주요한 영향을 나타내는 요인이 된다[9]. 이와 같은 경계는 모재가 고상용접상태로

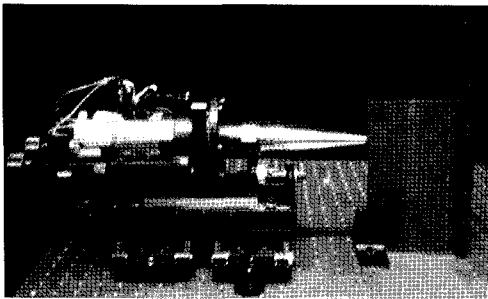


Fig. 4 A photograph of the experimental setup

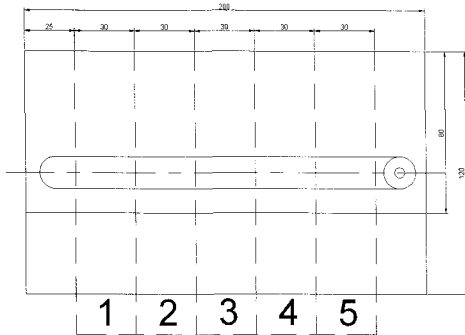


Fig. 5 Specimens of lap joint FSW

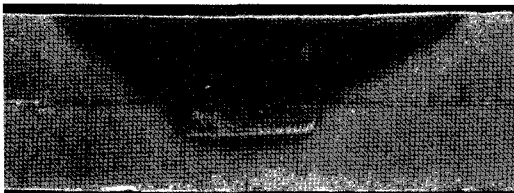
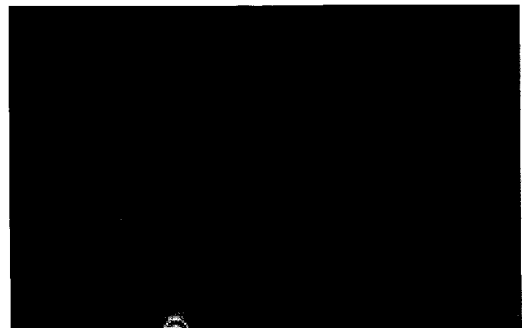


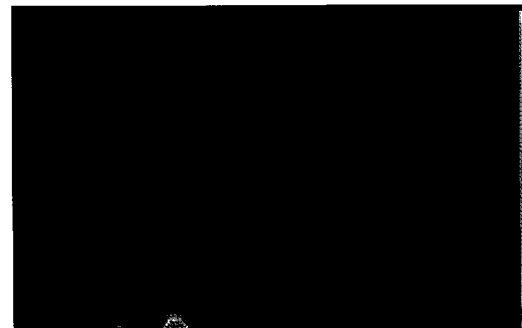
Fig. 6 Macro structural of lap joint FSW

발달하기 전까지 나타나게 되는데 이 부분에 초음파가 전달되게 되면 마찰에 의한 발열이 나타나게 된다. 통상 탄소강의 경우 4 μ m에서 가장 발열이 잘 나타나며 1 μ m이하와 100 μ m이상에서부터는 대체로 발열이 줄어든다고 알려져 있다[10].

Fig. 7은 100 mHz의 신호를 사각파 형태로 초음파를 가진한 후 발생하는 용접시편의 열화상을 검출한 후 위상잠금방법을 이용하여 신호처리를 한 것이다. Fig. 7과 Fig. 8은 초음파를 시험체에 가진하였을 때 실제 열화상 검출 방법에서 위상잠금 방법을 사용하지 않은 상태와 위상잠금 방법을 사용하여 얻은 영상을 보여 주고 있다. Fig. 7~8의 (a)는 용접비드가 보이는 정면에서 검출한 영상이며, (b)는 용접비드가 보이지 않는 뒤쪽에서 검출한 영상이다. 실시간으로 신호처리를 하지 않은 Fig. 7 (a)의 경우 가진시에 미미한 영상의 변화가 포착되었으나 시각적으로 그 변화를 확인하기 힘든 반면 위상잠금방법을 이용하여 열화상을 검출한 Fig. 8(a)는 시험편에서 발생하는 온도 분포를 또렷하게 시각화 해주어 어느 부분에서 온도 차이가 발생하는지를 정확하게 파악할 수 있었다.

