

유체감쇠 커플링의 동특성에 관한 실험적 연구(Ⅱ)

김종수* · 제양규** · 정재현* · 전효중*

An Experimental Study on the Dynamic Characteristics of Damping Flexible Coupling(Ⅱ)

J. S. Kim · Y. G. Jei · J. H. Jeong · H. J. Jeon

Key words : Multiple - leaf spring(겹판스프링), Damping flexible coupling(유체감쇠 커플링), Static coefficient of stiffness(정적강성계수), Dynamic coefficient of stiffness(동적강성계수), Damping coefficient(감쇠계수), Damping factor(감쇠율)

Abstract

The present works are the experimental results of study to develop a damping flexible coupling which has a high performance of control for the torsional vibrations of power shafts in a large machinery. The damping flexible coupling is manufactured and is compared for dynamic characteristics with other type coupling which is the Geislinger coupling. The static coefficient of stiffness is measured for each coupling. The apparatus designed to measure the dynamic coefficient of stiffness and the damping coefficient allows the control of excitation frequency through a cam driver. The experimental results obtained from the two couplings are compared with the theoretically results.

1. 서 론

회전하는 구동축과 피동축을 연결해 주는 기구를 커플링이라 하며 본질적인 기능은 동력전달 기능이다. 그러나 사용되는 기계장치에 따라서 부가적인 기능이 요구되며, 대표적인 것으로는 축심오차 흡수기능, 충격완화 기능, 비틀진동 제어기능 등이다. 특히 선박이나 군용 장갑차 및 중장비 등에서와 같이 기관 출력자체의 변동이나 작업하중

의 변동이 상대적으로 큰 경우에는 충격완화 및 비틀진동 제어기능이 우수한 커플링을 사용할 필요가 있다. 이와 같은 목적으로 사용되고 있는 커플링이 탄성형 커플링이다.

탄성형 커플링에는 금속탄성형, 고무탄성형, 유체감쇠형 커플링으로 분류할 수 있으며, 그 중에서도 고무탄성형과 유체감쇠형 커플링이 비틀진동 제어기능이 우수하다. 고무탄성형 커플링은 유체감쇠형 커플링에 비하여 가격 경쟁력이 우수하

* 한국해양대학교 기계공학과

** 한국기계연구원

기 때문에 많이 사용되고 있다. 그러나 고무의 특성상 장시간 사용하면 경화되어 그 기능을 상실하게 됨으로 수명이 비교적 짧다. 반면에 유체감쇠형 커플링은 고무탄성형에 비하여 가격이 높은 단점이 있지만 5배 내지 10배 정도의 큰 감쇠능력을 보유하고 있으며, 또한 고속에서도 사용이 가능하고 수명이 거의 반 영구적이라 할 수 있다. 유체감쇠 커플링은 제작이 까다롭고 많은 기술적인 노하우를 포함하고 있어서 설계가 곤란하다. 이와같은 유체감쇠형 커플링에 대한 설계를 체계화 하기 위하여는 이론해석을 기초로 한 제작 및 실험을 통하여 성능의 검증이 요구되며, 또한 제작기술의 확립도 중요한 과제이다.

본 연구는 유체감쇠 커플링을 국산화하기 위하여 대형기계에서 전세계적으로 많이 사용되고 있는 유체감쇠 커플링인 Geislinger 커플링을 모델로 하여 수행된 연구의 실험적인 결과이다. 유체감쇠 커플링의 동특성에 대한 성능을 비교검증하기 위하여 국산시제품을 제작하였다. 유체감쇠 커플링의 정적강성계수를 측정하였으며, 또한 동적강성계수 및 감쇠계수를 측정하기 위하여 가진진동수를 조절할 수 있는 실험장치를 고안하여 동특성 실험을 수행하였다. 국산시제품과 Geislinger제품과의 실험결과를 비교하여 성능의 차이점을 고찰하고, 이론결과와 비교함으로써 저자들의 이론결과식의 타당성을 규명하고자 한다.

