

차량용 MR 팬 클러치의 제어성능 평가 : 실험적 고찰

Control Performance Evaluation of MR Fan Clutch for Automotive : Experimental Investigation

김 은 석* · 최 승 북†

Eun-Seok Kim and Seung-Bok Choi

Key Words : Magnetorheological Fluid(자기유변유체), Fan Clutch(팬 클러치), Optimal Design(최적 설계), Finite Element Method(유한요소법), Sliding Mode Controller(슬라이딩 모드 제어기)

ABSTRACT

This paper presents temperature control of engine cooling system using a controllable magnetorheological (MR) fan clutch. An appropriate size of MR fan clutch is devised and modeled on the basis of Bingham model. Subsequently, an optimization to determine design parameters such as width of housing is undertaken by choosing the reciprocal of the controllable torque as an objective function. Under consideration of spatial limitation, design parameters are optimally determined using finite element analysis. A sliding mode controller is then designed to control the angular velocity of the MR fan clutch using experimentally determined parameters. The designed controller is experimentally implemented and control performances of the MR fan clutch system are evaluated.

1. 서 론

최근 차량에 탑재되는 엔진들이 고성능화, 고배기량화가 되어감에 따라 차량의 엔진에서 발생하는 발열량이 크게 증가하고 있다⁽¹⁾. 엔진 발열량은 엔진 효율에 많은 영향을 미치기 때문에 차량의 냉각장치는 엔진의 효율측면에서 매우 중요시 되고 있으며, 최근의 자동차 설계 경향을 보면 엔진 냉각 계통에 다양한 신기술들이 적용되고 있다. 냉각 계통으로 유입되는 냉각 공기는 프런트 그릴에서 차량의 팬 클러치 또는 모터에 장착된 냉각 팬에 의해 발생되고, 오일 쿨러, 콘덴서, 라디에이터 등을 통과하여 엔진 룸에 유입된다. 이러한 냉각 효과로 인해 엔진의 효율을 증가시킬 수 있으며, 차량 엔진의 적절한 엔진 냉각효과를 이용해 엔진의 연비를 향상시키기 위해 냉각장치에 여러 가지 기술들이 적용되고 있다. 그 중 대표적인 기술이 현재 자동차의 냉각 장치로 많이 사용되고 있는 점성 유체를 이용한 팬 클러치이다. 점성 유체 팬 구동 클러치는 냉각 팬을 구동하는데 있어 ON-OFF mode 나 High-Low speed mode 로 되어 있는 ON-OFF 방식이 사용되고 있다. ON-OFF 팬 클러치는 낮은 냉각 부하 시에 과도한 팬

구동 속도로 인한 과냉의 가능성이 있으며 고유의 ON-OFF 작동 설계 모드 때문에 아이들(idle) 엔진 부하 상태에서도 충분치 못한 팬 구동 속도를 가질 수 있다. 이러한 ON-OFF 방식의 한계를 극복하고자 보다 향상된 기술이 개발되고 있다. 그 예로 선형적으로 비례하는 적절한 냉각 공기량을 제공하기 위해 무단 변속 엔진 유체 팬 클러치가 연구되었으며⁽²⁾, 냉각 시스템의 능동적인 제어를 위해 영구자석과 전자석을 결합한 엔진 냉각 전자 팬 클러치도 개발되었다⁽³⁾.

본 연구에 앞서 냉각수의 온도에 따라 적절히 엔진 팬의 속도를 조절할 수 있는 MR 팬 클러치를 최적 설계를 이용하여 설계하였으며, 시뮬레이션을 통해 검증하였다⁽⁴⁾. MR 유체는 자기장(magnetic field)의 세기에 의해 전단저항력이 조절되는 특성을 갖는 재료이다. MR 유체는 넓은 온도 범위에서 성능의 안정성이 보장되며 고전압 장치가 필요하지 않아서 차량용 장치로 사용이 가능하다⁽⁵⁾. 또한 높은 항복 응력으로 인해 소형화에 매우 유리하다.^(6,7) 이러한 MR의 특성을 이용하여 팬 클러치에 의해 생기는 엔진부하를 최소화 하고 클러치의 넓은 동작범위를 최대화할 수 있도록 유한요소해석을 이용하여 최적 설계를 수행하였으며, 이를 통해 설계 변수가 결정되었다.

