

내부 펌프의 새로운 로버 설계에 관한 연구

장영준*, 김재훈**, 한승무***, 김철#

A Study on the Design of a New Rotor in Internal Pumps

Young June Chang*, Jae Hun Kim**, Seung Moo Han*** and Chul Kim#

ABSTRACT

A internal lobe pump is suitable for oil hydraulics of machine tools, automotive engines, compressors, constructions and other various applications. In particular, the pump is an essential machine element of an automotive engine to feed lubricant oil. The subject of this paper is the theoretical analysis of internal lobe pump whose the main components are the rotors: usually the outer one is characterized by lobes with circular shape, while the inner rotor profile is determined as conjugate to the other. The topic of this paper is the design of a new rotor, which is based on specific performance as different types depending on the shape of the lobe of the outer rotor. First, the design of internal lobe pumps with circular, elliptical, and their combined lobe profiles is considered. The latter is a new type of lobe profile with special shape whose curvature follows a definite function. Then we introduce the performance indexes used for the comparison. Some of these indexes, such as flow rate and flow rate irregularity, are commonly used for the comparison, while specific slipping is particularly suitable in this case. It is possible to notice that the circular and elliptical type is comparable to the circular one or the elliptical one in terms of flow rate irregularity, but has improved performance in terms of specific slipping. Results obtained from the analysis enable the designer and manufacturer of oil pump to be more efficient in this field.

Key Words : Elliptical lobe(타원 궤적), Flow rate irregularity(유량맥동), Internal lobe pumps(내부로버펌프), Specific flow rate (비유량), Specific slipping(비미끄럼틀)

기호설명

d : 외부로터 중심과 곡률반경 중심사이의 거리
 e : 내부 및 외부로터 중심 사이의 거리
 O₁ : 내부로터 중심점

O₂ : 외부로터 중심점
 O_{l2} : 곡률반경 중심점
 P : 내부 및 외부로터 접촉점
 P_m : 내부로터 궤적점

접수일: 2006년 2월 22일; 게재승인일: 2007년 1월 18일

* 부산대학교 기계공학부

** 부산대학교 정밀정형및금형가공연구소

*** 경희대학교 동서의료공학과

부산대학교 기계기술연구소

E-mail chulki@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-2489

- b : 로터 두께
- k : 타원의 형상계수
- s₁ : 내부로터 이동한 거리
- s₂ : 외부로터 이동한 거리
- S.S. : 비미끄럼틀
- Q : 일회전당 유량
- R : 유량맥동
- r₁ : 내부로터 피치반경
- r₂ : 외부로터 피치반경
- z₁ : 내부로터 로버의 개수
- z₂ : 외부로터 로버의 개수
- α, α' : 외부로터 회전각도
- θ_{z1} : α'회전시 접촉점과 그 이전의 내부로터
 궤적위의 점과 이루는 각
- θ_{z2} : α'회전시 접촉점과 그 이전의 외부로터
 궤적위의 점과 이루는 각
- ρ : 곡률반경 궤적의 곡률반지름
- ρ₁ : 내부로터 궤적의 곡률
- ρ₂ : 외부로터 궤적의 곡률
- φ : 내부로터 회전각

1. 서론

오일 펌프(oil pump)는 다른 펌프에 비하여 소음이 적어 엔진 율활을 위한 율활유의 공급원이나 자동 변속기의 유압원으로 널리 사용되고 있다. Colbourne¹은 내부 로터와 외부 로터의 접촉을 시뮬레이션 하여 내부 로터 치형의 좌표를 구하고 내부 로터와 외부 로터의 치형곡선으로 폐쇄되는 챔버에서의 면적을 계산하였다. Sae-gusa²등은 내부 로터를 고정시키고 외부 로터를 회전시켜 외부 로터의 치형인 원호의 중심에 대한 궤적을 구하고, 내부 로터와 외부 로터의 물림 특성으로부터 내부 로터의 치형을 구하는 식을 유도하였다. 최근 Tsay^{3,4}는 절삭과정을 시뮬레이션 하여 내부 로터의 치형을 구하는 방법을 발표하였다. 이성철⁵등은 운전 특성의 해석을 실시하였고 김충연⁶등은 제로터 설계변수에 따른 접촉응력의 변화를 관찰하였다. 또한 Kim⁷등은 지로터 펌프인 트로코이드의 치형에 관한 치형방정식을 유도하는 새로운 방법을 제안하고 이를 토대로 내외부로터의 궤적, 접촉점의 궤적, 회전시뮬레이션, 유량 및 유량맥동등을 자동적으로 구하는 통합적 시스템을 구축했다.

