

파동형 움직임이 가능한 다자유 IPMC 구동기 제작 Fabrication of MDOF IPMC Actuators to Generate Undulatory Motion

전진한*·오일권†
Jeon Jin Han and Oh Il Kwon

Key Words : IPMC actuators(이온성 고분자 금속 복합체 구동기), Undulatory motion(파동형 움직임), Patterning techniques(패터닝 기법), Electroplating(전기도금).

ABSTRACT

The ionic-polymer-metal-composite actuators have the best merit for bio-mimetic locomotion because of their large bending performance. Especially, they have the advantage for mimicking a fish-like motion because IPMCs are useful to be actuated in water. So we have developed IPMC actuators with multiple electrodes for realization of biomimetic motion. Generally, the IPMC actuator has been fabricated in electroless plating technique, while it needs very long fabrication time and shows poor repeatability in the actuation performance owing to the variables in chemical fabrication process. Therefore, the novel fabrication methods were investigated by combining electroless plating and electroplating techniques capable of patterning precisely. On the whole, two different methods were compared and analyzed with similar thickness level of Platinum electrodes. Present results show that mixing chemical reduction and electroplating can be a promising candidate for electrode patterning.

1. 서론

최근 들어, 인공근육, 의료 장비, 초소형 로봇, 생체모방학 등에 요구되는 새로운 센서 및 구동기의 연구가 활발히 진행 중에 있다. 특히, 고응답성을 갖는 센서 및 가볍고 유연한 구동기에 관심이 집중되고 있다. 대표적으로 전기장 하에서 형상의 변화가 일어나는 전기활성고분자(Electro-Active Polymer)가 광범위하게 연구되어 오고 있다. 이 중 우리는 IPMC 즉, 이온성 고분자 금속 복합체의 기초 연구를 수행했었고, 현재 응용 연구를 진행 중에 있다. IPMC는 나피온과 같은 플루오르로 치환된 이온 교환 고분자 막에 금 또는 백금이 화학적으로 적층된 구조를 이루고 있다⁽¹⁾. 그림 1(a, b)를 살펴보면, 그것은 내부에서 움직이는 양이온(H⁺) 과 결합된 구조로 고정된 음이온(술포산기(SO₃⁻))으로 구성되어 있다. 또한, SEM 사진과 모식도를 보면 전극 층이 표면 전극 층, 고분자-금속 복합 층으로 되어 있음을 알 수 있다. 그림 2 는 전기장 내에서 IPMC의 굽힘 원리를 설명하는 개략도 이다. 충분히 수화된 상태에서 IPMC 양면에 전압을 인가하면, 내부의 양이온과 물 분자가 클러스터 구조를 이루어 음극 쪽으로 이동하게 된다. 이때, 음극은 이온들의 과다

분포로 팽창하고 양극은 수축되어 IPMC는 양극 쪽으로 굽어지게 된다.

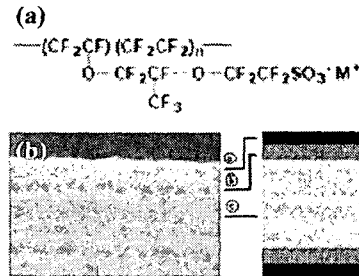


Figure 1. Structure of the IPMC (a) Chemical structure, (b) Cross-sectional structure: (ⓐ) Surface Electrode (ⓑ) Polymer-Metal Composite (ⓒ) Membrane).

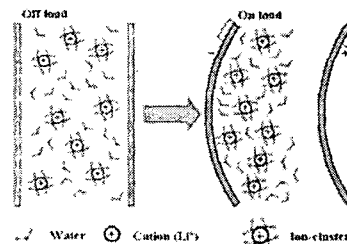


Figure 2. A schematic illustration of an actuation principle.

IPMC는 기본적으로 무전해 도금을 통해 만들어진다. 그러나 이 방법은 IPMC 제작 공정과 성능 재현성 등에 한계를 갖고 있다. 우리의 전 연구⁽²⁾에서, 개선된 무전해 도금 방법을 통해 성능 개선을 꾀하였지만, 그래도 여전히 한계가 있어 다양한 제작 방법이 제안되고 있다. Salehpoor⁽³⁾ 등이 PVD, 무전해도금, 전기 도금 등을 언급하였지만 확실한 성능 개선은 보고되지 않았다. 이번

† 전남대학교 기계시스템공학부 조교수
E-mail : ikoh@chonnam.ac.kr
Tel : (062) 530-1685, Fax : (062) 530-1689

* 전남대학교 기계공학과 대학원

연구에서는 앞의 기법들을 개선하고, 특히 다중 전극판 패터닝 기법에 적용함으로써 개선된 IPMC의 제작과 다자유 운동이 가능한 파동형 모션을 구현코자 한다.