따라서, 본 연구에서는 최적 설계를 이용해 얻은 설계 변수(design parameter)를 이용하여 MR 팬 클러치를 제작 후 실험을 통한 검증을 하였다. 입력 축으로부터 전달받은 속도를 냉각수의 온도에 따라 적

† 교신저자; 정회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : seungbok@inha.ac.kr
Tel : (032)860-7319, Fax : (032)868-1716
* 인하대학교 기계공학과

절히 팬의 속도를 조절할 수 있도록 제어기를 설계하였다. 강건 제어기(robust controller)중 하나인 슬라이딩 제어기를 설계 후 실험을 통해 온도 제어성능을 검증하였다.

2. MR 팬 클러치 시스템

MR 장치는 MR 유체와 전극의 상대 운동에 따라 유동 모드(flow mode), 전단 모드(shear mode), 압착 모드(squeeze mode)의 형태로 분류할 수 있다⁽⁸⁾. MR 팬 클러치는 회전 운동시 전단모드가 발생하며 이를 이용해 동작한다.

전단 모드의 경우 MR 유체의 거동은 일반적으로 다음과 같은 빙햄 모델로 표현할 수 있다.

$$\tau = \tau_y + \eta\dot{\gamma} \quad \tau_y(H) = \alpha H^\beta \quad (1)$$

여기서 τ 는 MR 유체의 전단응력을 나타내며, η 는 MR 유체의 기본점성 계수이고, $\dot{\gamma}$ 는 전단 속도 비를 나타낸다⁽⁹⁾. τ_y 는 MR 유체의 항복전단응력을 표현하는 것으로서, 자기장의 세기(field intensity) H 의 증가와 더불어 증가한다. 이때, 비례상수 α 와 지

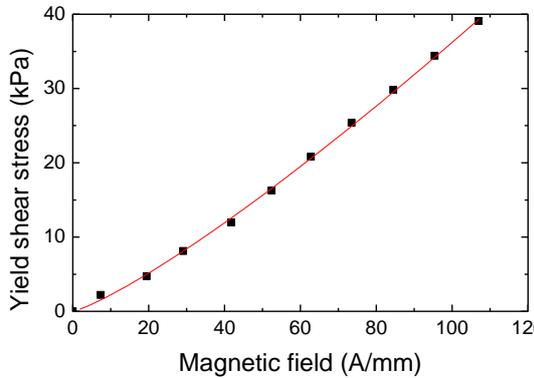


Fig. 1 Yield stress of MR fluid versus magnetic field

Table 1 Design parameters of the MR fan clutch

Design Parameters	Values
Height of Disk t	0.013 m
Depth of Coils W	0.012 m
Width of Housing dh	0.0085 m
Vertical Gap Size g_v	0.001 m
Horizontal Gap Size g_h	0.003 m

