

4WD용 비스코스 커플링 정상상태 특성 해석

Analysis of 4WD Viscous Coupling Characteristics at Steady State

이 정 석*, 김 경 하**, 김 현 진***, 김 현 수****
J. S. Lee, K. H. Kim, H. J. Kim, H. S. Kim

ABSTRACT

In this paper, a thermo-mechanical model for viscous coupling(VC) was suggested and torque equation in viscous mode was derived considering the effects of geometry of the plates, thermo-mechanical dynamics, silicon oil characteristics and dissolved air characteristics in the silicon oil. Theoretical results were in good accordance with experimental results demonstrating that VC torque equation in the viscous mode derived in this work is valid. Using the VC thermo-mechanical model and the theoretical equations, response of the torque transmitted, pressure, temperature and time to the hump were investigated. Simulation results showed that filling rate of the silicon oil plays an integral role not only in the steady state torque characteristics but also in determining the time to hump.

주요기술용어 : Viscous Coupling(VC, 비스코스 커플링), Torque(토크), Silicon Oil(실리콘 오일), Hump(험프)

1. 서 론

현대 자동차 기술은 환경오염 감소, 에너지 절감에 대한 요구에 대처하고 동시에 안정성과 운

전 편의성을 갖추어야 한다. 4륜구동(four wheel drive, 4WD) 차량은 노면상태의 변화에 따른 구동력의 적절한 조절과 조향시의 핸들링 안정성을 향상시킬 수 있어 그 보급이 증가 추세에 있다. 4WD 차량은 초기에는 손으로 레버를 조작하여 구동력을 전·후륜으로 전달하는 부분적 4WD 차량이었으나 이는 저속에서만 조작할 수 있는 단점을 지니고 있어 고속에서도 4WD 차

* 성균관대학교 대학원

** 기아자동차(주)

*** 인천대학교 기계과

**** 정회원, 성균관대학교 기계공학과

량의 주행 안정성 및 운전성능을 수행할 수 있는 AWD(all wheel drive) 차량이 개발되었고 다양한 타입의 동력분배 장치가 개발되었다.

Ferguson은 AWD의 동력분배 장치로 비스코스 커플링(viscous coupling, VC)을 사용하였다.¹⁾ Fig.1에 VC의 구조가 도시되어 있다. Fig.1에서 볼 수 있듯이 VC는 축에 고정된 내판과 하우징에 고정된 외판으로 구성되어 있으며 내판과 외판은 교대로 배치되어 있다. 축과 하우징은 각각 입력 또는 출력축과 연결되어 있어 입·출력축의 속도차가 발생하면 판 사이에 채워진 실리콘 오일의 점성전단력에 의해 동력이 전달된다. 출력축과 입력축 사이의 속도차가 커질수록 전달토크가 커지므로 바퀴들 사이의 상대속도를 감소시켜 미끄럼을 줄일 수 있다. VC는 작동시간이 지남에 따라 마찰열에 의한 오일의 점성감소로 전달토크가 감소하지만 일정 시간후 토크가 급격히 상승하는 특성을 보이는데 이를 험프(hump)^{2~4)}라고 한다. 험프의 원인은 내판과 외판이 접촉하여 금속마찰에 의해 동력이 전달되기 때문으로 생각되지만³⁾ 이에 대하여는 아직 정확하게 밝혀진 것이 없다. 험프가 일어나면 내판과 외판의 상대속도가 0이 되어 마찰열이 감소하고 실리콘 오일의 과열 및 VC 내부의 급격한 압력상승을 막아 수명에 도움이 된다.

앞서 설명한 바와 같이 VC는 입·출력축간의 상대속도차에 의해 적절히 동력을 분배하고 과열되면 입·출력축을 연결시키는 동력전달 기능

이 있다. 따라서 초기 중앙차동장치로 사용되던 VC는 차츰 그 적용 영역이 확대되어 좌·우륜의 차동장치 및 TCS(traction control system)에도 적용되고 있으며 앞으로 VC를 장착한 차량이 더욱 확대될 것으로 기대되고 있다.

VC는 앞서 설명한 바와 같이 많은 장점을 가지고 있어 그 사용이 점차 증가하고 있지만 핵심기술은 몇 개 전문 제조회사의 Know-how로서 발표된 것이 거의 없다. 국내에서도 최근 4WD RV(recreation vehicle)의 보급확대에 따라 VC에 대한 관심이 증가하고 있으나 일부 자동차 회사에서 수입해 사용하고 있을 뿐 이에 대한 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 VC에 대한 기존연구결과를 기초로 VC의 열역학 및 열전달모델을 제시하고, VC의 기하학적 형상, 압력 및 실리콘 오일에 용해되는 공기특성을 고려한 토크관계식을 이론 및 실험적으로 도출하고자 한다.

