

고밀도 제로터 펌프용 신형 치형설계 및 특성해석 New Tooth Type Design and Characteristic Analysis for High Density Gerotor Pump

정헌술^{1*} · 임영민¹ · 함영복²

Heon-Sul Jung^{1*}, Young Min Lim¹ and Young-Bok Ham²

Received: 30 Sep. 2019, Revised: 12 Nov. 2019, Accepted: 21 Nov. 2019

Key Words : Gerotor Pump(제로터 펌프), Volumetric Displacement(배제용적), Rotor Profile(로터설계), Hyperclloid(하이퍼클로이드), Optimal Design(최적 설계)

Abstract: The gerotor type device is mainly used in low-speed, high-torque hydraulic motors, and is also applied as a small priming hydraulic pump. For this reason, many studies have been conducted to increase the efficiency of the gerotor pump. In this paper, we propose a new tooth profile design method different from the existing method. The new tooth design is made by modifying the tooth surface using the amplification function of the trajectories, created along the inner and outer rolling circles around the base circle. The shape of the mate rotor is then created using rotation simulation techniques. Such shapes are described as hyperclloid. The designed hyperclloid rotor is compared with the existing trochoid rotor, and the characteristics of the parameters and volumetric displacements are analyzed. Through this process, the optimum design with larger volumetric displacement than the existing rotor is achieved.

기호 설명

r_B : base circle radius, mm
 r_{Bec} : outer base circle radius, mm
 r_{Bhc} : inner base circle radius, mm
 r_{Rec} : rolling radius of outside lobe, mm
 r_{Rhc} : rolling radius of inside lobe, mm
 r_{Ro} : additional radius of outside lobe, mm
 r_{Ri} : additional radius of inside lobe, mm
 r_{IR}^{min} : inner rotor root of tooth radius, mm

r_{IR}^{max} : inner rotor end of tooth radius, mm
 r_{OR}^{min} : outer rotor root of tooth radius, mm
 r_{OR}^{max} : outer rotor end of tooth radius, mm
 Z_i : number of inner rotor gears, mm
 Z_o : number of outer rotor gears, mm
 e : eccentricity, mm

1. 서 론

제로터 펌프는 주로 저속, 고 토크 유압 모터에 사용되며 소형 유압 펌프로도 사용된다. 제로터 펌프는 높은 가동속도, 압력조건에 상관 없이 일정한 배출, 작은 부품수로 만들 수 있다는 장점을 가진다. 이러한 이유로 제로터 펌프는 유압펌프뿐만 아니라 파워 스티어링 유닛, 고속 가스 컴프레셔, 변속기 등에서 다양하게 사용되고 있다. 제로터펌프의 로터 치형은 다양한 방식이 있는데 그중 대표적인 트로코이드 치형의 경우 사이클로이드 곡선으로부터 내부로터를 생성한다. 트로코이드(Trochoid) 로터의 경우 기초원

* Corresponding author: hsjeong@kunsan.ac.kr
 1 Department of Mechanical Engineering, Kunsan University 54150, Korea
 2 Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials, Deajeon 34103, Korea
 Copyright © 2019, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(Base circle)의 직경과 구름원(Rolling circle)의 직경에 의해 로터의 잇수가 결정되고 이높이는 외측 구름원과 내측 구름원의 직경에 의해 결정된다. 그래서 펌프의 토출량은 기초원과 구름원에 따라 결정되기 때문에 이높이와 잇수의 설정에 관한 자유도가 낮아지고 토출량을 증가시키기가 어렵다는 문제가 있다. 위와 같은 문제로 제로터펌프의 배제용적을 증가시키기 위해 다양한 연구들이 진행되어져 왔다.¹⁾

