

Non-destructive Evaluation of Defects of Glass fiber Composites using Imaging System based on Photo-mixer Terahertz Technique

오경환*, 김덕중*, 박동운*, 지영빈**, 오승재***, 김학성*****†

Gyung-Hwan Oh*, Dug-Joong Kim*, Dong-Woon Park*, Young-Bin Ji**,
Seung-Jae Oh*** and Hak-Sung Kim*****†

초 록 본 논문에서는 포토믹서 테라헤르츠 기술 기반의 영상화 시스템을 이용하여 유리섬유 복합재료의 결함을 영상화하기 위한 비파괴검사 기술에 대한 연구를 진행하였다. 유리섬유 복합재료 구조물의 내부 결함을 검사하기 위해 photomixer 기반의 테라헤르츠 발생 시스템을 이용하였고, 복합재 제작 공정 중에 시편 내부로 들어갈 수 있는 이물질을 모사하기 위해 유리섬유복합재료(GFRP) 시편 내부에 은 나노와이어가 입혀진 PET 필름을 사용하여 모사하였다. 내부 결함의 영상화를 위해 테라헤르츠 신호의 처리와 stage 제어를 위한 영상화 알고리즘을 Labview 기반의 GUI를 통해 개발하였다. 제작된 포토믹서 테라헤르츠 검사 시스템을 사용하여 결함 검사를 수행하였고, 단일 주파수를 이용해 취득한 테라헤르츠 파형을 영상화 하였다.

주요용어: 포토믹서, 테라헤르츠 파, 유리 섬유 복합재료, 비파괴검사

Abstract In this study, non-destructive evaluation using photo-mixer terahertz technique was studied to visualize the hidden damage in composite structures. A terahertz wave system was developed based on photo-mixer to detect the internal defects of the composite structure, and foreign material was simulated in a glass fiber-reinforced plastic (GFRP) specimen using PET film coated with silver nano-wire. For the visualization, an imaging algorithm for terahertz signal processing and stage control was developed using a GUI based on LABVIEW. The inspection was performed using the developed continuous terahertz inspection system and the terahertz waveform acquired in the single frequency was used to visualize defects.

Keywords: Photo-Mixer, Terahertz Wave, Glass Fiber Composite, Non-Destructive Evaluation

1.

최근 세계 주요 국가들의 환경 규제 및 연비 규제가 강화됨에 따라 기존의 금속 재질로 이루어진 자동차 부품을 경량화하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 이에 따라 강철이나 알루미늄 같은 고하중 부품을 섬유 보강재(fiber reinforced)와 저밀도 플라스틱 기지재(matrix)로 이루어진 섬유 강화 복합재(fiber reinforced composite)로 대체

하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 복합재 구조는 뛰어난 비강도(specific strength), 비강성(specific stiffness), 우수한 내부식성 등 많은 장점을 가지고 있다. 이러한 장점으로 인해 앞서 언급한 자동차 부품뿐만 아니라 항공우주, 풍력, 선박 등 다양한 분야에서 널리 적용되고 있으며, 복합재 사용의 증대로 인해 구조용 복합재료의 품질을 보장하기 위한 검사 시스템에 관한 관심이 증가하고 있다.

[Received: September 25, 2017, Revised: November 15, 2017 / January 3, 2018, Accepted: January 12, 2018] *한양대학교 기계공학과, **김해산업진흥의생명융합재단 김해의생명센터, ***연세대학교 의과대학 연의생공연메디컬융합연구소, ****한양대학교 나노과학기술연구소, †Corresponding Author: Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 64763, Korea (Email: kima@hanyang.ac.kr)

구조용 복합재료 잠닉손상의 종류로는 층간박리, 공공, 균열 등 다양한 종류가 있으며, 이러한 결함은 제작 공정이나 사용 중에 내부에 발생할 가능성이 있어 특별한 검사 과정을 필요로 한다. 이와 같은 잠닉손상 검출에 관한 중요성이 부각되고 있어 다양한 비파괴검사 기법이 개발되고 있는 실정이다. 보편적으로 비파괴검사 기법으로 사용되는 기술로는 초음파, X-선 검사법이 있다 [1,2]. 하지만 초음파검사법의 경우에 물과 같은 매개체를 필요로 하는 단점이 존재하며, X-선 검사법의 경우에는 높은 방사 에너지로 인해 안전 문제가 있다는 단점이 있다[3,4]. 따라서 기존의 비파괴 검사 방법은 복합재료 제작 공정상에 적용하기에는 한계가 있다.

