한국기계가공학회지, 제13권, 제2호, pp.8～14 (2014.4) ISSN 1598-6721 (Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.13 No.2, pp.8~14 (2014.4) ISSN2288-0771 (Online)

http://dx.doi.org/10.14775/ksmpe.2014.13.2.008

◆특집◆ 3D 프린팅

적층조형과 직접주사방식을 결합한 광경화성 수지 기반의 신축성 촉각센서의 제작

우상구*, 이인환#**, 김호찬***, 이경창****, 조해용**
(* 충북대학교, #, **충북대학교, *** 안동대학교, **** 부경대학교)

Development of a Photopolymer-based Flexible Tactile Sensor using Layered Fabrication and Direct Writing

Sang Gu Woo*, In Hwan Lee#**, Ho-Chan Kim***, Kyung Chang Lee****, Hae-Yong Cho**
(Received 9 April 2014; received in revised form 28 April 2014; accepted 29 April 2014)

ABSTRACT

Many kinds of robots and machines have been developed to replace human laborin industrial and medical fields, as well as domestic life. In these applications, the device sneed to obtain environmental data using diverse sensors. Among such sensors, the tactile sensor is important because of its ability to get information regarding surface texture and force through the use of mechanical contact. In this research, a simple tactile sensor was developed using the direct writing of pressure sensitive material and layered fabrication of photocurable material. The body of the sensor was fabricated using layered fabrication, and pressure sensitive materials were dispensed between the layers using direct writing. We examined the line fabrication characteristics of the pressure sensitive material according to nozzle dispensing conditions. A simple 4 x 4 array flexible tactile sensor was successfully fabricated using the proposed process.

Key Words : Layered fabrication(적층 조형), Multi walled carbon nanotubes(다중벽 탄소나노튜브), Flexible tactile sensor(유연촉각센서), Direct writing(직접 주사방식)

* Dept. of Precision Mechanical Engineering, Chungbuk National University
** School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University
*** Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Andong National University
****Dept. of Control & Instrumentation Engineering, Pukyong National University
\# Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University
E-mail : anxanx@chungbuk.ac.kr

1. 서 론

최근 산업현장 뿐 만 아니라, 가정 또는 의료 분야에서도 가사 노동을 돕거나 정밀한 수술 등 인간의 생활에 도움을 줄 수 있는 로봇들이 개발되고 사용되어 지고 있다. 이러한 로봇들이 인간의 생활에 더욱 용이하고, 안정적인 상호작용을 하며 생활에 사용되기 위해서는 인간의 감각기능과 같이 외부환경을 감지하고 이에 대한 대처를 스스로 할 수 있는 기능의 센서들이 필수적이다.

그 중에서도 피부의 감각을 대체할 촉각센서는 외부환경을 감지함으로써 로봇의 안전성 향상과 지능화를 기대할 수 있다.

한편, 이런 촉각센서는 다양한 곡면 형상을 갖는 면에 부착 될 수 있도록 신축성과 유연성을 갖는 것이 유리하다. 하지만, 기존의 실리콘 또는 폴리머 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 기술 기반의 촉각센서들은 탄성이 부족하거나 제작공정이 복잡한 단점들이 있다.[1,2,3] 이에 본 연구에서는 압력 감응재의 직접 주사 방식과 적층 조형을 결합한 신축성 촉각센서 제작에 대한 연구를 수행하였다. 이를 통하여 신축성 촉각센서를 위한 압력감응재의 성형 특성 및 센서 제작을 위한 제작공정을 제안하였다. 센서 제작에 사용된 압력 감응재는 탄소나노튜브와 경화 후 탄성과 신축성을 가지는 광경화성 수지를 혼합하였으며, 적층에 사용된 재료는 압력 감응재에 사용한 광경화성 수지와 동일하다.[4]

2.탄소나노튜브 압력감응재료

2.1 압력감응재료의 전기적 특성

Fig.1은 탄소나노튜브가 혼합된 압력감응재 형상의 대한 개략도이다. 탄소나노튜브를 이용한 압력감응재는 고분자 물질에 탄소나노튜브를 물리적 또는 화학적으로 혼합하여 만든다. 고분자