2. 정상상태 전달토크 해석

2.1 VC의 정상상태 전달토크 모델링

Fig.2는 내판과 외판의 기하학적 형상을 도시한 그림이다. Fig.2에서 볼 수 있듯이 내판과 외판은 각각 슬릿과 구멍을 가지고 있으며, 이와 같은 기하학적 형상은 험프와 같은 과도특성에 영향을 미치는 것으로 생각되고 있다.³⁻⁵⁾ VC는 내판과 외판 사이의 속도차에 의한 오일의 점성전단에 의해 토크를 전달한다. 우선 구멍과 슬릿

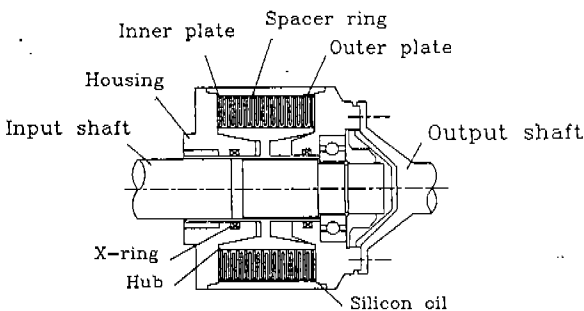


Fig.1 Viscous coupling

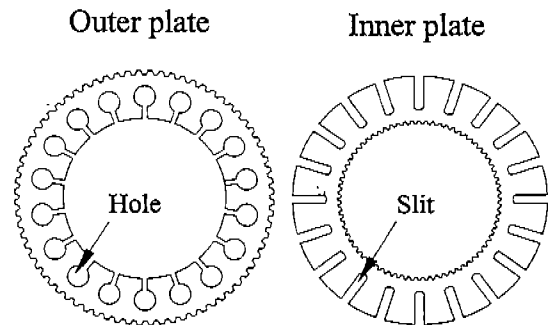


Fig.2 Shape of plates

을 가지지 않은 반지름이 r 인 두 원판 사이의 전달토크는 다음식으로 표시된다.

$$T_v = \int \tau \cdot 2\pi r^2 \cdot dr \quad (1)$$

τ 는 전단응력으로 다음과 같이 표현된다.

$$\tau = r\omega\nu/h_d \quad (2)$$

여기서 ω 는 입력축과 출력축의 속도차, ρ 는 실리콘 오일의 밀도, ν 는 실리콘 오일의 동점성 계수, h_d 는 두 판사이의 간격이다. 위의 두 식에서 실리콘 오일의 성질(ρ , ν)과 기하학적 형상(r , h_d)이 전달토크에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

우선 전달토크에 영향을 미치는 VC의 기하학적 형상에 대하여 고려해 보자. Fig.2에서 슬릿과 구멍의 상대적 위치에 따라 전단력이 작용하는 영역은 Fig. 3과 같이 다음 3부분으로 나누어 계산할 수 있다. (a) 판과 판이 겹친 경우, (b) 판과 구멍 및 슬릿이 겹친 경우, (c) 구멍과 슬릿이 겹친 경우. (c)의 구멍과 슬릿이 겹친 경우 전단력에 의한 토크는 전달되지 않는다. 따라서 구멍과 슬릿의 기하학적 형상을 고려한 VC의 두 판 사이의 정상상태 전달토크는 다음과 같이 정리된다.

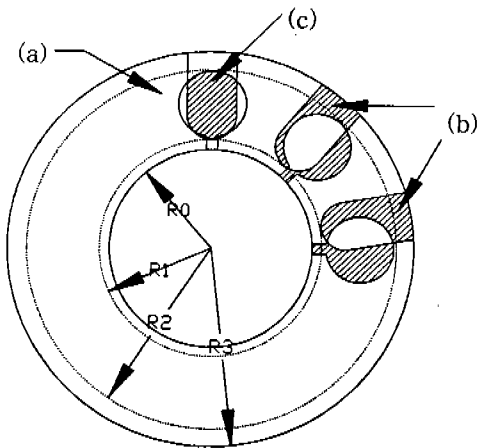


Fig.3 Plate geometry

$$\begin{aligned} T_v &= T_s + T_o \\ &= \int \nu\rho \frac{r\omega}{h_d} 2\pi r^2 (1 - \xi(r)) dr \\ &\quad + f \int \nu\rho \frac{r\omega}{h_d} 2\pi r^2 (\xi(r) - \gamma) dr \quad (3) \\ &= \int \nu\rho \frac{\omega}{h_d} 2\pi r^3 (1 - (1-f)\xi(r)) \\ &\quad + f \gamma dr \end{aligned}$$

여기서 T_s 는 (a) 판과 판이 겹친 경우의 전달토크, T_o 는 (b) 판과 구멍 및 슬릿이 겹친 경우의 전달토크이다. $\xi(r)$ 은 판과 구멍 및 판과 슬릿이 겹쳐진 부분의 면적비, f 는 판과 판 사이의 전달토크에 대한 판과 구멍 및 슬릿 사이의 전달토크 비이다. γ 는 구멍과 슬릿이 겹쳐진 부분의 면적비로서 다음과 같이 계산된다.

$$\gamma = \frac{\text{총겹쳐진 면적} \times 2}{\text{구멍면적} \times \text{구멍갯수} + \text{슬릿면적} \times \text{슬릿갯수}} \quad (4)$$

식(3)에서 알 수 있듯이 두 판 사이의 정상상태 전달토크는 동점성계수 ν , 밀도 ρ 그리고 두 축의 속도차 ω 에 비례하고 간극에 반비례하며 반지름의 4제곱에 비례하는 특징을 가진다.

2.2 VC의 열역학적 특성과 모델링

Fig.4는 VC 전체의 열의 흐름을 본드그래프로 모델링한 그림이다. Fig.4의 본드그래프 모델은 기계회전계와 열역학계로 구성된다. 기계회전계에서 VC의 입력축과 출력축 사이의 속도차에 의한 마찰토크로 인해 열이 발생하며 이 과정은 Fig.4의 본드그래프에서 R-요소로 모델링된다. 마찰에 의한 열량 Q_1 은 다음과 같이 표시된다.

$$Q_1 = T_v \omega \quad (5)$$

여기서 T_v 는 토크, ω 는 입·출력축의 속도차이다. 마찰에 의한 열량은 열역학계에서 절대온도 K 와 엔트로피의 변화율 \dot{S} 으로 변환되며 이 과정은 본드그래프에서 R-요소로 모델링된다. 엔트로피의 변화율은 다음과 같이 정의된다.

