

## 가변초음파 적외선열화상을 이용한 이종접합용접부의 미세균열 검출 연구

### The Study of Micro Crack Detection in Dissimilar Metal Weld Using a Variable Ultrasound Infrared Thermography

박정학\*, 박희상\*\*†, 최만용\*, 권구안\*

Jeong-Hak Park\*, Hee-Sang Park\*\*†, Man-Yong Choi\* and Koo-Ahn Kwon\*

**초 록** 최근 널리 사용되는 모든 비파괴검사 기술 중 적외선열화상 카메라는 점차 적용 범위를 확대하고 있다. 초음파적외선 열화상은 절대온도 0 K 이상의 모든 물체가 방출하는 적외선 에너지를 검출하여 검사자가 볼 수 있는 화상으로 이미지를 만들어 검사하는 기술에 초음파를 접목하여 결함 부위만을 검출하는 방법으로 비접촉으로 넓은 범위를 빠른 시간에 검사할 수 있는 장점이 있는 기술이다. 본 연구에서는 고유주파수를 변화할 수 있는 터페놀-D 소재의 가변초음파 가진검사 방법을 이용하여 결함 검출의 적용가능성을 연구하였다.

**주요용어:** 적외선열화상, 절대온도, 가변초음파, 자왜소재, 터페놀-D

**Abstract** As a nondestructive inspection technology currently in use, infrared thermography has gradually expanded its application range to industry. The method detects only defect areas by grafting ultrasound on a technique of detecting infrared energy emitted from all objects with absolute temperature of 0 K and converting this energy into thermography for inspection. Ultrasound infrared thermography has merits including the ability to inspect a wide area in a short time without contacting the target object. This study investigated the applicability of the technique for defect detection using variable ultrasound excitation inspection methods on samples of Terfenol-D, a magnetostrictive material with a tunable natural resonant frequency.

**Keywords:** Infrared Thermography, Absolute Temperature, Variable Ultrasound, Magnetostrictive Material, Terfenol-D

#### 1. 서 론

적외선은 전자기적 파장 중 가시광선보다 긴 파장을 갖는다. 이러한 적외선은 절대온도값 0도 이상의 온도를 갖는 모든 물체가 방출하는 전자기파이기도 하다. 최근 적외선열화상 기술은 비파괴검사 분야에 새로운 방법으로 사용되는 추세이다. 크게 넓은 범위를 측정하고 가시영상으로 볼 수 있다는 장점이 다양한 검사 방법으로 기술을 발전시키고 있다. 전통적 적외선열화상 기술 분류로는 수동적 방법과 능동적 방법이 있

다. 수동적 방법은 대상체가 방사하는 에너지를 측정하여 검사하는 방법이며, 능동적 방법은 대상체에 에너지를 부가한 후 방사하는 에너지를 측정하여 검사하는 방법이다[1]. 특히 능동적 적외선열화상검사 방법은 다시 기계적 방법과 광학적 방법으로 구분되며 기계적 방법으로는 초음파와 와전류 방법이 대표적인 방법이다. 이와 같은 방법 중 초음파 적외선열화상검사는 대상체에 초음파 대역의 에너지를 가진하여 결함부에서 발생하는 발열을 검출하는 기술이다. 지금까지는 단일 주파수를 갖는 피에조 압전소재 형태의 고정

[Received: June 2, 2015, Revised: June 22, 2015, Accepted: June 22, 2015] \*한국표준과학연구원 안전측정센터, \*\*한국스마트구조시스템연구원, †Corresponding Author: Department of Research & Development, Korea Research Institute of Smart Material and Structures System Association, Daejeon 302-852, Korea (E-mail: m55nring@naver.com)  
© 2015, Korean Society for Nondestructive Testing

가진 방법을 사용하여 왔으나, 재질의 형상, 재질의 음향임피던스, 재질의 고정 방법, 결함의 형상 및 위치 등 다양한 변수를 충족시키기에는 어려움이 따랐다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 고유주파수를 변화할 수 있는 터페놀-D 소재의 가변 초음파 가진 검사 방법을 이용하여 결함 검출의 적용 가능성을 연구하였다..

