

◆ 특집 ◆ 고령자 / 장애인의 활동 보조 기계 기술

## 전기자극 변조방식이 체성감각에 미치는 영향

### Effects of Modulation Type on Electrically-Elicited Tactile Sensation

황선희<sup>1</sup>, 아라 조산<sup>1</sup>, 송동진<sup>2</sup>, 배태수<sup>2</sup>, 박상혁<sup>2</sup>, 강곤<sup>1,✉</sup>

Sun Hee Hwang<sup>1</sup>, Jawshan Ara<sup>1</sup>, Tongjin Song<sup>2</sup>, Tae Sue Bae<sup>2</sup>, Sang-Hyuk Park<sup>2</sup>, and Gon Khang<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 경희대학교 생체의공학과 (Department of Biomedical Engineering, Kyung Hee Univ.)

<sup>2</sup> 중원대학교 의료공학과 (Department of Biomedical Engineering, Jungwon Univ.)

✉ Corresponding author: gkhang@khu.ac.kr, Tel: 031-203-8224

Manuscript received: 2012.4.27 / Accepted: 2012.5.23

*The purpose of this study was to investigate how the modulation method affects the effectiveness of eliciting tactile sensations by electrical stimulation. Two methods were employed and the results were compared and analyzed; pulse amplitude modulation (PAM) and pulse width modulation (PWM). Thirty-five healthy subjects participated in the experiments to measure the stimulation intensity that began to elicit a tactile sensation – activation threshold (AT). Constant-current monophasic rectangular pulse trains were employed, and the stimulation intensity was varied from zero until the subject felt any uncomfortable sensation. The step size of the stimulation intensity was 100nC/pulse. After each experiment, the subject described the sensation both quantitatively and qualitatively. The two modulation methods did not make a significant difference as far as the AT values were concerned, but most of the subjects showed 'intra-individual' consistency. Also, it was confirmed that our range of the stimulation parameters enabled us to obtain three major tactile sensations; tickling, pressure and vibration. The results suggested that the stimulation parameters and the modulation type should be selected for each individual and that selective electrical stimulation of the mechanoreceptors needs more diversified researches on the electrode design, multi-channel stimulation protocol, waveforms of the pulse train, etc.*

Key Words: Sensory Feedback (감각 피드백), Electrical Stimulation (전기자극)

#### 1. 서론

교통사고, 산업재해 또는 질병으로 사지의 일부가 절단된 환자의 경우에는 대부분 상실된 신체 부분의 모양을 대신해 주거나(orthosis) 기능을 대체해 주는(prosthesis) 인공보조기를 사용한다. 지금까지 개발된 인공보조기는 물건을 잡거나 눌렀을 때 느끼는 압력, 촉감 등의 체성감각을 뇌로 전달

해 주는 기능을 갖추고 있지 않거나 감각전달의 성공률이 매우 낮아서 물건을 다룰 때 놓치거나 파손시키는 등의 문제점이 발생하여 일상생활에서 사용할 때 어려움이 따른다.<sup>1</sup> 인공보조기로 물체를 잡을 때 체성감각을 인위적으로 만들어 뇌로 전달해 주는 감각피드백 시스템이 인공보조기에 적용된다면 절단환자들이 인공보조기를 일상생활에 적용할 때 보다 유용하고, 보다 절단되기 전의 신체

의 일부에 가깝게 사용할 수 있다.<sup>2</sup>

인위적으로 체성감각을 유발시켜 뇌로 전달하는 방법은 기계적 감각수용기(mechanoreceptor)가 반응하는 압력, 진동,<sup>3</sup> 온도<sup>4</sup> 등을 기계적 장치를 이용하여 직접 만들어내어 절단이나 손상되지 않은 신체부위에 자극함으로써 뇌로 전달하는 것이다. 이러한 방법은 인체의 기계적 감각수용기가 직접 반응하는 외부자극을 그대로 전달한다는 장점이 있으나, 압력, 진동의 자극을 만드는 기계장치를 손상되지 않은 인체부위에 부착했을 때 외관상으로 드러나지 않도록 작게 만드는 것이 쉽지 않고, 또한 기계장치를 부착했을 때 일상생활에 불편함이 없을 정도로 가볍게 만드는 것 또한 쉽지 않다.<sup>5</sup>