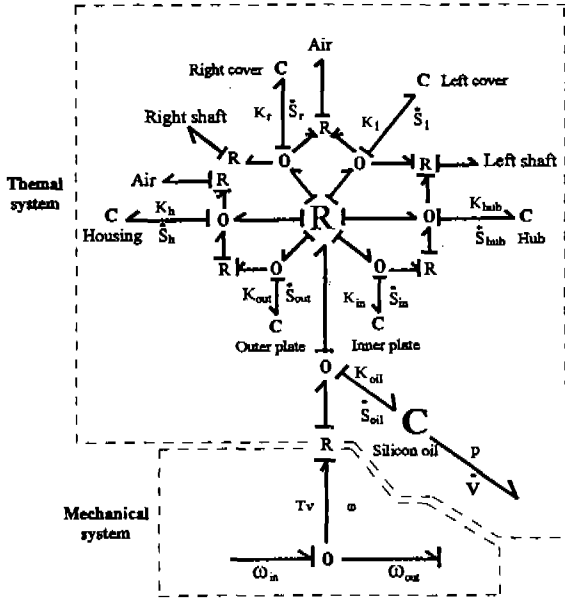


Fig.4 Bondgraph model for heat transfer in VC

$$\dot{S} = \frac{\Delta Q}{K} \quad (6)$$

즉 계에 들어온 열량과 나간 열량의 차이를 엔트로피의 변화율 \dot{S} 로 표현할 수 있다.

VC 내부에서 발생한 열은 실리콘 오일과 판, 허브, 하우징 및 좌·우측 커버 등으로 전달된다. VC 각 부분으로 열이 전달되는 과정은 다음과 같이 모델링 할 수 있다. 예를 들어 외판으로 전달되는 열은 다음과 같이 표시된다.

$$Q_p = h_c A (K_{oil} - K_p) \quad (7)$$

여기서 h_c 는 실리콘 오일의 열전달계수, A 는 전열면적, K_{oil} 은 실리콘 오일의 온도, K_p 는 외판의 온도이다. 외판에 전달된 열은 다시 외판의 온도를 높이고 또 다른 요소로 열을 전달한다. 실리콘 오일에서 VC 각 요소로 흐르는 열전달 과정은 외판으로의 열전달과 유사하게 모델링할 수 있다. 이제 판, 허브, 하우징, 좌·우측 커버 등 VC 각 요소로 전달되고 남은 열은 실리콘

오일의 온도를 높이는데 사용되며 이것은 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$\Delta Q = Q_1 - \sum_i Q_i = m_{oil} C_{p_{oil}} \Delta K_{oil} \quad (8)$$

$\sum_i Q_i$ 는 VC 각 요소로 공급되는 열량, $C_{p_{oil}}$ 은 실리콘 오일의 정압비열이다. 식(6)과 식(7)에서 실리콘 오일의 온도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_{oil} = K_0 \exp\left(\frac{S_{oil} - S_0}{m_{oil} C_{p_{oil}}}\right) \quad (9)$$

여기서 첨자 0은 각 상태의 초기값이다.

VC 나머지 각 요소로의 열전달 과정은 다음과 같다. 내판에 주어진 열은 허브로 전달되고 그 남은 열은 내판의 온도를 높이는데 사용된다. 내판에서의 엔트로피 변화율과 온도의 관계식은 식(7)과 식(9)를 따른다. 또한 내판과 오일에서 허브에 전달된 열은 입력측으로 전달되고 남은 열이 허브의 온도를 높인다. 입력측으로의 열전달은 축을 핀(fin)으로 가정하고 계산하였다. 또한 오일로부터 좌·우측 커버로 전달된 열은 입·출력측 및 공기로 전달된다. 이때 공기로 전달되는 열전달은 자연대류로 가정하였다. 자연대류에 있어서 열의 전달은 식(7)과 같은 형태이며 이 때 열전달 계수는 다음과 같이 표시된다.

$$h_c = \frac{k}{D} Nu \quad (10)$$

여기서 k 는 열전도계수이고 Nu 는 Nusselt 수이다.

이러한 열전달과정을 통해 실리콘 오일과 VC 각 부분의 온도를 계산할 수 있다. 특히 실리콘 오일의 온도가 상승하면 오일이 팽창하고 이로 인해 VC내의 압력이 상승한다. 압력이 상승하면 하우징 내의 공기가 실리콘 오일 속으로 용해되어 간다. 용기 내의 초기 압력과 일정시간이 흐른 뒤의 압력의 관계는 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$\frac{P_t}{P_0} = \frac{M_{At}/V_{At} RK_t}{M_{A0}/V_{A0} RK_0} = \frac{M_{At}}{M_{A0}} \frac{V_{A0}}{V_{At}} \frac{K_t}{K_0} \quad (11)$$

여기서 R은 이상기체 상수, 첨자 A는 공기를 나타내고 첨자 0은 초기상태, t는 일정시간이 흐른후의 상태를 표시한다. 또한 공기의 체적변화와 질량의 변화는 각각 다음과 같다.

