

전계공역유체를 이용한 마이크로 액추에이터

Microactuators Using Electro-Conjugate Fluids

서우석 · 横田眞一 · 吉田和弘 · 함영복

W. S. Seo, S. Yokota, K. Yoshida and Y. B. Ham

1. 서론

기능성 유체(또는 스마트 유체)는 유체 주위에 인가된 전계(electric field) 또는 자계(magnetic field)에 의해 물리적 성질이 변하는 유체를 총칭한다.^{1,2)} 대표적인 기능성 유체는 인가 전계 및 자계에 의해 점도와 같은 유체의 레올로지(rheology)를 변화시키는 ER 유체(electro-rheological fluid) 및 MR 유체(magneto-rheological fluid)가 있으며, ER 댐퍼, ER 밸브, MR 브레이크 및 MR 실린더 등 다양한 종류의 유체 제어용 디바이스 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{3~6)}

한편, 전계공역유체(Electro-Conjugate Fluid, 이하 ECF)는 일종의 유전성 유체이며, 액중에 삽입된 전극에 직류전압을 인가하면 전극간에 강력한 제트유동이 발생하는 기능성 유체이다.⁷⁾ 인가 전계에 의해 전극간에 발생하는 ECF의 유동현상을 통하여 ECF는 전기적 에너지를 기계적 유체 에너지로 직접 전환이 가능함에 따라 다양한 유체 제어 디바이스, 마이크로 머신 및 마이크로 액추에이터 등의 구동원으로 이용되고 있다.^{7~13)} ECF와 같은 기능성 유체를 마이크로 액추에이터의 작동유체로 이용하는 장점으로는 인가 전계에 따른 ECF 유동현상에 의해 발생하는 유량 및 압력을 액추에이터의 구동원으로 직접 사용함으로써 단순한 구조의 액추에이터를 실현할 수 있으며, 이에 따른 기계적 가동부를 최소화함으로써 마이크로 영역에서는 무시할 수 없는 성능 변수로 작용하는 고체 표면 마찰의 영향을 줄일 수 있는 이점이 있다.

ECF를 이용한 마이크로 액추에이터의 연구동향은 ECF 제트유동을 1) 회전운동으로 변환하는 방법, 2) 압력 발생원으로 사용하는 방법, 및 3) 발생유량 및 압력을 펌프의 구동원으로 사용하는 방법 등에 초점을 맞춰 활발한 연구가 이루어지고 있다.

Yokota 등⁸⁾은 ECF의 유동현상을 모터의 구동원으로 이용한 단순한 구조의 ECF 마이크로 모터를 제안, 제작하고 출력특성을 실험적으로 검토하였다.

Takemura 등⁹⁾은 ECF 제트를 압력원으로 이용한 마이크로 인공근육 액추에이터를 제안하고, ECF 제트의 압력 제어를 통한 마이크로 ECF 인공근육 액추에이터의 위치 제어 시스템을 구축하여 제어 성능을 확인하였다. 또한, Yokota 등¹⁰⁾은 유체 구동형 마이크로 머신의 구동원을 실현하기 위해 ECF 제트를 SMA(Shape Memory Alloy) 액추에이터의 강제 액체냉각 기구에 적용한 SMA 구동형 마이크로 펌프를 제안하고 ECF의 액체냉각 효과를 실험적으로 확인하였다.

한편, Seo 등^{1~13)}은 제한된 실장공간을 가지는 고발열 전자기기의 액체냉각 시스템의 구현을 위하여, ECF의 유동현상을 펌프의 구동원으로 응용한 기계적 가동부가 없는 무진동, 무소음의 평면형 ECF 펌프를 제안하고, 평면형 ECF 펌프를 유체 구동원으로 한 100W급 고발열 전자기기를 위한 강제 액체냉각 시스템을 구축하여 냉각특성을 실험적으로 검토하였다.

본 해설에서는 차세대 마이크로 액추에이터의 유체 구동원으로 활발한 연구가 이루어지고 있는 기능성 유체의 일종인 ECF의 특성 및 이를 이용한 연구 사례를 소개한다.

2. 전계공역유체(Electro-Conjugate Fluids)

전계공역유체(ECF)는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 유전성 유체의 내부에 전극을 삽입하고, 액중에 삽입된 전극에 직류 전계를 인가하면 전극간에 강력한 제트 유동(ECF-jet)이 발생하는 유전성의 기능성 유체이다. 인가 전계에 의해 전극간에 발생하는 ECF의 유동현상을 ECF 효과(ECF effect)로 부르며, 대표적인 ECF로는 Dybutyl decanedioate(DBD), Linalyl acetate(LA), FF-1EHA2 등이 있다. ECF 제트 유동의 가시화 예를 Fig. 2에 나타낸다. 이와 같은 ECF 제트의 발생 메커니즘은 현재 명확하게 밝혀져 있지는 않지만, 광의적으로는 전기유체역학(Electrohydrodynamics: EHD) 현상의 일종으로 알려져 있다.^{7,8)} 대표적인 ECF의 물성치를 Table 1에 나타낸다.