인위적으로 체성감각을 유발시키는 또 다른 방법은 기계적 감각수용기나 기계적 감각수용기가 연결된 신경을 전기로 자극하는 것이다. 기계적 감각수용기 또는 기계적 감각수용기가 연결된 신경을 적절한 강도와 주파수의 전기로 자극하면, 기계적 감각수용기가 물리적으로 자극을 받아 압력이나 진동 등의 감각을 만들어 낼 때와 유사하거나 거의 동일한 감각을 만들어 낼 수 있다.<sup>6</sup> 전기로 기계적 감각수용기를 자극하여 압력이나 진동의 감각을 인위적으로 만드는 경우에는 전기로 압력이나 진동 등의 체성감각을 유발하는 전기자극 파라미터를 찾아내야 하는 번거로움이 있으나, 기계적 장치를 이용하여 압력이나 진동을 만들어 내는 경우와는 달리, 전기로 압력이나 진동 등의 체성감각을 만들기 위해 손상되지 않은 인체부위에 부착하는 전극은 매우 얇고 가벼워서 옷을 입으면 전극의 부착 여부를 알 수 없다는 장점이 있다. 또한 기계장치를 이용하여 체성감각을 만들어 낼 때에는 기계장치가 만들어 낼 수 있는 체성감각의 종류가 단 1 가지이지만, 전기자극으로 체성감각을 유발하는 경우에는 압력 또는 진동의 체성감각을 구별하여 하나의 감각만을 만들어 낼 수 있을 뿐만 아니라,<sup>7</sup> 압력과 진동 자극을 동시에 유발시킬 수도 있다. 인체는 한번에 하나의 감각만을 느끼지 않고 여러 체성감각을 동시에 느끼므로 보다 유사한 체성감각을 유발할 수 있는 장점이 있다.

전기자극으로 체성감각을 피드백하는 연구는 그 필요성에도 불구하고 아직까지 활발히 연구되지 못하고 있으며, 특히 전기로 체성감각을 유발할 때의 적합한 전기의 파라미터나 변조방식에 대

해서는 아직까지 연구가 미흡하다. 본 연구에서는 전기자극으로 인위적인 체성감각(somatosensory)을 만들어 낼 때 펄스높이변조(pulse amplitude modulation, PAM)와 펄스너비변조(pulse width modulation, PWM) 중에서 어떤 방식이 더 효율적인지 비교하였다.

## 2. 방법

### 2.1 대상자 및 실험

대상자들은 체성감각 수용기 및 감각신경에 병변이 없는 20 세 이상 32 세 이하의 35 명으로, 실험에 앞서서 실험 과정과 실험 도중 발생할 수 있는 위험 상황 그리고 대처방법 등에 대하여 자세히 설명을 들은 후에 실험참여 동의서를 제출하였다.

적절한 전기의 펄스열로 피부를 자극하면 압력 감각이나 진동감각 등의 체성감각이 유발되는데, 본 연구에서는 PAM 과 PWM 중에서 어떤 변조방식이 체성감각을 더 쉽게 유발하며, 원하는 체성감각만을 선택적으로 조절하여 유발시키는데 더 적합한가를 판별하기 위한 실험을 진행하였다.

PAM 과 PWM 실험은 각각의 전기자극 파라미터를 변화시켜 자극의 강도를 높여가면서 대상자가 체성감각을 느끼는 시점(activation threshold, AT) 및 압력감각, 진동 등의 각기 다른 체성감각을 느끼는 시점의 전기자극 파라미터를 기록하였다. 전기자극 강도는 대상자가 통증을 느끼는 시점(pain threshold, PT)까지 증가시켰으며, 통증을 느끼는 시점의 전기자극 파라미터 또한 기록하였다.

### 2.2 전기자극

실험에 사용되는 전기자극 펄스열을 생성하고 원하는 시점에 실시간으로 전기자극 파라미터를 변화시켜 자극의 강도를 높이기 위하여 LabVIEW<sup>®</sup>(National Instruments Co., Austin, Texas, USA) 프로그램, 아날로그 출력 모듈인 NI 9263(National Instruments Co., Austin, Texas, USA)을 사용하였다. 아날로그 출력 모듈에서 출력된 정전압 펄스는 본 연구팀에서 제작한 전압-전류 변환기(voltage to current converter)를 사용하여 정전류원으로 변화시킨 이후에 실험에 사용하였다. 또한, 고통을 줄이고,<sup>8</sup> 좁은 너비의 전류로도 쉽게 감각을 유발<sup>9</sup> 시키는 사각의 음극 펄스열이 실험에 사

용되었으며, 주파수는 20Hz 를 사용하였다.