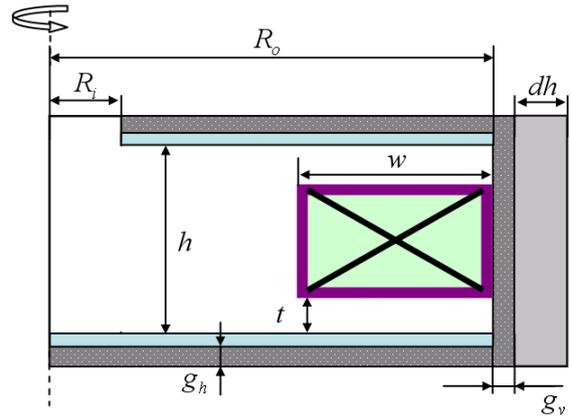


Fig. 2 Geometric parameters of the MR fan clutch

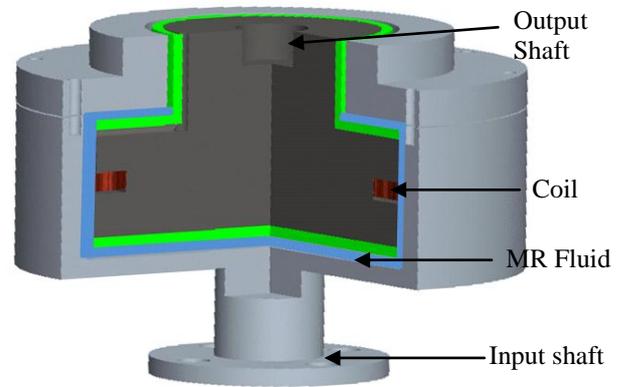


Fig. 3 Schematic configuration of the proposed MR fan clutch

수 β 는 MR 유체의 항복응력을 결정하는 고유 특성 값이다. Fig.1은 실험을 통해 도출된 MR 유체의 자기장에 따른 항복전단응력 값의 변화를 나타낸다. 이러한 결과를 수식 (1)을 이용하여 항복전단응력으로 표현하면 다음과 같다.

$$\tau_y(H) = 0.13592H^{1.21273} \quad (2)$$

MR 팬 클러치의 회전 운동에서 발생하는 토크의 크기는 전단응력과 접촉면적으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} T &= \tau_y \times A \times R + T_\eta + T_f \\ &= 4\pi R_o^2 t \tau_y + \frac{\pi^2 \eta \{(R_o + g_v)^4 - R_i^4\} f}{g_h} \\ &\quad + \frac{\pi^2 \eta (R_o + g_v)^4 f}{g_h} + \frac{4\pi^2 R_o^3 \eta h f}{g_v} + T_f \\ &= T_c + T_\eta + T_f \end{aligned} \quad (3)$$

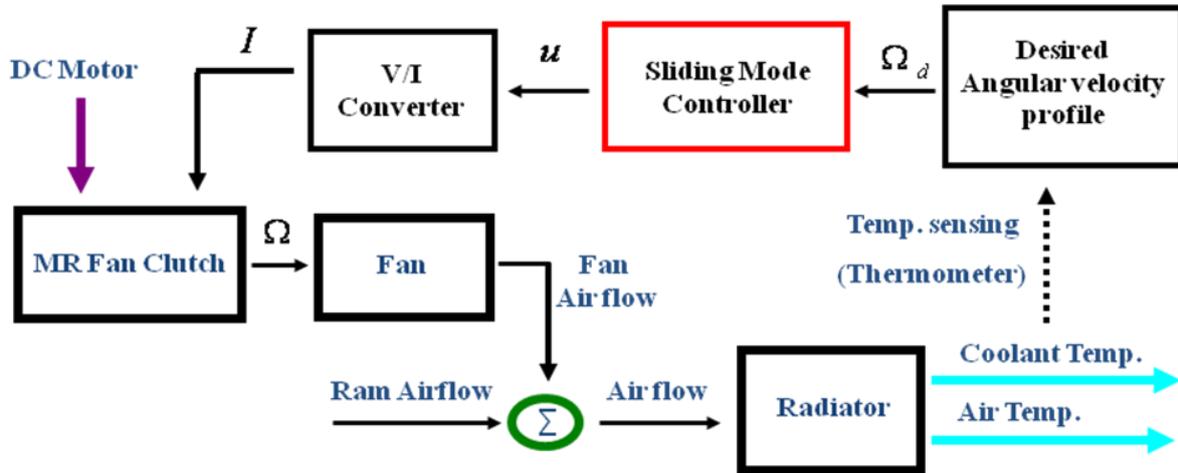


Fig. 4 Block diagram of engine cooling control system for automotive.