2. IPMC의 다중 전극판 패터닝

2.1 다중 전극판의 개념

생체 모방 공학은 자연계에서 영감을 얻어 이를 기존의 공학 체계에 접목시켜 기존의 공학적인 문제점들에 대해 새롭게 접근하는 흥미로운 연구 분야이다. 이런 관점에서 생체모방공학은 물고기의 움직임은 물속이나 혈관 속과 같은 환경에서 유평해야 되는 마이크로 로봇과 같은 소형 로봇의 구동 방법의 해결책을 제시해 줄 수가 있다. 대부분의 물고기는 꼬리지느러미를 이용하여 자신의 몸을 굽히고 비틀어서 추진력을 얻는다. 이런 물고기의 움직임은 전진과 관련된 파동형 신호와 회전과 관련된 진동형 신호로 이루어진다⁽⁴⁾. 이 점에 있어서, IPMC 구동기는 인공 물고기 로봇의 지느러미를 제어하는 용도로 사용 될 수 있다.

2.2 기존의 제작 방법들

기존의 패터닝 방법들은 크게 무전해 도금 방법을 이용하는 것과 물리적 또는 전기화학적 증착 기술을 이용하는 것으로 나눌 수 있다. 무전해도금에 기반을 둔 패터닝 기법은 특수 마스크 테이프, 크레이프 종이 등을 이용하여 간단하게 적용해왔다⁽⁵⁾. Guilly등⁽⁶⁾은 소수성 마스크(실리콘 고무)를 이용하여 패터닝을 하였다. Nakano등⁽⁷⁾은 접착성 테이프(3M 폴리에틸렌 필름 테이프 480)를 이용하여, 간단한 마스크 기법을 제안했다. 그러나 그것들은 무전해도금 중 발생하는 고분자 테이프의 수축과 팽창으로 정교하고 복잡한 패턴을 만들기에 부적합하다. Jeong⁽⁸⁾은 전처리 과정에서 나피온을 완전히 수화 시킨 후, 압력을 가하며 기계 지그로 간단한 패터닝 작업을 수행하였다. 하지만 이 방법은 고정된 지그 때문에 무전해 공정 시 고분자의 움 현상이 발생하여 미세 패턴에 부적합하다. 미세 패턴을 위해 레이저 커팅 기술도 개발되었다. Sewa 등⁽⁹⁾은 엑시머 레이저 공정을 제안하였고, Nakabo 등⁽¹⁰⁾은 레이저 빔의 버스트 조건을 최적화하여 대략 20 μm 깊이에 50 μm의 폭을 갖는 절연 라인을 패턴 하였다. 그러나, 이 방법은 IPMC의 표면에 손상을 야기하고 비용이 많이 든다. 우리는 지난 연구⁽¹¹⁾에서, 무전해

도금, 전기도금, 스퍼터링, 사진식각 공정 등 화학, 물리적 증착법을 조합하여 간략하게 다중 전극판을 갖는 IPMC 구동기 제작 방법을 제안하였다. 여기서는 그 방법들 중 무전해 도금과 전기도금 기법을 개선 및 발전시켜 체계화하겠다.

2.3 다중 전극판의 디자인

전극 표면의 패터닝을 통해 다자유를 갖는 구동을 구현할 수 있도록, 그림 3과 같이 디자인 하였다. 패턴은 구동 전압 인가부와 구동부로 나누어진다. 특히, 구동부는 비틀림, 파동, 진동형 모션을 고려하여, 6개의 독립적인 세부 패턴으로 디자인되었다. 추가적으로, 지난 여러 번의 제작 경험 및 실험을 바탕으로, 패턴 형상을 그림 3(b)와 같이 수정하였다.

