〈논 문〉 SAE NO. 933740

전자클러치의 동특성 해석

Analysis of Dynamic Characteristics of an Electro-Magnetic Clutch

김 연 호*, 김 현 수**
Y. H. Kim, H. S. Kim

ABSTRACT

Dynamic characteristics of an electro-magnetic clutch transmission system were investigated by using Bondgraph modeling method. Simulation results showed that when the rotor engaged with the armature, the response time of the current, the driver torque, the rotational speed and the relative sliding time between the driver and the driven side decreased, as the gap size between the rotor and the armature decreased and the number of coil turns increased. Also, when the rotor disengaged with the armature, the delay time increased with the decreased gap size and the increased number of coil turns. It was found that the experimental results of the current, the driver torque, the rotational speeds were in good accordance with the theoretical results. The results of this study can be used as basic design materials of the electro-magnetic clutch.

주요기술용어 : Electro-Magnetic Clutch(전자클러치), Bondgraph Model(본드그래프 모델), Sliding Velocity(상대속도), Current(전류), Rotational Speed(회전속도), Driver Torque(구동토크)

1. 서 론

전자클러치는 각종 공작기계, 자동차 에어콘 컴프레서 등에 광범위하게 사용되고 있으며 우리나라 기계공업의 발전, 성장에 따라서 그 수요가 더욱 신장되고 있다. 특히 최근에 이르러 전자클러치는 성능 향상에 따라 차량용 CVT(Continuously Variable Transmission)의 발진요소로서 기존의 토크컨버터를 대체하여 사용되기 시작하여 주목을 받고 있다.[1]

전자클러치는 전기, 자기 및 기계적 마찰 요소가 결합된 것으로 이의 성능해석을 위하여는 전기, 자기 및 기계적 마찰부분에 대한 동특성 해석이 필수적이다. 전자기력에 대하여는 이미 많은 연구에 의하여 잘 정의되고 있고 자기베어링 등 전자기력을 이용한 기기에 대해서도 많은 응용연구결과[2,3,4,5,6] 가 발표되어 있으나, 전자클러치 동력전달 시스템의 동특성에 대하여는 발표된

* 성균관대학교 기계공학과 대학원
** 정회원, 성균관대학교 기계공학과

연구결과가 거의 없는 실정이다. 80년대 이후 공작기계를 비롯하여 많은 기계의 품질, 성능, 정밀도의 향상을 위하여 전자클러치의 수요가 확대되고 있으나 거의 대부분 완제품 수입 또는 기술도입에 의존하고 국내 생산 기술은 극히 미미한 실정이다. 또한 CVT용 전자클러치의 구동부와 종동부 사이의 상대 미끄럼은 차량의 변속 승차감을 좌우하는 주요한 요소이나 이에 대하여는 제한된 전자클러치 제작자의 성능 시험결과만 보고되어 있을 뿐이다.

따라서 본 연구에서는 전자클러치의 전기, 자기 및 기계 마찰 요소를 본드그래프(Bondgraph)를 사용하여 모형화하고 모터 구동 전자클러치 동력전달시스템의 동특성을 이론 및 실험적으로 해석하여 전자클러치 성능 향상을 위한 설계 기초자료를 얻고자 하였다.

2. 이론적 해석

2.1 전자클러치의 본드그래프 모델

Fig.1은 마찰식 건식단판 전자클러치의 구조이다. 리드선을 따라 코일에 전류가 여자되면 스테이터(Stator)와 로터(Rotor)가 전자석화 되어 아마츄어(Armature)를 잡아 당기게 된다.

Fig.2는 모터-전자클러치-부하계를 도시한 것이다. 전자클러치에 전류가 여자되면 전자클러치의 로터와 아마츄어가 일체가 되어 구동측의 동력은 종동측으로 전달된다.

Fig.3은 Fig.2의 전자클러치 동력전달 시스템의 본드그래프 모델이다. 본드그래프 모델링 기법에 대하여는 참고문헌[7,8]에 상세히 소개되어 있다. Fig.3의 본드그래프는 전자클러치 동력전달 시스템의 동력 흐름을 보여 주고 있다. 제어기의 전압 $V_c(t)$에 의하여 여자된 전류는 저항 R을 지나 코일에서 자기력 M(magnetomotive force)과 동시에 전자기력 F_m을 발생시킨다. 이것은 C필드(field)로 모형화되었다. 전자기력 F_m은 아마츄어의 직선운동을 일으키고 전자클러치의 로터와 아마츄어가 결합되면 모터의 동력은 종동측 부하로 전달된다. 이때 모터는 저항 R_m과 자이레

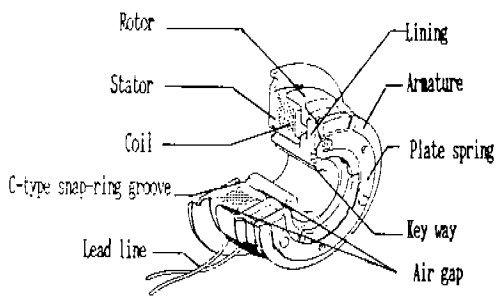


Fig. 1 Electro-magnetic clutch.

