

타원-인벌루트 조합 형상을 갖는 지로터 펌프의 통합적 설계 자동화 시스템 개발

Development of an Automated Integrated Design System for Gerotor Pumps with Multiple Profiles(Ellipse and Involute)

문현기¹, 정성윤², 배준호³, 장영준³, 김철^{2,✉}
Hyun Ki Moon¹, Sung Yuen Jung², Jun Ho Bae³, Young June Chang³ and Chul Kim^{2,✉}

1 부산대학교 창의공학시스템학과 (Department of Creative Engineering System, Pusan National Univ.)

2 부산대학교 기계기술연구원 (Research Institute of Mechanical technology, Pusan National Univ.)

3 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

✉ Corresponding author: chulki@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2489

Manuscript received: 2010.1.19 / Revised: 2010.4.22,5.25 / Accepted: 2010.6.15

An 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 lobe with elliptical and involute shapes, while the inner rotor profile is determined as conjugate to the other. And the integrated design system which is composed of three main modules has been developed through AutoLISP under AutoCAD circumstance plus CFD-ACE+. It generates new lobe profile and calculates automatically the flow rate and flow rate irregularity according to the lobe profile generated. CFD simulation results show trends similar to those carried out in experiments, and a quantitative comparison is presented. Results obtained from the automotive integrated design system enable the designer and manufacturer of oil pump to be more efficient in this field.

Key Words: Gerotor Pump (지로터 펌프), Ellipse (타원), Involute (인벌루트), Port (포트), Computational Fluid Dynamics (전산 유체 역학)

기호설명

- b = rotor width
- C = the curvature center of the outer rotor lobe
- C_{inv} = the curvature center of involute gear
- d = distance between the curvature center of the outer rotor lobe and its center along polar reference axis
- e = distance between the centers of the inner rotor and the outer rotor
- f = (vapor) mass fraction
- i = flow rate irregularity
- k = the ratio between the axis of ellipse
- O₁ = the curvature center of the inner rotor lobe
- O₂ = the curvature center of the outer rotor lobe
- P = pressure
- Q = contact point of inner and outer rotor
- r₁ = radius of inner rotor pitch circle
- r₂ = radius of outer rotor pitch circle

r_{l2} = radius of curvature of the outer rotor lobe along polar reference axis

T = temperature

\vec{V} = velocity vector

W = molecular weight of non-condensable gas

z_1 = number of the inner rotor teeth

z_2 = number of the outer rotor teeth

α = rotate angle of outer rotor

$\alpha_{v,g,l}$ = volume fraction of vapor, gas and liquid

inv α = involute angle

γ = starting angle of involute in outer rotor

δ = rotate angle for ellipse

η = range angle of involute in outer rotor

θ = rotate angle for involute

ρ = density

ω = angular speed

1. 서론

지로터 펌프는 최근 소결 제품의 제작기술 발달로 가공의 정밀도가 높아짐에 따라 형상이 복잡하더라도 가공이 용이하며 조립이 쉽다. 또한 두 로터 사이의 상대 운동이 적으므로 장기간 사용여도 효율의 변화가 적어 흡입 성능이 우수하다. 이러한 이점 때문에 자동차의 엔진오일이나 연료 펌프로 널리 사용되고 있다. 지로터 펌프의 치형 형상에 대해 많은 연구가 이루어지고 있으며,^{1,2} 최근에는 회전하는 유체영역뿐만 아니라, 캐비테이션 현상을 적절하게 모사하는 모델링은 상용 코드인 CFD-ACE+의 모듈로 Full Cavitation Model 을 발표하기에 이르렀다.^{3,4}

본 연구에서는 타원-인벌루트 조합 형상을 갖는 지로터 펌프에 대하여 AutoCAD 환경에서 AutoLISP 언어를 가지고 내외부로터를 자동으로 창출시키는 치형설계 모듈과 창출된 치형에 대하여 CFD-ACE+를 이용한 내부유동해석을 수행하는 유동해석모듈로 구성된 통합적 설계 자동화 시스템을 구축하였다. 통합적 설계 자동화 시스템의 치형 설계 모듈에서 창출되는 내·외부로터의 형상에 대하여 유동해석모듈에서는 수치해석방법을 이용하여 캐비테이션을 포함하는 3 차원 비정상상태의 유동해석을 수행하여 압력장과 속도장의 계산 결과에 의한 내부유동특성을 파악하고 토출유량 계산결과를 실험결과와 비교하였다.

2. 이론해석

2.1 로터 구성방정식^{5,6}

외부 로터의 로버 개수, 내부 및 외부로터의 피치원 반경은 식 (1)과 같다. 내외부 로터의 피치원이 교차되는 피치점(P)을 고정시키고 외부로터를 피치원의 중심(O_2)에 대하여 회전시켜 치형 방정식을 유도하였다.

