

파형 구름볼 감속기의 접촉점에서의 윤활특성 해석

Lubrication of Contact Area in Ball Reducer with Waved Grooves

장 시 열, 박 경 근, *김 완 두

Siyoul Jang, Kyoung Kuhn Park, Wandoo Kim
School of Mechanical and Automotive Engineering
Kookmin University

* Korea Institute of Materials and Machinery

ABSTRACT

Ball reducer with waved grooves has many advantages over other reducers for the high-reduction ratios, low noise and low energy loss, etc. The mechanism of force transmission is very similar to that of cam and follower in automobile valve train system especially in the contact geometry. In this study, we have investigated the traces of contact between ball and outer race and the working behaviors with a certain reduction ratio. In order to verify the contact behaviors between ball and outer race, which determines the critical endurance life the contact velocity and load are computed for a cycle. During some period of a cycle, the contact velocity reverses its direction very suddenly, which causes undesirable endurance performance of this machinery. From the computational investigation in this work, we hope to predict similar contact damages in other machinery due to this kind of contact behaviors, which is very common in many contact phenomena.

Key Words : elastohydrodynamic lubrication, elliptical contact, reverse sliding

기호설명

A	matrix containing the discrete operator
a	minor radius of elliptical Hertzian contact
b	major radius of elliptical Hertzian contact
E'	reduced modulus of elasticity
h	grid mesh size, film thickness
h^*	dimensionless film thickness (hR_x/a^2)
k	ellipticity ration
L	differential operator
p	pressure
p_H	Hertzian pressure
p^*	dimensionless film pressure (p/p_H)
R	Curvature of contact radius
t	time
η	viscosity
x, y, z	coordinates

1. 서론

파형 구름 볼 감속기는 외륜에서의 파형 주기에 따라 감속비가 결정되는 것으로 기어의 치수에 따라 결정되는 일반적인 감속기보다 동일 체적에서 매우 큰 감속 효과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 일반적인 감속기는 치차의 맞물림으로 인하여 동력 손실과 소음이 크게 발생하며 사용상의 많은 제약을 일으킨다. 이에 반하여 파형 구름 볼 감속기는 사이클로이드 곡선상을 구름 볼이 구름운동으로 작동시키기 때문에 소음과 동력손실이 작다. 또한 치차를 이용한 일반적 감속기는 입력축의 방향과

출력축의 방향에 따른 설치 공간상의 제약을 받기 때문에 실제 적용하기 위해서는 여러 가지 부가적인 장치의 설계들이 필요하다. 그러나 파형 구름볼 감속기는 입력축과 출력축이 일직선 상에 있으므로 설치 공간의 효율적 이용을 할 수 있다.

본 연구에서는 파형 구름볼 감속기의 내구성에 가장 큰 영향을 미치는 구름볼과 외륜 파형과의 접촉 현상을 분석하여 내구성 증진에 도움을 주고자 한다. 이를 위하여 구름볼과 외륜의 접촉 속도와 감속비에 따른 하중의 크기를 분석하고, 순간적인 역방향 운전등이 유막 두께에 미치는 영향을 분석한다.

2. 파형 구름볼 감속기의 작동원리

본 연구에서 대상으로 하는 감속기의 동작 원리는 다음과 같다.

1) 구름베어링 내륜에 조립된 편심축을 회전시키면 베어링 외륜은 캠 역할을 수행한다.

2) 베어링 외륜에 접촉되어 있는 Follower는 편심축이 회전함에 따라 플랜지의 반경 방향 안내면을 따라 왕복 운동을 한다.

3) Follower 끝에 조립된 볼은 감속기 외륜에 가공된 파형 홈(Waved Groove)을 따라 움직이게 된다.

4) Follower의 상하운동은 감속기 외륜이 고정되어 있을 경우, 기하학적인 구속으로 인하여 플랜지에 회전토크를 전달하게 된다.

