

실험계획법을 이용한 타원-인벌루트 형상의 제로터 최적 설계에 관한 연구 A Study on Optimal Design of Gerotor with Ellipse-Involute Lobe Profiles Using Design of Experiments

*최태훈¹, 문현기², #김철³, 한승무⁴, 조해용⁵

*T. H. Choi¹, H. K. Moon², #C. Kim(chulki@pusan.ac.kr)³, S. M. Han⁴, H. Y. Cho⁵

¹부산대학교 기계공학부 기계시스템설계전공, ²부산대학교 창의공학시스템 협동과정, ³부산대학교 기계기술연구원, ⁴경희대학교 동서의료공학과, ⁵충북대학교 기계공학부

Key words : Trichoid, Teeth profile design parameters, Gerotor, Flow rate, Irregularity, Design of Experiments

1. 서론

자동차 엔진의 윤활장치는 엔진의 작동을 원활하게 하고 수명을 오래 유지하기 위해 각 운동마찰부분에 오일을 공급하는 필수장치로써 오일 팬, 오일스트레이너, 오일펌프, 오일필터 등으로 구성된다. 그 중 오일펌프의 종류에는 기어펌프, 로터리펌프, 플린저펌프 등이 있으나 유량(송유량, cc/rev), 내구성, 소음, 소형화 등의 측면에서 장점을 가지는 내접형 기어펌프가 주로 사용된다. 하지만 내접형 기어펌프는 에너지 손실률이 엔진 전체의 10%에 달하고 자동변속기의 경우 약 20~30%까지 증가하는 단점이 있다. 이에 로터 크기를 줄이면 오일펌프의 에너지 손실률이 작아져 자동차 연비를 향상시킬 수 있지만 그에 따라 유량도 함께 작아지게 된다. 따라서 로터 크기가 작아지더라도 유량이 줄어들지 않고 유량맥동(%) 측면에서도 보다 더 효율적인 성능을 갖게 하기 위해 새로운 로터 치형의 개발이 요구되고 있는 추세이다.⁴

본 연구에서는 자동화 설계 프로그램을 사용하여 외부로터 로브(lobe) 형상이 'Ellipse1-Involute-Ellipse2'의 복합형상(이하 Trichoid 방식)인 제로터 치형을 창출하고 유량 및 유량맥동을 계산한다.⁵ 이어 다꾸찌 기법을 통한 실험계획법을 이용하여 유량 및 유량맥동 측면에서 가장 좋은 결과를 갖는 6 개의 치형 설계 인자를 도출한다. 한편 내부로터의 치끝 폭(이하 t_1)이 일정한 값보다 작으면 제작시 강성유지에 문제가 발생한다. 그러므로 이러한 한계조건을 만족시키기 위해 실험계획법으로 도출된 치형 설계 인자들을 변화시켜가며 유량 및 유량맥동 측면에서 최적의 성능을 갖는 타원-인벌루트 형상의 제로터를 설계하고자 한다.

2. 타원-인벌루트 형상의 제로터 치형 창출

본 연구에서 사용한 제로터 치형은 Fig. 1 과 같이 외부로터 로브 형상이 Trichoid 방식인 경우이다. 타원 1 위에 각도 η 의 구간만큼 인벌루트를 삽입하고 인벌루트 끝점과 타원 2 의 시작점에서의 1 차 미분함수가 연속이 되도록 타원 2 를 타원 1 에 대체한다. 여기에서 인벌루트 삽입 시 인벌루트 factor 값인 f 를 적용하였다.⁵

이어 외부로터가 시계반대방향으로 임의의 각도만큼 회전했을 때 내외부로터의 접촉점을 구하고 이로부터 내외부로터 궤적점의 좌표를 도출한다. 이에 대해 개발된 자동화 프로그램을 사용하여 치형을 창출하였다.