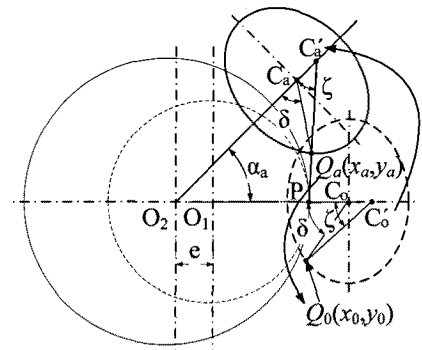


Fig. 1 Conjugated profile tracing

외부 로터 피치원의 중심(O_2), 내부 로터 피치원의 중심(O_1), O_2 와 O_1 사이의 편심량(e), 외부 로터가 타원의 형상을 갖는 곡률의 일부분일 때 Fig. 1로부터 초기 시작점 Q_0 와 외부로터의 중심점(O_2)과 타원의 중심을 잇는 선분의 연장선과의 교점을 C'_a 라 하고, O_2 를 중심으로 회전하여 회전각이 α_a 가 될 때 회전 후의 C'_a 의 점을 C'_a 라고 했을 때 직선 C'_aP 와 외부 로버형상의 교점이 접촉점 $Q_a(x_a, y_a)$ 가 된다. 접촉점 Q_a 를 구하기 위하여 $\angle O_2C'_aP$ 인 ζ 를 구하고 식 (2)로부터 δ 를 구하여 초기 외부 로버형상 위의 점 $Q_0(x_0, y_0)$ 를 구한다. Q_0 는 원, 타원 및 인벌루트로 조합된 외부로터 형상위의 한 점으로, 타원 구간에 존재할 경우 2.1.2 절에서, 인벌루트의 구간에 존재할 경우 2.1.1 절에서 나누어 구한다. 회전각, α_a 로 회전시킨 접촉점 $Q_a(x_a, y_a)$ 는 식 (3)으로 구한다.

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

$$\zeta = \cos^{-1} \left(\frac{\overrightarrow{C'_aP} \cdot \overrightarrow{C'_aO_2}}{\|C'_aP\| \|C'_aO_2\|} \right), \tan \delta = k \tan \zeta \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} x_a \\ y_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_a & -\sin \alpha_a \\ \sin \alpha_a & \cos \alpha_a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

2.1.1 외부로터가 인벌루트의 일부분인 경우

Fig. 2 로부터 인벌루트 함수는 직선 AB 와 호 DB 가 같아야 한다.

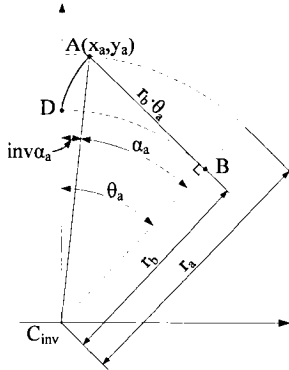


Fig. 2 Profile tracing for involute shape

$$\theta_a = \frac{r_a \sin \alpha_a}{r_b} \quad (4)$$

표준 인벌루트 치차에서 기초원(base circle)의 반경은 식 (5)와 같이 정의된다.⁷

$$r_s = \frac{mz}{2}, \quad r_b = r_s \cos \alpha_s = r_a \cos \alpha_a \quad (5)$$

여기서

$$\alpha_a = \cos^{-1} \left(\frac{r_a}{r_b} \right) \quad (6)$$

식 (4)과 (5)로부터 인벌루트 치형 궤적 방정식은 아래와 같다.

$$\begin{cases} x_0 = f(\theta) = r_b(\sin \theta_a - \theta_a \cos \theta_a) \\ y_0 = g(\theta) = r_b(\cos \theta_a + \theta_a \sin \theta_a) \end{cases} \quad (7)$$

2.1.2 외부로터가 타원의 일부분인 경우

외부로터의 모체가 되는 타원에서 타원의 중심 점에서 접촉점까지 거리(ρ)와 각(δ)은 Fig. 3 으로부터 식(8)-(10)에 의해 구한다.

$$\rho = r_{12} \sqrt{\cos^2 \zeta + k^2 \sin^2 \zeta} \quad (8)$$

$$\overline{AB} = \overline{BC} \tan \zeta, \quad \overline{A'B} = \overline{BC} \tan \delta \quad (9)$$

$$\overline{A'B} = k \overline{AB}, \quad \tan \delta = k \tan \zeta \quad (10)$$

상기의 식 (8)-(10)로부터 타원형상 치형 궤적 방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{cases} x_0 = d - \rho \cos \delta \\ y_0 = \rho \sin \delta \end{cases} \quad (11)$$

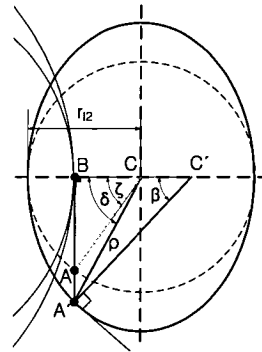


Fig. 3 Profile tracing for ellipse shape

2.1.3 외부로터가 타원 및 인벌루트 형상의 조합인 경우

grad e_1 과 grad i_1 점에서 순간기울기가 같은 G_{e1} 과 인벌루트의 순간기울기 G_{i1} 점을 찾고, grad e_2 과 grad i_2 점에서도 순간기울기가 같은 G_{e2} 과 G_{i2} 점을 찾는다. 이때 타원과 인벌루트의 순간 기울기는 식 (12)-(13)로 표현된다.

$$f'(x) = \frac{kx}{\sqrt{r_{12}^2 - x^2}} \quad (12)$$

$$g'(\theta) = \cot \theta, \quad \text{여기서 } \theta = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{r_{12}^2 - x^2}}{kx} \right) \quad (13)$$

Fig. 4 에서 $\overline{G_{e1}G_{e2}}$ 의 선분기울기와 $\overline{G_{i1}G_{i2}}$ 의 선분기울기가 같아지도록 인벌루트를 회전 시켜가면서 인벌루트상의 두점 G_{i1} 과 G_{i2} 를 다시 찾는다.

그리고 난 후 $\overline{G_{e1}G_{e2}}$ 의 선분길이 l_e 와 $\overline{G_{i1}G_{i2}}$ 의 선분길이 l_i 가 같도록 인벌루트의 기초원 반경(r_b)의 크기를 증감시킨다.