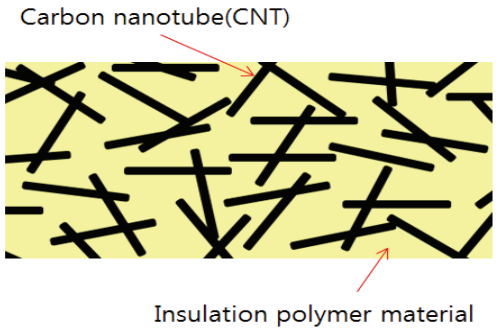

Fig. 1 Schematic drawing of pressure sensitive material mixed with CNT and insulation polymer

물질에 탄소나노튜브의 입자가 임계 농도만큼 분산되게 되면 이 혼합물은 전도성을 가지게 된다. 즉, 물리적인 가압에 의해 분산된 탄소나노튜브 입자의 간격이 감소하면 입자들 사이에 양자터널링 효과(QTE, Quantum Tunneling Effect)와 함께 더 많은 전류가 흐를 수 있는 상태가 된다. 이 때문에 압력이 가해지면 전기 저항이 증가하며, 전기전도도는 감소하게 된다.[5~7] 전기 저항의 변화는 압력감응재에 가해지는 힘의 크기에 따라 비례하여 증가하게 된다. 하지만 어느 한계 이상의 힘이 가해지면 저항은 더 이상 증가하지 않는다.

2.2 압력감응재의 제작

본 연구에서 개발하고자하는 신축성 촉각센서는 탄성과 유연성을 가지며 곡면에 부착이 가능해야하고 또한 외부 충격에 대한 내구성을 갖추어야 한다. 따라서 본 연구에서는 자외선 경화 후 신축성과 탄성을 가지는 광경화성수지(TangoPlus FLX 930, Stratasys)와 기계적, 전기적 특성이 우수한 다중벽 탄소나노튜브(IG-cnt, Nanolab)를 사용하여 압력감응재를 제작하였다. 한편, 탄소나노튜브의 분산을 위한 방법으로는 화학적인 방법과 물리적인 방법으로 나뉜다. 본 연구에서는 화학적인 방법과 물리적인 방법 두 가지를 모두 사용하였다.

Fig.2는 초음파 분산법을 이용한 다중벽 탄소나노튜브와 광경화성수지의 혼합 과정이다. 비커에 유기용매인 Dimethyformamide (DMF, 99.8%, Sigma-Aldrich) 40g과 다중벽 탄소나노튜브 0.1g 그리고 Sodium dodecyl sulfate (SDS, ≥99.0%, Sigma-Aldrich) 0.15g을 넣고 자석교반기 (MS300, MTOPS)를 이용하여 5분간 교반한다. 이때 SDS는 다중벽 탄소나노튜브의 응집을 방지하는 역할을 한다. 그 후 교반과 동시에 초음파 분산기 (Q700, Qsonica)를 이용하여 5분간 초음파 처리를 진행 한다(진폭 50 ㎛, 10 초간 분산 그리고 2 초간 정지). 이는 다중벽 탄소나노튜브가 전체 혼합액에 고르게 분산되게 하기 위함이다. 이때 교반

Table 1 Material data sheet of photocurable resin[8]

Stratasys TangoPlus FLX930			
	ASTM	Units	Metric
Tensile strength	D-412	MPa	0.8-1.5
Elongation at break	D-412	%	170-220
Compressive set	D-395	%	4-5
Shore Hardness(A)	D-2240	Scale A	26-28
Tensile Tear resistance	D-624	kg/cm	2-4
Polymerized density	ASTM D792	g/cm³	1.12-1.13

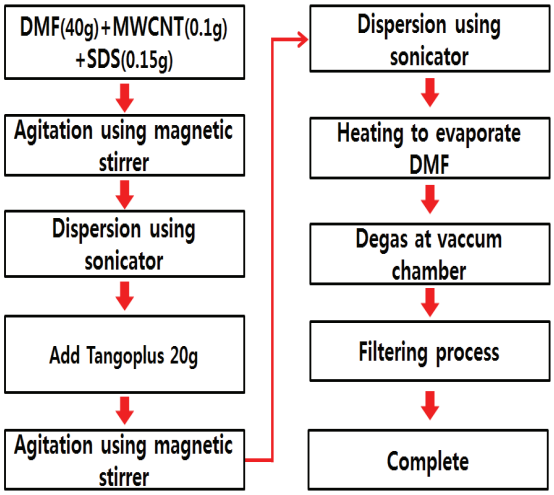

Fig. 2 Making process of the MWCNT sensitive material

을 같이 수행하지 않으면 다중벽 탄소나노튜브의 국부적인 분산만 일어난다.

