

電磁力 구동 마이크로 액츄에이터

안 종 혁*

(*Microelectronics Research Center
Georgia Institute of Technology)

1. 머릿말

마이크로(Micro) 領域에서 마이크로 액츄에이터(Microactuator)를 구동시키는 여러 구동원리에는 靜電力 구동, 電磁力 구동, 超音波 구동 및 바이메탈 구동 등이 있으나, 각 구동원리는 구동 範圍, 요구되는 구동력, 에너지 消耗率, 응답속도, 주변환경 適應力 및 集積(Integration) 實現性 등에 따라 각각의 장, 단점을 소유하고 있다. 따라서 마이크로 액츄에이터를 設計하는 경우에 여러 구동원리 중에서 특정 마이크로 액츄에이터의 應用分野에 잘 부합하는 구동 특성을 갖는 구동원리가 먼저 결정되어야 한다[1~3].

여러 구동 원리중에서 靜電구동력은 수 um의 구동범위를 갖는 마이크로 영역에서는 높은 스케일링(Scaling), 적합한 集積構造 및 적은 消耗電力 등의 長點 때문에 지금까지 마이크로 영역에서 가장 많이 응용된 구동력 중의 하나이었다[4]. 그러나 만일 구동범위가 수십 um 이상 요구되는 應用分野인 경우에는 靜電 구동력은 수 um의 마이크로 구동영역에서 갖게되는 스케일링의 長點을 거의 유지할 수 없게 된다. 더욱이 靜電力은 공기중의 먼지 등 微粒 부유물을 강하게 흡착하는 특성이 있는데, 이는 수 um의 구동영역에서 우수한 특성을 갖는 靜電구동력의 공기중에서의 구동을 현저하게 제한하게 된다. 또한 靜電 구동력은 일반적으로 높은 구동전압(수 um의 구동영역에서 수십 volt가 요구됨)을 요구하고 있는데, 이는 극간 絶緣破壞 때문에 도

전성 유체나 액체를 구동시키는 경우나 또 위험한 전기 쇼크를 피해야 되는 경우(의용 전자 응용 등)에는 특히 부적절하다. 따라서 이러한 靜電구동의 구동제약과 응용의 한계를 극복할 수 있는 새로운 구동력에 대한 관심과 요구가 극히 증대되어져 왔다.

메크로(Macro) 領域에서 電磁力 구동은 가장 보편적으로 사용되고 있는 구동원리인데, 마이크로 영역에서는 마이크로 인덕터의 不在, 제작의 난이성 및 낮은 구동 효율 뿐만 아니라, 초기 마이크로 머신(Micromachine) 구동원리 연구의 지극히 偏向된 연구 경향(주로 이론적 연구 규명에 치중함) 때문에 電磁力 구동 마이크로 액츄에이터의 實現이 지연되어져 왔다.

그러나 최근에 이르러 전자력 구동의 제한성을 극복할 수 있는 연구결과들이 속속 발표되면서, 마이크로 영역에서 電磁力 구동의 장점과 우수성이 증명되고 있으며[5, 8-18], 또 응용분야 및 시스템의 요구에 따라 電磁力 구동 마이크로 액츄에이터 및 센서의 실현이 가속화되고 있다. 특히 앞에서 언급한 바와같이 靜電구동력의 응용이 극히 제한 받는 먼지가 있는 공기중, 도전성유체 또는 액체를 구동해야 하는 경우, 큰 구동 범위를 요구하는 경우 및 높은 구동전압을 피해야 되는 경우나 얻을 수 없는 경우에 적합한 구동력으로 고려되어지고 있다.

이외에도 電磁力 구동원리는 마이크로 영역에서 에너지를 얻을 수 있는 發電機로써의 응용이 기대될 뿐만 아니라, 光電磁(Magneto-optic) 응용에도 많은 가능성을 가지고 있다.

