

자동차 연료펌프 구동용 보이스 코일 전자기 액츄에이터의 설계 및 해석

박세명 · 김진호* · 배철호

영남 대학교 기계공학부, 경북 경산시 대동 214-1, 712-749

(2010년 10월 19일 받음, 2010년 12월 7일 최종수정본 받음, 2010년 12월 10일 게재확정)

캠샤프트의 구동력을 활용한 기계식 연료펌프 시스템을 대체할 솔레노이드 격막 연료펌프는 최근 각광받고 있는 고효율 그린 카 부품 중 하나이다. 하지만 솔레노이드 격막 연료펌프의 경우 왕복운동에 필요한 자속을 오직 솔레노이드에 의존하므로 전력소비가 비교적 큰 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 전력소모를 최소화 하기 위하여 영구자석형 VCA 연료펌프 시스템을 제안한다. 또한 상용전자기해석소프트웨어인 MAXWELL을 활용하여 유한요소 해석을 통해 기존의 솔레노이드 격막 펌프와의 전력소모 및 동적 성능을 비교 분석한다.

주제어 : 연료 펌프, 다이어프램, 솔레노이드, 보이스코일 액츄에이터

I. 서 론

연료펌프는 연료탱크에서 기화기 또는 인젝션 노즐까지 연료를 공급해 주는 장치로써 현재 자동차에서 사용되는 연료펌프로는 기계식 다이어프램 펌프와 전기모터식 펌프 그리고 솔레노이드 다이어프램 펌프를 주로 사용한다.

기계식 다이어프램 펌프의 경우 실린더 블록 또는 헤드 측면에 장착되어 캠축의 구동에 의하여 구동된다. 따라서 기계식 다이어프램 펌프는 기계적인 부가장치를 결합한 이중구조의 구동시스템으로써 시스템 구성이 복잡하고 부품 사이에서 마찰에 의한 에너지 손실과 소음이 발생하고, 엔진효율의 향상에 한계가 있으며 정밀 위치제어에서의 한계와 비용 면에서 문제가 많이 발생하는 단점이 있다[1].

또한 기계식 다이어프램 펌프는 캠축의 형상에 따라서 진동특성이 달라지고 이에 따라 진동과 소음의 원인이 될 수 있어 캠축의 형상에 관한 최적화 설계가 요구된다[2]. 하지만 캠 형상의 최적화는 좁은 영역의 엔진 작동 조건에서만 가능하다는 단점이 있다.

최근 자동차 산업계에서는 저탄소 녹색성장의 기류에 맞추어 배기가스를 줄이고 에너지 효율을 높일 수 있는 지능화된 자동차 전기부품의 개발이 많이 이루어 지고 있다. 연료펌프의 경우에도 마찬가지로 엔진효율의 측면에서 한계가 있는 기계식 다이어프램 펌프는 현재는 거의 사용되고 있지 않으며 대부분 전자식 연료펌프인 전기모터식 연료펌프나 솔레노이드 다이어프램 펌프를 사용하고 있다.

전기모터식 연료펌프는 기계식 다이어프램 펌프에 비하여 항상 기관이 요구하는 이상의 충분한 연료를 공급할 수 있고

베이퍼록에 강한 이점이 있다. 하지만 전력 소모가 크고 구조가 다소 복잡하며 임펠러를 회전시켜주는 모터 등 추가적인 장치가 필요하다는 단점이 있다. 그리고 현재 공급되고 있는 전기모터식 연료펌프의 경우 그 구조 및 기능상 펌프, 플로트(Float), 흡입(Intake) 및 연료(Fuel)/증기관(Vapor line) 등을 모두 포함하는 일체형 연료펌프 모듈 형태로 공급되므로 만약 부품의 이상발견시 모듈 전체를 교체해야 하므로 교체 비용이 상승하는 단점이 있다[3].