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 이종용접시험편 제작

본 연구에서는 최소 사이즈 폭을 10 μm이하 결함을 갖는 시험편을 제작하기 위하여 다양한 방법을 제안하였으나 기존의 EDM 노치의 경우 10 μm의 결함폭을 제작하기 불가능하였고 실제 결함과 같이 한쪽이 서서히 좁아지며 단해지는 결함을 구현하기 힘든 문제가 존재하였다. 또 다른 방법으로 피로크랙을 만드는 방법을 강구하였으나 시험편의 용도가 피로시험을 위한 시험편을 기본으로 제작하였으므로 소성변형 상태의 결함으로 실제 용접시험편이 변형되지 않고 제작하기에는 어려운 문제가 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 용접을 진행할 때 뒷면 비드 쪽으로 발생하는 침투깊이를 조절하여 온전한 비드를 억제하여 시험편의 상부에서는 용접이 제대로 이뤄지고, 하부에서는 10 μm 이하의 폭으로 맞대어진 상태의 균열과 같은 형태의 결함시험편을 Fig. 1과 같이 제작하였다. 용접시험편의 경우 GMAW (gas metal arc welding)인 CO<sub>2</sub> MIG 용접을 자동으로 수행하여 시험편을 제작하였으며, 용가재의 경우 탄소강이 포함된 용접의 경우 ML-309를 사용하였다. Table 1은 시험편의 용접 조건을 나타내고 있다.

실험에 사용한 시험편 제작의 기본이 되는 규격은 Fig. 1과 같은 방법으로 용접 후 KS B ISO 12106:2004(금속재료의 피로시험-축방향 변형제어 방법)을 기본으로 half size로 제작하였다. 이종용접을 진행한 후 용접부에 미세한 결함을 갖게 된 시험편으로 크게 깊은 결함시험편과 얇은 결함시험편으로 제작하였다. 시험편의 재질은 Table. 2와 같은 SA106 Gr.b 재질의 평판을 절취하여 평판으로 제작 후 STS304 평판을 용접하여 이종용접 결함시험편을 제작하였다.

Table 1 Welding condition of DMW specimen

Material A	Material B	Speed (mm/s)	Current (A)	Voltage (V)
SA106	STS 304	5	24.72	275

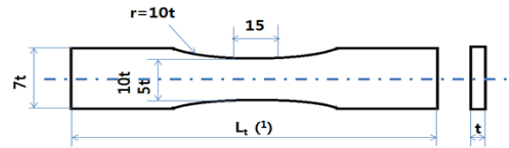
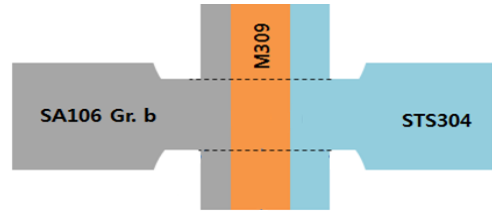


Fig. 1 A method for manufacturing a dissimilar welding specimen



Fig. 2 The specimen of micro crack

Table 2 The basic descriptions of DMW specimen

Materials	S	Si	Mn	C	Ni	Cr	P	Cu	Fe
STS304	0.02	0.90	1.80	0.08	8.00	18.00	0.04	-	Balance
SA106 Gr. b	<0.06	>0.10	0.29-1.06	<0.30	<0.40	<0.40	<0.04	<0.40	Balance

2.2. 실험 방법

본 연구에 사용된 방법은 능동적 방법 중 위상 잠금 (Phase lock-in) 방법으로 특정 자극원을 조화함수로 하여 대상체에 전달하여 대상체의 응답 신호를 처리하여 결함의 크기를 산출하는 방법이다. 본 연구에서는 결함을 효과적으로 검출하기 위해 초음파가진 주기와 동기화된 신호를 사용하여 위상 잠금 기술을 적용하여 실험하였다[2-4].

적외선 열화상검사 장치는 가변초음파 가진장치와 적외선열화상 카메라로 구성되며, 시험 중 시험편과 외부 열원과의 열 교환을 최소화하기 위해 Fig. 3과 같이 단열챔버 내부에 실험장치를 구성하였다.