이러한 단점들을 극복하기 위한 비파괴검사 기술로써 최근에 펄스 에코 초음파(pulse-echo ultrasonic wave) 및 테라헤르츠파(THz, terahertz)를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다[5-8]. 그중, 테라헤르츠파는 전자기 스펙트럼에서 마이크로파와 적외선의 중간에 위치하고 있는 100 GHz에서 10 THz 사이를 의미하며, 마이크로파의 장점인 우수한 투과성과 적외선이나 가시광선 등의 직진성을 모두 가지고 있다. 또한, X-선과 달리 상대적으로 에너지가 낮아 인체에 무해하고 물과 같은 매개체를 필요로 하지 않는다는 장점이 있다.

기존의 테라헤르츠 기술을 이용한 비파괴검사 연구에서는 펄스형 테라헤르츠 기술을 이용하여 복합재료 및 반도체 패키지 내부의 결함 검출에 대한 연구가 주를 이루었다. 반면에 연속형 테라헤르츠 기술은 다양한 분야에서 비파괴 검사로서 적용되었으나[7,8], 복합재료나 반도체 패키지 결함 검출에 관한 연구는 많이 수행되지 않았다. 또한, 장비의 소형화 및 가격 경쟁력에 있어서 포토믹서 테라헤르츠 기술이 장점을 가지고 있기 때문에 비파괴검사법의 상용화에 있어서 장점을 가지고 있다[9].

따라서 본 연구에서는 포토믹서 기반의 연속형 테라헤르츠 발생 시스템 및 Labview 기반의 영상화 알고리즘을 통하여 유리섬유 복합재료(GFRP) 내부의 이물질을 검출하였다. 내부 이물질을 모사하기 위하여 은 나노와이어를 입힌 PET 기판을 복합재 중간에 삽입하였고, 단일 주파수를 이용하여 결함을 영상화 하였다. 포토믹서 기반의 연속형 테라헤르츠 영상화 시스템의 비파괴검사 시스

템으로서 발전 가능성을 확인할 수 있었다.

2. 연속형 테라헤르츠 비파괴검사

2.1. 연속형 테라헤르츠 발생

연속형(CW, continuous wave) THz파는 일반적으로 단일 주파수를 중심으로 한 협대역 스펙트럼을 가진다. 연속형 테라헤르츠파를 발생하기 위한 대표적인 기술로는 solid state 소자 기반의 반도체 다이오드를 이용하는 방법이나 진공 내 전자소자 기반 기술 등이 있고, 광전도 안테나 기술 및 비선형 물질을 이용한 차주파수 발생법이 있다. 이 외에도 양자 폭포 레이저 기술이나 CO₂ 레이저를 이용한 기술들이 있다. 본 연구에서는 연속형 THz파의 다양한 발생 방법 중 포토믹서(photomixer) 방식을 사용하였다. 포토믹서 방식이란, 테라헤르츠 펄스 기술과 유사하게 레이저를 이용하는 방법으로 동일한 편광을 가지고 주파수가 각각 w_1 , w_2 인 두 개의 continuous wave 레이저를 공간상에 겹쳐지게 한 후 발생하는 비팅(beatting) 광원을 광전도안테나에 조사하여 두 주파수의 차주파 $w_{THz}(=w_1-w_2)$ 로 THz파를 발생시키는 방식이다[9-11]. 이 때 사용되는 레이저들은 근 적외선 영역의 레이저로서, GaAs와 같은 고속의 반도체 재료를 사용하고 있으며 본 연구에서는 InGaAs 기반 광원을 사용하였다. 이 방법은 주파수 가변성(0.3~3 THz)과 효율이 좋고 반도체 칩 크기로 제작이 가능하여 소형화가 가능하다는 장점을 가지고 있다.