관련 연구동향을 살펴보면 치형의 경우, Sasaki 등²⁾은 배제용적을 높인 Megafloid 로터를 개발하였고 Yoshida 등³⁾은 Geocloid 로터를 개발하여 더욱 높은 용량의 펌프를 개발하였다. 선행 연구자 최태훈 등⁴⁾은 하이포 및 에피 사이클로이드 곡선 사이에 원호 곡선을 삽입하여 내부로터를 설계하고 로터 회전시 물레이션 및 간섭회피를 위한 수정법을 통해 외부로터를 설계하는 방식의 제로터를 개발하였다. 김대명 등⁵⁾은 제로터의 이론적 설계방법을 이용하여 이론적 배제용적과 수치해석적 배제용적을 구하고 산출한 수치해석의 결과를 CAD의 폐윤곽 면적산출 기능을 이용한 결과와 비교하고 실험을 통하여 검증하였다. 유사한 연구로 CAD를 활용한 트로코이드 치형 제로터 펌프의 배제용적 계산⁶⁾, 제로터 펌프모터의 유량 및 배제용적에 관한 분석⁷⁾, 펌프 성능을 향상시키기 위한 로브 형상 또는 간극 설계에 관한 연구^{8, 9)} 등이 수행되었다.

한편 기어 펌프나 모터에 관련한 다른 관점의 연구 사례로는 기어 펌프나 모터의 이끝 틈새의 원주상 분포가 효율에 미치는 영향에 관한 연구¹⁰⁾와 유압 펌프 전동기의 PID 폐루프 제어알고리즘을 통한 유압모터의 속도 또는 토크 제어에 관한 연구^{11, 12)} 및 콘크리트 펌프트럭의 코어펌프 해석모델에 및 신뢰성 검토¹³⁾ 등이 수행되었다.

본 논문에서는 기존 치형의 설계의 단점을 개선하기 위해 증폭 함수를 사용하여 사이클로이드 치면을 수정함으로써 새로운 타입의 형상인 하이퍼클로이드 치형(HyperCloid)을 설계¹⁴⁾한다. 내부로터가 생성된 후, 회전 시물레이션 기법을 사용하여 내부로터나 외부로터로부터 맞물리는 치형을 만들고 배제용적을 산출하여 기존의 트로코이드 치형과 비교하고 설계인자 분석과 배제용적 해석을 통하여 특성을 알아낸다. 위와 같은 과정을 통한 자료를 토대로 최적설계를 하여 기존의 치형보다 배제용적이 큰 치형을 설계한다.

2. 신형 치형의 이론적 배경

Fig. 1에서 Hypercloid 치형의 로브를 나타내고 있다. 치형을 설계하기 위해서는 먼저 경계원과 구름원을 설정한다. 경계원은 로터의 중심에서 로브의 이끝 높이와 이뿌리 높이의 경계선이 이루는 원이다. 기초원은 경계원의 반경(r_B)에서 식(1)과 식(2)에서 보이는 것과 같이 바깥쪽 추가기준 반경(r_{Ro})만큼 증대된 바깥쪽 기초원과 안쪽 추가 기준반경(r_{Ri})만큼 감소된 안쪽 기초원으로 나누어 진다.

$$r_{Bec} = r_B + r_{Ro} \tag{1}$$

$$r_{Bhc} = r_B - r_{Ri} \tag{2}$$

구름원은 이끝 치형을 생성하는 이끝 구름원과, 이뿌리 치형을 생성하는 이뿌리 구름원으로 나누어진 다. 바깥쪽 하이퍼클로이드 치형 구름원의 반경(r_{Rec})과 안쪽 하이퍼클로이드 치형 구름원의 반경(r_{Rhc})은 로브의 개수(Z_i)에 따라 식(3)과 같은 관계를 가지고 있으므로 안쪽 하이퍼클로이드 치형 구름원의 반경(r_{Rhc}) 식(4)와 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{r_{Rec}}{r_B + r_{Ro}} + \frac{r_{Rhc}}{r_B + r_{Ri}} = \frac{1}{Z_i} \tag{3}$$

$$r_{Rhc} = r_{Bhc} \left(\frac{1}{Z_i} - \frac{r_{Rec}}{r_{Bec}} \right) \tag{4}$$

안쪽과 바깥쪽 하이퍼클로이드 치형 구름원의 궤적이 Fig. 1에서 이끝 높이의 꼭지점(P1)부터 이끝 높이와 이뿌리 높이의 경계점(P_B)을 지나 이뿌리 높이의 꼭지점(P2)를 지나서 로브의 형상을 나타낸다. P_B 부터 P1까지의 치형곡선의 수식은 식(5)~식(8)로 표현된다.