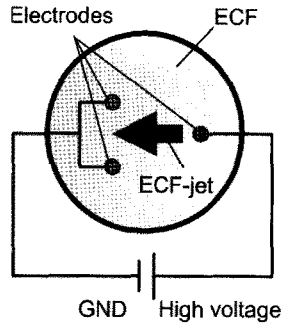


Fig. 1 Schematic diagram of ECF-jet

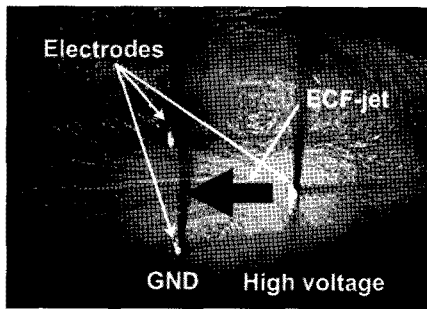


Fig. 2 Visualization of ECF-jet

전압 6kV의 경우 최대 유속 225mm/s가 얻어졌다. 비록, ECF 제트를 발생시키기 위하여 수 kV의 높은 전압을 요구하고 있지만, mA 크기의 미소 전류치를 필요로 함에 따라 mW급의 소비전력으로 ECF 제트를 발생시킬 수 있는 것을 알 수 있다.

이와 같은 ECF의 유동현상을 공학적으로 응용함으로써 다양한 유체 디바이스 및 액추에이터의 구동원으로 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

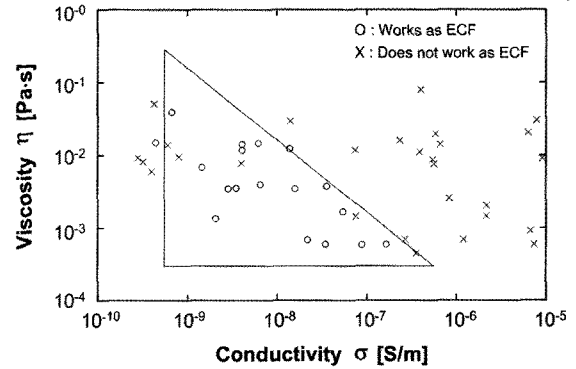
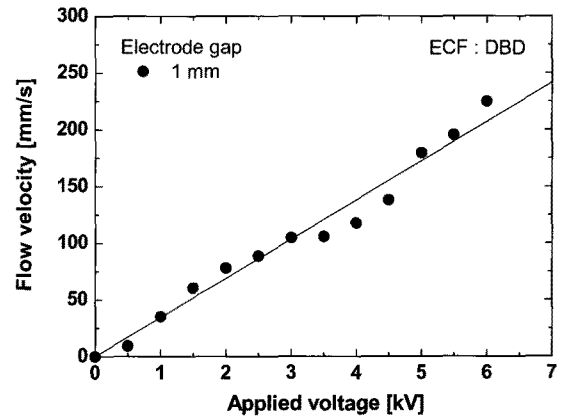


Fig. 3 ECF qualifications

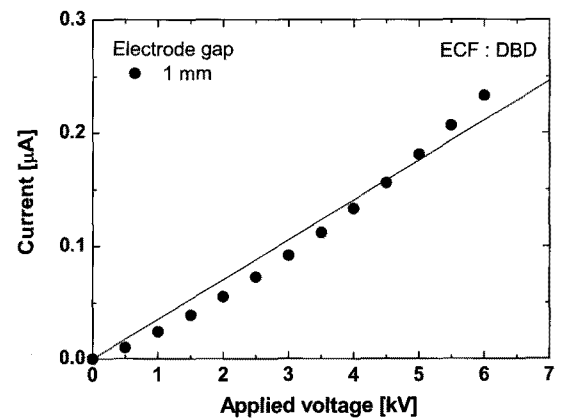
Table 1 Physical properties of ECFs

Physical property	DBD	FF-1EHA2
Density [kg/m ³]	0.938×10^{-3}	1.688×10^{-3}
Boiling point [°C]	345	210
Freezing point [°C]	-9	-25
Viscosity [mPa·s]	7.5	11
Electric conductivity [nS/m]	1.03	5.0

Fig. 3은 약 50 종류의 유전성 유체에 관한 ECF 제트의 발생 유무를 점도와 도전율의 관계로 분류한 결과를 나타낸다. 인가 전계에 따른 ECF 효과가 발생하는 유체를 ○, 발생하지 않는 유체를 ×로 나타내고 있다. Fig. 3의 결과로부터, ECF 효과는 점도와 도전율이 특정한 범위를 만족시키는 유전성 유체 (Fig. 3의 삼각형 내부)에서 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, ECF 효과에 의해 발생하는 제트의 유속은 불균일한 전계하에서 보다 증가하며, 인가전압에 거의 비례하는 것이 알려져 있다. 일례로써 ECF의 한 종류인 DBD에 직경 0.3mm의 한 쌍의 선형 전극대를 삽입하고 전극 간격을 1mm로 한 경우, 인가전압의 변화에 따른 ECF 제트의 유속 및 전류치의 측정 결과를 Fig. 4에 나타낸다. Fig. 4의 결과로부터, 인가전압의 상승에 따른 ECF 제트의 유속 및 전류치는 거의 비례하여 증가하는 것을 알 수 있으며, 인가



(a) Flow velocity



(b) Current

Fig. 4 ECF-jet characteristics

3. ECF 마이크로 모터⁸⁾

인가 전계에 의해 전극간에 발생하는 ECF 제트를 이용함으로써 기존의 모터와 비교하여 단순한 구조를 갖는 새로운 구동원리의 모터의 실현이 가능하다. 마이크로 ECF 모터는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 ECF 제트를 발생시키는 전극의 배치에 따라 SE형(stator electrode type)과 RE형(rotor electrode type)으로 구분된다.