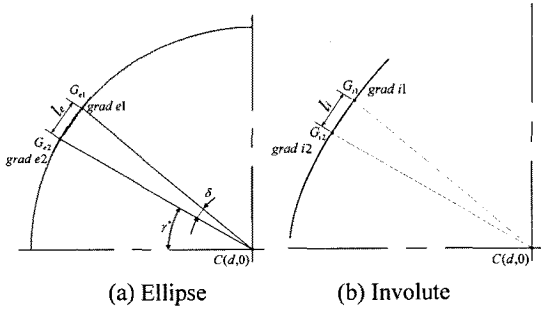


Fig. 4 Profile tracing for ellipse and involute shape

2.2 내부유동해석^{8,9}

상용 유동해석 코드인 CFD-ACE+를 이용하여 지로터 펌프의 내부의 유동장 및 압력장을 계산하였다. 이때 난류모델은 standard k-ε 난류모델을 이용하였고, 저압 영역의 상변화를 계산하기 위하여 캐비테이션 모델을 적용하였다. 사용된 캐비테이션 모델은 버블 다이내믹스(bubble dynamics), 난류 파동(turbulent fluctuation), 유체 내부 비응축 가스(non-condensable gas)의 영향을 모델링한 것이다.

2.3 유량 및 유량맥동 계산

접촉점 및 내외부 로터의 치형에 관한 정보를 이용하여 순간유량 및 맥동을 계산할 수 있다.

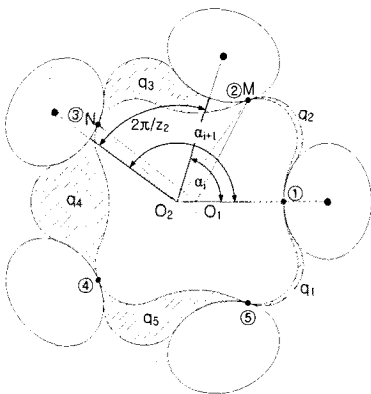


Fig. 5 Evaluation of the contribution to the flow rate given by each flank of rotors

작동유체는 비압축성 유체로써 체적의 변화가 발생하지 않는다고 가정하였다. Fig. 5에서 해칭된

챔버(Chamber)는 내외부 로터가 만나는 두 개의 접촉점을 경계로 닫혀진 폐구간 영역이다.

각 챔버는 로터가 일정한 간격으로 미소 각도 만큼 회전함으로써 측면의 길이가 변화되어 체적이 증감한다. 이때 흡입이 일어나는 영역과 토출이 일어나는 영역이 나타내는 면적들은 각각 중심으로부터 접촉점 사이의 거리의 제곱에 비례하기 때문에 챔버가 유량의 변화에 기여하는 정도를 나타내는 순간 유량(instantaneous flow rate)은 식(14)-(16)을 이용하여 구할 수 있다.

$$q_i(\alpha) = \frac{1}{2}b \left[\left(\left| \overline{O_1M} \right|^2 - \left| \overline{O_1N} \right|^2 \right) \frac{r_2}{r_1} - \left(\left| \overline{O_2M} \right|^2 - \left| \overline{O_2N} \right|^2 \right) \right] \omega_2 \quad (14)$$

$$\left| \overline{O_1M} \right| = \rho_{11} \quad \left| \overline{O_2M} \right| = \rho_{21} \quad (\alpha = \alpha_i) \quad (15)$$

$$\left| \overline{O_1N} \right| = \rho_{12} \quad \left| \overline{O_2N} \right| = \rho_{22} \quad (\alpha = \alpha_{i+1}) \quad (16)$$

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

회전당 유량은 식 (17)과 같다.

$$Q = z_1 \int_0^{2\pi/z_2} q(\alpha) d\alpha = z_1 \sum_{i=1}^{2\pi/z_2} q_i \quad (17)$$

소음 및 진동에 영향을 미치는 유량맥동(Flow rate irregularity)은 식(18)과 같다.

$$i = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{q_{\text{average}}} \quad (18)$$

3. 지로터 통합적 설계 자동화 시스템¹⁰⁻¹²

타원과 인벌루트가 조합된 형상을 갖는 외부로터로부터 내부로터를 자동으로 창출하고 이를 토대로 내부유동해석을 하기 위한 통합적 설계 시스템을 개발하였다. AutoCAD 환경하의 AutoLISP 과 CFD-ACE+를 사용하여 개발된 시스템은 치형설계 모듈과 유동해석 모듈로 구성되어 있으며 시스템 구성도는 Fig. 6과 같다.