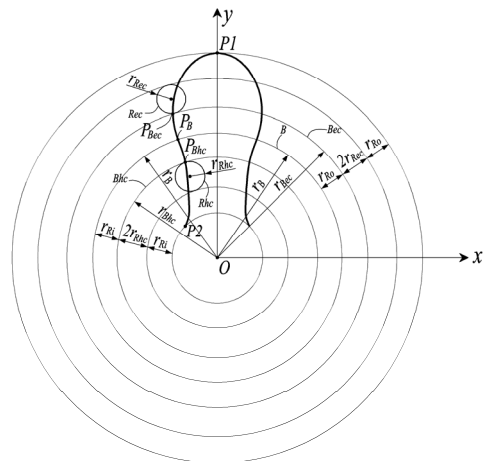


Fig. 1 Lobe shape of Hypercloid tooth

$$r_{ec}^A = r_B + f_{ec} \cdot (r_{ec} - r_B) \quad (5)$$

$$r_{ec} = \sqrt{x_{ec}^2 + y_{ec}^2} \quad (6)$$

$$x_{ec} = (r_{Bec} + r_{Rec})\cos\theta - r_{Rec}\cos\left(\frac{r_{Bec} + r_{Rec}}{r_{Rec}}\theta\right) \quad (7)$$

$$0 < \theta < \theta_{ec}, \quad \theta_{ec} = 2\pi \frac{r_{Rhc}}{r_{Bhc}} \quad (8)$$

P_B 부터 $P2$ 까지의 치형곡선(r_{hc}^H)의 수식은 식(9)~식(12)로 표현된다.

$$r_{hc}^H = r_B + f_{hc} \cdot (r_{hc} - r_B) \quad (9)$$

$$r_{hc} = \sqrt{x_{hc}^2 + y_{hc}^2} \quad (10)$$

$$x_{hc} = (r_{Bhc} + r_{Rhc})\cos\theta - r_{Rhc}\cos\left(\frac{r_{Bhc} + r_{Rhc}}{r_{Rhc}}\theta\right) \quad (11)$$

$$0 < \theta < \theta_{hc}, \quad \theta_{hc} = 2\pi \frac{r_{Rec}}{r_{Bec}} \quad (12)$$

치면의 형상은 증폭함수를 이용하는데, 이끝 구름원의 반경(r_{Rec})과 바깥쪽 추가 기준반경(r_{Ro})으로 정해지는 바깥쪽 증폭함수(f_{ec})는 이끝 높이가 식 (13)가 되도록 결정하고, 이뿌리 구름원의 반경(r_{Rhc})과 안쪽 추가 기준반경(r_{Ri})으로 정해지는 안쪽 증폭함수(f_{hc})는 이뿌리 높이가 식 (14)이 되도록 결정하여 사용한다.

$$r_{IR}^{\max} = r_B + 2(r_{Rec} + r_{Ro}) \quad (13)$$

$$r_{IR}^{\min} = r_B - 2(r_{Rhc} + r_{Ri}) \quad (14)$$

위와 같은 과정들로 새로운 치형의 형상을 만들 수 있다.

3. 형상 설계 및 배제용적 해석

3.1 Trochoid 치형과 배제용적

Hyperclloid의 치형설계를 하기 전에 배제용적 해석 및 비교를 위한 대상으로 트로코이드 펌프를 선정하고 제원을 측정, 배제용적을 계산 한다.

Fig. 2에 비교대상인 트로코이드 치형이 나와 있고 측정 값과 계산 결과는 아래의 Table 1과 같다.

