

내부로터가 다양한 곡선의 조합으로 구성된 제로터의 설계 Design of a Gerotor with the Inner Rotor composed of various curved lines

*최태훈¹, 정성윤², 조해용³, #김철²

*T. H. Choi¹, S. Y. Jung², H. Y. Cho³, #C. Kim(chulki@pusan.ac.kr)²

¹부산대학교 기계공학부 기계시스템설계전공, ²부산대학교 기계기술연구원, ³충북대학교 기계공학부

Key words : Hypocycloid, Epicycloid, Involute, Inner Rotor, Outer Rotor, Gerotor

1. 서론

자동차 엔진의 윤활장치는 엔진의 작동을 원활하게 하고 수명을 오래 유지하기 위해 각 운동마찰부분에 오일을 공급하는 필수장치이다. 윤활장치의 구성품 중 하나인 오일펌프는 유량, 내구성, 소음 및 소형화 측면에서 장점을 가지는 내접형 기어펌프가 주로 사용된다. 하지만 오일펌프의 에너지 손실률은 엔진 전체의 약 10%에 달하며 자동 변속기의 경우 20~30%까지 증가한다.¹ 따라서 자동차 연비 개선을 위해 오일펌프의 에너지 손실률 저감은 반드시 필요하며 그러기 위한 방법 중의 하나로써 오일펌프에 쓰이는 로터의 두께를 줄이는 것이 가능하다. 그러나 두께를 줄이면 유량도 함께 줄어들므로 로터 두께를 줄이더라도 요구되어지는 유량의 조건을 만족시키기 위해서는 고유량의 특성을 가지는 로터개발이 필요하다. 또한 로터 구동시 발생하는 소음저감을 위해서 저맥동을 갖는 로터의 개발이 요구된다.

기존의 트리코이드(Trichoid) 방식의 로터 치형에서는 외부로터 로브형상을 다양한 곡선으로 조합하여 구성하고 이를 바탕으로 내부로터를 생성하였다. 그리고 유량극대화를 위해 내부로터 및 외부로터 간의 편심량을 크게 하는 방법이 사용되었다. 하지만 편심량이 커질수록 내부로터 이끝의 폭이 좁아지기 때문에 제작상의 한계조건을 만족하기 위해서는 더 이상 크게 할 수 없는 한계 편심량이 존재하게 된다.

이에 본 연구에서는 다양한 형태의 곡선을 조합 및 삽입하여 내부로터를 구성하고 이를 바탕으로 외부로터를 생성하는 방식으로 로터 치형을 창출하고자 한다. 내부로터에 임의의 곡선을 삽입하면 내외부로터 간의 편심량을 트리코이드 치형의 한계 편심량보다 크게 하더라도 내부로터 이끝 폭이 제작상의 한계조건을 만족시킬 수 있게 된다. 이를 위해 먼저 하이포사이클로이드 및 에피사이클로이드 곡선을 조합하거나 인벌루트 곡선을 삽입하여 내부로터를 구성하고 이를 바탕으로 외부로터를 생성하는 방식²을 우선 채택하였다. 이후 이를 바탕으로 기존에 사용한 곡선 이외 다양한 곡선의 조합으로 구성된 내부로터 및 외부로터를 생성하여 고성능의 제로터를 설계하고자 한다.

2. Hypo+Epi 방식의 제로터 설계

구름원이 피치원 둘레를 미끄럼 없이 굴러갈 때, 구름원 위의 한 점이 그리는 곡선을 사이클로이드 곡선이라 한다. 이 때 구름원이 피치원 둘레 안에서 접촉하여 구를 때 생기는 곡선을 하이포사이클로이드 곡선이라 하고, 반대의 경우를 에피사이클로이드 곡선이라 한다. 잇수가 9개인 내부로터를 생성함에 있어서 한 피치구간 안에 이뿌리면의 치형은 하이포사이클로이드 곡선으로, 이끝면의 치형은 에피사이클로이드 곡선으로 구성한다. Fig 1은 한 피치구간의 내부로터 치형 곡선을 나타낸다. 반경이 r_h 인 구름원이 피치원 내부에서 반바퀴를 굴러 양끝의 하이포사이클로이드 곡선을 생성하고 반경이 r_e 인 구름원이 피치원 외부에서 한바퀴를 굴러 가운데의 에피사이클로이드 곡선을 생성한다. 여기에서 각 구름원의 중심이 이동한 각은 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 이며 이들의 합은 한 피치각의 크기와 같다.