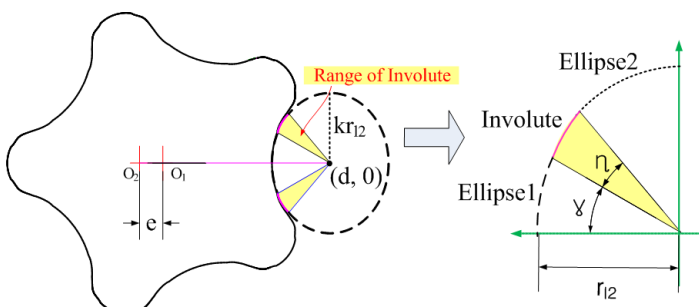


Fig. 1 Trichoid type gerotor gear form pump

3. 실험계획법을 이용한 치형 최적 설계

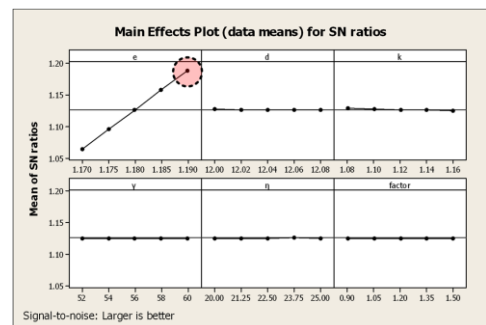
치형 설계 인자는 Fig. 1 에서의 e, d, k, γ, η 와 인벌루트 factor 인 f 의 6 개로 선정하였다. 로터 직경은 29mm, 두께는 7.2mm, 외부로터 이뿌리부터 최외경까지의 폭을 2.5mm, tip clearance(t_p)는 0.02mm 로 설정하였다. 여기에서 r_{12} 는 식 (1)와 같이 e, d 에 따라 종속적으로 결정된다.

$$d - r_{12} + 2e + t_p = 14.5 - 2.5 = 12 \quad (1)$$

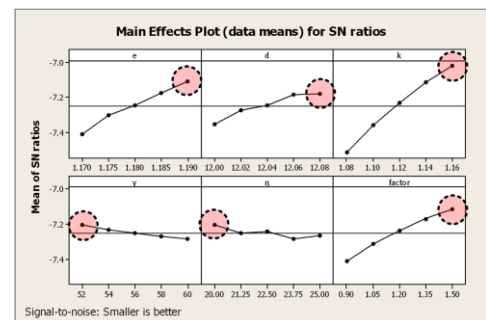
6 개 인자에 대해 5 수준으로 설정 후 다꾸찌 분석을 수행하였다. 이때 유량 및 유량맥동 측면에서 가장 좋은 결과를 가지는 인자를 도출하여 창출된 치형이 cusp(첨점)와 루프가 심하게 발생하지 않도록 반복적으로 과정을 수행하여 최종적으로 Table 1 과 같이 수준을 설정하였다. 이어 직교배열표(L_{25})를 구하고 다꾸찌 분석을 수행하여 SN ratios 그래프를 구하면 Fig. 2 와 같다.

Table 1 Determination of the level of design parameters

인자	요 인 수 준				
e	1.170	1.175	1.180	1.185	1.190
d	12.00	12.02	12.04	12.06	12.08
k	1.08	1.10	1.12	1.14	1.16
γ	52	54	56	58	60
η	20.00	21.25	22.50	23.75	25.00
f	0.90	1.05	1.20	1.35	1.50



(a) flow rate



(b) irregularity

Fig. 2 Analysis of flow rate and irregularity

Fig. 2에서 점선원으로 표시한 인자는 유량 및 유량맥동 측면에서 각각 가장 좋은 결과를 갖는 설계 인자이다. 여기에서 편심량이 클수록 유량 및 유량맥동이 좋아지며 편심량 이외 인자의 변화는 유량에 거의 영향을 미치지 않는다. 따라서 Fig. 2-(b)에서 도출된 설계 인자가 유량 및 유량맥동을 동시에 가장 좋게 하는 인자라고 할 수 있으며 그 값은 Table 2과 같다.

Table 2 Design parameters at the final level

e	d	k	γ	η	f
1.190	12.08	1.16	52	20	1.50

Table 2의 설계 인자로 치형을 창출하면 t_i 는 1.63mm으로 측정된다. 이는 제작상의 한계조건을 만족하지 못하므로 설계 인자를 변화시킬 필요성이 있다. 그러한 변화작업의 규칙을 설립하기 위해 Table 2의 설계인자를 Table 1의 수준 내에서 한 개씩만 변화시켜가며 유량, 유량맥동 및 t_i 를 구하였으며 그 결과는 Table 3와 같다. 여기에서 t_i 가 커지면 유량 및 유량맥동이 나빠짐을 알 수 있다. 따라서 t_i 가 2.0mm 보다는 크지만 2.0mm에 가장 가까운 경우가 최적임을 알 수 있다.

이를 참조하여 치형 설계 인자의 t_i 에 대한 영향도를 조사하면 Table 4와 같다. 이와 같은 규칙을 바탕으로 Table 2의 설계 인자를 Table 5의 순서대로 변화시킨 결과 No.4의 경우가 최적의 설계 인자로서 도출되었으며 Fig. 3과 같이 치형을 창출하였다. 시제품 제작결과는 Fig. 4와 같다.