5) 입력축이 1회전하면 Follower는 한 주기의 왕복운동을 수행하며 이때 플랜지는 Wave의 한 피치만큼 회전하게 되어 $1/(Wave 수+1)$ 의 감속비(RR)를 얻게 된다.

Figure 1은 고효율 파형 구름볼 동력 전달장치 (HERB Drive : High Efficient wave

Rolling Ball Drive) 동작 원리를 보여주는 그림이다. 본 감속기는 외륜의 볼 홈을 따라 볼이 구름 운동을 함으로서 동력을 전달하게 되어 정속 운전과 고효율이 예상된다.

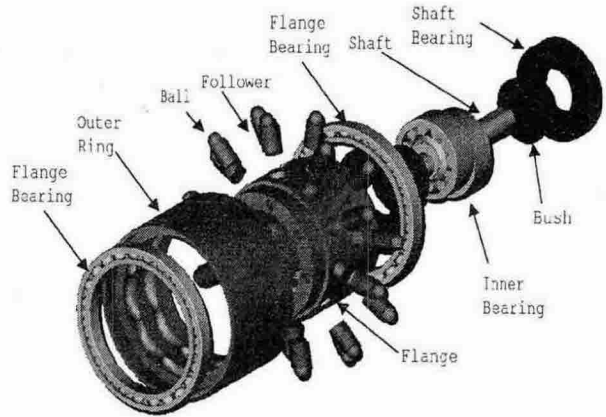


Figure 1 HERB의 구성 부품

볼과 볼홈 사이는 큰 접촉 하중으로 인해 마멸 및 구름 피로 손상이 우려되는 부위로서, 이 부위에서의 접촉응력에 의한 피로수명이 곧 감속기의 내구수명을 좌우하게 된다. 감속기 설계시 가장 중점적으로 고려하여야 할 설계 변수는 최대 접촉 응력이다. 그러므로 여러 가지 설계 치수 변화에 따른 접촉응력을 검토하여야 한다.

본 감속기의 외륜 형상은 안쪽에 볼이 구름 운동할 수 있는 홈이 있으며, follower 끝에 조립되는 볼이 이 홈을 따라 운전하는데, 사이클로이드 곡선상을 볼이 구름 운동을 하며 이로부터 운동 궤적을 계산할 수 있다. 볼 중심점의 궤적 $T_c(\theta)$ 는 편심축의 편심량 (e), 편심 베어링 반경 (R) 및 편심 베어링의 외경에서 볼 중심까지의 거리 (h)의 함수로 결정되며, 반경 r 인 볼이 (x, y) 궤적을 따라 움직이면서 만들어지는 볼 홈의 궤적 (X, Y)는 Figure 2의 기하학적 관계로부터 계산할 수 있다. 또한 볼 홈의 파형은 파형의 개수 만큼 반복 된다.