SE형 ECF 마이크로 모터는 스테이터 내부에 배치된 전극대에서 ECF 제트가 발생함으로써 로터와 스테이터 사이에 형성된 ECF의 유동방향과 동일하게 로터가 회전한다. RE형 ECF 마이크로 모터의 경우는 로터에 직접 전극이 배치되어 있으며, ECF 제트의 반력에 의해 제트 발생 방향과 반대로 로터가 회전하는 구조로 되어 있다.

한편, RE형 ECF 모터는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 전극이 배치된 로터의 구조에 따라 C-RE형(Cylindrical RE type)과 DP-RE형(Disk plate RE type)으로 분류된다. C-RE형 ECF 마이크로 모터는 원주형 로터의 길이 방향으로 전극이 배치됨에 따라 모터의 직경을 작게 할 수 있으므로 마이크로화에 유리하며, DP-RE형과 비교하여 모터의 고속 회전이 가능하다. 반면에 DP-RE형 ECF 마이크로 모터는 얇은 디스크형 로터 상부에 전극을 배치함으로써 박형 구조를 실현할 수 있으며, 적층형 로터 구조를 통하여 모터의 출력 토크를 향상시킬 수 있음을 실험적으로 확인하고 있다.

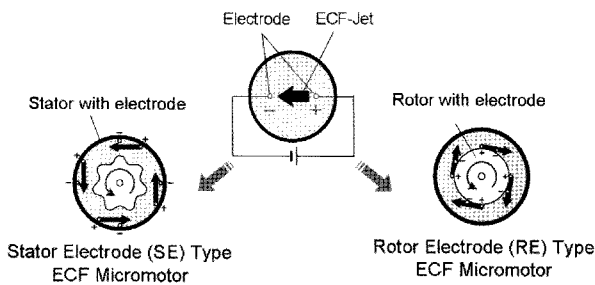


Fig. 5 Classifications of micro ECF motor

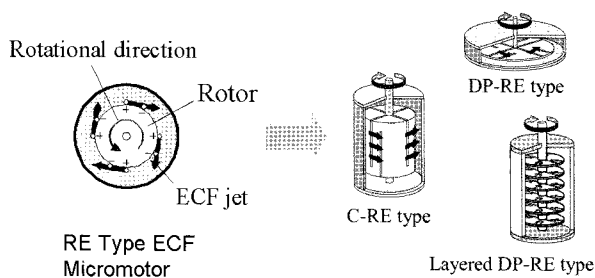


Fig. 6 Variations of RE type ECF micro motors

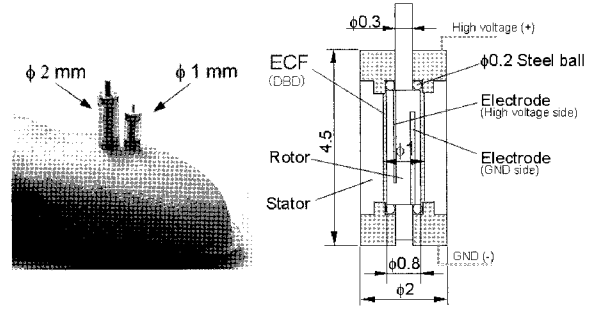


Fig. 7 Structure and photograph of 1 mm C-RE type ECF micro motor

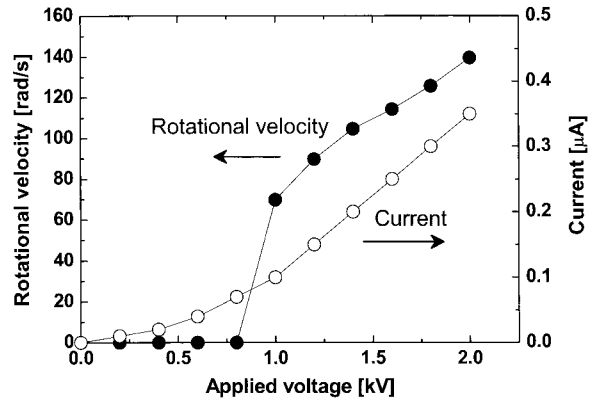


Fig. 8 Performance of 1 mm C-RE type ECF micro motor

Fig. 7은 내경 1mm의 C-RE형 ECF 마이크로 모터의 구조 및 사진을 나타낸다. 직경 0.8mm의 로터에 2쌍의 선형 전극대가 배치되어 있으며, ECF 제트가 발생하는 로터와 스테이터 사이의 간격은 100μm이다. 로터의 회전축을 지지하는 상/하부 커버의 재질은 황동이며, 실린더형 외부 케이스는 폴리에틸아미드로 제작되었다.

