

다행정 레이디얼 피스톤 모터의 캠 형상에 따른 토크 특성 기초 연구

A Basic Study on the Torque Characteristics of Multi-stroke Radial Piston Motor by Cam Profile

조영진* · 지상원** †
Yeong-Jin Jo* and Sang-Won Ji** †

(Received 05 June 2024, Revision received 24 June 2024, Accepted 25 June 2024)

초록 : 우수한 저속-고토크 특성으로 감속기 없이 회전부하를 직접 구동시키는 다행정 레이디얼 피스톤 모터는 농기계, 건설기계 및 특장차 등으로 그 적용범위가 확장되고 있다. 본 논문에서는 다행정 레이디얼 피스톤 모터의 평균 출력토크, 토크 맥동 등의 토크 특성과 밀접한 관계가 있는 캠링의 형상에 에피트로코이드 및 정현파 곡선을 이용하여 각각 설계한다. 추가적으로 불연속점을 회피하기 위해 수정된 에피트로코이드 곡선을 설계하고 토크 맥동 감소를 위해 상사점과 하사점에 평탄각을 부여한 수정된 정현파 곡선을 이용한 캠링 형상을 설계한다. 설계된 각각의 캠링 형상을 적용하여 일정한 공급 압력을 가정하고 토크 시뮬레이션을 수행하여 캠링 형상에 따른 이론적 토크 특성을 규명한다. 시뮬레이션 결과를 통해 평균 출력토크의 크기는 에피트로코이드, 수정된 에피트로코이드, 정현파 및 수정된 정현파 곡선 순으로 나타났으나 토크 맥동율은 이의 역순으로 계산되었다.

키워드 : 레이디얼 피스톤 모터, 캠링, 에피트로코이드 곡선, 정현파 곡선, 토크 맥동

Abstract : Multi-stroke radial piston motors, known for their excellent low-speed and high-torque characteristics, can directly drive rotating loads without a reducer. This paper focuses on the design of the cam ring shape, which significantly affects torque characteristics such as average output torque and torque pulsation in multi-stroke radial piston motors. The cam ring shapes are designed using epitrochoid and sinusoidal curves, respectively. Additionally, a modified epitrochoid curve is proposed to eliminate discontinuities, and a modified sinusoidal curve with flat angles at the top and bottom dead centers is designed to reduce torque pulsation. Torque simulations were performed using each designed cam ring geometry under constant pressure to determine their theoretical torque characteristics. Simulation results indicate that the average output torque magnitudes are the highest for the epitrochoid curve, followed by the modified epitrochoid, sinusoidal, and modified sinusoidal curves. However, the torque pulsation rates are inversely ordered.

Key Words : Radial Piston Motor, Cam Ring, Epitrochoid Curve, Sinusoidal Curve, Torque Ripple

** † 지상원(<https://orcid.org/0000-0002-9827-4717>) : 교수, 국립부경대학교 기계시스템공학과
E-mail : jsw@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6190
*조영진(<https://orcid.org/0000-0001-9829-8498>) : 책임연구원, 한화엔진 구조기술팀

** † Sang-Won Ji(<https://orcid.org/0000-0002-9827-4717>) : Professor, Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.
E-mail : jsw@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6190
*Yeong-Jin Jo(<https://orcid.org/0000-0001-9829-8498>) : Engineer, Structure Technology Team, Hanwha Engine.

1. 서 론

유압 장치는 단위 중량당 동력의 크기가 크고, 유압 실린더와 유압 모터를 이용하여 직선 운동과 회전 운동을 용이하게 구현할 수 있으므로 건설 중장비, 하역 운반 기계, 자동차, 선박, 항공기 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 다양한 분야에 보편적으로 사용되는 유압 피스톤 모터는 크게 액시얼 형과 레이디얼 형으로 구분할 수 있고, 레이디얼 형은 다시 회전 캠 레이디얼 피스톤 모터와 다행정 레이디얼 피스톤 모터로 구분된다. 다행정 레이디얼 피스톤 모터는 행정체적을 증대시키기 위하여 출력축이 1회전하는 동안에 피스톤의 왕복 행정 횟수를 2회 이상으로 하여 감속기의 부착 없이도 양호한 저속-고토크 특성을 갖는 것으로 알려져 있다.^{1,2)}

본 논문의 연구대상인 다행정 레이디얼 피스톤 모터의 구조를 Fig. 1에 나타낸다. Fig. 1에서 나타난 바와 같이 고정된 하우징 속에서 로터/피스톤 그룹이 회전하는 형식으로 피스톤은 롤러를 통해 캠 링 형상의 표면과 접촉하며, 각각의 피스톤은 6회의 왕복 행정을 수행하여 구동축을 1회전시킨다. 이를 위해 가압된 유체가 모터 축에 고정된 유체 분배기를 통해 각 피스톤의 개별 행정 체임버로 공급되고, 공급된 유체에 의해 피스톤은 반경 방향으로 이동하며, 롤러가 캠 링 형상을 따라 회전한다.³⁾