電磁力 구동이 필요한 곳에서 電磁力을 얻기 위하여 電磁力 구동 마이크로 액츄에이터는 集積 인덕터 素子が 필수적으로 필요하게 되며, 따라서 電磁力의 발생이 필요한 미세한 곳에 電磁界를 가해 줄 수 있어야만 한다. 궁극적으로 평면 完全 集積 電磁力 구동 마이크로 액츄에이터의 실현은 얼마나 적절한 평면 集積 인덕터 素子を 실현 할 수 있는가에 절대적으로 좌우된다고 볼수 있다. 따라서 먼저 平面 集積 인덕터 素子에 대해서 소고해 보기로 하자.

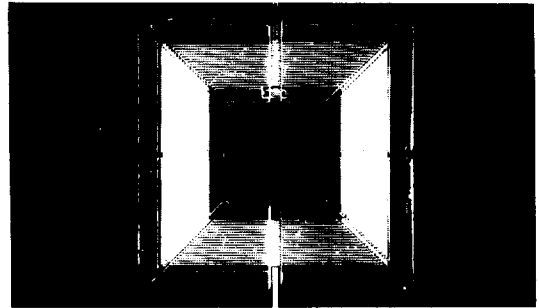
2. 平面 集積 인덕터 素子 (Planar Integrated Inductive Component)

지금까지 平面 集積 인덕터 素子の 실현은 무엇보다도 3차원 인덕터 구조의 평면 제작의 난이성 때문에 크게 제한을 받아 왔다. 일반적으로 절연 평판위에 스파이럴 형태의 코일을 만듦으로써 평면 集積 인덕터를 주로 실현하여 왔는데[6, 7], 높은 코일 저항 및 발생자속의 정확한 집속 기능의 결핍으로 마이크로 액츄에이터의 구동 소자로써의 응용에 많은 제한이 따른다. 그러나 만일 3차원적인 코일 구조를 포함하는 인덕터 소자를 마이크로 머신 제작기술을 이용하여 제작할 수 있고, 또 박막형 코아(Core)를 포함할 수 있다면 코일에서 발생된 電磁界는 이 코아를 통하여 電磁力이 필요한 미세한 곳에 정확하게 전달할 수 있게된다. 그러므로 박막형 코아의 도입은 電磁力 구동 마이크로 액츄에이터의 응용을 위한 集積 인덕터에서 아주 중요한 역할을 하게된다.

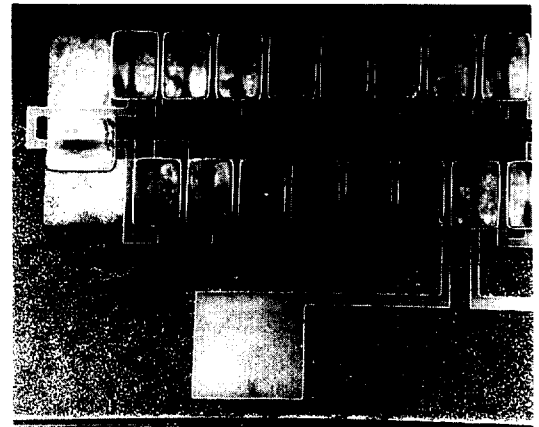
뿐만 아니라 集積 인덕터는 가능한 높은 인덕턴스 및 Q-Factor, 우수한 안정성을 가져야 하고, 또 제작이 용이하여야 한다. 그러나 무엇보다도 높은 인덕턴스와 Q-Factor를 갖는 平面 集積 인덕터를 실현하는 것이 극히 어려운데, 이는 요구되는 많은 고일의 횡수와 특히 인덕터의 3차원적인 구조 때문이다. 최근에 이르러서 마이크로 머신 제작 기법은 3차원적 구조인 스파이럴 및 범용 솔레노이드 형태의 인덕터를 니켈/철 과멀로이(Permalloy)의 두꺼운 박막형 코아를 도입함으로써 平面 集積된 인덕터 素子の 實現을 가능케 하여주었다[5, 8-10]. 뿐만 아니라 인덕턴스와 Q-Factor를 높이고, 電