PAM 자극 실험은 펄스의 너비를 200 $\mu$ s 로 고정하고 펄스의 높이를 0.5mA 씩 증가시켜 각 단계마다 펄스당 100nC 씩 더 많은 전하량으로 자극하도록 설정하였으며, 각 단계는 5 초씩 자극을 유지시킨 후에 다음 단계의 자극이 이어지도록 설정하였다. PWM 으로 자극할 때에는 펄스의 높이를 5mA 로 고정하고, 펄스의 너비를 20 $\mu$ s 씩 변화시켜, PAM 으로 자극할 때와 동일하게, 펄스당 100nC 씩 각 단계마다 더 많은 전하량으로 자극하도록 설정하였고, 각 단계의 자극지속시간도 PAM 자극 실험과 동일하게 5 초로 설정하였다.

**2.3 전극 및 피부처리**

검지의 끝 마디를 전기로 자극하기 위하여 Fig. 1 과 같은 전극을 제작하였다. Fig. 1 에서 표면에 금도금된 부분으로 전류가 흐르도록 제작하였으며, 전극의 너비는 10mm, 각 전극의 높이는 0.5mm, 각 전극 사이의 간격은 1mm 로 제작하였다. 8 개의 전극으로 구성된 전극을 개발한 이유는 우선, 1 채널 즉, 하나는 접지(ground) 전극으로 사용하고, 다른 하나는 액티브(active) 전극으로 사용할 때, 접지전극은 제일 바깥의 하나를 선택하고 액티브 전극을 제일 가까운 전극부터 가장 먼 전극까지 바꾸어 가면서 최소의 전류로 최대의 감각을 유발시키는 거리의 전극을 선택하기 위함이다. 이번 연구에서는 본 연구팀의 이전 연구의 결과<sup>10</sup> 를 토대로 전극 사이의 간격이 7mm 가 되는 전극(제일 바깥 전극과 제일 바깥으로부터 6 번째 전극)을 선택하여 사용하였다.

각 대상자의 검지 끝 마디는 실험 전에 알코올 솜을 이용하여 이물질을 제거하고, 상온의 물에 10 초간 넣은 후에 닦고 끈이어 전해 젤을 고르게 발라서 검지 끝 마디에 충분한 습도가 유지되어 전류가 잘 흐르는 상태가 되도록 준비하였다.

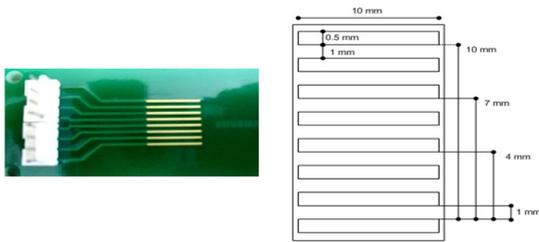


Fig. 1 Surface electrode

**3. 결과**

**3.1 전기자극 변조방식과 AT**

총 35 명의 대상자에게 PAM 과 PWM 으로 각각 자극하면서 감각을 느끼기 시작하는 시점(AT)에서의 자극강도, 즉 펄스높이/너비를 기록하고, PAM 과 PWM 중에서 어떤 변조방식으로 자극했을 때 더 적은 펄스당 전하량(charge per pulse, CPP)으로 AT 에 도달하는 가를 비교하였다. 대상자의 48.6%는 PWM 보다 PAM 으로 자극했을 때 더 적은 CPP 로 AT 에 도달하였으며, 37.1%는 PAM 보다 PWM 으로 자극했을 때 더 적은 CPP 로 AT 에 먼저 도달하였다. 대상자 중에서 14.3%는 PAM 과 PWM 으로 자극했을 동일한 CPP 로 AT 에 도달하였다(Fig. 2 참조).