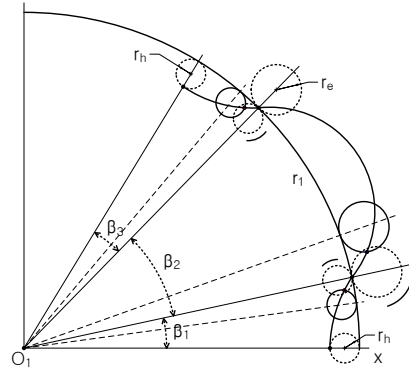


Fig. 1 One pitch of Inner Rotor

편심량을 e 라고 했을 때 내부로터 중심점은 $O_1 = (e, 0)$ 이며 외부로터 중심점은 $O_2 = (0, 0)$ 이다. 또한 로터 외경은 29mm이며 외부로터 치저부에서 로터 외경까지의 거리는 2.5mm로 한다. 구름원 반경 및 이동각 사이의 관계는 다음과 같으며 여기에서 tp 는 tip clearance를 뜻한다.

$$r_i = eZ_1, \quad \rho_{1max} = \rho_{2max} - e - tp = r_i + 2r_e, \quad 2\pi(r_h + r_e)Z_1 = 2\pi r_i \quad (1)$$

$$\pi r_h = r_i \beta_1, \quad 2\pi r_e = r_i \beta_2, \quad \pi r_h = r_i \beta_3$$

Fig 1에서 내부로터 이끝 폭(t_i)은 에피사이클로이드 곡선의 양 끝점사이의 거리이며 이를 2mm로 했을 때 식(1)을 참조하여 한계 편심량을 구하면 다음과 같다.

$$t_i = 2r_i \sin \frac{\beta_2}{2} = 2, \quad e_{lim} = 1.134 \quad (2)$$

x 축을 기준으로 구름원 이동각을 β 라고 했을 때, 각 구간별 구성방정식을 유도하고 내부로터(IR)를 생성한다. 또한 IR, 점 O_1 및 x 축을 O_2 를 중심으로 α 만큼 CCW 방향으로 회전한 후 점 O_1 는 O_1' 으로, x 축은 x' 축으로 변환된다고 하자. 이때, 회전된 내부로터를 O_1' 을 중심으로 α' 만큼 CW 방향으로 다시 회전시키면 IR' 으로 변환되는데 IR' 과 x' 축과의 교점에서 tp 만큼 떨어진 점을 외부로터(OR) 위의 점으로 지정한다. IR 및 OR 위의 점을 각각 (x, y) 및 (X, Y) 라고 하면 외부로터의 구성방정식은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \left(1 - \frac{Z_2}{Z_1}\right) & -\sin \alpha \left(1 - \frac{Z_2}{Z_1}\right) \\ \sin \alpha \left(1 - \frac{Z_2}{Z_1}\right) & \cos \alpha \left(1 - \frac{Z_2}{Z_1}\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - e \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} (e + tp) \cos \alpha \\ (e + tp) \sin \alpha \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{Z_1}{Z_2} \arctan \left(\frac{y}{x - e} \right) \quad (4)$$

AutoLLSP 프로그램 및 AutoCAD를 사용하여 $tp=0$ 일 때 상기 구성방정식을 바탕으로 치형을 생성하고 내외부로터간 간섭유무를 체크한 결과 $\beta_1 + 0.5\beta_2$ 의 구간 내에서 간섭이 발생하였다. 이에 외부로터 구성방정식 수정 후 축대칭으로 한 피치구간만큼 외부로터를 생성하였다. 또한 내외부로터 생성 후 간섭없이 회전시물레이션을 수행하였다.