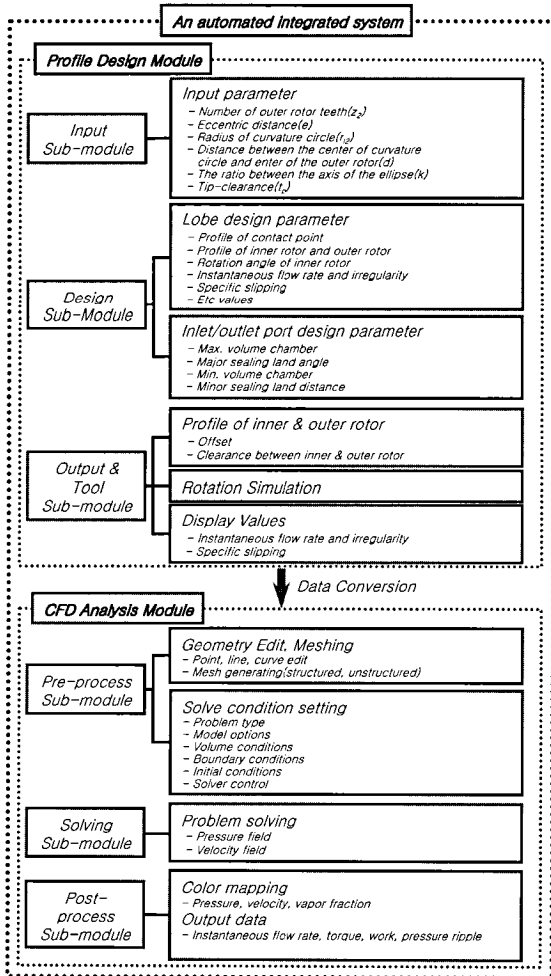


Fig. 6 Configuration of the automated integrated system

3.1 치형설계 모듈

치형설계 모듈에서는 로터의 치형 및 유량, 유량맥동 구성방정식을 이용하여 치형 설계 및 이론적 성능값을 도출하며 이 모듈은 입력 부모모듈, 설계 부모모듈, 출력 부모모듈로 구성되며 각 부모모듈의 기능을 아래에서 간략히 설명한다.

3.1.1 입력 부모모듈

입력 부모모듈은 치형 설계와 유량, 유량맥동 및 미끄럼률을 구하기 위하여 설계 변수 값들을 입력하는 모듈이다. 입력 변수는 외부로터의 치차의 개수(z_2), 내외로터 중심간의 거리, 즉 편심량(e), 타원단축 거리(r_{t2}), 아웃로터의 중심점과 타원중심간의 거리(d), 타원의 장단축비(k), tip 틈새(t_p)와

인벌루트의 시작각(γ)과 범위각(η)이다.

3.1.2 설계 부모모듈

설계 부모모듈에서는 입력된 설계 변수값으로부터 치형 방정식에 의하여 외부 로터로부터 내부 로터의 궤적을 창출하고, 내부 및 외부 로터 사이의 오프셋량을 보정한 후, 창출된 치형의 유량 및 맥동과 미끄럼률을 계산한다.

3.1.3 출력 부모모듈

출력 부모모듈에서는 2 차원 모델링, 회전시물레이션, 순간유량 곡선 및 데이터 파일의 저장을 수행한다. 설계 부모모듈에서 구한 내외부 로터의 궤적을 이용하여, 외부 로터 끝단부의 곡률, 내외부 로터간의 거리, 내부 로터의 오프셋량, 내부로터의 회전 각도를 입력받아 회전 각도에 따른 치형을 창출시킨다. 또한 실제 내외부 로터가 회전하는 모습을 시물레이션하여 챔버의 모양 및 크기, 회전 시에 발생하는 간섭 등을 체크함으로써 사용자로 하여금 오류를 미리 방지할 수 있다.

3.2. 유동해석 모듈

유동해석 모듈에서는 로터의 펌핑챔버와 포트 내부유동 영역에서의 속도장과 압력장을 계산하여 유동특성을 파악하고 출구의 유량을 도출하며 이 모듈은 전처리 부모모듈, 솔빙 부모모듈, 후처리 부모모듈로 구성되며 각 부모모듈의 기능을 아래에서 간략히 설명한다.

3.2.1 전처리(Pre-process) 부모모듈

전처리(Pre-process) 부모모듈에서는 출력 부모모듈에서 생성된 치형의 유동영역에 격자를 생성 후, 3 차원 형상 변환을 한다. 경계조건으로 입출구면 지정, 포트면과 펌핑챔버면의 임의공유면을 설정한다. 유체 물성치는 작동 유체의 밀도, 온도, 점성계수이다.

3.2.2 솔빙(Solving) 부모모듈

솔빙(Solving) 모듈에서는 전처리(Pre-process) 모듈에서 생성된 모델을 SIMPLEX(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation Consistent) 알고리즘을 적용한 CFD-ACE solver를 이용하여 압력장과 속도장을 계산하여, 출구의 유량, 압력, 속도 등을 구한다.

3.2.3 후처리(Post-process) 부모들

후처리(Post-process) 모듈에서는 솔빙(solving) 부모들에서 계산된 결과에 대하여 후처리 기능을 수행하며 GUI 환경에서 유동영역에 임의의 단면을 생성시켜 유동영역의 압력 분포, 속도벡터, 유선 등의 정보를 매핑하여 내부 유동의 특성을 파악한다.

4. 시스템에의 적용 및 고찰

외부로터의 치선경과 치저경을 일정하게 계산하는 식 (19)-(20)에 의해 외부로터의 외경을 일정하게 하고, 설계변수의 값을 개발된 시스템의 치형설계 모듈에 적용하여 치형을 창출시키고 창출된 치형을 유동해석 모듈에 적용시켜 내부유동 특성을 파악하였다.

$$\rho_{1,max} = d - r_{f2} + e, \rho_{1,min} = d - r_{f2} - e \quad (19)$$

$$\rho_{2,max} = d - r_{f2} + 2e + t_p, \rho_{2,min} = d - r_{f2} \quad (20)$$

4.1 입력 부모들에의 적용

입력 부모들에 로터의 내외부 로터 잇수, 9/10 개, 외부로터 폭(w=7.2mm), 외경(Φ29mm), 편심량(e=1.15mm), 곡률반경(r_{f2} = 2.25mm), 곡률반경과 외부로터의 중심까지 거리(d=11.93mm), 타원의 장단축비(k=1.21), 외부로터 간극량(t_p=0.02mm)와 인벌루트 시작각(γ=0°)과 범위각(η=30°)을 Fig. 7 처럼 입력시키면 이 부모들에서는 타원과 인벌루트의 조합된 외부로터 형상이 창출되는데 이를 Fig. 8 에 나타내었다.