여기서 T_c 는 자기장 부하 시 발생하는 제어토크 (controllable torque), T_v 는 자기장과는 무관한 MR 유체의 점성으로 인한 점성 토크(viscous torque), T_f 는 베어링 등에서 발생하는 마찰토크(frictional torque)이다. 또한, Fig. 2 에 나타낸 것과 같이 R_o 는 디스크의 바깥 반지름, R_i 는 디스크의 안쪽 반지름, A 는 접촉 면적, h 는 디스크의 높이, t 는 디스크에서 마그네틱 코일을 제외한 부분의 높이, f 는 입력 축과 출력축의 회전속도 차이를 나타낸다. g_v 는 MR 유체에 흐르는 자기장 경로의 길이를 나타낸다.

MR 팬 클러치 내부의 자기회로를 최적화하기 위해서 상용 소프트웨어인 ANSYS 를 사용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 최적설계 및 제어에 사용되는 MR 유체는 미국 Lord 사의 MRF-132DG⁽⁴⁰⁾ 로 Carbonyl iron 과 Hydrocarbon oil 을 합성한 것이며, 중량 비는 80.98%이며, 기본점성계수는 0.092 Pas, 밀도는 2.92-3.18 g/cm³ 이다. 최적설계에 사용된 목적함수는 전체 토크에서 제어토크를 최대화할 수 있도록 T_c 의 역수를 최소화하는 것으로 설정하였다. 이는 아래의 식과 같이 표현할 수 있다.

$$Obj = \min \left\{ \frac{1}{T_c} \right\} = \min \left\{ \frac{1}{4\pi R_o^2 t r_y} \right\} \quad (4)$$

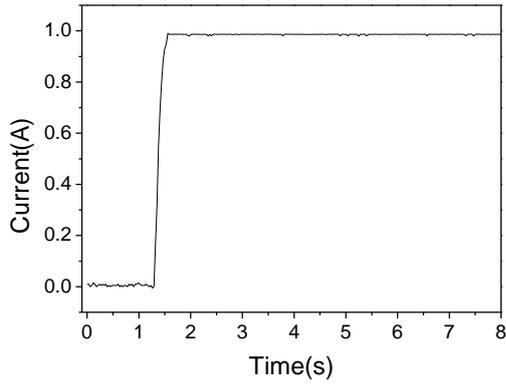
팬 클러치의 자기회로 구성 시 자속(magnetic flux)의 집중을 위해 자화(magnetization)가 잘 되지 않는 알루미늄을 부착시켰으며, 알루미늄 안쪽 자기회로의

변수들을 이용하여 최적 설계를 진행하였다. 최적 설계를 이용해서 얻은 MR 팬 클러치의 설계 변수들의 값은 Table1 에 나타내었다. 최적 설계를 통해 얻은 설계 값을 이용하여, 최종적으로 모델링 한 MR 팬 클러치의 구성도는 Fig. 3 과 같다.

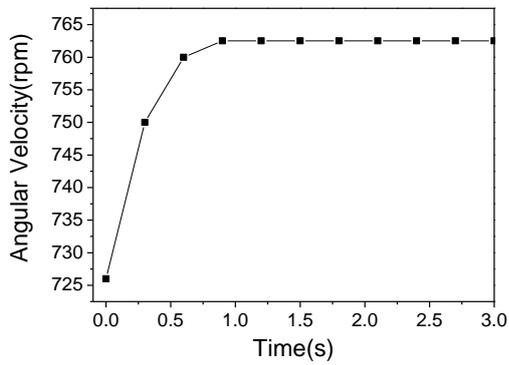
3. 제어기 설계

Fig.4 는 MR 팬 클러치를 이용한 전체적인 엔진 냉각 시스템의 제어 블록 다이어그램으로써 차량의 라디에이터로부터 냉각수의 온도를 측정하여 엔진 냉각 부하에 비례해서 팬 클러치의 각속도를 제어하는 시스템을 나타낸다. 측정된 온도를 이용해 온도 제어에 필요한 각속도를 산출해 낸 후 제어기를 이용하여 제어입력전압을 구할 수 있으며, 이를 전력공급장치(V/I Converter)를 통해 MR 팬 클러치에 전류를 가하여 냉각 팬의 속도를 제어할 수 있도록 하였다.