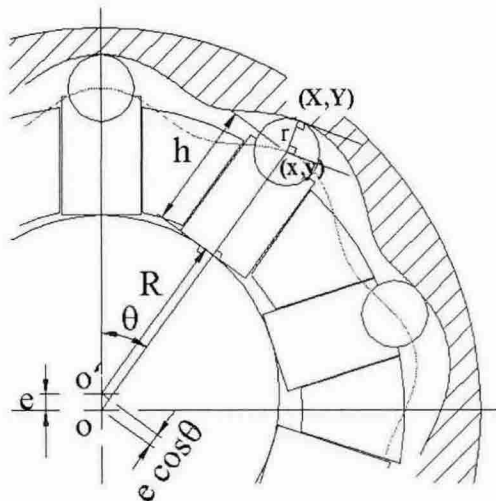


Figure 2 HERB Drive 의 과형 곡선

$$T_c = [e \cdot \cos(N_w \theta) + R + h] \quad (1)$$

$$x(\theta) = [e \cdot \cos(N_w \theta) + R + h] \sin \theta \quad (2)$$

$$y(\theta) = [e \cdot \cos(N_w \theta) + R + h] \cos \theta \quad (3)$$

$$\frac{(Y-y)}{(X-x)} = -\frac{dx}{dy} = -\frac{1}{k} \quad (4)$$

$$(X-x)^2 + (Y-y)^2 = r^2 \quad (5)$$

식(4) 와 (5)로부터 (X, Y)의 좌표를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$X = x - \frac{rk}{\sqrt{1+k^2}}, \quad Y = y + \frac{r}{\sqrt{1+k^2}} \quad (6)$$

여기서

$$k = -\frac{T_c \sin \theta + e N_w \sin(N_w \theta) \cos \theta}{T_c \cos \theta - e N_w \sin(N_w \theta) \sin \theta} \quad (7)$$

이다.

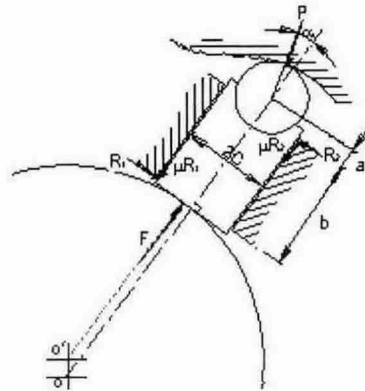


Figure 3 HERB Drive 의 하중 분포

HERB Drive 의 동력전달 기구는 편심 원형 Cam - Flat Faced Follower 의 작동 원리와 매우 비슷하다. Figure 3 은 각 구성 부품 요소에서 작용 하중들을 보여주며, 각 변수에 대한 설명은 다음과 같다.

- P : 볼과 볼홈의 접촉하중,
- R_1, R_2 : 플랜지에서의 반력,
- F : 편심베어링의 반력,
- μ : follower 와 플랜지 사이의 마찰계수
- α : 볼과 볼홈의 접촉각 (압력각),
- a : 플랜지 외경에서 볼 중심까지 거리,
- b : 플랜지의 두께,
- c : Follower 의 반경

볼과 볼홈 사이의 상대운동은 순수한 구름접촉으로 가정하며, 편심 베어링과 Follower 사이에도 마찰이 없다고 가정하여 다음식들을 유도한다.

$$R_1 = \frac{a}{b} P_i \sin \alpha \quad (8)$$

$$R_2 = \frac{a+b}{b} P_i \sin \alpha \quad (9)$$

$$F_i = P_i \left[\cos \alpha - \mu \left(\frac{2a+b}{b} \right) \sin \alpha \right] \quad (10)$$

접촉하중 값으로 환산하면

$$P_i = \frac{F_i}{\cos \alpha - \mu \left(\frac{2a+b}{b} \right) \sin \alpha} \quad (11)$$

가 된다.

3. 외륜과 구름볼과의 윤활현상

미끄럼운동과 구름운동하는 두 곡면의 접촉에서 틈새내의 유체거동에 대한 서술은 다음의 레이놀즈 방정식으로 설명할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) - u \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

접촉하여 상대 운동하는 접촉 속도는 변화하는데, 이러한 영향으로 윤활유막 두께와 윤활유막 압력이 다르게 나타난다. 이것은 식(12)의 네 번째 항으로 설명할 수 있다. 이러한 경우 시간에 따라 다르게 나타나는 유막 두께의 변화로 일정한 속도만을 고려한 정상 상태의 경우와 전혀 다른 계산 결과를 보여준다. 특히 접촉 속도의 순간적인 역방향 진행에 의한 유막 두께 및 유막 압력의 영향은 윤활유막 형성에 장애요소로 작용하는데, 이것은 식(12)의 네 번째 항이 시간의 함수로 나타나는 결과이다.