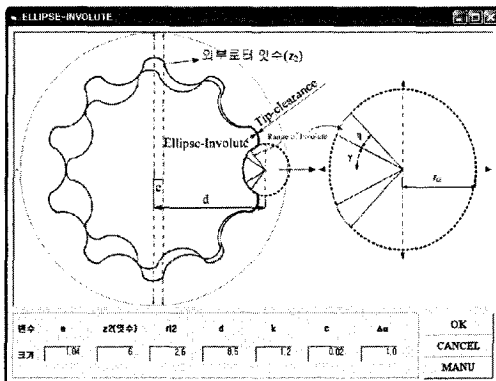


Fig. 7 Window for inputting design values

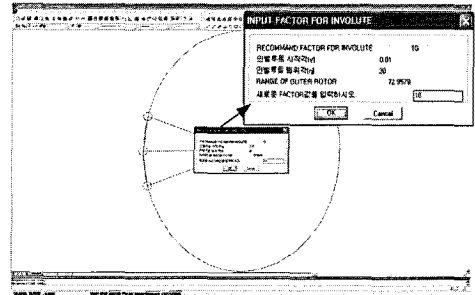
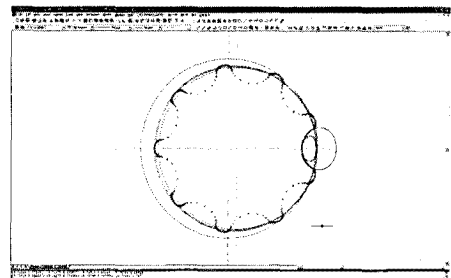


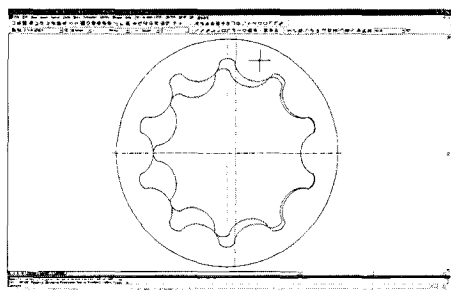
Fig. 8 The result carried out in the input sub-module

4.2 설계 부모들에의 적용

설계 부모들에서는 구성방정식에 의하여 타원과 인벌루트의 조합된 외부로터 형상을 구한 후 이에 매칭되는 접촉점과 내부로터 형상을 자동으로 창출시키는데 이를 Fig. 9 에 나타내었다.



(a) The inner rotor generated



(b) The generated the inner and outer rotors

Fig. 9 The results carried out in the design sub-module

4.3 출력 부모들에의 적용

출력 부모들에서는 창출된 치형에 대해 치폭을 입력하면 유량과 유량맥동이 자동으로 계산되어 Fig. 10 과 같이 출력되며 또한 Fig. 11 과 같이 실제 내외부로터가 회전하는 모습을 시뮬레이션하여 챔버의 모양 및 크기, 회전시 간섭등을 체크함으로써 사용자가 하여금 오류를 미리 방지할 수 있다.

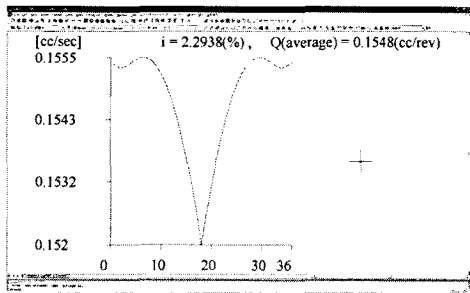


Fig. 10 The result output from in the design sub-module

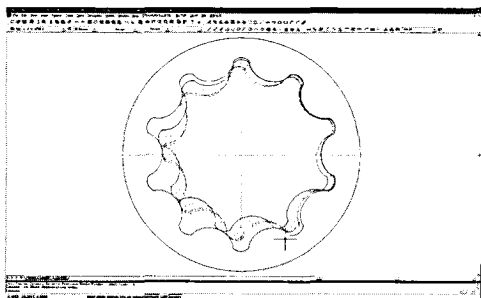


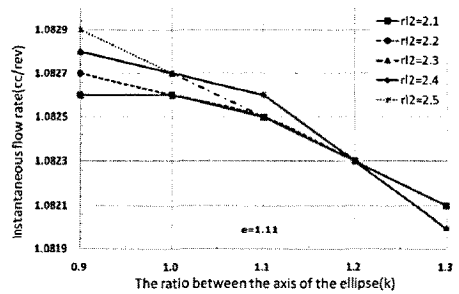
Fig. 11 The result simulated in the design sub-module

허용압력각 이내이면서 첨점(cusp) 혹은 루프가 발생되지 않는 범위 내에서, 동일한 크기의 로터들 가운데 최적의 로터를 찾기 위하여 로터의 내외부 로터 잇수(9/10 개), 외부로터 폭($w=7.2\text{mm}$), 외경($\Phi=29\text{mm}$), 외부로터의 최외경과 치저경 사이의 두께($t_0=2.5\text{mm}$)는 일정하게 유지하였다. 편심량(e), 타원의 곡률반경(r_{12}), 타원의 장단축비(k)를 변화시키면서 유량, 유량 맥동의 영향도를 조사하여 Fig. 12 에 나타내었다. 영향도 조사 결과를 바탕으로 첨점과 루프가 발생하지 않는 범위에서 성능이 우수하게 나타나는 편심량과 타원의 곡률반경, 타원의 장단축비 등의 설계 변수를 도출하였다.