본 연구의 제어시스템에 사용된 전력공급장치와 MR 팬 클러치의 특성을 파악하기 위해 실험을 수행하였으며, 결과는 Fig. 5 와 같다. Fig. 5(a), (b)는 MR 팬 클러치 시스템에 사용되는 전력공급장치와 MR 팬 클러치의 시간 응답을 보여준다. 그래프로부터 제어기에 사용된 전력공급장치 장치와 MR 팬 클러치의 시상수를 구할 수 있다. 따라서 전력공급장치와 MR 팬 클러치는 각각 1 차의 과도감쇠(over-damped)특성을 가진 시스템으로 설정할 수 있으며, 이로부터 MR 팬 클러치 시스템은 전력공급장치와 MR 팬 클러치가 연속되어 있는 2 차의 과도감쇠의 특성을 가진 시스템으로 모델링 할 수 있다. 이것에



(a) Time response of V/I Converter



(b) Time response of MR fan clutch

Fig. 5 Time response of the MR fan clutch system.

대한 2 차 상 미분 방정식 형태의 지배방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_p t_c \ddot{\Omega}(t) + (t_p + t_c) \dot{\Omega}(t) + \Omega(t) = u(t) \quad (5)$$

여기서 $\Omega(t)$ 는 팬의 각속도이며, $u(t)$ 는 제어입력 전압이다. t_p 는 전력공급장치의 시상수, t_c 는 전류의 계단 입력에 대한 MR 유체의 반응을 나타내는 시상수이다. 각각의 값은 Fig.5로부터 $t_p = 162ms$, $t_c = 337ms$ 로 정하였다. 식(5)을 상태공간방정식 (state space model)으로 표현하면 다음과 같다.

$$X(t) = [x_1 \quad x_2]^T = [\Omega \quad \dot{\Omega}]^T \quad (6)$$

$$\dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t) \quad (7)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{t_p t_c} & -\frac{t_p + t_c}{t_p t_c} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{t_p t_c} \end{bmatrix} \quad (8)$$

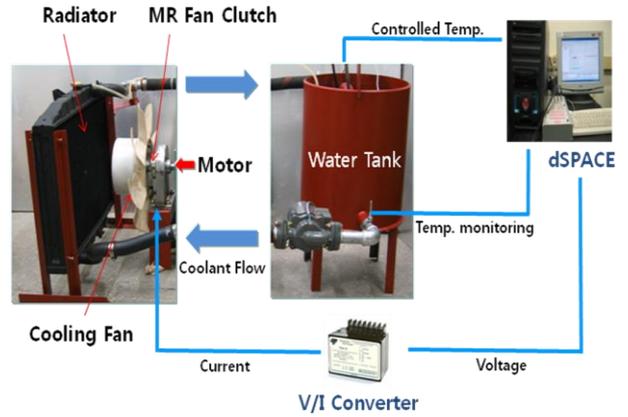


Fig. 6 Experimental apparatus for temperature control of MR fan clutch system.

