

차량용 MR 팬 클러치 설계 및 제어

Design and Control of MR Fan Clutch for Automotive Application

김 은 석* · 손 정 우* · 최 승 복†
Eun-Seok Kim, 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 an optimal design of a magnetorheological(MR) fan clutch based on finite element analysis and also presents torque control of engine cooling fan using a sliding mode control. The MR fan clutch is constrained in a specific volume and the optimization problem identifies the geometric dimension of the fan clutch that minimizes an objective function. The objective function for the optimization problem is determined based on the solution of the magnetic circuit of the initially designed clutch. Under consideration of spatial limitation, design parameters are optimally determined using finite element analysis. After describing the configuration of the MR fan clutch, the viscous torque and controllable torque are obtained on the basis of the Bingham model of MR fluid. Then, a sliding mode controller is designed to control the torque of the fan clutch according to engine room temperature and control performance is evaluated through computer simulation.

1. 서 론

최근에 출시되는 차량들은 높은 출력을 내기 위해서 고성능, 고배기량의 엔진을 장착하고 있으며, 고속 및 과부하 주행에 따라 엔진에서 발생하는 발열량은 크게 증가되는 추세에 있다⁽¹⁾. 이에 비해서 엔진 룸의 냉각에 중요한 영향을 미치는 개구부의 면적, 그릴 및 냉각 팬 등은 미적인 요소와 소음으로 인한 승차감과 직결되어 있으므로 설계자의 요구를 전면적으로 수용하기는 힘든 실정이다. 따라서 최근의 자동차 설계 경향을 살펴보면 엔진 냉각 계통에 다양한 신기술들이 적용되고 있다. 냉각 계통으로 유입되는 냉각 공기는 프런트 그릴 에서 팬 클러치에 장착된 냉각 팬에 의해 발생되고 오일 쿨러, 콘덴서, 라디에이터 등을 통과하여 엔진 룸에 유입된다. 이 때 공기 역학적인 소음들이 발생하는데 이들 소음 중 팬 소음은 엔진의 가장 큰 소음 원이다. 엔진의 팬 소음과 진동을 줄이고, 에어컨디셔너의 성능과 엔진의 연비를 향상시키기 위해 여러 가지 기술들이 적용되고 있다. 그 중 대표적인 기술이 현재 자동차의 냉각 장치로 가장 많이 사용되고 있는 점

성 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 연구에서는 MR 유체를 이용해서 엔진 냉각 부하에 비례해서 팬의 토크를 제어할 수 있는 MR 팬 클러치를 제안한다. 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⁽⁴⁾. 또한 높은 항복 응력으로 인해 소형화에 매우 유리하다.^(5,6) 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 변수를 결정하였다. 적절한 팬 구동력의 전달은 과도한 팬 구동

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

력의 감소로 인해 효과적인 엔진의 연비 개선 및 팬의 구동에 따른 소음과 진동을 감소시킬 수 있다. 따라서 엔진부하에 따라 적절한 팬 구동력을 전달할 수 있도록 슬라이딩 모드 제어를 설계하였으며, 요구되는 온도에 맞는 토크 프로파일(profile)을 이용해서 제어 시뮬레이션을 진행하였다.

2. MR 팬 클러치 모델링

본 연구에서 설계한 MR 팬 클러치는 Fig.1 과 같다. 기존의 점성 유체 팬 구동 클러치보다 간단한 구조로써 출력 축(output shaft)과 연결된 디스크에 코일(coil)이 감겨있고, 디스크 주변으로 MR 유체가 채워져 있다. 제안된 MR 팬 클러치는 현재 상용화된 2000cc 급 디젤엔진에 사용될 수 있도록 모델링을 진행하였다. 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⁽⁷⁾. MR 팬 클러치는 회전 운동시 전단모드가 발생하며 이를 이용해 동작한다.