솔레노이드 다이어프램 연료펌프는 전기모터식 연료펌프보다 구조가 간단하고 구동을 위한 외부 추가장치가 필요하지 않다는 장점이 있다. 그리고 기계식 다이어프램 펌프에서와 같이 캠 샤프트의 구동에 따르는 기계적인 마찰에 의한 에너지 손실이 없으며 소음을 줄일 수 있다. 하지만 왕복 운동에 필요한 자속을 오직 솔레노이드에만 의존하므로 충분한 구동력을 내기 위하여 전력소모가 크다는 단점이 있다.

최근의 자동차 산업계에서는 전자식 부품의 사용이 많으므로 각 부품당 전력소모를 줄이는 것이 중요하다. 따라서 기계적으로 구조가 단순하고 에너지 손실이 적으며 소음 발생이 적은 장치의 개발이 필요하다. 따라서 왕복 운동에 필요한 자속을 솔레노이드에만 의존하는 방식이 아닌 솔레노이드 방식에서 영구자석을 적용하여 전력소모를 줄이는 장치가 개발되고 있다.

본 연구에서는 앞서 언급한 장치들의 단점을 극복하고 전력소모를 최소화 하기 위하여 영구자석과 전자석을 활용한 연료펌프 구동용 보이스코일 액츄에이터(VCA)를 제안한다. 제안하는 보이스코일 액츄에이터와 기계식 다이어프램 펌프를 접목 시킨 보이스코일 액츄에이터 연료펌프를 상용 전자기 해석 프로그램인 MAXWELL을 활용하여 유한요소 해석을 한다. 이를 바탕으로 기존의 솔레노이드 다이어프램 펌프와 제

*Tel: (053) 810-2441, E-mail: jinho@ynu.ac.kr

안하는 보이스코일 액추에이터 연료펌프의 동적성능을 비교하여 전력소모 절감량을 보여준다.

II. 자동차 연료펌프 구동용 액추에이터

1. 솔레노이드 다이어프램 펌프의 구조 및 구동원리

Fig. 1는 솔레노이드 다이어프램 펌프의 개략도를 나타낸다. 이 솔레노이드 다이어프램 펌프는 한 개의 솔레노이드와 요크(Yoke), 전기자(Armature), 하나의 스프링(Spring), 그리고 다이어프램으로 구성된다. 전기자와 다이어프램은 하나의 강체로써 솔레노이드에 전류가 인가되면 솔레노이드에 의해 생성되는 자속에 의해 전기자가 아래로 끌려오게 된다. 전기자와 연결된 다이어프램 또한 아래로 당겨지게 된다.

Fig. 2는 솔레노이드 격막 펌프에 인가되는 입력 전류의 프로파일을 나타낸다.

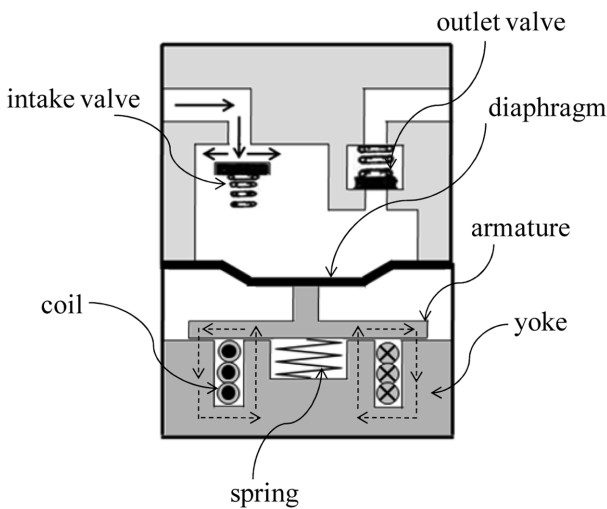


Fig. 1. Schematic diagram of solenoid diaphragm pump.

