

### ◆ 특집 ◆ 신경모방 소자 및 감각 도우미 시스템

## 플렉서블 전자소재를 이용한 신경모방 인공피부

### Bio-mimic Electronic Artificial Skin based on Flexible Electronics

김민석<sup>1,✉</sup>, 김종호<sup>1</sup>, 송한욱<sup>1</sup>, 박연규<sup>1</sup>  
Min Seok Kim<sup>1,✉</sup>, Jong Ho Kim<sup>1</sup>, Han Wook Song<sup>1</sup> and Yon Kyu Park<sup>1</sup>

1 한국표준과학연구원 기반표준본부 질량힘센터 (Division of Physical Metrology, KRISS)  
✉ Corresponding author: minsok@kriiss.re.kr, Tel: 042-868-5242

Key Words: Artificial Skin (인공피부), Tactile Sensor (촉각센서), Flexible Electronics (유연한 전자소자), Robot (로봇)

#### 기호설명

$\alpha$  = directional orientation of the system  
h = strip thickness strip thickness strip thickness strip thickness strip thickness

#### 1. 서론

인간과 기계(여기서는 광범위한 뜻으로 사용되어 문명의 이기를 의미함)와의 상호 작용(인터페이스, interface)에 있어서 촉감에 의한 전달방법은 중요한 수단으로 자리매김하고 있다. 최근에 인기를 끌고 있는 휴대폰 중에 터치폰과 햅틱폰은 이러한 추세를 잘 반영하는 예로 들 수 있다. 최근 컴퓨터도 키보드와 마우스를 벗어나 촉각(터치)를 통한 입력방식을 채택하고 있다. 로봇의 경우도 마찬가지로 단순한 작업만을 반복하는 산업용 로봇이 아닌 감각과 지능을 가진 지능형 로봇이 출현할 것으로 기대되고 있는데 일본에서 출시한 애완견 로봇 아이보(AIBO)의 경우, 인간이 자신을 손으로 만지면 움직이고 반응하게 있고 학습기능이 있어 접촉방법에 따라 대응도 달라지게 되어있다. 이런 애완견 로봇은 동물을 이용한 인간의 마음치료(동물매개치료)에도 이용되고 있다. 여기서 로봇은 도구로서가 아니라 사람에게 대해 즐거움이나 편안함과 같은 정신적인 효과를 전해 주는 친구 같은 존

재이다. 이처럼 기계는 점점 인간의 감성과 지능을 모방하게 될 것이며 인간친화적인 모습으로 나타나기 위한 촉감의 중요성도 커지고 있다.

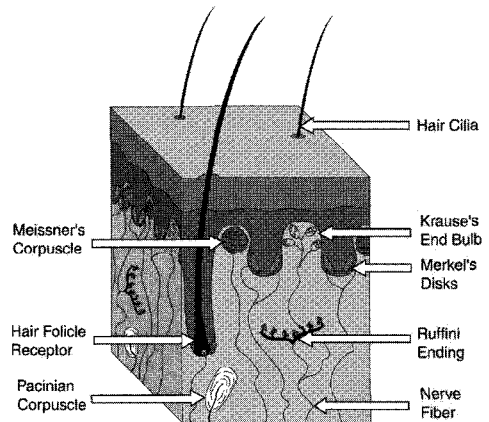


Fig. 1 Cross-sectional diagram of the human skin

기계에 촉감을 부여하기 위해서는 인간의 피부처럼 촉감을 감지할 수 있는 인공 전자 피부가 필요하다. Fig. 1 은 사람피부의 단면을 나타낸 것이다. 피부 표피 밑에는 각종 물리량을 감지할 수 있는 수용기들이 존재하는데 수용기 별로 잘 감지할 수 있는 감각들이 다르다. 대표적인 수용기 네 개를 예로 들면, 마이소너(Meissner) 소체는 피부 움직임을 가장 잘 감지하며 머켈(Merkel) 수용기는 피부

를 누르는 감각에 가장 잘 반응하고 진동에 대한 인식 기능을 일부 담당한다. 한편 파시닌(Pacinian) 소체는 피부의 가장 깊은 곳인 진피에 위치하고, 운동감과 미세한 접촉, 진동을 인식한다. 루피니(Ruffini) 소체는 방추형 구조로 압력과 온도변화를 감지한다.