DBD를 작동유체로 사용한 경우, 내경 1mm C-RE형 ECF 마이크로 모터의 인가전압에 따른 회전수 및 전류치 측정실험 결과를 Fig. 8에 나타낸다. 실험 결과로부터, 인가전압 0.8kV 이하에서는 전류치의 상승에도 불구하고 회전은 발생하지 않고 있음을 알 수 있다. 이는 인가전압 0.8kV 이하에서 ECF 제트 유동은 발생하고 있지만, 낮은 인가전압에 따른 ECF 제트의 강도가 로터 회전부와 지지부의 마찰력보다 낮기 때문에 로터가 회전하기 어렵기 때문으로 판단된다. 인가전압 2kV의 경우, 140rad/s(1340rpm)의 회전수가 측정되었으며, 이때의 전류치는 0.35mA가 측정되었다.

Fig. 9는 고출력 파워밀도를 갖는 마이크로 모터를 실현하기 위하여 전극이 배치된 8개의 로터를 적층

시킨 8층 DP-RE형 ECF 마이크로 모터의 구조 및 사진을 나타낸다. ECF 제트를 발생시키는 전극은 직경 8mm의 박형 로터 플레이트 상/하부에 각각 4쌍의 전극대가 배치되어 있으며, 8층의 로터 플레이트를 적층시킴으로써 콤팩트한 구조에서 높은 출력 토크 및 고출력 파워밀도의 향상을 꾀하고 있으며 전체 크기는 직경 13mm, 높이 17.1mm이다.

8층 DP-RE형 ECF 마이크로 모터의 출력 특성 실험 결과를 Fig. 10에 나타낸다. 실험 결과로부터 8층 DP-RE형 ECF 마이크로 모터의 성능은 전류치 3.9mA에서 최대 회전속도 480rpm(50rad/s), 최대 출력 토크 51μNm, 및 최대 출력 파워 0.62mW가 얻어졌다.

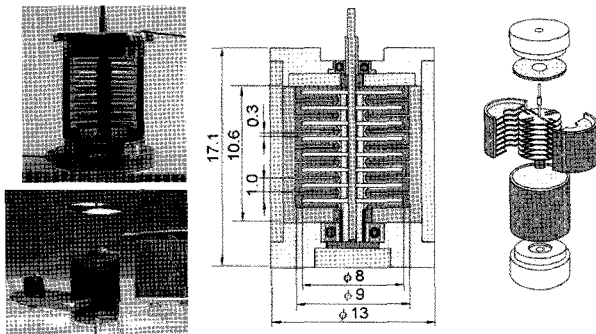


Fig. 9 8-layered DP-RE type ECF micro motor

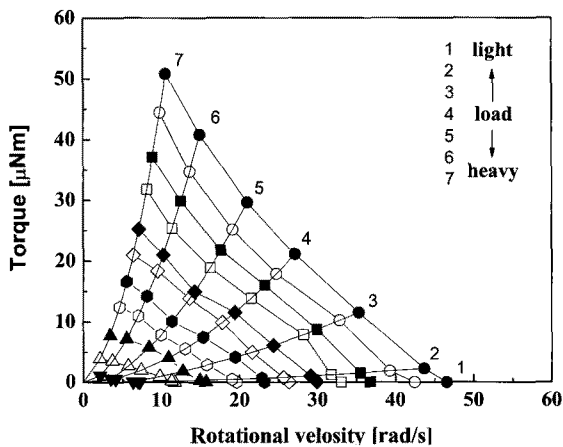


Fig. 10 Torque characteristics of 8-layered DP-RE type ECF micro motor

기능성 유체의 일종인 ECF를 이용한 마이크로 모터는 기존의 전동모터에서 필수적인 코어 및 코일 등을 사용할 필요가 없고 직류전압을 전극대에 인가하는 것으로 구동 가능함으로써 별도의 스위칭 회로가 불필요함에 따라 적은 부품수를 가지는 단순한 구조의 초경량, 마이크로 모터의 실현을 용이하게 할 수 있다. 이와 같은 ECF 마이크로 모터의 실용화를

위해서는 ECF 제트유동을 형성하기 위하여 비교적 고전압이 요구되는 점, 로터 회전부의 실링 문제 및 20% 대의 낮은 효율 등을 극복하는 연구가 실용화를 위한 핵심 과제로 부각되고 있다.

4. ECF 마이크로 인공근육 액추에이터⁹⁾

ECF 제트의 발생 압력을 소프트 액추에이터의 구동원으로 이용함으로써 생체 로봇, 소프트 로봇 등에 적용하기 위한 단순한 구조의 ECF 마이크로 인공근육 액추에이터에 관한 연구가 이루어지고 있다. ECF 마이크로 인공근육 액추에이터의 구동 원리를 Fig. 11에 나타낸다. 먼저, 상/하부 커버 사이에 아라미드 (aramid) 강화섬유가 부착된 얇은 박막의 원통형 실리콘 고무 튜브를 배치한다. 상부 커버를 고정시킨 상태에서 원통형 실리콘 고무 튜브 내부에 ECF 제트의 발생 압력을 인가하면 얇은 박막의 실리콘 고무 튜브가 팽창함으로써 인공근육 액추에이터의 길이가 수축한다. 이때, 인가전압에 따른 ECF 제트의 압력제어를 통하여 ECF 마이크로 인공근육 액추에이터의 수축량을 제어할 수 있다. Fig. 12는 ECF 제트(압력) 발생기, 인공근육 셀 및 탱크로 구성된 직경 5mm, 길이 10mm의 ECF 마이크로 인공근육 액추에이터의 구성 및 시작품 사진을 나타내고 있으며, PID 제어에 의한 변위 제어 성능을 Fig. 13에 나타낸다.