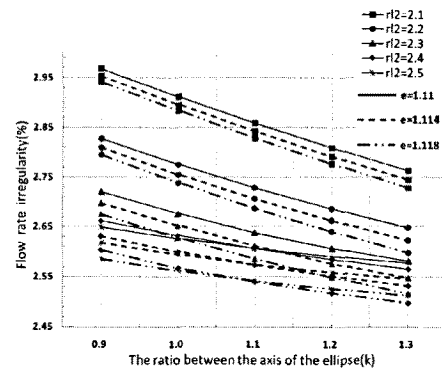
도출된 설계 변수에 의해 창출된 치형의 외부로터 로버 형상에 삽입되는 인벌루트의 시작각(γ)과 범위각(η)을 변화시켜가며 유량과 유량 맥동을 조사하여 Table 1 에 나타내었다. 시작각(γ)이 중심일 때($\gamma=0^\circ$), 범위각(η)의 범위가 클수록 유량 맥동이 낮음을 알 수 있다.

개발된 시스템의 치형설계 모듈의 결과를 토대로 고유량, 저맥동을 갖는 성능이 우수한 설계 인자값을 선정하여 Table 2 에 나타내었고, 이로부터 No. 4 가 최고유량, 최저맥동을 갖는 설계 인자값임을 알 수 있다. 또한 설계 인자값을 토대로 창출된 치형의 형상들 가운데 최고유량 및 최저맥동을

갖는 No.4 를 Fig. 13 에 나타내었다.



(a) Instantaneous flow rate when $e=1.11$



(b) Flow rate irregularity

Fig. 12 Comparison of irregularity and flow rate according to the factor, k : (a) flow rate, (b) flow rate irregularity

Table 1 The results of flow rate and irregularity according to the factor, γ and η

	γ	η	Flow rate (cc/rev)	Irregularity(%)
Ellipse and Involute	0°	10°	0.1547	2.2365
		20°	0.1548	2.2238
		30°	0.1548	2.2315
	10°	10°	0.1546	2.3831
		20°	0.1546	2.3799
		30°	0.1547	2.3417
	20°	10°	0.1547	2.3417
		20°	0.1547	2.3417
		30°	0.1547	2.3417
	30°	10°	0.1547	2.3417
		20°	0.1547	2.3417
		30°	0.1547	2.3418
Circle			0.1486	2.7346
Ellipse			0.1486	2.5787

Table 2 Specification of teeth profiles

No.	e	Z ₂	k	r ₁₂	d	γ	η
1	1.114	10	1.194	2.32	12.02	0°	20°
2	1.114	10	1.194	2.32	12.02	10°	20°
3	1.11	10	1.11	2.3	12.2	0°	15°
4	1.15	10	1.21	2.25	11.93	0°	20°

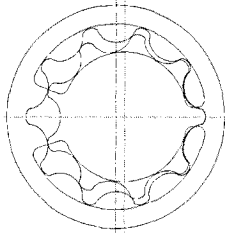


Fig. 13 Teeth profiles of profile No.4 to be chosen from the results generated in the output sub-module of the system

4.4 전처리(Pre-process) 부모들에의 적용

입출구 포트 단면형상을 Fig. 15 와 같이 설계하고 CFD 해석을 수행하기 위한 데이터로 변환을 한 후, 최적의 치형인 Fig. 13 에 대하여 Fig. 14 와 같이 격자를 생성하여 3 차원 모델링을 수행하였다. 펌핑 챔버와 입출구 포트 영역에 육면체 격자

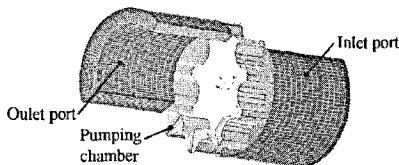


Fig. 14 3-D modeling and meshing of flow area

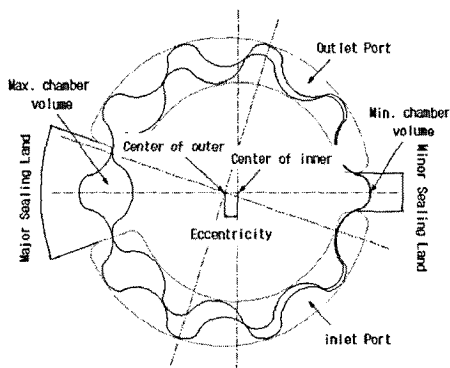


Fig. 15 Gerotor teeth profile and port arrangement

를 적용하였으며, 적용된 격자수는 18 만개이다. 펌핑 챔버의 격자는 시계방향으로 회전하며, 회전과 동시에 격자는 변형(deforming)된다. 치형 형상에 따른 지로터 펌프의 성능을 평가하기 위해 포트영역의 모델링 형상을 단순화하였다.

4.5 솔빙(Solving) 부모들에의 적용

솔빙(solving) 부모들에서 지로터 내부 유동장의 압력장과 속도장을 계산하여 지로터 펌프의 출구 유량과 압력을 구하였다. 로터 회전은 스텝당 1.6 도씩 총 225 스텝을 1 회전으로 하였고, 토출 포트의 압력은 3bar 이고, 회전속도가 4000rpm 인 경우에 대하여 계산을 수행하였다. 솔빙(solving) 부모들에서 출력되는 출구 압력값과 유량값을 그래프로 출력하면 Fig. 16 과 Fig. 17 와 같이 시간에 따른 압력과 유량 변화 추이를 알 수 있다. 로터가 1 회전 이후 안정화가 되는 것을 볼 수 있으며 안정화 구간에서 유량 변동 주기가 내부 로터의 잇수 9 와 동일하게 나타난다. 로터가 회전함에 따라 펌핑 챔버의 체적이 주기적으로 변화하게 되고 이에 따라 주기적인 압력 변화가 발생하게 된다.