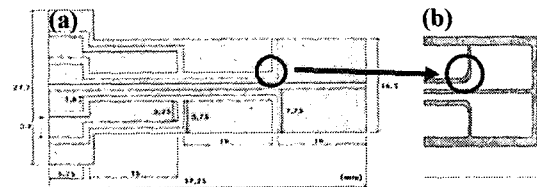


Figure 3. A pattern of multiple electrodes of IPMC actuator (a) Pattern design of multiple electrodes and (b) Partial schematic of improved pattern design.

3. 다중 전극판 제작 방법

3.1 마스크 테이프를 이용한 무전해 도금방법

가장 간단한 패터닝 기법은 그림 4(a)와 같이 마스크 필름 테이프를 나피온 양단에 붙이는 것이다. 제작에 앞서 우리는 사용 가능한 세 가지 테이프를 비교하였다.

표 1은 테이프 5413이 온도와 화학적 특성이 우수함을 보여준다. 그러나 나피온에 붙이기에 두께가 너무 얇아서 쉽게 구겨지고 찢어졌다. 반면 폴리에틸렌 3M 5423은 적당한 접착력에 화학적 특성도 우수하고, 적절한 두께를 지녀 복잡한 패턴의 마스크를 나피온에 붙이기에 적합하였다.

Table 1. Basic characteristics of masking film tapes.

제품	두께 [mm]	온도 범위[°C]	접착력 [g/in]	특징
폴리이미드 테이프5413	0.07	-73~260	566	고온에 안정 내화학적
플라스틱 테이프472	0.26	107	652	온도에 민감
폴리에틸렌 3M 5423 ⁽¹²⁾	0.28	-34~107	737	내화학적 약간의 잔사

결과적으로, 5423 을 이용하여 무전해 도금된 형상은 그림 4(b)와 같다. 긴 공정 시간에 의해 마스킹 테이프와 나뉘은 막 사이에 백금의 미세 침투 현상이 발생하였고, 화학 공정 중 테이프의 수축, 팽창 현상에 의해 패턴된 형상의 모서리가 무더졌다. 그림 4(c)는 전극의 패턴 형상의 백금 침투와 무더진 모서리 형상을 보여준다. 그래서, 앞 장 2.3 에서 제안했듯이 개선된 패턴 형상 제작하여 새롭게 적용하였다. 절연 라인의 폭을 조금 증가시켰고, 패턴의 사각 모서리를 곡률지게 하였다. 그 결과, 그림 4(d)에서 볼 수 있듯이 마스크 패턴이 상당히 깨끗하고 선명하게 나왔다. IPMC 는 1 차 도금과정을 3 회, 2 차 도금과정을 2 회 거침으로써 백금 층이 약 9 μm 성장하였다.

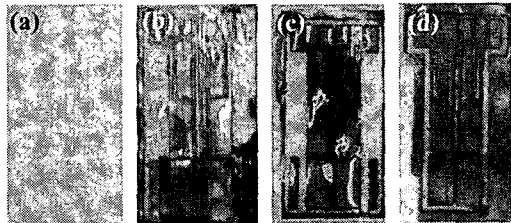


Figure 4. IPMC patterning by masking tape and electroless chemical reduction: (a) Bonded tapes to Nafion, (b) Infiltration and rough edges, (c) Patterning by previous masking tape and (d) Patterning by improved masking tape.

3.2 무전해도금과 전기도금 조합 방법

방법 1 에서의 긴 제작 시간과 백금 침투 현상을 좀더 개선하기 위해, 무전해도금방법과 전기도금 방법을 조합해보았다. 백금의 전기도금⁽¹³⁾은 무전해도금 방법으로 1 차 도금을 3 회, 2 차 도금 1 회를 한 후 추가적으로 시행하였다. 1N의 염산 200ml에 2mM의 질산(II) 납과 20mM의 질산을 첨가한 후, 5g 염화백금산(IV)을 녹여 도금 욕을 만들었다. 전 연구⁽¹¹⁾에서, 전기도금은 0.1A의 일정한 전류를 가하여 30 분씩 7 회 반복 시행하였다. 그 결과, 제작 시간이 3 일로 줄었고, 그림 5(a)에서 보다시피 백금 침투 현상도 개선되었다. 그러나, 백금 층의 두께가 과도하게 20 μm 까지 성장하였고, 미세 선폭들이 다소 불균일 했으며, 전기도금 과정에서 뒤틀림이 발생하여, 제작된 IPMC가 평평하지 않았다. 무엇보다, 그림 6(c-d)에서 볼 수 있듯이 각 층 마다 구동부에서 작동부의 끝 단까지 저항의 차이가 커서 전기도금시 도금 라인이 도중에 끊기는 현상이 발생했다. 그래서, 각 층마다 따로 도금하는 방법을 고안했고, 적절한 두께의 도금 층을 형성하기 위해 적합한 전류 밀도를 찾고자 아래와 같이 추가 실험을 준

비하였다. 우선 우리는 일정 크기 (4 x 70 mm)로 샘플을 네 개 만들어, 표 3 과 같이 전류 밀도를 달리해 제작하였다.