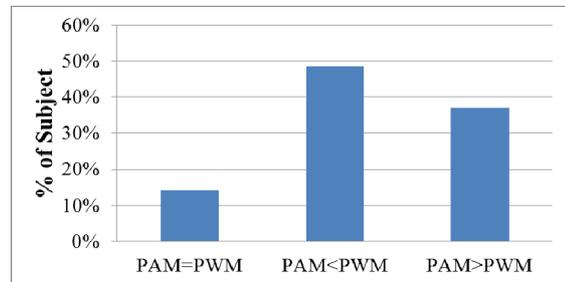


Fig. 2 CPP comparison between PAM and PWM at AT

5 명의 대상자에게 각 변조방식 당 7 번의 실험을 반복한 결과, 3 명은 PWM 으로 자극할 때보다 PAM 으로 자극할 때 더 적은 양의 CPP 로 AT 에 도달하였고, 1 명은 PAM 으로 자극할 때보다 PWM 으로 자극할 때 더 적은 양의 CPP 로 AT 에 도달하였으며, 나머지 1 명은 일관된 결과를 보이지 않았다.

Fig. 3 은 5 명으로 7 번 반복 실험한 결과 중에서 대표적인 2 명의 결과로써, 첫 번째 대상자(S1)는 7 번 실험에서 6 번은 PWM 으로 자극할 때보다 PAM 으로 자극할 때 더 적은 양의 CPP 로 AT 에 도달하였고, 1 회는 PWM 과 PAM 의 CPP 가 동일할 때 CPP 에 도달했다. 두 번째 대상자(S2)는 첫 번째 대상자와는 반대로 7 번 실험에서 4 회는 PAM 으로 자극할 때보다 PWM 으로 자극할 때 더 적은 양의 CPP 로 AT 에 도달하였고, 2 회는 PWM 과 PAM 의 CPP 가 동일할 때 AT 에 도달했으며, 1 회는 반대의 결과가 나타났다.

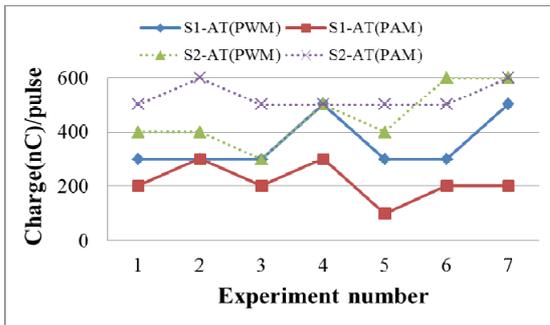


Fig. 3 Individual consistency in charge per pulse at AT

### 3.2 전기자극 변조방식과 체성감각

총 35 명의 대상자에게 AT 를 느낀 이후에도 PAM 과 PWM 각각으로 전기자극의 강도를 높여가면서 간지러운 감각(Tickling sensation), 압력감각(pressure sensation), 진동감각(Vibration sensation) 중 어떤 감각이 먼저 유발되는지 비교하였다(Fig. 4 참조). 3 가지 감각 중에서 2 가지 감각을 동시에 느낀 대상자의 경우에는 두 감각을 맨 처음 느낀 것으로 중복해서 나타내었다.

PAM 으로 자극하는 경우에 간지러운 감각을 맨 처음 느낀 대상자는 54.3%이고, 압력감각을 맨 처음 느낀 대상자는 34.3%, 진동감각을 맨 처음 느낀 대상자는 25.7%였다. PWM 으로 자극하는 경우에는 간지러운 감각을 맨 처음 느낀 대상자는 전체 대상자 중에서 74.3%이고, 압력감각을 맨 처음 느낀 대상자는 25.7%, 진동감각을 맨 처음 느낀 대상자는 22.9%였다.

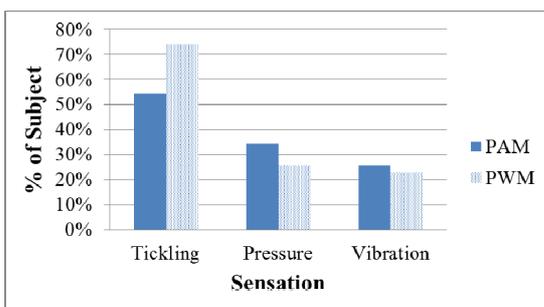


Fig. 4 First sensation caused by PAM and PWM

## 4. 토의

더 적은 CPP 로 AT 에 도달하는 변조방식으로 자극하면 동일한 배터리의 충전량으로 더 오래 자극한다는 것을 의미하며, PAM 과 PWM 두 변조방

식에서 동일한 CPP 에서 고통을 느낀다고 가정하면 더 적은 CPP 로 AT 에 도달하는 변조방식이 자극의 단계를 느낄 수 있는 범위가 넓어진다는 것을 의미한다. 또한 체성감각을 유발할 때 사용되는 전하의 양은 피부의 화상을 일으킬 정도로 크지 않기 때문에 발생할 확률은 적으나, 한 부위만을 오랜 시간 동안 자극하는 경우에는, 적은 양의 CPP 로 동일한 체성감각을 유발할 수 있는 자극방식을 선택하는 것이 피부나 피부 바로 밑에 위치한 조직이 자극으로 손상될 확률을 줄일 수 있다.