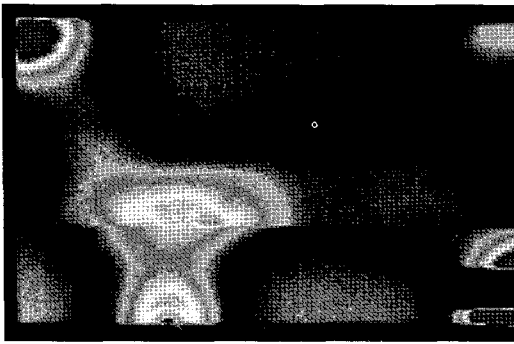


(a) Front

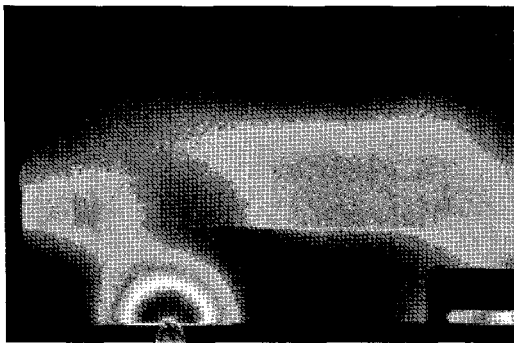


(b) Back

Fig. 7 Using pulse thermography images of lap joint FSW

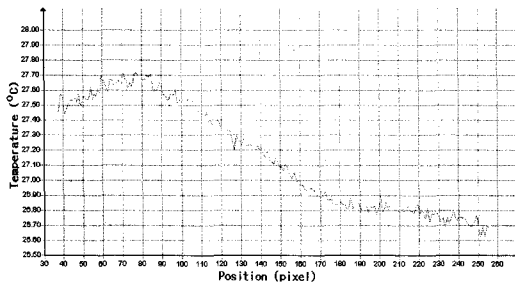


(a) Front

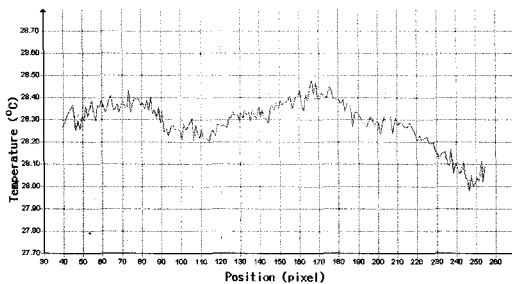


(b) Back

Fig. 8 Using pulse-phase thermography images of lap joint FSW



(a) Front



(b) Back

Fig. 9 Front and back of the specimen temperature

실험 결과 열화상의 차이가 발견되었는데 가진된 (a)면의 영상에서 나타난 결과는 시편1, 2에 해당하는 부분에서 발열이 높게 나타나는 영상을 보였다. 발열부분은 위쪽 판의 끝부분이 닿는 부분으로 위 판과 아래쪽 판의 마찰이 강하게 발생하는 것으로 둘 사이의 간격이 마찰열이 발생하기 쉬운 차이를 보이는 것으로 판단된다. 그 외의 지역에서는 시편 고정부에서 발생하는 마찰열이 검출되었다.

(b)면의 검출 영상에서 나타난 부분의 시편1, 2 부분의 경우에서 마찰열의 발생이 현저히 적게 나타나며 그 외의 용접부에서는 거의 동일한 열적거동을 보이는 것을 발견할 수 있었으며 가진부분과 달리 다른 부분에서 발열이 나타남으로 가진부분의 차이는 크지 않다 하겠다. 초음파 적외선열화상의 경우 발열에 의한 hot spot이 발생하는 부분은 열탄성효과에 의한 발열보다는 마찰에 의한 발열로 두 재료 사이의 접촉이 틈이 발생하기 힘들게 붙어 있을 때와 마찰이 발생하기 힘들게 틈이 넓을 때 발열이 발생하지 않는 특성을 나타낸다. 이와 같은 특성을 고려할 때 시편(a)와 (b)의 열화상 결과는 시편1, 2 부분이 (a)의 front side와 (b)의 back side 부분에서 3~5 부분과 다른 형태의 발열 특성을 보였다. 겹치기 마찰교반용접은 위판과 아래판이 용접되는 과정이 일반 마찰교반 맞대기용접보다 용접성에 영향을 미치는 요인들이 더욱 많이 존재한다.

이러한 원인은 시편 전체의 용접성을 균일하지 못하게 만들게 되는데 Fig. 7-8의 1, 2부분이 다른 부분과 온도 분포가 다른 것은 이 부분에서의 변형이 발생하였다고 판단된다. Fig. 8은 Fig. 7의 용접부 비드 중간을 가로지르는 온도 분포를 보여주고 있다. Fig 9의 (a)와 (b)의 경우 가장 크게 나타난 차이점은 (a)의 경우 온도 차이가 1 °C 정도의 차이를 보인 반면 (b)의 경우는 0.4 °C 정도의 온도 차이를 보였는데 이는 Fig. 8의 (a)부분에서 발열이 높게 발생함을 나타낸다 하겠다.