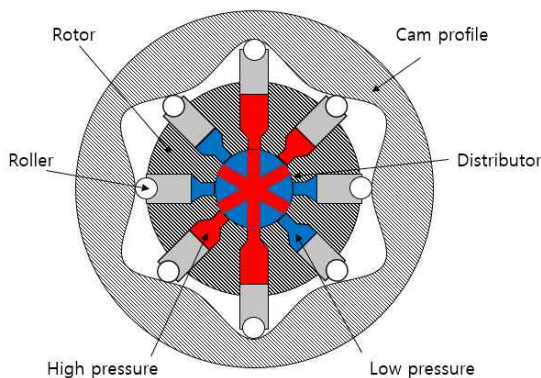


Fig. 1 Structure of multi-stroke radial piston motor

용적형 펌프 및 모터의 맥동에 관한 연구는 상대적으로 미미한 편이며, 이일영 등은 회전 캠 고정 실린더식 레이디얼 피스톤 펌프의 설계를 위한 특정 규격의 유압펌프를 대상으로 하여 수치 시뮬레이션을 수행하고, 펌프 설계에 관련된 주요 물리 인자들이 펌프의 송출 유량 특성에 미치는 영향을 상세하게 조사하였고, 레이디얼 피스톤 펌프의 유량 맥동에 대한 기초적 연구를 수행하여 유량 맥동의 계산 결과를 검증하였다.^{4,5)} Nicole 등은 에피트로코이드 곡선이 적용된 캠 링 형상과 정현파 곡선이 적용된 캠 링 형상을 가진 레이디얼 피스톤 모터의 평균 토크에 관한 시뮬레이션 연구를 수행하였다.^{6,7)}

따라서 본 논문에서는 다행정 레이디얼 피스톤 모터의 캠 링 형상이 토크 특성에 미치는 영향을 규명하고자 한다. 이를 위해 에피트로코이드(Epitrochoid) 곡선과⁸⁾ 정현파(Sinusoidal) 곡선을 수식화하여 캠 링 형상을 설계한다. 설계된 캠 링 형상을 적용하고 일정 압력 및 유량이 공급된다고 가정하여 기구학적 토크 시뮬레이션을 통해 캠 링 형상에 따른 다행정 레이디얼 피스톤 모터의 토크 특성에 대한 기초연구를 수행하여 그 특성을 규명한다.

2. 캠 링 형상 모델링

2.1 에피트로코이드 곡선 방정식

트로코이드(trochoid) 곡선은 직선을 따라 굴러가는 원의 안 또는 바깥에 위치한 한 정점에 의해 그려지는 곡선을 통칭하며, 그중 에피트로코이드 곡선은 고정된 피치원(원의 중심 O_1)에 외접한 구름 원(원의 중심 O_2)을 나타내었다. 따라서 구름 원에 속하는 점 C 에 의해 생성된 에피트로코이드 곡선의 좌표는 식 (1) ~ (2)와 같다.⁹⁾

Fig. 2에 반지름 R_1 인 고정된 피치원(원의 중심 O_1)을 중심으로 회전하는 반지름 R_2 인 구름 원(원의 중심 O_2)을 나타내었다. 따라서 구름 원에 속하는 점 C 에 의해 생성된 에피트로코이드 곡선의 좌표는 식 (1) ~ (2)와 같다.

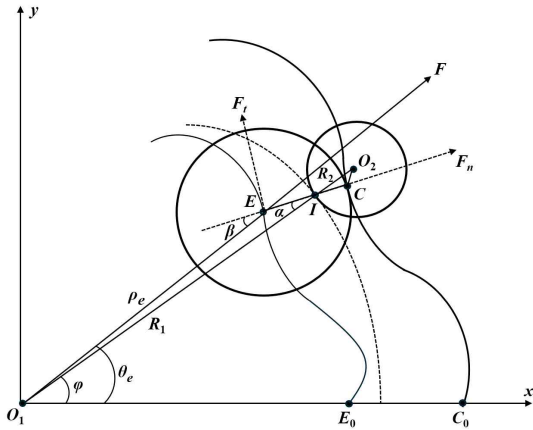


Fig. 2 Part of the cam profile and roller with epitrochoid curve

$$x_c = (R_1 + R_2)\cos\varphi - e \cdot \cos(\varphi + \psi) \quad (1)$$

$$y_c = (R_1 + R_2)\sin\varphi - e \cdot \sin(\varphi + \psi) \quad (2)$$

여기서, e 는 $\overline{O_2C}$ 의 길이, φ 는 $\angle IO_1E_0$, ψ 는 $\angle IO_2C$ 을 뜻한다. 삼각형 O_2IC 에서 선분 \overline{IC} 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \overline{IC} &= \sqrt{\overline{IO_2}^2 + \overline{O_2C}^2 - 2\overline{IO_2} \cdot \overline{O_2C} \cdot \cos(\pi - \psi)} \\ &= \sqrt{R_2^2 + e^2 + 2R_2 \cdot e \cdot \cos\psi} \end{aligned} \quad (3)$$