본 연구에서는 원 또는 타원형의 로버(lobe)형상

을 가진 외부로터의 설계변수를 고려하여 운동학적인 분석을 수행하였다. 이러한 연구를 통하여 외부 로터가 원 또는 타원의 일부분일때 기하학적인 설계한계 영역범위 안에서 유량 및 유량맥동과 미끄럼틀을 구하고 이를 비교분석하여 원 및 타원의 형상이 조합된 로버 형상을 갖는 외부 로터로부터 새로운 로버 형상의 내부로터를 개발하였다.

2. 로터의 기구학 및 운동학

내외부 로터의 피치원이 교차되는 피치점(P_{int})을 고정시키고 외부로터를 피치원의 중심(O₂)에 대하여 회전시켜 치형 방정식을 유도했다. 외부 로터 피치원의 중심(O₂), 내부 로터 피치원의 중심(O₁), O₂와 O₁사이의 편심량(e), 외부 로터가 임의의 형상을 갖는 곡률의 일부분일 때의 곡률 반경(ρ_θ) 등을 Fig. 1에 도시했다.

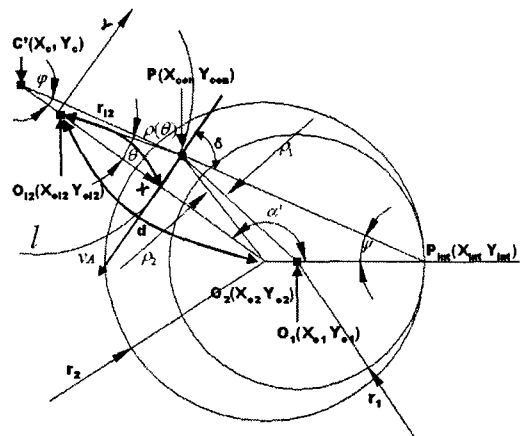


Fig. 1 Conjugated profile tracing

외부 로터의 로버 개수, 내부 및 외부로터의 피치원 반경은 식(1)과 같다.

$$z_2 = z_1 + 1, \quad r_1 = ez_1 \quad r_2 = ez_2 \quad (1)$$

피치점(P_{int})에서 외부로터 곡률궤적의 법선중심점(C')까지의 이은 직선과 곡률 궤적과의 교점이 접촉점(P)이다. 외부로터의 개수(z₁), 외부로터와 곡률 궤적간의 중심거리(d), 편심률(e)와 같은 입력변수의 값이 주어질 때 Fig. 2로부터 외부로터 곡률궤적

중심(O₁₂)을 외부로터 피치원의 중심에 대하여 α' 만큼 회전시킬 때 곡률 궤적의 중심 좌표는 식(2)로 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} X_{o12} \\ Y_{o12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha' & -\sin \alpha' \\ \sin \alpha' & \cos \alpha' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{o2} \\ Y_{o2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

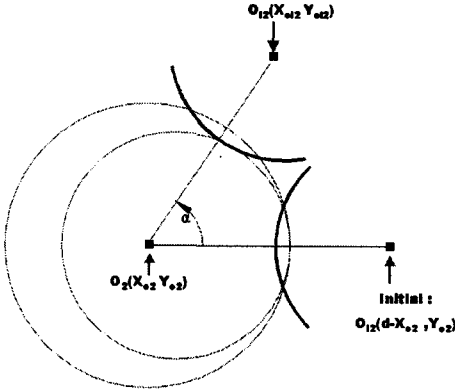


Fig. 2 Center of curvature in the rotated position

이때 접촉점(P)은 식(3)으로부터 구할 수 있다.

$$\vec{Cp} = \frac{\vec{Cp}_{int}}{|\vec{Cp}_{int}|} \rho(\theta) \quad (3)$$

여기서 ρ(θ)는 아래의 식으로 구할 수 있다.