4.2. 시편의 인장시험

Fig. 10은 시편 1~5의 각각의 인장강도를 나타낸 것으로 시편의 위치에 따른 인장강도의 값이 다를 것을 나타내고 있다. 최고 인장강도 값은 167 MPa로 시편4, 5에서 결과를 보였으며, 시편3은 165 MPa로 시편4, 5와 차이가 크지 않았다.

그러나 시편1, 2의 경우 시편3, 4, 5에 비하여 상

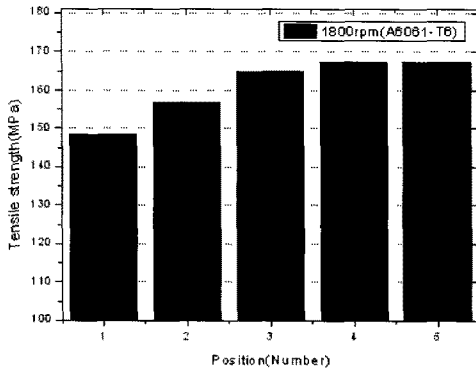


Fig. 10 Tensile strength of the specimen location

대적으로 인장강도 값이 상대적으로 낮게 나타나고 있는데, 이는 앞선 초음파 적외선열화상 검출시 시편1, 2 부분에서의 열화상이 3, 4, 5시편들과 다르게 나타난 것과 같은 결과와 같은 차이점을 보인 것이 있는데 초음파 적외선열화상과 인장강도 값과의 상관관계가 있음을 나타낸 것으로 이와 같은 결과를 통하여 겹치기 마찰교반용접시 용접의 시작부분에서 강도가 상대적으로 저하됨을 발견할 수 있었으며, 초음파 적외선열화상을 통하여 검출한 열화상 데이터와 인장시험을 통한 실험 결과 용접부의 성능을 예측하는데 초음파 적외선열화상 데이터를 활용 가능성을 확인할 수 있었다.

5. 결론

- (1) 초음파 적외선열화상검사기법을 활용하여 겹치기 마찰교반용접부의 발열 특성을 파악하였다.
- (2) 위상잠금 열화상방법을 이용하여 마찰교반용접부의 발열 부분을 명확히 확인할 수 있었다.
- (3) 인장시험을 통하여 용접 시작 부분에서 인장강도가 저하하였다.
- (4) 초음파 적외선열화상에서 검출된 영상과 시험편의 인장강도 간의 상관관계가 있었다.

참고문헌

[1] E. A. Starke, Jr. and J. T. Staley, "Application of modern aluminum alloys to aircraft," Progress in Aerospace Sciences, Vol. 32, Issues 2-3, pp. 131-172 (1996)

[2] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Smith-Temple,

and C. J. Dawes. "Friction-stir butt welding," GB Patent No. 9125978.8, International Patent Application No. PCT/GB92/02203 (1991)

[3] R. John and K. V. Jata, Proceeding of the Friction Stir Welding and Processing, Eds. K. V. Jata, M. W. Mahoney, R. S. Mishra, S. L. Semiatin and D. P. Field, TMS, p. 57 (2003)

[4] J. F. Hinrichs, C. B. Smith, B. F. Orsini, R. J. DeGerge, B. J. Smale and P. C. Ruehl "Friction stir welding for the 21st century automotive industry," Proceeding of the 5th International Symposium on Friction Stir Welding, Metz, France (2004)

[5] F. Riegart, Th. Zweschper and G. Busse, "Eddy-current lock-in thermography: Method and its potential," J. Phys. IV France, Vol. 125, pp. 587-591 (2005)

[6] V. P. Vavilov, "Infrared and thermal testing: Heat transfer," Nondestructive Testing Handbook Series III (3rd Ed.), X. P. V. Maldague, P.O. Moore Ed., pp. 54-86, ASNT, Columbus, USA (2001)

[7] D. Wu and G. Busse, "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials," Rev. Gen. Therm., Vol. 37, pp. 693-703 (1998)

[8] G. Busse, "Infrared and thermal testing: technique of infrared thermography," Nondestructive Testing Handbook Series III (3rd Ed.), X. P. V. Maldague, P. O. Moore Ed., pp. 318-328, ASNT, Columbus, USA (2001)

[9] W. M. Thomas, K. L. Johnson and C. S. Wiesner, "Friction stir welding - Recent developments in tool and process technologies," Advanced Engineering Materials, Vol. 5, No. 7, pp. 485-490 (2003)

[10] M. Y. Choi, S. S. Lee, J. H. Park, W. T. Kim and K. S. Kang, "Analysis of heat generation mechanism in ultrasound infrared thermography," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 29, No. 1, pp. 10-14 (2009)