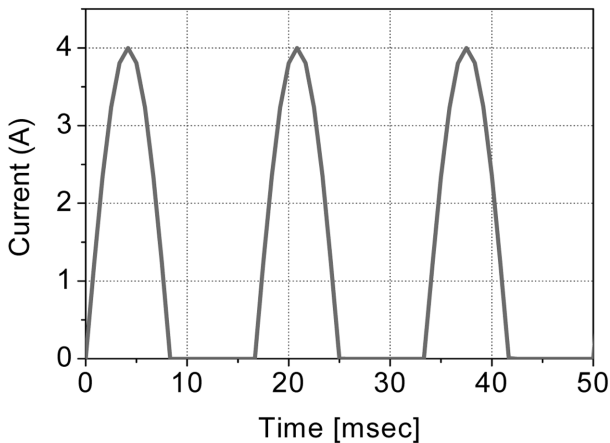


Fig. 2. Input current profiles versus time.

솔레노이드 다이어프램 펌프의 경우 원활한 펌핑(pumping) 작용을 위하여 요구되는 대략 30 N 정도의 힘을 얻기 위하여 솔레노이드에 인가하는 전류를 최대 4[A]로 한다.

솔레노이드에 전류가 인가되면 솔레노이드에 의해 생성되는 자기력선에 의해 전기자는 요크쪽으로 끌려내려오게 되고 전기자와 연결되어 있는 스프링은 압축되어 진다. 그리고 전기자와 연결된 다이어프램 또한 아래로 당겨지게 된다. 이로 인해 펌프실의 체적이 커지기 때문에 입구 밸브를 통하여 연료가 펌프실로 들어온다. 솔레노이드에 입력되는 전류는 Fig. 2에서와 같이 최대로 4A와 최소 0A까지 주기적으로 입력되며 솔레노이드에 인가되는 전류의 양이 0A가 되면 솔레노이드에 의해 생성되었던 자기력선은 소멸 되고 압축되어 있던 스프링의 복원력에 의해 다시 다이어프램은 위로 밀려 올려지며, 이에 따라 연료가 출구 밸브를 열고 바깥으로 배출된다.

2. 보이스코일 액추에이터 연료펌프의 구조 및 구동원리

Fig. 3은 보이스코일 액추에이터 연료펌프의 개략도를 나타낸다.

이 보이스코일 액추에이터는 요크(yoke)와 요크 내에 위치한 영구자석이 자기회로를 구성하고 요크 사이의 공극(air gap)에 전류가 흐르는 코일(coil)과 코일 하우징으로 위치하고 있다. 구동 방식에는 로렌츠 힘(Lorentz force)을 이용하여 자석과 요크를 움직이는 가동 영구자석형 방식과 코일을 움직이는 가동 코일형 방식이 있다. 본 연구에서는 가동 코일형 방식을 이용한다.