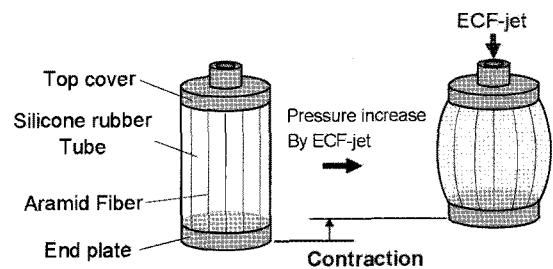


Fig. 11 Concept of ECF micro artificial muscle

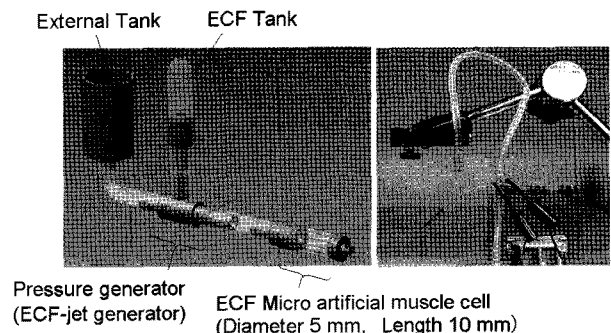


Fig. 12 Prototype of ECF micro artificial muscle

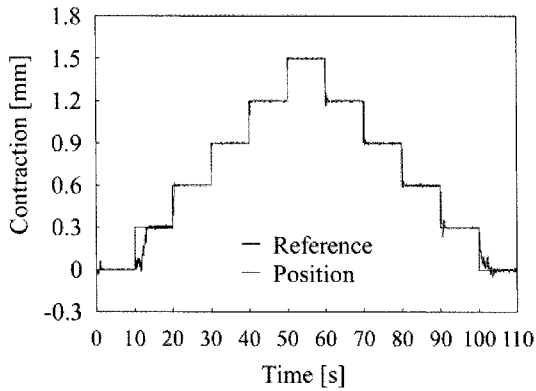


Fig. 13 Displacement control performance of ECF micro artificial muscle actuator

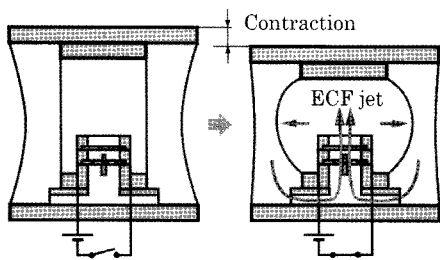


Fig. 14 Pressure generator integrated ECF micro artificial muscle cell

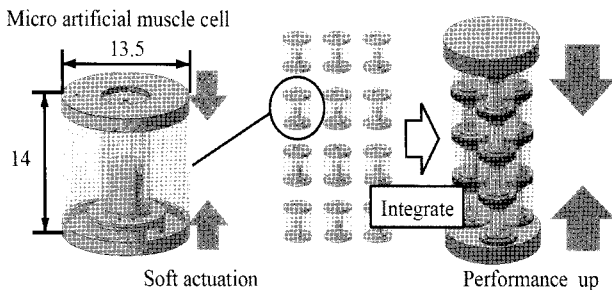


Fig. 15 Concept of the integration of ECF micro artificial muscle cell

Fig. 14는 ECF 마이크로 인공근육 액추에이터의 직·병렬 집적화를 통한 고성능화를 실현하기 위하여 제안된 압력 발생원을 내장한 ECF 마이크로 인공근육 셀의 구조 및 동작을 나타낸다. 바늘형(needle type) 전극 및 링형(ring type) 전극으로 구성된 ECF 제트 압력 발생원 및 탱크가 일체화된 구조를 통하여 ECF 마이크로 인공근육 액추에이터의 직·병렬 조합을 용이하게 구성할 수 있으며, 실제의 생체근육이 근육세포의 조합으로 이루어진 것과 같이 제안된 ECF 마이크로 인공근육 액추에이터는 각각 독립적인 인공근육 셀(cell)의 역할을 수행할 수 있다. Fig. 15는 ECF 마이크로 인공근육 셀의 조합을 통한 고

성능 인공근육 액추에이터의 개념도를 나타낸다. ECF 마이크로 인공근육 셀의 향후 연구 진행 방향은 인공근육 액추에이터의 고출력화, 집적도 향상 및 다자유도 소프트 마이크로 매니플레이터의 실현 등에 초점을 맞추어 활발한 연구가 이루어지고 있다.

