

# 마이크로 - 나노 매니플레이션 기술의 동향

김 경 환\*, 김 덕 호\*\*

\*우신기전(주), \*\*한국과학기술연구원 마이크로시스템 연구센터

## 1. 서론

많은 전문가들은 2020년 이전에 현재의 반도체 기술을 이용한 마이크로화는 한계에 이를 것이며, 향후 미세가공에서 미세조립으로 기술적 대전환이 일어날 것으로 예측하고 있다. 필자의 의견으로는 MEMS 기술을 기반으로 한 Top-Down Approach (미세가공)와 Bottom-Up Approach(미세조립)의 기술적 융합이 당분간 활발히 이루어지리라 생각한다. 미세조립의 궁극적인 목적은 원자나 분자를 자유롭게 관찰, 계측, 제어, 조작하여 신물질과 디바이스를 만들어내는 것으로서, 이는 다름아닌 나노 테크놀로지이다. 로봇기술은 21세기에 기존의 제조업은 물론 나노 산업의 생산기술로 변모할 것으로 예상되며, 이러한 로봇 기술이 바로 본 기사에서 다루려는 마이크로-나노 로봇이다.

마이크로-나노 로봇은 크게 두 가지로 정의할 수 있다. 첫째는 조작 대상이 마이크로 혹은 나노의 크기를 가진 경우이다. 이 경우에는 조작물의 크기에 맞춰, 구동기나 센서의 정밀도 또한 마이크로 혹은 나노급이어야 한다. 둘째는 로봇 자체의 크기가 마이크로 혹은 나노인 경우로서, 혈리웃에서 만든 SF 영화 Inner Space에 나오는 것처럼 혈관 내를 자유로이 주행하는 환상의 로봇이다. 본 논문에서는 생산기술의 관점에서 조작 대상과 구동기나 센싱의 정도가 마이크로, 나노 레벨인 로봇을 다루고자 한다.

초정밀 로봇을 제작하고, 미세 대상물을 조작(매니플레이션)하고 미소 영역을 관찰하는 기술을 마이크로-나노 로봇 기술이라고 정의할 수 있는데, 기술적으로 볼 때 기존의 로봇 기술과는 크게 다르다. 다음 절에서 설명하겠지만, 마이크로-나노 영역에서는 매크로 세계와는 다른 물리 현상들이 존재하므로 기존의 로봇 기술에 더하여 새로운 접근법이 필요하다. 예를 들어, 나노 세계에서 무게는 거의 무시할 수 있으므로, 나노 입자의 매니플레이션은 하나의 바늘만으로도 복잡한 조작이 가능하다. 그리고, 미세 세계는 인간이 직관적으로 예측하기 곤란하므로 조작물이나 환경의 관찰 및 센싱 기술이 매우 중요하며, 센싱 정보에 기반한 로봇 조작 기술이 필요하다.

한마디로 마이크로-나노 로봇이라 하더라도 조작 대상물의 크기나 특성에 따라 로봇의 사양, 즉, 액츄에이터,

센서, 로봇 메커니즘, 비전 (모니터링), 그리퍼, 제어 기술 등이 천차만별이다. 이는 로봇 사양이 비교적 표준화되어 있는 매크로 세계의 조작과는 크게 다른 점이다.

## 2. 마이크로-나노 세계의 특징

마이크로-나노 매니플레이션 기술은 말 그대로 마이크로-나노급의 물체를 조작(매니플레이션)하는 기술이다. 마이크로-나노 세계에서는 매크로 세계와 다른 현상이 존재하기 때문에, 중력을 직관적으로 의식하면서 조작하는 기술과는 크게 다르다.

표 1은 길이  $L$ 에 대한 여러 물리 파라미터의 마이크로 세계에서의 효과 (Scale 효과)이다. 물체의 운동 시에 길이  $L$ 에 대하여, 중력은  $L^3$ , 관성력은  $L^4$ 에 비례하고 점성력 (마찰력)은  $L^2$ 에 비례한다.

표 1. 스케일 효과

scale	Physical Parameters
$L$	길이
$L^2$	표면적, 압력, 점성력, 탄성력, 레이놀즈 수 ( $Re$ ), 열전달/열방사, 정전기력
$L^3$	체적, 질량, 중력
$L^4$	관성력, 전자기력, 운동량
$L^5$	관성 모멘트, 운동 에너지

따라서, 길이  $L$ 이 줄어들면 체적이 영향을 주는 힘 (중력, 관성력)보다 면적이 영향을 주는 힘(점성력, 마찰력)이 상대적으로 커진다. 따라서 미소 물체의 운동에서는 마찰을 무시할 수 없고 환경에 따라 큰 점성저항을 받는다 (점성력에 대한 관성력의 비율인 레이놀즈 수  $Re$ 는  $L^2$ 에 비례).