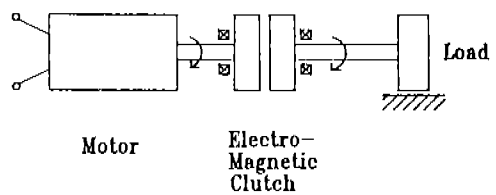


Fig. 2 Electro-magnetic clutch transmission system.

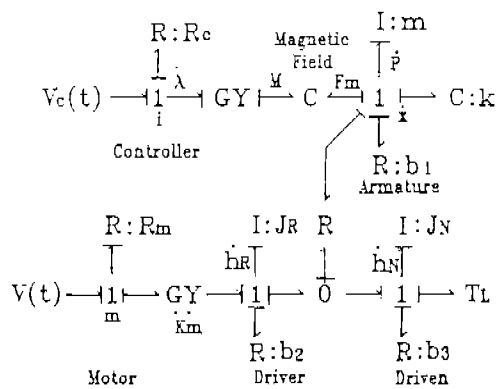


Fig. 3 Bondgraph model.

이터(Gyrator) GY로 모델되었다. 여기서 K_m은 모터토크상수이다. Fig.3의 본드그래프에서 상태변수는 전자기력에 관계하는 자속쇄교수(flux linkage) λ, 아마츄어의 선형운동량 P, 아마츄어의 이동량 X, 구동측 각운동량 h_R과 피동측 각운동량 h_N의 5개이다. 여기서 $V_c(t)$와 R은 전자클러치에 여자되는 전압과 저항, V(t)는 모터의 입력전압이다. Fig.3의 본드그래프에서 다음 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\lambda}=V_c(t)-\frac{(g_o+X_o-X)}{\mu_o N^2 A}R\lambda \quad (1)$$

$$\dot{p}=\eta\frac{1}{2}\frac{\lambda^2}{\mu_o N^2 A}-F_S(X)-b_1\frac{p}{m} \quad (2)$$

$$\dot{X}=\frac{p}{m} \quad (3)$$

$$\dot{h}_R=\frac{K_m}{R}V(t)-(\frac{K_m^2}{R}+b_2)\omega_R-T \quad (4)$$

$$\dot{h}_n=T-b_{3\omega m}-T_L \quad (5)$$

여기서 g_o은 스테이터와 로터 사이의 공극, X_o는 로터와 아마츄어의 설치공극, μ_o는 자유공간에서의 투자율, N은 요크내의 코일 감은 수, A는 자속이 통과하는 클러치의 단면적, η는 효율, b_1은 아마츄어의 감쇠계수, m은 아마츄어의 질량, b_2는 구동측의 감쇠계수, b_3는 종동측의 감쇠계수, T는 클러치 토크, T_L은 부하토크, J_R은 모터의 관성모멘트, J_N은 부하의 관성모멘트이다. $F_s(X)$는 스프링 반력으로 스프링 특성에 따라 선형 또는 비선형적으로 표시된다.

2.2 전자클러치 토크

Fig.1에서 코일에 전류가 여자되어 로터와 아마츄어가 결합되고 마찰면의 구동토크가 부하토크와 같아지면 동력이 전달되며 이때 토크 T는 다음 식으로 표시된다.

$$T=\mu R_m F \quad (6)$$

여기서 R_m은 마찰면의 평균 반경이고, F는 마찰면의 밀어 붙이는 힘으로 다음과 같이 표시된다.

$$F=F_m-F_s(X)=\frac{1}{2}\frac{\lambda^2}{\mu_o N^2 A}-F_s(X) \quad (7)$$

여기서 F_m은 전자기력이다. $F_s(X)$는 스프링 반력으로 본 연구에서 사용된 전자클러치 스프링의 인장 실험결과에서 스프링 반력 $F_s(X)$는 다음식

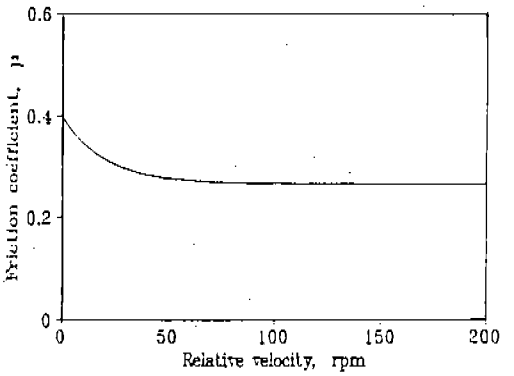


Fig. 4 Friction coefficient versus ralative velocity.