2. 정적 강성계수 측정

2.1 실험장치 및 실험방법

Fig.1은 커플링의 정적인 비틀림강성계수를 측정하기 위한 실험장치의 개략도를 나타내고 있다. 정적 비틀림 강성계수를 측정하기 위하여 Fig.1과 같은 구조로 하여 내측보스측에 부착된 아암을 잭을 사용하여 토오크를 가하고 외측보스에 연결된 아암이 로드셀(load cell)위에 얹혀져서 커플링에 작용하는 토오크를 알 수 있다. 즉 외측보스는 로드셀에 의하여 움직이지 않고 내측보스만 각도변위를 일으키게 된다. 이때 내측보스와 외측보스와의 상대 각도변위를 측정하기 위하여 외측보스의 각도변위와 내측보스의 각도변위를 두 개의 다이얼

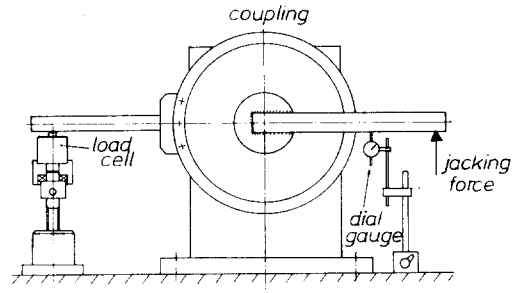


Fig.1 Schematic Diagram for Measuring Static Stiffness

게이지를 사용하여 측정한다. 그러면 커플링의 정적 비틀림 강성계수는 다음식으로부터 구해진다.

$$K_{st} = T_q / (\theta_i - \theta_o) \quad (1)$$

여기서 T_q 는 커플링에 작용하는 토오크이고, θ_i , θ_o 는 각각 내측보스와 외측보스의 각도변위를 나타낸다.

2.2 정적 비틀림강성계수

Fig.2는 정적 비틀림 강성계수에 대한 실험결과를

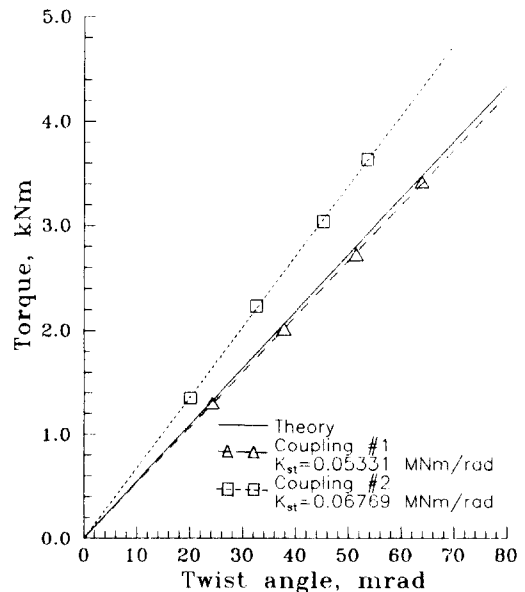


Fig. 2 Experimental Results of Static Stiffness

Table 1 Comparison of Theoretical and Experimental Static Stiffness Coefficients

Theoretical Result	0.05445 MNm/rad
Coupling #1(Geislinger)	0.05331 MNm/rad
Coupling #2(Present)	0.06769 MNm/rad

나타내고 있다. 커플링 #1 및 #2는 각각 Geislinger 커플링과 국산 시제품을 의미한다. 유체감쇠 커플링의 정적 비틀림 강성계수에 대한 이론결과 및 실험결과를 Table 1에서 보여주고 있다. 이론결과와의 오차는 Geislinger사의 제품이 2% 정도 작고, 국산 시제품은 24.3% 정도 더 크다. 그리고 국산 시제품은 Geislinger사의 제품보다 약 27% 정도 강한 정적 강성계수를 갖게 됨을 알 수 있다.

3. 동적 강성계수 및 감쇠계수 측정

3.1 실험장치 및 실험방법

유체감쇠 커플링의 동적 특성계수를 구하기 위하여 실험장치를 설계, 제작하였으며, Fig.3은 실험장치의 개략도이며 Fig. 4는 실험장치에 대한 사진이다. 실험장치 구성의 핵심은 다음과 같이 되어 있다. 즉 조화운동(harmonic motion)을 하는 캠을 이용하여 커플링의 외측보스를 가진하여 조화함수를 갖는 비틀림 운동이 커플링의 외측보스에 발생하게 하였으며, 진동크기 및 속도를 측정하기 위하여 가진되는 반대측에 간극변환기(displacement transducer)를 설치하였다. 또한 가진되는 힘을 측정하기 위하여 또한 로드셀을 그림에서와 같이 설치하였다.