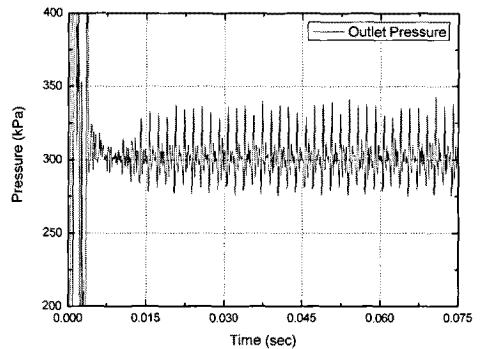


Fig. 16 Pressure ripple at 4000rpm in the outlet

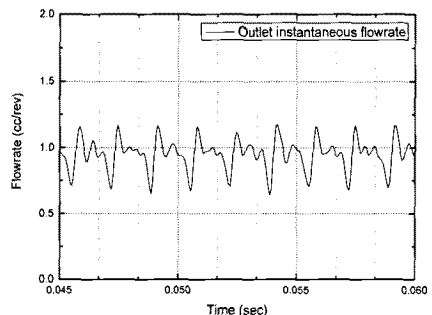


Fig. 17 Instantaneous flow rate at 4000rpm in the outlet

4.6 후처리(Post-process) 부모들에의 적용

지로터 펌핑 챔버 높이의 1/4 지점에 해당하는 단면에서의 압력 분포를 Fig. 18 에 나타내었다. 단면에서의 압력분포를 볼 때 최소 압력은 14,660 Pa 로 작동유체의 포화증기압인 120 Pa 보다 높아 캐비테이션 현상이 발생하지 않았다.

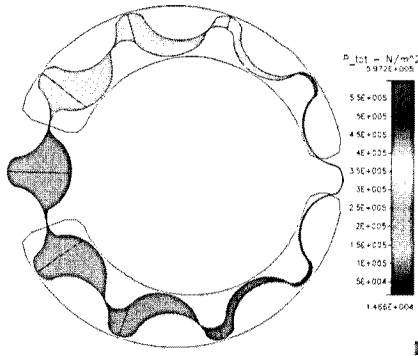


Fig. 18 Pressure distribution of the gerotor fluid zone

Fig. 19 는 펌핑 챔버 단면에서의 속도분포를 나타내었고, 로터 회전에 따른 지로터 펌프의 입출구 포트 영역에서의 유선을 Fig. 20 에 나타내었다. 지로터가 회전함에 따라 상대적으로 저압의 펌핑 챔버가 고압의 출구포트와 접하게 될 때 압력차에 의해 일시적으로 역류가 발생하게 됨을 알 수 있다. 이러한 현상으로 인해 유량 맥동이 다소 커지게 되나 출구의 평균유량에는 크게 영향을 미치지 않는다. 이러한 역류 현상을 줄이기 위해서는 출구 포트의 형상을 변경하여 저압의 펌핑 챔버와 고압의 토출 포트가 만나는 시간을 지연시키는 것이 필요하다.

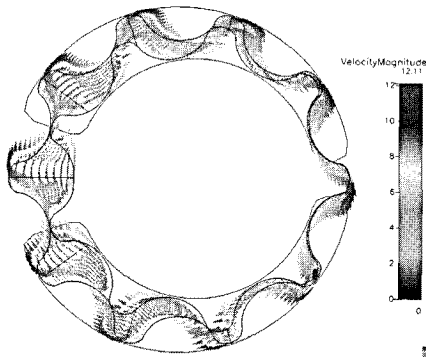


Fig. 19 Velocity vector of the gerotor fluid zone

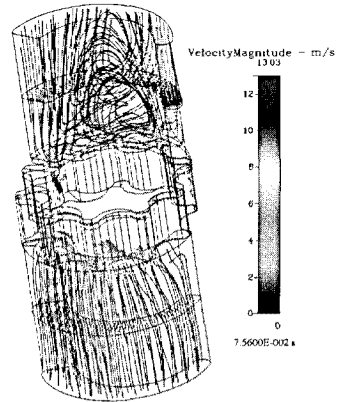


Fig. 20 Stream line of the gerotor fluid zone

5. 시제품 제작 및 성능시험

성능시험을 통해 치형의 형상에 따른 유량에 초점을 맞추어 각 치형의 토출 유량 성능을 비교하였다. 성능 시험 조건은 실제 차량에 사용되는 조건으로 유동해석 모듈에서 적용한 조건과 동일하게 적용하였다.

Fig. 21 에서는 치형설계 모듈에서 선정된 Table 2 의 4 가지 치형(No. 1~4)에 대한 이론, CFD, 실험의 결과값을 비교하였다. 결과값들은 다소 차이가 있으나 전체적으로 비슷한 경향성을 나타내었으며, 치형설계 모듈에서의 유량 계산값에 비하여 유동해석 모듈에서의 유량 계산값은 3.3~5.7% 차이를 보임을 알 수 있다. 그러나 유동해석 모듈의 유량 계산값과 성능 시험 결과값은 약 15%정도의 차이가 나는 것을 볼 수 있는데 이는 하우징 측면과 틱간극 누설에 의한 것으로 사료된다.