磁場을 코아 內에 제한 함으로써 인덕터 부근에 있는 電子集積回路(IC)에 대한 電磁場의 영향을 극소화하고, 또 필요한 곳에 電磁場을 案内하는 기능을 강화시켰다. 이 마이크로 머신 제작기법으로 제작된 여러구조의 平面 集積 인덕터 素子들은 다양한 마이크로 센서 응용도 가능케 할 것이다.

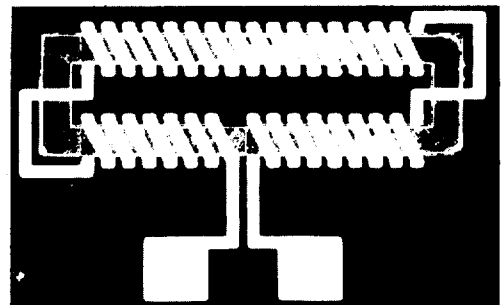
그림 1에서 마이크로 머신 기술을 이용하여 제작



(a) 스파이럴 形態



(b) Meander 形態



(c) Toroidal 形態.

그림 1. 環形 Ni/Fe 코아 電磁回路를 수반하는 마이크로 머신 技術로 製作된 平面集積 인덕터 素子

된 環形 코아의 電磁回路를 수반하는 Spiral(8), Meander(9) 및 Toroidal(10) 형태의 平面 集積 인덕터 素子들의 구조를 보여주고 있다.

3. 電磁力 구동 마이크로 액츄에이터 研究 動向

앞장에서 언급한 바와같이, 電磁力 구동 마이크로 액츄에이터의 실현은 마이크로 인덕터 素子の 실현에 의하여 많은 制約을 받아왔다. 특히 높은 전류를 흘릴 수 있는 集積된 인덕터 素子の 製作은 集積回路製作 技術의 한계 때문에 거의 실현이 불가능하다고 보았으며, 따라서 초기에 보고된 마이크로 액츄에이터는 電磁場을 발생시키는 인덕터 소자와 可變구동소자를 별도로 제작한 다음에 이를 조립하는 Hybrid Assembly 방법을 주로 채택하였다. 이와같은 방법으로 超傳導 박막형 코일과 영구자석 사이의 Meissner 효과를 이용하여 浮上 마이크로 영구자석 슬라이더가 실현되어졌으며(11), 그림 2는 超傳導 浮上 마이크로 액츄에이터를 보여주고 있다. 또는 영구자석을 平面 스파이럴(Spiral) 형태의 코일 위에 얹어놓고, 스파이럴 코일에 전류를 흘려서 발생하는 電磁場과 영구자석 사이에 발생하는 힘을 이용하여 可變 영구자석을 구동시키는 형태의 액츄에이터가 실현되어 졌다. 이와같은 기법을 이용하여 그림 3에서 보여주는 축방향 가변 액츄에이터(12) 및 슬라이딩 모터(13)가 실현되어 졌다. 그러나 위에 열거된 액츄에이터는 電磁場을