실험방법은 교류전동기(50kW)를 이용하여 캠축(cam shaft)를 구동하여 진동속도를 12~220 rad/sec 범위 이내에서 변화시켰으며, 이 때 간극변환기와 하중변환기로부터 나오는 전기적 신호를 A/D변환기를 사용하여 컴퓨터에 저장하였다. 또한 커플링에 사용되고 있는 기름의 온도를 예측하기 위하여 커플링 커버의 온도를 측정하였다. 그리고 Table 2는 커플링의 극관성모멘트의 크기에 대한 실험결과를 나타내고 있다. 전체 운동부의 극관성모멘트에는 커플링의 외측보스와 하중

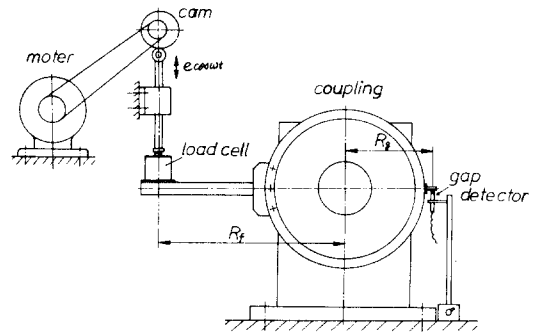


Fig. 3 Schematic Diagram for Measuring Coefficients of Dynamic Characteristics

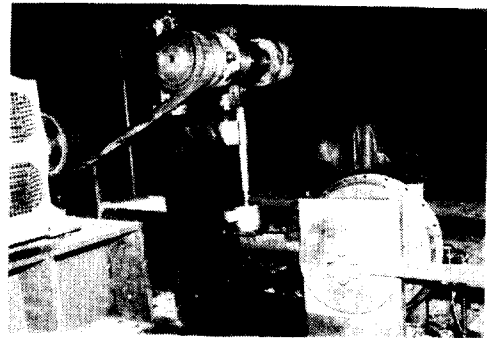


Fig. 4 Experimental Apparatus for Measuring Coefficients of Dynamic Characteristics

Table 2 Inertia of Mmoment of Coupling and Appratus

Inertia of moment of coupling	
Inner star I_i	0.05 kgm ²
Outer star I_o	1.52 kgm ²
Inertia of moment of appratus I_p	
	2.39 kgm ²

을 가하기 위한 보조막대 및 하중변환기에 의한 극관성모멘트가 포함되어 있다.

3.2 동특성계수 측정방법

본 실험장치에서 커플링의 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$I_p \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + C_t \frac{d\theta(t)}{dt} + K_t \theta(t) = T_q(t) \quad (2)$$

위 식에서 비틀림 각도 및 작용토크가 다음과

같은 조화함수를 갖는다면

$$\begin{aligned} \theta(t) &= \Theta \sin \omega t \\ T_q(t) &= T_o \sin(\omega t + \phi) \end{aligned} \quad (3)$$

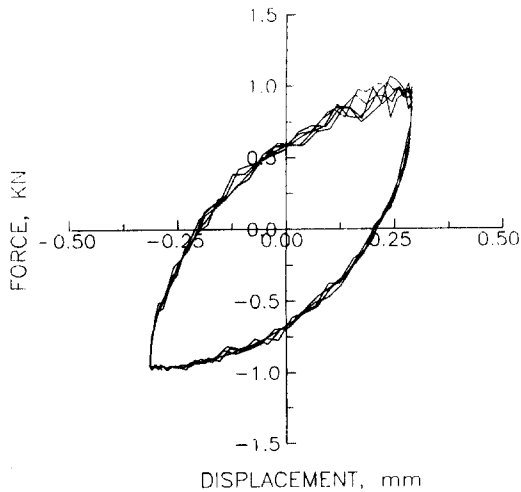
커플링의 동적 강성계수는 다음식으로 주어진다.

$$K_t = \frac{\omega C_t}{\tan \phi} + \omega^2 I_p \quad (4)$$

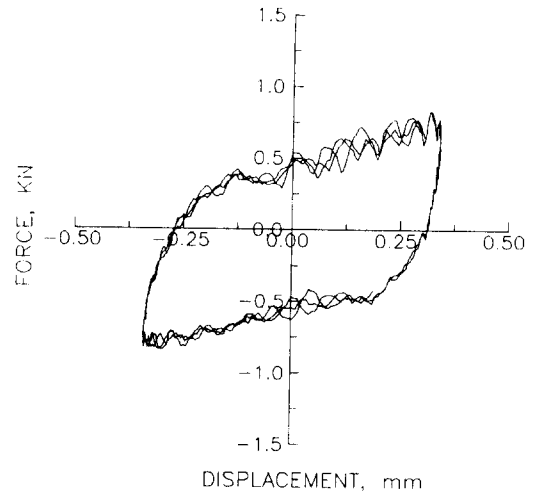
그리고 등가 감쇠계수는 1 사이클당 소산에너지 (E_d)의 크기를 알면 다음식으로부터 쉽게 구할 수 있다.

