



병진운동용 롤러 종동절을 갖는 원반캠의 스커핑 위험도 평가

서명원^a, 김민채^a, 권순만^{b,*}

Scuffing Risk Evaluation for Disk Cams with a Translating Roller Follower

Myeong-won Seo^a, Min-chae Kim^a, Soon-man Kwon^{b,*}^a Department of Mechanical Design & Manufacturing Engineering, Graduate School, Changwon National University^b School of Mechanical Engineering, Changwon National University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	31	July	2025
Revised	26	August	2025
Accepted	26	August	2025

Keywords:

Disk cam
Translating roller follower
Scuffing risk
Flash temperature
Contact temperature

ABSTRACT

A cam is a mechanical element that converts rotational or reciprocating input into complex follower motion, including nonlinear and intermittent profiles. In high-speed, high-precision systems, poor cam design can cause dynamic issues such as vibration, noise, and heat, leading to cam-follower separation, motion disruption, and scuffing. Scuffing results from lubricant film breakdown under extreme load or poor lubrication, causing direct surface contact, rapid temperature rise, and local damage such as scratching or welding. Using the flash temperature method, we investigated how cam profile design parameters—including cam rotating speed, percent sliding, oil supply temperature, surface roughness, and thermal contact coefficient—influence scuffing probability in a disk cam with a translating roller follower (TRF). The findings confirm that the scuffing risk for a TRF disk cam can be reduced when the running speed, percent sliding, oil sump temperature, and surface roughness are decreased and when the thermal contact coefficient is high.

1. 서론

캠(cam)은 회전 또는 왕복 운동을 하는 구동체를 종동절(follower)이라는 부품에 원하는 운동(주로 직선, 회전, 또는 복합 운동)을 전달하는 기계요소로서, 일정한 회전운동을 통해 비선형적·간헐적 출력운동을 구현할 수 있다. 또한, 캠-종동절의 조합만으로도 추가적인 센서나 제어 시스템 없이 정확한 타이밍에 정밀한 운동제어가 가능하여 소형화, 유지보수 등의 장점이 있다.

최근 이러한 장점을 갖는 캠 기구의 응용이 고속화됨에 따라 스커핑(scuffing)과 같은 표면 손상 현상에 관한 연구가 필수적이나, 형상설계를 포함한 캠 설계의 난이성에 기인하여 관련 연구가 부

족한 실정이다. 스커핑은 캠과 종동절이 접촉할 때 발생하는 순간적인 마찰열로 인한 접촉온도(contact temperature, θ_B)가 윤활 오일의 스커핑온도(scuffing temperature, θ_s)보다 높아져 캠과 종동절 사이의 직접적인 접촉이 발생하고, 이에 의해 진행된 극심한 마모현상이다^[1].

관련된 연구로 Qu 등^[2]은 캠-롤러 종동절(roller follower)의 탄성유체윤활(elastohydraulic lubrication) 모델 구축을 통한 수명 예측을 수행하였고, Bell과 Willemse^[3]는 자동차용 캠-종동절 접촉의 스커핑 파손을 조사한 바 있다. 또 Wang 등^[4]은 캠, 기어, 롤러 베어링 등에서의 반타원형 접촉에 대해 점접촉 혼합윤활(mixed lubrication) 모델 개발을 통하여 스커핑 발생 가능성을

* Corresponding author. Tel.: +82-55-213-3269

E-mail address: smkwon@changwon.ac.kr (Soon-man Kwon).

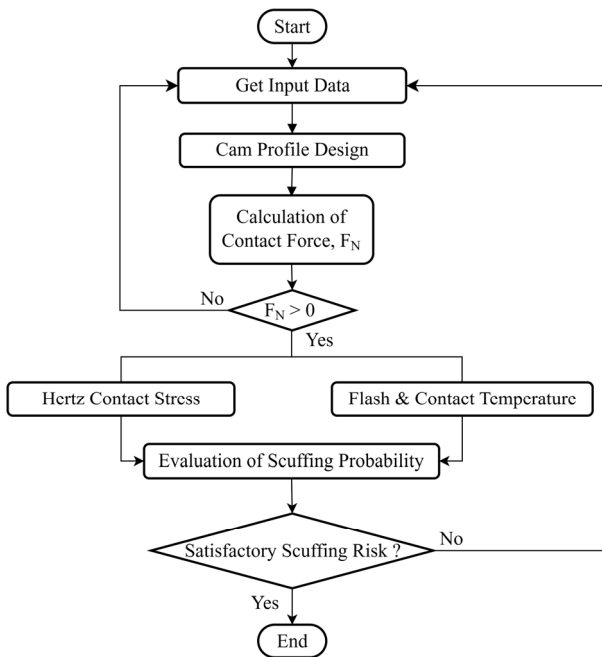


Fig. 1 Flowchart for evaluating scuffing risk

평가하였다. 그리고 Ramprasad와 Mayuram^[5]은 표면처리된 AISI 4340강의 스커핑 저항성 평가를 위해 한계하중 및 하중-속도 관계의 평가, 열-기계적 마모 모델을 통한 성능지수를 산출한 바 있다. 하지만 이상의 연구들은 캠-종동절에서의 스커핑 발생에 대한 직접적, 확률론적 접근이기보다는 간접적, 보충적, 결정론적 접근 연구에 머물러 있다.

이에 본 논문에서는 병진운동용 롤러 종동절(translating roller follower, 이하 TRF)를 갖는 원반캠(disk cam)에서의 스커핑 위험도(scuffing risk) 평가를 위해 AGMA 925-A03^[6]에서 제시하는 순간온도법(flash temperature method)을 이용하여 캠 회전속도(running speed), 미끄럼률(% sliding), 표면거칠기(surface roughness), 오일유입온도(oil sump temperature), 열접촉계수(thermal contact coefficient) 등이 스커핑 확률에 미치는 영향을 검토하였다. 또 Fig. 1의 순서도와 같은 절차에 의해 스커핑 위험도를 상, 중, 하로 구분하여 설계자가 직관적으로 스커핑 파손 정도를 판단할 수 있도록 제시하였다. 이를 통해 TRF 원반캠의 강도설계 분야에 일조하고자 한다.