과 같이 구하였다.

$$F_s(X)(N)=a_1*X^6+a_2*X^5*-a_3*X^4*+a_4*X^3*-a_5X^2+a_6*X \quad (8)$$

여기서 $a_1=-7.56*10^{22}$, $a_2=1.13*10^{20}$, $a_3=6.71*10^{16}$, $a_4=2.01*10^{13}$, $a_5=3.23*10^9$, $a_6=268500$, X는 아마츄어의 변위(m)이다.

마찰계수 μ는 Fig.4와 같이 상대속도의 함수로 생각하였다.[9]

$$\mu=(\mu_s-\mu_k)exp^{(-\Delta\omega/\omega_S)}+\mu_k \quad (9)$$

$$\Delta\omega=\omega_R-\omega_N \quad (10)$$

여기서 μ_s는 정마찰계수로서 0.4, μ_k는 동마찰계수로서 0.27이며 μ_k는 전자클러치 마찰판의 실험에서 측정하였다. $\Delta\omega$는 상대속도, ω_R은 구동속도, ω_N은 종동속도이고 ω_S는 정상상태에서의 속도이다.

3. 수치해석 결과 및 고찰

Fig.5~Fig.12는 전자클러치의 응답특성에 대한 수치해석 결과를 도시한 것이다. 전자클러치의 동특성 해석은 상태방정식 (1)~(5)를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 사용된 각

설계사양은 실험장치 및 실험조건에서 구해진 다음의 값을 사용하였다. 전자클러치 제어기의 입력 전압 $V_c(t)=50Volt$, $R=33.3\Omega$, $g_o=0.45mm$, $\mu_o=4\pi \times 10^{-7}Wb/(AT \cdot m)$, $N=500$, $A=1450mm^2$, $m=0.432kg$. 수치해석은 코일 감은 수 N, 공극 X_o를 설계인자로 변화시키며 수행하였고 제어기의 입력전압은 t=0.2sec에서 여자되고 t=1.5sec에서 단절되도록 하였다.

Fig.5는 로터와 아마츄어 사이의 설치공극 X_o의 변화에 대한 아마츄어의 응답을 도시한 것이다. Fig.5에서 알 수 있듯이 공극이 클 수록 아마츄어의 응답은 늦어지며 공극 $X_o=0.7mm$에서 아마츄어는 로터와 결합되지 못한다. 이것은 $X_o=0.7mm$에서 전자클러치의 전자기력이 스프링의 반력보다 작기 때문이다. 또한 전압을 단절하였을 때 공극이 작아질 수록 아마츄어는 지연시간을 갖고 늦게 해방됨을 알 수 있다.

Fig.6은 공극 X_o의 변화에 대한 전류 i의 응답을 도시한 것이다. 여자시 공극 $X_o=0.3mm$, 0.5mm인 경우 전류는 증가하다가 로터와 아마츄어가 결합하는 순간 감소하고 다시 증가한다. 전압을 단절시키면 전류는 감소하다가 아마츄어가 해방되는 순간 다소 증가한 후 다시 감소한다. 이와 같은 전류의 감소 및 증가는 다음식으로 설명할 수 있다.

$$i=\frac{(g_o+X_o-X)}{\mu_o N^2 A}\lambda \qquad (11)$$

즉 전류 i는 λ와 (g_o+X_o-X)의 값에 따라 변한다. 초기에는 자속쇄교수 λ의 증가량이 (g_o+X_o-X)의 감소량보다 크기때문에 전류는 증가한다. 결합되는 순간 자속쇄교수 λ의 증가량은 (g_o+X_o-X)의 감소량보다 작기때문에 전류는 감소하고 결합후 자속쇄교수의 증가에 따라 증가한다. 단절시 전류가 증가하는 이유는 아마츄어가 떨어지는 순간 (g_o+X_o-X)의 증가량이 자속쇄교수 λ의 감소량보다 크기 때문이다. 이후는 자속쇄교수 λ의 감소량이 (g_o+X_o-X)의 증가량보다 크기 때문에 전류는 계속 감소한다. 공극 $X_o=0.7mm$인 경우 여자시 로터와 아마츄어는

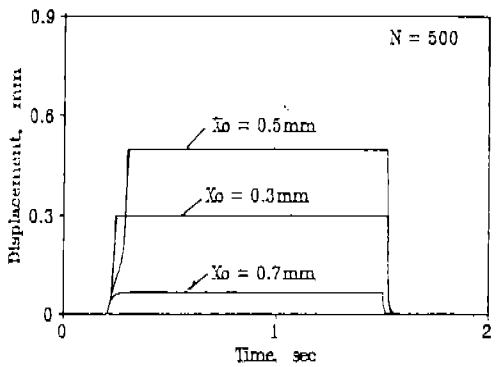


Fig. 5 Theoretical results for armature displacement with various gap size.