$$C_t = \frac{E_d}{\pi \omega \Theta^2} \quad (5)$$

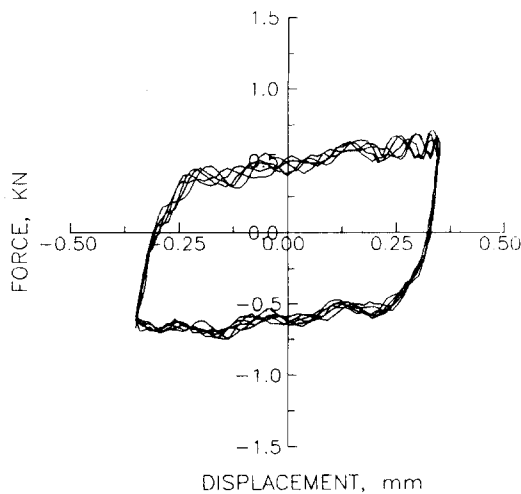
그러므로 동특성계수를 구하기 위하여 커플링의 극관성모멘트(I_p), 1 사이클당의 소산에너지, 위



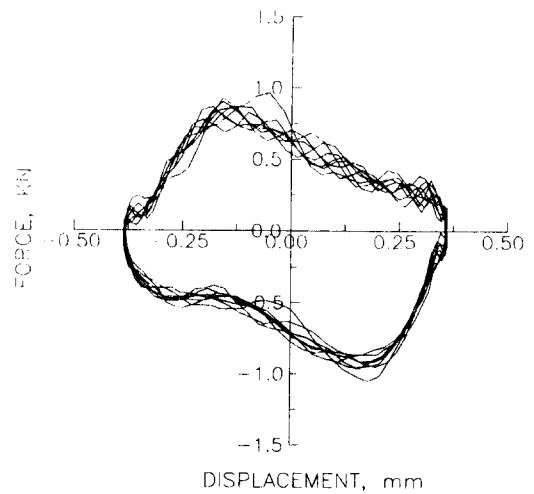
(a) $\omega = 24.3 \text{ rad/s}$



(b) $\omega = 48.9 \text{ rad/s}$



(c) $\omega = 109.5 \text{ rad/s}$



(d) $\omega = 198.3 \text{ rad/s}$

Fig.5. Hysteresis Loop of Damping Flexible Coupling(Geislinger)

상각(ϕ) 및 각운동 진폭(Θ)을 구해야 함을 알 수 있다.

감쇠계수는 식(5)를 실험데이터에 관한 아래와 같은 식으로 바꾸면 바로 구할 수 있다.

$$C_t = \frac{R_f R_g}{\pi \omega X^2 n_d} \sum_{k=1}^{N_T} (F_{k+1} + F_k)(x_{k+1} - x_k) / 2 \quad (6)$$

여기서,

R_f = 커플링의 중심축으로부터 하중 측정점까지의 거리(446mm)

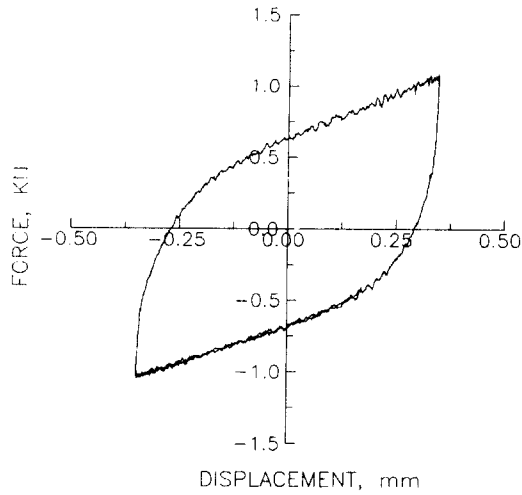
R_g = 커플링의 중심축으로부터 변위 측정점까지의 거리(105mm)

