

## 광원 펄스와 위상잠금 적외선 열화상을 이용한 점용접부의 진전성 평가 연구

### A Study on the Health Evaluation in Spot Welded Zone by Using Optical Pulse and Lock-in Phase Infrared Thermography

박희상\*, 최만용\*<sup>†</sup>, 권구안\*, 박정학\*, 김원태\*\*, 이보영\*\*\*

Hee Sang Park\*, Mang Yong Choi\*<sup>†</sup>, Koo Ahn Kwon\*, Jeong Hak Park\*, Won Tae Kim\*\*  
and Bo Young Lee\*\*\*

**초 록** 적외선 열화상을 이용한 비파괴검사는 다양한 산업분야로 활용도가 확장중이다. 또한, 적외선 열화상을 이용한 용접부의 비파괴검사도 다양하게 진행중이다. 현재는 전기저항 점용접부의 비파괴검사는 방사선 검사를 주로 진행하고 있다. 본 연구는 광 적외선 열화상 비파괴검사를 이용하여 전기저항 점용접부의 용융부(너깃)의 영역을 측정하였다. 실험결과 펄스 적외선 열화상검사 방법을 활용할 경우 짧은 시간안에 명확한 용융부의 검출이 가능함을 확인하였다.

**주요용어:** 적외선열화상, 펄스, 위상잠금 적외선열화상, 점용접부

**Abstract** The non-destructive testing using infrared thermography is extended to a variety of industries and non-destructive testing of welds using infrared thermography is also in progress in various ways. Currently, a non-destructive testing of electrical resistance spot welds which is mainly used is Radiography Testing. This study detected area of spot welds nugget using optical-infrared thermography. In the results, it is possible for detecting defects of nugget in a short period of time using pulse-infrared thermography.

**Keywords:** Infrared Thermography, Pulse, Lock in Termography, Spot Welding

#### 1. 서 론

다양한 산업체가 공존하는 현재 전통적인 기계 구조물의 생산에 대표적으로 활용하는 방법은 용접이라 할 수 있다. 용접의 경우 두 가지의 재료가 용융하여 하나의 구조물로 접합되는 방법으로 특히 금속의 접합에 주로 사용되고 있다. 앞서 말한 바와 같이 모재가 용융하여 하나의 구조물로 생성되는 방법을 야금학적 접합이라고 한다면 구조물을 리벳, 볼트 등으로 결합하는 방법으로는 활용하는 기계적 접합방법이 있다. 그중 다양한 박판의 접합에 주로 사용하는 리벳팅의 경우

항공, 철도, 자동차 등 다양한 분야에 적용되어 활용되어 왔지만 현재는 점용접 등으로 대체 가능한 분야에 한하여 다른 기술로 대체되고 있다. 점용접의 경우 설비에 많은 비용이 들고 대전류를 활용하는 문제가 존재하지만 빠른 시간 안에 야금학적으로 접합을 할 수 있는 방법으로 가장 경제적인 접합기술로 이용하고 있다. 우리가 점용접이라고 하는 용접방법중 주로 이용하는 방법은 전기저항을 이용한 점용접을 주로 이용하고 있다. 이러한 점용접의 경우 로드 용접 전극 위, 아래에 모재를 사이에 두고 통전되는 순간에 발생하는 저항열로 인하여 모재가 부분적으로 용융

[접수일: 2013. 7. 3, 수정일: 2013. 8. 16, 게재확정일: 2013. 8. 16] \*한국표준과학연구원 안전측정센터, \*\*공주대학교 기계자동차공학부, \*\*\*한국항공대학교 항공우주기계공학과, <sup>†</sup>Corresponding Author: Safety Measurement Center, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-353, Korea (E-mail: moonring@kriss.re.kr)

접합되는 기술로 전기 저항값을 형성하는 전압, 전류, 통전시간, 압력값 등에 따라 점용접의 용융부인 너깃의 형성이 달라지며 이러한 너깃의 상태에 따라 용접강도 또한 다르게 된다. 본 연구는 비파괴검사 기술 중 광원 침투깊이가 깊고 신속한 펄스 방법[1,2]과 열화상 이미지의 감도가 높은 위상 잠금 방법을 이용한 적외선 열화상 검사 장치로 아연도금 박판을 이용한 점용접부의 건전성 평가를 진행하여 향후 자동차 산업 등에 활용 가능한 기술의 가능성을 연구하였다.

