GA를 이용한 요동운동용 디스크 캠의 마멸특성

Wear Characteristic for Oscillating Disk Cam Mechanism using GA

*여 뢰¹, 남형철¹, 신중호², #권순만²,

*L. Lu¹, H. C. Nam¹, J. H. Shin², [#]S. M. Kwon²(smkwon@changwon.ac.kr) ¹ 창원대학교 대학원 기계설계공학과. ²창원대학교 기계설계공학과

Key words: Oscillating cam mechanism, Hertzian contact stress, Wear rate proportional factor, Genetic algorithm

1. 서론

특정 함수로 출력축의 운동특성을 구성하는데 매우 용이한 캠 기구는 구조가 간단하면 구성부품이 적다는 장점을 가지고 있다. 또 캠 기구의 설계에 있어서 변위선도 선택의 중요성은 주지의 사실이다. 본 논문에서는 순간속도 중심법에 의한 캠의 형상설계를 바탕으로 변위선도의 선정이 캠 기구의 마멸특성에 어떠한 영향을 미치는지 고찰한다. 적용모델로 밸브 트레인용캠 운동에 많이 이용되는 TES 다항식(1)을 적용하여 요동운동용평판 캠을 설계하고 TES 다항식에 포함된 4개의 지수 선택에 의한 캠의 마멸특성을 분석하고 유전 알고리즘(genetic algorithm: GA)을 도입하여 최적화를 시도한다.

2. 접촉응력

본 논문에서는 순간속도 중심법 $^{(2)}$ 을 이용하여 설계되어진 요동운동용 평판 캠과 롤러 종동절 사이에서 발생되는 마멸특성의 정의를 위해 접촉응력 $^{(1)}$ 에 대해 우선 고찰한다. Fig. 1에서와 같이 1 자유도 집중매개변수 시스템을 고려하여 캠과 종동절인 롤러가 이상적으로 접촉하고 있는 상태에서 캠 작용력 F_f 는 다음과 같이 결정할 수 있다. 여기서 F_u 은 캠과 종동절의 이역현상을 방지하기 위한 스프링의 예력이다.

$$F_f = m_{eff} \ddot{x} + c\dot{x} + kx + F_{pl} \tag{1}$$

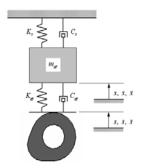


Fig.1 1-DOF lumped parameter model

또한 원통 접촉하는 Hertz 접촉응력은 다음과 같다. 여기서 E^* 와 R^* 는 캠과 종동절의 등가 탄성계수와 곡률반경이며, L은 원판 캠의 두께이다.

$$p_H = \sqrt{\frac{F_f E^*}{2\pi L R^*}} \tag{2}$$

3. 마멸률 비례계수

일반적으로 마멸률은 접촉상태에서 상대운동을 하는 두 물체 사이에서 발생하는 접촉응력 (p_H) 와 미끄럼속도 (V_s) 에 비례하며 이때 발생하는 입자의 이탈을 마멸이라고 한다. 따라서 본 연구에 서는 마멸특성을 분석하기 위해서 마멸에 영향을 미치는 두개의 주요 인자를 이용하여 마멸률 비례계수(wear rate proportional factor: WRPF)를 다음과 같이 제안한다.

$$WRPF = p_H V_s / \omega \tag{3}$$

여기서 미끄럼 속도 V_s 는 캠과 종동절의 접촉점에서의 공통 접선방향 상대속도이므로 Fig. 2와 같이 순간중심 I_{23} 을 이용하여 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$V_s = (m - R_f)(1 + v)\omega \tag{4}$$

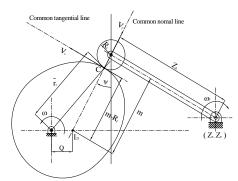


Fig. 2 Velocities at contact point

4. WRPF 최적화⁽²⁾

본 연구에서 종동절의 운동(Table 1)을 고려하여 선정한 TES 다항식(하강곡선)은 다음과 같다.

$$s = h \left[1 + C_2 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 + C_p \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^p + C_q \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^q + C_r \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^r + C_w \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^w \right] \tag{5}$$

$$\begin{split} C_2 =& -\frac{pqrw}{(p-2)(q-2)(r-2)(w-2)} \\ C_p =& -\frac{2qrw}{(p-2)(p-q)(p-r)(p-w)} \\ C_q =& -\frac{2prw}{(q-2)(q-p)(q-r)(q-w)} \\ C_r =& -\frac{2pqw}{(r-2)(r-p)(r-q)(r-w)} \\ C_w =& -\frac{2pqr}{(w-2)(w-p)(w-q)(w-r)} \end{split}$$

또한, 변위선도를 이용하여 캠의 형상을 설계하고 캠과 종동절 사이의 접촉특성을 해석하기 위한 변수들을 Table 2에 정리하였다. Eq.(5)의 지수인 2-p-q-r-w에 대해서 밸브트레인용 캠에 주로 사용되는 TES 2-10-20-30-40 다항식을 초기자료로 이용하여 내마멸성을 최적화하는 갖는 TES 다항식의 p, q, r, w를 찾고자하였다.