보이스코일 액추에이터의 구동원리는 공극에서 영구자석에 의한 자력선이 형성되고 공극내에 위치하는 코일에 교류전류

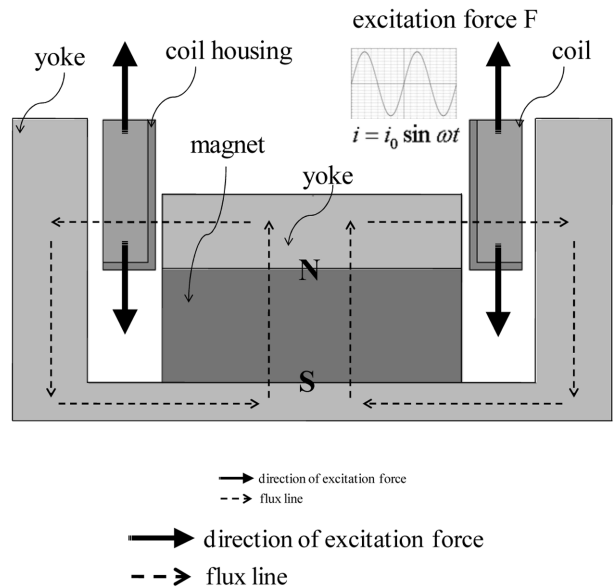


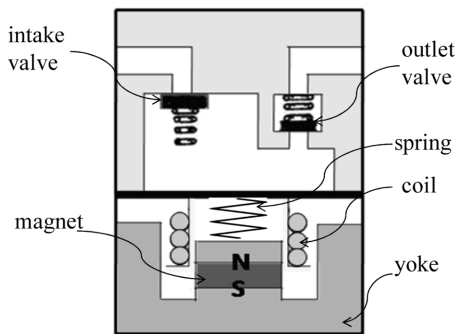
Fig. 3. Schematic diagram of VCA.

를 인가하면 로렌츠힘(Lorentz force)이라 불리는 힘이 발생한다. 그 힘의 크기는 공극에서의 공극자속밀도의 크기(B_g), 전류의 양(i), 자력선내에서 반응하는 코일의 길이(l_{eff}), 코일이 감긴 횟수(n)에 비례하고 식 (1)으로 표현할 수 있다[4].

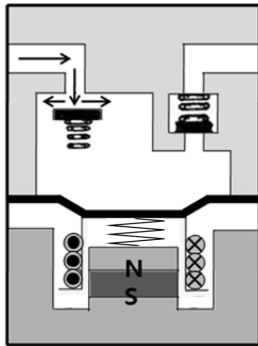
$$F_{Lorentz} = nB_g i l_{eff} \quad (1)$$

그리고 이 힘의 방향은 자속밀도와 전류가 이루는 평면의 직각 방향으로 형성되어 코일과 코일하우징이 상하방향으로 진동하게 된다.

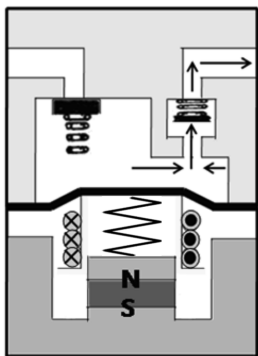
연료 흡입 시 이 가지는 코일하우징은 다이어프램에 부착되어 있어 코일하우징이 아래로 내려가게 되면 다이어프램



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Operation principle of VCA actuated fuel pump (a) at initial position (b) at the lower position (c) at the upper position.

이 아래로 당겨지고 펌프실의 체적이 커지기 때문에 입구 밸브를 통하여 연료가 펌프실로 들어온다. 연료 배출시 코일 하우징이 위로 올라가게 되면 다이어프램 또한 위로 밀려 올라지며, 이에 따라 연료가 출구 밸브를 열고 배출된다.

Fig. 4는 연료펌프 구동용보이스코일 액추에이터의 구조 및 구동원리와 결합된 연료펌프실내의 구동원리를 나타낸다.

III. 유한요소해석을 이용한 시뮬레이션

보이스코일 액추에이터 펌프 솔레노이드 다이어프램 펌프의 성능을 규명하기 위하여 상용 전자기 유한요소 해석 프로그램인 맥스웰(Maxwell)을 이용하였다.

Table I은 연료펌프 구동용 보이스코일 액추에이터에서 사용된 NdFeB35자석의 자기적 특성을 나타내고, Table II는 보이스코일 액추에이터 솔레노이드 다이어프램 펌프에서의 동적 기계시스템의 질량, 강성, 고유진동수, 댐핑 계수를 나타

Table I. Magnetic properties of NdFeB35.

Residual induction	1.3T
Coercivity	-890,000 A/m
Relative permeability	1.1

Table II. Specification of mechanical subsystem.

Mass	0.2 (kg)
Spring stiffness	24 kN/m
Natural frequency	55 hz
Damping coefficient	1.35 kg/ms

Table III. Specification of electric subsystem.