위와 같이 모델링 된 MR 팬 클러치 시스템의 각속도 제어 성능을 확인하고자 슬라이딩 모드 제어를 설계 하였다. 슬라이딩 모드 제어기의 추적오차 (tracking error)는 다음과 같이 정의하였다.

$$e(t) = X(t) - X_d(t) = [x_1 - x_{d1} \quad x_2 - x_{d2}]^T \quad (9)$$

$X_d(t)$ 는 추적해야 할 기준이 되는 요구토크 T_d 를 의미한다. 추적오차를 이용하여, 슬라이딩 서피스를 다음과 같이 정의한다^(11,12).

$$S(e(t)) = \left(\frac{d}{dt} + c \right) e_1(t) = c e_1(t) + e_2(t) = Ce(t), \quad c > 0 \quad (10)$$

슬라이딩 서피스 $S(e(t)) = 0$ 에서 슬라이딩모드가 존재하기 위한 조건은 다음과 같다.

$$S(e(t))\dot{S}(e(t)) < 0 \quad (11)$$

식(11)의 조건을 만족시키기 위한 제어기는 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$u = -(CB)^{-1}(CAX(t) - C\dot{X}_d(t)) - k \operatorname{sgn}(S(t)) \quad (12)$$

식(12)에서 시스템의 채터링(chattering)을 방지하기 위해 추적오차가 경계층의 내부에 존재 시에는 부호함수 $\operatorname{sgn}(S(t))$ 를 포화함수 $\operatorname{sat}(S(t))$ 로 대체한다. 따라서 MR 팬 클러치 시스템의 최종 제어기는 다음과 같이 표현할 수 있다.

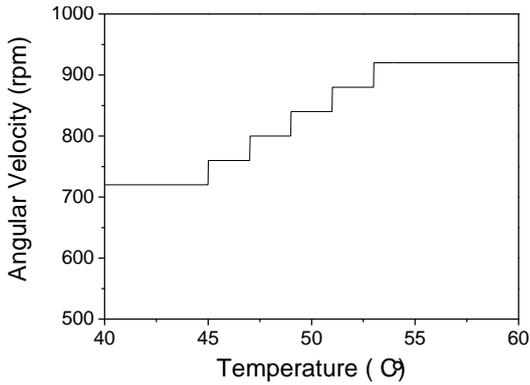


Fig. 7 Angular velocity vs. Temperature

$$u = -(CB)^{-1}(CAX(t) - C\dot{X}_d(t)) - k\text{sat}(S(t)) \quad (13)$$

여기서,

$$\text{sat}(S(t)) = \begin{cases} S(t)/\varepsilon & |S(t)| \leq \varepsilon \\ \text{sgn}(S(t)) & |S(t)| > \varepsilon \end{cases} \quad (14)$$

식(14)에서, ε 은 경계층의 두께이다.

위에서 설계된 제어기에 사용된 설계 변수에 실제 입력된 값은 각각 $c=1$, $\varepsilon=4.1$, $k=0.05$ 이다.

4. 실험 결과

Fig.6은 본 연구에서 제안한 MR 팬 클러치 시스템의 실험적 검증에 사용된 실험장치이다. 물 탱크(water tank)안에 있는 열선(heat coil)에 의해 냉각수를 가열할 수 있게 하였으며, 펌프를 이용하여 라디에이터에 있는 냉각수와 순환할 수 있게 하였다. 물 탱크의 입구와 출구에 써모커플을 설치하여 팬 클러치에 의해 라디에이터로부터 나오는 냉각수의 온도와 물탱크에 저장되어 있는 냉각수의 온도를 측정할 수 있게 하였다. 측정된 온도에 따라 적절하게 냉각 팬의 속도를 조절할 수 있도록 냉각 수의 온도와 냉각 팬의 속도 관계를 설정하였다. 온도가 증가함에 따라 냉각 팬의 속도가 증가되도록 결정하였으며, 그 관계 그래프는 Fig. 7과 같다. 측정된 온도 값을 실시간 제어기에 입력한 후, 계산된 제어입력 전압을 MR 팬 클러치에 인가하여 냉각수의 온도를 제어할 수 있도록 하였다. 본 실험에서 냉각수가 유지해야 하는 최종 제어목표 온도 값은 45°C 로 설정한 후 실험을 진행하였다.