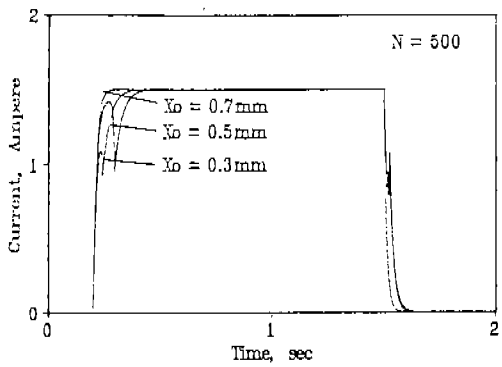


Fig. 6 Theoretical results for current with various gap size.

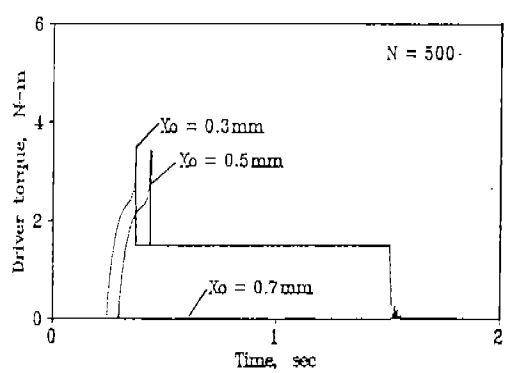


Fig. 7 Theoretical results for driver torque with various gap size.

결합되지 않기 때문에 전류는 계속 증가하여 정상상태에서 이르고 단절시 감소한다. Fig.6에서 여자시 전류가 증가하다가 떨어진 지점까지의 시간이 아마츄어 흡입시간이고 단절시 전류가 감소하다가 증가한 지점까지의 시간이 아마츄어 해방시간이다. 여자시 공극이 클 수록 아마츄어 흡입시간은 길어지나 단절시 아마츄어 해방시간은 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

Fig.7은 공극 X_o의 변화에 대한 모터 구동토크의 응답을 도시한 것이다. 아마츄어가 전자기력에 의해 로터와 결합되는 순간 구동토크는 발생하며 전자기력의 증가에 따라 계속 증가한다. 로터와 아마츄어의 상대 미끄럼속도가 감소하여 마찰계수 μ가 동마찰 상태에서 정마찰 상태로 이동하는 순간 구동토크는 급격히 증가한 후 다시 급격히 감소하여 부하토크와 균형을 이루게 된다. Fig.7에서 알 수 있듯이 공극이 증가함에 따라 이와 같은 구동토크의 급격한 증가 및 감소 경향은 완만해진다. 공극 X_o=0.7mm인 경우에는 로터와 아마츄어가 결합되지 않기 때문에 동력전달은 이루어지지 않고 따라서 모터구동토크는 0의 값을 보인다.

Fig.8은 공극 X_o의 변화에 대한 구동 및 종동측 회전속도의 응답을 도시한 것이다. 모터의 구동토크가 발생하면 구동측 회전속도는 감소하기 시작하여 구동과 동종측 회전속도가 같아지는 순간까지 감소한다. 종동측은 구동토크가 부하토크와 같아지는 순간부터 회전하기 시작하여

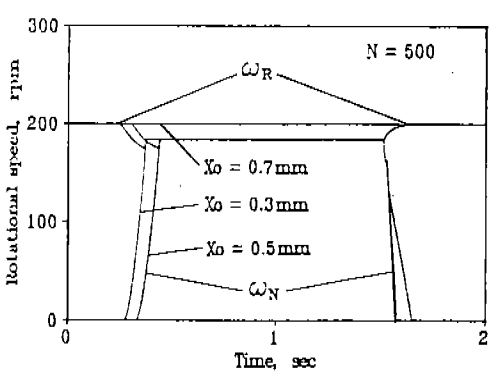


Fig. 8 Theoretical results for rotational speed with various gap size.

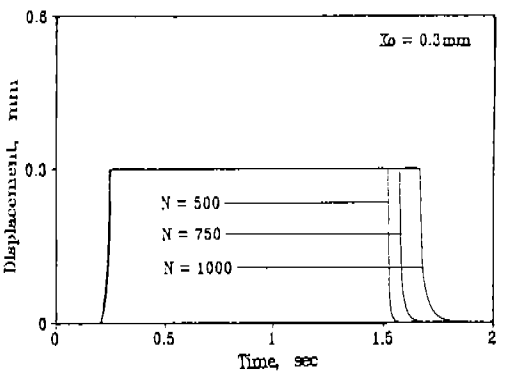


Fig. 9 Theoretical results for armature displacement with various number of coil turns.

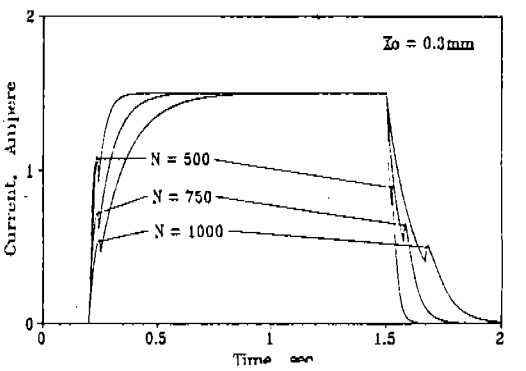


Fig.10 Theoretical results for current with various number of coil turns.