삼각형 O_2IC 에서 식 (4)의 관계를 통해 각도 α 는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\overline{IC}}{\sin(\pi - \psi)} = \frac{e}{\sin\alpha} = \frac{R_2}{\sin(\pi - \alpha)} \quad (4)$$

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{e \times \sin\psi}{\overline{IC}}\right) \quad (5)$$

따라서 에피트로코이드 곡선을 직교 좌표로 나타내면 식 (6) ~ (7)과 같다.

$$x_e = x_c - r \cos(\alpha - \varphi) \quad (6)$$

$$y_e = y_c + r \sin(\alpha - \varphi) \quad (7)$$

캠 링 형상을 따라 회전하는 롤러의 중심을 E 라 할 때 원점부터 점 E 까지의 거리 ρ_e 와 각도 θ_e 는 식 (8) ~ (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_e = \sqrt{x_e^2 + y_e^2} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \theta_e &= \tan^{-1}(2(y_e, x_e)), & \theta_e &\geq 0 \\ \tan^{-1}(2(y_e, x_e) + 2\pi), & \theta_e < 0 \end{aligned} \quad (9)$$

한편, 각도 β 는 삼각형 O_1EI 의 외부에 존재하므로 식 (10)과 같다.

$$\beta = \alpha + \theta_e - \varphi \quad (10)$$

또한 힘 F 는 접선 방향의 힘 F_t 와 반경 방향의 힘 F_n 으로 분리되므로, 식 (11)과 식 (12)와 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$F_t = F \cdot \sin\beta \quad (11)$$

$$F_n = F \cdot \cos\beta \quad (12)$$

접선 방향의 힘 F_t 에 의해 회전 운동이 생성되며, 유압 모터의 출력축에는 힘 F_t 에 비례하는 토크가 발생한다. 식 (11)로부터 힘 F_t 는 힘 F 와 캠의 경사각 β 에 의해 결정됨을 알 수 있다.

O_1 에서 F_t 의 작용선까지의 수직 거리 b 는 식 (13)과 같다.

$$b = \rho_e \cdot \cos\beta \quad (13)$$

전술한 식 (1) ~ (13)을 고려하면, 힘 F_t 에 의해

발생하는 토크는 최종적으로 식 (14)와 같다.

$$T = F_t \cdot b = P \cdot A \cdot \rho_e \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta$$

$$= \frac{1}{2} P \cdot A \cdot \rho_e \cdot \sin 2(\alpha + \theta_e - \varphi) \quad (14)$$

토크는 유체가 공급되는 상승 행정에서만 발생하므로 토크가 발생하는 각도 φ 의 조건은 식 (15)와 같다.

$$\frac{1}{6}\pi \leq \varphi < \frac{1}{3}\pi, \quad \frac{1}{2}\pi \leq \varphi < \frac{2}{3}\pi, \quad (15)$$

$$\frac{5}{6}\pi \leq \varphi < \pi, \quad \frac{7}{6}\pi \leq \varphi < \frac{4}{3}\pi,$$

$$\frac{3}{2}\pi \leq \varphi < \frac{5}{3}\pi, \quad \frac{11}{6}\pi \leq \varphi < 2\pi$$

2.2 정현파 곡선 방정식

Fig. 3은 정현파와 원호로 구성된 캠 링 형상에서 1회 동안의 상승 행정을 나타낸 것으로, 이는 캠 링 형상과 캠을 따라 회전하는 피스톤의 롤러의 위치를 나타낸다. T_1 , T_2 는 각각 상승 행정의 시작과 끝 점이고, T 는 $T_1 T_2$ 사이의 임의의 한 점을 의미한다. T 의 좌표를 나타내기 위해 $\overline{OT_1}$ 과 $\overline{OT_2}$ 는 식 (16)과 같이 나타낸다.