우선, 제어기를 동작시키지 않은 상태에서 실험을 진행하였으며 모터에 의해 냉각 팬에 전달되는 토크

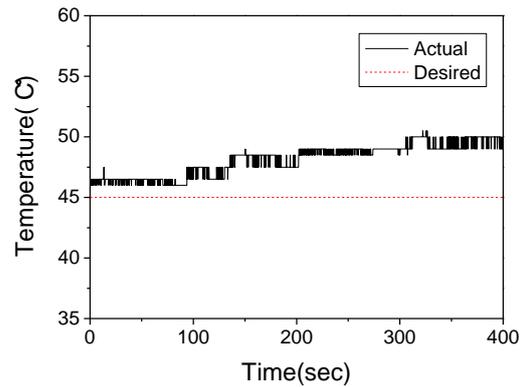
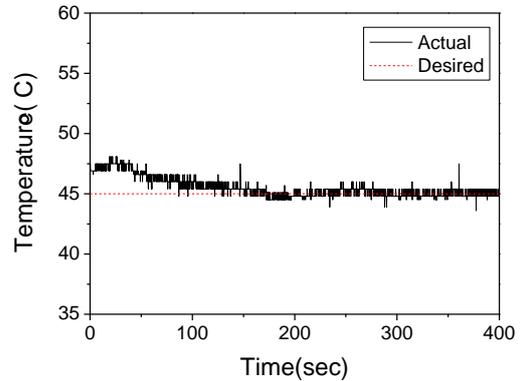
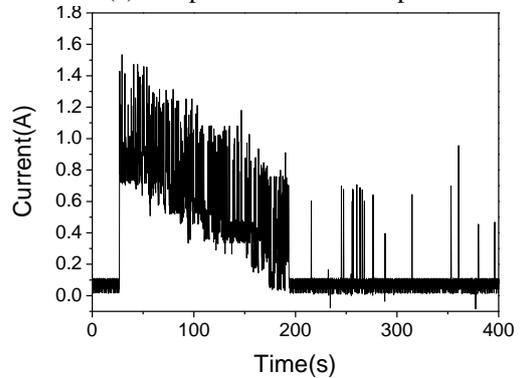