5. 평면형 ECF 펌프¹²⁾

제한된 실장공간을 가지는 고발열 전자기기의 강제 액체냉각 시스템을 위한 유체 구동원을 구현하기 위하여 ECF를 이용한 기계적 가동부가 없는 무진동, 무소음의 평면형 ECF 펌프를 제안하였다. Fig. 16은 평면형 ECF 펌프의 구동 원리를 나타낸다. 기판상에 선형 전극대를 유로와 직교하여 배치하고 이 기판을 삽입한 펌프실 내부에 ECF를 주입한다. 펌프실 내부의 전극대에 직류 전압을 인가하면, 전극 주변의 전계에 따른 ECF 효과에 의해 전극간에 제트 유동이 발생한다. 인가전계에 의해 발생하는 ECF 제트의 운동량은 정지상태인 전극 상부의 유체에 전달된다. 먼저 전극 주변의 유체가 이동하는 국소유동이 발생하고, 이 국소유동이 발전함에 따라 유로 내부의 유동이 순차적으로 형성된다.

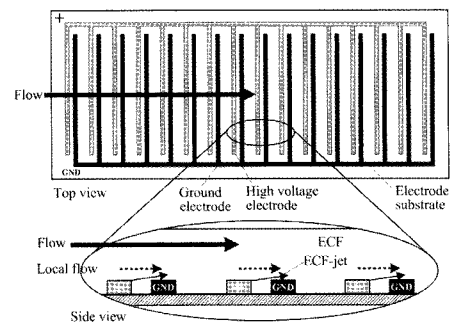
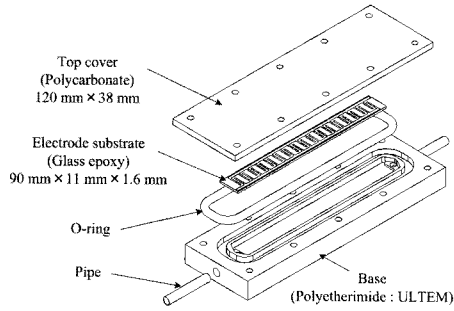


Fig. 16 Pumping principle of planar ECF pump

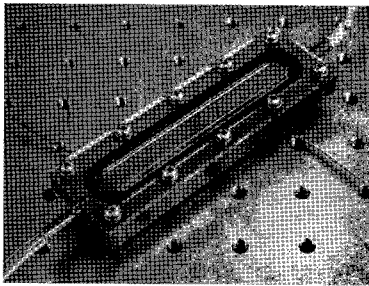
Fig. 17은 제작된 평면형 ECF 펌프의 구성도 및 사진을 나타낸다. 본 펌프의 구성은 펌프 베이스, 외부 상판, 전극 기판, O링 및 파이프를 이루어져 있다. 펌프의 전체 치수는 120mm × 38mm × 12mm이며, 전극 기판과 외부 상판 사이에 형성된 유로 높이는 500μm이다.

평면형 ECF 펌프는 인가 전계에 의해 전극간에 발생하는 ECF 제트가 펌프의 구동원으로 사용되고 있기 때문에 전극의 형상은 펌프의 출력특성을 결정하는 주요한 설계 파라미터가 된다. 본 연구에서는 고출력 평면형 ECF 펌프를 구현하기 위하여 선형

전극, 톱니/선형 전극 및 톱니/호형 전극 형상을 가지는 전극 기판을 제작하고, 펌프의 출력특성에 관한 실험적 검토를 행하고 있다. 제작된 3종류의 전극 형상 및 사진을 Fig. 18, 치수를 Table. 2에 나타낸다.