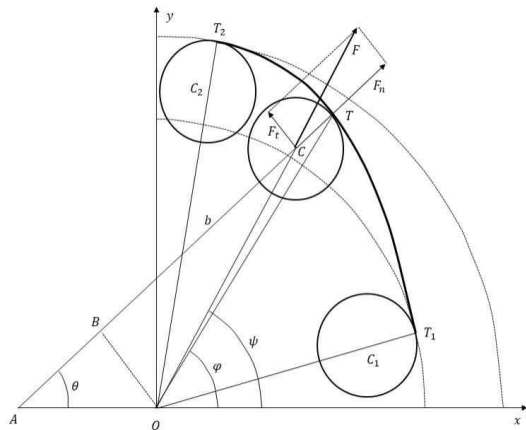


Fig. 3 Part of the cam profile and roller with sinusoid curve

$$\overline{OT_1} = \frac{d_{\min}}{2}, \quad \overline{OT_2} = \frac{d_{\max}}{2}, \quad (16)$$

$$c = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{2}$$

여기서, d_{\min} 은 상승 행정의 시작점 사이의 거리, d_{\max} 는 상승 행정의 끝점 사이의 거리, c 는 피스톤의 최대 변위이다. 식 (16)을 이용하여 각도 φ 에 따른 \overline{OT} 의 거리를 구하면 식 (17)과 같다.

$$\overline{OT} = \frac{d_{\min}}{2} + \frac{c}{2} \left[1 - \cos \left(\pi \frac{\varphi - \varphi_1}{\varphi_2 - \varphi_1} \right) \right], \quad (17)$$

$$\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2$$

3. 캠 링 형상 설계

Table 1에 본 논문의 캠 링 형상 설계에 사용된 주요 파라미터를 나타낸다. n_{lob} 는 로브의 수, n_{cyl} 은 실린더의 수를 각각 의미한다.

Table 1 Parameter of cam ring profile

Parameter	Value	Unit
d_{\max}	150	mm
d_{\min}	132	mm
n_{lob}	6	-
n_{cyl}	8	-

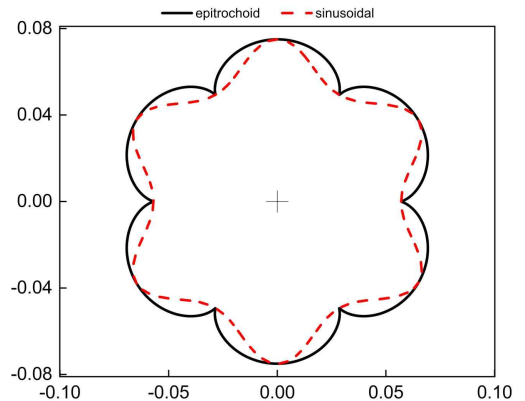


Fig. 4 Epitrochoid and sinusoidal cam profile

전술한 식들과 Table 1의 파라미터를 통해 설계된 캠 링 형상을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 검은 실선은 에피트로코이드 곡선이 적용된 캠 링 형상을 의미하고, 붉은 파선은 정현파 곡선이 적용된 캠 링 형상을 각각 의미한다.

Fig. 5에 피치 원의 반지름과 구름 원의 반지름이 서로 배수 관계가 아닌 에피트로코이드 곡선이 적용된 캠 링 형상을 나타내었다. Fig. 5의 결과로부터 에피트로코이드 곡선이 적용된 캠 링 형상은 곡선의 특성상 피치 원의 반지름과 외접하는 구름 원의 반지름이 서로 배수 관계가 아니면 꺾적이 끊어지는 현상이 발생하며, 배수 관계 일지라도 곡선 불연속점이 발생할 수 있으므로 이를 수정 없이 캠 링 형상에 적용하는 것은 부적합하다.

따라서 정격 토크를 만족하는 범위에서 피스톤의 행정 거리를 조정하여 불연속점이 없는 수정

된 에피트로코이드 형 캠 링 형상을 Fig. 6에 나타내었다.

4. 캠 링 형상에 따른 토크 특성

Table 2에 토크 특성 시뮬레이션에 사용된 주요 파라미터를 나타내었다. Table 2에서 d_{rol} 은 롤러의 반지름, A_{cyl} 은 실린더의 면적, P_s 는 모터 공급 압력, P_r 은 피스톤 하강 행정시에 인가되는 배압을 각각 의미한다.