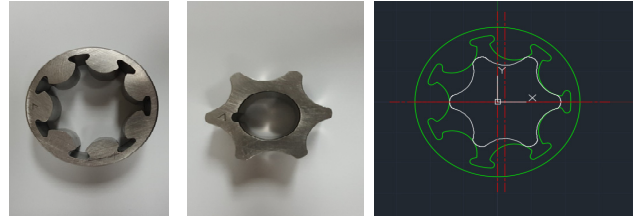


Fig. 2 Trochoid gerotor pump

Table 1 Specification of gerotor pump used in analysis

Model: NOP-210HBE	
description	data
inner rotor lobe number	6
outer rotor lobe number	7
eccentricity	2.25 mm
locus circle radius	7.5 mm
inner rotor center to rolling circle center	21.75 mm
rotor thickness	25 mm
outer rotor max. radius	18.75 mm
volumetric displacement	9.88 cm ³ /rev

3.2 Hyperclloid 치형의 설계 및 배제용적해석

하이퍼클로이드의 치형의 경우 식 (1)~(14)의 과정들로 파라미터가 정해지고 내부와 외부 중 하나의 치형을 결정한다. 하나의 로터가 형성되면 회전 시물레이션 방식을 이용해서 짝이 되는 (내/외부)로터를 형성할 수 있다.

본 논문에서는 트로코이드 치형과 비교를 위해서 외부로터의 외경이 같은 크기를 가지는 하이퍼클로이드 치형을 Matlab을 이용하여 설계하였다. 외경이 같기 위해서 식 (15)~(16)을 만족하는 파라미터를 사용하였다. 시뮬레이션으로 짝공로터를 생성하면 접촉점과 배제용적을 계산한다.

$$r_{OR}^{\max} = r_B + 2(r_{rec} + r_o) \quad (15)$$

$$r_{Rhc} = (r_B - r_{Ri})\left(\frac{1}{Z_i} - \frac{r_{Rec}}{r_B + r_{Ro}}\right) \quad (16)$$

이와 같은 짝공로터 형상설계 과정과 트로코이드 치형과 동등한 하이퍼클로이드 치형의 설계결과는 Fig. 3과 Table 2에 나와 있다.

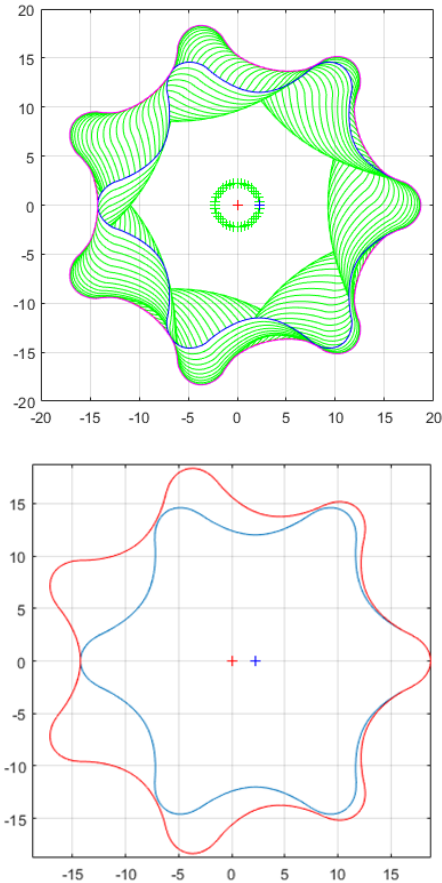


Fig. 3 Design process of hyperclloid tooth mate rotor profile equivalent to the trochoid pump

Table 2 Specification of hyperclloid gerotor pump

Model: HyperClloid	
description	data
inner rotor lobe number	6
outer rotor lobe number	7
outer rotor base circle radius	17.23 mm
outer rotor rolling radius of outside lobe	0.76 mm
outer rotor additional radius of outside lobe	0.2346 mm
rotor thickness	25 mm
outer rotor max. radius	18.75 mm
volumetric displacement	9.9 cm ³ /rev

하지만 하이퍼클로이드 펌프의 형상을 설계하는 과정에서, 서로 크기가 다른 기초원으로 인해 경계원 전후의 기어 윤곽 부위에서 짝꿍 기어와 접촉면에 불연

속이 발생할 수 있고, 결국 이 지점의 불연속 접촉은 펌프 운전시 유발되는 진동과 소음 발생 원인과 밀접한 연관이 있으므로 설계인자 결정에 유의해야 한다.