2. 실험 장치 및 구성

2.1. 실험재료

결합 검출을 위하여 점용접 모재의 재질은 고강도 아연도금 강판(EZFFC590)을 사용하였다. 아연도금 강판의 경우 자동차 부품으로 차체 패널에 주로 사용하는 재질이다. 시험편은 두께에 따라 2가지로 분류하였고 1.0 mm 두께의 시험편 크기는 길이 100 mm, 너비 30 mm의 시험편을 겹쳐 점용접하였고, 1.4 mm의 두께의 시험편의 길이는 125 mm, 너비 40 mm의 크기로 위 아래로 겹쳐 점용접하였다. 용접부는 시험편 당 한 개로 제한하였다. 기계적 성질 및 화학적 조성은 Table 1과 2와 같다.

Table 1 EZFFC590 chemical composition

Chemical composition	C	Si	Mn	P	S	S-AL	Fe
EZFFC 590	0.098	0.98	1.5	0.073	0.002	-	B

Table 2 EZFFC590 mechanical property

Mechanical properties	YP (MPa)	TS (Mpa)	EL (%)	BEND	IMPACT	HARDNESS (HRB)
EZFFC 590	420	617	34	-	-	-

Table 3 Welding conditions

Type/thickness (mm)	Current	Cycle	Kgf
GA 1.0 X 1.0	6, 10 kA	10	300
GA 1.4 X 1.4	6, 10 kA		

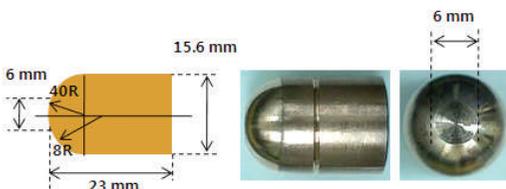


Fig. 1 Electrode

실험에 사용된 용접기는 SCR-AC 저항 점용접기 이고, 용접봉은 Fig. 1와 같은 형상으로 크롬과 구리로 코팅된 D-type 전극봉으로 길이는 23 mm이고 직경은 16 mm이다. 용접 조건은 Table 3과 같다.

2.2. 장치 구성

Fig. 2와 Fig. 3은 실제 적외선 열화상 검사의 장치 구성을 나타내고 있다. 본 연구에 사용된 펄스 광원 시스템은 Balcar light system Nexus A6400 시스템으로 6.4 kJ의 출력을 내는 제논램프 장치로 구성되었으며, 정밀한 적외선 열화상 검출 방법중 가장 널리 사용되는 위상 잠금 방법에 사용된 할로겐 광원 램프는 시험편 좌우 하나씩 출력 1 kW, 거리 1.5 m로 설치하였다. 광원의 위치를 점용접부의 전면과 후면에 위치하여 투과법과 반사법을 이용하여 장치를 구성하였다.

Pulse 열화상은 순간적인 광원 가진 후 1.0 mm 두께일 때는 10프레임(1초=60프레임), 1.4 mm 두께일 때는 15프레임일 때의 이미지를 획득하였으며, 위상잠금 열화상 이미지는 100 mHz의 시간이 한 주기를 완성한 후의 이미지를 획득하였다.