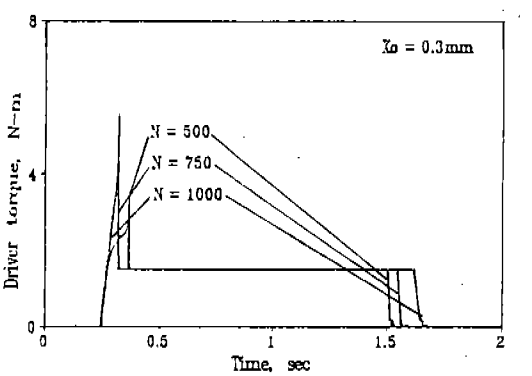


Fig.11 Theoretical results for driver torque with various number of coil turns.

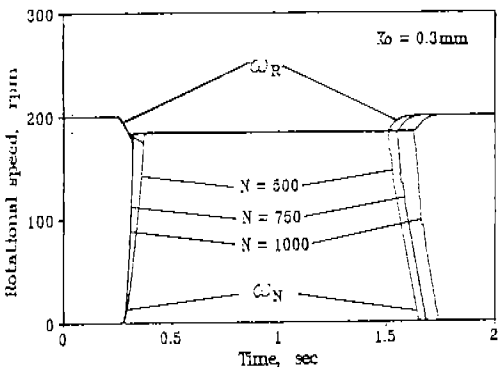


Fig.12 Theoretical results for rotational speed with various number of coil turns.

구동토크와 부하토크의 차이에 의하여 점차 속도가 증가한다. 구동측 회전속도가 종동측 회전속동와 같아지면 로터와 아마츄어 사이의 상대미끄럼은 없고 로터와 아마츄어는 일체가 되어 회전한다. 제어기의 전압이 단절되면 로터와 아마츄어는 해방되고 구동속도는 부하가 없으므로 공회전속도로 증가한다. 종동측 속도는 회전 운동량에 의해 점차 감소하여 0이 된다. Fig.8에서 볼 수 있듯이 공극 X_o=0.3mm, 0.5mm에 대해 응답속도는 변화하지만 그 경향은 유사하다. X_o=0.7mm인 경우 동력전달이 되지 않기 때문에 모터구동속도는 변화하지 않고 종동속도는 0에 머물러 있다.

Fig.10은 코일 감은 수 N의 변화에 대한 전류 i의 응답을 도시한 것이다. 전류의 응답은 코일 감은 수 N이 증가할 수록 단절시 아마츄어 해방시간이 길어지나 여자시의 아마츄어 흡입시간은 거의 비슷한 값을 보인다.

Fig.11은 코일 감은 수 N의 변화에 대한 모터 구동토크의 응답을 도시한 것이다. Fig.11에서 알 수 있듯이 코일 감은 수 N이 클 수록 여자시 구동토크는 급격히 증가하고 토크 변동폭이 크다. 이것은 코일 감은 수 N의 증가에 따라 전자기력이 증가하기 때문이다.

Fig.12는 코일 감은 수 N의 변화에 대한 구동 및 종동측 회전속도의 응답을 도시한 것이다. 여자시 감은 수 N이 클 수록 모터의 구동토크가 급격히 증가하여 구동측 회전속도는 빠르게 감소하고 종동측 회전속도는 빠르게 증가한다. 또한 단절시 감은 수 N이 클 수록 지연시간이 길어진다.

Fig.7, Fig.8, Fig.11, Fig.12의 토크와 회전속도에 대한 응답결과는 토크변화에 의한 충격과 상대미끄럼에 의한 클러치 마모를 결정하는 중요한 기초자료이다. 특히 차량용 발진요소로서 전자클러치를 사용할 경우 변속시 승차감과 클러치 마모 특성을 향상시키기 위하여는 토크와 상대미끄럼을 적절히 제어하여야 한다.

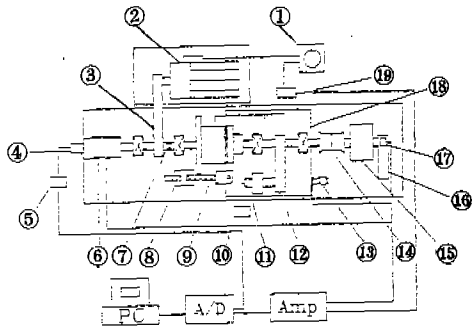
4. 실험적 연구

4.1 실험장치

Fig.13은 전자클러치 동특성 해석을 위한 실험장치이다. AC모터(2)의 동력은 타이밍 벨트(Timing belt)(3)을 통해 구동 풀리로 전달되고 구동 풀리는 전자클러치 로터를 구동한다. 전자클러치가 여자되면 로터의 전자기력에 의해 아마츄어가 로터와 결합되고 구동측의 동력은 종동측으로 전달된다. 종동부하는 전자기력을 이용한 파우더클러치(15)에서 공급된다. 아마츄어와 종동축은 선형베어링에 장착된 이동평판(18) 위에 설치하고 리드스크류(8)를 조정하여 로터와 아마츄어의 공극 간격을 조정하였다. 초기 공극은 커플링(14)의 세트스크류로 조정되며 변위센서(13)로 측정된다.