① 원의 형상을 갖는 외부로터 일때

$$\rho = r_{12} \sqrt{\cos^2 \delta + \sin^2 \delta},$$

$$\tan \theta = \tan \delta, \tan \psi = \tan \delta \quad (4)$$

② 타원의 형상을 갖는 외부로터 일때

$$\rho = r_{12} \sqrt{\cos^2 t + k^2 \sin^2 t},$$

$$\tan \theta = k \tan \delta, \tan \psi = \frac{1}{k} \tan \delta \quad (5)$$

k : 장단축의 비

외부로터 피치원 중심에 대하여 회전각에 따른 외부로터 곡률궤적의 기하학적 변수들을 위의 과정을 통하여 계산한 후 수치해석적 방법으로 접촉점의 궤적을 구하고 이로부터 내부로터의 궤적을 구할 수 있다. 내부로터 궤적 위의 한 점, P_{in}(X_{in}, Y_{in})은 Fig. 3으로부터 식(6)로 표현된다.

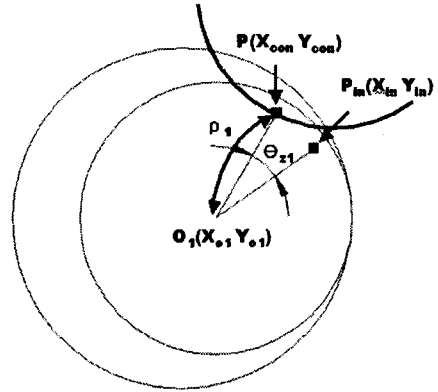


Fig. 3 Inner rotor profile tracing

$$\begin{pmatrix} X_{in} \\ Y_{in} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{z1} & -\sin \theta_{z1} \\ \sin \theta_{z1} & \cos \theta_{z1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{con} - X_{o1} \\ Y_{con} - Y_{o1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{o1} \\ Y_{o1} \end{pmatrix} \quad (6)$$

여기서, θ_{z1}은 식(7)로부터 구한다.

$$\frac{\theta_{z1}}{\theta_{z2}} = \frac{z_1}{z_2}, \theta_{z2} = z_2 \alpha' \quad (7)$$

3. 유량 및 맥동과 미끄럼률 계산

접촉점 및 내외부 로터의 치형에 관한 정보를 이용하여 순간유량 및 맥동을 계산할 수 있다. 작동유체는 비압축성 유체로써 체적의 변화가 발생하지 않는다고 가정하였다. Fig. 4에서 해칭된 챔버(Chamber)는 내외부 로터가 만나는 두 개의 접촉점을 경계로 닫혀진 폐구간 영역이다.

각 챔버는 로터가 일정한 간격으로 미소 각도만큼 회전함으로써 측면의 길이가 변화되어 체적이 증감한다. 이 때, 챔버가 유량의 변화에 기여하는 정도를 나타내는 것을 순간유량으로 정의한다. 이때 흡입이 일어나는 영역과 토출이 일어나는 영역이 나타내는 면적들은 각각 중심으로부터 접촉점 사이의 거리의 제곱에 비례하기 때문에 순간 유량(instantaneous flow rate)은 식(8)로 구할 수 있다.

$$q_i(\alpha) = \frac{1}{2} b \left[\left(|\vec{o_1A}|^2 - |\vec{o_1B}|^2 \right) \frac{r_2}{r_1} - \left(|\vec{o_2A}|^2 - |\vec{o_2B}|^2 \right) \right] \omega_1 \quad (8)$$

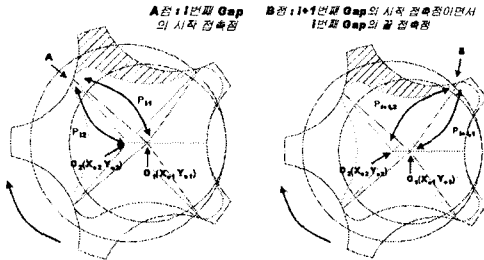


Fig. 4 Evaluation of the contribution to the flow rate given by each flank of rotors

Fig. 4에서 처럼 내부 및 외부 로터의 중심점에서 i 번째 챔버의 시작 접촉점 (A), 끝 접촉점 (B)까지 거리는 각각 식(9), (10)으로 구한다.

$$|\overline{o_1A'}| = \rho_{i,1}, \quad |\overline{o_2A'}| = \rho_{i,2} \quad (\alpha = \alpha_i) \quad (9)$$

$$|\overline{o_1B'}| = \rho_{i+1,1}, \quad |\overline{o_2B'}| = \rho_{i+1,2} \quad (\alpha = \alpha_{i+1}) \quad (10)$$

여기서, $\alpha_{i+1} = \alpha + \frac{2\pi}{z_2}$ 이다.