마이크로 세계에서는 단순히 스케일 효과의 차이뿐 아니라 환경에 따라 각 힘의 영향력이 바뀐다. 매크로 세계에서는 대상물의 질량에 비례하는 중력이 영향이 마찰력 등에 비해 너무 크기 때문에 물체의 질량, 중심위치만 고려하면 물체의 운동을 거의 예측할 수 있다. 그러나 마이크로 세계에서는

분위기(환경)에 따라서 여러 힘의 영향력이 바뀌기 때문에 마이크로 물체의 거동을 예측하기란 매우 어렵다. 마이크로-나노 매니플레이션에서 대표적인 표면력으로는, 입자와 입자, 입자와 표면이 극도로 접근하였을 때 발생하는 전자 기력인 분자간력 (van der Waals), 접촉부에 액체가 존재할 때 발생하는 표면장력, 물체간의 진하 분포에 따른 정전기력 등이 있다.

대상물의 크기에 따른 표면력과 중력의 영향을 이론적으로 조사해보면, 크기가 100 um 이하인 경우에는 중력에 비교하여 표면력이 지배적이다. 환경을 제어하면 표면력의 영향을 축소하고 용이한 매니플레이션이 가능하다. 예를 들어, 진공 상태에서는 습기에 의한 표면장력을 무시하고 van der Waals와 정전기력의 영향만을 고려하면 된다. 한편 습도를 높이면 정전기의 영향을 억제할 수 있어서 표면장력만을 고려하면 된다. 액체 중에서는 표면장력은 고려할 필요가 없고 정전기력에 의한 물체의 급격한 거동을 억제할 수 있으나 브라운 운동 등을 고려해야 한다.

마이크로화는 매니플레이션의 난점인 동시에 구동기나 센서 설계에 있어서 장점이기도 하다. 표 1에서 알 수 있듯이, 운동에너지는  $L^5$ 에 비례하므로 미소 에너지로도 구동하는 액츄에이터, 고감도의 센서를 만들 수 있고, 정전기력이나 전자기력이 전극간 거리의 제곱에 반비례하므로 쉽게 저전력으로 강전계와 강자장을 발생시킬 수 있다.

### 3. 방법론

마이크로-나노 매니플레이션의 조작 대상체는 전자 디바이스(부품), MEMS (미소전자기계시스템), 세포나 유전자, 새로운 나노 재료, 원자나 분자 등 매우 폭이 넓고 이에 따라 매니플레이션 기법 또한 다양하다. 그러나, 매니플레이션 기법 상으로 분류하면 접촉형, 비접촉형 등으로 나눌 수 있다.

#### 3.1. 접촉형 마이크로 매니플레이션

이것은 수 mm에서 수 um 크기의 대상물을 그리퍼 등의 작업 툴을 이용하여 접촉식으로 조작하는 기술이다. 기계전자 부품의 마이크로화가 진행됨에 따라 산업계에서는 오래 전부터 자동화 기술의 일환으로 개발되고 있다. 최근에는 기구의 소형화, 위치제어 정밀도의 향상, 고속화, 작업영역의 확대, 자유도의 향상 등이 이루어지고 있다. 기구면에서는 6자유도화, 소형화, 스테이지로 대상체를 같이 움직이는 자유도의 분산, 매니플레이터의 기계강성을 향상시키고 구조를 컴팩트하게 만들기 위한 병렬 메커니즘 등에 관한 연구개발이 이루어지고 있다. 그리고, 고속/정밀/넓은 작업영역을 동시에 만족시키기 위해 조동 (coarse motion)과 미동구동 (fine motion)

을 조합한 이중 서보계에 대한 연구도 활발하다.

자동화를 위해서는 그리퍼와 같은 작업 툴은 6자유도 캘리브레이션이 중요한데, 현재로서는 1 um 정도의 절대 위치 정도를 확보한 상태이다. 그리고, 마이크로 매니플레이션에서 절대위치정밀도를 올리는데에는 한계가 있으므로 인간의 원격조종 작업 시, 3차원, 고속, 다 시점 화상정보를 적극적으로 이용하는 방법이 고안되고 있다.