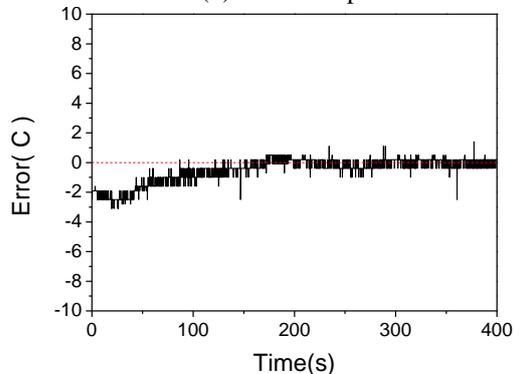
Fig. 8 Temperature without control



(a) Temperature control response



(b) Current input



(c) Tracking error

Fig. 9 Temperature control results of MR fan clutch

는 MR 팬 클러치의 점성 토크와 마찰토크에 의해서만 전달되도록 하였으며, 그 결과는 Fig. 8 과 같다. 결과에서 확인할 수 있듯이, 점성토크와 마찰토크에 의해서 냉각 팬이 동작하지만, 시간이 지날수록 점차적으로 냉각수의 온도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig.9(a)는 설계된 제어기에 의해 냉각수의 온도를 제어한 결과이며, Fig.9(b)는 온도 제어 시에 MR 팬 클러치에 인가된 전류 값이고, Fig.9(c)는 제어 시에 발생한 오차를 나타낸다. 실험을 통해 얻은 Fig.9(a)에서 볼 수 있듯이 슬라이딩 모드 제어가 적절히 동작함을 확인할 수 있었으며, 약 100 초 이후 냉각수의 온도가 제어 목표 값인 45 °C 대비 1 °C 내외로 제어되며, 약 170sec 이후 제어목표 값에 완전히 수렴함을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 차량의 팬 클러치에 의해 생기는 엔진 부하를 최소화하고, 엔진 온도에 따라 엔진 냉각 팬에 적절한 구동력을 전달하여 엔진 냉각수의 온도를 적절히 제어할 수 있도록 MR 유체를 이용한 MR 팬 클러치 시스템을 제안하였다. 상용 소프트웨어인 ANSYS 를 사용하여 최적 설계를 진행하였으며, 이로부터 얻은 설계 값을 토대로 제작이 이루어 졌다. 설계 값을 이용해 제작된 MR 팬 클러치 시스템은 강건제어기 중 하나인 슬라이딩 모드 제어기를 이용해 온도 제어를 할 수 있도록 하였으며, 실시간 제어기를 이용하여 실험을 통해 시스템의 온도제어 성능을 검증하였다. 최종 제어 결과의 오차 범위는 최대 2%이내로 수렴하였으며, 결과로부터 설계된 MR 팬 클러치 시스템이 적절한 제어 성능을 보여주는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안된 MR 팬 클러치 시스템이 실제 차량의 냉각장치에 적용 되었을 때 적절한 냉각성능을 발휘할 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 한국 과학재단 도약지원사업(과제번호 R17-2007-028-01001-0) 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

(1) Shin, C. H., Lee, S. H., Park, W. G., Jang, G. ..

2006, " The Study about the Performance-Analysis of a Automotive Engine Cooling System " , Transaction of KSAE, Vol. 14. No. 2, pp. 30~48.

(2) Lee, K. Y., Lee, J. H., Jung, S. Y., 1998, " Development of continuous Variable Speed Viscous Fan Clutch for Engine Cooling System " , Proceeding of KSAE Annual spring conference, pp, 859~864.

(3) Lee, B. H., Jeon, J. D., 2008, " Development of Engine Cooling Magnetic Fan Clutch of Permanent magnet and Elector magnetic " , Proceedings of the KSAE Annual Conference, pp, 225.

(4) Kim, E. S., Sohn, J. W., Choi, S. B., 2009, " Design and Control of MR Fan Clutch for Automotive Application " , Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 8, pp. 795~801.

(5) Kim, C. J., Han, Y. M., Sung, G. K., Choi, S. B., 2008, " Controllable Haptic Knob for Vehicle Instrument Using MR Fluids " , Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 307~314.

(6) Choi, S. B., Hong, S. R., Cheong, C. C. and Park, Y. K., 1999, " Comparison of Field-controlled Characteristics Between ER and MR Clutches " , Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 10, No. 8, pp. 615~619.

(7) Neelakantan, V. A. and Washington, G. N., 2005, " Modeling and Reduction of Centrifuging in Magnetorheological (MR) transmission Clutches for Automotive Applications " , Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 16, No. 9, pp. 703~712.

(8) Jolly, M. R., Bender, J. W. and Carlson, J. D., " Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids " , The International Society for optical Engineering, Vol. 3327, pp. 262~275.

(9) Ginder, J. M. and Ceccio, S. L., 1995, " Effect of Electrical Transients on the Shear Stresses in Electrorheological Fluids " , Journal of Reology, Vol. 39, No. 1, pp. 211~234.

(10) Lord Corporation, Lord technical data, <http://www.lordfulfillment.com/upload/DS7015.pdf>.

(11) Slotine, J. J. E. and Sastry, S. S., 1994, " Tracking Control of Nonlinear System Using Sliding Surfaces with Application to Robot Manipulators " , International Journal of Control, Vol. 38, No.2, pp. 465~492.

(12) Choi, S. B., Park, D. W. and Jayasuriya, S., 1994, " A Time-varying Sliding Surface for Fast and Robust Tracking Control of Second-order Uncertain Systems " , Automatica, Vol. 30, No. 5, pp. 899~904.