x_k = 변위

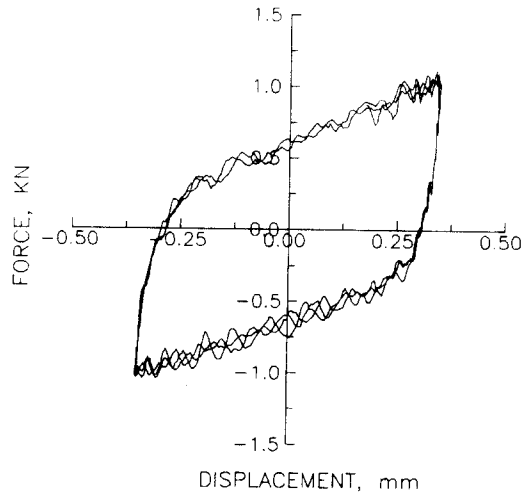
F_k = 가진력

N_T = n_d 주기까지 전체 데이터 수

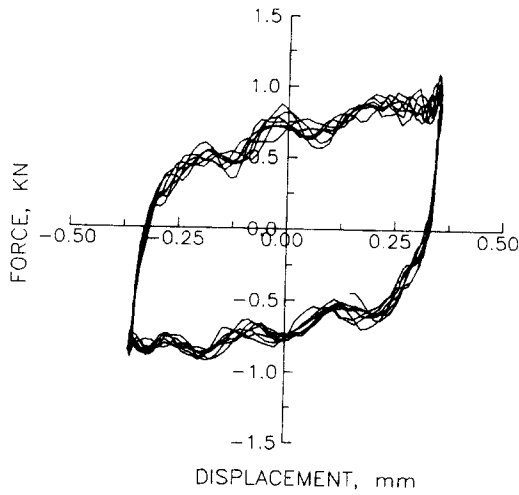
n_d = 주기 수(평균화 수)



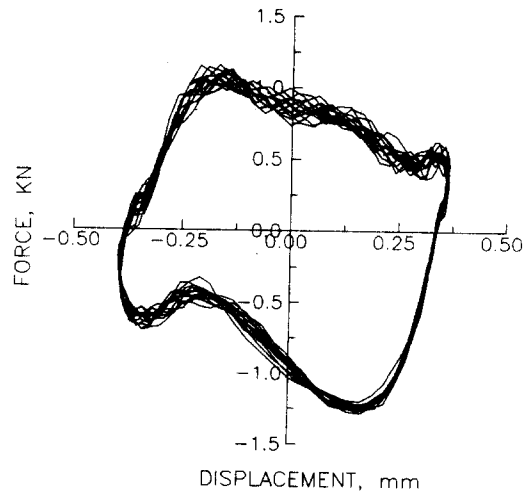
(a) $\omega = 12.9$ rad/s



(b) $\omega = 44.3$ rad/s



(c) $\omega = 111.1$ rad/s



(d) $\omega = 205.5$ rad/s

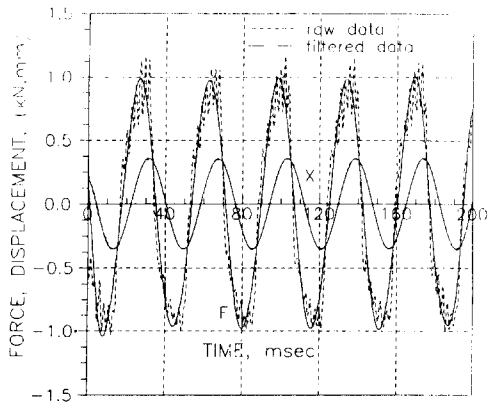
Fig.6. Hysteresis Loop of Damping Flexible Coupling(Present)

X = 변위측정점에서의 진폭

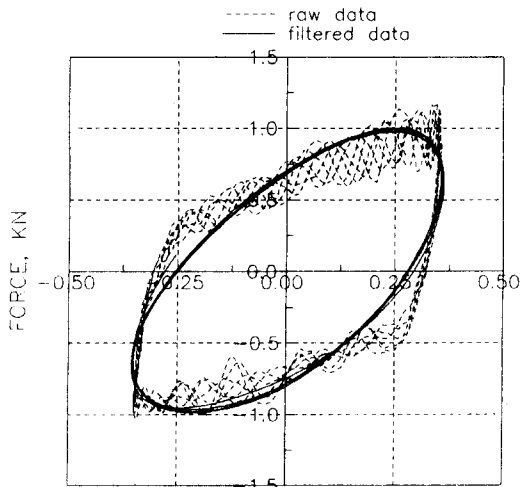
Fig.5 및 Fig.6은 실험으로부터 얻어진 변위와 하중과의 관계를 나타내는 히스테리시스 궤도(hysteresis loop)를 나타내고 있다. 그림에서 보여주고 있듯이 궤도가 타원형을 이루고 있지 않다. 이는 마찰력에 의한 감쇠효과가 큼을 의미한다. 그렇지만 식(6)으로부터 동가감쇠계수를 구하는 데 있어서는 이 궤도의 형상은 제약을 받지 않으므로

비교적 정확한 감쇠계수를 구할 수 있다.