2. 면압강도 설계

2.1 TRF 캠 형상설계

접촉 3절 기구의 일종인 TRF 원반캠이 회전중심(I_{12})을 기준으로 ω 의 각속도로 회전(Fig. 2 참조)할 때, 캠 형상은 S_f -좌표계에서의 접촉점($^f C$)을 S_m -좌표계에서의 접촉점($^m C$)으로 동차좌

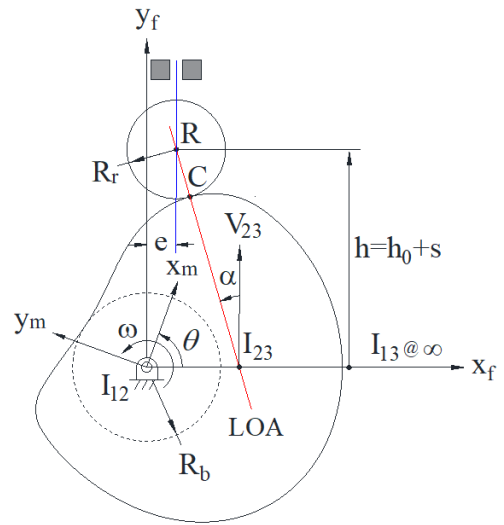


Fig. 2 Schematic diagram for a TRF disk cam

표변환하여 결정^[7-9]할 수 있다. 즉,

$${}^m C = M_{m,f} {}^f C \quad (1)$$

여기서 S_f -좌표계에서의 접촉점($^f C$)은 다음과 같다.

$${}^f C = \begin{bmatrix} e + R_r \sin \alpha \\ h - R_r \cos \alpha \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

그리고 $M_{m,f}$ 는 S_f -좌표계에서 S_m -좌표계로의 동차좌표 변환 행렬을 나타내고, α 는 가변 피치점(I_{23})에서의 선속도(V_{23})와 작용선(line of action, LOA) 사이의 예각인 압력각(pressure angle)이며 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\alpha = \angle (V_{23}, LOA) = \tan^{-1} \left(\frac{v - e}{h} \right) \quad (3)$$

이때 v 는 캠 변위선도(displacement diagram)의 유사속도(pseudo-velocity) $ds/d\theta$ 를 의미한다.

2.2 접촉력

캠 접촉력(F_N)은 종동절의 변위(s), 속도($v = ds/d\theta$), 가속도($a = d^2s/d\theta^2$)를 고려하여 Fig. 3과 같이 1 자유도 집중매개변수 시스템을 구성^[7,10-13]함으로써 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$F_N = [m_{eff}(aw^2 + 2\zeta\omega_n v\omega + \omega_n^2 s) + F_{pl}] / \cos \alpha \quad (4)$$

여기서 $\omega_n = \sqrt{k/m_{eff}}$ 이다.

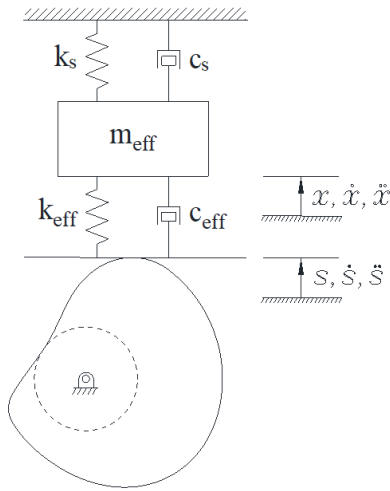


Fig. 3 1-DOF lumped parameter model

이때 종동절의 등가질량(m_{eff})은 캠을 제외한 종동절 시스템의 모든 구성요소의 질량으로서 레버 비(lever ratio) 관계 및 3D CAD 프로그램의 모델링을 통해 쉽게 산출해 낼 수 있고, 감쇠비 ζ 는 에너지보존법칙을 이용하여 결정할 수 있다. 또 등가 스프링 상수 $k(1/k = 1/k_s + 1/k_{eff})$ 는 주어진 캠-종동절의 각 링크에 대한 모든 강성을 구하여 결정할 수 있다. 그리고 F_{pl} 은 종동절 점프(follower jump)^[12, 14] 현상을 회피하기 위해 반드시 고려해야 하는 예력(preload)을 나타낸다.

2.3 접촉응력

주어진 재료물성, 곡률반경(ρ), 그리고 식 (4)를 통해 얻어진 캠 접촉력(F_N)을 이용하여 Hertz 접촉응력은 다음과 같이 결정^[12, 15]할 수 있다.

$$\sigma_c = C_p \sqrt{K^*} \quad (5)$$

여기서 C_p 는 AGMA 탄성정수(AGMA elastic coefficient)^[15]이고, K^* 는 보정 하중응력계수(corrected load-stress factor)^[12, 15]로 다음과 같다.

$$K^* = \frac{K_D F_N}{R^* b} \quad (6)$$

이때 K_D 는 하중 및 사용환경을 고려한 보정계수, b 는 캠 두께를 나타내며, R^* 는 롤러 종동절과 캠 접촉점에서의 등가곡률반경(equivalent radius of curvature)으로 다음과 같다.

$$R^* = \left(\frac{1}{\rho} + \frac{1}{R_r} \right)^{-1} \quad (7)$$

위 식에서 TRF 원반캠 형상의 곡률반경(ρ)은 매개변수 곡률 식을 이용하여 다음과 같이 결정^[7, 12]할 수 있다.

$$\rho = \frac{[(v-e)^2 + h^2]^{3/2}}{(2v-e)(v-e) - h(a-h)} - R_r \quad (8)$$

3. 스커핑 위험도

3.1 순간온도

순간온도(flash temperature, θ_{fl}) 개념은 1937년 Blok^[16]에 의해 처음으로 제안되었고, 현재는 실험적 결과를 기반으로 하여 마찰계수, 표면조도 등을 고려할 수 있도록 발전된 형태를 갖추고 있다. 이 중 AGMA 925-A03^[6]에서 제시하는 순간온도 결정 식은 다음과 같다.

$$\theta_{fl} = K \mu_m \frac{f_n}{\sqrt{b_H}} \frac{|V_s|}{B_{M2} \sqrt{V_{2t}} + B_{M3} \sqrt{V_{3t}}} \quad (9)$$