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

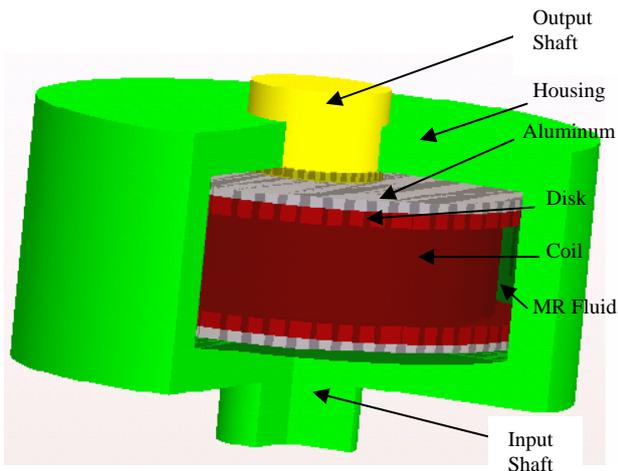


Fig.1 Schematic configuration of the proposed MR fan clutch

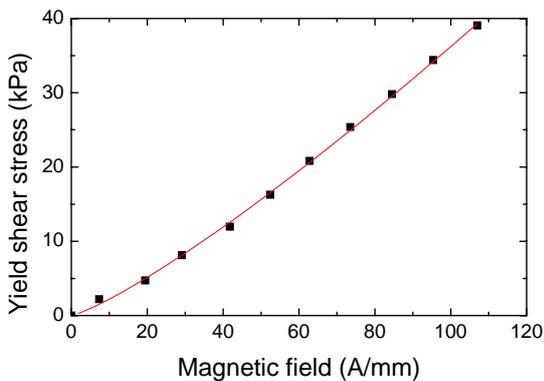


Fig. 2 Yield stress of MR fluid versus magnetic field

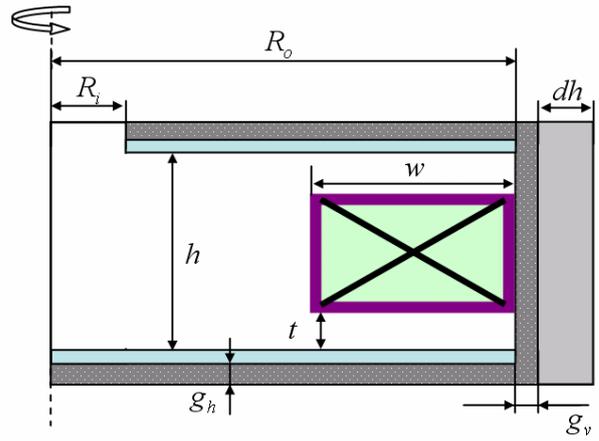


Fig. 3 Geometric parameters of the MR fan clutch

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

여기서 τ 는 MR 유체의 전단응력을 나타내며, η 는 MR 유체의 기본점성 계수이고, $\dot{\gamma}$ 는 전단 속도 비를 나타낸다⁽⁸⁾. τ_y 는 MR 유체의 항복전단응력을 표현하는 것으로서, 자기장의 세기(field intensity) H 의 증가와 더불어 증가한다. 이때, 비례상수 α 와 지수 β 는 MR 유체의 항복응력을 결정하는 고유 특성이기 때문이다. Fig. 2는 실험을 통해 도출된 MR 유체의 자기장에 따른 전단응력값의 변화를 나타낸다. 이러한 결과를 수식 (1)을 이용하여 항복전단응력으로 표현하면 다음과 같다.

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

자기장의 세기 (H)는 권선수 (N)와 여기에 흐르는 전류 (I)를 이용하여 다음과 같은 관계식을 통해 얻을 수 있다⁽⁹⁾.

$$NI = H \times L \quad (3)$$

여기서 L 은 자기장 경로의 길이를 나타낸다. 이 연구에서 제안된 MR 팬 클러치 구조(Fig.3)를 보면 MR 유체에 흐르는 자기장의 경로는 2개이며, 강자 성체에 흐르는 자기장의 경로는 1개이다. 따라서 식 (3)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$NI = 2 \times H_M L_M + H_S L_S \quad (4)$$

여기서 첨자 M , S 는 각각 MR 유체와 철을 의미한다. 이때 철에 흐르는 자기장은 MR 유체의 자기장에 비해 매우 작기 때문에 식(4)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_M = \frac{NI}{2g_v} = \frac{NI}{2L_M} \quad (5)$$

여기서 g_v 는 MR 유체에 흐르는 자기장 경로의 길이를 나타낸다.