1차 분산이 된 혼합물에 광경화성수지(Tangoplus FLX 930, Stratasys) 20g을 첨가한 후, 앞선 과정과 동일하게 교반기로 5분간 교반 그리고 동일한 설정의 초음파 분산기로 5분간 초음파 분산을 진행한다. 초음파 분산이 완료된 혼합물에 포함되어 있는 유기용매를 제거하기 위해 혼합된 재료를 가열식 자석교반기를 이용하여 약 100℃로 48시간 동안 가열하며 동시에 교반을 한다. 한편, 가열 온도가 100℃ 보다 높을 경우, 광경화성 수지가 경화된다.

유기용매의 증발이 완료되면 초음파 분산과 교반과정에서 혼합물 내에 발생된 미소기포를 제거하기 위해 진공챔버를 이용하여 탈포 과정을 거친다. 게이지압력 -35 kPa 에서 1시간 동안 탈포를 진행하였다. 마지막으로 공극크기(pore size)가 150㎛인 시린지 필터(Syringe Filter, whatman)를 이용한 여과 과정을 수행 한다.

혼합된 다중벽 탄소나노튜브 압력감응재는 탄소나노튜브의 전기적 특성을 가지며 자외선에 의해 경화되고 신축성과 유연성을 지닌다. 또한, 이는 액체 상태로써 직접주사 방식에 의한 토출 성형이 가능하기 때문에 대면의 신축성 촉각센서 제작에 용이하다. Table 1은 압력감응재에 사용된 광경화성 수지의 물성을 나타내는 표이다.

3.직접주사 방식에 의한 압력감응재의 토출 성형 특성

3.1 토출 성형을 위한 장비의 구성

Fig. 3은 다중벽 탄소나노튜브 압력감응재를 직접주사하기 위한 실험장치의 개략도이다. 다중벽 탄소나노튜브 압력감응재는 베럴에 담겨있고 베럴에는 노즐이 부착되어있다. 베럴은 z축에 고

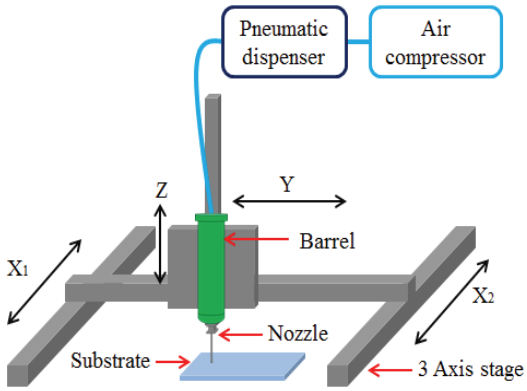

Fig. 3 Schematic drawing of dispensing system for MWCNT sensitive material

Table 2 Summary of dispensing system

Component	Specification
Dispenser	ACCURA8-DX (Iwashita Engineering Inc.)
Nozzle	MN-28G-13 (Iwashita Engineering Inc.)
Stage systems (x_1, x_2, y, z)	x_1 : LP092-ST-700L-IDLE x_2, y : LPS180Y-700-44SA-WC z : LP-090-SB-10 (LPK inc)
Optical Table	DVIO-B-1812M-300T (DAEIL Systems)

정되어 3축 방향으로 정밀 이송이 가능하다. 3축 스테이지와 디스펜서는 광학 테이블 위에 설치되어 있다. 공압 디스펜서는 파이프를 통해 베럴에 압력을 가하고, 그 압력에 의해 다중벽 탄소나노튜브 압력감응재가 노즐을 통해 토출된다. 한편, 실험에서 사용한 기저판은 광경화성수지(TangoPlus FLX 930, Stratasys)를 정밀 정반 위에서 자외선 경화시켜 사용하였다. 시스템의 상세한 구성은 Table 2와 같다.

