

항공기용 연료이송펌프 기어부 설계에 관한 연구

이정훈^{1,†} · 김준태²

¹한국항공우주연구원

²(주)한화에어로스페이스

A Study on the Design of Fuel Transfer Pumps Gear Part for the Aircraft

Jung-hoon Lee^{1,†} and Joon-tae Kim²

¹Korea Aerospace Research Institute

²Hanwha Aerospace

Abstract

This paper discusses a series of procedures and results for designing the gear part of a fuel transfer pump for an aircraft, developed as an independent technology for the first time in Korea. A gear pump type is selected because the design requirements of the fuel transfer pump are met by a gear pump with a characteristics of less leakage inside than a vane pump with superior overall performance. The gear housing is designed with suitable clearance, considering the outer diameter of the gear, which is the main factor on which the flow can be determined. Additionally, the calculation of the required hydraulic and axial force for the motor to drive the fuel transfer pump was performed.

초 록

본 논문은 국내 최초로 독자기술로 개발된 항공기용 연료이송펌프의 기어부를 설계하는 일련의 절차 및 그 결과에 대한 것이다, 기어펌프 방식이 베인펌프 방식에 비하여 전반적 성능이 우월하고, 내부 누설이 소량으로, 연료이송펌프의 설계에 필요사항에 부합하여 이 방식이 선정되었다. 기어 하우징은 흐름을 결정하는 중요한 변수인데, 기어의 외경을 고려하여 적절한 여유공간을 갖도록 설계하였다. 아울러, 모터가 연료이송펌프를 구동하기 위해 필요한 공압 및 축동력 등도 계산하였다.

Key Words : Fuel Transfer Pump(연료이송펌프), Gear Pump(기어펌프), Housing(하우징), Bearing(베어링), Clearance(간극), Displacement(배체체적)

1. 서 론

항공기용 연료펌프는 그 기능에 따라 연료탱크의 연료를 엔진에 균일한 압력으로 공급하는 연료승압펌프와 연료탱크 간의 연료를 이송하는 연료이송펌프로 구분할 수 있다. 우리나라에서는 민군겸용 핵심구성품

개발사업을 통하여 헬기 연료탱크에 대한 기본설계 연구가 수행된 바 있으며[1], 항공기 연료승압펌프의 최적설계와 해석에 대한 연구가 수행된 바 있다[2]. 그리고 연료펌프의 안전성 평가/분석에 관한 연구[3]와 항공기용 연료승압펌프 모터 조립체 설계에 대한 연구[4]를 통하여 연료펌프 개발의 기반을 확립한 바 있다. 본 연구는 국내 최초로 독자기술로 개발된 항공기용 연료이송펌프에 있어서 연료이송펌프의 기어부 설계에 대한 일련의 과정을 다루고 있다[5].

Received: Jan 27, 2019 Revised: Feb. 6, 2020 Accepted: Feb. 12, 2020

† Corresponding Author

Tel: +82-042-860-2291, E-mail: kariere@kari.re.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

2. 연료이송펌프 형상 결정

2.1 연료이송펌프 구성

연료이송펌프는 연료송압펌프가 안정적인 역할을 수행할 수 있도록 주 연료탱크 사이에서 연료를 배분하는 기능과 연료를 사용함에 따른 기체의 무게중심의 변화를 조정하여 기체의 안정성을 유지하는 기능을 수행한다. 연료이송펌프는 Fig. 1과 같은 조립체로 구성할 수 있다.

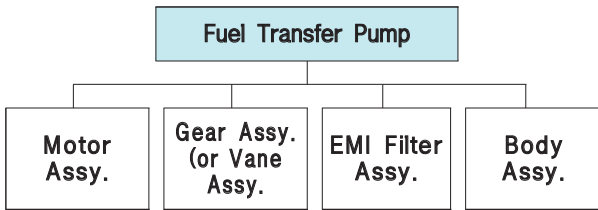


Fig. 1 Composition of Fuel Transfer Pump

Figure 1에서 보는 바와 같이 연료이송펌프는 크게 4부분으로 구성된다. 여기에서 Motor Assembly, EMI(Electro Magnetic Interference) Filter Assembly, Body Assembly는 펌프의 공통적인 구성요소라 할 수 있다. Gear Assembly(혹은 Vane Assembly) 부분이 펌프의 성능 및 특성을 구분하는 요소이므로 이에 대한 상세연구를 수행한 바 있다[6].