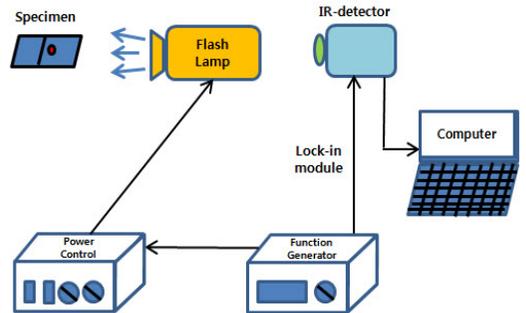


Fig. 2 Halogen lamp reflection method config

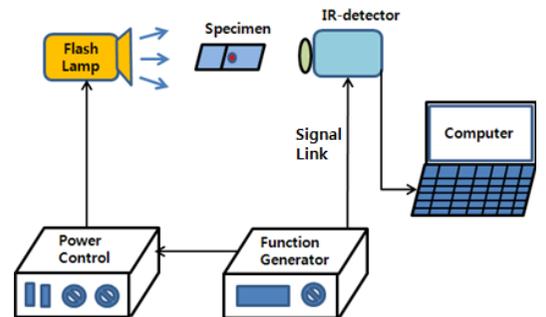


Fig. 3 Xenon lamp transmission method config

적외선 카메라는 프랑스 Cedip의 silver 480 m 모델(NEDT: 25 mK)을 사용하였다. Fig. 2의 경우 적외선 열화상의 검출 감도를 위하여 검정색 무광 페인트를 도포한 부분을 측정하였고, Fig. 3의 실험은 광원 조사부는 페인트를 도포하지 않았고 열화상 측정 부위만 페인트를 도포하였다.

### 3. 광 적외선 열화상 적용 이론

#### 3.1. 광 펄스 열화상 영상 정규화

순간적인 광원이 검사 대상체의 표면에 작용할 때 표면결합 존재 경우를 배제하고 열 펄스 증착을 따르게 하는 냉각의 초기 순간동안, 시험체의 열적거동은 z방향에서 분출율,  $e_z$ 에 의해 특성화된 반무한 동질의 매체에서 발생하는 것과 같은 것으로 고려할 수 있다. 표면온도 시간 전진은 매우 간단한 식(1)과 같은 법칙에 따른다.

$$\Delta T_{x,y}(t) = \frac{Q_{x,y}}{e_z \sqrt{\pi t}} \tag{1}$$

내부 결함의 영향이 느껴지기 시작할 때, 표면 온도 전진은 보다 복잡해지고 한 지점에서 다른 지점으로 달라진다. 그럼에도 불구하고, 결함을 검출하고 특성화하기 위한 서모그램 분석은 국소가 열 보여진 표면에 의해 국소적으로 방사되고 카메라 검출기에 의해 기록된 적외선 복사열이 표면의 가능한 비완전 조도와 광학적 상태량(소스 스펙트럼 영역내 흡수율과 카메라 스펙트럼 영역내에서 적외선 방사율)의 변동에 독립적이어야 한다. 이에 대한 해법은 펄스 발생에 충분히 근접한 시간  $t'$ 에서 IR카메라에 의해 기록된 국소 온도 상상을 정규화 하는 것을 구성된다[3].

$$\overline{\Delta T_{x,y}}(t) = \frac{\Delta T_{x,y}(t)}{\Delta T_{x,y}(t')} \tag{2}$$

이 시간 화소방향 연산은 식(2)와 같이 각 화소에 시간  $t'$ 에서 정규화된 온도 상승에 1에 해당하는 값을 준다. 로그 다이어그램에서 그래프 관점으로부터, 서모그램  $\Delta T_{x,y}(t)$ 의 병진을 온도 축에 평행하게 하여 각각의 서모그램과 모든 화소가 그 나름의 병진되어 연산하게끔 한다. 최종적으로 정규화된 온도 영상들로부터 유도된 상대

적인 콘트라스트 영상들이 조악한 온도 영상들로부터 유도된 것들과 같지 않다는 것을 식(3)을 통하여 주목할 필요가 있다[4].

$$\overline{Cr_{x,y}}(t) = \frac{\overline{\Delta T_{x,y}}(t)}{\Delta T_{x,y}(t)} - 1 \neq Cr_{x,y}(t) \tag{3}$$