Fig.13의 실험장치에서 검출되는 신호는 구동 및 종동 토크, 구동 및 종동측 회전속도, 전자클러치 여자 전류 등이다. 구동토크는 로터축에 스트레인 게이지(7)를 부착하여 토크 검출신호를 슬립링(6)을 통하여 측정하고 종동토크는 파우더클러치의 출력축에 외팔보(16)를 설치하고 외팔보에 스트레인게이지(17)를 부착하여 측정하였다. 전자클러치의 여자 전류는 전류계(19)를 제작하여 측정하였다. 위의 각 검출신호는 증폭기와 A/D컨버터를 거쳐 컴퓨터로 입력된다.

실험은 로터와 아마츄어의 간격 X_o=0.3mm, 종동부하 T_L=1.5N−m, 구동측 회전속도 ω_R=200 rpm에 대하여 수행하여 코일의 전류와 구동 및 종동 토크, 구동 및 종동 회전수를 측정하였다.



① Motor controller
② Motor
③ Timing belt
④ Encoder
⑤ Tachometer
⑥ Slip ring
⑦ Strain gauges
⑧ Lead screw for moving plate
⑨ Electro magnetic clutch
⑩ Tachometer
⑪ Encoder
⑫ Timing belt
⑬ Displacement sensor
⑭ Coupling
⑮ Powder clutch
⑯ Bending ber
⑰ Strain gauges
⑱ Moving plate
⑲ Current to voltage converter

Fig.13 Experimental apparatus for electro-magnetic clutch system.

4.2 실험결과 및 고찰

Fig.14~Fig.19는 여자시 전자클러치 동특성에 대한 실험결과와 수치해석 결과를 비교 도시한 것이다. 실험과 수치해석은 로터와 아마츄어 사이의 공극 X_o=0.3mm, 코일감은 수 N=500에 대하여 수행하였고, t=1sec에서 여자하였다.

Fig.14는 전류 i의 응답을 도시한 것이다. Fig.14에서 알 수 있듯이 전류는 로터와 아마츄어가 결합하는 순간 감소한 후 다시 증가한다. 실험결과와 수치해석 결과를 비교해보면 로터와 아마츄어가 결합되는 시간은 실험의 경우 약 0.1 sec로 이론의 0.04sec보다 붙는 시간이 길게 나타났다.

Fig.15는 모터 구동토크의 응답을 도시한 것이다. Fig.15에서 볼 수 있듯이 모터 구동토크는 로터와 아마츄어가 결합하는 순간 증가하고 다시 감소하여 정상상태 토크값을 보인다. 구동토크는

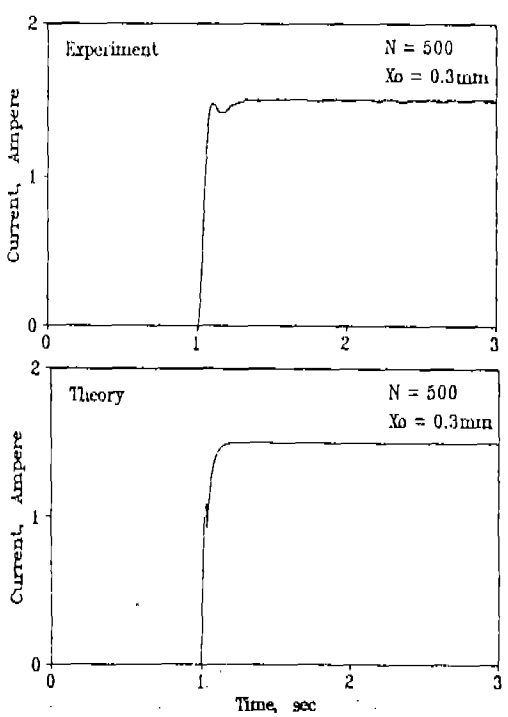


Fig.14 Comparison of experimental and theoretical results of current for engagement.