4. 설계인자 분석

4.1 설계인자에 따른 치형 해석

설계인자에 따른 치형 형상의 변화를 확인하기 위하여 경계원반경(r_B), 이끝구름원반경(r_{Rec}), 안쪽 추가기준 반경(r_{Ri}), 바깥쪽 추가기준 반경(r_{Ro}), 편심에 변화에 따른 치형의 경향을 Fig. 4와 같이 해석하였다. 해석결과 경계원 반경과 이끝 구름원 반경이 증가할수록 로터의 외경 커지는 것을 확인하였다.

안쪽추가기준 반경은 이뿌리 높이의 영향을 주고, 바깥쪽 추가기준의 경우 이끝 높이의 영향을 준다. 편심의 경우 증가할수록 외경은 증가하고 내경은 감소하는 경향을 보였다.

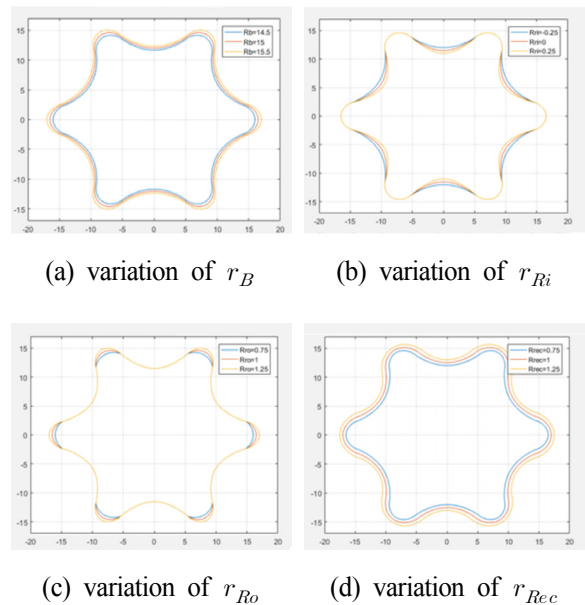


Fig. 4 Hyperclloid tooth profiles according to various design parameters' change

4.2 설계인자에 따른 배제용적 해석

기존의 트로코이드 펌프와 같은 외경을 가지며 배제용적을 증가시키기 위해서 설계인자에 따라서 배제용적의 변화를 Fig. 5-8에 나타내었다.

Fig. 5에서는 외부로터의 외경과 편심이 동일할 때 경계원반경이 증가할 경우 배제용적과 폐공간은 증가하고 외부 하이퍼클로이드치형 구름원반경과 내부로터 최소경이 감소함을 확인하였고 Fig. 6에서는 기초원 바깥쪽 추가반경과 기초원 안쪽 추가반경이 증

가할 때도 같은 경향을 보였다.