Fig. 2 의 결과를 보고, 35 명의 대상자 중에서 11.5%가 PWM 으로 자극했을 때보다 PAM 으로 자극했을 때가 더 적은 CPP 로 AT 에 도달하였으므로, PWM 보다는 PAM 으로 자극하는 것이 더 효율적이라고 판단할 수 있다. 그러나 전체 대상자 중에 37.1%는 PWM 으로 자극했을 때가 PAM 으로 자극했을 때보다 더 적은 CPP 로 AT 에 도달했으므로, PAM 으로 AT 에 먼저 도달하는 대상자는 PAM 을 사용하고 PWM 으로 AT 에 먼저 도달하는 대상자는 PWM 을 사용하는 대상자 맞춤형 방식으로 자극하는 것이 바람직하다고 판단된다. 즉, 시스템을 적용하기에 앞서서 각 대상자마다 PAM 과 PWM 으로 자극하고 둘 중에서 더 적은 CPP 로 AT 에 도달하는 변조방식을 선택하는 것이 더 바람직하고 생각된다.

Fig. 3 의 결과를 참조하면, PAM 으로 자극했을 때 더 적은 양의 CPP 로 AT 에 도달하는 사람은 실험을 반복하더라도, PAM 으로 자극할 때가 PWM 으로 자극할 때보다 더 적은 CPP 로 AT 에 도달하는 것을 보여주고 있다. 반대의 경우도 마찬가지로 PWM 으로 자극할 때 더 적은 CPP 로 AT 에 도달한 사람은 실험을 반복하더라도 대부분 PWM 으로 자극할 때가 PAM 으로 자극할 때보다 더 적은 CPP 로 AT 에 도달하는 일관성을 보이고 있다.

이 실험에서 1 단계의 자극강도를 높이면 펄스당 전하의 양은 100nC/pulse 씩 많아지는데, Fig. 3 의 결과를 보면, S1 을 PAM 으로 자극하는 경우에 AT 를 느끼는 펄스당 전하량은 모두 100~300nC/pulse 사이의 값을 가지고, 중간값은 200nC/pulse 이다. S1 을 PWM 으로 자극하는 경우에 AT 를 느끼는 펄스당 전하량은 모두 300~500nC/pulse 사이의 값을 가지고, 중간값은 400nC/pulse 이다. S1 의 실험결과를 자극강도의 단계로 해석해 보면, S1 이 AT 를 느끼는 펄스당 전하량은 중간값(PAM 은 200nC/pulse, PWM 은

400nC/pulse)에서 단 1 단계(100nC/pulse)씩의 변화만 있다. S2 의 경우도 S1 의 경우와 크게 다르지 않아서 PAM 으로 자극하면 500~600nC/pulse 사이의 펄스당 전하량으로 AT 를 느끼고, PWM 으로 자극할 때 마지막 2 회를 제외하면, 300~500nC/pulse 사이에서 AT 를 느낀다. 이 사실을 종합해 보면, 대부분 개인마다 더 낮은 CPP 에서 AT 에 도달하는 변조방식이 있으며, 변조방식마다 AT 에 도달하는 전기의 자극강도는 실험을 반복하더라도 변하지 않는다고 할 수 있다.