Table 1 Follower motion

Segment	Cam angle(deg)	Rise(+) or Return(-)	Type of motion
1	0 ~ 69	+5.772 (deg)	TES polynomial
2	69 ~ 91	-	Dwell
3	91~160.5	-5.772(deg)	TES polynomial
4	160.5~360	-	Dwell

Table 2 Cam design and analysis parameters

ε	<i>U</i> , 1		
Parameters	Values	Unit	
Follower coordination	(-130,116)	mm	
Radius of base circle	53.5	mm	
Radius of roller follower	27	mm	
Follower effective mass	2.5736	kg	
Damping ratio	0.10		
Spring constant	9332	N/m	
Pre-load force	886.54	N	
Camshaft rotating speed	300	rpm	
Thickness of cam	27	mm	

이를 위해 본 연구에서는 GA를 이용하여 최적화를 수행하였다. 즉 최적화조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Find} & x_i = (p,q,r,w) \\ & \text{Minimize} & f(x_i) = \textit{WRPF} \\ & \\ & \text{Subject to} & \begin{cases} |\alpha|_{\text{max}} < 35 \\ (F_f)_{\text{min}} > 0 \\ |\rho_{\text{min}}| > (1.5 \sim 2.5)R_f \end{cases} \end{aligned}$$

여기서 α 는 압력각으로서 통상적인 요동운동용 캠 시스템에서 는 35 ° 를 허용 압력각으로 설계한다. 그리고 작용력이 접촉력으로서 의미를 가지기 위해서는 최소 작용력이 예력보다 커야한다. 따라서 최적화를 위해 다음과 같이 망소특성을 가지는 적합도 함수를 결정하였다. 여기서 K와 γ 는 각각 적합도 계수와 목적계수이며, P는 벌칙함수이다.

$$Fitness = \frac{K}{\gamma f' + P} = \frac{1000}{1.2 \left(WRPF \right) + P} \tag{6}$$

그리고 Table 3에서와 같이 기준함수와 유사한 범위에서 최적의 결과를 찾기 위해 변수의 탐색영역(5~45)을 설정하였다. 또한 개체군의 크기와 세대수는 각각 500으로 설정하였으며 원활한 탐색을 위해 80%의 교차확률과 2%의 돌연변이를 적용하였다.

Table 3 Searching range of parameters

Parameters	Searching ranges
p	5 ~ 45
q	5 ~ 45
r	5 ~ 45
w	5 ~ 45

5. 결과검토

500세대 동안 최적화 과정에서의 적합도 변화를 Fig. 3에 도시하였다. 앞서 제시한 적합도 함수의 망소 특성을 확인할 수 있으며이를 통해 최적화 과정에서는 아무런 문제가 없음을 알 수 있다. 따라서 최적화를 통해 얻어진 결과와 앞서 기준으로 제시한 TES 2-10-20-30-40 다항식의 결과와 비교 검토 하였다.

우선 WRPF를 최적화 전·후를 비교하여 Fig. 4에 도시하였다. 150° 부근에서 최대값이 나타났으며, 최적화를 통해 WRPF가 비교적 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이를 보다 상세히 살펴보기 위해서 수치적인 결과를 Table 4에 정리하였다.

최적화가 진행됨에 따라서 마멸의 주요 인자인 접촉응력은 비교적 증가하였으나 큰 변화를 보이지는 않았음에도 불구하고 마멸률 비례계수는 약 1.5%감소하였음을 확인할 수 있다. 이는 또 다른 마멸인자인 미끄럼속도의 감소에 의한 것으로 본 연구에서 마멸에 영향을 미치는 주요 요인은 미끄럼속도임을 고찰할수 있다.

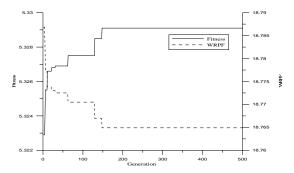


Fig. 3 Fitness and WRPF history

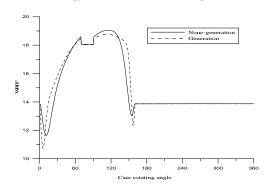


Fig. 4 Compared with WRPF

Table 4 Results of FGA

Parameters	Non-optimized	Optimized	
p	10	44.5153	
q	20	44.8755	
r	30	44.5617	
w	40	44.8095	
$\left(p_H^{}\right)_{\mathrm{max}}^{}$, MPa	275.8218	273.8626	
$\left(\left.V_{s}/\omega\right)_{\mathrm{max}}$, mm/rad	2.1790	2.1553	
$(WRPF)_{max}$, N/mm/rad	19.0561	18.7646	

그리고 앞서 변위선도 함수로 선정된 TES 다항식의 탐색결과를 살펴보면 p, q, r, w는 탐색범위의 최대치인 45로 근접하여수렴하였다. 따라서 TES 다항식의 지수인 p, q, r, w의 특성을 알 수 있었으며, 이를 통해 내마멸성이 항상된 캠 시스템의 설계가이루어질 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결론

본 논문에서는 최적설계를 이용하여 밸브 트레인용 캠의 설계에 많이 사용되는 TES 다항식에 포함된 지수의 변화를 통해 마멸특성을 분석하고자 하였으며, 이를 위해 마멸의 주요 인자를 고려한 마멸률 비례계수를 도입하였다. 그 결과 최적화를 통해 WRPF가 약 1.5% 감소한 설계변수를 획득하였으며 이를 통해 내마멸성이 보다 향상된 캠의 설계가 가능하리라 판단된다.

후기

본 연구는 국립 창원대학교「2단계 BK21 사업」의 지원비를 받았음.

참고문헌

- 1. Thoren, T. R., et al., 1952, "Cam design as related to valve train dynamics," SAE Quarterly Transactions, 6(1), pp. 1~14.
- Kim, C.H., 2008, "A study on optimization design of disc cam using genetic algorithm," Master Thesis, Changwon National University, Republic of Korea.