Table 2. Operating conditioreless plated Nafion membranes.

도금액	2.5% 염화백금산욕
온도 (°C)	30
교반	기계 교반 시스템
일반적인 전류밀도	0.1 ~ 1 A/dm ² (14)
pH	0.4
양극	백금 코팅 망사형 티타늄 판
음극	패턴된 IPMC

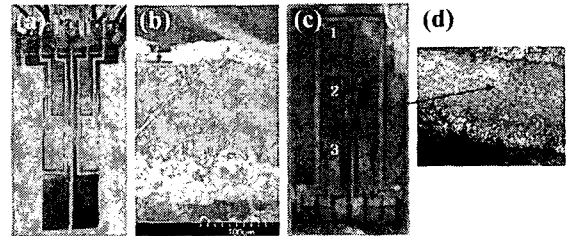


Figure 5. Patterned IPMC by combining electroless plating and electroplating with masking tapes: (a) Specimen by Method 2, (b) SEM cross-section of IPMC sample by Method 2, (c) Picture of uneven plating surface and (d) Optical microscope picture of plating line disconnected.

Table 3. Current density conditon of electroplating.

시편	1	2	3	4	단위
전류밀도	0.33	0.58	0.83	1.08	A/dm ²
공급 전류	0.04	0.07	0.1	0.13	A
도금 시간 (1 time)	1382	786	549	422	sec.
공급된 전하량 (1 time)	456	456	456	456	C/dm ²

먼저 무전해도금을 통해 백금 층을 5 μm 성장시켰고, 다양한 전류밀도에서 전기도금을 통해 대략 4 μm 성장하였다. 여기서, 적정 전류밀도 범위 안에서, 전류 밀도보다 전하 공급 양이 전기도금의 두께에 영향을 미침을 알 수 있었다.

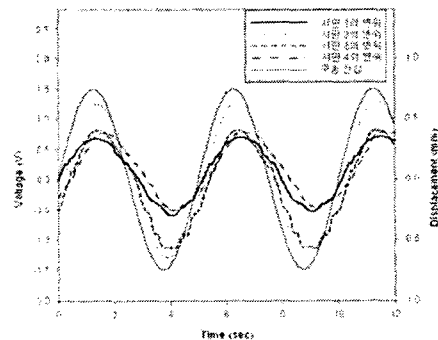


Figure 6. Comparison of bending performance according to current density at driving voltage : $1.5 * \sin(2\pi * 0.2 * t)$.

그림 8 과 같이 전류 밀도에 따른 시편의 굽힘 성능을 평가하였다. 그 결과 시편 1 의 경우가 가장 성능이 좋음을 알 수 있고, 이를 살펴보기 위해 소스미터로 2.1V 를 인가하여 표면 전기 저항을 측정하였다. 시편 1 의 경우가 가장 표면 전기 저항이 낮음을 알 수 있고, 이것이 굽힘 성능을 개선시켰다.

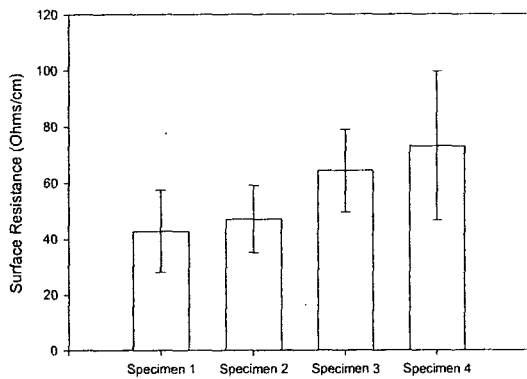


Figure 7. Surface resistance of specimens according to current density.