#### 3.2. 접촉형 나노 매니플레이션

이 기술에서는 SPM (주사형 프로브 현미경 Scanning Probe Microscope)의 프로브를 이용한 2차원 조작이 시도된 바 있고 대표적인 예가 90년대 초에 IBM연구그룹에 의한 원자 조작이다. 최근에는 직경 1 nm에서 수십 nm의 카본 나노튜브 (CNT)를 SPM탐침으로 조작하여 전자회로를 만드는 연구가 진행되고 있다. SPM을 이용한 매니플레이션은 높은 분해능을 얻을 수 있다는 장점이 있는 반면에 실시간 조작이 어렵다는 난점이 있다. SPM보다는 분해능이 떨어지지만 SEM이나 TEM과 같은 전자현미경을 사용하여 Chamber 내에 설치된 로봇 매니플레이터로 실시간/3차원 나노 매니플레이션을 하기도 한다. 또, SEM 내에서 SPM을 동시에 사용하여 고분해능과 실시간성을 동시에 달성하려는 연구도 있으나, 고분해능이 되면 필수적 각종 노이즈의 제거가 기술적 장벽이다.

마이크로-나노 공간에서 역각, 촉각 정보를 실시간으로 획득하여 작업 효율을 향상시키려는 시도는 오래 전부터이다. 예를 들어, 3축 힘 센서를 소형화하여 그리퍼의 안정 파지에 활용하는 연구이며, 현재 이론치 0.5 uN의 분해능도 가능하다. 또한, 반사된 레이저 빔에서 얻어진 변위로부터 2 nN 정도의 미세한 힘을 제어한 사례도 있다. 그 외에도 SEM화상으로부터 CNT 프로브의 형상 변화를 관찰하여 pN 단위의 힘을 계측한 연구사례도 있다.

#### 3.3. 비접촉형 매니플레이션

이 기술은 미소 대상물에 작용하는 힘의 형태에 따라 광 핀셋, 초음파, 모세관 현상, 전기영동, 유전영동 등의 방법이 있다. 특히, 광 핀셋을 이용한 방법의 경우, 세포 등의 액상조작에 활용되고 있으며, 레이저를 직접 비추는 것을 피하기 위해 우선 레이저로 마이크로 툴을 비접촉으로 조작하고 이 툴을 이용하여 대상물을 접촉 조작하는 방법도 있다.

조작물의 수가 많아지면 일일이 개별조작하는데 한계가 있기 때문에 자기조직화를 이용하여 대량으로 미소물을 조작한다. 자기조직화에는 계면에 작용하는 힘 (친수성, 소수성, 표면장력, 전하 등), 전기장의 힘, 화학적인 결합력 (수소결합, 배위결합 등) 등을 이용한다. 현재는 일부 패턴의 형성에는 성공하였으나, 기능설계에 자기조직화 현상을 응용한 예는 없다.

#### 4. 응용 분야

다음은 마이크로-나노 매니플레이션의 대표적인 응용 분야를 간략히 설명하고자 한다.

##### 4.1. 마이크로 부품 조립

마이크로 부품이 대량 생산되면서 이를 검사하고 조립하기 위한 로봇 장비가 절실히 요구되고 있다. 조립용 로봇 장비는 조작 대상물의 크기가 수백 um 에서 수 um이며, 로봇의 위치 정밀도는 수um에서 수백 nm급이 요구된다. 대상물이 액적일 경우는 부피가 1 nl 정도, 정밀도는 10 pl 정도이다. 일본 Micromachine Center의 앙케이트 조사에 의하면, 산업현장에서는 200 um 정도의 크기만 되어도 조립이나 검사에 애로를 겪고 있으며 생산성 저하의 요인이 된다고 한다.

그림 1은 이동형 마이크로 로봇이 미세부품 조립 작업에 적용된 사례이다. 독일 Karlsruhe 대학에서 유럽내의 다른 산학연 기관과 공동으로 광부품의 자동화 조립 시스템을 개발하였다. 조립대상은 광부품이고 xy 방향의 부품정렬에 있어서 1um 이내의 절대 위치 정밀도를 가진다. 작업에 따라 여러 개의 조작 툴을 바꿀 수 있고 5 um 의 반복정밀도를 가지며, 힘 센서가 부착되어 있어 광부품 조립 작업 시 힘 제어가 가능하다.