그럼 인공 전자 피부가 갖추어야 할 요건은 무엇일까? 먼저 압력, 온도, 접촉부위의 물성(경도, 열전도도 등)을 측정할 수 있는 촉각센서가 일정한 간격으로 촘촘히 배열되어 있어야 한다. 사람의 신체부위 중 손가락 끝, 혀 등은 공간 분해능이 1~2mm 로 촉각센서의 공간 분해능도 이와 비슷해야 할 것이다. 또한 사람의 피부처럼 유연성을 가져야 한다. 사람의 손가락과 같이 3 차원 곡률을 가진 곳에 센서를 부착하려면 유연하지 않고는 불가능하기 때문이다. 마지막으로 갖추어야 할 것은 내구성이다. 사람의 피부는 부드럽지만 반복적인 접촉에도 손상되지 않고 제 기능을 수행한다. 이런 기본적인 조건 이외에도 실제로 로봇 등에서 널리 사용되기 위해선 저렴하게 생산할 수 있어야 한다는 것과 전력소모, 촉각정보처리 및 통신 문제들을 해결해야 한다. 앞서 언급한 조건들을 모두 만족시키는 인공전자피부의 개발이 궁극적인 목표가 될 것이다. 하지만 현재 개발된 인공 피부는 일부 조건만 만족시키고 있으며 궁극적인 인공 피부를 만들기 위해서는 아직 넘어야 할 산이 많다고 볼 수 있다.

촉각센서에 대한 기본적인 이해와 개발 동향은 이전 논문<sup>1</sup>에서 다루었고 국내에서도 유연한 촉각센서에 대한 연구가 진행되었다.<sup>2,3</sup> 본 논문에서는 유연성을 갖기 위해 최근에 부각되고 있는 플렉서블 전자소재에 기반한 인공 전자 피부 개발에 대한 최근 연구동향 소개하고 앞으로 나아갈 방향에 대해 논의하고자 한다.

## 2. 유연한 촉각 센서

### 2.1 폴리이미드(Polyimide) 기반 촉각 센서

유연성을 갖는 인공전자피부 개발에 관해 주목할 만한 두 가지 연구결과에 대해 소개하고자 한다. 두 방법은 각각 나름대로의 장단점을 갖고 있다. 처음에 소개할 내용은 일리노이 대학(University of Illinois at Urbana-Campaign)의 J. Engel 팀이 발표한 논문<sup>4</sup>으로 촉각 센서 어레이의 전체적인 모습과 구조는 Fig. 2 와 같다. 이 연구에서

특이할 점은 여러 물리량을 감지하기 위해 사람의 피부를 모방하여 각 감각을 담당할 센서들을 하나의 센서 노드(sensory node)에 집적시켜 넣었다는 것이다. 하나의 노드는 온도센서 및 히터(열전도도를 측정하기 위한), 경도 센서로(경도센서는 두 개의 센서로 구성) 이루어져 있으며 각 노드와 노드 사이에 홈을 파서 쉽게 구부러질 수 있다. 홈이 파여 두께가 얇아진 부분에는 인공 피부의 곡률을 측정할 수 있도록 스트레인 게이지가 부착되어 있다.

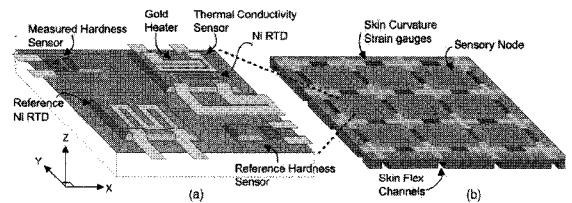


Fig. 2 Multimodal skin schematic: (a) a sensory node incorporates four distinct sensors. (b) Sensor nodes are arranged in an array to form skin, with skin mapping sensors between nodes<sup>4</sup>

촉각센서는 유연성을 부여하기 위해 폴리이미드 계열의 고분자 필름을 재료로 하여 MEMS 공정을 통해 제작하였다. Fig. 3 은 제작된 센서를 보여준다.