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

$$\begin{aligned}
 T &= \tau \times A \times R + T_\eta + T_f \\
 &= 4\pi R_o^2 t \tau_y + \frac{\pi^2 \eta \{(R_o + d)^4 - R_i^4\} f}{g_h} \\
 &\quad + \frac{\pi^2 \eta (R_o + d)^4 f}{g_h} + \frac{4\pi^2 R^3 \eta h f}{g_v} + T_f \\
 &= 4\pi R_o^2 t \alpha \left(\frac{NI}{2g} \right)^\beta + \frac{\pi^2 \eta \{(R_o + d)^4 - R_i^4\} f}{g_v} \\
 &\quad + \frac{\pi^2 \eta (R_o + d)^4 f}{g_h} + \frac{4\pi^2 R^3 \eta h f}{g_v} + T_f \\
 &= T_c + T_\eta + T_f \tag{6}
 \end{aligned}$$

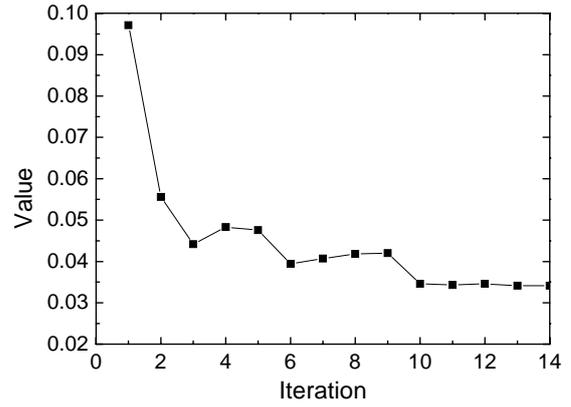
여기서 T_c 는 자기장 부하 시 발생하는 제어토크(controllable torque), T_η 는 자기장과는 무관한 MR 유체의 점성으로 인한 점성 토크(viscous torque), T_f 는 베어링 등에서 발생하는 마찰토크(frictional torque)이다. 또한 R_o 는 디스크의 바깥 반지름, R_i 는 디스크의 안쪽 반지름, A 는 접촉 면적, h 는 디스크의 높이, t 는 디스크에서 마그네틱(magnetic) 코일을 제외한 부분의 높이, f 는 입력 축과 출력축의 회전속도 차이를 나타낸다.

3. MR 팬 클러치의 최적설계

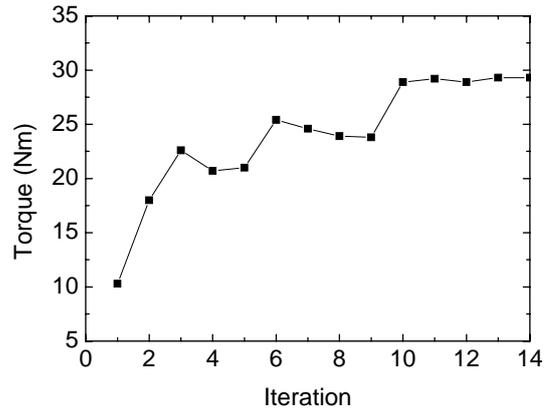
본 연구에서는 MR 팬 클러치 내부의 자기회로를 최적화하기 위해서 상용 소프트웨어인 ANSYS (<http://www.ansys.com/>)를 사용하여 유한 요소 해석을 수행하였다. 이 연구에서 최적설계 및 제어에 사용되는 MR 유체는 미국 Lord 사의 MRF-132DG⁽⁴⁰⁾로 Carbonyl iron 과 Hydrocarbon oil 을 합성한 것이며, 중량 비는 80.98%이며, 기본점성계수는 0.092 Pas, 밀도는 2.92-3.18 g/cm³ 이다.