3.2 직접주사 방식을 이용한 토출 성형 결과

다중벽 탄소나노튜브 압력감응재의 토출성형을 위한 실험 조건은 다음과 같다. 노즐은 내경 180 ㎛, 외경 360 ㎛ (MN-28G-13, Iwashita Engineering Inc)를 사용하였고, 토출 시 노즐 끝과 기저판 사이의 간격은 50 ㎛로 일정하게 유지하였다. 공압 디스펜서의 토출 압력은 10~80 ㎪ 로 10 ㎪ 씩 증가하면서 실험을 수행하였다. 한편, 노즐의 이송속도는 10 ㎜/s 와 20 ㎜/s의 두 경우에 대해 각각 토출 실험을 진행 하였다. 토출된 다중벽 탄소나노튜브 혼합물은 자외선램프로 경화 하였으며, CCD 카메라가 부착된 현미경 (OSM-U, Dong-won)을 이용하여 20배율로 촬영하고 이를 이미지 측정 프로그램 (Plus-4.0, Alpha systec)을 이용하여 선폭을 측정하였다. 동일한 조건에서 토출 성형된 샘플에 대해 30회 측정 후 평균값을 계산하였다. Fig.4는 노즐의 이송속도 10 ㎜/s와 20 ㎜/s의 조건에서 토출 성형된 다중벽 탄소나노튜브 압력감응재의 선폭 측정 결과이다. 동일한 노즐에서 노즐과 기저판의 간격 및 노즐의 이송속도가 일정하면, 토출압력이 증가할수록 성형되는 선폭이 선형적으로 증가함을 확인 할 수 있다. 한편, 동일한 조건에서 이송속도가 빠르면 선폭이 감소함을 알 수 있다. Fig.5는 노즐의 이송속도 20 ㎜/s, 토출 압력 80 ㎪에서 측정된 실제 선폭을 나타낸 사진이다.

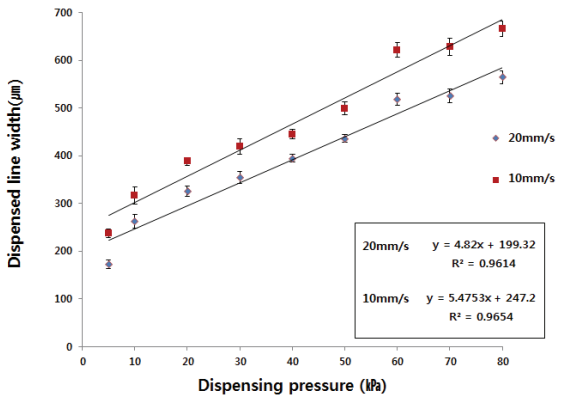

Fig. 4 Dispensed line width of MWCNT sensitive material at changing dispensing pressure by 180 ㎛ at moving velocity 10 and 20 ㎜/s

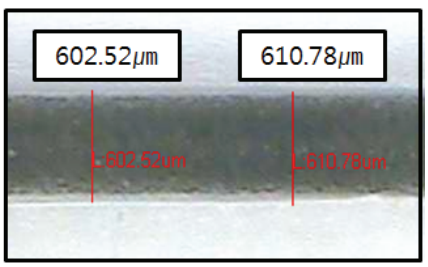

Fig. 5 Photograph of dispensed line width at moving velocity of 20 ㎜/s and dispensing pressure 80 ㎪

4. 적층조형과 직접 주사방식을 이용한 센서 제작공정

4.1 광경화성 수지를 이용한 신축성 촉각센서의 제작

Fig. 6은 신축성 촉각센서의 제작과정이다. 광경화성 수지는 자외선 경화 후에 성형된 압력감응재를 보호하고 하중을 전달하는 역할을 수행한다. 쾌속조형장비(EDEN-250, Stratasys)를 이용하여 미리 제작된 틀에 광경화성 수지를 1 ㎜ 높이로 붓고 자외선램프로 경화하여 기저판을 만든다. 그 위에 동일한 방향으로 다중벽 탄소나노튜브 압력 감응재를 토출 성형한다. 여기에 광경화성 수지를 다시 1 ㎜ 높이로 붇고 경화 시킨다. 앞서 토출 성형한 압력감응재에 수직한 방향으로 압력감응재를 다시 토출 성형하고, 1㎜ 높이의 광경화성 수지를 붇고 경화하여 크기가 2×2×0.3 ㎝인 2×2의 압력 감응부를 갖는 신축성을 가지는 센서를 제작하였다. 한편, 다중벽 탄소나노 튜브 압력감응재를 서로 다른 층에서 교차하여 성형하는 이유는 대면적의 신축성 촉각센서가 제작되었을 때 외력이 센서의 어느 부위에 가해지고 있는지 판단하기 위해서이다.