$$V_{At} = V_{A0} - \beta V_{S0} \Delta K \quad (12)$$

$$M_{At} = M_{A0} - \alpha_r M_{S0} \Delta P$$

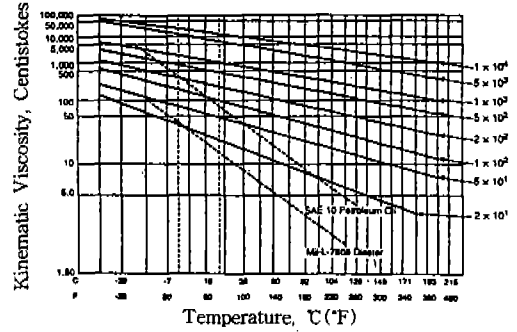
여기서 α_r 은 공기의 용해율, β 는 체적팽창계수, 첨자 S는 실리콘 오일을 나타낸다. 식(11)에 식(12)를 대입하면 압력은 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$P_t = \frac{\left(1 + \alpha_r \frac{M_{S0}}{M_{A0}} P_0\right) \cdot P_0}{\left(1 - \beta \frac{\chi}{1 - \chi} \Delta K\right) \frac{K_t}{K_0} + \alpha_r \frac{M_{S0}}{M_{A0}} P_0} \quad (13)$$

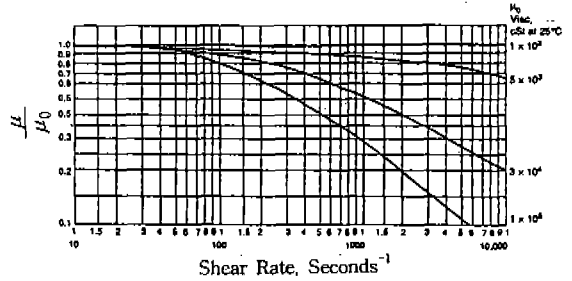
여기서 χ 는 초기 실리콘 오일의 충전율로서 VC 내부 전체 체적에 대한 실리콘 오일의 체적비이다.

2.3 실리콘 오일의 특성

실리콘 오일은 넓은 점성영역과 화학적 불활성, 온도변화에 따른 점성변화의 둔감성, 무취, 우수한 산화 저항성 및 전단 저항성, 열에 안정한 특징 때문에 VC의 작동유로 사용되고 있다. 그러나 실리콘 오일은 온도가 높아짐에 따라 점성력이 떨어질 뿐만 아니라 전단율(shear rate)에 의해 점도가 감소한다. 그러므로 설계시 실리콘 오일의 온도에 따른 점성력과 전단율 변화 특성을 모두 고려하여야 한다. 온도에 대한 실리콘 오일의 동점성계수와 전단율 변화에 대한 선도가 각각 Fig. 5 (a),(b)에 도시되어 있다. Fig. 5(a)에서 온도에 대한 동점성계수는 다음식으로 모델링할 수 있다.



(a)



(b)

Fig.5 Silicon oil characteristics

$$\nu = 10^{a/(t+273.15)^b} / \rho \quad (14)$$

여기서 a는 y절편, b는 직선의 기울기이고 t는 실리콘 오일의 온도(°C)로서 앞의 열역학 관계식(9)에서 계산된다. Fig. 5(b)에서 전단율에 대한 점성계수 특성은 3부분으로 직선근사화할 수 있고 각 구간에서 점성계수는 다음식으로 모델링하였다.

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{S^{\log c}}{d} \quad (15)$$

여기서 S는 전단율, c, d는 각 구간에서의 계수이다.

2.4 온도와 공기체적변화를 고려한 VC의 정상상태 전달토크

VC의 기하학적 특성에 대한 전달토크식(3)에 실리콘 오일의 온도 및 전단율에 대한 동점성계수 $\nu(t,s)$ 변화와 실리콘 오일 압력상승에 대한

공기체적변화 특성을 고려한 VC의 정상상태 토크전달식은 다음과 같다.

$$T_v = 2n \int v(t, s) \rho \frac{\omega}{h_d} 2\pi r^3 \{1 - (1-f)\xi(r) + f\gamma\} dr \quad (16)$$

여기서 n은 내판의 수이다.

3. 실험적 해석

3.1 실험장치

Fig.6은 VC 특성을 해석하기위한 실험장치이다. 동력은 DC 모터로부터 모터에 내장된 1/10 종감속 기어와 V-벨트를 통하여 VC의 입력축에 전달된다. VC의 출력축은 고정되어 있다. VC 입출력 속도차를 일정하게 유지하기 위하여 모터의 속도를 인버터로 제어하였다. 실험에 사용된 VC는 독일 GKN 제품으로 설계사양은 Table 1에 나와있다. 실험에서 검출되는 신호는 입력축의 회전수와 토크, VC 표면온도 등 3개이다.

3.2 실험결과 고찰

Fig.7~Fig.8에 실험결과가 도시되어 있다. Fig.7은 입출력 속도차의 변화에 대한 토크특성

실험결과이다. VC의 토크는 시간이 지남에 따라 점차 감소하는 경향을 보이다가 일정시간후 갑작스런 상승값을 보인다. 그림에서 볼 수 있듯이 입출력 속도차가 클수록 VC의 전달토크 크기가 증가한다. 하지만 입출력 속도차가 클수록 전달토크의 감소율이 더 커지는데 이것은 입출력 속도 차이가 증가하면 VC 내부에 실리콘 오일 마찰에 의해 더욱 많은 열량이 발생하고 실리콘 오일의 온도가 증가하여 점성이 감소하기 때문이다. 각 경우에 대하여 토크는 감소하다가 급격한 상승값을 보이는데 이와 같은 토크의 상승시점은 일반적으로 험프발생시점으로 알려져 있다. 험프의 발생이론에 대하여는 여러 가지 연구가