팬 클러치의 최적화는 기존 상용차의 클러치와 동일한 크기로 설계될 수 있도록 전체 지름과 두께를 각각 140mm, 40mm 로 고정시킨 후 진행하였다. 설계 최적화 시의 목적함수는 전체 토크에서 제어토크를 최대화하여 동작범위를 최대화하기 T_c 의 역수를 최소화하는 것으로 설정하였다.

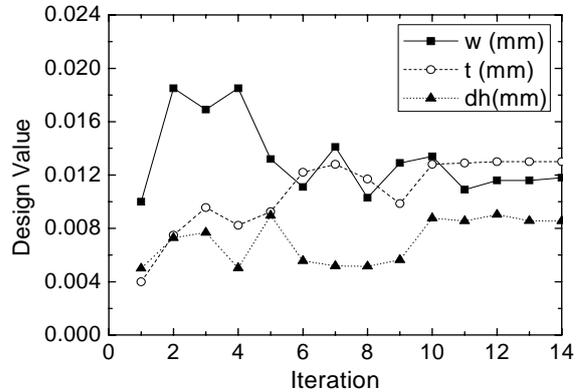
$$Obj = \min \left\{ \frac{1}{T_c} \right\} \tag{7}$$



(a) Objective function



(b) Torque



(c) Design variables

Fig. 4 Optimal design results of the MR fan clutch

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. 자기회로의 기하학적인 형상은 MR 팬 클러치의 성능에 큰 영향을 미치기 때문에 간극의 높이(t), 코일의 깊이(w), 클러치 하우징(housing)의 외곽 두께(dh)를 설계 변수(Design Variable)로 선정하였다. 해석 수행 시에 t , w , dh 의 범위는 4~13mm, 6~20mm, 5~10mm 로 정하였으며, 초기값은 각각 4mm, 10mm, 5mm 로 설정하였다. 코일에 인가되는 전류로부터 발생하는 자기장의 세기는 1.2A/mm 로 설정하였으며,

Table1 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
Max yield shear stress τ_y	49.23 kPa
Max controllable torque T_c	29.32 Nm

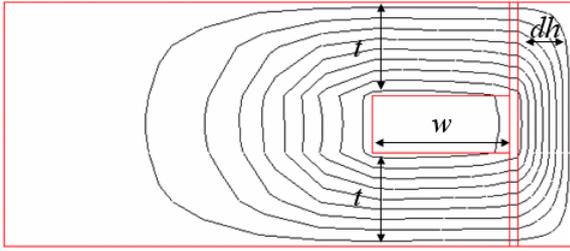


Fig. 5 2D magnetic flux lines of the optimized MR fan clutch

초기 해석 결과 제어토크 T_c 는 8.76Nm 가 산출되었 다. 최적화 방법에는 Sub-problem approximation method 를 사용하였으며 Iteration 결과는 Fig. 4(a)와 같다. 최적화 결과로부터 목적함수의 값이 연산을 반복함에 따라 최소값으로 수렴함을 확인할 수 있다. 토크의 Iteration 결과는 Fig. 4(b)와 같으며, 토크의 최대값은 29.3Nm 임을 알 수 있다. 이때 최대 항복 전단 응력은 49.23kPa 이며 설계 변수인 t , w , dh 는 각각 0.0129m, 0.0117m, 0.00854m 가 됨을 확인할 수 있다. 최적화된 변수를 이용해서 유한요소해석을 한 결과를 Fig. 5 에 나타내었다. Fig. 4(c)에서 설계 변수 가 수렴하게 되는 과정을 보면, 간극의 높이 t 가 설계 범위의 최대값의 범위까지 도달하게 되는데, Fig. 5 에서 볼 수 있듯이 MR 팬 클러치를 설계함에 있어서 실제 자속밀도가 높고 MR 에 자기장이 인가되는 통로인 간극의 높이(t)가 가장 지배적인 설계 변수가 됨을 알 수 있다.