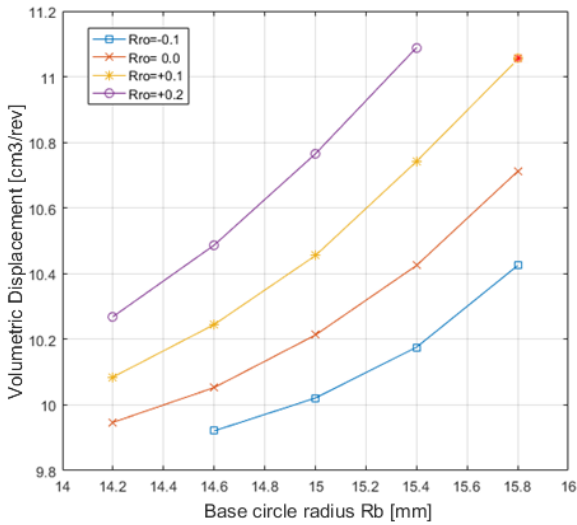


Fig. 5 Outside lobe additional radius vs volumetric displacement

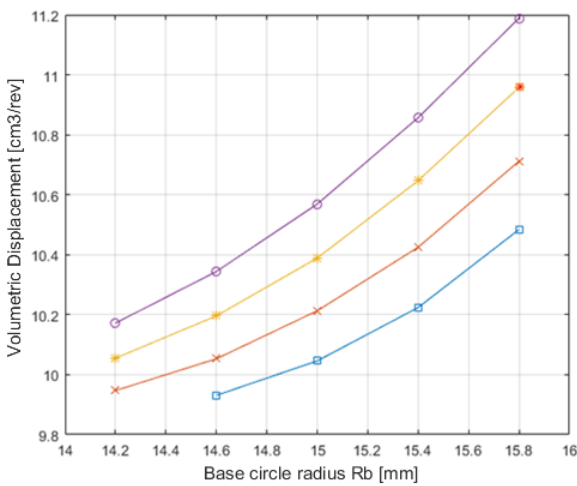


Fig. 6 Inside lobe additional radius vs volumetric displacement

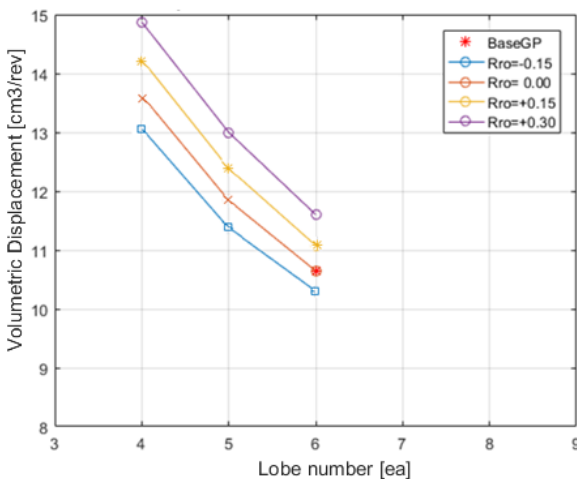


Fig. 7 Lobe number vs volumetric displacement

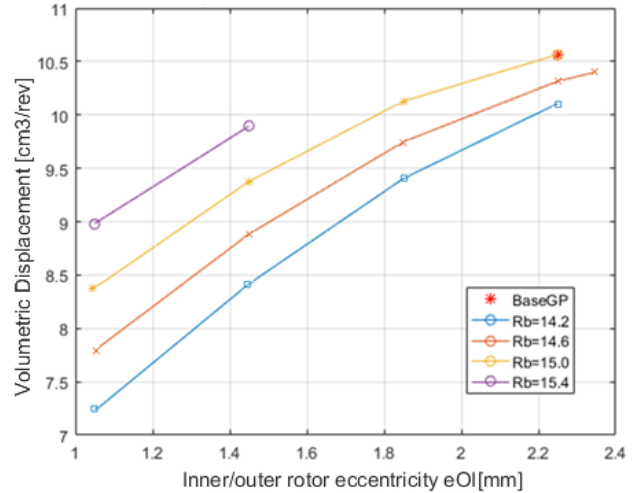


Fig. 8 Eccentricity vs volumetric displacement

Fig. 7에서 로브 개수는 증가할수록 배제용적이 감소함을 보였다. Fig. 8에서는 외경이 동일하고 편심이 증가할 경우 배제용적은 증가하고 폐공간, 외부 하이퍼클로이드 구름원 반경, 내부로터 최소경이 감소함을 보였다.