#### 3.2. 위상잠금 초음파-적외선 열화상 적용 이론

위상잠금 적외선 열화상 기법은 다양한 신호처리 기법이 존재하는데 대표적인 방법은 이산푸리에변환(discrete Fourier transform; DFT)을 이용한 방법으로 이산푸리에변환(DFT)은  $N$ 개의 이산적인 복소수  $\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_{n-1}$  값들을 복소수값  $F_0, F_1, F_2, \dots, F_{n-1}$  으로 변환하는 이산 푸리에 변환식 (4)로 정의된다.

$$F_j = \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cdot e^{-\frac{2 \cdot \pi \cdot i}{N} \cdot jk} = Re_j + i \cdot Im_j \quad j=0, \dots, n-1 \tag{4}$$

이때 DFT의  $j$  값은 주파수 증가의 실수부(Re)와 허수부(Im)로 나타낼 수 있으며, 실수부와 허수부를 이용하여 식(5)와 식(6)과 같은 진폭값  $A_j$  (amplitude)와 위상값  $\varnothing_j$  (phase)을 얻을 수 있다.

$$A_j = \sqrt{Re_j^2 + Im_j^2} \tag{5}$$

$$\varnothing_j = atan\left(\frac{Im_j}{Re_j}\right) \tag{6}$$

이를 이용하여 주파수 선정에 따른 진폭이미지와 위상이미지를 얻을 수 있다[5].

### 4. 실험

전기저항 점용접된 시험편 경우 용접된 부위에 압흔이 나타나게 된다. 압흔의 경우 용접부의 용융부 크기와 비례하는 경우가 많으나 실제 용접 조건이 맞지 않는 경우 용접 너깃과 무관하게 표면의 압흔만이 존재하는 경우가 있다. 이와 같은 경우 방사선투과검사를 수행할 경우 실제 용접부를 확인할 수 있으나, 기존의 머신비전 등을 활용할 경우에는 실제 용접된 용접부의 건전성을 정확하게 판단하지 못하는 경우가 발생하게 된

다. Fig. 4와 5는 1.4 mm, 1.0 mm 두께의 용접 시험편을 나타내고 있다. 각각 위쪽에 위치한 용접시험편의 경우 6 kA이고 아래쪽에 위치한 용접시험편은 10 kA로 전류가 높은 아래쪽 시험편의 표면압흔이 상대적으로 크게 나타나고 있다. Fig. 4, 5와 같이 실제 압흔이 1.0 mm와 1.4 mm 두께의 시험편과 유사하게 전류의 세기에 따라 압흔의 크기가 달라짐을 나타내고 있다.

광 펄스 방법을 이용한 반사법과 투과법의 검사결과 이미지는 각각 Fig. 6~9의 (a), (b)와 같다. 제는 램프의 순간적인 플래시를 가하고 0.5초에 해당하는 영상프레임에서 촬영된 이미지를 선정하여 그 결과값을 이용하여 결합 검출에 이용하였다. 각각의 이미지에서 전류가 높을수록 압흔이 넓게 분포함을 확인 할 수 있었다. 각각의 이미지 (a)와 (b)에서 용접 너깃의 크기가 전류의 세기에 따라 확연히 달라짐을 확인할 수 있었다. 또한 대부분의 점용접의 경우 겹치기 용접이 주로 진행되는데 펄스법을 이용한 적외선 열화상 이미지를 통하여 위, 아래에 위치한 두 모재가 겹쳐지는 크기를 확인할 수 있다. 점용접의 경우 위쪽에 위치한 모재의 여유량만을 확인할 수 있는 경우가 대부분이지만 고출력의 플래시 램프를 이용하여 적외선 열화상 검사를 진행할 경우 위, 아래의 모재의 겹침 부분까지 파악할 수 있음을 확인하였다.