3. Hypo+Involute+Epi 방식의 제로터 설계

Hypo+Epi 방식의 제로터에서 하이포사이클로이드 곡선과 에피사이클로이드 곡선 사이에 인벌루트 곡선을 삽입하여 내부로터를 구성하였다.

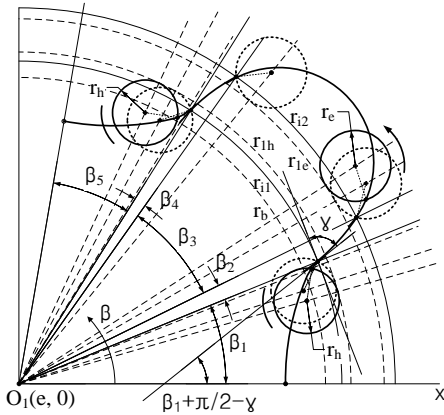


Fig. 2 One pitch of Inner Rotor

Fig 2에서 한 피치구간의 내부로터는 각각 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ 구간의 Hypo, Involute, Epi, Involute, Hypo 곡선으로 구성되어 있으며 각 곡선의 기초원 중심은 내부로터 중심점과 일치한다. 인벌루트 기초원 반경은 하이포사이클로이드 곡선의 기초원 반경보다 작으며 그 차이는 구름원 직경 이내로 설정하였다. 그리고 하이포사이클로이드 곡선과 인벌루트가 만나는 점은 두 곡선의 기초원 반경 사이에 존재하고 그 점에서 양 곡선의 순간기울기는 같은 것으로 설정하였으며 그 값은 식 (5)와 같다. 여기에서 γ 는 두 곡선이 만나는 점에서 Fig 2에서와 같이 r_{11} 을 반경으로 하는 원에의 접선과 두 곡선에의 접선이 서로 이루는 각도이다. 마찬가지로 인벌루트와 에피사이클로이드 곡선 사이에도 동일한 조건을 적용하였으며 내부로터 치선경 ρ_{1max} 는 식 (6)과 같다.

$$\text{순간기울기} = \tan\left(\beta_1 + \frac{\pi}{2} - \gamma\right) \quad (5)$$

$$\rho_{1max} = \rho_{2max} - e - tp = r_{1e} + 2r_e \quad (6)$$

x 축을 기준으로 구름원의 이동각을 β 라고 하고 Fig 2에서와 같이 구름원이 점선 원에 멈췄을 때의 이동각을 코사인 제 2 법칙을 이용하여 계산한 후 각 구간별로 하이포 및 에피사이클로이드 곡선의 구성방정식을 유도하였다. 또한 인벌루트 곡선에서는 x 축을 기준으로 곡선 위의 점까지의 각도를 β 라고 했을 때 Fig 3에서와 같이 각도 ϕ 를 정의하여 구성방정식을 유도하였다.

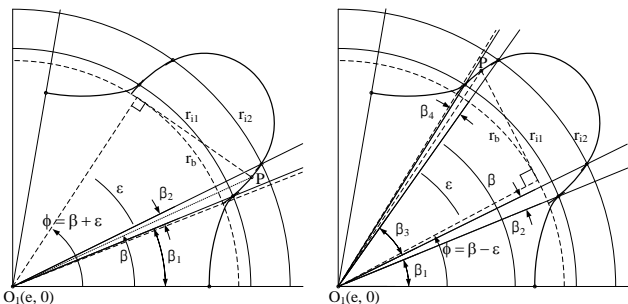


Fig. 3 Definition of angle of Involute curve

입력가능한 e와 γ 값에 대해 각각의 곡선이 만나는 점에서의 조건을 나열하여 정리하면 4 개의 방정식으로 쓸 수 있으며 이에 대한 변수는 r_b, r_e, r_h 및 C_i 의 4 개로 지