한편, 센서 제작에 사용된 재료들은 모두 자외선에 의해 경화되기 때문에 제작과정이 매우 단순한 것을 확인 할 수 있다.

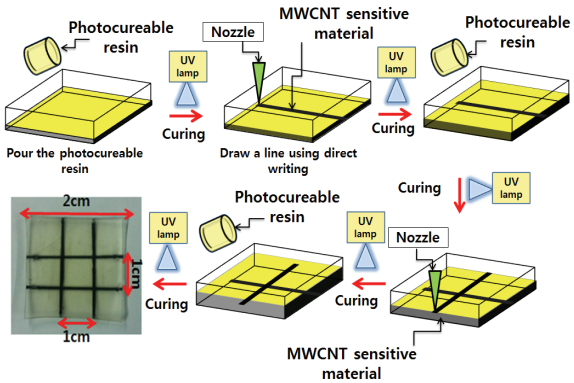

Fig. 6 Schematic drawing of fabrication process for flexible tactile sensor using photocurable resin

4.2 신호처리를 위한 핀 헤더의 삽입

제작된 센서를 이용하여 촉각을 측정하기 위해서는 센서에 전원을 공급하고 신호를 받을 수 있는 전극이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 상용화되어 있는 핀 헤더를 전극으로 사용함으로써 전원공급과 센서와의 정보교환을 용이하게 하였다.

Fig. 7 (a)는 핀 헤더의 삽입공정의 개략도이다. 4.1절과 마찬가지로 쾌속조형장비로 틀을 제작하였다. 한편, 이 때 핀 헤더가 적절한 높이로 삽입되어 다중벽 탄소나노튜브 압력감응재와 전기적 접촉이 충분히 이루어 질 수 있도록 틀을 설계하였다. 하지만 제작된 틀의 재료 또한 광경화성수지 이기 때문에 센서 재료와 직접적으로 맞닿아 경화되면 분리되지 않는다. 따라서 제작된 센서 소자를 틀과 분리시키기 위해서 PDMS(Sylgard 184 Silicone Elastomer, Dow corning)로 틀의 표면을 코팅해주었다. 여기에 핀 헤더를 삽입하고 광

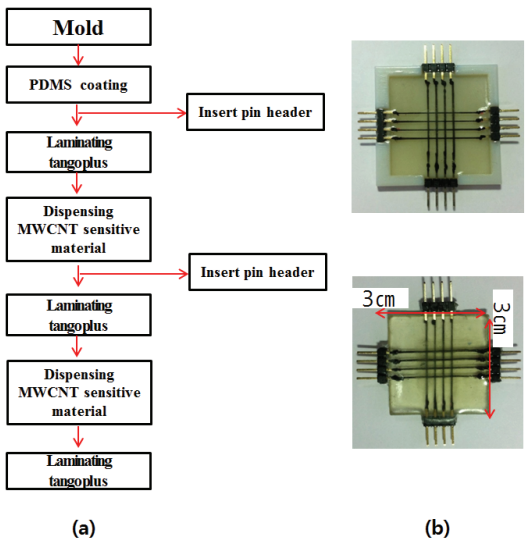

Fig. 7 Pin header insert process; (a) schematic diagram of fabrication process and (b) photograph fabricated flexible sensor

경화성수지를 1 ㎜ 높이로 경화 하였다. 이때 미리 틀이 설계된 대로 경화된 광경화성 수지의 높이와 핀 헤더의 높이는 일치하게 된다. 여기에 다중벽 탄소나노튜브 압력감응재를 성형하면 핀 헤더와 전기적으로 연결되게 된다.

Fig. 7 (b)는 제작된 신축성 촉각센서 소자의 사진이다. 크기는 3×3×0.3 ㎝ 이며, 4×4의 압력 감응부을 갖는다. Fig. 7 (b)의 윗 사진은 틀에서 신축성 촉각 센서를 분리하기 전이며, 아래 사진은 틀에서 분리된 신축성 촉각 센서의 모습이다.