에피트로코이드와 정현파 곡선이 적용된 캠 링 형상을 대상으로, 회전 각도에 따른 단일 실린더에서 발생하는 출력 토크를 Fig. 7에 각각 나타내었다. 붉은 점선은 에피트로코이드 캠 링 형상의 피스톤 출력 토크이고, 검은 실선은 정현파 캠 링 형상의 피스톤 출력 토크를 각각 의미한다. Fig. 7의 결과로부터 에피트로코이드 형상의 최대 토크

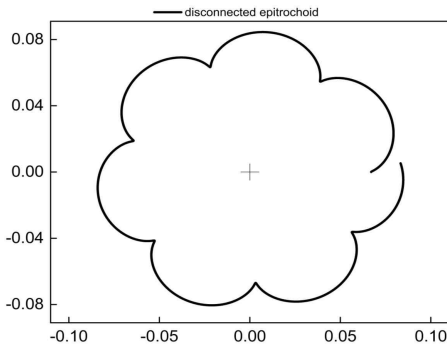


Fig. 5 Disconnected epitrochoid cam profile

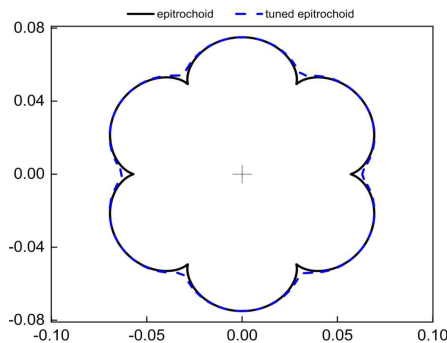


Fig. 6 Epitrochoid and tuned epitrochoid cam ring profile

Table 2 Parameter of torque characteristic

Parameter	Value	Unit
d_{rol}	11	mm
A_{cyl}	700	mm
P_s	450	bar
P_r	9	bar

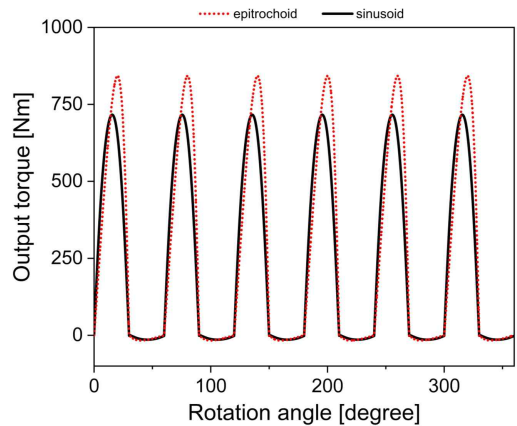


Fig. 7 Output torque by 1 cylinder with epitrochoid and sinusoidal

는 842.4 Nm이고, 정현파 형상의 최대 토크는 716.4 Nm임이 각각 관찰되었다.

에피트로코이드와 수정된 에피트로코이드 곡선이 각각 적용된 캠 링 형상을 대상으로, 회전 각도에 따른 단일 실린더 출력 토크를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 붉은 점선은 에피트로코이드 캠 링 형상을, 검은 실선은 수정된 에피트로코이드 캠 링 형상의 실린더 출력 토크를 각각 의미한다. 수정된 에피트로코이드 캠 링 형상의 최대 토크는 751.9 Nm로 나타났으므로, 수정 전 형상의 경우와 비교하면 출력 토크가 약 90.5 Nm 감소한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9에 회전 각도에 따른 에피트로코이드 곡선과 정현파 곡선이 적용된 캠 링 형상의 모터 출력 토크 시뮬레이션 결과를 각각 나타내었다. 붉은 점선은 에피트로코이드 형상의 토크로, 최대 토크는 2,404 Nm, 평균 토크는 2,065 Nm, 토크 효율은 92%, 토크 맥동율은 0.457로 계산되었다. 검은 실선은 정현파 형상의 토크를 의미하며, 최대 토크는 2123 Nm, 평균 토크는 1,870 Nm, 토크 효율은 83.1%, 토크 맥동율은 0.387로 계산되었다. 따라서 정현파 곡선 형상이 에피트로코이드 곡선 형상에 비해 평균 토크와 토크 맥동율 및 토크 효율은 각각 195 Nm, 0.07 및 8.9% 낮은 것으로 계산되었다. 이는 정현파 곡선이 적용된 캠 링의 상승 행정 경사가 상대적으로 완만하므로 동일 행

정 거리에서 토크 최대치와 토크 맥동 및 토크 효율이 감소되기 때문으로 해석된다.

Fig. 6에 나타낸 에피트로코이드와 수정된 에피트로코이드 곡선이 적용된 캠 링 형상을 대상으로 회전 각도에 따른 모터 출력 토크 시뮬레이션을 수행하고, 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서 검은 실선은 수정된 에피트로코이드 곡선이 적용된 캠 링 형상의 토크를 의미하며, 평균 토크 1,848 Nm, 토크 맥동율 0.434, 토크 효율 82%로 각각 확인되었다. 수정된 에피트로코이드 곡선의 경우, 토크 맥동율과 효율은 에피트로코이드