일 회전당 유량은 식 (11)과 같다.

$$Q = z_1 \int_0^{2\pi/z_2} q(\alpha) d\alpha = z_1 \sum_{i=1}^{2\pi/z_2} q_i \quad (11)$$

비유량(specific flow rate)은 식 (12)로 구한다.

$$R = \frac{Q}{\pi \rho_{i,max}^2 b} \quad (12)$$

소음 및 진동에 영향을 미치는 유량맥동(Flow rate irregularity)은 식(13)과 같다.

$$i = \frac{q_{max} - q_{min}}{q_{average}} \quad (13)$$

비미끄럼률은 식(14)로 부터 구할 수 있다.

$$S.S. = \frac{|s_2 - s_1|}{s_1} \quad (14)$$

여기서, s_1 과 s_2 는 Fig. 5에서와 같이 회전량에 따라서 접촉점이 내외부로터의 형상으로부터 각각 움직인 거리이다.

4. 로버 형상 설계

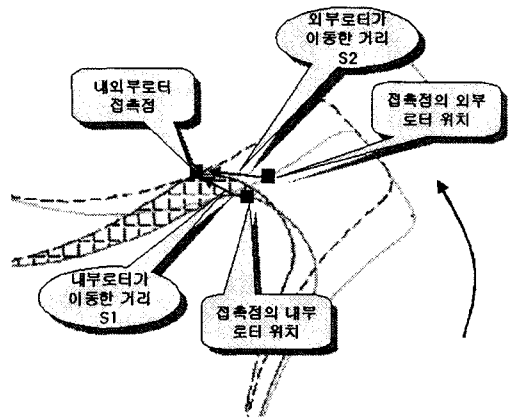


Fig. 5 Specific slipping

로버 형상 설계를 위한 설계변수로는 외부로터의 치차의 개수(z_2), 내외부로터 중심간의 거리(e), 곡률반경(r_{t2}), 곡률반경의 중심과 외부로터의 중심간의 거리(d), 형상계수(k)가 있다. 이러한 설계변수 값으로부터 치형방정식에 의해서 내부로터 및 외부로터의 궤적을 구할 수 있다.

4.1 원의 형상을 갖는 외부로터

원의 형상을 갖는 외부로터의 경우 현장작업자와의 인터뷰를 통해 펌프의 효율에 영향을 미치는 유량 및 유량맥동을 우선 고려하고 그 후에 수명에 영향을 주는 미끄럼률을 고려하도록 목적함수의 우선 순위를 정하여 허용 압력각 이내이면서 내부로터의 형상이 첨점(cusp) 혹은 루프(loops or undercutting)⁷를 만들지 않는 범위에서 최적설계를 수행하였다. 이때 설계변수는 d/e , r_{t2}/e 로 선정하였다.

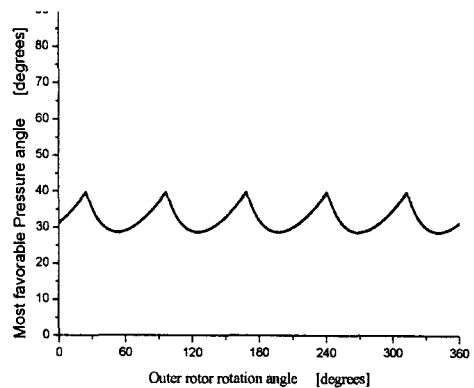


Fig. 6 Pressure angle between the Z_2 contact points

로터위의 접촉력이 방향과 힘의 작용점의 사잇각인 압력각은 외부로터의 회전각도 함수를 $2\pi/z_2$ 의 병진운동을 주기적으로 반복하는 각 연속적인 로버에 대하여 압력각의 기하학적인 도식을 수행할 수 있는데 $z_2(5)$ 개의 접촉점들 사이에서 허용되어지는 최소 압력각의 도식을 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 로버의 개수를 감소시킬수록 최소압력각의 크기가 커질 가능성이 높으므로 로터의 로버개수를 적절하게 선택하는 것이 좋다.

로터의 로버개수가 4/5개일 경우 d/e 와 r_{12}/e 를 변화시켜 구한 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 비유량 및 유량맥동을 각각 나타내었다. d/e 와 r_{12}/e 의 차가 매우 큰 왼쪽 부분은 압력각(δ_{opt})의 크기가 45° 보다 크고, d/e 와 r_{12}/e 의 차가 작은 오른쪽 부분은 침점이나 루프가 발생되는 범위이므로 유량 및 유량맥동의 계산을 제외시켰다.