여기서 K 는 비례상수로서 반타원형 Hertz 응력분포를 고려할 때 0.8을 적용한다. 또한, μ_m 은 표면조도를 고려한 평균마찰계수, f_n 은 보정계수(K_D)를 고려한 단위 두께당 접촉력이며, b_H 는 접촉패치의 절반 폭, V_{2t} 및 V_{3t} 는 원반캠과 롤러 종동절의 공통접선방향 속도성분, V_s 는 미끄럼속도(sliding velocity), B_{M2} 및 B_{M3} 는 캠과 종동절의 열접촉계수(thermal contact coefficient)로서 열전도계수(heat conductivity) λ_M , 밀도(density) ρ_M , 비열(specific heat) c_M 을 고려하여 결정할 수 있다. 각 변수들은 다음과 같다.

$$\mu_m = 0.06 \left(\frac{1.13}{1.13 - R_{avg}} \right) \quad (10)$$

$$f_n = K_D f = \frac{K_D F_N}{b} \quad (11)$$

$$b_H = \sqrt{\frac{8 f_n R^*}{\pi E_r}} \quad (12)$$

$$V_{2t} = [(m - R_r) - v \sin \alpha] \omega \quad (13)$$

$$V_{3t} = (\beta R_r - v \sin \alpha) \omega \quad (14)$$

$$V_s = V_{2t} - V_{3t} = [m - (1 + \beta)R_r] \omega \quad (15)$$

$$B_M = \sqrt{\lambda_M \rho_M c_M} \quad (16)$$

이때 식 (10)의 R_{avg} 는 평균표면거칠기(average arithmetic roughness)이고, 식 (12)에서 E_r 은 접촉하는 캠과 종동절의 탄성 계수(E)와 푸아송 비(ν)를 고려한 등가접촉탄성계수(reduced elastic modulus)로서 다음과 같다.

$$E_r = 2 \left(\frac{1 - \nu_2^2}{E_2} + \frac{1 - \nu_3^2}{E_3} \right)^{-1} = 2\pi C_p^2 \quad (17)$$

또 식 (13)~(15)에서 기술된 m 및 β 는 다음과 같다.

$$m = \overline{I_{23}R} = \sqrt{h^2 + (v - e)^2} \quad (18)$$

$$\beta = (1 - \sigma)\beta_0 = (1 - \sigma) \frac{l_t}{2\pi R_r} \quad (19)$$

여기서 σ 는 구름접촉길이(l_r) 대비 미끄럼접촉길이(l_s)의 비율로 정의되는 미끄럼률(l_s/l_r , % sliding)이고, l_t 는 원반캠 둘레 길이(perimeter)로 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$l_t = \sum \sqrt{({}^m x_{i+1} - {}^m x_i)^2 + ({}^m y_{i+1} - {}^m y_i)^2} \quad (20)$$

3.2 스커핑 위험도

식 (9)를 통해 순간온도(θ_{fl})가 결정되면, 캠 접촉표면에서의 접촉온도(contact temperature, θ_B) 및 최대접촉온도($\theta_{B,max}$)는 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\theta_B = \theta_M + \theta_{fl} \quad (21)$$

$$\theta_{B,max} = \theta_M + \theta_{fl,max} \quad (22)$$

여기서

$$\theta_M = k_{sump} \theta_{oil} + 0.56 \theta_{fl,max} \quad (23)$$

이때 k_{sump} 는 비말식(splash) 윤활일 때는 1.0, 분무식(spray type) 윤활일 때는 1.2의 값을 적용하며, θ_{oil} 는 오일이 틈새로 유입될 때의 온도, $\theta_{fl,max}$ 는 최대순간온도(maximum flash temperature)이다.

일반적으로 최대접촉온도($\theta_{B,max}$)가 평균 스커핑온도(θ_s)보다 커지면 스커핑 파손이라고 판정하고 있으나, AGMA 925-A03^[6]

에서는 최대접촉온도($\theta_{B,max}$)를 확률변수(x)로 하는 정규분포 $N(\mu_x, \sigma_x^2)$ 를 고려하여 스커핑 확률을 산출할 것을 제안하고 있다. 즉 스커핑 확률 $\Phi(z)$ 를 30% 초과, 10~30%, 10% 미만으로 구분하고 이를 기준으로 스커핑 위험도(scuffing risk)를 상(high), 중(moderate), 하(low)로 평가^[17]하고 있다. 이때 표준정규분포 확률변수 z 는 다음과 같다.

$$z = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} = \frac{\theta_{B,max} - \theta_s}{0.15\theta_s} \quad (24)$$

여기서 정규분포 평균 μ_x 에 해당하는 평균 스커핑 온도(mean scuffing temperature, θ_s)는 캠 오일의 40°C 동점도(kinematic viscosity, ν_{40})를 고려하여 일반 광유(mineral oil) 및 스커핑 방지 광유(anti-scuff mineral oil)에 대해 다음과 같이 결정^[18]하고 있다.

$$\theta_s = 63 + 33 \ln \nu_{40} \quad (25)$$

$$\theta_s = 118 + 33 \ln \nu_{40} \quad (26)$$

4. 고찰

4.1 접촉응력

TRF 원반캠의 스커핑 위험도 검토를 위해 본 논문에서 고려한 종동절 운동에 대한 변위선도는 Table 1과 같고, 캠을 설계하고 해석하기 위한 변수는 Table 2와 같다. 캠 소재는 고주파 열처리된 중탄소 망간강(AISI 1340)이며, 롤러 종동절 소재는 베어링 제작의 주 소재로 사용되는 AISI 52100 고탄소 크롬 합금 공구강을 적용하였다.