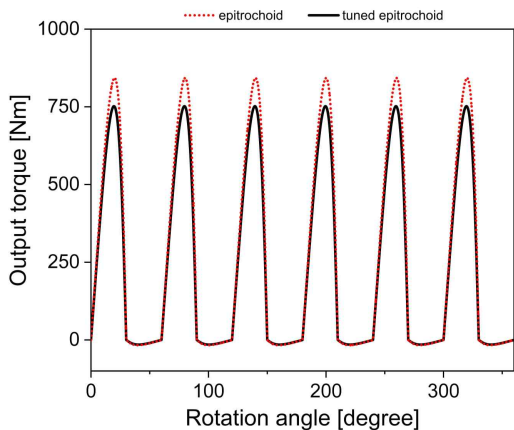


Fig. 8 Output torque of a single cylinder in epitrochoid and tuned epitrochoid shapes

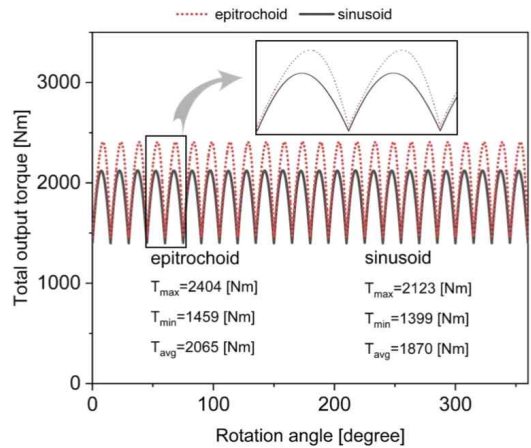


Fig. 9 Total output torque with epitrochoid and sinusoidal

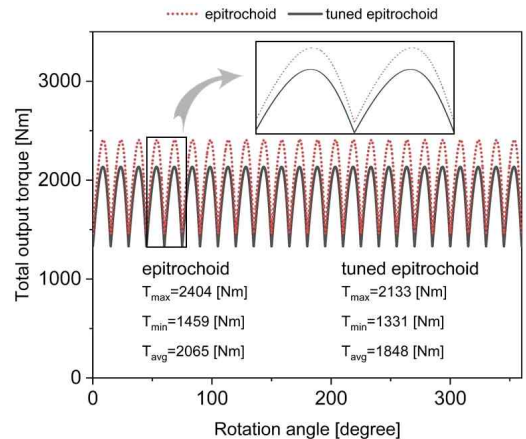


Fig. 10 Total output torque with epitrochoid and tuned epitrochoid

드 곡선에 비해 모두 감소하였으나 상대적으로 효율이 보다 큰 폭으로 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 토크 맥동율과 효율의 측면을 고려하면 정현파 곡선이 적용된 캠 링 형상이 수정된 에피트로코이드 곡선이 적용된 캠 링 형상과 비교하여 보다 성능이 우수한 것으로 판단할 수 있다. 결과적으로 요구되는 정격 토크를 만족하며 토크 맥동이 저감화된 다행정 레이디얼 피스톤 모터를 설계하기 위해서는 전술한 곡선들 중에서는 정현파 곡선을 이용하여 캠 링 형상을 설계하는 것이 가장 바람직할 것으로 판단되었다.

5. 평탄각에 따른 토크 특성 해석

Fig. 11에 행정의 상사점과 하사점에 일정한 평탄각을(d_a , d_b)를 부여한 정현파 곡선이 적용된 캠 링 형상의 일부분을 나타낸다. 다행정 레이디얼 피스톤 모터는 유압유가 공급되어 상승 행정이 수행되고 유압유가 토출되면 하강 행정이 수행된다. 이때 상승과 하강 행정의 각 시작 부분에 해당하는 상사점과 하사점, 즉 유압유의 공급과 토출이 서로 전환되는 부분에서 실린더 벽과 피스톤 틈 사이로 미량의 유체가 누설되는 현상과 유체가 실린더에 일시적으로 갇히는 잠김(locking) 현상이 발생하며 이 영역에서 집중적인 마모가 발생한다. 이때 캠 링 형상에 평탄각을 부여하면 토크 맥동을 감소시키면서 누설과 잠김 현상을 방지하여 모터의 수명이 향상되는 것으로 알려져 있다. 상승 및 하강부의 각 평탄각 영역에서는 F_t 가 발생하지 않으므로 캠 링은 유체에 의한 압력에 의한 힘을 온전히 그대로 전달받는다. 따라서 평탄각이 적용된 캠 링은 압력이 최대 수직력으로 모두 전환되어 이를 견딜 수 있도록 설계되어야만 한다. 평탄각이 증가할수록 압력에 의한 최대 수직력을 받는 영역 또한 넓어지므로 평탄각의 크기는 유체의 압력과 캠 링의 재질 등 다양한 요소에 의해 결정되는데, 통상 $0 \sim \pm 2.5^\circ$ 범위로 설계한다.¹⁰⁾

정현파 곡선을 바탕으로 피스톤 상사점 및 하사점에 0° , $\pm 1.5^\circ$, $\pm 2.5^\circ$ 의 평탄각이 각각 부여된

캠 링 형상을 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12 상부의 확대된 두 형상은 평탄각이 적용된 상사점 및 하사점을 나타내고, 하부의 확대된 두 형상은 평탄각에 따른 상승 및 하강 행정 기울기의 차이를 나타낸다. 부여된 평탄각이 증가할수록 행정 거리의 변함없이 행정의 기울기는 증가한다.