그리고 동적강성계수를 구하기 위하여 위상각을 구해야 하는데 Fig.5, 6에서 예상할 수 있듯이 히스테리시스 궤도가 타원형이 아니므로 이들의 데이터로부터 위상각을 구하는 것은 매우 힘들고 또한 그 정확성에도 문제가 발생할 수 있다. 그러므로 디지털필터(digital filter)를 사용하여 고주파의 성분을 제거함으로써 데이터를 조화함수 형태

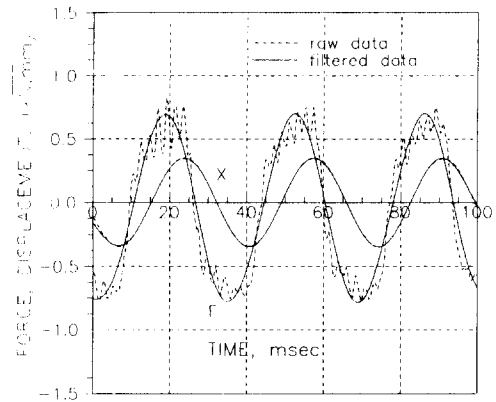


(a) Time signal

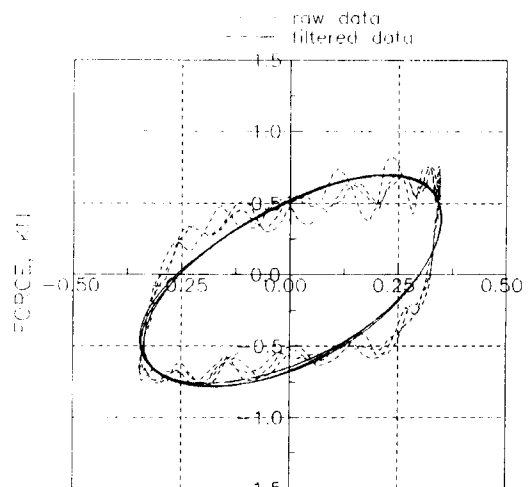


(b) Hysteresis loop

Fig.7. Filtered Data for Measuring Phase Angle (Geslinger)



(a) Time signal



(b) Hysteresis loop

Fig.8. Filtered Data for Measuring Phase Angle (Present)

에 가깝게 만들에서 위상각을 구할 수 밖에 없다. Figs.7, 8에서 보여주고 있는 것처럼 변위는 조화함수이나 하중은 마찰력의 영향으로 조화함수가 아님을 보여주고 있으며, 위상각을 구하기 위하여 원래 데이터의 변조가 최소화되면서 위상각을 구할 수 있을 정도의 고주파성분만 제거하였다.

3.3 동적 특성계수

Table 3 과 4는 Geislinger사 제품 및 국산 시제품에 대한 실험결과를 나타내고 있다. 실험시 커플링의 외부 온도는 2℃ 였으며, 실험중의 온도변화는 거의 없었다. 실험결과에서 동일한 진동속도(ω)를 기준으로 하면 위상각은 국산 시제품이 Geislinger사 제품에 비하여 약간 작게 나타나고, 1 사이클당 소산에너지는 국산 시제품이 더 크게 나타나고 있다. 이는 국산 시제품의 감쇠계수와

동적강성계수가 Geislinger사 제품 보다 더 크게 됨을 의미한다.

Fig.9는 두 제품의 감쇠계수에 대한 실험결과와 이론결과를 나타내고 있다. 여기서 이론결과를 계산하는데 있어서 스프링판사이의 마찰계수는 0.05 (상당 마찰감쇠율로는 0.6에 해당)로 가정하였다. 진동속도가 증가함에 따라 국산 시제품 및 Geislinger사 제품의 감쇠계수가 감소하고 있음을 보여주고 있으며, 대체적으로 국산 시제품의 감쇠계수가 약간 더 크게 됨을 알 수 있다. 그러나 그 차이는 비교적 작은 것으로써 이는 감쇠계수에 있어서 국산 시제품과 Geislinger사 제품은 거의 유사한 성능을 갖게 됨을 의미한다. 이론결과 역시 진동속도가 증가함에 따라 감쇠계수가 감소하며 실험결과와 매우 잘 일치하고 있다. 본 실험의 조건에서는 감쇠계수에 있어서는 오차의 성분을 거의 포함