Fig. 4는 Tables 1, 2의 변위선도 및 형상제원에 따라 설계한 TRF 원반캠 형상($\theta = 45^\circ$)의 일례이며, 회전방향은 반시계 방향(CCW), 롤러 종동절의 위치(position)는 캠의 중심보다 위쪽

Table 1 Follower motion

Segment	Cam angle interval	Rise(+) or Fall(-)	Type of motion
1	0° ~ 50°	+25.4(mm)	Mod. Sine
2	50° ~ 90°	0	Dwell
3	90° ~ 140°	-25.4(mm)	Cycloid
4	140° ~ 180°	0	Dwell
5	180° ~ 230°	+25.4(mm)	3-4-5 poly
6	230° ~ 270°	0	Dwell
7	270° ~ 320°	-25.4(mm)	4-5-6-7 poly
8	320° ~ 360°	0	Dwell

Table 2 Cam design and analysis parameters

Materials	Disk cam	AISI 1340
	Roller follower	AISI 52100
Base circle radius (R_b)	76.2 mm	
Roller follower radius (R_r)	25.4 mm	
Eccentricity (e)	0.0 mm	
Orientation of cam rotation	CCW	
Follower position	Upward	
Follower effective mass (m_{eff})	12.915 kg	
Damping ratio (ζ)	0.1	
Spring constant (k_s)	35.02 N/mm	
Thickness (b)	10.0 mm	
Correction factor (K_D)	1.3	
AGMA elastic coefficient (C_p)	187.5 MPa ^{0.5}	
Preload (F_{pl})	7598 N	
Camshaft rotating speed (ω)	450 rpm	
Average arithmetic roughness (R_{avg})	0.4 μ m	
Oil inlet or sump temperature (θ_{oil})	40 $^{\circ}$ C	
% sliding (σ)	9 %	

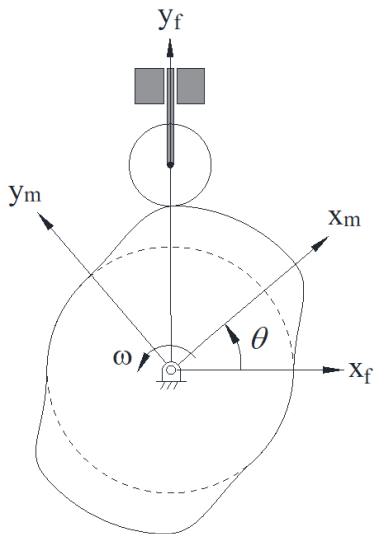


Fig. 4 TRF disk cam profile at = 45°

(upward)으로 설정하여 설계하였다.

Figs. 5~8에서, 고속용 캠 형상설계 시 반드시 준수하여야 하는 캠-종동질 운동과 관련된 변위(s), 속도(v), 가속도(a) 함수가 모든 구간에서 연속(continuous)임과 최대, 최소 압력각(α)은 25.6°, -29.2°로 $\pm 30^{\circ}$ 이내임을 확인할 수 있다. 또 식 (3)에서 알 수 있듯이 압력각(α)은 속도(v) 선도에 지배적인 영향을 받음을 확인할 수 있다. 그리고 캠의 회전에 따른 등가곡률(equivalent curvature, $1/R^*$)의 변화를 Fig. 9에 도시하였고, Fig. 7의 가속

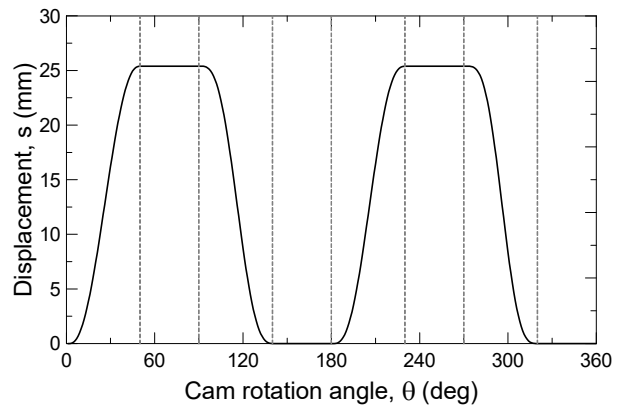


Fig. 5 Displacement diagram

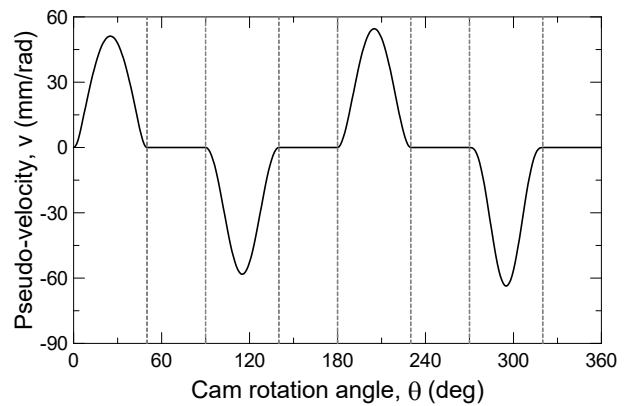


Fig. 6 Pseudo-velocity

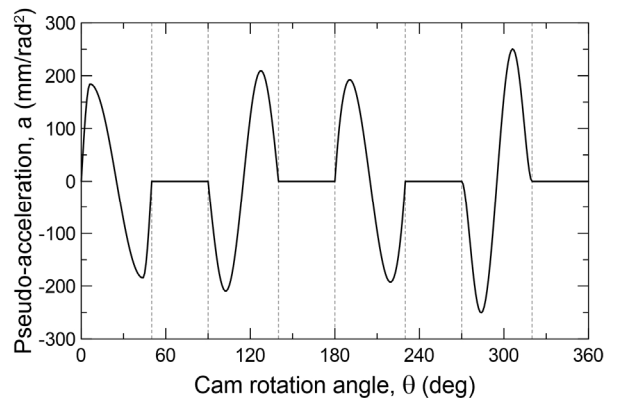


Fig. 7 Pseudo-acceleration

도(a) 변화와 음의 상관관계가 있음을 확인하였다. 이는 식 (8)에서 알 수 있듯이 가속도(a)가 증가하면 원반캠의 곡률반경(ρ) 또한 증가함에 기인한다.

캠 회전속도(ω)에 따른 식 (4)의 접촉력(F_N)을 Fig. 10에 도시하였고, 캠 회전속도(ω)가 증가하면 캠 접촉력(F_N)도 증가함을 확인할 수 있다. 또 캠 회전속도(ω)에 따른 적절할 예력(F_{pl})의 선정을 통하여 구간 7에서 볼 수 있듯이 1,000 N의 최소접촉력($F_{N, min}$)을 확보하였으며 이를 통해 캠-종동질 분리(cam-follower