Table 1 Design specification of VC

Contents/Parameter	Value/unit
Filling rate	85%
Density ρ at 25°C	970.21kg/m ³
No. of inner plate	25
No. of outer plate	26
Outer diameter of plate, d2	101.4mm
Inner diameter of plate, d1	67.8mm
No. of hole	18
Diameter of hole, ϕ	6mm
No. of slit	20
Width of slit, ws	2.5mm

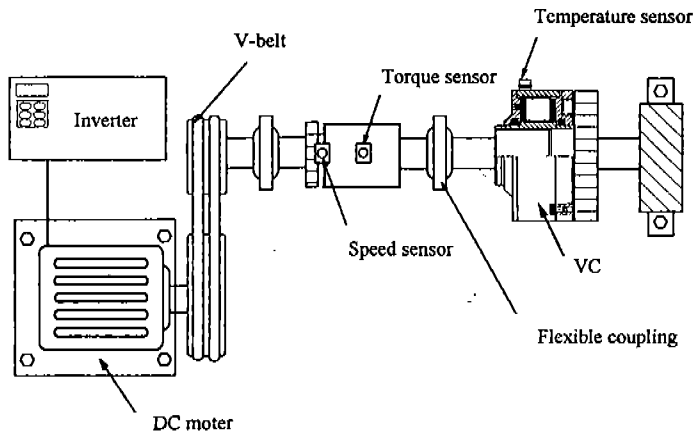


Fig.6 Schematic diagram of experimental apparatus for VC

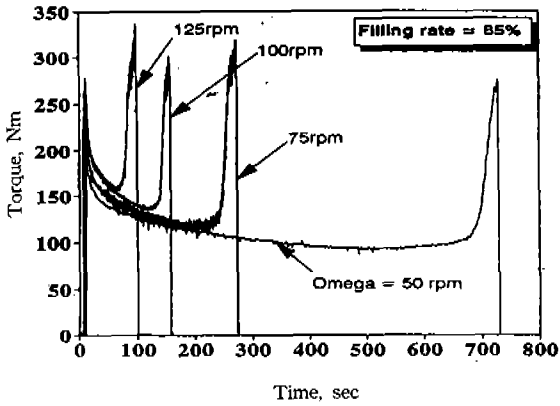


Fig.7 Torque characteristics for various slip speed

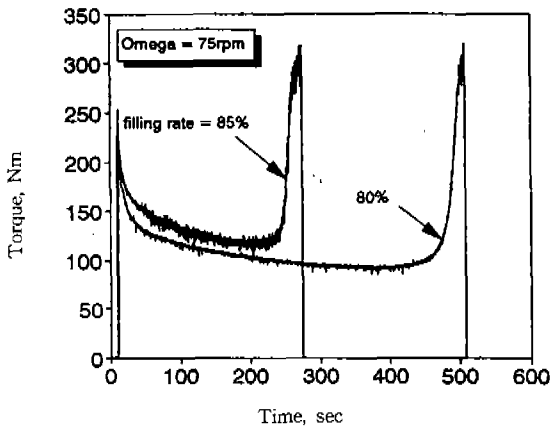


Fig.8 Torque characteristics for various filling rate

보고되고 있으나⁹⁾ 상세한 발생메카니즘은 아직까지 밝혀진 것이 없고, 다만 VC 내부의 마찰열에 의해 실리콘 오일이 팽창하여 VC 내부를 100% 채우는 시점, 즉 충전율이 100%인 시점에서 발생한다는 이론이 널리 받아들여지고 있다. 본 연구에서는 험프가 시작되는 시점을 실리콘 오일의 충전율이 100%인 점으로 가정하였다. Fig.7에서 볼 수 있듯이 속도차가 증가함에 따라 험프에 도달하는 시간은 짧아지는데 이것은 증가된 VC 내부의 발생열에 의해 실리콘 오일이 빨리 팽창하고 따라서 충전율이 100%가 되는 시점이 빨라지기 때문이다. 그러므로 회전속

도 차가 클수록 빠르게 험프에 도달하게 된다.

Fig.8은 충전율이 VC 전달토크에 미치는 영향을 실험한 것이다. 입출력 속도차 75rpm에 대하여 충전율은 85%인 경우와 80%인 경우에 대하여 전달토크를 측정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 실리콘 오일의 충전율은 전달토크의 크기와 험프 도달시간 2가지에 모두 영향을 미칠 수 있다. 즉 충전율이 작아지면 전달토크도 작아지는데 이는 토크전달 매개체인 실리콘 오일의 양이 상대적으로 줄어들어 전달할 수 있는 토크의 양도 줄기 때문이다. 또한 충전율이 작을수록 험프도달시간도 길어지는데 이것은 실리콘 오일이 팽창하여 100% 충전되는 시간이 길어지기 때문이다. 하지만 충진을 감소에도 불구하고 시간에 대한 전달토크의 감소율은 거의 일정함을 알 수 있다.

Fig.9와 Fig.10은 실험과 수치해석 결과를 비교한 그림이다. Fig.9는 입출력 속도차 75rpm, 초기온도 19℃일 때의 실험결과와 해석결과를 비교한 것이다. 해석결과는 실리콘 오일의 충전율이 100% 되는 시점까지 수행하였다. 그림에서 알 수 있듯이 토크변화 특성은 실험결과와 거의 일치한다. 온도는 이론치가 실험결과보다 5~15℃ 높은 값을 보이는데 이것은 실험에서 측정된 온도가 표면온도로서 내부온도가 5~15℃ 정도 높은 것을 감안할 때³⁾ 비교적 잘 맞는 결과이다. 압력은 수치해석 결과만 도시하였다. 험프발생시의 압력은 약 250kPa이다. 기존연구³⁾의 경우 약 200~250kPa부근에서 험프가 일어난다고 보고되어 있어 해석 결과가 실제와 유사함을 알 수 있다.