그림 2는 마이크로 가공 기술과 마이크로 조립 기술을 데스크톱 크기로 통합한 일본 MEL의 Micro Factory이다. Micro Factory는 소형 부품을 기계가공하는 초소형 선반, 프라이스반, 프레스기와, 가공한 미세 부품을 운반하는 반송용 로봇팔, 부품을 조립하는 로봇 손 (Finger는 2개)으로 구성되어 있다. 이 Micro Factory를 이용하여, 축 직경 100 um, Ball 직경 200 um, 외경 900 um의 베어링을 원격조종으로 조립하였다.

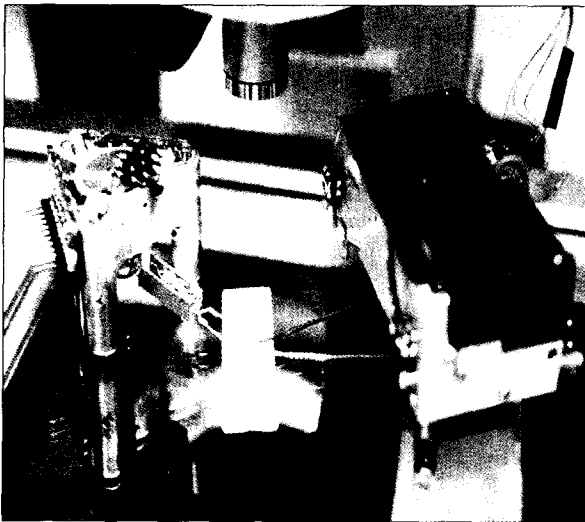


그림 1. 독일 Karlsruhe 대학의 MINIMAN

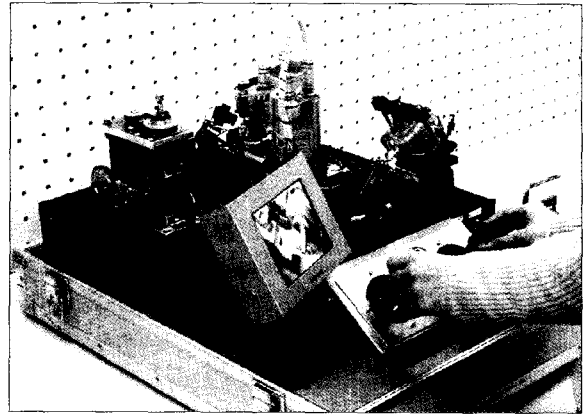


그림 2. 일본 MEL의 Micro Factory

그밖에도 마이크로 조립에 있어서 인간의 손동작을 구현하고자 하는 연구도 있다. Tanikawa 등은 3장의 판으로 구성된 압전구동 병렬형 매니플레이터를 개발하였는데, 인간의 젓가락 동작을 모방하여 직경 5um 유리구슬의 점착 조립을 한 바 있다[3].

##### 4.2. 세포 조작 자동화

축산업에서 핵 이식 작업의 효율을 높이기 위해서 자동화 연구가 진행 중이다. 여기서 자동화란 공급된 세포의 포착과 세포의 자세 제어, 세포막의 특정한 위치에서의 발아, 불필요한 핵의 제거, 새로운 핵의 주입, 융합 전극을 이용한 고정, 융합된 세포의 제거와 배양기로의 반송, 이러한 일련의 작업을 수행하는 매니플레이션 기술, 센서와 화상 처리 기술, 마이크로 환경에서의 세포의 대량 반송 및 처리 기술을 말한다.

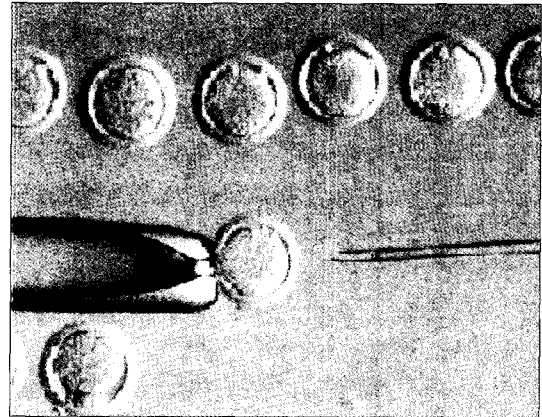


그림 3. 세포 내 핵 자동이식 조작

그림 3은 마이크로 매니플레이터를 이용한 세포 내 핵 이식의 모습이다. 조작 대상인 수정란의 크기는 약 120 um이며, 세포를 피펫으로 고정한 후 세포막에 구멍을 뚫어 핵을 꺼낸 후 새 핵을 주입하고 마지막으로 전극으로 전압을 걸어 핵을 융합하는 조작이다. 현재 이러한 조작은 숙련