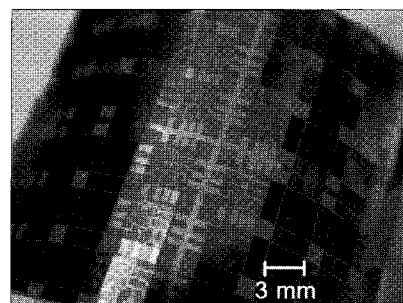


Fig. 3 Photograph of a fabricated flexible sensory node array made of polyimides using MEMS technology<sup>4</sup>

온도는 니켈(Ni)로 도선을 만들어 저항체를 만든 후 온도변화에 비례한 저항변화를 이용하여 검출한다(Fig. 2 에서 Reference Ni RTD 로 표기된 센서). 이 온도 측정 센서는 열전도도를 측정하기 위한 기준센서로도 사용한다. 경도를 담당하는 두 센서는 모두 접촉력을 검출할 수 있는 센서로 니켈-크롬 합금(NiCr, 80:20 wt. %) 스트레인 게이지가

멤브레인 위에 증착되어 있다. 경도는 두 센서 멤브레인의 강성 차이를 이용해 검출하게 되는데 Fig. 4 에서 보듯이 한쪽의 ‘측정’ 센서는 필름의 아래 부분을 식각하여 강성이 낮고 나머지 ‘기준’ 센서는 필름의 두께를 온전히 멤브레인으로 사용하여 강성이 높다. 따라서 물체가 접촉하였을 때 물체의 강성에 따라 각 센서의 변위량은 서로 차이가 나게 된다. 즉, 물체의 강성이 작을 경우, 두 센서의 변형량은 비슷해 질 것이며 클수록 상대적으로 차이가 크게 된다. 일반적으로 경도를 측정할 때 물체를 압입하면서 힘과 변위를 모두 측정해야 되지만 이 방법은 강성차이를 이용하여 눌렀을 때 변형량만 감지해도 되므로 촉각센서에 적합한 구조라 볼 수 있다. 하지만 본질적으로 센서 재료 본래의 경도보다 큰 물체 또는 ‘측정’ 센서의 경도보다 작은 물체의 경도는 감지할 수 없다. 실질적으로 측정할 수 있는 경도의 구간은 재료 경도의 0.1~0.6 정도이다.

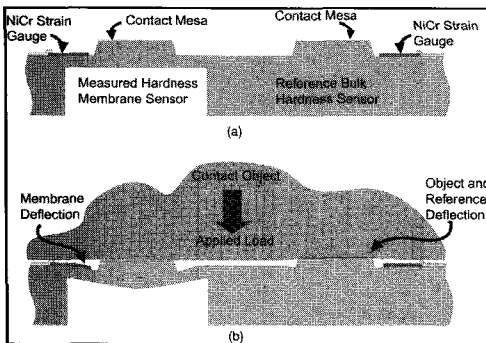


Fig. 4 Schematic of hardness sensors; (a) cross-section with membrane and bulk hardness sensors, (b) in contact with an object, the sensors deform, with apparent pressures proportional to the contact object hardness<sup>4</sup>

사람의 피부는 온도 그 자체보다도 열의 흐름에 민감하다. 사람은 체온과 다른 물체와 접촉했을 때 미세한 열의 흐름을 감지하여 온도를 구분할 수 있으며 열전도도에 따라 물체도 구분하게 된다. 이를 모방하여 열전도도 센서는 열을 발생하는 히터와 일정한 간격(20 $\mu$ m)으로 떨어진 온도 센서로 구성되어 있다. Fig. 5 는 열전도도 센서의 구조를 나타낸다. 물체의 접촉이 없을 때 열은 폴리이미드 재료를 주로 이동하여 온도 센서에 이르게 된다. 열전도도가 높은 물체가 접촉하면 히터

의 열은 대부분 접촉물체로 빠져나가므로 온도 센서에 다다른 열이 줄어든다. 따라서 접촉했을 때 센서의 시간에 따른 온도 변화를 획득하여 시정수를 구하면 열전도도를 알 수 있게 된다.