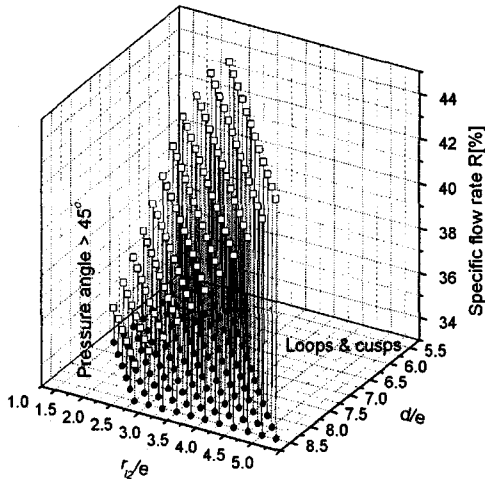


Fig. 7 Specific flow rate diagram for $z_1=4, z_2=5$

Fig. 7과 Fig. 8으로부터 d/e 와 r_{12}/e 의 차가 증가할수록 비유량(R)도 감소되고 유량맥동(i)도 감소됨을 알 수 있고 $d-r_{12}$ 값이 동일한 경우 유량 및 유량맥동의 값이 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

그러나 Fig. 9에서는 유량의 측면에서 $d-r_{12}$ 가 같은 값을 가지기 때문에 동일한 크기를 가진 펌프임에도 불구하고 접촉점이 로터 외곽을 따라 움직인 거리로 계산할 수 있는 비미끄럼틀이 상이함을 보여준다.

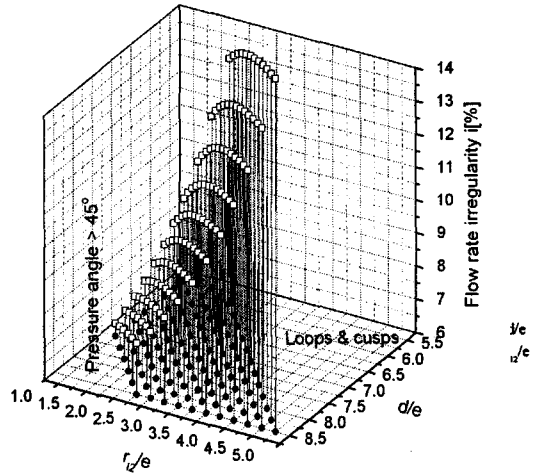


Fig. 8 Flow rate irregularity diagram for $z_1=4, z_2=5$

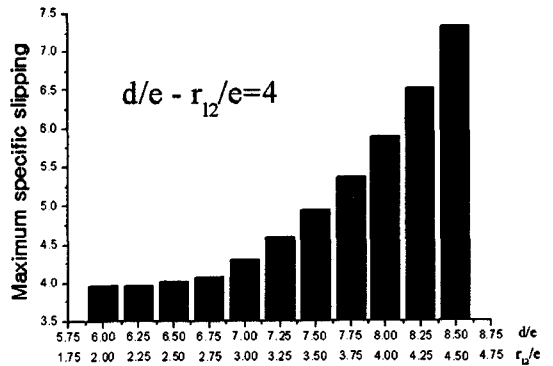


Fig. 9 Maximum specific slipping according to the same values of $d/e-r_{12}/e$

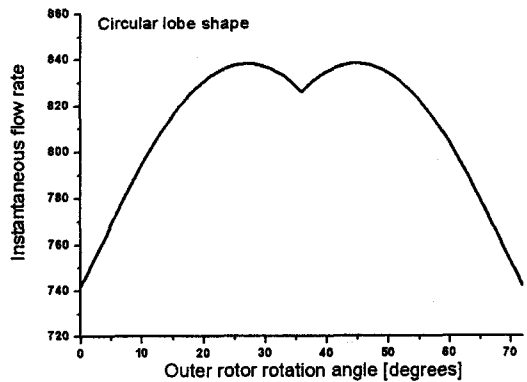


Fig. 10 Instantaneous flow rate for the case of " $d/e=6, r_{12}/e=2$ " in Fig. 9 of " $d/e=6, r_{12}/e=2$ " in Fig. 9