접촉 부분에서의 유막 압력에 의한 접촉 표면의 탄성 변형은 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$h(x, y) = h_0(t) + \frac{x^2}{2R_x} + \frac{y^2}{2R_y} + \frac{2}{\pi E'} \iint_x \frac{p(x', y') dx' dy'}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} \quad (13)$$

유막 압력과 작용 하중과의 평형 방정식은 다음과 같다.

$$\iint_{-\infty}^{\infty} p^*(x^*, y^*) dx^* dy^* - \frac{2\pi k}{3} = 0 \quad (14)$$

유막 압력과 이때 수렴된 유막 크기를 구하기 위하여 수렴의 안정성이 뛰어난 Jacobi 분배 이완법 (Jacobi distributive relaxation)의 적용으로 수렴해를 구할 수 있다.

4. 결 과

유막 압력과 유막 두께의 크기를 계산하기 위하여 작용 하중과 접촉 속도의 크기를 규명해야 한다. 구름 볼과 외륜사이에서의 접촉점의 궤적은 식(6)으로 계산할 수 있으며, 여기에 회전속도의 크기를 고려하여 접촉 속도를 계산한다.

감속비가 30 인 경우 구름 볼과 감속기의 외륜의 접촉 경로를 살펴 보면 Figure 4, 5 과 같다.

구름 볼의 직경은 7.144mm, 평균적으로 볼 홈의 구름 방향 반지름은 3.643mm, 구름 방향의 직각 방향은 12.52mm, 회전속도는 1000rpm 이다. 볼과 외륜의 재질은 $E=208GPa$, $\nu=0.3$ 이다.

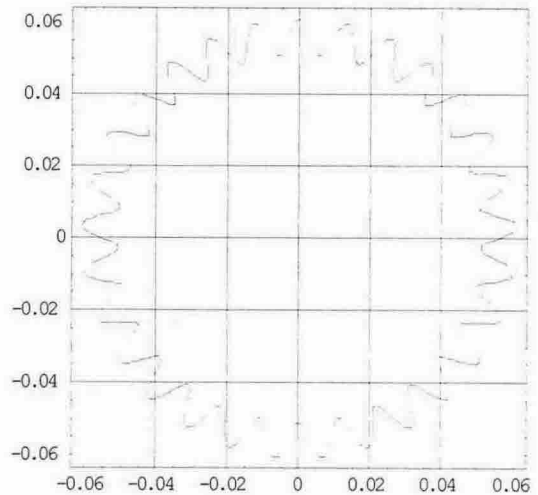


Figure 4 Traces of center of rolling ball during 30 revolutions of input [m]

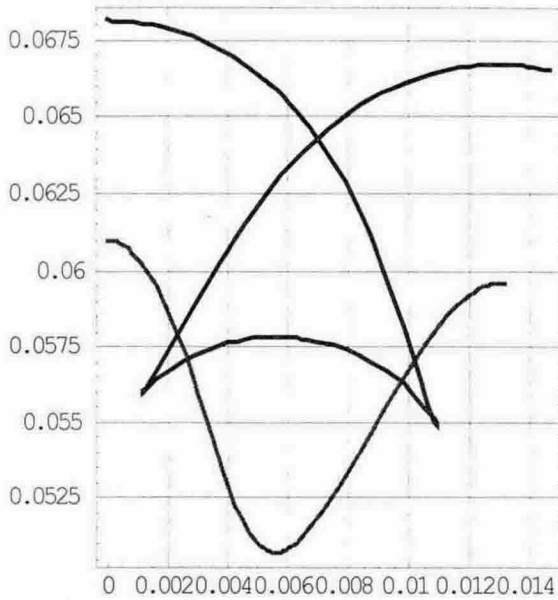


Figure 5 Traces of center of rolling ball and corresponding contacting point at the outer race during one cycle of input [m]

회전속도가 1000rpm 일 때 구름 볼과 외륜 사이의 접촉점에서의 접촉 속도는 Figure 6 과 같으며 이것은 입력축 이 일 회전할 때의 속도 크기를 polar coordinate 으로 표현한 것이다.