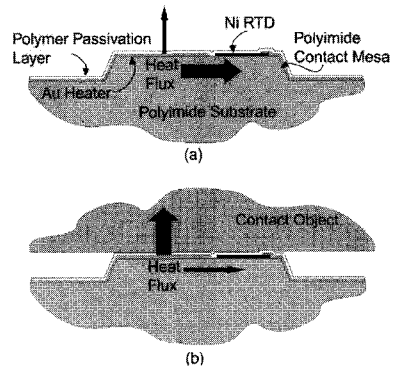


Fig. 5 (a) Thermal conductivity sensor when not in contact with an object. (b) Cross-section of thermal conductivity sensor in contact with an object<sup>4</sup>

저자들은 제작된 센서를 이용하여 나일론, 60 $^{\circ}$ C 알루미늄, 상온(20 $^{\circ}$ C) 알루미늄, 고무, 유리를 구분하는 양맹 테스트를 실시하였는데 모두 구분해 내었다고 보고하였다. 이 연구는 각종 물리량을 측정할 수 있는 센서를 집적하여 성공적으로 측정하였으나 몇 가지 해결해야 할 문제를 가지고 있다. 첫째로는 신호선의 처리인데 각 센서노드에 여러 센서를 포함하고 있으므로 한 센서노드 당 10 개의 신호선이 필요하다. 25 mm $\times$ 25 mm 영역에 5 $\times$ 5 센서 노드 어레이를 구성하려면 250 개의 방대한 양의 선이 필요하게 되어 현실적으로 구현이 어렵다. 이를 해결하려면 촉각 센서 자체에서 신호처리를 하여 외부에는 처리된 정보만 주면 된다. 저자들

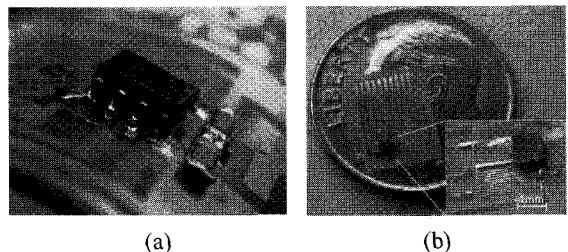


Fig. 6 Photos of (a) surface mount IC and components and (b) bare IC silicon die flip chip soldered to flexible printed circuit board<sup>4</sup>

은 Fig. 6 과 같이 플렉서블한 기판 위에 직접 IC 칩이나 파운더리 수준의 IC 를 직접 납땜하는 방법을 제시하고 있으나 한계가 있다. 또 다른 문제는 폴리이미드가 유연한 소재이긴 하나 신축성이 떨어져 3 차원 곡률을 가진 물체에 부착하면 구김이 발생하거나 밀착하지 못하고 뜨는 부위가 발생하게 된다. 따라서 2 차원 곡률을 가진 실린더에만 적용 가능한 단점이 있다.

2005 년에 동경대학교 Someya 교수팀이 발표한 연구<sup>5</sup> 는 이러한 단점들을 극복할 수 있는 방법을 제시하고 있어 주목된다. 앞의 연구와 마찬가지로 폴리이미드 계열의 고분자를 이용하여 센서를 제작하였으나 크게 두 가지 점이 다르다. 첫째로 폴리이미드의 저신축성을 극복하기 위해 그물망으로 센서 네트워크를 구축하였다. Fig. 7 의 A 와 C 에

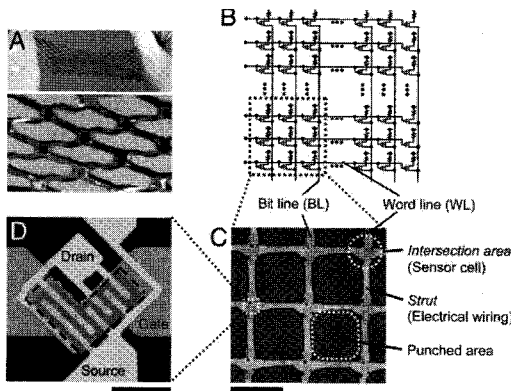


Fig. 7 A conformable network of pressure sensors. (A) A plastic film with organic transistors and pressure-sensitive rubber is processed mechanically to form a unique net-shaped structure, which makes a film device extendable by 25%. A magnified view of extended net-structures is also shown. (B and C) The circuit diagram of the pressure sensor network is shown (B) together with a picture of the 3 × 3 sensor cells (C). A word line, denoted as WL, is connected to the gate electrodes, and a bit line, denoted as BL, is connected to the drain electrodes. The circuit diagram of the thermal sensor network can be obtained by replacing the resistances with diodes. (Scale bar: 4 mm.) (D) The optical microscopic image of an organic transistor before shaping the net or integrating it with sensors. The dotted line indicates the semiconductor channel layer (Scale bar: 1 mm)<sup>5</sup>

그물망으로 구성된 센서를 볼 수 있으며 교차점에 단위 센서가 위치하고 있다. 두 번째로 유기 반도체를 이용한 트랜지스터를 제작하여 신호처리를 센서 네트워크 내에서 상당부분 해결함으로써 신호선의 개수를 획기적으로 줄일 수 있다는 것이다. Fig. 7 의 B 와 D 에 각각 신호처리 회로와 유기 반도체 소자가 나타나있다.