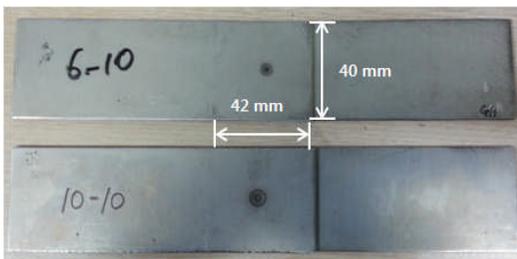


Fig. 4 Spot welded specimens of 1.4 mm thickness

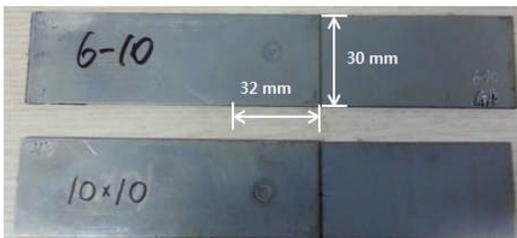


Fig. 5 Spot welded specimens of 1.0 mm thickness

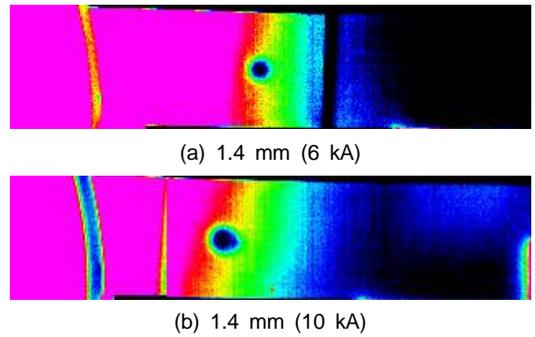


Fig. 6 Infrared thermography of spot welded specimens by reflection method (pulse)

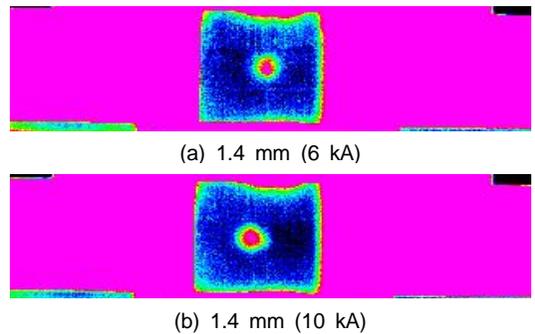


Fig. 7 Infrared thermography of spot welded specimens by transmission method (pulse)

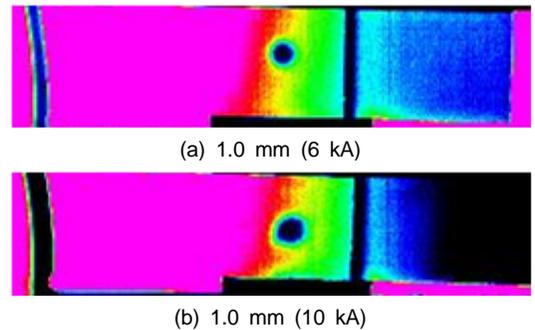


Fig. 8 Infrared thermography of spot welded specimens by reflection method (pulse)

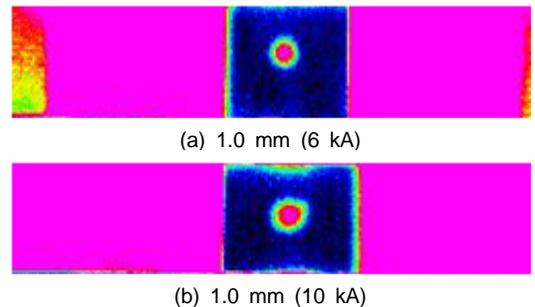


Fig. 9 Infrared thermography of spot welded specimens by transmission method (pulse)

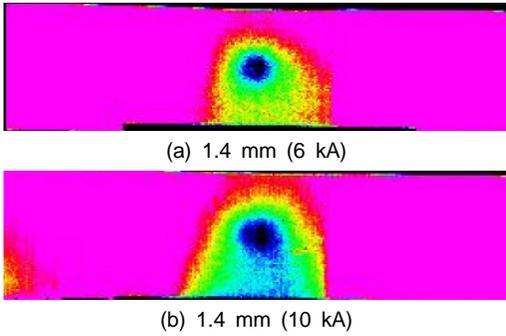


Fig. 10 Infrared thermography of spot welded specimens by reflection method (lock-in)