Fig.10은 입출력 속도차 50rpm, 초기온도 13℃에서 실험결과와 해석결과를 비교한 그림이다. 토크값은 실험치보다 15~20Nm 작은 값을 보이나 그 경향은 거의 일치한다. 그러나 온도는 그 차이가 20~30℃로서 표면온도와 내부온도 차이를 고려하더라도 이론치와 실험결과는 다소 차이를 보인다. 이것은 $\omega=50\text{rpm}$ 에서 실리콘 오일의 전달을 변화에 대한 동점성계수 추정오차에 의한 것으로 판단되며 보다 정확한 해석을 위해서는 실험에 의한 실리콘 오일 물성치의 측

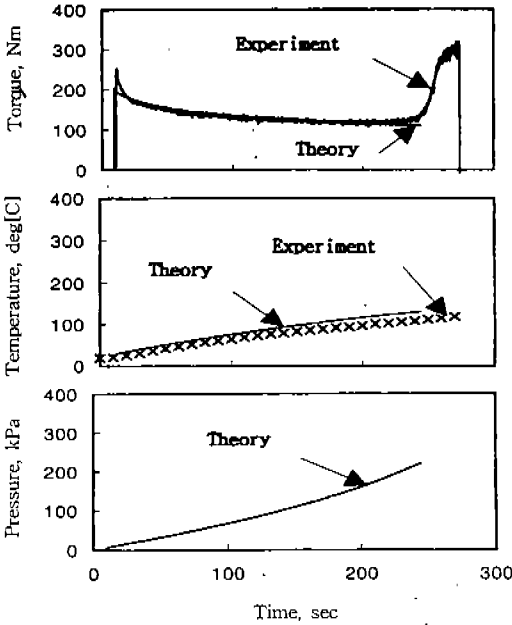


Fig.9 Comparison of experimental results with theory for $\omega = 75\text{rpm}$

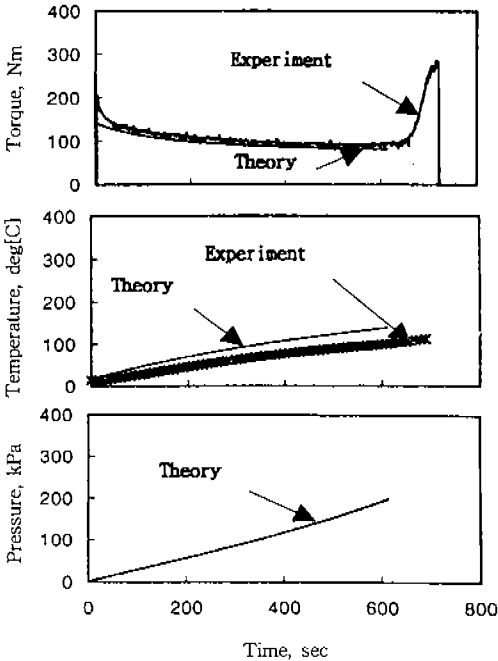


Fig.10 Comparison of experimental results with theory for $\omega = 50\text{rpm}$

정값이 요구된다.

Fig.9와 Fig.10에서 볼 수 있듯이 토크의 실험결과는 운전초기 피크값을 보인후 급격히 감소하여 정상상태 토크값을 보이는데 이와 같은 현상은 VC 기동 마찰토크에 의한 것으로 생각된다. 기동마찰토크는 실리콘 오일의 유체저항과 기계적 마찰로 나눌 수 있다. 유체저항은 정지해 있던 고점성 유체인 실리콘 오일이 움직이기 시작할 때 저항에 의한 것이며, 기계적마찰은 역시 정지상태에 있던 기계적 마찰요소들이 정지마찰 (static friction)에서 운동마찰(kinetic friction)로 변화하는 과정의 마찰토크에 의한 것으로 판단된다.

또한 Fig.9와 Fig.10에서 토크의 이론치와 실험결과를 자세히 비교해 보면 이론치는 힘프에 도달할 때까지 계속 감소하는 반면, 실험결과는 힘프에 다가갔을 때 토크 값이 약간 증가하는 현상을 보인다 이러한 현상에 대하여 Shimizu³⁾는 VC 내부의 압력증가에 따라 내판과 외판이 일부는 접촉하여 급속마찰을 하고 일부는 실리콘 오일에 의한 점성마찰상태를 유지하며, 압력이 증가할수록 급속마찰 점유율이 증가하기 때문에 토크가 증가한다고 설명하였다. 그러나 이에 대한 확실한 연구결과는 아직 보고된 것이 없으며 추후 연구의 대상으로 생각된다.

이상의 실험으로 앞에서 도출된 VC 기하학적 특성과 열역학 및 열전달 특성을 고려한 정상상태 토크식의 타당성을 확인할 수 있었다.