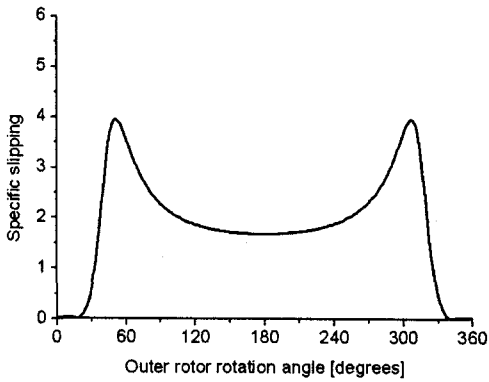


Fig. 11 Inner rotor specific slipping for the case

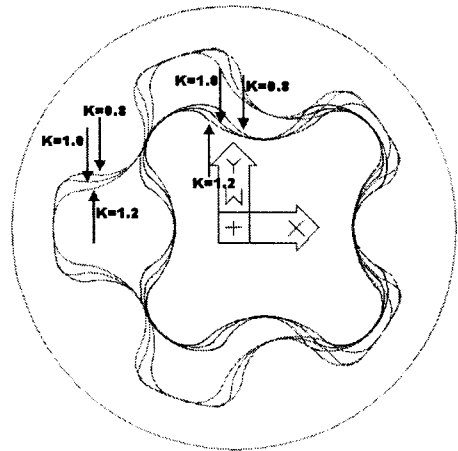


Fig. 13 Elliptical profiles according to shape factor(k)

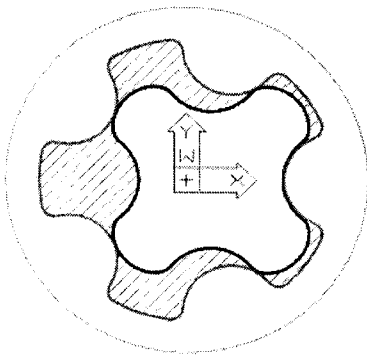


Fig. 12 The optimum rotors with the circular profile for $z_1=4, z_2=5$

Fig. 9에서 $d/e=6, r_{12}/e=2$ 인 경우에 외부로터 회전각에 따른 순간유량과 식(14)에 의하여 외부로터 회전각에 따른 비미끄럼률의 결과를 각각 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다.

이러한 과정을 통하여 최적의 유량 및 유량맥동을 가진 펌프들 중에서 비미끄럼률이 가장 좋은 경우를 Fig. 12에 나타내었다.

4.2 타원형상을 갖는 외부로터

타원의 형상을 갖는 외부로터의 설계 입력변수 중 원의 형상을 갖는 최적의 외부로터의 설계입력값을 일치시키고 Fig. 13와 같이 타원의 형상계수(k)를 변화시켜 가면서 타원형상을 갖는 외부로터와 이에 따른 내부로터를 설계하였다.