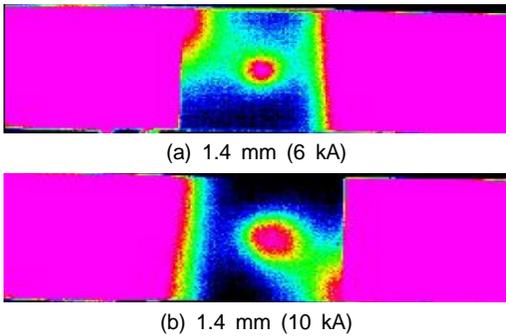


Fig. 11 Infrared thermography of spot welded specimens by transmission method (lock-in)

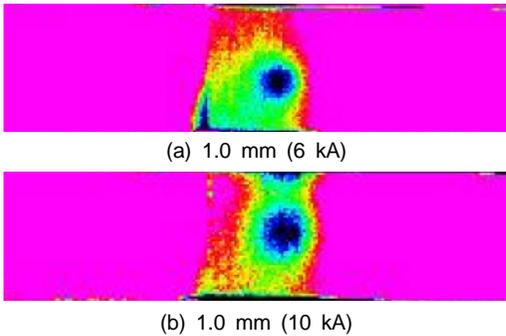


Fig. 12 Infrared thermography of spot welded specimens by reflection method (lock-in)

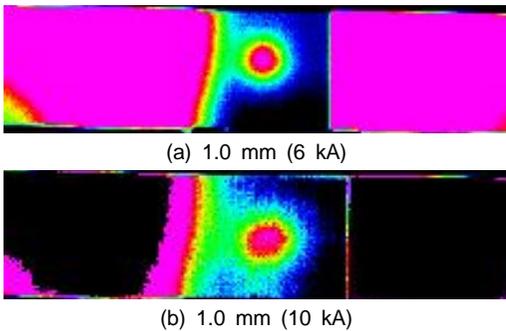


Fig. 13 Infrared thermography of spot welded specimens by transmission method (lock-in)

또한 광원 조사 방법을 반사법과 투과법으로 나누어 측정된 결과 이미지 모두에서 투과법의 압흔과 모재의 겹침 부분이 반사법 측정 결과보다 명확하게 측정되었다.

위상 잠금법에 의한 반사법과 투과법의 검사 결과 이미지는 각각 Fig. 10~13의 (a), (b)와 같다. 펄스법에 의한 적외선 열화상 이미지 결과와 마찬가지로 높은 전류에서의 용접 압흔이 상대적으로 크게 검출되었으며, 반사법보다는 투과법에서 보다 더 선명한 압흔을 확인할 수 있었다.

펄스법과 위상 잠금법을 이용한 적외선 열화상 검사 결과 이미지를 비교한 결과 두 방법 모두 반사법보다는 투과법에서 보다 더 선명하고 뚜렷한 압흔을 확인할 수 있었다. 또한 위상잠금법에 비해 펄스법에서 좀 더 뚜렷하고 선명한 이미지 결과를 얻을 수 있었다.

Table 4은 적외선 열화상 실험 결과 중 가장 명확한 결함 이미지를 나타낸 pulse 광원을 이용한 실제 너깃 사이즈와 열화상 이미지의 사이즈와 겹침이 일어나는 부위의 실제 사이즈와 열화상 이미지의 사이즈를 나타내고 있다. Fig. 14는 열화상 이미지를 이용한 이미지 측정 방법을 보여주고 있다.