5. 배제용적 최적화 설계

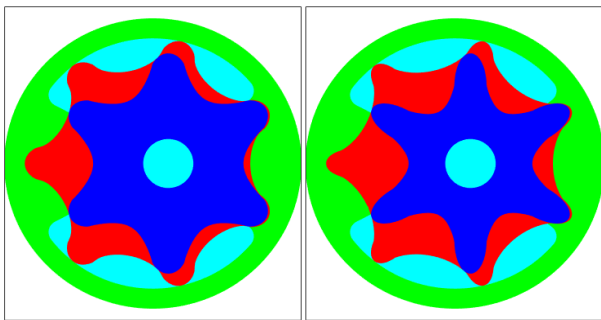
위의 배제용적 특성을 해석한 자료를 토대로 경향을 파악하고 같은 외부로터 외경 크기에서 최대 배제용적을 얻는 배제용적 최적화설계를 하였다.

최적화 조건으로는 기존의 트로코이드 펌프와 같은 외부로터 외경을 갖게 하기 위해 외부로터 최대 반경은 18.75 mm로 하였고 내부로터 최소반경은 9 mm, 로브두께는 0.75mm로 설정하였다. 설계인자 분석결과를 이용하여 편심이 2.25 mm일 때, 경계원 반경(12 mm), 구름원 반경(0.75 mm), 안쪽(0.25mm), 바깥쪽 추가기준(1.5 mm)을 정하였고 적정사양을 기준으로 편심을 증가시키고 바깥쪽 추가 반경을 조절하여 폐공간과 배제용적을 계산하였다. 계산결과는 Table 3에서 보이는 것과 같으며 그중 외부로터 이높이에 적절한 편심을 결정하였다.

이와 같이 선정된 배제용적 최적설계안과 기준 하이퍼클로이드 제로터 펌프의 형상은 Fig. 9와 같으며 내부와 외부 로터 사이의 폐공간이 증가했음을 육안으로도 확인할 수 있다. 한편 정격압력과 유량 등 작동조건에 따른 기어의 강도 문제는 내부와 외부로터 접촉점 반경 인근에서 로브두께가 설계기준으로 반영되었지만 운전 속도 및 온도 등에 따른 내구수명 등

에 관한 좀 더 세부적인 검토가 이뤄져야 할 것이다.
 Table 3 Analysis of volumetric displacement by design factor

r_B	r_{Ro}	r_{Ri}	e	cavity	Vd
12	2.0	0.25	1.25	11.284	14.076
12	1.9	0.25	1.45	10.676	13.872
12	1.8	0.25	1.65	10.052	13.639
12	1.7	0.25	1.85	9.415	13.382
12	1.6	0.25	2.05	8.776	13.07
12	1.55	0.25	2.15	8.459	12.967
12	1.5	0.25	2.25	8.157	12.835
12	1.45	0.25	2.35	7.879	12.720
12	1.4	0.25	2.45	7.634	12.629



(a) baseline design (b) optimized design

Fig. 9 Comparison of hypercloid pump design

6. 결 론

본 논문에서는 제로터 펌프 치형의 새로운 형상을 설계하고, 기존 방식 중 트로코이드 방식의 치형을 비교대상으로 하여 같은 외부로터 외경을 가지게 파라미터를 설정한 후, 하이퍼클로이드 치형의 조절 가능한 설계인자 중 4가지 인자를 대상으로 배제용적에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

이러한 설계 인자 분석을 통해 트로코이드 펌프와 동일한 외부로터 외경을 갖고 내부로터 최소반경을 제한한 상태에서 편심량 또는 바깥쪽 추가기준 반경에 따라 구해진 하이퍼클로이드 치형의 배제용적은 Table 3과 같다. 이로부터 기존 트로코이드 펌프와 같은 2.25mm의 편심을 가질 때 하이퍼클로이드 펌프의 배제용적은 12.835 cm³/rev로 기존의 트로코이드 치형의 9.9cm³/rev 보다 약 30%의 큰 배제용적을 같은 가짐을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제시한 하이퍼클로이드 설계 기법은,

중복함수의 설정의 유연함을 이용하여 로브 개수, 편심, 경계원 반경, 구름원 반경, 추가기준 반경 등의 설계인자 선정에 제한이 거의 없어서 다양한 치형의 설계가 자유롭게 가능하며, 그 결과 동일한 크기의 외경을 가진 경우에 보다 큰 배제용적을 가진 제로터 펌프의 설계가 가능함을 보였다.