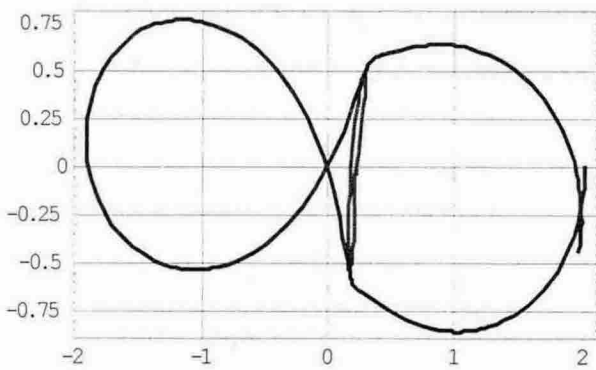


Figure 6 Velocities at the contact points between ball and outer during one revolution of input axis [m/s]

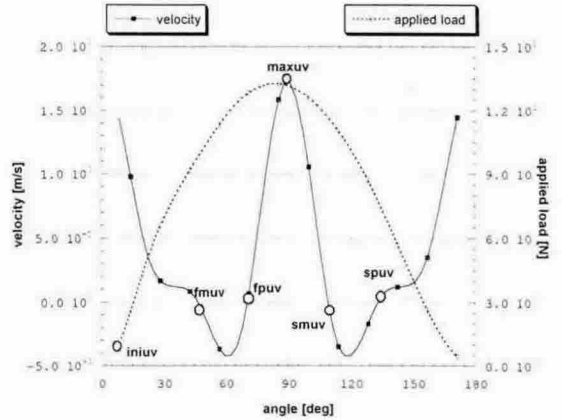


Figure 7 Applied forces and contact velocities during a cycle [2ms]

접촉점에서의 구름 볼 속도와 외륜의 접촉점의 상대 속도는 Figure 7 과 같이 계산할 수 있는데, 이때 순수한 구름 운동만 존재한다고 가정한다. 그리고 접촉하중은 회전 모멘트의 크기 변화에 따라 계산할 수 있다.

접촉점에서의 운동 방향이 변화되는 지점에서의 유막 두께를 살펴 보면 Figure 8 과 같이 나타난다.

입력 축의 회전에 따른 접촉 점에서의 유막 두께 변화는 Figure 9-14 에 표시되어 있다.

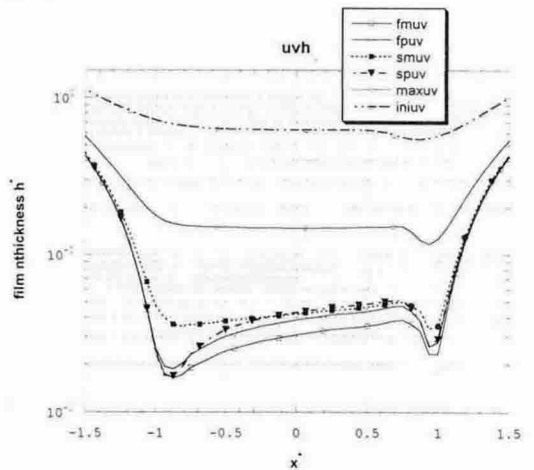


Figure 8 Applied forces and contact velocities during a cycle [$h^* = hR/b^2$]