연속형 테라헤르츠파의 측정 시 보편적으로 사용되는 방식으로는 쇼트키 장벽 다이오드(Schottky barrier photodiode)가 있는데, 이 방식은 THz파가 조사되면 p-n junction으로부터 발생하는 전류를 감지하여 THz를 검출하는 원리로서 제작이 간편하고 소형화가 가능하다는 장점이 있다[12].

2.2. 연속형 테라헤르츠 영상화 시스템

Fig. 1에 나와 있는 CW THz 영상화 시스템은 미국의 Topptica 사의 0.05–1.2 THz 주파수 대역을 갖는 포토믹서 CW THz파 발생/검출 소자(Terascan 1550)를 기반으로 제작한 것이다. CW THz파 발생을 위한 장치는 DFB laser diodes, lock-in and

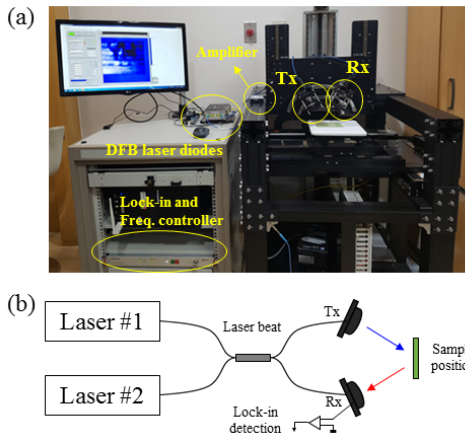


Fig. 1 Developed CW Terahertz imaging system for non-destructive evaluation (NDE); (a) photograph and (b) schematic

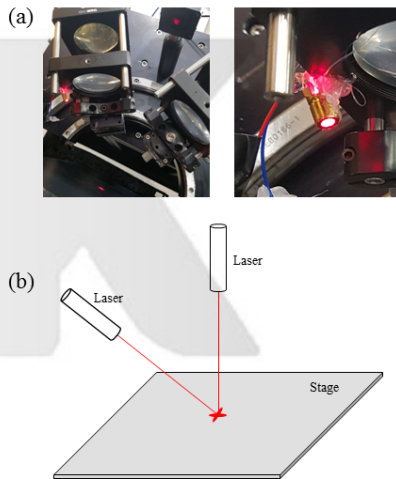


Fig. 2 Designed CW Terahertz modules combined with multiple laser guiding; (a) photographs and (b) schematic

frequency controller, low-noise transimpedance amplifier 등으로 구성되어 있다. 발생기와 수신기는 DFB laser diodes와 광섬유 케이블을 이용하여 연결되어 있어 시스템을 구성하기에 용이하다는 장점을 가지고 있다.

이러한 CW THz파 발생 장치를 이용하여 영상화 시스템을 제작하기 위해 먼저 각각 두 개의 TPX 렌즈를 이용하여 발생기와 수신기 모듈을 제작하였다. 렌즈의 직경은 2 인치로 동일하며, 초점거리는 5 cm 와 7 cm를 각각 하나씩 사용하였다. 또한, THz 초점의 위치의 가시적으로 확인 및 z축 초점을 맞추기 위해서 다중 레이저 광선