Input current (VCA actuated pump)	1 A
Input current (Solenoid diaphragm pump)	4 A
Input frequency	60 hz
Number of coil turns	1000 turns

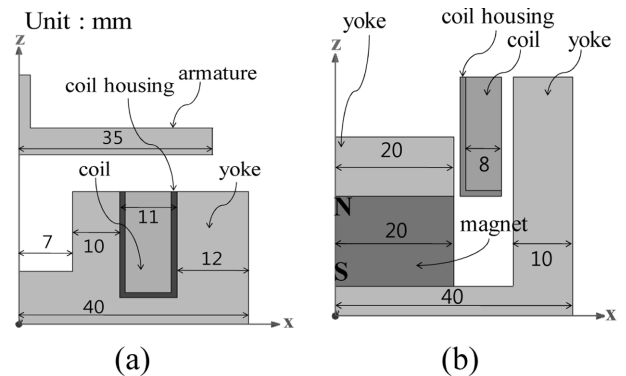


Fig. 5. FE model specification: (a) VCA actuated pump 2-D model specification, (b) solenoid diaphragm pump 2-D model specification.

내고 Table III은 보이스코일 액추에이터와 솔레노이드 다이어프램 펌프의 입력 전류, 구동 주파수, 코일의 감긴 횟수를 나타낸다.

Fig. 5은 유한요소 해석을 위한 모델링과 그 치수를 나타낸다.

기존에 사용 되어 왔던 기계식 다이어프램 연료펌프의 적절한 구동력인 약 40 N의 힘과 약 8~10 mm 정도의 스트로크를 만족시키기 위하여 본 연구에서 제안하는 보이스코일 액추에이터를 Fig. 5와 같이 모델링 하였다.

보이스코일 액추에이터의 시뮬레이션을 위한 모델링에서 요크는 1010 탄소강의 비선형 특성이 이용되고 영구자석은 높이 15 mm 지름 40 mm의 네오디뮴 NdFeB35 자석이 이용되고 이 영구자석은 잔류자속밀도와 보자력이 높은 장점이 있다.

동적 기계시스템의 운동방정식은 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_{Lorentz} = nB_g i l_{eff} \quad (2)$$

보이스코일 액추에이터에서 $F_{Lorentz}$ 는 앞서 언급한 로렌츠힘으로써 영구자석과 코일에 의해 생성되며 코일에 인가된 전류는 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$i = i_0 \sin \omega t \quad (3)$$

입력 전류 i_0 와 구동주파수 ω 는 Table III에 주어진다.

결합된 기계시스템과 전기시스템을 상용 전자기 해석프로그램 맥스웰(Maxwell)로 해석하기 위하여 원통형 좌표계에서 모델의 한 단면을 2D유한요소 모델로 만들고 삼각형 요소를 생성하여 과도운동을 해석하였다.

IV. 시뮬레이션 결과

Fig. 6은 솔레노이드 다이어프램 펌프에서 전기자의 과도운동 중 초기상태와 전류가 인가되어 전기자가 요크쪽으로 끌려내려간 후 생성된 자기력선의 형태를 나타낸다. Fig. 6(a)는

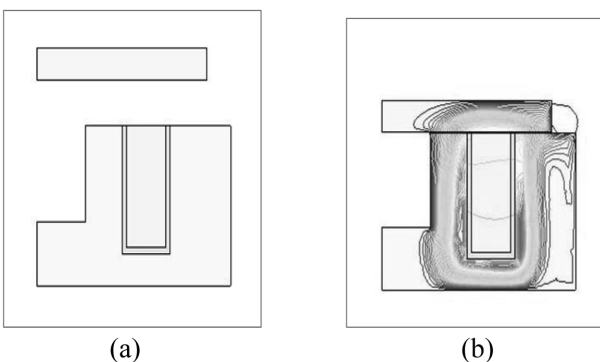


Fig. 6. Position of armature and flux distribution in solenoid diaphragm pump (a) initial position of armature (b) at lower position of armature and flux distribution.