또한 하이퍼클로이드 설계기법은 본 논문에 거론되지는 않았지만 팁 간극의 설정 및 외부로터와 내부로터 치형 사이 간극 또한 기능하다는 장점을 가지고 있다.

향후 하이퍼클로이드 치형의 설계인들이 구동토크, 토출 압력 맥동, 진동 등에 미치는 특성들에 대한 분석이 이뤄져야 할 것이다. 또한 정격 속도와 부하압력에 따른 하이퍼클로이드 치형의 강도 및 마모에 미치는 영향, 제로터 펌프 내외부 로터 사이 간극이나 캠링 사이 간극이 효율에 미치는 영향 등에 관한 이론적인 연구뿐만 아니라 실험적으로 진행되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 건설기계R&D전문인력양성사업(N0001292)과 과학기술정보통신부(2018H1D2A2075824)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- 1) J. R. Colbourne, "Gear Shape and Theoretical Flow Rate in Internal Gear Pumps", Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, Vol.3, No.4, pp. 215-223, 1975.
- 2) H. Sasaki et al., "Development of High Efficiency P/M Internal Gear Pump Rotor (Megafloid Rotor)", Automotive SEI Technical Review, No.66, pp.124-128, 2008.
- 3) K. Yoshida et al., "Development of High Efficiency Internal Gear Pump Rotor "Geocloid Rotor"", Automotive SEI Technical Review, No.74, pp.43-47, 2012.
- 4) T. H. Choi et al., "Design of Gerotor Using Cycloid and Circular-Arc Curves", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers. A, Vol.35, No.3, pp.241-250, 2011.
- 5) D. M. Kim et al., "Design of a Gerotor Pump and

- Experimental Investigation of Its Volumetric Displacement Characteristics”, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol.35, No.11, pp.1383-1389, 2011.
- 6) H. S. Jeong et al., “Shape Design of Trochoid Tooth Type Gerotor Pump and Volumetric Displacement Analysis using CAD Area Calculation Function”, Proceedings of 2018 Spring Conference on Drive and Control, pp.39-40, 2018.
 - 7) S. D. Kim et al., “Analysis Methods for the Flowrate and Volumetric Displacement of Gerotor Pumps/Motors”, Journal of the Korean Society for Fluid Power and Construction Equipments, Vol.9, No.4, pp.97-104, 2012.
 - 8) J. S. Seo, H. S. Chung and H. M. Jeong, “A study on Gerotor Design with Optimum Tip Clearance for Low Speed High Torque Gerotor Hydraulic Motor”, Journal of the Korea Society For Power System Engineering, Vol.10, No.4, pp.119-126, 2006.
 - 9) J. H. Kim, C. H. Kim and C. Kim, “Optimum design on the lobe shapes of Gerotor Oil Pump”, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol.23, No.4, pp.124-131, 2006.
 - 10) H. S. Jeong, L. Peng and S. H. Oh, "A Study on the Effect of Gear Teeth End-Gaps for Hydraulic Gear Pumps and Motors", Transactions of the Korea Fluid Power Systems Society. Vol.2, No.4, pp.23-29, 2005.
 - 11) J. W. Nam and H. S. Jeong, "PID closed loop control algorithm of hydraulic pump through the hydraulic motor Torque control", Proceedings of the KFPS 2011 Autumn Conference, pp.7-10, 2011.
 - 12) J. W. Nam et al., "PID closed loop control algorithm of hydraulic pump through the hydraulic motor speed control", Proceedings of the KFPS 2011 Spring Conference, pp.21-25, 2011.
 - 13) S. S. Park et al., "Development of a Concrete Pump Truck's Core Pump Model and Its Validation", Journal of Drive and Control, Vol.15, No.2, pp.1-8, 2018.
 - 14) H. S. Jeong, “Design method of rotor profile with high capacity and performance for internal gear pump and rotor using the same method”, Patent 10-2040416, 2019.10.29.