2.2. 연료이송펌프 분류 및 형상결정

연료이송펌프로 사용되는 펌프 형태는 흡입양정이 큰 기어펌프와 베인펌프 두 가지를 고려하였다. 기어펌프는 안쪽 물림기어형식과 바깥쪽 물림기어형식이 있으며 각각의 형태와 특징은 다음과 같다(Fig. 2, 3).

가. 기어펌프의 특징

- 고점도액 이송에 적합
- 구조 간단
- 내부 누설 소량
- 마모 심함
- 기어사이에 이물질 삽입 시 회전 불능

나. 베인펌프의 특징

- 기어펌프에 비해 토출압력의 맥동 적음
- 기어펌프대비 수명완료 시 성능 우수
- 호환성이 양호하고 보수 용이
- 다른 펌프에 비해서 소음 성능 우수
- 내부 누설 과다

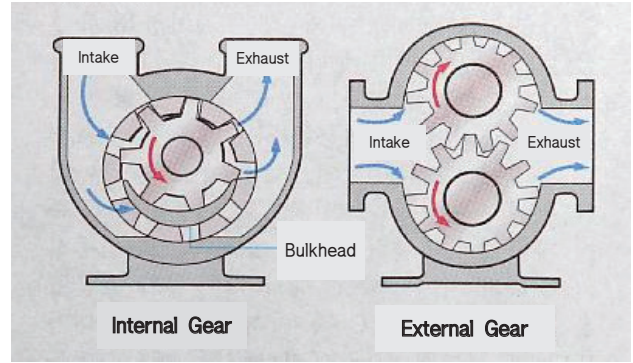


Fig. 2 Types of Gear Pump

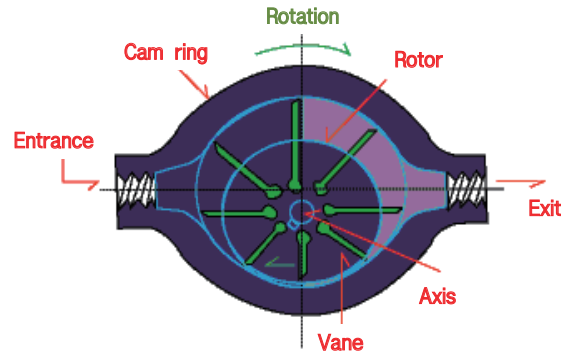


Fig. 3 Configuration of Vain Pump

기어펌프는 내부 누설이 소량이지만 베인펌프는 내부 누설이 과다한 특성을 가지고 있다. 연료이송펌프는 정지 상태로 연료의 흐름이 차단된 상태에서 양 방향에 대해 양단에 운용압력 작용시 연료의 누설이 분당 100 cc 이하가 필요하다. 이에 따라 본 연구에서 필요한 사항을 고려할 때 기어펌프 형식이 연료이송펌프에 적당한 방식으로 판단된다.

3. 연료이송펌프의 설계 절차

연료이송펌프의 기본 설계 흐름은 Fig. 4와 같이 진행된다. 상위 요구도가 결정되면 상세연구를 통하여

요구사항에 적합한 기어펌프의 형식을 선정하는 것이 선행되어야 한다[6].

기어펌프 형식이 결정되면 요구사항에 적합하도록 기어형상 혹은 베인의 형상을 설계한다. 본 연구에서는 기어펌프 방식으로 결정되어 기어형상을 설계하고 이에 따른 해석을 수행한다. 일련의 과정으로, 모터부 설계와 Body Assy. 설계를 각각 수행한 후 이에 대한 접속부와 배치에 대하여 설계를 수행한다. 기타 구성품 설계를 완료한 후, 연료펌프 설계 결과를 도출하는 것으로 이에 대한 설계를 종료한다. 요구사항에 부합할 때까지 이와 같은 과정으로 각 단계별로 상세설계를 반복하여 수행하게 된다.