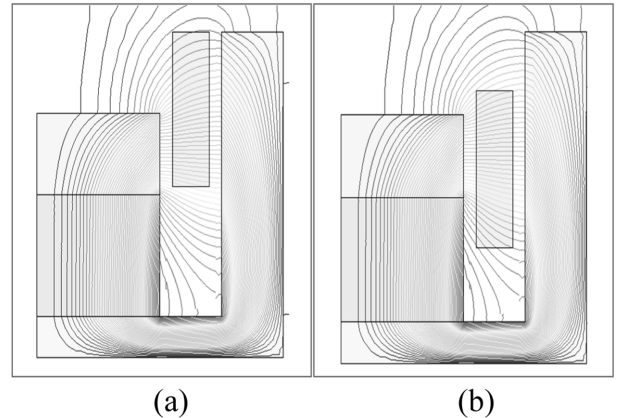


Fig. 7. Position of moving coil and flux distribution in VCA actuated pump (a) initial position of moving coil and flux distribution (b) at lower position of moving coil and flux distribution.

초기상태에서의 전기자의 위치를 나타내고, Fig. 6(b)는 과도운동 후 아래지점에서 자기력선의 형태이다.

Fig. 7은 보이스코일 액추에이터의 가동코일의 과도운동 중 초기상태와 로렌츠힘에 의해 가동코일이 아래로 끌려 내려간 후의 자기력선의 형태를 나타낸다. Fig. 7(a)는 초기상태에서의 가동코일의 위치를 나타내고, Fig. 7(b)는 과도운동 후 아래지점에서의 자기력선의 형태를 나타낸다.

Fig. 8은 보이스코일 액추에이터의 가진력과 솔레노이드 다이어프램 펌프의 가진력을 나타낸다.

Fig. 9보이스코일 액추에이터의 입력전류의 프로파일과 솔레노이드 격막 펌프의 입력전류 프로파일을 동시에 나타낸다.

시뮬레이션 결과 두 시스템간의 동적성능에서는 매우 비슷한 결과를 보여주지만 소모되는 전력면에서는 큰 차이가 있

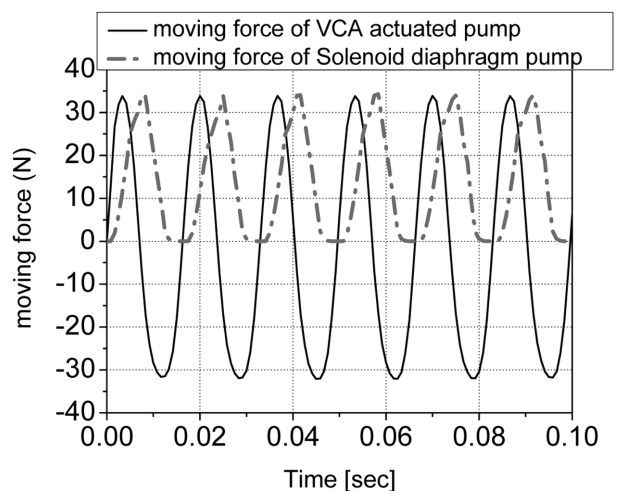


Fig. 8. Position profile of moving coil of VCA actuated pump and armature of Solenoid diaphragm pump.