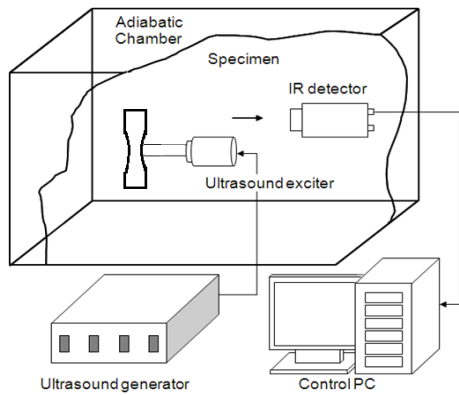


Fig. 3 Configurations of ultrasound excited thermography system

초음파 가진장치는 1~20 kHz의 터페놀-D 소재의 [5] 가진기를 사용하였으며, 적외선 카메라는 프랑스 Cedip의 Silver 480 m 모델을 사용하였다. 적외선열화상의 검출 감도를 위하여 시험편 표면은 흑체와 흡사한 조건을 만족시키기 위하여 검정색 무광 페인트로 도포하여 방사율을 0.95 이상으로 조절하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1. 결함시험편의 침투탐상

Fig. 4는 깊은 깊이 결함시험편의 액체침투탐상을 통해서 결함을 검출한 시험편으로 시험편의 두께는 2.90 mm이고, 결함부 반대편인 (a)는 건전부이며, 결함 깊이는 시험편의 바닥면을 기준으로 시험편의 양쪽의 결함 깊이가 (b) 1.85 mm와 (c) 1.24 mm로 다르며, (d)를 통하여 결함부를 확인할 수 있다. Fig. 5의 얇은 깊이 결함시험편 또한 재료와 용접법은 동일하며 대신 결함의 깊이가 다른 시험편이다. 얇은 깊이 결함시험편은 (d)의 바닥면으로부터 (b) 0.38 mm와 (c) 1.80 mm로 다르며 결함부의 반대편인 (a)는 결함이 없음을 확인하였다. 앞선 결함시험편보다 결함 깊이가 전체적으로 얇게 제작되었으며 이를 확인할 수 있었다.

결함폭은 0.0043 mm로 10 μm 이하 기준에 적합한 결함시험편임을 x500배율 현미경을 이용하여 0.0044 mm임을 Fig. 6을 통하여 검증하였다.

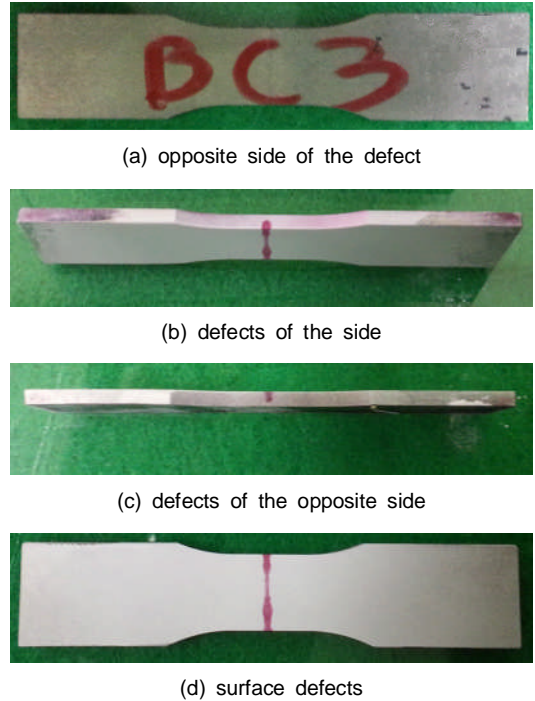


Fig. 4 The defect detection of deep depth micro defect specimen by the liquid penetrant