4. VC 특성 수치해석

앞에서 검증된 VC 특성 관계식을 이용하여 VC의 주요 설계 파라미터 변화에 따른 정상상태 특성을 고찰하였다. 먼저 충전율을 고정시키고 입·출력축의 속도 차 ω 의 변화에 대한 수치해석 결과가 Fig.11에 도시되어 있다. 수치해석은 초기 VC 내부온도 25°C, 실리콘 오일의 충전율 85%인 상태에서 공기가 완전히 실리콘 오일 속으로 녹아 들어가 실리콘 오일이 VC 내에 100% 충전된 상태에 도달할 때까지 수행하였다. Fig.11의 (a),(b)는 각각 ω 의 변화에 대

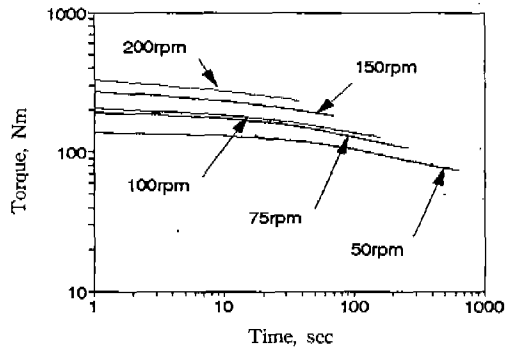
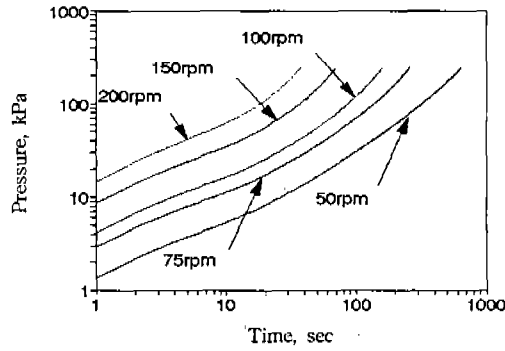
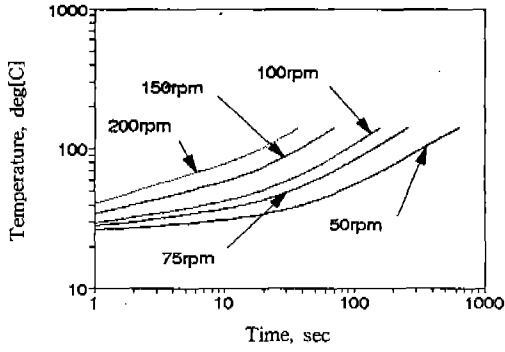


Fig.11 VC characteristics for various slip speed with 85% filling rate

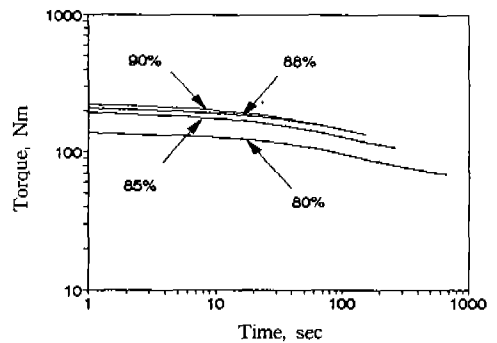
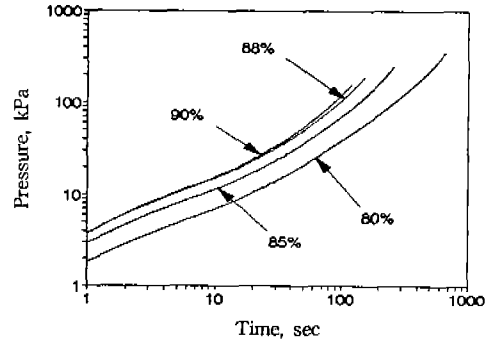
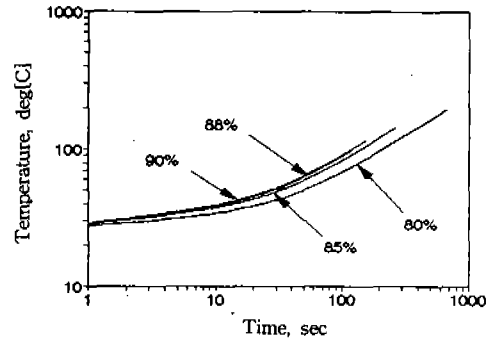


Fig.12 VC characteristics for various filling rate with $\omega = 75\text{rpm}$

한 VC의 온도 및 압력 특성이다. ω 가 커지면 온도(a) 및 압력(b) 상승이 증가한다. Fig.11(a), (b)에서 수치해석에 사용된 VC의 경우 실리콘 오일의 충전율이 100%가 되는 상태는 대략 $t = 124^\circ\text{C}$, $P = 250\text{kPa}$ 이다. Fig. 11(a)에서 알 수 있듯이 ω 가 증가할수록 실리콘 오일의 충전율이 100%가 되는 시간이 빨라진다.

Fig.11(c)는 ω 에 대한 전달토크의 변화를 도

시한 것이다. ω 가 증가할수록 VC 전달토크가 증가한다. 이것은 식(15)에서 확인할 수 있다. 시간이 지남에 따라 VC의 전달토크가 감소하는데 이는 ω 에 의해 VC 내부에 마찰열이 발생하여 실리콘 오일의 점도가 떨어지기 때문이다. Fig.11(c)에서 볼 수 있듯이 작동시간에 대한 전달토크의 감소량은 ω 가 증가할수록 커진다. 이것은 실리콘 오일의 점도가 전달율의 함수로

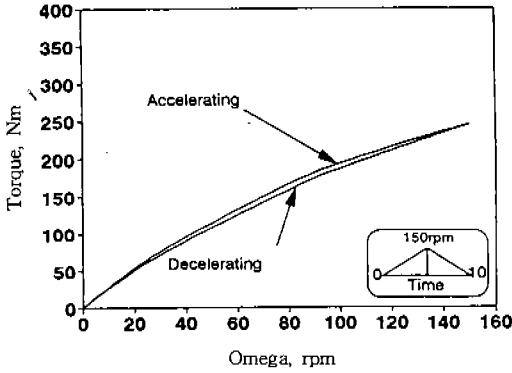


Fig.13 Torque characteristics for slip speed difference

서 Fig.5(b)에서 볼 수 있듯이 전단율이 커질수록 점성이 빨리 떨어지고 온도 및 압력의 영향으로 토크가 더 급격히 감소하기 때문이다.