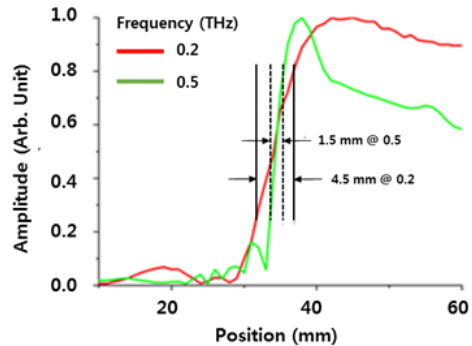


Fig. 3 Diameter of THz focus measured by knife edge method

을 THz 모듈에 집적하여 십자형 레이저 가이드 모듈을 제작하였다(Fig. 2). 그리고 제작된 THz 발생기와 수신기 모듈을 장착하기 위한 테스트 베드를 제작하였다(Fig. 1). 테스트 베드는 반사모드와 투과모드 적용이 모두 가능하도록 하였으며 THz 파의 중심을 맞추기 위해 상하조작 및 회전이 가능하도록 모듈 고정부를 설계하였다. 모듈을 테스트 베드에 집적 후 나이프 에지 방법을 이용하여 THz파의 초점 직경을 측정하였다[13]. Fig. 3에 보이듯이 측정된 결과 200 GHz에서 4.5 mm, 500 GHz에서 1.5 mm의 초점 직경을 갖는 것을 확인하였다. 이론적으로 검증하기 위해서 Rayleigh's criterion을 고려한 빔의 직경 계산 수식을 이용하여 계산해 보았을 때, 200 GHz에서 3.4 mm, 500 GHz에서 1.37 mm의 직경과 유사함을 확인하였다[14]. 이론적 계산값과 실험값의 비교를 통해 실험을 통해 얻은 THz 모듈의 광 정렬 상태를 검증할 수 있었다.

2.3. 영상화 알고리즘

테라헤르츠파를 이용한 영상화는 크게 amplitude 또는 phase 차이를 이용한 두 가지 방법으로 이루어진다. 그러나 연속형 테라헤르츠파의 경우, 단일 주파수가 발생되기 때문에 단일 주파수에 대한 amplitude의 차이를 이용하여 영상화 알고리즘을 구성하였다. 이러한 차이는 테라헤르츠파가 검사 대상을 투과하거나 반사되면서 시편의 두께나 재질에 따라 발생하게 된다. 따라서 수신된 테라헤르츠 신호를 LabVIEW에서 amplitude 차이에 따른 결함 영상화를 위한 알고리즘을 구성하였다.

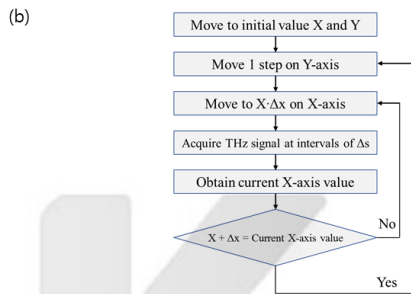
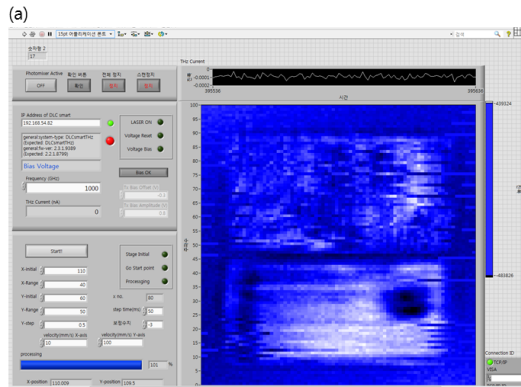


Fig. 4 Line scan type THz imaging program; (a) LabVIEW program window and (b) imaging flowchart

Table 1 Specification of developed continuous THz wave imaging system

Item	Value
Type of THz generation	photomixer
Frequency (THz)	0.05 - 1.2
Max. Image area (mm ²)	200 × 200
Image pixel size (mm)	≥0.1
Data signal rate (ms/point)	50
Imaging speed (min) @ (10 × 10 cm ² @0.5mm)	30

라인 스캔형 THz 영상화 프로그램 개발을 위해 LabVIEW 기반으로 포토믹서 THz 시스템과 라인스캔 시스템 동기화 프로그램을 개발하였다. Fig. 4(a)에서 보이듯이 위 개발된 프로그램을 토대로 라인 스캔형 THz 영상화 프로그램을 구성하였다. 영상 시 필요로 되는 변수로 스캔 영역 (최대: 200 mm × 200 mm), 스캔 간격 (영상 pixel 크기), 신호 취득 속도 (최대: 50 ms/point) 등의 설정이 가능하도록 하였고, 영상화 flowchart는

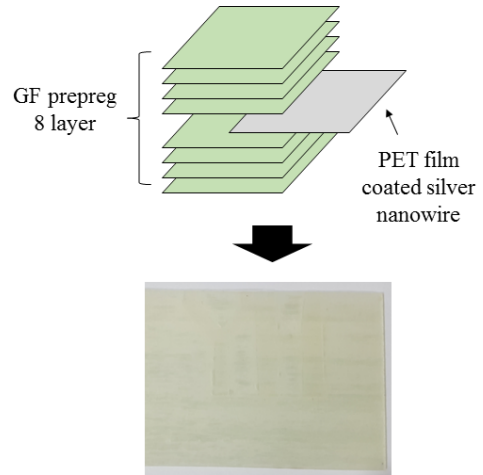


Fig. 5 GFRP specimen with artificial delamination using PET film coated silver nanowire