4.3 제작된 센서의 동작 실험

제작된 신축성 촉각센서의 동작을 확인하기 위하여 오실로스코프를 이용한 실험을 수행하였다. 외력이 가해지지 않은 경우, 신축성 촉각센서의 압력감응재로 성형된 선의 한 곳에 7 V의 전압을 가했을 때, 직렬 연결된 오실로스코프에는 약 500 ㎷의 전압이 측정되는 것을 알 수 있다(Fig.8 (a)). 한편, 센서에 적절한 크기의 외력이 가해졌을 때에는 측정 전압이 약 80 ㎷ 낮아진다(Fig.8 (b)). 이는 다중벽 탄소나노튜브 압력감응재의 전기 저항이 외력에 의해 증가함에
따라 증가하게 되어 측정 전압이 감소되기 때문이다. 이상의 결과를 통해 제작된 신축성 촉각센서가 적절히 동작됨을 확인 할 수 있다. 향후 제작된 센서의 특성파악 및 이의 실제적인 적용을 위해서, 신호처리 및 증폭회로를 이용하여 노이즈를 제거하고 전기적 신호를 증폭하는 연구가 진행될 예정이다.

5. 결 론

본 연구에서는 다중벽 탄소나노튜브와 광경화성 수지를 혼합한 액상의 다중벽 탄소나노튜브 압력감응재를 사용하는 신축성 촉각센서 개발에 대한 연구를 수행하였다. 이는 직접주사 방식에 의한 대면적의 토출 성형이 가능하며, 직접주사 방식과 적층조형 방법에 의해 제작공정을 단순화 할 수 있다. 직접주사 방식에 의한 다중벽 탄소나노튜브

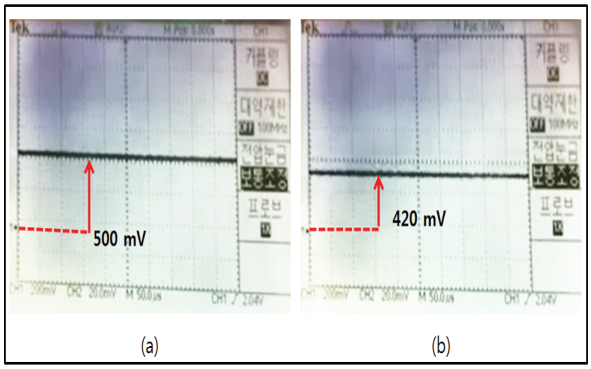

Fig. 8 Sensing experimental result of fabricated flexible tactile sensor; (a) without load and (b) with load

압력감응재의 토출 성형 특성을 파악하였다. 또한, 적층조형과 직접주사 방식을 이용한 센서 제작공정을 제안하였으며, 이를 바탕으로 핀 헤더가 포함된 4×4 압력 감응부를 갖는 센서 소자를 제작하였다.

후 기

이 논문은 산업통상자원부의 부품소재 국제협력사업 지원을 받아 수행된 것임(2012-021063).

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0023501)

REFERENCES

(1) J. Y. Kim, S. H. Baek and J. J. Lee., “Development of fabric-based optical fiber tactile sensor using optical fiber”, *Journal of Korean Sensors Society*, Vol. 18, No. 3, pp. 210-216, 2009.

(2) M. S. Kim, Y. K. Park and S. Y. Kwon., “Tactile device That Mimics Human`s Sensory system”, PHYSICS & HIGH TECHNOLOGY, Vol. 19, pp. 15-22, 2010.

(3) J-H. Kim, J-I. Lee, H-J. Lee, Y-K. Park, M-S.

Kim and D-I. Kang., “Development of tactile sensor and its application”, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21 No. 9, pp. 20-25, 2004.

(4) I. H. Lee and S. G. Woo, “Dispensing Characteristics of Conductive Material for the Flexible Tactile Sensor”, ICCAS 2013, pp. 148-150, 2013.

(5) S. G. Woo, I. H. Lee, J. W. Choi, H. C. Kim and H. Y. Cho, "Flexible Sensor Material using Photopolymer and MWCNTs Mixture", Proceedings of KSME Autumn Conference, pp. 3241-3244, 2013.

(6) E. J. Yun, J. Y. Kim and S. T. Lee, "Optimization on the Fabrication Process of Si Pressure Sensors Utilizing Piezo Resistive Effect", Journal of the Institute of Electronics of Korea, Vol. 42, pp. 19-24, 2005.

(7) M. Vatani, E. Engeberg and J.W. Choi, "Force and Slip Detection with Direct-write Compliant Tactile Sensors using Multi-walled Carbon Nanotuve / Polymer Composites", Sensor and Actuator A: Physical, Vol. 195, PP. 90-97, 2013.

(8) “TangoPlus FLX930”, 28, March., 2014, from http://www.stratasys.co.kr.