Fig.12는 ω 를 고정시키고 충전율(filling rate)을 80% 에서 90%로 증가시키며 수치해석을 수행한 결과이다. 수치해석은 초기 VC 내부온도 25°C 인 상태에서 공기가 완전히 실리콘 오일 속으로 녹아 들어가 실리콘 오일이 VC 내에 100% 충전된 상태에 도달할 때까지 수행하였다. Fig.12(a)는 충전율의 변화에 대한 VC 온도 변화 선도이다. 그림에서 볼 수 있듯이 충전율이 작아질수록 같은 온도에 도달하는데 걸리는 시간이 증가한다. Fig.12(b)는 충전율에 대한 압력의 변화를 나타내는 선도이다. VC 내부의 압력은 충전율이 커질수록 빨리 증가하며 험프에 도달하는 시간도 짧아진다. Fig.12(c)는 충전율의 변화에 따른 VC 전달토크 특성을 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 충전율이 증가하면 전달토크의 크기도 증가한다. 이것은 충전율이 증가하면 전달토크의 크기가 커지고 이에 따라 온도도 빨리 상승하여 실리콘 오일이 100% 충전되는 시점이 빨라지기 때문이다. 따라서 실리콘 오일의 충전율은 온도, 압력 및 전달토크에 모두 중요한 영향을 미치고 있어 VC 설계의 핵심임을 알 수 있다.

Fig.13은 입출력축의 속도차를 그림의 우측 하단부와 같은 운전모드로 작동시킬 때의 해석 결과이다. 입출력 속도차를 증가시키면 VC의 전

달토크는 위로 볼록한 포물선의 형태를 나타내며 증가한다. 또한 감속시도 포물선의 형태를 보이며 토크가 감소한다. 그림에서 볼 수 있듯이 가속구간의 토크와 감속구간의 토크가 다른 것을 볼 수 있는데, 이것은 가속시 실리콘 오일의 특성에 의해 VC의 온도가 상승하고 오일의 점도가 떨어져있기 때문에 감속시에는 가속시 보다 더 낮은 토크를 전달하게 된다.

5. 결 론

- 1) 비스코스 커플링(VC)의 내판과 외판 및 간극, 구멍, 슬릿 등 기하학적 형상과 열역학 및 열전달 특성, 실리콘 오일의 온도, 전단율에 대한 동점성계수 특성, 압력 상승에 따른 공기의 용해율을 고려한 정상상태 VC 전달토크 관계식을 유도하였다.
- 2) 실차 장착용 VC의 실험적 연구를 수행하여 정상상태 토크와 표면온도 및 험프발생시점을 측정하였다. 실험결과는 이론치와 그 경향이 거의 일치하고 있으며 따라서 도출된 VC 정상상태전달토크 및 온도, 압력식의 타당성을 확인할 수 있었다.
- 3) VC 주요 설계파라미터 변화에 대한 VC 특성을 고찰하였다. 해석결과 VC 내판 및 외판의 기하학적 형상외에 실리콘 오일의 충전율이 VC의 정상상태 토크특성에 지배적인 영향을 미치며, 특히 실리콘 오일의 충전율은 그 값이 작아질수록 전달토크 크기는 작아지나 험프발생시간을 늦출 수 있는 등 험프발생시점을 조정할 수 있다.

참 고 문 헌

1. T. Ushijima, Y. Yuhashi, "Visco Control Unit", JSAE Review Vol. 10, 1988.
2. Y. Niikura, T. Takemura, "Analysis on Torque Characteristics of Viscous Coupling", 自動車技術會論文集 研究論文(5), 1988.
3. M. Shimizu, Y. Yuhashi, "Simulation

- Analysis on Torque Characteristics of Viscous Coupling”, 自動車技術會論文集 研究論文(10), 1989.
4. K. Aoki, M. Shimizu, Y. Yuhashi, Y. Nakayama, “Study on Characteristics of Viscous Coupling”, 日本機械學會論文集 (B編) 55卷, 515號(1989-7), 1988.
 5. H. Taureg, J. Horst, “Induced Torque Amplification in Viscous Couplings”, IMechE C832/024, 1989.
 6. T. Takasaki, Y. Mimuro, Y. Yuhashi, “An Experimental Study of the Viscous Characteristics of High-Viscosity Sili-cone Fluids and Measuring Method for Viscous Couplings”, JSAE Review Vol. 12, 1998.
 7. M. Wakamatsu, K. Yoshida, Y. Kojima, O. Murata, “Flow Analysis of Viscous Coupling”, JSAE Intenational Conference on Motion and Power Transmissions, 1991.
 8. T. Takemura, Y. Niikura, “An Analysis of Viscous Coupling Torque Transmi-ssion Characteristics and Hump Pheno-menon”, SAE 900558.
 9. S. K. Mohan, B. V. Ramarao, C. F. Stephens, S. K. Varma, B. V. Gokul, “Viscous Couplings in 4WD Vehicles: Application of Computational Modelling”, SAE 920611.