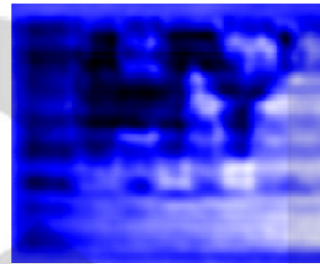


Fig. 6 THz imaging result of GFRP specimen

Fig. 4(b)에 나타냈다. 영상화 과정 중 THz 신호의 크기를 확인할 수 있도록 하였으며, 시편의 위치를 조정할 수 있도록, 테스트 베드 제어가 가능하도록 하였다. 개발된 영상화 알고리즘 및 시스템의 사양은 Table 1에 나타내었다.

2.4. 복합재료 제작 및 테스트 결과

유리섬유 복합재료 제작 공정 중 내부의 이물질이 들어가 결함이 형성되는 경우가 종종 일어난다. 이러한 결함을 모사하는데 있어서, 확연한 차이를 보기 위해서 금속 코팅된 시편을 삽입하였다. 두께 0.125 mm를 갖는 유리 섬유 복합재 prepreg를 8장을 단일 방향으로 쌓아 1 mm의 두께를 갖는 유리섬유 복합재료를 제작하였다. 이때, 은 나노와이어가 입혀진 3 cm × 2 cm의 크기를 갖는 HY 형태의 PET 필름을 4,5번째 prepreg 중간에 삽입하였다(Fig. 5).

개발된 THz 영상화 시스템을 이용하여 Fig. 1과 같이 35도의 각도를 갖는 반사모드로 제작된 GFRP 시편을 영상화하였다. 이 때, 스캔 간격(pixel 크기)은 0.1 mm, 단일 주파수 300 GHz, 신호 취득 속도 50 ms/point로 설정하여 영상화를 진행하였다. 그 결과로 Fig. 6에서 보이듯이 HY라는 글자를 확인할 수 있었다. 또한, 영상 필터를 이용하여 해상도를 개선한 이미지를 얻을 수 있었다. 이용하여 이는 테라헤르츠파의 amplitude의 차이가 발생하게 되면서 이와 같은 결과가 나타나게 된 것이다. 그 원인으로서는, 은 나노와이어가 코팅된 필름이 삽입된 영역에서는 금속에 대해 전반사가 일어나는 테라헤르츠파의 특성 때문에, 입사된 대부분의 테라헤르츠파가 반사되는 반면에, 필름이 삽입되지 않은 유리섬유 복합재료 영역에서는 입사된 테라헤르츠파가 일부는 투과하고 일부는 반사되기 때문이다. 이를 통해, 연속형 테라헤르츠파를 이용하여 단일 주파수의 amplitude를 이용한 영상화를 하였을 때, 복합재료 내부에 존재하는 결함(이물질)을 검출할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 영상에서 보이듯이 가로로 줄무늬 패턴이 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 유리 섬유 방향과 동일하였다. 이는 유리섬유와 테라헤르츠파 사이의 간섭현상(산란, 흡수)으로 인하여 amplitude 차가 발생되어 검출되는 것으로, 이를 통해 연속형 테라헤르츠파 시스템을 이용하여 유리 섬유의 방향을 검출할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

3. 결론

본 연구에서는 연속형 테라헤르츠파 발생 시스템을 이용하여 영상화 시스템을 제작하였고, 유리섬유 복합재료의 결함을 영상화하기 위한 알고리즘 개발을 수행하였다. Labview 기반의 알고리즘 구축을 통해서 포토믹서 테라헤르츠파 신호처리와 영상화를 하나의 프로그램으로 운용 가능하도록 하였다. 단일 주파수에 대한 amplitude 분석을 통해 유리섬유 복합재료 내 silver wire가 코팅된 film을 통해 모사된 내부 이물질에 대한 결함 영상을 얻었다. 따라서 본 연구를 통해서 포토믹서 기반의 연속형 테라헤르츠 영상화 시스템의 비파괴검사 시스템으로서 발전 가능성을 확인할 수 있었다.