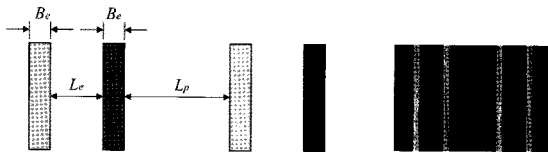


(a) Schematic diagram

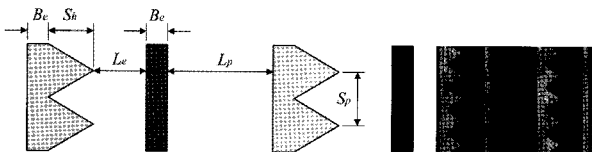


(b) Photograph

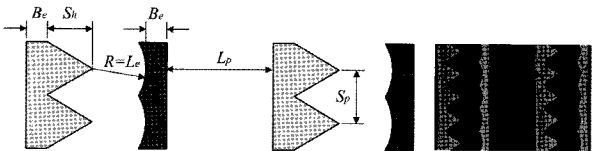
Fig. 17 Fabricated planar ECF pump



(a) No. 1: Rectangular electrodes



(b) No. 2: Saw-tooth and rectangular electrodes

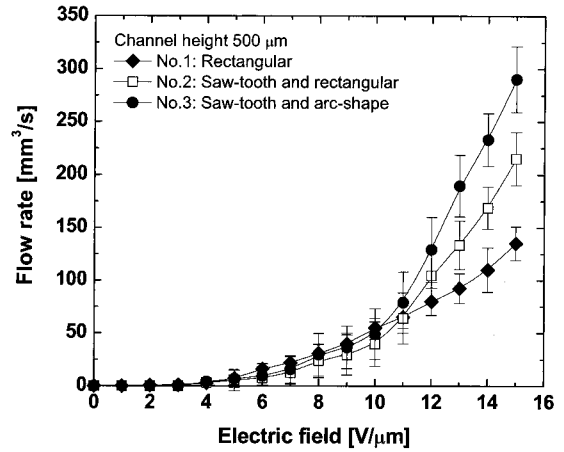


(c) No. 3: Saw-tooth and arc-shape electrodes

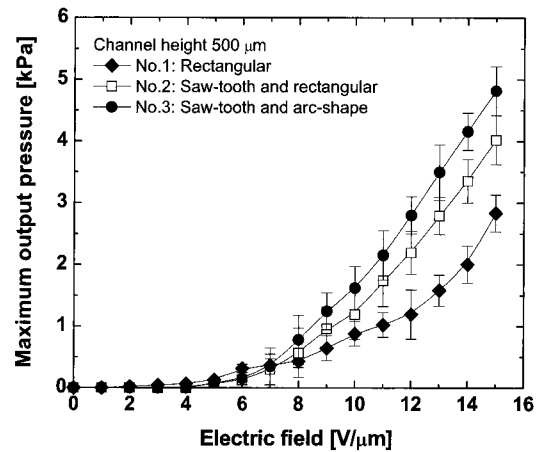
Fig. 18 Schematic diagram of electrode designs

Table 2 Specification of electrode designs

	B_e (mm)	L_e (mm)	L_p (mm)	S_h (mm)	S_p (mm)	No. of stages
No. 1	80	200	400	N/A	N/A	108
No. 2	80	200	400	170	200	93
No. 3	80	200	400	170	200	93



(a) No-load flow rate



(b) Maximum output pressure

Fig. 19 Comparison among pump characteristics for the electrode substrate No. 1 to 3

평면형 ECF 펌프의 작동유체로 불소 유전성 액체인 FF-1EHA2를 사용하여 인가 전계에 따른 무부하 토출유량 및 최대 토출압력 측정 결과를 Fig. 19에 나타낸다. Fig. 19의 결과로부터, 선형 전극 형상의 기관 1의 출력 특성과 비교하여 톱니/호형 전극으로 이루어진 기관 3의 출력 특성은 Table 2에 나타난 바와 같이 동일한 전극 간격(L_e)이지만 적은 전극 개수를 가지는 조건에도 불구하고 토출유량 및 압력이 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 톱니형 전극 형상에 따른 전극간의 전계 불균일성이 증가한 것에 의해 선형 전극으로만 이루어진 기관 1과 비교하여 보다 강력한 ECF 제트가 발생한 결과에 기인한다.

실험 결과로부터 톱니형 전극과 호형 전극으로 구성된 전극 기관 5, 유로높이 500mm의 경우, 인가 전계 15V/mm에서 무부하 토출유량 290mm³/s, 최대 토출압력 4.8kPa이 얻어졌으며, 이 때, 소비전류는 296mA가 측정되었다.

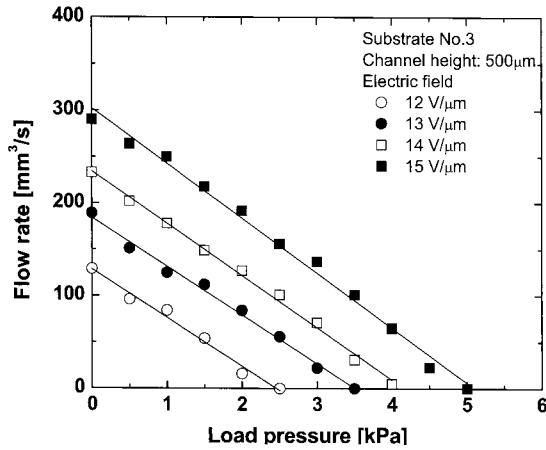


Fig. 20 Flow rate vs. load pressure characteristics of planar ECF pump

Fig. 20은 전극 기관 3, 유로높이 500μm의 경우, 인가 전계의 변화에 따른 평면형 ECF 펌프의 부하 특성 실험 결과를 나타낸다. Fig. 20의 결과로부터, 부하압력과 토출유량의 관계는 거의 선형적인 것을 알 수 있으며, 최대 출력 파워는 인가 전계 15V/mm에서 0.41mW가 얻어졌다.

6. 결 론

본 해설에서는 인가 전계에 의해 전극간에 강력한 제트 유동이 발생하는 기능성 유체의 일종인 ECF의 특성 및 이를 이용한 마이크로 액추에이터에 관한 연구 동향을 소개하였다. 대표적인 연구 사례로 ECF 제트의 반력을 회전운동으로 변환시킨 ECF 마이크로 모터, ECF 제트의 발생 압력을 소프트 액추에이터의 구동원(마이크로 압력원)으로 이용한 ECF 마이크로 인공근육 액추에이터, 및 ECF 제트유동에 따른 유량 및 압력을 펌프에 적용한 평면형 ECF 펌프 등의 구조 및 성능을 기술하였다. 이와 같은 ECF를 이용한 마이크로 액추에이터 및 유체제어 디바이스 기술은 차세대 마이크로 메카트로닉스의 요소기술로써 마이크로 머신, 마이크로 팩토리 및 마이크로 로봇 등에 광범위하게 응용 가능할 것으로 기대된다. 향후, ECF 응용기술에 관한 고기능화, 고출력밀도화 및 구동전압 저하에 따른 고효율화 연구를 통하여 보다 실용적인 기술로 발전되기를 기대해 본다.