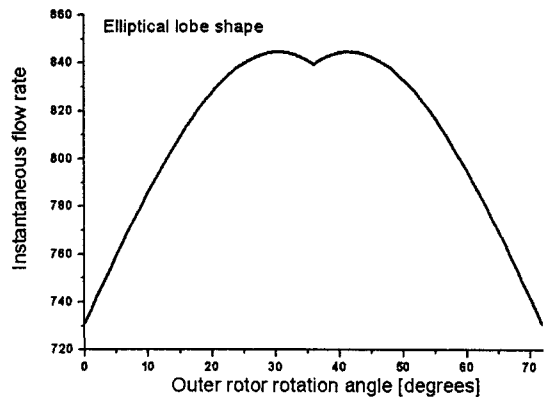


Fig. 14 Instantaneous flow rate for the case of "k=1.4" in Fig. 13

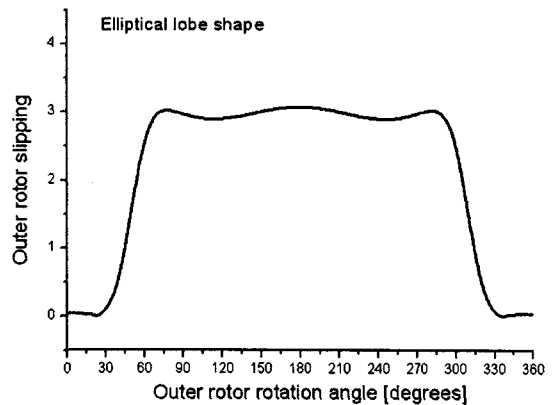


Fig. 15 Inner rotor specific slipping for the case of "k=1.4" in Fig. 13

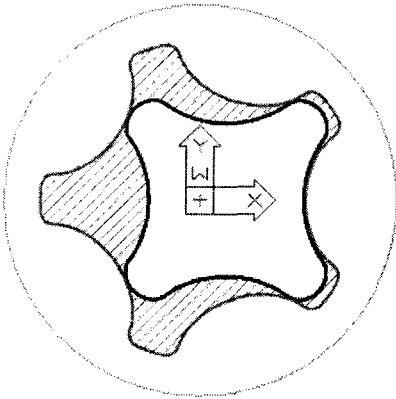


Fig. 16 The rotor with the elliptical profile($k=1.4$)

또한 타원의 형상계수를 변화시켜 구한 로터의 형상들 가운데 중의 최적인 경우의 순간유량 및 유량맥동을 Fig. 14에 비미끄럼틀은 Fig. 15에 각각 나타내었다. 타원형상을 갖는 로터와 원의 형상을 갖는 로터에 대하여 총유량, 순간유량을 비교하면 총유량은 거의 동일하지만 타원형상을 갖는 로터가 순간유량의 최소값에서는 낮고 최대값에서는 높아 유량맥동면에서 펌프의 성능이 감소되지만 비미끄럼틀의 최대값은 감소되어 비미끄럼틀면에서 펌프의 성능이 향상됨을 알 수 있었다.

이러한 결과로부터 얻어진 타원의 형상을 갖는 외부로터와 이에 따른 내부로터(형상계수, $k=1.4$)를 Fig. 16에 나타내었다.

4.3 원 및 타원의 조합형상을 갖는 외부로터

원 또는 타원의 궤적의 장점을 이용하여 원 및 타원의 조합된 형상을 갖는 외부로터로부터 내부로터를 설계하여 기존의 설계된 로터와 회전각도에 따른 유량, 유량맥동, 미끄럼틀을 비교하였다.

Fig. 17에 나타난 것과 같이 외부로터의 회전각도가 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 범위에서 원의 형상을 갖는 로터의 궤적을 따르고 $10^{\circ}\sim 36^{\circ}$ 범위에서는 타원의 형상을 갖는 로터의 궤적을 따르도록 설계하여 순간유량의 최소값은 증가시키고 최대값은 감소시켜서 이에 따른 저유량맥동과 고유량을 갖는 로터를 창출하였다. 또한 원 및 타원의 조합된 형상을 갖는 로터에 대하여 미끄럼틀을 향상시키기 위해 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 범위에서는 원의 궤적, $10^{\circ}\sim 130^{\circ}$ 범위에서는 타원의 궤적, $130^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 범위에서는 다시 원의 궤적을 따르도록

설계하여 전 범위내에서 비미끄럼틀 뿐만 아니라 최대 비미끄럼틀을 감소시켰고 이를 Fig. 18에 나타내었다.

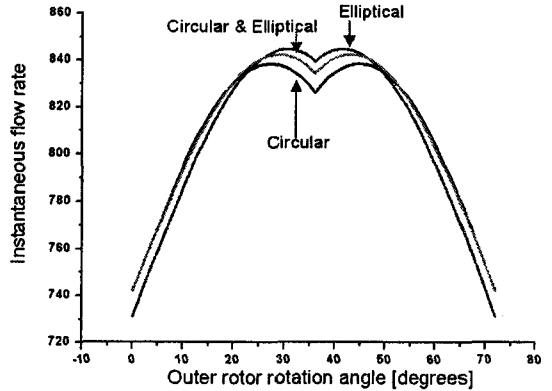


Fig. 17 Instantaneous flow rate for combined rotor with circular & elliptical profile

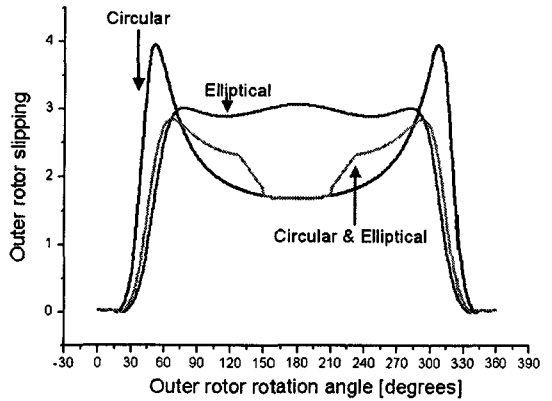


Fig. 18 Inner rotor specific slipping for combined rotors with circular & elliptical profile