후 기

This research was also supported by a National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean Government (MEST) (2013M2A2A9043280) and This work was supported by the Industrial Strategic Technology Development Program(10052674, In-line Semiconductor Chip/Package Inspection system with THz imaging) funded by the Ministry of Trade, Industry&Energy(MOTIE, Korea). This work was supported by a National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Education (2015R1D1A1A09058418 and 2015R1A5A1037668).

Reference

- [1] R. S. H. Yang, D. R. Braden, G.-M. Zhang and D. M. Harvery, "An automated ultrasonic inspection approach for flip chip solder joint assessment," *Microelectronics Reliability*, Vol. 52, No. 12, pp. 2995-3001 (2012)
- [2] F. Wang and F. Wang, "Void detection in TSVs with X-ray image multithreshold segmentation and artificial neural networks," *IEEE Trans. Compon. Packag. A*, Vol. 4, No. 7, pp. 1245-1250 (2014)
- [3] Z. Xu, T. Shi, X. Lu and G. Liao, "Using active thermography for defects inspection of flip chip," *Microelectronics Reliability*, Vol. 54, No. 4, pp. 808-815 (2014)
- [4] A. Ditali, M. Ma and M. Joluston, "X-Ray inspection-induced latent damage in DRAM," *Proceedings of 44th IEEE International Reliability Physics Symposium*, pp. 266-269 (2006)
- [5] S. C. Hong, A. D. Abetew, J. R. Lee and J. B. Ihn, "Three dimensional evaluation of aluminum plates with wall-thinning by full-field pulse-echo laser ultrasound," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 99, pp. 58-65 (2017)
- [6] H. J. Shin, J. Y. Park, S. C. Hong and J. R. Lee, "In situ non-destructive evaluation of an aircraft UHF antenna radome based on pulse-echo ultrasonic propagation imaging," *Composite*

- Structures*, Vol. 160, pp. 16-22 (2017)
- [7] S. J. Oh and Y. B. Ji, "Non-destructive Imaging Technique using terahertz wave," *J. Korean Soc. Nondestruct. Test.*, Vol. 37, No. 5, pp. 349-357 (2017)
- [8] K. H. Jin, Y. G. Kim, S. H. Cho, J. C. Ye, and D. S. Yee, "High-speed terahertz reflection three-dimensional imaging for nondestructive evaluation," *Optics Express*, Vol. 20, No. 23, pp. 25432-25440 (2012)
- [9] H. C. Ryu, N. Kim, S. P. Han, H. Ko, J. W. Park, K. Moon, and K. H. Park, "Simple and cost-effective thickness measurement terahertz system based on a compact 1.55 μm $\lambda/4$ phase-shifted dual-mode laser," *Optics Express*, Vol. 20, No. 23, pp. 25990-25999 (2012)
- [10] X.-C. Zhang and J. Xu, "Introduction to THz Wave Photonics," New York, Springer Science (2010)
- [11] N. Karpowicz, H. Zhong, J. Xu, K. I. Lin, J. S. Hwang and X. C. Zhang, "Comparison between pulsed terahertz time-domain imaging and continuous wave terahertz imaging," *Semiconductor Science and Technology*, Vol. 20, No. 7, S293 (2007)
- [12] H. S. Kim, "Introduction of non-destructive evaluation method using terahertz technique for detecting the internal defects," *Journal of the KSME*, Vol. 57, No. 5, pp. 32-37 (2017)
- [13] M. Gonzalez-Cardel, P. Arguijo and R. Diaz-Urbe, "Gaussian beam radius measurement with a knife-edge: a polynomial approximation to the inverse error function," *Applied Optics*, Vol. 52, No. 16, pp. 3849-3855 (2013)
- [14] K. Yamauchi, H. Mimura, T. Kimura, H. Yumoto, S. Handa, S. Matsuyama, K. Arima, Y. Sano, K. Yamamura, K. Inagaki, H. Nakamori, J. Kim, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi and T. Ishikawa, "Single-nanometer focusing of hard x-rays by Kirkpatrick-Baez mirrors," *J. Phys: Condens. Matter*, Vol. 23, pp. 394206-394214 (2011)