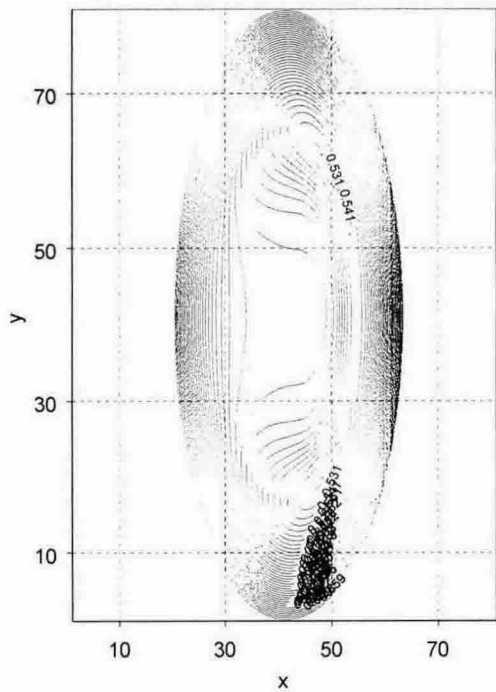


Figure 9 Fluid film pressure at point iniuv at Figure 7

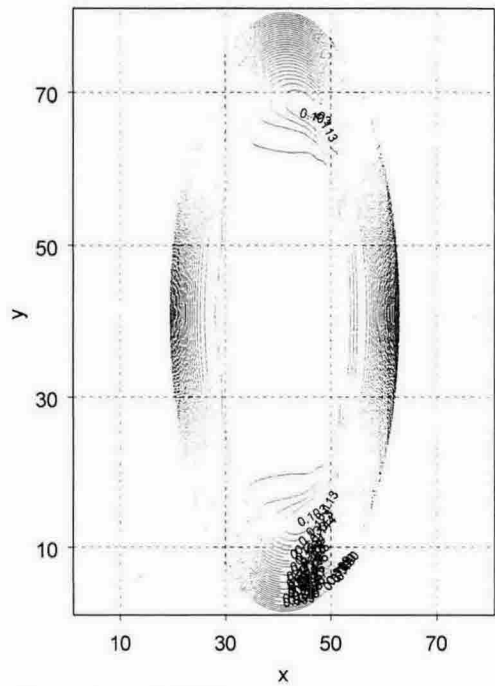


Figure 11 Fluid film pressure at point fpuv at Figure 7

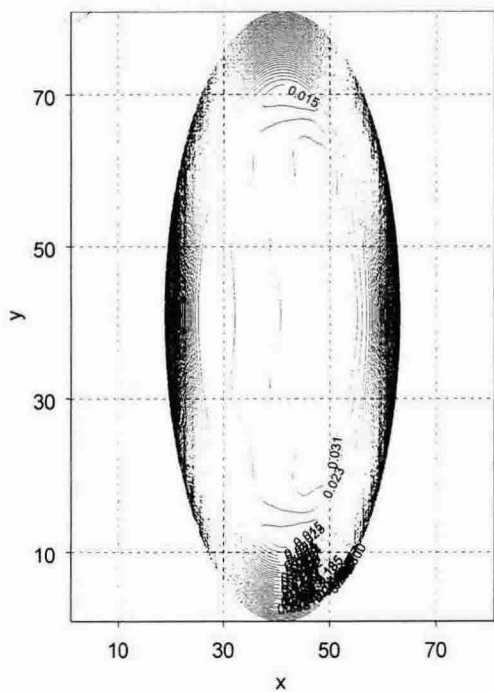


Figure 10 Fluid film pressure at point fmuv at Figure 7

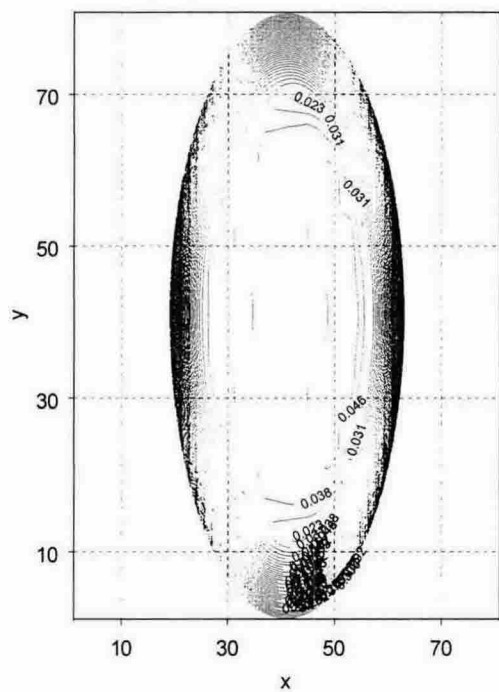


Figure 12 Fluid film pressure at point maxuv at Figure 7

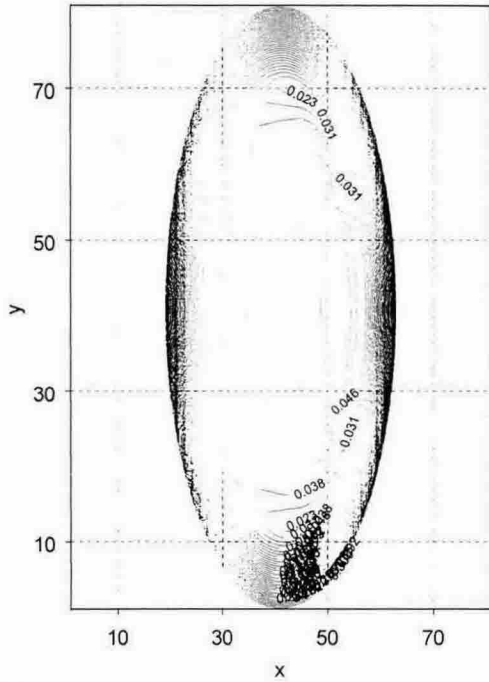


Figure 13 Fluid film pressure at point smuv at Figure 7

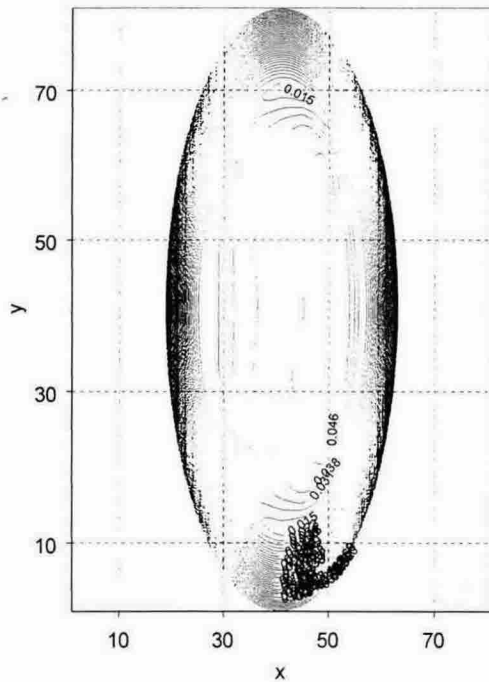


Figure 14 Fluid film pressure at point spu at Figure 7

5. 결론

과형 구름 볼 감속기의 작동 원리는 캠과 롤러 타펫의 접촉의 경우와 매우 유사하다. 그러나 접촉점 부근에서 접촉 방향이 순간적으로 바뀌는 현상이 나타나는데, 본 연구에서는 이러한 가혹한 조건에서도 유막 두께를 알아 예측할 수 있는 계산 조직을 개발하였다.

후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-1-30400-005-3)지원으로 수행되었음

참고문헌

- (1) Jolkin, A., Larsson, R. and Ehret, P., "Elastohydrodynamic Lubrication During Sudden Reversal of the Rolling Direction," ITC 2000, Nagasaki, p579-583
- (2) Ehret, P., Dowson, D., Taylor, C. M. and Wang, D., "Analysis of Isothermal Elastohydrodynamic Point Contact Lubricated by Newtonian Fluids using Multigrid Methods," Journal of Engineering Tribology, Vol. 211, pp493-508, 2000