정하였다. 여기에서 C_i 는 치높이 ($H=2e$)에 대한 삽입된 인벌루트 곡선의 높이이며 이에 대한 정의 및 Fig 2에서 r_i 와 r_b 와의 관계식은 다음과 같다.

$$HC_i = r_{i2} - r_{i1}, \quad r_b = r_{i1} \sin \gamma \quad (7)$$

4 개의 방정식을 만족하는 4 개 변수값을 구한 뒤 유도된 구성방정식을 바탕으로 내부로터를 생성하고 또한 식 (3), (4)를 이용하여 외부로터를 생성하였다. 이때 내외부로터 간의 간섭유무를 체크한 결과 Hypo+Epi 방식의 제로터에서와 마찬가지로 β 가 $\beta_1 + \beta_2 + 0.5\beta_3$ 이내의 범위에서 간섭이 생기는 것을 발견하였다. 이에 외부로터 치형 수정 후 축대칭을 이용하여 한 피치구간만큼 외부로터를 생성한 결과, 최종적으로 Fig 4와 같은 결과가 도출되었다. 이때, $e=1.27, \gamma=75^\circ, tp=0.011$ 이며 내부로터에 인벌루트 곡선이 삽입된 구간을 두 개의 동심원으로 표시하였다.

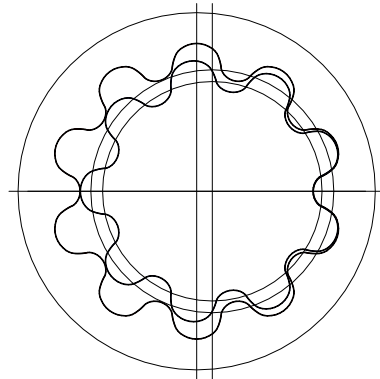


Fig. 4 Inner Rotor and Outer Rotor

상기 Fig 4의 치형에 대해 회전 시뮬레이션 수행결과 내외부로터 간의 간섭이 발견되지 않았다. 이때의 내부 및 외부로터 이빨 폭은 각각 3.28mm, 2.46mm로서 제작상의 한계조건을 만족하는 가운데 편심량은 식 (2)의 한계 편심량보다 큰 값으로 설정하였다. 이는 편심량에 구속받지 않고 치높이 ($H=2e$)를 키울 수 있으며, γ 값을 조절하여 이빨 폭 설정에도 제한을 받지 않음을 뜻한다.

4. 결론

내부로터 잇수가 9 개인 제로터에 대해 여러가지 곡선을 조합하여 내부로터를 구성하였고 또한 임의의 곡선을 삽입하여 그 이전의 한계 편심량보다 큰 값에서의 로터를 생성할 수 있었다. 이는 상대적으로 치높이의 증가를 뜻하며 유량증대에 결정적 영향을 미치지므로 요구되어지는 유량에의 비율의 역수로 로터 두께를 얇게 할 수 있다. 이로써 보다 적은 구동력으로도 로터를 작동시킬 수 있게되므로 에너지손실률을 줄여 연비개선에 도움을 주게 된다. 또한 앞으로 상기 제시된 곡선 뿐만아니라 여러가지 다른 형태의 곡선을 조합하여 다양한 방식의 제로터를 창출하고 로터 성능을 표현하는 인자를 이론식으로 유도하여 최적 성능의 제로터를 설계할 계획이다.

후기

본 연구는 교육과학기술부의 지역혁신인력양성사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. Harumitsu SASAKI, Naoki INUI, Yoshiyuki SHIMADA and Daisuke OGARA, "Development of High Efficiency P/M Internal Gear Pump Rotor (Megafloid Rotor)," SEI Technical Review, **66**, 124-128, 2008
2. Sumitomo, "내접 기어식 펌프 및 그 펌프의 내측 회전자," 공개특허, KR-10-2006-0032634