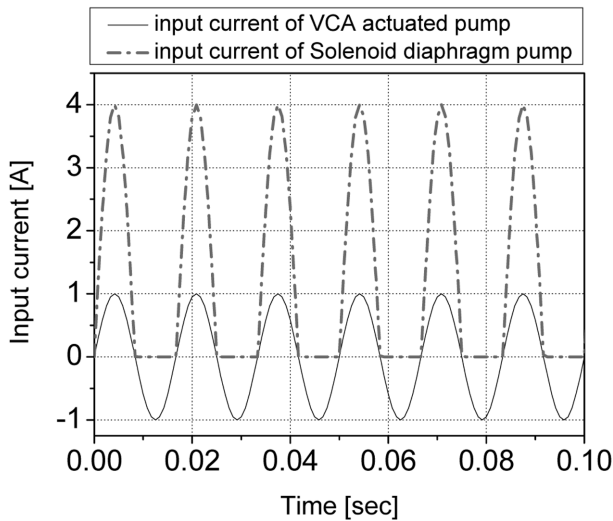


Fig. 9. Input current profile for VCA actuated pump and Solenoid diaphragm pump.

음을 확인할 수 있다.

솔레노이드 다이어프램 연료펌프와 보이스코일액츄에이터의 같은 동적 성능 하에서 전력 소모량을 비교하여 보았을 때 보이스코일 액츄에이터가 솔레노이드 다이어프램 연료펌프보다 인가되는 전류의 양을 시간에 따른 적분 결과 전력절감효과가 약 87.5% 정도 있음을 알 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서 자동차 연료 펌핑을 위한 보이스코일 액츄에이터를 제안하였다. 보이스코일 액츄에이터와 기존에 사용되고있는 솔레노이드 다이어프램 펌프를 유한요소해석을 통해

성능을 점검하였다.

그 결과 동적성능면에서 두 시스템이 매우 비슷한 결과를 보여주지만 전력소모 면에서는 큰 차이가 있음을 확인하였다.

솔레노이드 다이어프램 펌프의 경우 본 연구에서 제안하는 보이스코일 액츄에이터와 같은 성능을 구현하기 위해서는 7 배의 전력소모가 더 필요함을 확인하였다. 이는 연료펌핑을 위한 보이스코일 액츄에이터의 사용으로 전력소모를 87.5% 정도 절감시킬 수 있음을 시사한다. 이로써 전자부품을 많이 사용하는 최근의 자동차 산업계의 추세에 적합한 시스템을 입증하였다.

또한 본 연구에서 제안하는 보이스코일 액츄에이터의 경우 기계식 다이어프램 연료펌프의 단점인 시스템의 복잡성과 소음, 에너지 손실 등을 극복할 수 있는 장치를 개발할 수 있는 가능성을 볼 수 있다.

후 기

“이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0005447).”

참고문헌

- [1] J.-H. Lee, J.-H. Kim, J.-Y. Lee, S.-H. Jung, and B.-W. Han, J. Kor. Mag. Soc. **20**, 28 (2010).
- [2] B.-H. Kim, B.-Y. Lee, and W.-J. Kim, Trans. KOSME **30**, 58 (2005).
- [3] Y.-I. Kim, Trans. KOTRA & globalwindow.org (2004).
- [4] H.-C. Lee and K.-J. Kim, Trans. KSME **15**, 1141 (1991).

Design and Analysis of Voice Coil Actuator to Drive Fuel Pump in Automobile

Se-Myung Park, Jin-Ho Kim* and Cheolho Bai

School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 214-1, Gyeongbuk 712-749, Korea

(Received 19 October 2010, Received in final form 7 December 2010, Accepted 10 December 2010)

Solenoid diaphragm fuel pump, which to replace mechanical fuel pump system by utilizing cam-shaft driving force, is in the spotlight for being a high efficient green car component. However, there is a drawback in power consumption as a solenoid diaphragm fuel pump only relies on solenoid for its flux needed in reciprocating motion. Therefore, this research proposes permanent magnet type VCM (Voice Coil Motor) fuel pump system to minimized power consumption. Furthermore, the study compares and analyzes power consumption and dynamic performance between the current and the former solenoid diaphragm pump by conducting finite element analysis with the commercial electromagnetic solver, MAXWELL.

Key words : fuel pump, diaphragm, solenoid, voice coil actuator, finite element analysis, permanent magnet