Fig. 4(c)에서 수렴한 설계 변수들을 이용하여 MR 팬 클러치의 설계 변수 값을 Table1 에 나타내었다. 최적화를 수행한 결과를 이용하여 설계 변수의 값은 디스크의 간극 높이 0.013m, 코일의 깊이 0.012m, 클러치 하우징의 두께 0.0085m 로 정하였다.

4. 제어기 설계

Fig. 6 는 MR 팬 클러치를 이용한 전체적인 엔진 냉각 제어 시스템의 블록 다이어그램으로써 차량의 라디에이터로부터 냉각수의 온도를 측정하여 엔진 냉각 부하에 비례해서 팬 클러치의 토크를 제어하는

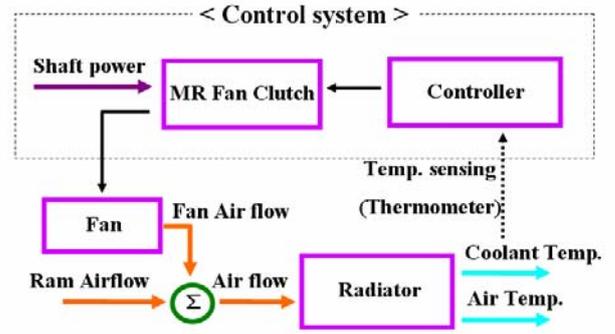


Fig. 6 Block diagram of engine cooling system for automotive

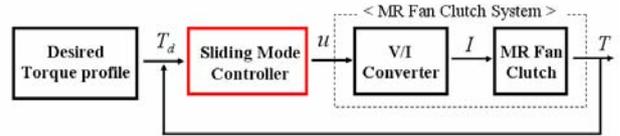


Fig. 7 Block diagram of MR fan clutch controller

시스템을 나타낸다.

본 연구에서는 차량의 냉각수 온도를 일정하게 유지시키는데 필요한 토크를 제어할 수 있도록 MR 팬 클러치의 제어 시스템을 설계 하였으며, 이에 대한 블록 다이어그램은 Fig. 7 과 같다. Fig. 7 에서 전력공급장치(V/I Converter)와 MR 팬 클러치는 각각 1 차의 과도감쇠(overdamped) 특성을 가진 작동기로 설정하였다⁽¹¹⁾. 따라서 MR 팬 클러치 시스템은 전력공급장치와 MR 팬 클러치가 연속되어 있는 2 차의 과도감쇠의 특성을 가진 작동기로 모델링 하였으며, 이로부터 2 차 상미분 방정식 형태의 토크제어 시스템의 지배방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_p t_c \ddot{T}(t) + (t_p + t_c) \dot{T}(t) + T(t) = u(t) \quad (8)$$

여기서 $T(t)$ 는 제어 토크이고, $u(t)$ 는 제어입력전압이다. t_p 는 전력공급장치의 시상수, t_c 는 전류의 계단 입력에 대한 MR 유체의 반응을 나타내는 시상수이다. 식(8)을 상태공간방정식(state space model)으로 표현하면 다음과 같다.

$$X(t) = [x_1 \quad x_2]^T = [T \quad \dot{T}]^T \quad (9)$$

$$\dot{X}(t) = AX(t) + B\tilde{u}(t) \quad (10)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{t_p t_c} & -\frac{t_p + t_c}{t_p t_c} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{t_p t_c} \end{bmatrix} \quad (11)$$

위와 같이 모델링 된 MR 팬 클러치 시스템의 토크 제어 성능을 확인하고자 슬라이딩모드 제어기를 설계 하였다. 슬라이딩모드 제어기의 추적오차(tracking error)는 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} e(t) &= X(t) - X_d(t) \\ &= [x_1 - x_{d1} \quad x_2 - x_{2d}]^T \end{aligned} \quad (12)$$