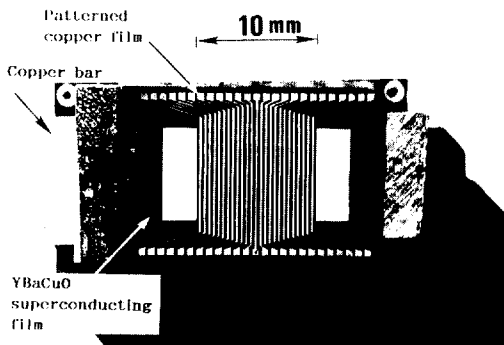
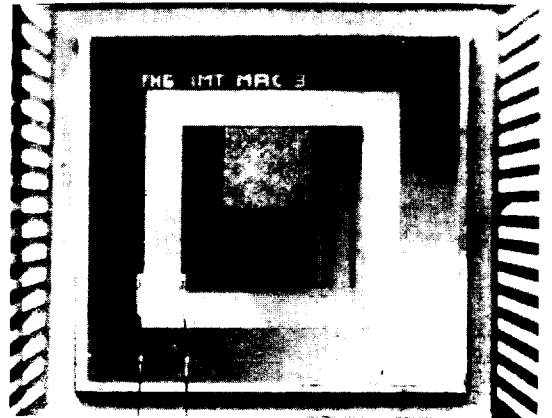
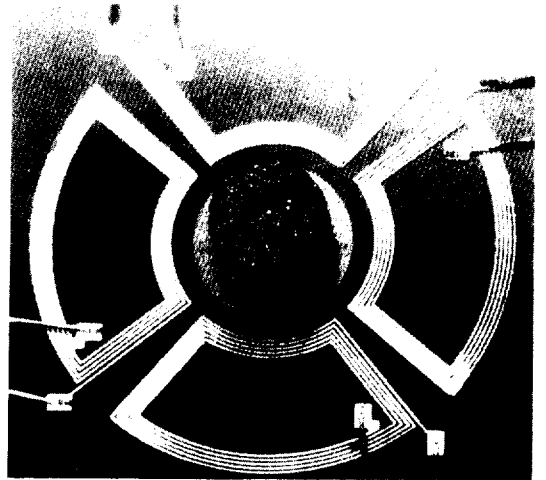


그림 2. 超傳導 박막형 코일과 영구자석 사이의 Meissner 效果를 이용한 浮上 마이크로 영구자석 슬라이더.



(a) 축방향 可變 액츄에이터

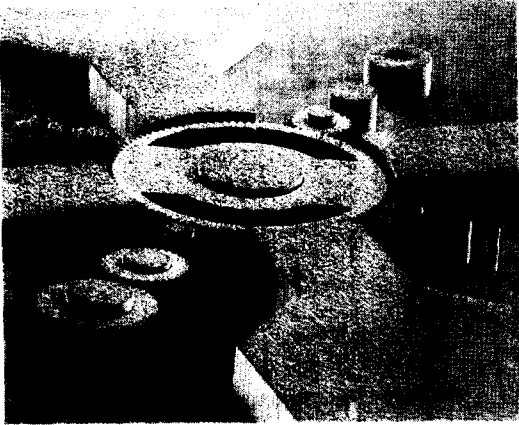


(b) 슬라이딩 모터.

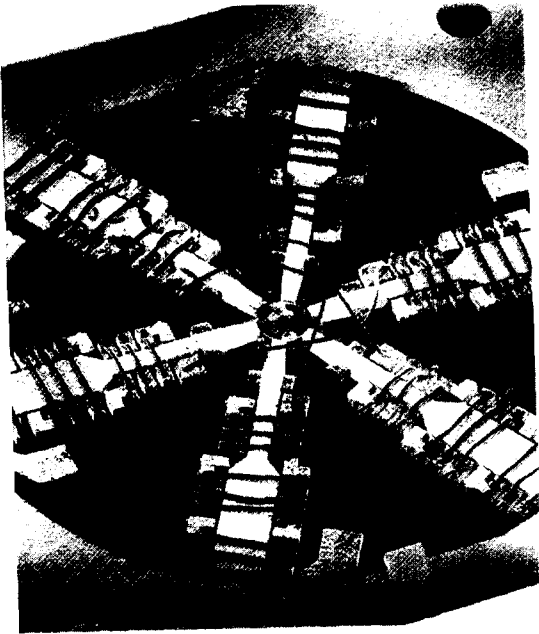
그림 3. 스파이럴 코일과 영구자석 사이에서 발생하는 힘을 이용한 電磁力 구동 액츄에이터

引導할 수 있는 박막형 코아를 導入하지 않고, 평면 스파이럴 코일을 이용하였기 때문에, 電子回路와의 EMI 억제 및 정확한 액츄에이터의 구동이 용이하지 아니하였다.