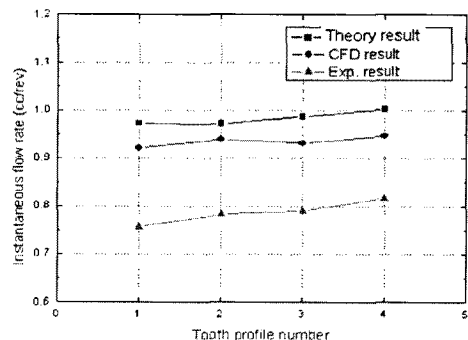


Fig. 21 Comparison of results(instantaneous flow rate) according to the teeth profiles

통합적 설계 자동화 시스템의 치형설계 모듈을 통해 창출된 치형에 대하여 시스템의 유동해석 모듈을 통해 검증된 최적 치형의 시제품을 Fig. 22 에 나타내었다.

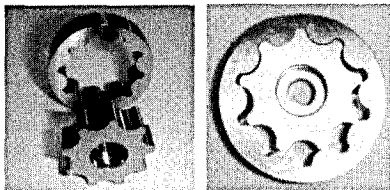


Fig. 22 Inner and outer rotors manufactured by the best values of design parameters

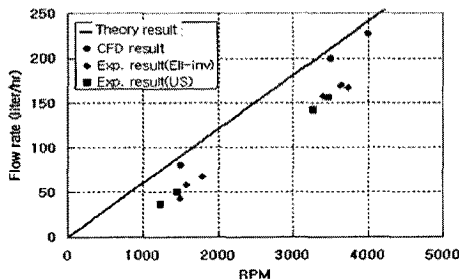


Fig. 23 Comparison of endurance test results

본 연구에서 개발한 최적의 치형 형상(Fig. 22) 을 갖는 지로터와 미국 N 사의 치형을 890 시간 내구성 시험을 통한 결과 비교를 Fig. 23 에 나타내었는데 1500rpm 부근에서 거의 동등한 성능을 나타내거나 미국 N 사의 치형이 다소 우수한 성능을 보이는 반면에, 3500rpm 부근에서는 본 연구에서 개발된 치형이 다소 우수한 성능을 보임을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 타원, 인벌루트가 조합된 치형 형상을 가진 외부로터의 기하학적인 분석과 운동학적인 분석을 통하여, 치형설계 모듈과 유동해석 모듈로 구성된 통합적 설계 자동화 시스템을 개발하였다.

개발된 통합적 설계 자동화 시스템의 특징은 다음과 같다.

1) 통합적 설계 자동화 시스템의 치형설계 모듈에서는 타원, 인벌루트가 조합된 외부 로터로부터 내부로터 형상의 자동 창출과 창출된 로터 형

상에 대하여 유량과 유량맥동을 자동으로 계산할 수 있다.

2) 치형설계 모듈의 설계 부모들에서는 입력변수 값에 의하여 치형을 자동으로 창출시키고 출력 부모들에서는 외부로터의 회전각도에 따른 순간유량 및 맥동을 자동으로 계산하여 그 결과를 그래프로 출력시킬 수 있다.

3) 유동해석 모듈에서는 치형설계 모듈에서 창출된 치형 데이터를 가지고 유동 영역의 압력분포를 통한 캐비테이션, 속도벡터를 통한 틱간극 누설, 출구 유량 등의 결과를 얻을 수 있다.

4) 개발된 시스템은 설계변수에 따라 로터를 창출시키고 창출된 로터가 회전하는 모습과 내부 유동 시뮬레이션을 수행하므로써 설계 오류를 사전에 방지할 수 있고, 완성차 업체의 사양에 따른 제조업체들에게 적절한 치형 형태의 결정법을 제시할 수 있다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임. 또한 본 결과물은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

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, 1984.
3. Jiang, Y. and Perng, C. Y., "An Efficient 3D Transient Computational Model for Vane Oil Pump and Gerotor Oil Pump Simulations," SAE Paper No. 970841, 1997.
4. Singhal, A. K., Li, H. Y., Athavale, M. M. and Jiang, Y., "Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model," Journal of Fluid Engineering, Vol. 124, No. 3, pp. 617-624, 2002.
5. Jung, S. Y., Han, S. M. and Kim, C., "Development of an Automated Design System for Oil Pumps with Ellipse Lobe Profile," Journal of the Korea Society

- for Precision Engineering, Vol. 26, No. 1, pp. 120-129, 2009.
6. 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)," Journal of the Korea Society for Precision Engineering, Vol. 26, No. 3, pp. 103-112, 2009.
 7. Colbourne, J. R., "The Geometry of Involute Gears," Springer-Verlag, pp. 24-44, 1987.
 8. Yang, S. Y. and Cha, S. J., "Simulation of Cavitating Flow in a Gerotor Oil Pump," KSAE Annual Conference, Vol. 1, pp. 599-604, 2005.
 9. Nam, K. Y., Cho, S. H. and Park, J. I., "Numerical simulation in the IC Engine Lubrication Gerotor Pump," Transactions of the KSME B, Vol. 30, No. 10, pp. 1019-1025, 2006.
 10. Kim, J. H. and Kim, C., "Development of an Integrated System of Automated Design of Gerotor Oil Pump," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 2, pp. 88-96, 2006.
 11. Kim, J. H., Kim, C. and Chang, Y. J. "Optimum Design on Lobe Shapes of Gerotor Oil Pump," J. of Mechanical Science and Technology, Vol. 20, No. 9, pp. 1390-1398, 2006.
 12. Chang, Y. J., Kim, J. H., Jeon, C. H., Kim, C. and Jung, S. Y., "Development of an Integrated System for the Automated Design of a Gerotor Oil Pump," Journal of Mechanical Design, Vol. 129, No. 10, pp. 1099-1105, 2007.