Fig. 4 를 보면 압력감각을 먼저 느끼는 대상자의 비율과 진동감각을 먼저 느끼는 대상자의 비율이 거의 동일하다. 압력감각을 담당하는 기계적 감각수용기는 머켈디스크(Merkel's disk)로 진동감각을 담당하는 기계적 감각수용기인 파시니소체(Pacinian corpuscle)보다 피부에 가까운 위치에 분포해 있다. 전극 사이의 거리가 피부에서 머켈디스크까지의 거리와 동일하다면 자극강도가 상대적으로 약할 때에는 전류의 흐름이 전극 사이에서 원형으로 생겨서 피부 바로 밑까지만 도달하므로 압력감각을 담당하는 머켈디스크만 활성화되고, 자극강도가 강해지면 전류의 흐름이 블록해져서 상대적으로 피부 깊숙이까지 도달하여 진동감각을 담당하는 파시니소체를 활성화할 것으로 기대했다. 그러나 Fig. 4 의 결과는 압력감각을 먼저 느끼는 대상자도 있었지만, 진동감각을 먼저 느끼는 대상자도 있었으며, 둘을 동시에 느끼는 대상자도 있었다. 위 결과를 종합해보면 전극 사이의 거리가 충분히 좁지 않아서 자극강도가 크지 않음에도 불구하고 전류의 흐름이 파시니소체가 분포해 있는 피부 깊이까지 흘러 머켈디스크와 파시니소체를 동시에 자극한 것으로 생각된다. 본 실험에서 설정한 7mm 는 AT 를 적은 CPP 에서 느끼게 해주지만 감각을 분별하기에는 충분히 좁지 않다고 생각할 수 있다. 1 개의 접지 전극과 여러 액티브 전극을 사용하는 다채널 자극 방식을 사용하면 피부 아래에서 전류분포를 집중시킬 수 있으므로, 이어지는 연구에서는 다채널 자극방식을 사용하여 원하는 체성감각을 유발시키는 방법을 도입하고자 한다.

## 5. 결론

대상자마다 적은 CPP 로 AT 에 도달하는 변조방식이 다르므로, 대상자에 맞는 변조방식을 선택

해야 하며, 선택된 변조방식은 일관성을 가지므로 대상자마다 AT 를 느끼는 파라미터를 최초 1 회 설정해 두면 이후에도 파라미터를 변경시키지 않고 사용할 수 있다.

PAM 과 PWM 의 변조방식 모두 압력감각과 진동감각을 선택적으로 자극하지 못하였다. 뚜렷한 감각을 유발하고 감각을 선택적으로 유발하기 위해서는 새로운 전극모양의 디자인, 펄스 파형의 다양성, 그리고 다채널 전기자극 방법에 대한 연구가 필요하다.

## 후 기

이 논문은 2011 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단-공공복지안전사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0020933).

## 참고문헌

- Biddiss, E., Beaton, D., and Chau, T., "Consumer Design Priorities for Upper Limb Prosthetics," *Disabil. Rehabil. Assist. Technol.*, Vol. 2, No. 6, pp. 346-357, 2007.
- Cipriani, C., Zaccone, F., Micera, S., and Carrozza, M. C., "On the Shared Control of an EMG-Controlled Prosthetic Hand: Analysis of User-Prosthesis Interaction," *IEEE Trans. Robotics*, Vol. 24, No. 1, pp. 170-184, 2008.
- Antfolk, C., Balkenius, C., Rosén, B., Lundborg, G., and Sebelius, F., "Smarthand Tactile Display: A New Concept for Providing Sensory Feedback in Hand Prostheses," *J. of PSHS*, Vol. 44, No. 1, pp. 50-53, 2010.
- Jones, L. A. and Berris, M., "The Psychophysics of Temperature Perception and Thermal-Interface Design," *Proc. of HIVETS*, pp. 137-142, 2002.
- Chouvardas, V., Miliou, A., and Hatalis, M., "Tactile Displays: Overview and Recent Advances," *Displays*, Vol. 29, No. 3, pp. 185-194, 2008.
- Konyo, M., Tadokoro, S., Yoshida, A., and Saiwaki, N., "A Tactile Synthesis Method Using Multiple Frequency Vibrations for Representing Virtual Touch," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on IROS*, pp. 3965-3971, 2005.
- Kajimoto, H., Kawakami, N., and Tachi, S., "Electro-

- Tactile Display with Tactile Primary Color Approach,” Proc. of Int. Conf. on IROS, 2004.
8. Field-Fote, E. C., Anderson, B., Robertson, V. J., and Spielholz, N. I., “Monophasic and Biphasic Stimulation Evoke Different Responses,” *Muscle Nerve*, Vol. 28, No. 2, pp. 239-241, 2003.
  9. Rubinstein, J. T., Miller, C. A., Mino, H., and Abbas, P. J., “Analysis of Monophasic and Biphasic Electrical Stimulation of Nerve,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol. 48, No. 10, pp. 1065-1070, 2001.
  10. Giron, S., Hwang, S., Song, T., Rhee, K., and Khang, G., “Perception Caused by Current Amplitude Variation in Electro-Tactile Stimulation,” Proc. of IFMBE, pp. 1190-1193, 2011.