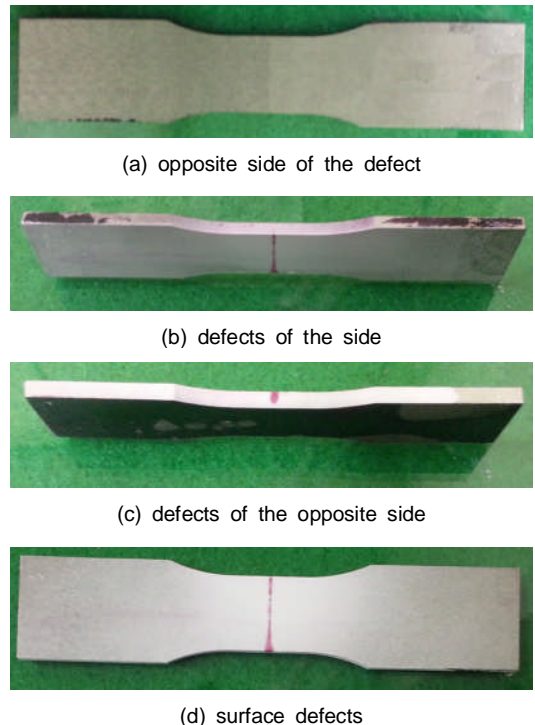


Fig. 5 The defect detection of shallow depth micro defect specimen by the liquid penetrant

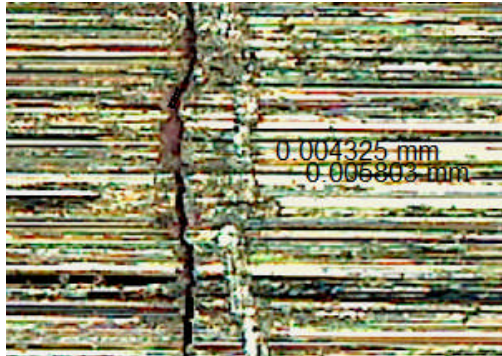


Fig. 6 The defect width measurement

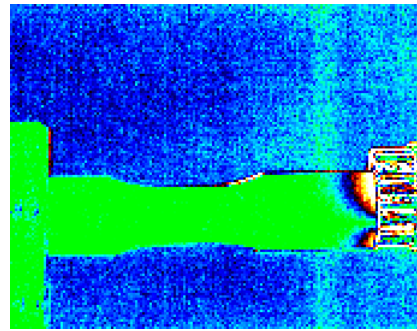
### 3.2 가변초음파를 이용한 결함 검출

#### 3.2.1. 깊은 깊이 결함시험편

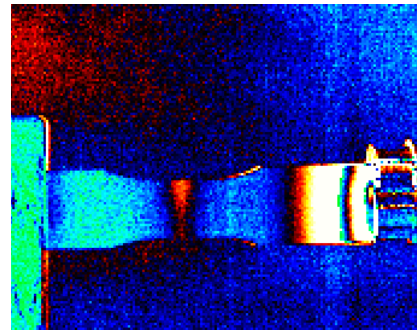
Fig. 7은 깊은 깊이 결함시험편에 초음파가진 을 가하였을 때 나타는 위상잠금 열화상을 보여 주고 있다. 시험편의 다른 조건은 동일하게 진행 하였으며 가진시간은 25초를 3주기로 구형파를 이용하여 가진하였다.

실제 적외선열화상을 이용한 위상 잠금 기술의 [6] 경우 구형파보다는 정현파로 진행되는 경우가 대부분이나 초음파적외선의 경우 정현파보다 구형파를 이용하여 모든 출력이 100% on, off 되는 형태로 진행되는 경우 결과 값이 양호하게 나타는 경우가 많으며, 본 연구에서는 이와 같은 구형파를 이용하여 결함을 검출 하였다. 가진주파수의 선정은 가장 많이 사용하는 20 kHz 이하의 주파수에서 1 kHz의 범위로 실험을 한 후 미세주파수 조절을 통하여 최적 주파수를 선정하였다. Fig. 7을 통하여 실제 결함의 존재 유무를 확인할 수 있었다. Fig.7(a)는 17.00 kHz로 가진하였을 때, (b)는 18.23 kHz로 가진 하였을 때 (c)는 19.00 kHz로 가진 하였을 때 각각의 결과를 나타내고 있다. 실제 동일한 시험편에서 진행하였을 때 각각 다른 결과를 얻을 수 있었다.