그러나 높은 투자율을 갖는 박막형 코아를 도입하여 電子부를 필요한 곳에 인도할 수 있을 뿐만 아니라, 기계적인 마이크로 구조를 구성코저하는 새로운 연구가 진행되어져 왔는데, 미세구조를 만들기엔 적합한 LIGA(Lithography & Galvanoforming)공정을 사용하여서 回轉子 기어와 軸을 만든 후, 이를 서로 조립하여 마이크로 모터 구



(a) 외부 회전자계 공급형



(b) Wire Bonding 코일 界磁를 이용한 마이크로 모터(회전자 直徑 423 μm)

그림 4. LIGA 공정을 이용하여 제작된 電子力 구동 마이크로 모터

조를 만들고, 외부에서 회전자계를 가하여 회전을 구동시키는 외부회전자계 공급형 마이크로 모터(14)와 Wire Bonding 기술을 이용하여 界子코일을 제작한 마이크로 모터(15)가 그림 4에서 보여주는 바와 같이 실현되었다. 또한 스파일럴 코일과

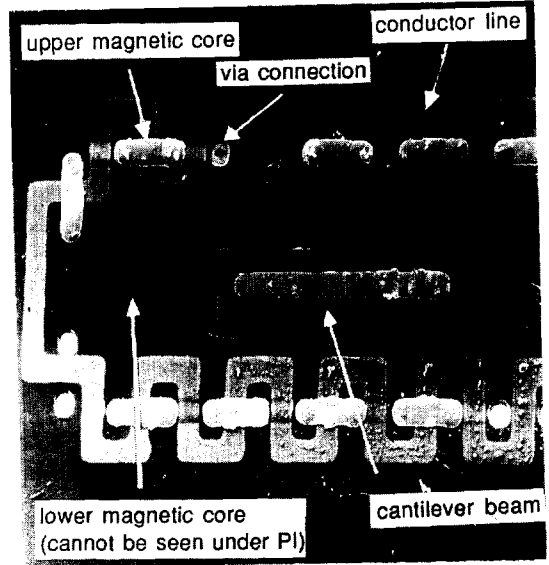
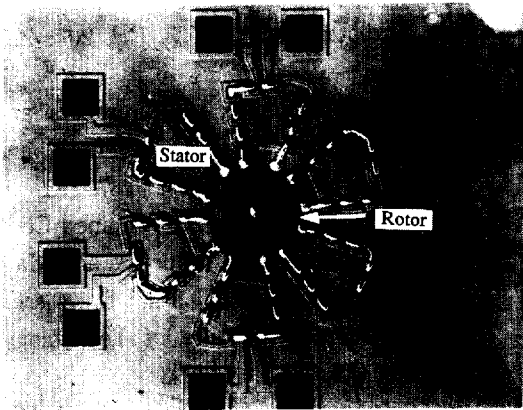


그림 5. 集積 인덕터 素子와 表面 마이크로 머신 기술을 이용하여 製作된 Cantilever Beam을 수반하는 完全集積 마이크로 액츄에이터.

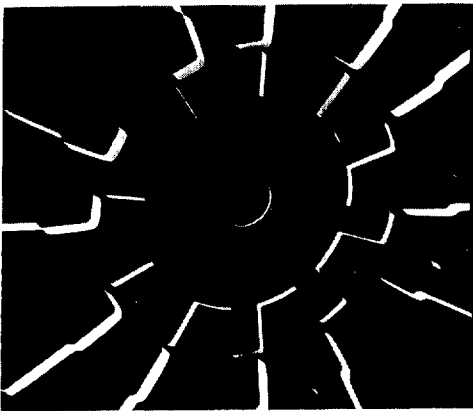
Bulk마이크로 머신 기술을 이용하여 Ni/Fe 코어의 Beam과 Tip을 이용한 액츄에이터가 제작되었다(16).