Table 4 Measurement of thermography defect size (pulse)

Thickness (mm)	Power (kA)	Nugget size		Area of overlapping	
		Real (mm)	Image (mm)	Real (mm)	Image (mm)
1.0	6	4.47	5.03	33.65	31.90
1.4		4.82	5.16	41.62	38.64
1.0	10	6.14	6.43	36.15	34.42
1.4		6.25	6.61	42.94	43.76

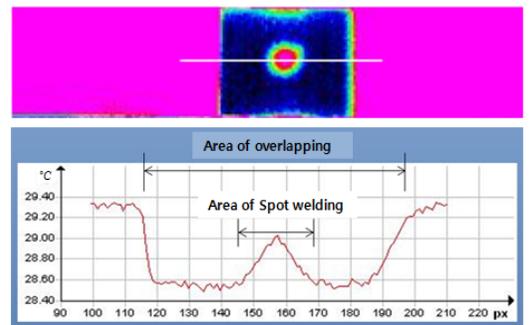


Fig. 14 Temperature distribution

시편의 너짓 직경과 열화상 이미지상의 너짓과 열화상 직경의 최대 오차는 1.0 mm 두께에 6 kA로 용접된 시편에서 검출된 오차인 12.5%로 확인되었다. 이와 같은 이유는 두께가 두꺼운 1.4 mm의 경우 용융부의 너짓에 충분한 재질이 용융되는 것과 달리 1.0 mm의 경우 충분한 용융부가 발생하지 않음에 따라 용접 너짓이 충분히 생성되지 않음으로 사료 된다.

적외선 열화상의 경우 다양한 이미지 처리 방법이 존재하며, 이미지 신호 처리의 경우 시간이 많이 소요될수록 더 나은 품질의 이미지를 획득할 수 있다. 하지만, 실제 산업 현장에서 제품의 품질 검사를 진행하기 위해서는 빠른 시간 내에 많은 대상을 검사하는 것이 중요하다. 따라서, 더 많은 이미지 처리시간을 요하는 위상잠금법에 비해 펄스법이 실제 산업 현장에 더 유리하다고 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 현재 산업 현장에서 활용하고 있는 아연도금 강판의 전기저항 점용접의 용접부 검사에 주로 사용되고 있는 적외선 열화상 검사 방법 중 펄스법과 위상 잠금법을 이용하여 검사를 진행하였다. 광원의 조사 방법 또한 반사법과 투과법으로 나누어 비교 실험을 진행하였다. 실험 결과는 다음과 같다.

- (1) 열화상 이미지상의 너짓과 열화상 직경의 최대 오차는 1.0 mm 두께에 6 kA로 용접된 시편에서 검출된 오차인 12.5%로 확인되었다.
- (2) 펄스와 위상잠금을 이용한 적외선 열화상 이미지 검사 결과 반사법에 비해 투과법에서 압흔의 형태와 겹침부가 선명하게 나타난 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 펄스 열화상 방법이 위상잠금법에 비해 겹침부의 경계선과 압흔이 뚜렷하게 관찰되었다.

향후 용접부 내부의 결함 및 최적의 플래쉬 가진 조건을 추출하여 방사선을 이용한 점용접의 검사와 비교하여 연구를 진행할 경우 산업 현장에 바로 적용이 가능한 기술이 되리라 판단된다.

## 후 기

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No.20121620100020).

## 참고문헌

- [1] J. M. Milne and W. N. Reynolds, "The non-destructive evaluation of composites and other materials by thermal pulse video thermography," *Proceedings of Thermosense VII, SPIE*, pp. 119-122 (1984)
- [2] B. Brown and E. Bangs, "The measurement and monitoring of resistance spot welds using infrared thermography," *Proc. SPIE, Vol. 0581, Thermosense VIII: Thermal Infrared Sensing for Diagnostics and Control*, pp. 57-69 (1986)
- [3] V. Vavilov, "Nondestructive Testing Handbook," Vol. 5, Book 1: Thermal/Infrared Testing, Moscow-Specktr Publishing House (2009)
- [4] W. T. Kim, "Remarks on of Optimizations of Time-Resolved Pulse Thermography for Nondestructive Testing Evaluations," *Journal of Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 33, No. 2, pp. 226-231 (2013)
- [5] G. Busse, D. Wu and W. Karpen, "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography," *J Appl. Phys.*, Vol. 71, No. 8, pp. 3962-3965 (1992)