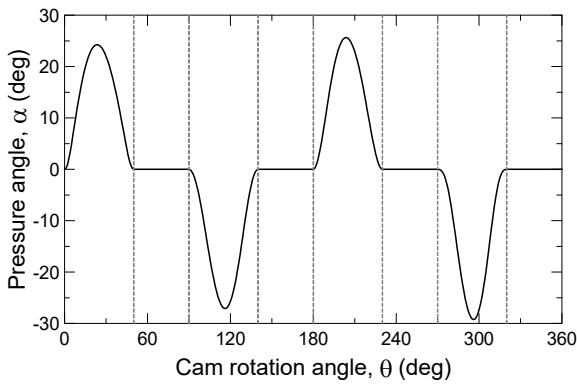


Fig. 8 Pressure angle

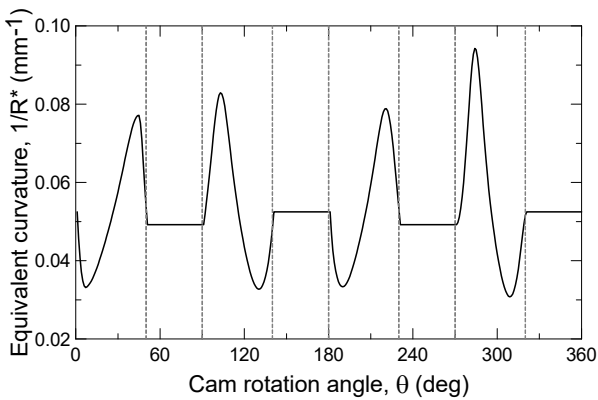


Fig. 9 Equivalent curvature

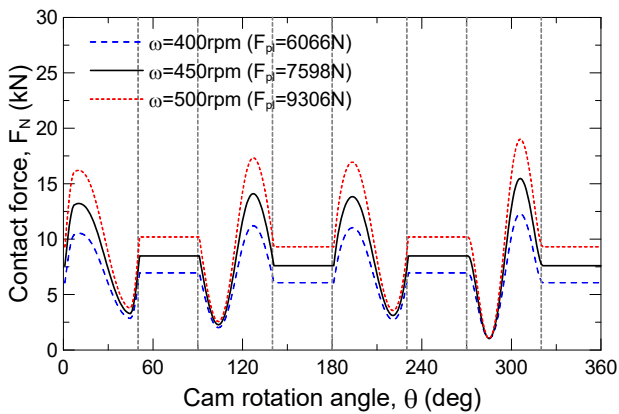


Fig. 10 Contact force with the variation of ω

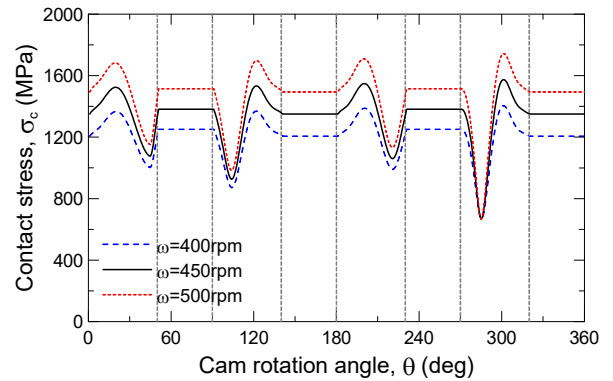


Fig. 11 Contact stress with the variation of ω

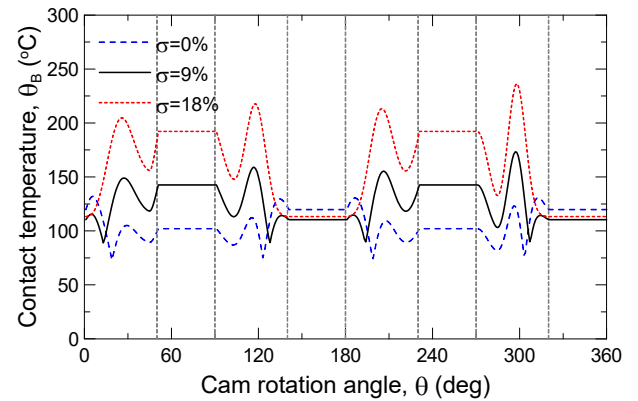


Fig. 12 Contact temperature with the variation of σ

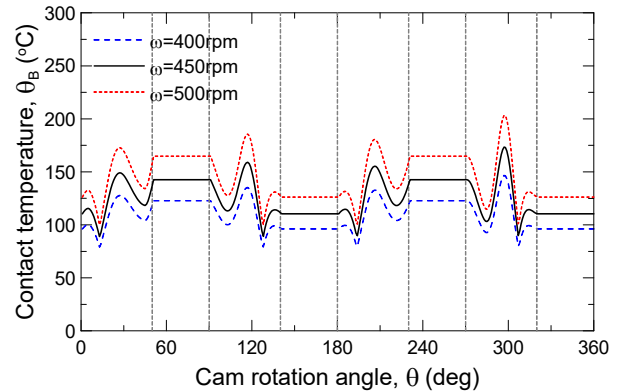


Fig. 13 Contact temperature with the variation of ω

separation)^[12,14] 현상을 회피하였다. 그리고 캠 접촉력(F_N)은 Fig. 7의 가속도(a) 곡선의 변화에 지배적 영향을 받음을 확인할 수 있다.

캠 표면에서의 마모 및 피팅수명(pitting life) 평가를 위한 캠 회전속도(ω)에 따른 접촉응력(σ_c)의 변화를 Fig. 11에 도시하였다. 일반적으로 등가곡률($1/R^*$)이 커질수록 접촉응력(σ_c) 또한 증가한다. 하지만 본 연구의 TRF 캠의 경우 등가곡률($1/R^*$)이 커질수록 가속도(a) 곡선과 음의 상관관계를 갖기에 오히려 접촉

응력(σ_c)이 감소함을 주목할 필요가 있다.

따라서 가속도(a) 곡선의 여하한 선택에 따라 접촉력(F_N) 및 등가곡률($1/R^*$)이 좌우되므로 이를 통해 캠 표면에서의 마모 또는 피팅 수명을 좌우하는 접촉응력(σ_c)을 저감시킬 수 있음을 확인하였다.