$X_d(t)$ 는 추적해야 할 기준이 되는 요구토크 T_d 를 의미한다. 추적오차를 이용하여, 슬라이딩 서피스를 다음과 같이 정의한다^(12,13).

$$\begin{aligned} S(e(t)) &= \left(\frac{d}{dt} + c \right) e_1(t) = ce_1(t) + e_2(t) \\ &= Ce(t), \quad c > 0 \end{aligned} \quad (13)$$

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

$$S(e(t))\dot{S}(e(t)) < 0 \quad (14)$$

식(14)의 조건을 만족시키기 위한 제어기는 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$u = -(CB)^{-1}(CA\dot{X}(t) - C\dot{X}_d(t)) - k \operatorname{sgn}(S(t)) \quad (15)$$

식(15)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 최종 제어기는 다음과 같이 표현된다.

$$u = -(CB)^{-1}(CA\dot{X}(t) - C\dot{X}_d(t)) - k \operatorname{sat}(S(t)) \quad (16)$$

여기서,

$$\operatorname{sat}(S(t)) = \begin{cases} S(t)/\varepsilon & |S(t)| \leq \varepsilon \\ \operatorname{sgn}(S(t)) & |S(t)| > \varepsilon \end{cases} \quad (17)$$

식(17)에서, ε 은 경계층의 두께이다.

5. 시뮬레이션

앞서 설계한 슬라이딩 모드 제어기를 적용하여 토크 제어 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 시에 필요한 파라미터(parameter)들은 기존의 MR 클러치 논문을 참조하였다⁽¹¹⁾. Fig. 8 은 개발 완료된 점성 유체 팬 클러치의 성능 제원⁽²⁾을 참조하여 결정한 MR 팬 클러치의 온도에 따른 팬의 속도를 나타낸 그래프이다. 제안된 팬 클러치의 온도에 따른 팬 속도의 관계는 선형적으로 나타나며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\omega = \kappa T_R \quad (18)$$

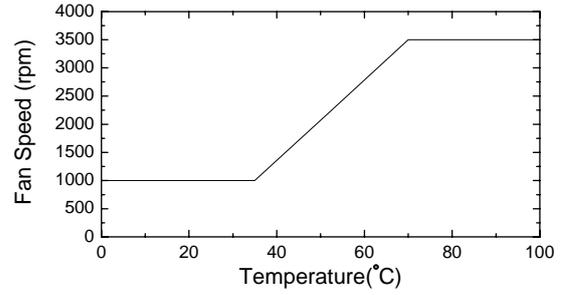
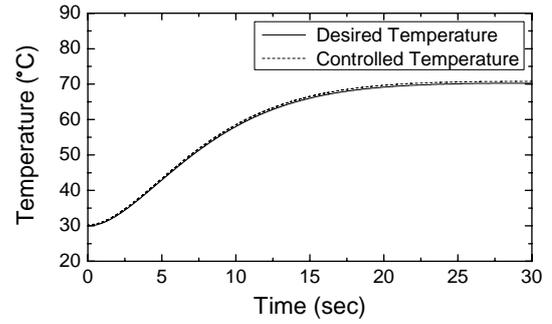
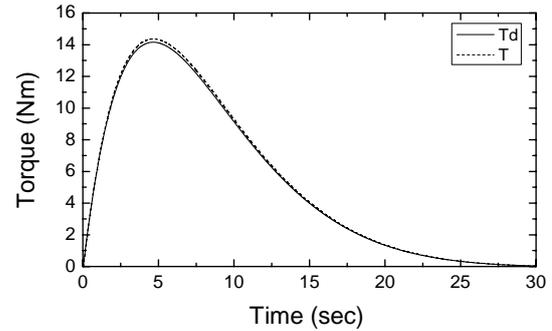