Table 3 Tooth-tip width of inner-rotor and size of cusp

e	Q	i	t_i	d	Q	i	t_i
1.190	1.1462	2.1090	1.63	12.08	1.1462	2.1090	1.63
1.185	1.1421	2.1335	1.66	12.06	1.1462	2.1186	1.66
1.180	1.1381	2.1593	1.69	12.04	1.1463	2.1284	1.69
1.175	1.1341	2.1885	1.71	12.02	1.1463	2.1383	1.72
1.170	1.1300	2.2182	1.74	12.00	1.1464	2.1484	1.75
k	Q	i	t_i	γ	Q	i	t_i
1.16	1.1462	2.1090	1.63	52	1.1462	2.1090	1.63
1.14	1.1463	2.1404	1.73	54	1.1462	2.1217	1.67
1.12	1.1465	2.1730	1.83	56	1.1462	2.1332	1.69
1.10	1.1467	2.2068	1.93	58	1.1462	2.1434	1.71
1.08	1.1468	2.2417	2.02	60	1.1462	2.1518	1.73
η	Q	i	t_i	f	Q	i	t_i
20.00	1.1462	2.1090	1.63	1.50	1.1462	2.1090	1.63
21.25	1.1462	2.1132	1.64	1.35	1.1462	2.1253	1.68
22.50	1.1462	2.1174	1.65	1.20	1.1462	2.1463	1.73
23.75	1.1462	2.1215	1.66	1.05	1.1463	2.1745	1.79
25.00	1.1462	2.1255	1.67	0.90	1.1463	2.2126	1.86

Table 4 Analysis of influences of design parameters

규칙 1	e, d, k, f를 늘릴수록 t_i 가 줄어들며, γ, η 를 늘리면 t_i 는 늘어남.
규칙 2	t_i 의 변화에는 k, f, d, e, γ, η 의 순서로 영향을 미침.

Table 5 Teeth profile design parameters

No.	e	d	k	γ	η	f	Q	i	t_i
0	1.19	12.08	1.16	52	20	1.5	1.1462	2.1090	1.63
1	1.19	12.08	1.08	52	20	0.9	1.1469	2.3405	2.20
2	1.19	12.08	1.12	52	20	1.2	1.1465	2.2125	1.92
3	1.17	12.08	1.12	60	25	1.2	1.1303	2.3192	2.06
4	1.18	12.08	1.12	60	25	1.2	1.1384	2.2793	2.01
5	1.18	12.08	1.14	60	25	1.2	1.1383	2.2470	1.92

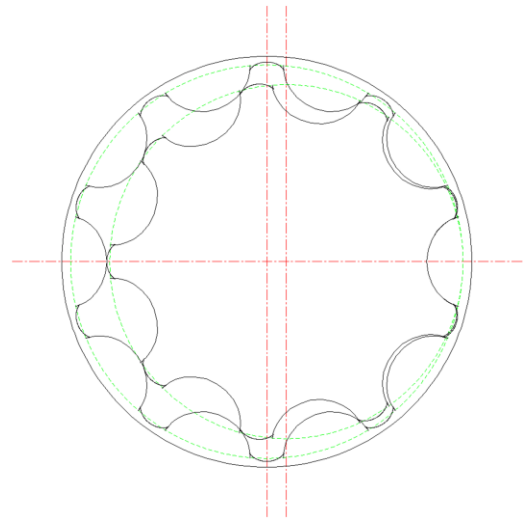


Fig. 3 Optimal teeth profile



Fig. 4 Inner and outer rotors

4. 결론

본 연구에서는 Trichoid 방식으로 제로터 치형을 생성함에 있어 유량 및 유량맥동 측면에서 가장 좋은 결과를 갖게 하는 치형 설계 인자를 실험계획법을 이용하여 도출하였다. 이때 유량 및 유량맥동을 동시에 좋게 하는 결과는 유량맥동만을 고려했을 때와 일치함을 알 수 있었다. 그리고 실험계획법으로 도출된 치형에 대해 제작상의 한계조건을 만족할 수 있도록 규칙에 따라 설계 인자를 변화시킨 결과 최적의 치형 설계 인자를 도출할 수 있었고 시제품을 제작하였다. 향후 이에 대한 실험결과를 통해 이론적 계산값과 비교하여 그 타당성을 검증할 계획이다.

후기

본 연구는 교육과학기술부의 지역혁신인력양성사업의 지원 및 산업자원부의 대학전력연구센터 지원사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

- Colbourne, J. R., "Gear Shape and Theoretical Flow Rate in Internal Gear Pumps," Transactions of the CSME, **3**, 215-223, 1975
- Mimmi, G., Pennacchi, P., "Internal Lobe Pump Design," Transactions of the CSME, **21**, 109-121, 1997
- Fabiani, M., Manco, S., Nervegna, N. and Rundo, M., "Modelling and Simulation of Gerotor Gearing in Lubricating Oil Pumps" SAE Technical paper series, 1999
- 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
- Jung, S. Y., Kim, M. S., Cho, H. Y and Kim, C., "Development of an Automated Design System for Oil Pumps with Multiple Profiles(Circle, Ellipse and Involute)," J. of KSPE, **26**, 103-112, 2009