위에 언급된 거의 모든 액츄에이터들은 製作 工程이 복잡하고, 무엇보다도 電子集積回路(IC)를 만드는 工程과 竝立할 수 없기 때문에 마이크로 구조가 각계되는 많은 製作, 工程 및 운용상의 長點을 激減시키고 있다.

이를 극복하기 위하여서는 電子集積回路(IC) 工程과 竝立할 수 있으며 완전히 集積工程만을 사용하여 제작할 수 있는 집적 電磁力 구동 액츄에이터의 실현이 절실히 요구 되어졌다. 이와같은 공정은 완전히 集積된 인덕터 素子들(8-10)을 이용하여 가능케 되었으며, 表面 마이크로 구조 製作工程(Surface micromachining technique)을 사용하여서 최초의 完全集積(Fully integrated)된 Cantilever Beam 形態의 電磁力 구동 액츄에이터(17, 18)가 그림 5에 보여주는 바와같이 실현되어졌으며, 이를 통하여 또한 새로운 많은 完全集積 電磁力 구동 액츄에이터의 研究分野가 열리게 되었다. 최근에 이르러서는 마이크로 모터의 界子를 集積 인덕터소자를 사용하여 제작한 회전자 직경이 500



(a) 電磁力 구동 마이크로 모터(회전자 직경 500 um)



(b) 회전자 및 계자의 SEM

그림 6. 마이크로 모터의 계자를 集積 인덕터素子를 이용하여 제작한 電磁力 구동 마이크로 모터

um되는 集積 電磁力 구동 마이크로 모터(19)가 그림 6에서 보여주는 바와같이 실현되어졌고, 기능적으로 작동하는 모터의 우수한 특성 때문에 조만간 그 실용적인 응용을 바라보고 있다.

電磁力 구동 마이크로 액추에이터의 應用分野 및 그 展望에 대하여 간략하게 살펴본다.

3.1 마이크로 벨브, 펌프 및 믹서 응용

미세한 화학공정, 제약공정, 의용전자공학분야 및 프린터에 응용할 수 있는 微細量의 도전성이나 비도전성 액체를 구동하는 액추에이터의 응용이 기대되어진다.

3.2 마이크로 모터, 마이크로 릴레이, 마이크로 Gripper 및 位置調整機 應用

이미 실현된 電磁力 구동 마이크로 모터는 큰 구동력 때문에 압축고속 펌프로써 고속고압으로 액체를 구동할 수 있기 때문에 잉크 Jet 프린트나 섬유 화학 공정의 응용이 기대될 뿐만 아니라, 특히 수만 rpm의 구동속도가 가능하며 또 회전자의 磁氣浮上形狀 때문에 3차원 感知 加速度 센서의 응용이 기대된다. 초고주파에서 구동 스위치로 사용되는 여러형태의 범용 電磁力 구동 릴레이가 集積형태의 마이크로 릴레이로 실현되어지면 통신계통의 응용이 기대되어지며, 마이크로 Gripper 및 위치조정기는 半導體 産業 分野에서 Bonding Wire등 微細한線이나 構造物의 위치조정에 응용이 가능하다.

3.3 集積 마그네틱 微粒子 加速度, 分離機 및 카운터 應用

생물 및 응용 전자공학에서 영구자석에서 발생하는 電磁場을 이용하여 분석코저하는 시료에서 선별코저하는 마그네틱 反應 微粒子를 加速하고 分離하는 기술은, 시료에서 미립자를 신속히 분리할 수 있는 가장 편리한 방법으로 알려져있다. 영구자석 대신에 集積 인덕터를 이용한 集積 마그네틱 微粒子 加速機, 分離機(zo) 및 카운터는 의용 공학 분야에서 큰 관심을 불러일으키고 있는데, 이는 集積 인덕터가 이들 器械의 소형화, 集積可能, 센서의 附着可能 및 大量生産을 가능하게 하기 때문이다. 예를 들면 HIV(AIDS)나 어떤 병원균의 保有診斷을 좀더 신속하고 정확하게 할 수 있는 것을 가능케하여 줄 것이다.