4. 실험 장비 설치

횡방향 끝 단 변위 측정과 전체 움직임의 형태를 살펴기 위한 비전 센싱 시스템이 통합된 실험 장비를 꾸렸다. 전체 측정 시스템은 그림 8 과 같다. 입력 신호는 BNC-2210 터미널에 연결된 NI-PXI 6733 보드에 의해 생성되고, 전류 앰프 (UPM 1503)을 거쳐 다자유 IPMC 구동기에 전달된다. 그리고, PXI-4472 와 CCD 레이저 변위 센서 (LK 301)가 끝 단 변위 측정에 사용되고, PXI 1409 이미지 획득 보드와 CCD 카메라 (XC-HR 50)를 비전 센싱에 사용하였다.

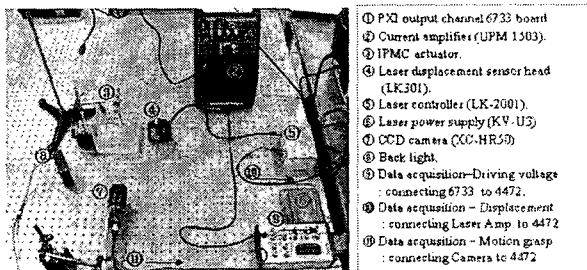


Figure 8. The integrated experimental setup for measurement of transverse displacement and total movement shape of patterned IPMC.

5. 실험 결과

전압 2V, 주파수 0.5Hz 인 사인파를 패턴된 IPMC 양단 모두에 인가하였다. 이를 통해 다중 전극판을 갖는 IPMC 의 순수 굽힘 움직임을 볼 수 있었다. 그림 9 에서 방법 1 과 방법 2 의 순수 굽힘 시 횡방향 끝 단 변위를 비교해 보았다. 방법 1 이 더 좋은 굽힘 성능을 보였고, 이는 무전해 도금시 고분자-금속 복합층이 성능에 큰 영향을 미침을 보여주는 결과이다. 주파수와 전압에 따른, 방법 1 과 2 의 굽힘 성능 경향은 유사하였다.

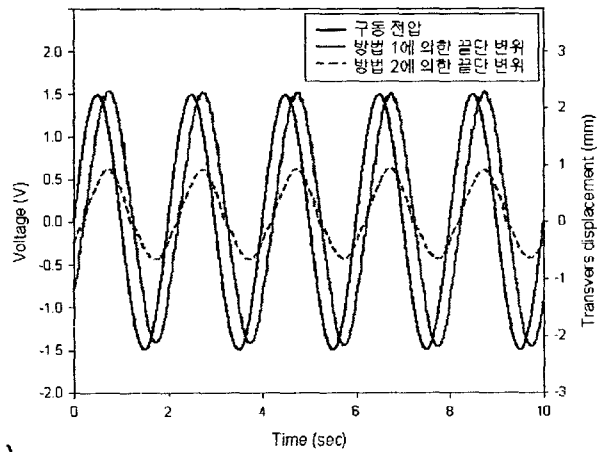


Figure 9. Comparison of tip transverse displacement between Method 1 and Method 2 at driving voltage: $1.5 \cdot \sin(2\pi \cdot 0.5 \cdot t)$.

IPMC 횡방향 변위는 동일 위상과 2 층에 180도 반대 위상을 줌으로써 비전 센싱을 통해 그림 10 과 같이 표현해 보았다. 2Hz 의 비교적 높은 주파수에서 비교해 보았을 때, 어느 정도 파동형 모션이 구현됨을 알 수 있었다.

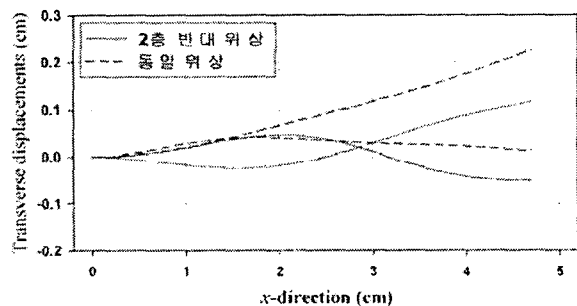


Figure 10. Displacement shapes of two different phases under harmonic excitation: $3 \cdot \sin(2\pi \cdot 2 \cdot t)$.