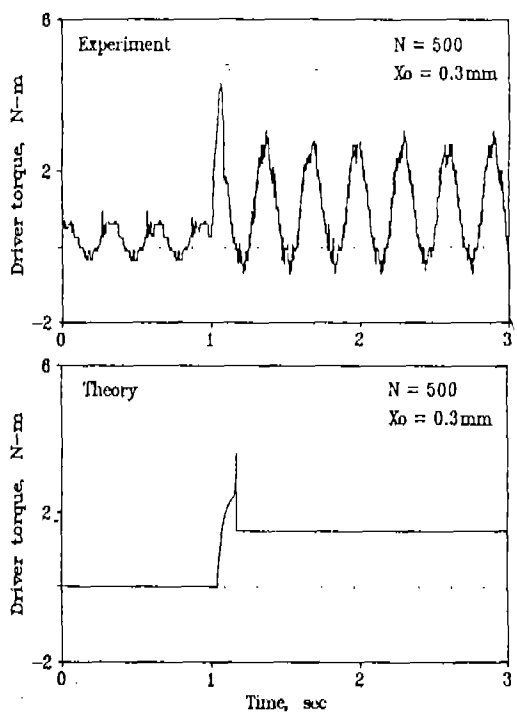


Fig.15 Comparison of experimental and theoretical results of driver torque for engagement.

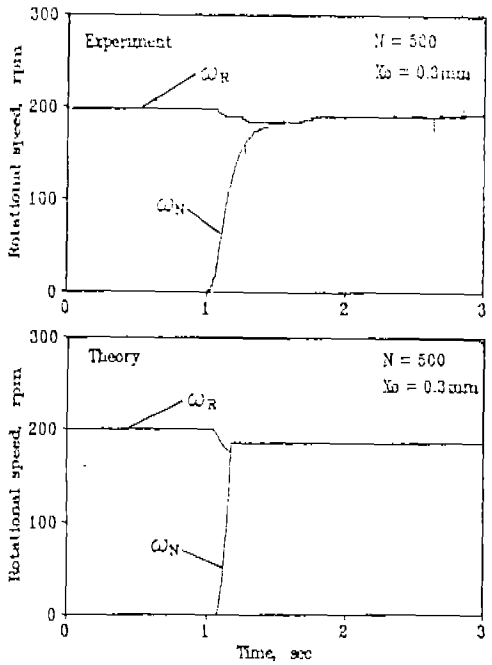


Fig.16 Comparison of experimental and theoretical results of rotational speed for engagement.

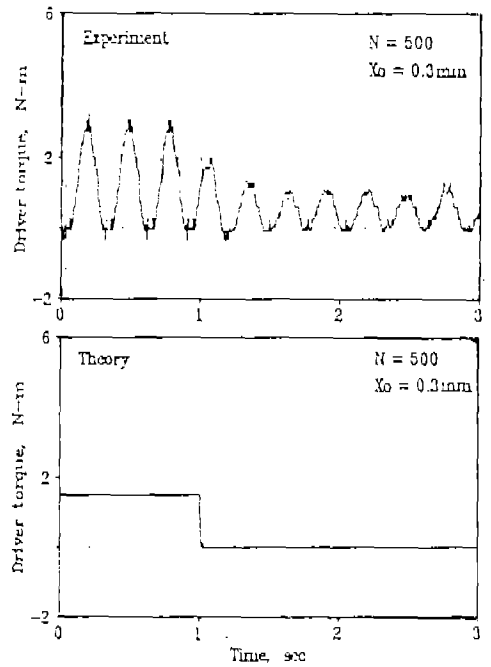


Fig.18 Comparison of experimental and theoretical results of driver torque for disengagement.

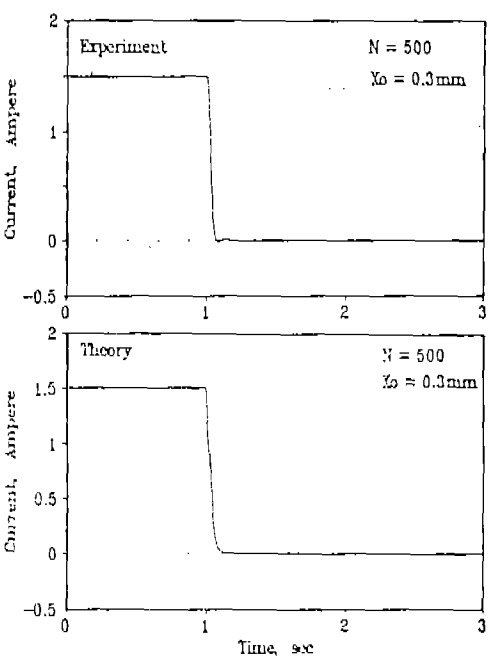


Fig.17 Comparison of experimental and theoretical results of current for disengagement.