정현파 곡선을 바탕으로 피스톤 행정의 상사점과 하사점에 0 , ± 1.5 및 $\pm 2.5^\circ$ 의 평탄각을 각각 부여한 캠 링 형상을 대상으로 회전 각도에 따른

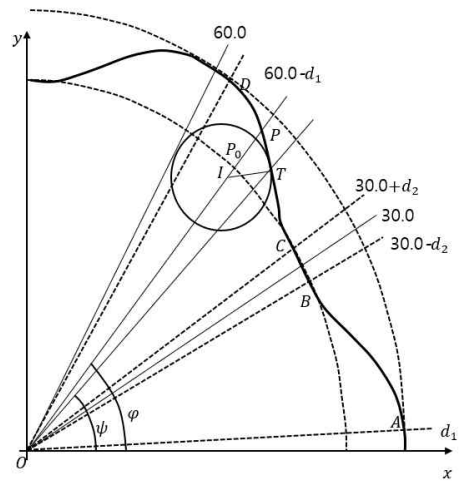


Fig. 11 Part of the cam profile and roller with flat angle

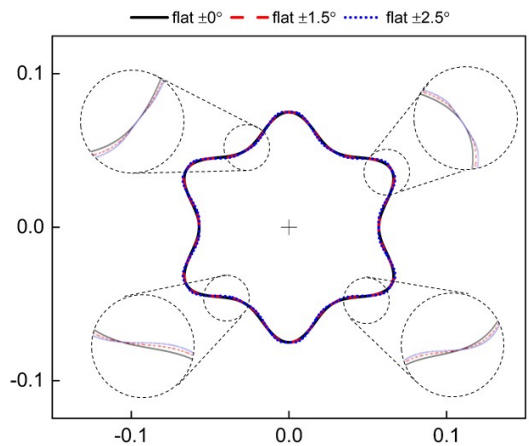


Fig. 12 Sinusoidal cam rings with flat angles of 0 , ± 1.5 and ± 2.5 degrees

모터의 출력 토크 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13에서 검은 실선은 평탄각을 부여하지 않은 경우이고, 붉은 파선은 $\pm 1.5^\circ$, 푸른 점선은 $\pm 2.5^\circ$ 에 해당하는 평탄각을 부여한 캠 링 형상의 출력 토크를 각각 의미한다. 평탄각이 0, ± 1.5 및 $\pm 2.5^\circ$ 일 때 평균 토크는 1,870, 1,831 및 1,798 Nm로 각각 계산되었다. 또한 토크 맥동율은 각각 0.387, 0.362 및 0.340으로 확인되었다. 따라서 부여된 평탄각이 증가할수록 평균 토크는 감소하나 최소 토크가 증가하여 토크 맥동은 감소하는 것으로 이해된다.

Table 3에 평탄각을 0~ $\pm 2.5^\circ$ 의 범위에서 $\pm 0.5^\circ$ 씩 변화시켜가면서 계산된 각 모터의 평균 토크와 토크 맥동을 나타낸다. 전술한 바와 같이, 부여된 평탄각이 증가할수록 평균 토크와 토크맥동이

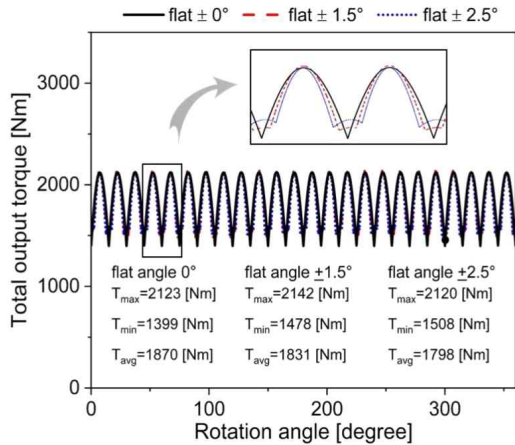


Fig. 13 Total output torque of Sinusoidal cam rings with flat angles of 0, ± 1.5 and ± 2.5 degrees

Table 3 Torque characteristic by flat angle

Flat angle [degree]	Average torque [Nm]	Torque ripple rate
± 0.0	1870	0.387
± 0.5	1858	0.379
± 1.0	1845	0.371
± 1.5	1831	0.362
± 2.0	1815	0.352
± 2.5	1798	0.340

감소하는 것을 확인할 수 있다. 상기의 결과를 통해, 정격 토크 1,850 Nm 이상을 만족하면서 토크 맥동이 저감된 다행정 레이디얼 피스톤 모터를 설계하기 위해서는 $\pm 0.5^\circ$ 의 평탄각이 적용되어야 할 것으로 사료된다.