된 조작자가 수동으로 하고 있으며, 1회당 조작시간은 5~10분 정도 걸린다. 또한 융합 성공률은 복제 소의 핵 이식의 경우 50~70%이며, 분열 후 배아가 형성되어 체 내에 착상되고 최종적으로 분만, 생존할 확률은 많아야 5% 정도이다. 이처럼 세포조작 기술은 고도의 기능을 지닌 소수의 숙련자만이 가능하며 시간이 오래 걸리는데다 성공률 또한 극히 낮다.

세포 조작을 위해서는 미세 피펫 및 바늘을 이용한 집속식 기술, 세포 표면의 전하와 외부 전계와의 상호작용을 이용한 전기영동(electrophoresis) 기술, 분극 전하와 외부 전계와의 상호작용을 이용한 유전영동(dielectrophoresis) 기술의 개발이 필요하다. 예를 들어, 기존의 집속식 매니플레이션 방법 외에도 제어된 전계 속에서 대상물에게 유도전하를 지니게 하여 이동 및 가공을 하는 비접촉형 매니플레이션 기술의 개발이 요구된다.

#### 4.3. 나노 소자의 조작 및 조립

DNA는 2nm 정도의 두께에 길이가 수 um~수nm 의 얇고 긴 형상이다. DNA 는 보통 현미경 아래의 수용액 속에 놓여지므로 집근 방법이 한정된다. 이러한 생체 고분자 및 DNA 조작을 위해 SPM을 이용한 집속형 방식이나 레이저 광압력을 이용한 비접촉 방식으로 대상을 포획, 결합하는 방법이 쓰여 지고 있다.

그림 4는 SPM을 이용한 DNA 조작의 한 예로서 DNA 절단 작업을 보여주고 있다. SPM을 이용한 집속식 방법을 이용하면 생체시료의 물리적인 특성을 측정함과 동시에 분자간의 간섭력도 측정할 수 있어 생체 분자의 조작에 있어 이점이 있다. 그 밖에도 정전기력을 이용하여 세포를 회전시켜서 정렬시키는 연구사례도 있다.

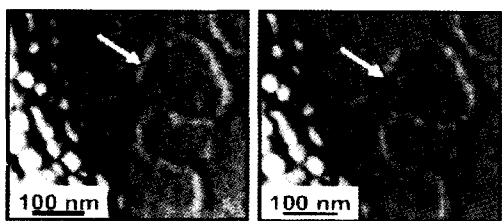


그림 4. SPM을 이용한 DNA 절단

그림 5는 미국 USC에서 수행한 연구로서 무절서한 금 입자를 SPM을 이용하여 밀어서 이동시켜 USC라는 글자를 쓰고 있다. 그밖에도 미국 IBM의 연구그룹은 CNT 조작의 예를 보여준 바 있으며, 미국 UNC대학에서는 SFM(Scanning Force Microscope)을 이용하여 나노 조작물에 대한 영상을 제공하고 물체를 조작한 바 있다. 햅틱 장치로 Sensable Technologies 사의 6자유도 PHANTOM을 사용하여 사용자에게 나노 영역의 촉각 피드백을 느낄 수 있도록 한 것이 시스템의 특징이다.

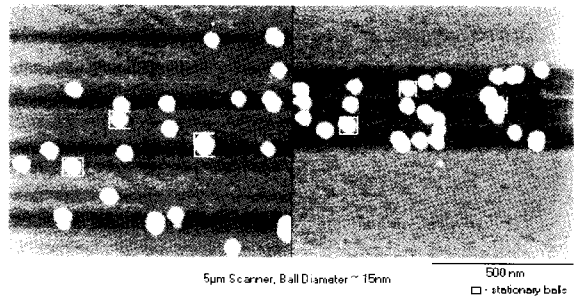


그림 5. 미국 USC의 나노 입자 조립

### 5. 결론

이상, 간략하게 마이크로-나노 매니플레이션에 대해 알아보았다. 본 논문에서는 지면 관계상 초소형 마이크로-나노 로봇에 대해서는 언급하지 않았으나, 초정밀 로봇 기술과 초소형 로봇 기술은 밀접한 관련이 있으며 상호보완적이다. 21세기에는 기존의 매크로 로봇을 보다 적극적으로 산업 현장에 도입하는 한편, 로봇 산업의 새로운 패러다임에도 진취적인 자세로 도전해야 할 때이다. 본 논문에서 다룬 마이크로-나노 로봇은 로봇산업은 물론 전 산업을 근본적으로 업그레이드 시키는 원동력이 될 것이다.