4.2 접촉온도

식 (21)을 기반으로 계산된 접촉온도(θ_B)의 변화를 Figs. 12~

Table 3 Thermal contact coefficients

Description	Unit	Values			
		cam			roller
Material	-	AISI 1020	AISI 1340	AISI 4340	AISI 52100
Thermal conductivity, λ_M	W/m·K	51.9	→	44.5	46.6
Specific heat, c_M	J/g·K	0.486	0.472	0.475	→
Density, ρ_M	g/cm ³	7.87	→	7.85	7.81
Thermal contact coefficient, B_M	N/mm·s ^{0.5} ·K	14.089	13.885	12.881	13.148

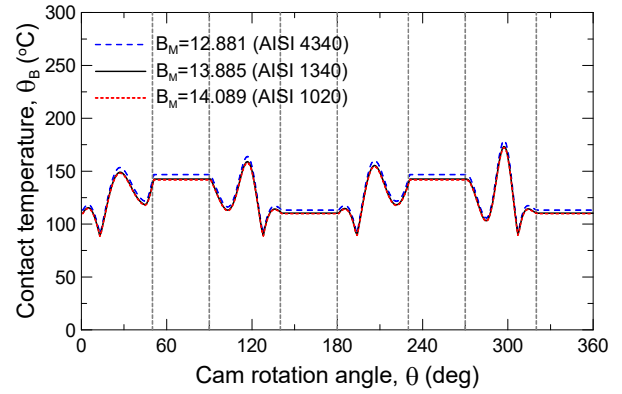


Fig. 16 Contact temperature with the variation of B_M

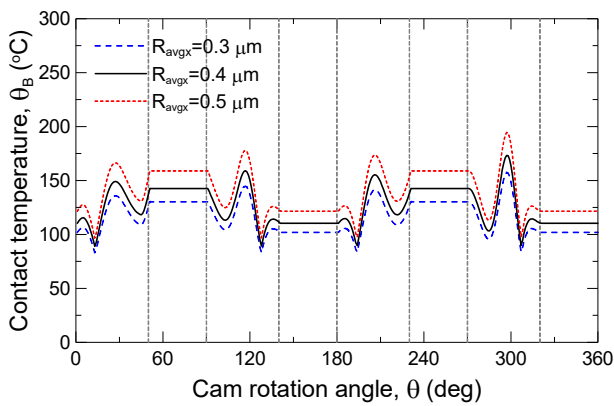


Fig. 14 Contact temperature with the variation of R_{avgx}

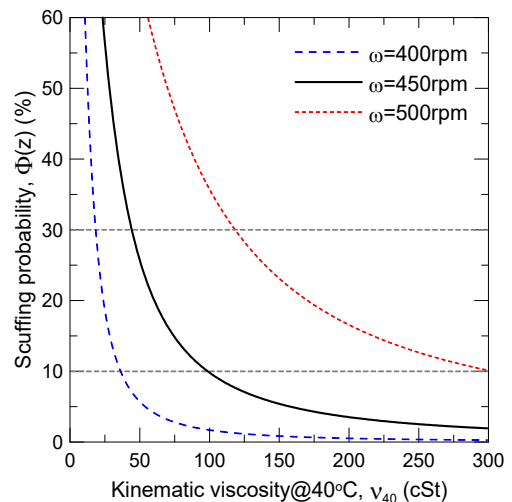


Fig. 17 $\Phi(z)$ with the variation of ω

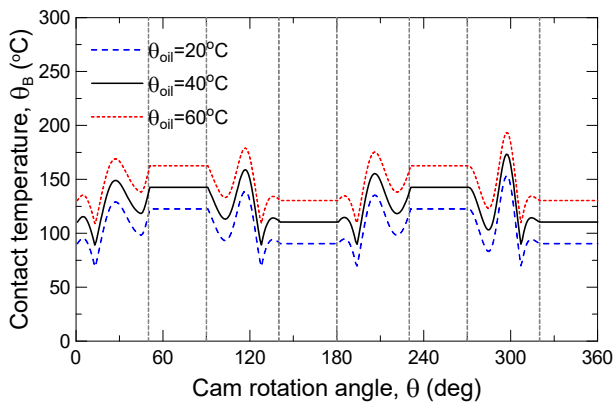


Fig. 15 Contact temperature with the variation of θ_{oil}

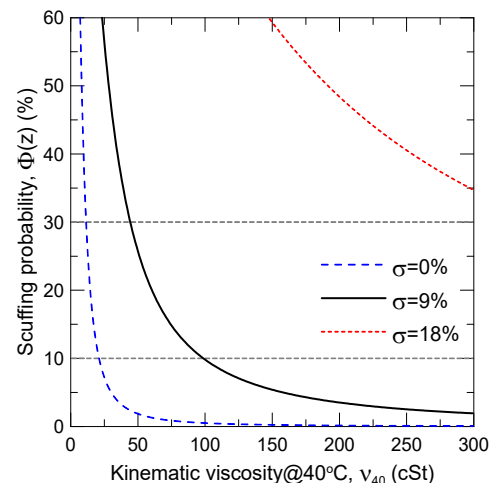


Fig. 18 $\Phi(z)$ with the variation of σ

16에 도시하였다.

Fig. 12에 미끄럼률(σ)에 따른 접촉온도(θ_B)의 변화를 나타내었고 미끄럼률(σ)이 증가할수록 접촉온도(θ_B)도 함께 증가하는 경향을 보였다. 이는 식 (19)의 β 의 감소로 인한 식 (9)의 순간온도(θ_{fl}) 증가에 기인한다.

Fig. 13에서는 회전속도(ω)에 따른 접촉온도(θ_B)의 변화를 도시하였고, 회전속도(ω)가 증가함에 따라 접촉온도(θ_B) 또한 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 접촉력(F_N)의 증가로 인한 식

(9)의 순간온도(θ_{fl}) 증가에 기인한다.

Fig. 14는 표면거칠기(R_{avgx})에 따른 접촉온도(θ_B)의 변화를 도시하였다. 표면거칠기 (R_{avgx})가 커질수록 접촉온도(θ_B)가 상승하는 경향이 확인되었다. 이는 식 (10)의 평균마찰계수(μ_m)의