압력센서가 있는 폴리이미드 필름과 유기반도체가 있는 폴리이미드 필름을 수직 접합하여 최종 센서 네트워크를 완성하며 완성된 센서 네트워크를 펀치로 구멍을 뚫어 그물망 형태의 모습으로 만든다.

이런 방식으로 센서를 제작하면 다양한 물리량을 측정할 수 있는 각각의 센서 네트워크를 만든 후 단지 적층하기만 하면 된다. 이는 센서 네트워크 각각이 독립적이고 외부와 절연이 되어있기 때문에 가능하다. 이 연구에서는 압력센서 네트워크와 온도센서 네트워크를 구성하였는데 열개는 Fig. 8 과 같다. 압력센서는 전도성 고무에 전극을 만들어 제작하였고 온도는 다이오드의 PN 접합을 이용하여 감지한다. 센서 기판 아래에는 유기 트랜지스터가 전기적으로 접합하여 신호를 처리한다.

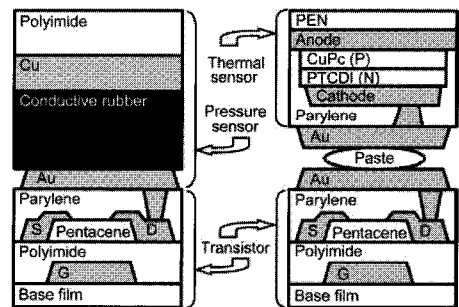


Fig. 8 The device structures. A cross-sectional illustration of the pressure (Left) and the thermal (Right) sensor cells with organic transistors is shown<sup>5</sup>

이렇게 각각 제작된 센서 시트를 센서부가 바둑판 모양으로 위치하도록 적층하여 최종 센서 네트워크를 구성한 후, 50 °C 로 가열된 구리 블록을 센서 위에 올려 놓고 반응을 측정하여 Fig. 9 에서 보듯이 압력분포와 온도분포를 동시에 측정할 수 있음을 보였다.

Someya 교수팀의 연구는 촉각센서로서 진일보한 것임에 틀림이 없지만 몇 가지 한계를 가지고 있다. 첫째로 내구성 문제이다. 센서 네트워크가

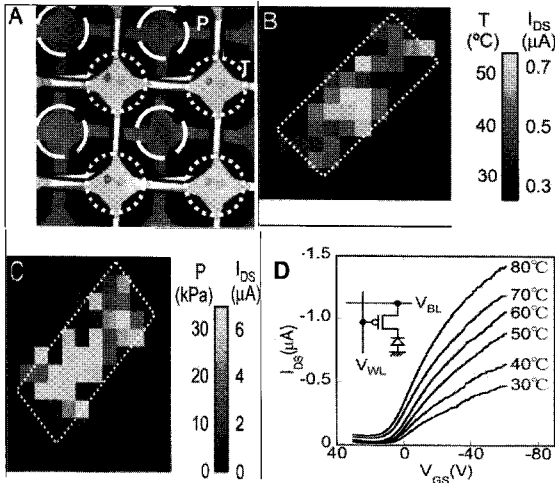


Fig. 9 Integration of pressure and thermal sensor networks. (A) A possible implementation of thermal and pressure sensor films. The pressure and thermal sensors are represented by P and T, respectively. (Scale bar: 4 mm.) (B) The spatial distribution of temperature that is converted from the temperature dependent current in the thermal sensor network. A copper block (15 × 37 mm<sup>2</sup>) whose temperature is maintained at 50°C is positioned diagonally (indicated by the dotted line). The sensing area is 44 × 44 mm<sup>2</sup>. (C) Simultaneously, the spatial distribution of pressure is measured with the pressure sensor network. (D) One cell of the thermal sensor network devices consisting of the diode-based thermal sensors and transistors is characterized at various temperatures from 30 °C to 80 °C<sup>5</sup>