3.4 마그네틱 헤드, 光電磁 모듈레이터, 가속도 센서, 압력센서 및 近接位置 측정센서 應用

電磁力 구동 액추에이터와 信號處理용 센서 및 모듈레이터의 결합은 새로운 센서 응용을 가능케한다. 특히 마그네틱 헤드와 위치 조정기의 결합은 컴퓨터 주변 메모리의 集積度를 극히 증대시켜 줄 것이다. 이외에도 자동차에 사용되는 많은 센서에의 응용이 集積 인덕터를 이용하여 가능케 되었다. 특히 다소 劣惡한 환경에서 耐久性이 있는 다양한 종류의 센서로써의 응용이 크게 기대되고 있다.

위에 열거한 응용 분야 외에도 電磁力을 이용하

는 MEMS는 미세한 구조에서 電磁界를 요구하는 어느 곳에서든지 集積을 가능케하는 새로운 研究分野를 열었으며, 또 많은 새로운 산업기기 응용이 가능케 되리라고 기대되어진다.

4. 맺음말

최근 集積 인덕터 소자와 電磁力 구동 마이크로 액츄에이터의 實現은 마이크로 머신의 實用化를 좀더 구체화 시켰고, 또한 이를 활용한 많은 새로운 응용 분야를 열어놓았다.

특히 마이크로 영역에서 電磁力 구동은 靜電 구동력의 응용이 극히 제한받는 면지가 있는 공기 중, 도전 유체나 액체의 구동, 큰 구동 범위를 요구하는 경우 및 높은 구동전압을 피해야 되거나 얻을 수 없는 경우에 적합한 구동력으로 고려되고 있다. 電磁力 구동 마이크로 액츄에이터와 센서가 集積電子回路 IC와 함께 集積됨으로써 電磁力 구동 마이크로 시스템을 구성하게 되면, 마이크로 머신 응용의 주도적인 역할을 담당하게 될것으로 예상된다.

특별히, 최근에 마이크로 머신의 여러 연구 분야 중에서 Micro-Electro-Magnetic-Mechanical-System(MEMS) 분야가 연구의 최대 관심사로 떠오르며, 完全集積 電磁力 구동 액츄에이터와 센서의 開發, 實現 및 應用에 여러 세계적인 굴지의 연구소 및 회사가 속속 참여하고 있다는 것은 시사해주는 바가 크다고 하겠다.

참 고 문 헌

[1] H. Fujita and K. J. Gabriel, "New Opportunities for Micro Actuators", Proc. Transducers '91, International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, pp. 14-20, San Francisco, Ca, June 1991

[2] W. Benecke, "Silicon-Microactuators: Activation Mechanisms and Scaling Problems", Proc. Transducers '91 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, PP. 46-50, San Francisco, Ca, June 1991

[3] I. J. Busch-Vishniac, "The Case for Mag-

netically Driven Microactuators", Sensors and Actuators, Vol. A, 33, PP. 207-220, 1992

[4] W. S. N. Trimmer, "Microrobots and Micromechanical Systems", Sensors and Actuators, Vol. 19, PP. 267-287, 1989

[5] Chong-Hyuk Ahn, "Micromachined Components as Integrated Inductors and Magnetic Microactuators", Ph. D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, U. S. A. 1993

[6] R. Rodriguez, J. M. Dishman, F. D. Dickens, and E. W. Whelan, "Modeling of Two-Dimensional Spiral Inductors", IEEE Trans on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. CHMT-3, No. 4, pp. 535-541, 1980

[7] W. A. Roshen and D. E. Turcotte, "Planar Inductors on Magnetic Substrate", IEEE Trans, on Magnetics, Vol. 24, No. 6, pp. 3213-3216, 1988

[8] Chong-Hyuk Ahn and Mark G. Allen, "A Planar Micromachined Spiral Inductor for Magnetic Microactuator Applications", Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol.3. No.3, pp.1-9 1993, in Press.