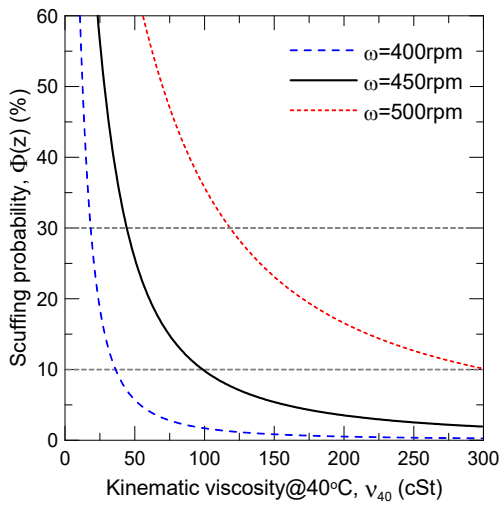


Fig. 19 $\Phi(z)$ with the variation of R_{avgx}

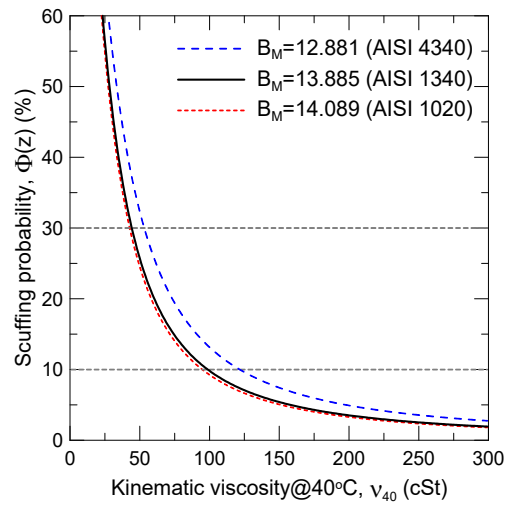


Fig. 21 $\Phi(z)$ with the variation of B_M

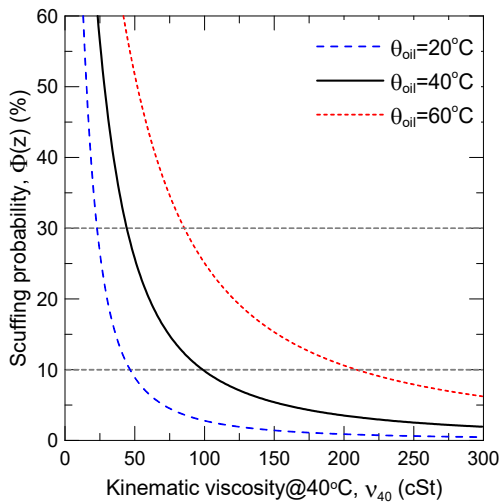


Fig. 20 $\Phi(z)$ with the variation of θ_{oil}

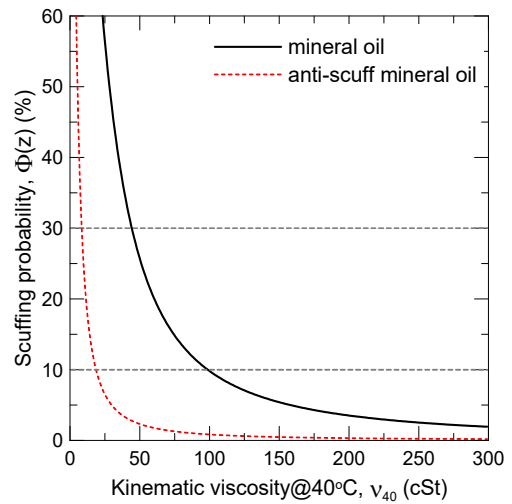


Fig. 22 $\Phi(z)$ with the variation of oil type

증가로 인한 식 (9)의 순간온도(θ_{fl}) 증가에 기인한다.

또 오일유입온도(θ_{oil})가 증가할수록 접촉온도(θ_B) 또한 증가함을 Fig. 15에서 확인할 수 있다. 이는 열 평형에 도달했을 때의 식 (23)의 캠 온도(θ_M) 증가에 기인한다.

그리고 원반캠 재질 변경에 따른 접촉온도(θ_B)의 변화를 검토하기 위해 Table 3과 같이 3가지 재료에 대한 열접촉계수(B_M)를 고려하였다. Fig. 16에서 확인할 수 있듯이 원반캠의 열접촉계수(B_M)가 증가할수록 접촉온도(θ_B)는 미미하게나마 감소함을 알 수 있다. 이는 순간온도(θ_{fl}) 결정을 위한 식 (9)의 분모 값이 커진 결과에 기인한다.

4.3 스커핑 위험도

식 (24)를 기반으로 40°C에서의 상대점도 또는 동점도 (ν_{40})에 따른 스커핑 확률 $\Phi(z)$ 의 변화를 Figs. 17~22에 도시하였다.

공히 40°C에서의 동점도 (ν_{40})가 큰 윤활유를 선택하면 스커핑 발생 확률이 감소함을 알 수 있다. 또 스커핑 위험도 (상, 중, 하) 판단이 용이하도록 스커핑 확률 10%, 30% 위치에 점선을 추가하였다.

Figs. 17, 18에 회전속도(ω) 및 미끄럼률(σ) 변화에 따른 스커핑 위험도를 도시하였고, 회전속도(ω) 및 미끄럼률(σ)이 증가할수록 스커핑 위험도는 급격히 증가함을 확인할 수 있다.

표면거칠기(R_{avgx}), 오일유입온도(θ_{oil}), 열접촉계수(B_M)에 따른 스커핑 위험도를 Figs. 19~21에 도시하였다. 표면거칠기(R_{avgx})와 유입온도 (θ_{oil})가 클수록 스커핑 위험도가 증가하였고, 반면 열접촉계수(B_M)가 증가할수록 스커핑 위험도는 감소하였다.

Fig. 22는 식 (25), (26)의 특성을 갖는 일반 광유(mineraloil) 및 스커핑 방지 광유(anti-scuff mineral oil)의 스커핑 위험도를

나타낸 것이다. 일반 광유보다 스커핑 방지 광유의 스커핑 위험도가 월등히 낮음을 확인할 수 있다. 이를 기반으로 적절한 점도를 갖는 오일 선택을 통하여 스커핑이 발생할 가능성을 낮출 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 병진운동용 롤러 중동절을 갖는 원반캠의 스커핑 위험도 평가(scuffing risk)를 위해 AGMA 925-A03의 순간온도법(flash temperature method)을 적용하였고, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

첫째, 캠 변위선도의 가속도(a) 곡선과 접촉력(F_N)은 양의 상관관계를 가진 반면, 등가곡률($1/R^*$)은 음의 상관관계를 보였다. 등가곡률($1/R^*$)과 접촉력(F_N)의 곱에 비례하는 접촉응력(σ_c)은 가속도(a) 곡선 또는 접촉력(F_N)과 양의 상관관계를 보였다.