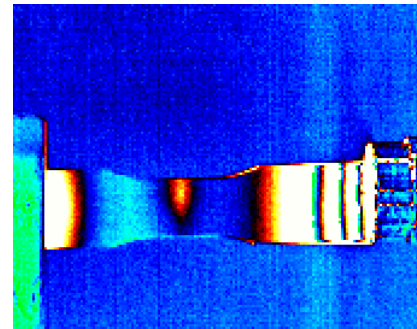
통상 가진 주파수의 수가 높을수록 결함 검출이 용이한 것으로 알려져 있으나 이는 가진 주파수가 높을 때 실제 대상체가 동일하게 가진이 일어날 때 가능한 이야기로 가진 주파수와 달리 대상체의 고유주파수를 고려할 경우 Fig. 7과 같이 (b)의 결과물이 (c)의 결과물에 비하여 전체 결함



(a) 17.00 kHz



(b) 18.23 kHz



(c) 19.00 kHz

Fig. 7 Infrared thermography deep depth defect detection in accordance with a variable frequency

을 나타내는데 용이함을 보여주고 있다.

이는 (c) 결함의 경우 위쪽에 발생한 크랙 (거저부 기준 깊이 1.85 mm)의 결함폭이 (c)의 19.00 kHz일 때 가장 최적 결함 검출이 가능한 반면 아래쪽 (깊이 1.24 mm) 결함에는 적합하지 않은 결과로 사료 되며, (b)의 18.23 kHz의 경우는 위, 아래 결함 모두에 적합한 가진 주파수임을 확인할 수 있었다.

### 3.2.2. 얇은 깊이 결함시험편

앞선 결함시험편에서와 같이 결함의 깊이와 특성에 따라 가장 최적의 결함이 검출되는 주파수를 이용하여 결함 검출을 진행하였다.

Fig. 8 (c)의 19.88 kHz의 주파수에서 가장 최적의 결함 열화상 위상이미지가 검출되었으며, 실제 Fig. 9의 (a) 8.63 kHz의 주파수로 가진하였을 때 Fig. 8 (a) 18.00 kHz에서보다 검출이 용이함을 나타냈다.

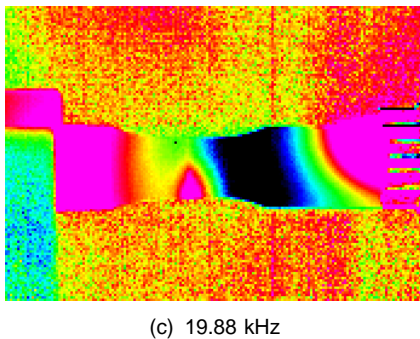
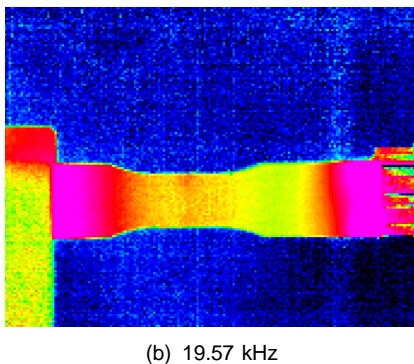
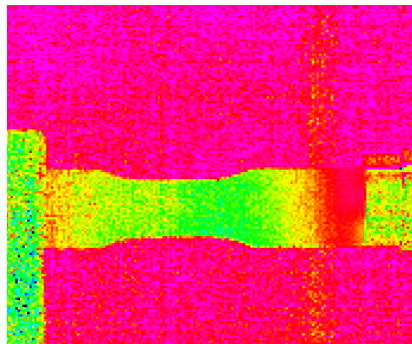


Fig. 8 Infrared thermography shallow depth defect detection in accordance with a variable frequency

즉, 주파수가 높을수록 결함이 잘 검출되는 것이 아닌 최적의 가진 조건에서 결함이 검출됨을 확인할 수 있다. 피에조 압전소재의 경우 고정 가진 주파수를 이용하여 가진하게 되며 주파수 특성의 선정은 변위값을 기준으로 선정하여 활용하게 된다. 그러나 변위의 측정은 초음파 압전소재와 대상체와 접촉하는 공구흔의 변위 측정에 기준을 두게 된다. 그러나 공구흔이 접촉하게 되는 대상체의 조건에 따라 결함부의 발열 조건은 비선형적으로 달라진다. 그러므로 대상체의 발열 최적조건을 위해서 고정 가진 주파수가 아닌 가변 진동주파수의 선정을 통한 가진이 더 효율적인 것으로 사료된다.