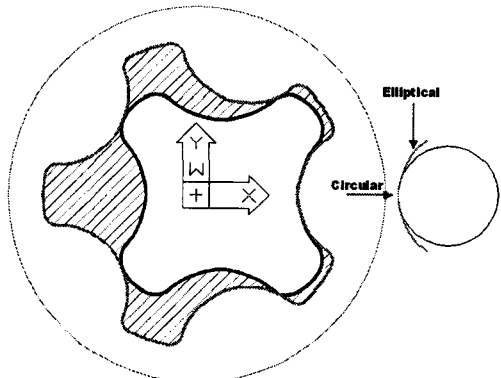


Fig. 19 Circular & elliptical profile

이러한 과정을 통하여 창출된 원 및 타원의 조합된 형상을 갖는 로터($e=2.0$, $r_{12}=8.0$, $d=12.0$, $k=1.4$)를 Fig. 19에 나타내었고 이는 원 또는 타원의 형상을 갖는 로터보다 유량, 유량맥동, 비미끄럼률 면에서 좋은 성능을 가짐을 Table 1에서 보여준다

Table 1 The performance index results according to the profile shape of the outer rotor

	Total flow rate (cc/rev)	Flow rate irregularity	Maximum specific slipping
Circular profile	4.076	12.176	3.956
Elliptical profile	4.065	14.433	3.070
Combined profile	4.183	12.688	2.840

5. 결 론

원 또는 타원형의 로버(lobe)형상을 가진 외부로터의 설계변수를 고려하여 운동학적인 분석을 수행하였다. 이러한 연구를 통하여 외부로터가 원 또는 타원의 일부분일때 기하학적인 설계한계 영역범위 안에서 유량 및 유량맥동과 미끄럼률을 구하고 이를 비교분석하여 원 및 타원의 형상이 조합된 로버형상을 갖는 외부 로터로부터 새로운 로버형상의 내부로터를 개발하였다.

1. 기하학적인 측면에서 설계 한계를 고려하여 침점이나 루프가 생기지 않는 범위에서 로터를 설계하였다.
2. 원 및 타원이 조합된 형상을 갖는 외부로터로부터 수치해석법으로 접촉점을 구한 후 새로운 내부 로터의 형상을 설계하였다.
3. 개발된 로터는 원 또는 타원의 형상을 갖는 로터를 보다 고유량, 저미끄럼률을 가졌다.

향후, 원 및 타원의 조합된 형상을 갖는 외부로터와 타원의 형상을 갖는 외부로터로부터 내부로터에 대한 최적설계를 수행하여 최적의 설계변수 값

을 구할 수 있는 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Colbourne, J. R., "Gear Shape and Theoretical Flow Rate in Internal Gear Pumps," Transactions of the CSME, Vol. 3, No. 4, pp. 215-223, 1975.
2. Saegusa, Y., Urashima, K., Sugimoto, M., Onoda, M. and Koiso, T., "Development of Oil-Pump Rotors with a Trochoidal Tooth Shape," SAE Paper, No. 840454.
3. Tsay, C. B. and Yu, C. Y., "Mathematical Model for the Profile of Gerotor Pumps," J. of CSME, Vol. 10, No. 1, pp. 41-47, 1989.
4. Yu, C. Y. and Tsay, C. B., "The Mathematical Model of Gerotor Pump Applicable to Its Characteristic Study," J. of CSME, Vol. 11, No. 4, pp. 385-391, 1990.
5. Lee, S. C. and Lee, S. N., "Design and Analysis of Gerotor for Hydraulic Motors," J. of KSTLE, Vol. 11, No. 2, pp. 63-70, 1995.
6. Kim, C. H., Kim, D. I., Ahn, H. S. and Chong, T. H., "Analysis of Tooth Contact Stress of Gerotor Hydraulic Motors," J. of KSTLE, Vol. 15, No. 2, pp. 164-170, 1999.
7. Kim, J. H. and Kim, C., "Development of an Integrated System of Automated Design of Gerotor Oil Pump," J. of The Korean society of precision engineering, Vol. 23, No. 2, pp. 88-96, 2006.