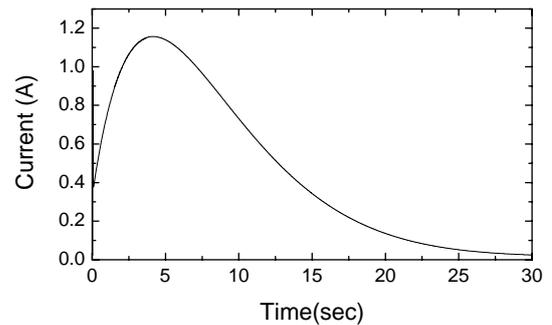
Fig. 8 Proposed design target of MR fan clutch



(a) Temperature control response



(b) Torque control response



(c) Current input

Fig. 9 Trajectory tracking control result

여기서 ω 는 팬의 각속도이고, T_R 은 라디에이터에서 측정된 엔진 냉각수의 온도이며, κ 는 비례 상수이다. 토크 프로파일을 얻기 위해 식(18)로부터 요구토크 T_d 와 온도와의 관계식을 도출하였으며 그 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_d = I_p \dot{\omega} = I_p \kappa \dot{T}_R \quad (19)$$

여기서 I_p 는 출력 축과 팬의 극 관성 모멘트를 나타낸다. 본 시뮬레이션에서 사용된 시스템 변수와 제어기의 변수는 각각 $t_p = 0.303 \text{ sec}$, $t_c = 0.153 \text{ sec}$, $c = 1$, $I_p = 0.00762 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $\kappa = 71 \text{ rev/sec} \cdot \text{°C}$ 값을 사용하였다.

Fig. 9(a)은 요구되는 온도와 추적 제어된 결과를 나타낸다. 온도 프로파일은 초기 상온(30 °C)부터 70 °C 까지 점차적으로 증가하는 형태로 설정하였으며, 식(19)의 관계를 이용하여 온도가 제어될 수 있도록 하였다. 온도 제어의 추적 오차는 1% 이내로 제한됨을 알 수 있다. Fig. 9(b)는 온도 프로파일을 이용하여 계산된 요구토크 프로파일을 추적 제어한 결과이다. 온도 제어결과와 마찬가지로 추적 오차는 1% 이내 임을 확인할 수 있다. Fig. 9(c)는 토크 제어시 MR 팬 클러치에 공급되는 전류를 나타낸다. 이러한 결과를 통해 MR 팬 클러치 시스템이 올바른 제어성능을 발휘할 수 있음을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 차량의 팬 클러치에 의해 생기는 엔진 부하를 최소화하고, 엔진 온도에 따른 적절한 팬 구동력을 전달할 수 있도록 MR 유체를 이용한 MR 팬 클러치 시스템을 설계 하였다. 유한 요소 해석을 이용한 최적 설계를 통해 제어 성능에 중요한 설계 변수의 값을 정하였으며, 엔진의 온도를 적절히 제어해줄 수 있는 토크 프로파일을 설정한 후 슬라이딩 모드 제어를 이용하여 추적제어를 하였다. 시뮬레이션을 이용해서 얻은 온도 및 토크 제어 결과를 통해 MR 팬 클러치가 오차범위 1% 이내에서 제어됨을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로부터 차량의 냉각장치 시스템에 적용 되었을 때 적절한 온도제어성능을 발휘할 것으로 기대된다.

본 연구의 다음단계로 최적 설계를 이용해 도출해 낸 설계 변수를 이용하여 MR 팬 클러치를 제작한 후 엔진 룸과 유사한 조건의 실험장치를 설계하여, 실험을 통해 MR 팬 클러치의 성능을 검증할 예정이다.

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" , KSAE 2008 Annual Conference, pp, 225.

(4) 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.

(5) 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.

(6) 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.

(7) 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.

(8) 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.

(9) Lord Corporation, Engineering Note : Magnetic Circuit Design, www.lord.com/Portals/0/MR/Magnetic_Circuit_Design.pdf.

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

(11) Hong, S. R., Choi, S. B., 1998, " Performance Comparison between ER and MR Clutches" , Proceedings of the KSME annual Fall Conference, pp. 724~729.

(12) 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.

(13) 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.