둘째, 캠 회전속도(ω), 미끄럼률(% sliding), 표면거칠기(R_{avgx}), 오일유입온도(θ_{oil})가 상승함에 따라 접촉온도(θ_B)의 상승 및 스커핑 위험도의 증가를 확인하였고, 열접촉계수(B_M)가 증가할 때, 접촉온도(θ_B) 및 스커핑 위험도는 감소하는 것을 확인하였다.

결과적으로, 캠 설계를 위한 변위선도의 가속도(a) 곡선에 따라 접촉력(F_N), 접촉응력(σ_c) 및 접촉온도(θ_B)가 좌우되므로 이의 여하한 선정과 더불어 스커핑 방지 오일의 사용을 통해 스커핑 위험도를 낮출 수 있음을 확인하였다.

기호설명

a	: 유사 가속도
B_M	: 열접촉계수
b	: 원반캠 두께
C_p	: AGMA 탄성정수
e	: 롤러중동절 편심량
F_N	: 접촉력
F_{pl}	: 스프링 예력
K^*	: 보정 하중응력계수
K_D	: 하중 수정계수
k_s	: 복귀 스프링상수
l_t	: 원반캠 둘레길이
m_{eff}	: 등가질량
R_{avgx}	: 산술평균 표면거칠기

R_b	: 기초원 반지름
R_r	: 롤러중동절 반지름
R^*	: 등가 곡률반지름
s	: 중동절 변위
V_{2t}	: 공통접선방향 속도성분, 캠
V_{3t}	: 공통접선방향 속도성분, 롤러 중동절
V_s	: 미끄럼속도
v	: 유사 속도
z	: 표준정규분포 확률변수
α	: 압력각
ζ	: 감쇠비
σ	: 미끄럼률
σ_c	: Hertz 접촉응력
θ	: 캠 회전각도
θ_B	: 접촉온도
θ_{fl}	: 순간온도
θ_M	: 열평형온도
θ_{oil}	: 선택온도
θ_s	: 평균 스커핑온도
μ_m	: 평균 마찰계수
ν_{40}	: 동점도 @40°C
ρ	: 캠 곡률반경
$\Phi(z)$: 스커핑 확률
ω	: 캠 회전속도

References

- [1] Kwon, S. M., Lee, Y. H., 2025, Scuffing Risk of External Pinwheel Gear Set Pinion, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 34:3 170-178, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2025.34.3.170>.
- [2] Qu, D., Zhang, R., Xu, J., Zhang, S., 2019, Lubrication Analysis and Abrasion Prediction of a Cam-Roller Configuration, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 267:4 042065, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/267/4/042065>.
- [3] Bell, J. C., Willemsse, P. J., 1998, Mid-Life Scuffing Failure in Automotive Cam-Follower Contacts, Proc. I. Mech. Engrs, Part J : J. Eng. Tribol. 212:4 259-269, <https://doi.org/10.1243/1350650981542074>.
- [4] Wang, Z., Yu, Q., Shen, X., Chen, X., 2018, A Simple Model for Scuffing Risk Evaluation of Point Contact Under Mixed Lubrication, ASME. J. Tribol., 140:3 031502, <https://doi.org/10.1115/1.4038410>.
- [5] Ramprasad, M., Mayuram, M. M., 2003, Some Studies on

- Scuffing Performance of Surface Treated AISI 4340 Steels, ASME. J. Tribol., 125:1 181-186, <https://doi.org/10.1115/1.1504089>.
- [6] AGMA, 2003, Effect of Lubrication on Gear Surface Distress, AGMA 925-A03, American Gear Manufacturers Association, Virginia.
- [7] Kwon, S. M., Kim, C. H., Nam, H. C., Shin, J. H., 2008, Optimization of Specific Film Thickness for a Disc Cam Using Genetic Algorithm, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, 32:11 924-929, <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2008.32.11.924>.
- [8] Shin, J. H., Kwon, S. M., Nam, H. C., 2010, A Hybrid Approach for Cam Shape Design and Profile Machining of General Plate Cam Mechanisms, Int. J. Prec. Eng. Manuf., 11 419-427, <https://doi.org/10.1007/s12541-010-0048-6>.
- [9] Iriarte, X., Bacaicoa, J., Plaza, A., Aginaga, J., 2024, A Unified Analytical Disk Cam Profile Generation Methodology Using the Instantaneous Center of Rotation for Educational Purpose, Mech. Mach. Theory, 196 105625, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2024.105625>.
- [10] Kwon, S. M., 2019, Surface Fatigue Life of Close Cam for Gas Circuit Breaker, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 28:5 274-279, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2019.28.5.274>.
- [11] Chen, F. Y., 1982, Mechanics and Design of Cam Mechanisms, Pergamon Press, New York.
- [12] Norton, R. L., 2009, Cam Design and Manufacturing Handbook, 2nd ed., Industrial Press, New York.
- [13] Rothbart, H. A., 2004, Cam Design Handbook, McGraw-Hill, New York.
- [14] Yan, H. S., Tsai, W. J., 2008, A Variable-Speed Approach for Preventing Cam-Follower Separation, J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf., 2:1 12-23, <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2.12>.
- [15] Budynas, R. G., Nisbett, J. K., 2015, Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th ed., McGraw-Hill, New York.
- [16] Blok, H., 1963, The Flash Temperature Concept, Wear, 6:6 483-494, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(63\)90283-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(63)90283-7).
- [17] AGMA, 1965, Gear Scoring Design for Aerospace Spur and Helical Power Gears, AGMA 217.01, American Gear Manufacturers Association, Virginia.
- [18] AGMA, 2002, Industrial Gear Lubrication, ANSI/AGMA 9005-E02, American Gear Manufacturers Association, Virginia.



Myeong-won Seo

Graduate Student in the Department of Mechanical Design & Manufacturing Engineering, Changwon National University. His research interest is Disk Cam Mechanism Design.
E-mail: iaan105402@naver.com



Min-chaе Kim

Ph. D. Candidate in the Department of Mechanical Design & Manufacturing Engineering, Changwon National University. His research interests are Cam Rack Pinion and Disk Cam.
E-mail: uveas_cosmo@naver.com



Soon-man Kwon

Professor in the School of Mechanical Engineering, Changwon National University. His research interests are Pin Gear Drive Unit and Speed Reducer.
E-mail: smkwon@changwon.ac.kr