### 참고문헌

1. T. Sato, T. Kameya, H. Miyazaki, Y. Hatamura, "Hand-Eye System in Nano Manipulation World," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.59-66, 1995
2. A. Codourey, M. Rodriguez and I. Pappas, "Human Machine Interaction for Manipulations in the Microworld," *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp.244-249, 1996.
3. T. Tanikawa and T. Arai, "Development of a Micro Manipulation System Having a Two Fingered Micro-Hand," *IEEE Trans. On Robotics and Automation*, vol. 15, no. 1, pp. 152-162, 1999.
4. M. Sitti, and Hashimoto, "Controlled pushing of nanoparticles: modeling and experiments," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol.5, pp.199-211, June 2000.
5. K. Kim and D. H. Kim, "Hybrid Microassembly System for Three-Dimensional MEMS Components", *International Workshop on Micro Factory*, Sept 2002.

저자소개



〈김 경 환〉

- 1992년 연세대학교 전기공학과(공학사).
- 1994년 일본 동경대학 전기공학과 (공학석사).
- 1997년 동경대학 전기공학과(Ph.D.).
- 1997년~1999년 미국 University of

Wisconsin-Madison과 Texas A&M University에서 연구원.

- 1999년~2002년 6월 한국과학기술연구원(KIST) 선임연구원.
- 2002년7월부터 (주)우신기전의 기획이사로 재직 중.
- 주요 관심 분야 : 마이크로-나노 로봇, 반도체/크리스탈 장비, 휴먼 인터페이스 등.



〈김 덕 호〉

- 1998년 포항공과대학교 기계공학과 졸업(공학사).
- 2000년 서울대학교 기계설계학과 졸업 (공학석사).

• 2000년~현재 한국과학기술연구원 (KIST) 미래기술본부 마이크로시스템 연구센터 연구원.

- 주요 관심분야 : 마이크로-나노 로봇, 마이크로-나노 매니플레이션, MEMS, 차량동역학 및 제어.



제어 · 자동화 · 시스템공학회지 기사모집 안내

명실상부한 산, 학, 연의 정보 교환의 장으로서 학회지가 회원님들에게 보다 도움이 되는 실질적인 정보를 제공하고자 아래와 같은 기사를 모집합니다. 회원님들의 적극적인 참여를 부탁드립니다.

- 1) 회원사 동향, 신제품 소개, 회원 동향 정보
  - 특별회원사에서 새로 개발한 신제품의 소개, 회사 인사 사항, 회사 홍보내용, 회사 뉴스 등
  - 회원 중에서는 직장 변동, 연구회 활동결과, 수상실적, 기타 홍보내용 등
- 2) 제어 · 자동화 · 시스템공학 분야 뉴스
  - 국내, 국외 언론 매체에 게재된 내용 중에서 새로운 정보
  - 제어 · 자동화 · 시스템공학 분야의 소개 및 홍보를 담은 내용
- 3) 특별기고란 투고 안내
  - 국외 간행물에 게재된 기사나 기술동향 중에서 흥미로운 내용
  - 흥미있는 제어 · 자동화 · 시스템공학 분야의 홈페이지 주소 및 내용
- 4) 연구소, 연구팀, 연구실 소개 기사
- 5) 학회 회원 최신 박사학위 논문초록 접수(학회 홈페이지 참조)
- 6) 국내외 학술대회 안내용 call for paper (학회 홈페이지 및 학회지에 게재)
- 7) 공개 채용 안내를 위한 자료 (학회 홈페이지 및 학회지에 게재)
  - 제어 · 자동화 · 시스템공학 분야의 교수 공채 공고
  - 회원사의 사원 모집 공고, 회원 중에서 필요한 인력 채용 공고
  - 벤처 기업 및 중소기업에서의 필요 인력 채용 공고
  - 기타 회원 대상 홍보 내용

기사는 MS-word, 아래아한글 파일로 작성하여 학회사무국 magazine@icase.or.kr 로 보내주시면 감사하겠습니다.