6. 결론

본 논문에서는 캠 링 형상에 따른 토크 특성을 규명하기 위하여 다행정 레이디얼 피스톤 모터를 대상으로 450 bar의 일정한 공급압력을 가정하여 캠 링 형상에 따른 토크 시뮬레이션을 수행하였다. 대상이 된 다행정 레이디얼 피스톤 모터는 6개의 로브와 8개의 피스톤을 가지는 모델이며, 이를 위해 에피트로코이드 곡선과 정현파 곡선의 방정식을 적용하여 캠 링의 형상을 각각 설계하였다.

설계된 각각의 캠 링 형상을 이용하여 기구학적 토크 특성을 해석하였으며, 이를 통해 요구되는 정격 토크를 만족하며 토크 맥동이 저감화된 다행정 레이디얼 피스톤 모터를 설계하기 위해서는 정현파 형 캠 링 형상이 에피트로코이드 형 캠 링 형상에 비해 상대적으로 우수함을 확인하였다. 토크 맥동 저감을 목적으로 정현파형 캠 링 형상에 평탄각을 각각 부여하고, 이에 따른 캠 링 형상의 변화가 토크 특성에 미치는 영향을 확인하였다. 이를 통해 평탄각이 $\pm 0.5^\circ$ 인 경우, 요구되는 정격 토크를 만족하면서 토크 맥동이 최소화된 다행정 레이디얼 피스톤 모터를 설계할 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서는 유압유의 압축성, 누설 및 톨러와 캠 링의 마찰력 등을 무시한 기구학적 토크 특성만을 해석하였으나, 후속 연구에서는 무시된 유압유의 압축성, 누설 및 마찰력 등을 포함한 다행정 레이디얼 피스톤 모터의 정밀 시뮬레이션 및 실험을 수행할 예정이다.

후 기

이 논문은 국립부경대학교 자율창의학술연구비 (2023년)에 의하여 연구되었음.

Author contributions

Y. J. Jo; Investigation, Resources, Software, Visualization and Writing-original draft. S. W. Ji; Conceptualization, Formal analysis, Data curation, Funding acquisition, Methodology, Project administration, Supervision, Validation and Writing-review & editing.

References

1. I. Y. Lee, 2012, "Experimental and Numerical Verification of Pressure/Flow pulsation in Radial Piston Pump", KSFC Spring Conference, 133-136.
2. J. W. Smith, 1985, "Low-Speed, High-Torque Radial Piston Hydraulic Motors; The New Generation", SAE Transactions, 94, 768-771. (<https://doi.org/10.4271/851538>)
3. Y. J. Nam, 2019, "Design of Radial Piston Motor Camring for Reducing Pressure Ripple", KSFC Spring Conference, 125-128.
4. S. R. Choi, 2011, "A Basic Study on Simulation of Flow Ripple in Piston Pumps", MS thesis, Pukyong National University, 22-33.
5. I. Y. Lee and S. R. Choi, 2011, "Discharge Flow Characteristics of a Rotating-Cam and Fixed-Cylinder Type Radial Piston Pump", Journal of the Korea Fluid Power Systems Society, 8(1), 10-18.
6. N. Ursu-Fischer, M. Ursu and M. T. Chima, 2008, "The Study of the Average Torque of the Hydraulic Motor with Radial Pistons and Cam with Sinusoidal Profile", Scientific Bulletin Series C: Fascicle Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology, 22(1), 1-6.
7. N. Ursu-Fischer, M. Ursu and M. T. Chima, 2008, "The Study of the Average Torque of the Hydraulic Motor with Radial Pistons and Cam with Epitrochoidal Profile", Scientific Bulletin Series C: Fascicle Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology, 22(1), 7-11.
8. C. I. Kang, 2021, "Development of a CAD/CAM System for Trochoid Cam Gears", MS thesis, Gyeongsang National University, 5-8.
9. J. Ivantysyn and M. Ivantysynova, 2003, "Hydrostatic Pumps and Motors : Principles, Design, Performance, Modelling, Analysis, Control and Testing", Tech Books International, India, 390-393.
10. X. Zheng and L. Zhang, 2018, "Design of a Kind of Multi Cylinder High Pressure Radial Piston Pump", Machine Tool & Hydraulics. 46(2), 81-84. (<https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3881.2018.02.023>)