물리적으로는 취약한 그물망 형태를 가지고 있어서 반복 접촉 시 끊어질 위험이 크다. 그물망 하나만 끊어져도 한 라인에 위치하고 있는 센서들은 동작하지 않게 된다. 둘째로 아직까지는 불완전한 유기 트랜지스터의 성능이다. 유기 트랜지스터의 ON-OFF 특성은 센서 성능 구현에 지장이 없는 정도이나 시간이 지나도 일정한 성능을 유지하리라는 보장은 없다. 또한 온도변화에 따른 성능 변화도 무시할 수 없는 요인이다. 셋째로 센서 네트워크의 적층 문제인데 두 가지 물리량의 경우 큰 문제가 없지만 여러 물리량을 측정하기 위해 여러 층을 쌓는다면 표면의 특성이 잘 전달될 수 있을지 검증이 필요하다.

### 3. 맺음말

사람의 피부처럼 부드럽고 강건하며 여러 물리량을 감지할 수 있는 인공 피부를 만드는 것은 꿈일지도 모른다. 현재까지 가능성 있는 몇 가지 연구결과가 제시되었지만 아직 실용화되어 로봇에 적용되지는 못하고 있다. 하지만 최근 유기반도체, 전자종이, 유기 태양전지 등의 분야에서 플렉서블 전자소자에 대한 연구가 활발히 진행되면서 실용적인 인공피부가 나올 가능성이 커졌다. 최근에는 우수한 신장 특성과 굽힘 특성을 가지면서도 기존의 전자 소자에 필적할 만한 성능을 가진 전자소자가 발표되었다.<sup>6,7</sup> 본 연구단에서는 기존에 보유하고 있는 플렉서블 촉각센서 기술을 기반<sup>8</sup>으로 우수한 특성을 지닌 플렉서블 전자소자를 개발 또는 응용하여 실용적인 인공 피부를 개발하고자 한다.

### 후 기

본 논문은 교육과학기술부 신기술융합형 성장동력사업 중 “휴먼인터페이스를 위한 촉각센서 및 제어기술 개발”의 지원으로 진행 중이다.

### 참고문헌

1. Kim, J. H., Lee, J. I., Lee, H. J., Park, Y. K., Kim, M. S. and Kang, D. I., “Development of tactile sensor and its application,” Journal of the KSPE, Vol. 21, No. 9, pp. 20-25, 2004.
2. Yu, K. H., Yoon, M. J., Jeong, G. Y., Kwon, T. G and Lee, S. C., “Development of a distributed flexible tactile sensor system,” Journal of the KSPE, Vol. 19, No. 1, pp. 212-218, 2002.
3. Heo, J. S and Lee, J. J., “Development of flexible force sensor using fiber bragg grating for tactile sensor and its evaluation,” Journal of KSPE, Vol. 23, No. 2, pp. 51-56, 2006.
4. Engel, J., Chen, J., Fan, Z. and Liu, C., “Polymer micromachined multimodal tactile sensors,” Sensors and Actuators A, Vol. 117, No. 1, pp. 50-61, 2005.
5. Someya, T., Kato, Y., Sekitani, T., Iba, S., Noguchi, Y., Murase, Y., Kawaguchi, H. and Sakurai, T., “Conformable, flexible, large-area networks of pressure and thermal sensors with organic transistor

- active matrixes,” Proc. National Academy of Sciences of USA, Vol. 102, No. 35, pp. 12321-12325, 2005.
6. Kim, D. H., Ahn, J. H., Choi, W. M., Kim, H. S., Kim, T. H., Song, J., Huang, Y. Y., Liu, Z., Lu, C. and Rogers, J. A., “Stretchable and foldable silicon integrated circuits,” Science, Vol. 320, No. 5875, pp. 507-511, 2008.
  7. Sekitani, T., Iba, S., Noguchi, Y., Hata, K., Fukushima, T., Aida, T. and Someya, T., “A rubberlike stretchable active matrix using elastic conductors,” Science, Vol. 321, No. 5895, pp. 1468-1472, 2008.
  8. Kim, J. H., Kwon, H. J. and Kang, D. I., “Development of tactile sensor and its application,” Proceeding of the Korean Society of Sensors, pp. 106-108, 2008.