Table 3. Experimental Results of Geislinger Coupling

ω [rad/s]	ϕ [deg]	E_d [Nm]	θ [mra]	K_t [kNm/rad]	C_t [Nm/rad/s]	χ
24.3	37.4	2.5251	3.267	117.99	3534.6	0.755
29.6	40.3	2.6091	3.249	109.87	2802.4	0.831
48.9	46.0	2.6182	3.243	99.45	1619.2	0.962
60.9	47.4	2.6924	3.276	82.53	1311.2	0.970
75.0	52.0	2.6945	3.233	77.53	1093.6	1.058
82.5	52.6	2.6923	3.271	77.41	971.2	1.035
94.1	55.2	2.7924	3.330	77.97	870.4	1.050
109.1	57.5	2.8744	3.314	80.87	763.2	1.033
140.2	67.5	3.1279	3.386	82.92	591.2	1.047
176.5	82.9	3.3613	3.443	85.69	511.2	1.053
198.3	93.2	3.3876	3.467	89.15	452.4	1.006

Table 4. Experimental Results of Present Coupling

ω [rad/s]	ϕ [deg]	E_d [Nm]	θ [mra]	K_t [kNm/rad]	C_t [Nm/rad/s]	χ
12.9	39.0	3.2977	3.266	121.91	7627.0	0.807
28.2	40.3	3.2941	3.238	119.78	3552.0	0.836
44.3	44.2	3.1637	3.245	102.11	2155.2	0.935
59.9	45.9	3.4172	3.257	107.90	1713.6	0.951
67.7	46.6	3.3809	3.262	106.64	1494.4	0.949
75.9	47.7	3.3346	3.285	103.31	1296.6	0.952
88.0	48.9	3.5279	3.341	106.29	1143.4	0.947
103.0	51.0	3.6126	3.346	108.54	997.4	0.946
111.1	53.3	3.6463	3.350	106.57	930.6	0.970
132.1	58.0	3.8069	3.383	109.63	801.8	0.966
172.6	68.4	4.4537	3.692	112.37	602.4	0.925
205.5	82.6	4.5806	3.514	116.07	574.8	1.018

하고 있지 않기 때문에 본 연구에서 유도된 감쇠계수에 대한 이론식이 매우 유용함을 알 수 있다.

Fig.10은 동적 강성계수에 대한 실험결과 및 이론결과를 보여주고 있다. 실험결과에서 두 경우 모두 진동속도가 약 50rad/s 이상에서는 진동속도가 증가함에 따라 동적강성계수가 약간씩 증가한다. 또한 이 영역에서 시제품의 강성계수가 Geislinger사 제품의 강성계수보다 크게 나타나고 있으며 그 차이는 Geslinger사 제품을 기준으로 할 때 약 32% 정도 시제품의 강성계수가 더 크며 진

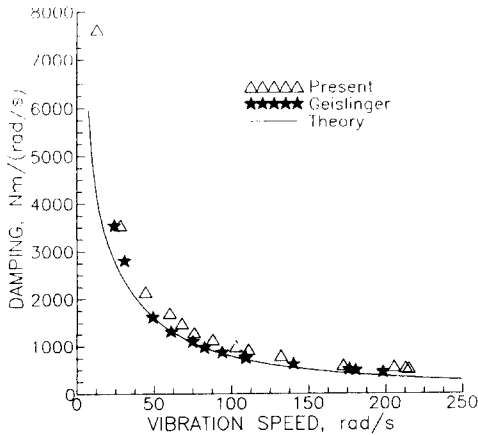


Fig.9. Experimental Results of Damping Coefficients

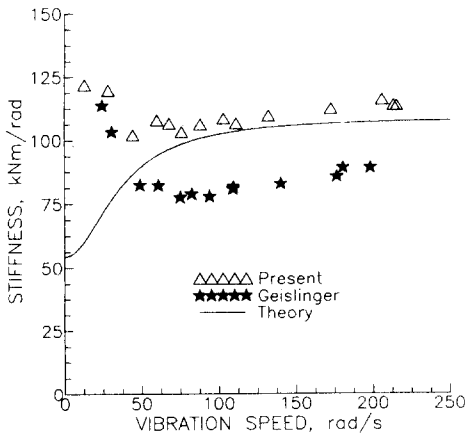


Fig.10. Experimental Results of Dynamic Stiffness Coefficients

동속도(50rad/s이상)에 관계없이 거의 일정하다. 이론결과는 진동속도가 50rad/s이상인 경우에 있어서 시제품의 실험결과와 보다 일치하는 것을 보여주고 있다. 그리고 진동속도가 50rad/s이하에서는 실험에서 구한 강성계수가 이론결과보다 상당히 크게 나타나고 있으며, 실험적으로 측정된 정적 강성계수와 비교하여도 매우 크게 됨을 알 수 있는데 이는 진동속도가 낮은 경우에는 마찰감쇠력이 점성감쇠력 보다 상당히 크게 되어 식(4)로부터 강성계수를 구하는 것이 타당하지 않기 때문으로 생각된다. 그러므로 마찰감쇠력이 상대적으로 큰 경우에는 식(4)대신 다른 방법으로 구하는 것을 고안해야 할 것으로 사료되지만 그러한 방법은 쉽게 구현하기는 어려울 것으로 판단된다.