[9] Chong-Hyuk Ahn and Mark. G. Allen, "A New Toroidal-Meander Type Integrated Inductor with a Multilevel Magnetic Core", IEEE Transaction on Magnetics, MAG-30, No.1. 1994.

[10] Chong-Hyuk Ahn, Yong-Jun Kim, and Mark G. Allen, "A Fully Integrated Micromachined Toroidal Inductor with a Nickel-Iron Magnetic Core(the Switched DC/DC Converter Application)", Transducers '93, International Conference on Solid-State Sensors and actuators, pp. 70-73, 1993

[11] Yong-Kwon Kim, M. Katsurai and H. Fujita, "Fabrication and Teesting of a

- Micro Superconducting Actuator Using the Meissner-Effect”, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, pp. 61-66, Napa Valley, U. S. A, Feb. 1990
- [12] B. Wagner and W. Benecke, “Microfabricated Actuator with Moving Permanent Magnet”, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, pp. 27-32, Nara, Japan, Jan. 1991
- [13] B. Wagner M. Kreutzer, and W. Benecke, “Linear and Rotational Magnetic Micromotors Fabricated Using Silicon Technology”, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, pp. 183-189, 1992
- [14] H. Guckel, K. J. Skrobis, T. R. Christenson, J. Klein and S. Han, B. Choi, E. G. Novell, and T. W. Chapman, “Fabrication and Testing of the Planar Magnetic Micromotor”, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 1, No. 3, pp. 135-138, 1991
- [15] H. Guckel, T. R. Christenson, K. J. Skrobis, T. S. Jung, J. Klein, K. V. Hartojo, and I. Widjaja, “A First Functional Current Excited Planar Rotational Magnetic Micromotor”, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, pp. 7-11, Fort Lauderdale, Florida, February 7-10, 1993.
- [16] K. Yanagisawa, A. Tago, T. Ohkubo, and H. Kuwano, “Magnetic Micro-Actuator”, Proc. IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 120-124, Nara, Japan, 1991.
- [17] Chong-Hyuk Ahn and Mark. G. Allen, “A Fully Integrated Micromagnetic Actuator with a Multilevel Magnetic Core”, Technical Digest, IEEE Solid State Sensor and Actuator Workshop, pp. 14-18, Hilton Head, SC, June 1992.
- [18] Chong-Hyuk Ahn and Mark. G. Allen, “A Fully Integrated Surface Micromachined Magnetic Microactuator with a Multilevel Meander Magnetic Core”, IEEE Journal of Micro Electro Mechanical Systems, Vol. 2, No. 1, pp. 15-22, 1993.
- [19] Chong-Hyuk Ahn, Yong-Jun Kim, and M. G. Allen, “A Planar Variable Reluctance Magnetic Micromotor with Fully Integrated Stator and Wrapped Coils”, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, pp. 1-6, Fort Lauderdale, Florida, February 7-10, 1993
- [20] Chong-Hyuk Ahn and Mark G. Allen, “Micromachined Magnetic Particle Separator for Biotechnological Applications”, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Kanagawa, Japan, Feb. 25-28, 1994



안종혁

1953년 9월 29일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 Georgia Institute of Technology School of Electrical and Computer Engineering(Ph. D.) 현재 Georgia Institute of Technology Microelectronics Research Center (Micromachines, Microsensors and Microactuators 응용 연구중)