참고문헌

1) 日本機械學會, “知能流体工学に関する調査研究分科會報告書(P-SC240)”, 1995.

2) 日本機械學會, “メカトロニクス機器の電気粘性流体を用いた制御に関する研究分科會成果報告書(P-SC237)”, 1996.

3) 横田 眞一, “機能性流体を応用した流体システムの展開”, フルードパワーシステム, Vol. 34, No. 1, pp. 25~29, 2003.

4) 横田 眞一, “電界共役流体(ECF)を応用したマイクロアクチュエータ”, 精密工學會誌, Vol. 72, No. 7, pp. 826~829, 2006.

5) K. Yoshida et al., “Fabrication of micro ER valves by micromachining and experiments”, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 95, No. 2, pp. 227~233, 2002.

6) K. Yoshida et al., “A Valve-Integrated MR Cylinder Using Magneto-Rheological Fluid”, Proc. of ACTUATOR 2004, pp. 609~612, 2004.

7) Y. Otsubo and K. Edamura, “Dielectric fluid motors,” Appl. Phys. Lett., Vol. 71, No. 3, pp. 318~320, 1997.

8) S. Yokota et al., “A Micro Motor Using Electro-conjugate Fluids (ECF),” Int. Journal of JSME (C), Vol. 44, No. 3, pp. 756~762, 2001.

9) K. Takemura et al., “Development and control of a micro artificial muscle cell using electro-conjugate fluid,” Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 133, pp. 493~499, 2007.

10) S. Yokota et al., “An SMA-Driven Micro-pump Using ECF Jet Cooling,” Trans. of JSME (C), Vol. 66, No. 650, pp. 3516~3522, 2000.

11) W. S. Seo et al., “A Thin-Planar Pump Using Electro-Conjugate Fluid (ECF) for Liquid Cooling of Electronic Chips,” Trans. of JSME (C), Vol. 71, No. 709, pp. 2798~2804, 2005.

12) W. S. Seo et al., “A high performance planar pump using electro-conjugate fluid with improved electrode patterns,” Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 134, pp. 606~614, 2007.

13) W. S. Seo et al., “Design, Fabrication and Experimental Investigation of a Planar Pump Using Electro-Conjugate Fluid,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 21, No. 8, pp. 1320~1327, 2007.

[저자 소개]



서우석(책임저자)

E-mail: woosseo@kimm.re.kr

Tel: 042-868-7168

1974년 8월 25일생

2000년 울산대학교 자동차공학과 학사, 2002년 동 대학원 석사, 2006년 동경공업대학 대학원 Mechano-Micro공학 전공 박사, 2002~2003년 동경공업대학 정밀공학연구소, 2006년~현재 한국기계연구원 선임연구원, 관심 연구분야는 기능성 유체 메카트로닉스, 마이크로 액추에이터, 스마트 액추에이터, 대한기계학회, 한국정밀공학회, 일본기계학회 회원, 공학박사

[저자 소개]



吉田和弘

E-mail: yoshida@pi.titech.ac.jp

Tel: +81-45-924-5011

1962년 2월 2일생

1986년 동경공업대학 대학원 제어공학전공 석사, 1989년 동 대학원 박사, 1989년~현재 동경공업대학 정밀공학연구소 부교수, 관심 연구분야는 유체 마이크로 머신, 유체제어시스템, 일본기계학회, 일본유공압시스템학회, IEEE 회원, 공학박사

[저자 소개]



横田眞一

E-mail: syokota@pi.titech.ac.jp

Tel: +81-45-924-5034

1949년 8월 22일생

1975년 동경공업대학 대학원 기계물리공학 전공 석사, 1982년 동 대학원 박사, 1975년~현재 동경공업대학 정밀공학연구소 교수, 2006년~2007년 동경공업대학 정밀공학연구소 소장, 관심 연구분야는 기능성 유체 메카트로닉스, 유체제어, 마이크로 머신, 일본기계학회, 일본유공압시스템학회, 계측자동제어학회 회원, 공학박사

[저자 소개]



함영복

E-mail: hyb665@kimm.re.kr

Tel: 042-868-7157

1965년 10월 23일생

1987년 금오공과대학교 기계공학과 학사, 1990년 동 대학원 석사, 2003년 동 대학원 박사, 2004년 동경공업대학 정밀공학연구소, 1990년~현재 한국기계연구원 책임연구원, 관심 연구분야는 유압 피스톤 펌프 및 모터, 수압 피스톤 펌프, 압전소자 응용 펌프 및 노즐, 대한기계학회, 한국정밀공학회, 유공압시스템학회 회원, 공학박사