감쇠율에 대한 실험결과 및 이론결과는 Fig.11에서 보여주고 있다. 실험결과에서 두 경우에서 감쇠factor는 진동속도가 약 50rad/s이상에서는 거의 일정하며 시제품은 0.95정도이고 Geislinger사의 경우는 1.05정도로 시제품이 약 0.1정도 작게됨을 보여주고 있다. 진동속도가 50rad/s이하에서는 진동속도와 함께 감쇠율이 증가한다. 이론결과는 진동속도가 증가함에 따라 감쇠율이 증가하다가 어느 진동수 이상이 되면 다시 감소하고 있으며, 실험결과와는 저속도 부근에서는 어느정도 일치하는 경향을 보이고 있지만 진동속도가 높을수록 이론결과가 보다 낮게 된다.

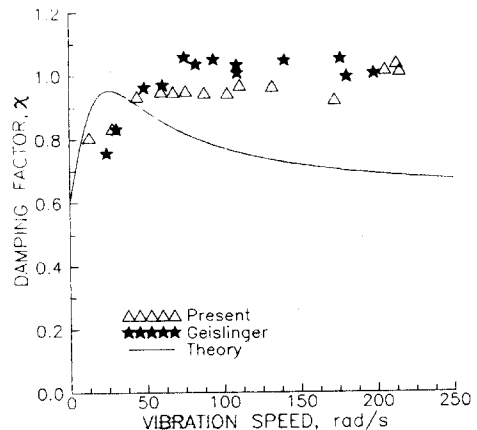


Fig.11. Experimental Results of Damping Factor

4. 결 론 후 기

유체감쇠 커플링의 동적 특성계수를 구하기 위한 실험을 Geislinger사의 제품과 국산 시제품에 대하여 실시 하였으며, 본 이론결과와도 비교하였다. 커플링의 동적강성계수 및 감쇠계수는 국산 시제품이 Geislinger사 제품보다 약간 크게 나타났으며, 그 차이는 정적강성계수 및 동적강성계수를 포함한 전체적인 강성계수는 시제품이 Geislinger사 제품에 비하여 약 30% 큰 것으로 나타났다. 실험적으로 확인된 강성계수는 진동속도가 50rad/s이상에서는 진동속도와 함께 낮은 비율로 증가하며 이론결과와도 비교적 잘 일치한다. 그러나 진동속도가 50rad/s이하에서는 실험결과가 이론결과에 비하여 매우 크게 나타나며 정적강성계수와 비교하여도 상당히 크게 된다. 그러므로 마찰감쇠가 큰 경우에는 강성계수를 구하는 새로운 방법을 구현할 필요가 있음을 알 수 있다. 그리고 감쇠계수는 두 경우가 서로 유사하지만 시제품쪽이 약간 더 크다. 또한 이론결과와의 비교에서는 매우 잘 일치하는 함을 알 수 있었으며, 이는 실험적으로 구하는 감쇠계수가 다른 요소에 비하여 오차를 가장 적게 수반하는 경우이기 때문에 본 연구에서 개발한 이론이 타당함을 입증한다고 볼 수 있다. 감쇠율에서는 국산 시제품이 Geislinger사 제품보다 약간 작게 나타났다. 이론결과와는 진동속도가 큰 경우를 제외하고는 비교적 일치한다.

본 연구는 상공부 공업기반 기술과제 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 관계자 여러분께 사의를 표합니다.

참고문헌

- 1) Dr - Iig. Geislinger & Co., Geislinger Elastic Damping Coupling.
- 2) Tse, F. S., Morse, I. E., and Hinkle, R. T., Mechanical Vibrations - Theory and Applications, 2nd edition, Allyn and Bacon, Boston, 1978.
- 3) Andra, R., and Spuck, J. H., "Torsional Damper for Maximum Energy Absorption with Equilibrated Polydimethylsiloxanes as Damping Fluids," J. of Sound and Vibration, Vol.82, No.4, pp. 465 - 472, 1992.
- 4) Nashif, A. D., Jones, D. I. G., and Henderson, J. P., Vibration Damping, John Willy & Sons, New York, 1985.
- 5) James, M. L., Smith, G. M., Wolford, J. C., and Whaley, P. W., Vibration of Mechanical and Structural Systems, Harper & Row, New York, 1989.