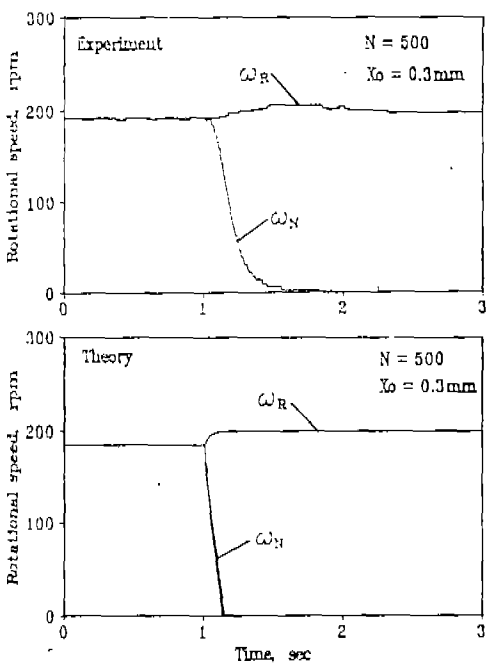


Fig.19 Comparison of experimental and theoretical results of rotational speed for disengagement.

로터와 아마츄어가 결합하기전 변동(fluctuation)하고 평균값은 0보다 크다. 이것은 구동 시스템의 마찰에 의한 것으로 생각된다. 로터와 아마츄어가 결합한 후에도 토크는 변동값을 보인다. 변동토크의 평균은 파우더클러치에서 가해진 종동부하 T_L=1.5N-m이다. 토크의 변동주기는 대략 3.3 Hz로서 이것은 클러치의 회전속도 200rpm과 일치한다. 즉 토크변동은 축이 한바퀴 회전할 때마다 나타나며 이것은 전자클러치의 로터축과 아마츄어축이 제작 및 조립 오차에 의하여 편심되어 있기 때문으로 생각된다.

Fig.17~Fig.19는 단절시 전자클러치 동특성에 대한 실험결과와 수치해석 결과를 비교 도시한 것이다. 실험과 수치해석은 로터와 아마츄어 사이의 공극 X_o=0.3mm, 코일감은 수 N=500에 대하여 수행하였고 t=1sec에서 단절하였다.

Fig.17은 전류 i의 응답을 도시한 것이다. 전류가 증가하다가 다시 감소하였을 때 아마츄어가 완전히 해방되었음을 알 수 있고 아마츄어 해방시간은 실험 및 이론 모두 약 0.1sec 값을 보인다.

Fig.18은 구동토크의 응답을 도시한 것이다. 구동토크는 종동부하 평균 토크로 변동하다가 단절되면 급격히 감소하여 여자되기 전의 상태로 돌아간다.

Fig.19는 구동 및 종동측 회전속도의 응답을 도시한 것이다. 단절되면 구동측 회전속도는 부하가 없으므로 다시 증가하여 로터와 아마츄어가 결합하기 전의 회전속도로 돌아가고 종동측 회전속도는 감소하여 정지한다.

Fig.14~Fig.19의 실험 결과와 수치해석 결과를 비교해 보면 절대값은 다소 차이가 있으나 경향은 일치하고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 전자클러치의 효율을 고려하였으며 (식(2)) 수치해석에서는 η=0.13을 사용하였다. 이 효율은 이론에 의한(식(2), (6), (7)) 최대 전달토크와 실험에서 구한 최대 전달토크의 값에서 구하였으며 대단히 낮은 값이다. 따라서 전자클러치는 효율의 개선이 중요한 과제로 생각된다. 본 연구의 이론 및 실험결과는 전자클러치 동특성 개선과 토크의 변동 및 상대미끄럼을 제어하기 위한 제어기 설계의 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

5. 결 론

전자클러치 동특성에 대한 수치해석 및 실험결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 로터와 아마츄어 사이의 공극이 작고 코일감은 수가 클 수록 토크 및 회전속도의 응답속도는 빠르고 구동측과 종동측의 상대미끄럼 시간은 감소하나 토크의 변동폭이 크다.
2) 전자클러치의 전류, 구동토크 및 회전속도에 대한 실험결과는 이론치와 그 경향이 일치한다.

참 고 문 헌

1. Y. Sakai, "The 'ECVT' Electro Continuously Variable Transmission", SAE 880481, 1988.
2. 김연호, 김현수, "전자클러치 동특성 해석", 대한기계학회 '92춘계학술대회논문집(Ⅰ), pp. 692-696, 1992.
3. K. Habermann, G, Liard, "Practical magnetic bearing", IEEE spectrum, September, pp.26-30, 1979.
4. K. Nonami, "Vibration and Control of a Flexible Rotor Supported by Magnetic Bearing", JSME, Series Ⅲ, Vol. 33 No. 4, 1990.
5. H. M. Chen, M. S. Darlow, "Magnetic bearing with rotating force control", Trans. AMSE, Journal of Tribology, Vol. 100, pp.100-105, 1988.
6. 하영호, 김철순, 이종원, "능동 자기 베어링 시스템의 설계", 한국과학기술원 석사학위논문, 1989.
7. R. C. Rosenberg, "Introduction to Physical System Dynamics", McGraw-Hill, 1983.
8. D. C. Karnopp, "System Dynamics : A unified Approach", Willey-Interscience Publication, 1990.
9. 조선휘, 박천경, 이장무, 이교일, 김현수, "차량용 변속기 설계기초연구", 목적기초 2차 보고서, 1989.