Fig. 9의 (a), (b)는 기존에 수행하는 가진 시간 주파수(가진시간)의 변화를 이용하여 결함을 검출을 수행하는 방법으로 동일한 시험편에 가진 시간 주파수(시간)만을 달리하여 검사한 결과를 나타냈다. 가진 시간 주파수만을 달리했을 때 시간이 길어짐에 따라 발열에 의한 결함폭이 일정한 정도 늘어나지만 노이즈도 같이 늘어남을 확인하였다.

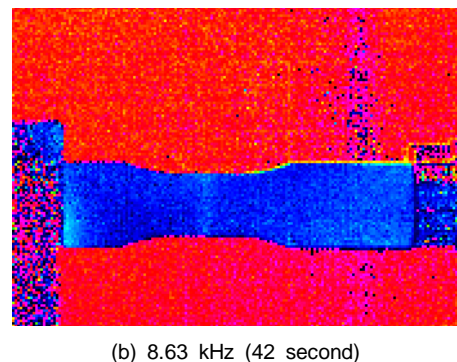
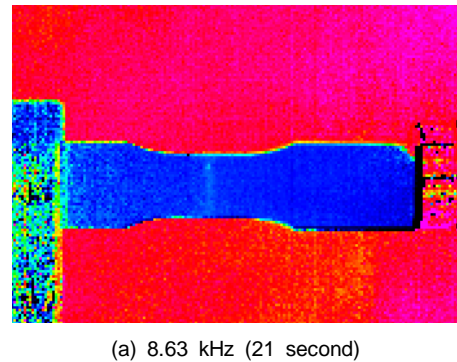


Fig. 9 The results of the different in the thermography of excitation time

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기존에 초음파가진을 발생시키는 피에조 소재의 진동이 아닌 터패놀-D 자왜 소재를 이용하여 가변가진을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 자왜소재인 터패놀-D를 이용하여 가변하여 가진하였을 때 미세결함의 검출이 가능함을 확인할 수 있었다.
- 2) 동일한 형상의 시험편에 존재하는 결함폭이 다를 경우 동일한 가진주파수를 가하였을 때에도 결함의 검출유무가 달라짐을 확인하였다.
- 3) 실제 8.63 kHz의 주파수로 가진하였을 때 18.00 kHz에서보다 검출이 용이함을 나타냈으며 즉 주파수가 높을수록 결함이 잘 검출되는 것이 아닌 최적의 가진조건에서 결함이 검출됨을 확인하였다.

향후 가변초음파의 가진시 대상체와 가진주파수와의 상관관계에 관한 실험을 통하여 최적의 실험 조건을 찾는 연구가 수행되어야 하리라 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 미래창조과학부와 한국연구재단의 방사선기술개발사업으로 연구 지원한 (2013M2A2A9043706) 및 (2015R1A2A2A01005426)의 결과물과 2012년도 지식경제부의 재원과 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No.20121620100020)입니다.

#### 참고문헌

- [1] V. Vavilov, "Nondestructive Testing Handbook," Vol. 5, Book 1: Thermal/Infrared Testing, Moscow-Spektr Publishing House, (2009)
- [2] A. Dillenz, A. Salerno, D. Wu, J. Rantala and G. Busse, "Progress in ultrasonic lockin thermography," *QIRT* 98, pp. 154-160 (1988)
- [3] H. S. Park, M. Y. Choi, J. H. Park and W. T. Kim, "Study on the micro crack detection in joints by using ultrasound infrared thermography," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 32, No. 2, pp. 162-169 (2012)
- [4] 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)
- [5] J. Zhai, J. Li, D. D. Viehland and M. I. Bichurin, "Large Magnetolectric Susceptibility: The Fundamental Property of Piezoelectric and Magnetostrictive Laminated Composites" VirginiaTech College of Engineering (2007)
- [6] P. K. Kuo, Z. J. Feng, T. Ahmed, L. D. Favro, R. L. Thomas and J. Hartikainen, "Parallel Thermal Wave Imaging Using a Vector Lock-in Video Technique in Photoacoustic and Photothermal Phenomena," Springer Berlin Heidelberg. pp. 415-418 (1988)