6. 결 론

이번 연구에서, 무전해 도금과 전기도금 방법을 결합시킨 새로운 패터닝 방법을 제안하였다. 패터닝된 고분자 위에 적절한 도금 층이 형성될 수 있도록 전류밀도 별로 제작하고, 각각 굽힘 성능 테스트, 표면 전기 저항, 표면 형상 등을 살펴보았다. 0.33A/dm²의 전류 밀도에서 제작된 것이 뛰어난 성능을 보였다. 또한, 새로운 패터닝 방법을 통해 다중 전극판을 갖는 IPMC 구동기가 파동형 움직임이 구현될 수 있음을 살펴보았다. 제작된 다자유도 작동기의 전극판에 동일 위상 보다 반대 위상을 줌으로써 더욱 파동형에 근접한 움직임이 가능하였다. 이번 연구로부터 도출된 결론을 요약해보면 다음과 같다. :

- (1) 방법 1 은 가장 간단한 패터닝 기법으로, 기존의 패터닝 방법 보다 더 섬세한 패터닝이 가능하였고, 굽힘 성능은 도금 횟수의 조절과 마스크 패터닝의 개선을 통해 유지 및 개선되었다.
- (2) 방법 2 에서, 최적 조건의 전기도금 방법을 찾아 적용함으로써 IPMC 구동기의 성능 재현성이 향상되고, 제작 시간은 현저히 줄어들었다. 비록 방법 1 에 비해 굽힘 성능이 떨어졌지만, 파동형 모션을 구현하는 데에는 문제가 없었고, 도금 방법과 작업 조건의 개선을 통해 성능을 향상시킬 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초 연구(R01-2005-000-10848-0(2005))지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Oguro, K., Asaka, K. and Takenaka, H., 1993, "Actuator Element", US Patent Specification 5,268,082.
- (2) 건진한, 신동균, 이관호, 오일권, 2005, "IPMC의 동적 특성", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp.356~359.
- (3) Salehpoor, K., Shahinpoor, M. and Razani, A., 1998, "Role of Ion Transport in Actuation of IPMC Artificial Muscles", SPIE Smart Structures and Materials, Vol. 3330, pp.50-58.
- (4) Sfakiotakis, M., Lane, D.M. and Davies, J.B.C., 1997, "Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 24, Issue 2, pp.237-252.
- (5) Tadokoro, S., Murakami, T., Fuji, S., Kanno, R., Hattori, M., Takamori, T. and Oguro, K., 1997, "An Elliptic Friction Drive Element Using an ICPF Actuator", IEEE Control Systems, pp. 60-68.
- (6) Guilly, M. L., Uchida, M. and Taya, M., 2002, "Nafion

Based Smart Membrane as an Actuator Array", SPIE Smart Structures and Materials, Vol. 4695, pp.78-84.

(7) Nakano, M., Mazzone, A., Piffaretti, F., Gassert, R., Nakao, M. and Bleuler, H., 2005, "IPMC actuator array as 3-d haptic display", SPIE Smart Structures and Materials, Vol. 5759, pp.331-339.

(8) Jeong, K. M., 2001, "Research on Artificial Muscle-like Actuator Using IPMC", Master Thesis, Sung Kyun Kwan University.

(9) Sewa, S., Onishi, K., Asaka, K., Fujiwara, N. and Oguro, K., 1998, "Polymer actuator driven by ion current at low voltage, applied to catheter system", IEEE The Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, pp.148-153.

(10) Nakabo, Y., Mukai, T. and K. Asaka, 2005, "Kinematic Modeling and Visual Sensing of Multi-DOF Robot Manipulator with Patterned Artificial Muscle", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.4315-4320.

(11) Oh, I. K. and Jeon, J.H. and Lee, Y. G. 2006, "Multiple electrode patterning of ionic polymer metal composite actuators", SPIE Smart Structures and Materials, Vol. 6168, pp.286-293.

(12) Technical Sheet., 1995, 3M UHMW Polyethylene Tape 5423, Foundation Web site:<http://www.3m.com/intl/kr/img/single/pdf/5423.pdf>

(13) Lee, M.K. and Hwang, Y.G., 2004, "A study on the Preparation of the Platinized Expanded-Titanium Electrode", Applied Chemistry, Vol. 8, No. 2, pp.498-501.

(14) Morrissey, R. J., 2001, "Platinum plating", Metal Finishing, Vol. 99, Supplement 1, pp.291.