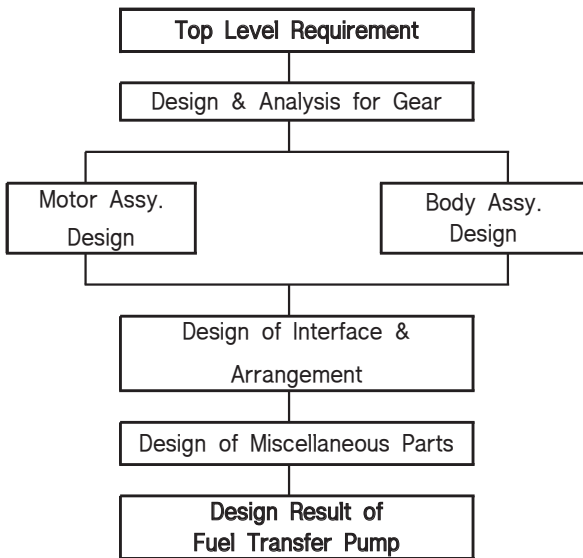


Fig. 4 Flow Chart of Design for Gear Type Fuel Transfer Pump

4. 기어부 설계 및 해석

4.1 기어 설계

기어펌프는 서로 맞물리는 2개의 기어를 외접하는 하우징 속에 넣고 기어를 회전시켜 기어의 이(teeth)와 하우징 벽면 사이에 생기는 공간의 이동을 이용하여 유체를 송출하게 된다. 기어 펌프가 송출할 수 있는 유체의 양은 2가지 주요 매개변수인 펌프의 배제체적과 구동축의 회전속도에 의해 지배된다. 2가지 매개변수 중에서 특히 펌프의 배제체적은 주로 설계 형상에

의해 결정된다.

Figure 5와 같이 기어가 같은 방향으로 회전할 때, 구동기어의 이 1번과 7번, 그리고 종동기어의 이 6'번과 7'번에 의해 배제된 유체는 펌프와 출구로 가압될 것이다. 이와는 반대로 입구에서는 유체가 이 2번, 3번, 2'번 및 3'번에 의해 운반된다. 유체 체적의 감소는 입구의 저압 영역에서 발생된다. 주어진 펌프의 설계 구조에 대하여 일회전당 출구로 송출되는 유체의 양을 결정하는 것이 중요하다.

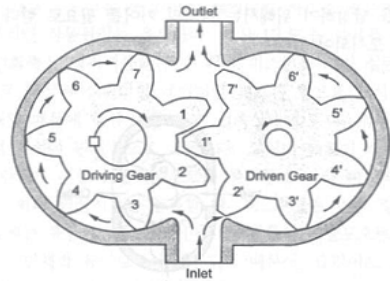


Fig. 5 Schematic Diagram of External Gear Pump

기어 이의 측단면형상이 부정형(irregular shape)이기 때문에 Fig. 6에서 음영면적으로 도시되어 있다. Fig. 6으로부터 배제면적 ABOB'A'A는 면적 ABOA'A와 A'OB'A'의 합이라는 사실을 알 수 있다. 또한, 면적 AOBA는 A'OB'A'와 동등하다. 따라서 배제면적은 원호 면적 AOA'A와 동등하다.

$$A_{ABO'B'A'} = A_{AOBA} = 0.5r^2d\theta \tag{1}$$

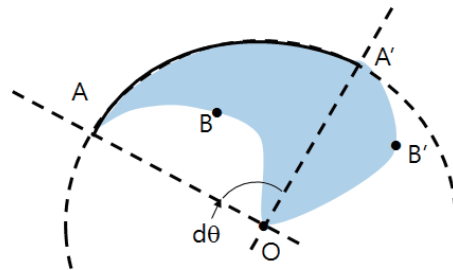


Fig. 6 Displacement by Uniform Curvature

여기에서, r은 Fig. 6에서의 거리 OA와 동등한 회전반경이다. 출구 챔버 내에서 증가하는 전체 유체체적

(dV)은 시간간격 동안에 구동기어의 이 1번과 7번으로부터 배제된 체적 (dV_1)과 종동기어의 이 6'번과 7'번으로부터 배제된 체적(dV_2)에 의한 것임을 알 수 있다.

$$dV_1 = w \left(\frac{r_{a1}^2 d\theta_1}{2} - \frac{r_{c1}^2 d\theta_1}{2} \right) = \frac{w}{2} (r_{a1}^2 - r_{c1}^2) d\theta_1 \quad (2)$$

$$dV_2 = w \left(\frac{r_{a2}^2 d\theta_2}{2} - \frac{r_{c2}^2 d\theta_2}{2} \right) = \frac{w}{2} (r_{a2}^2 - r_{c2}^2) d\theta_2 \quad (3)$$

여기에서,

w = 기어의 이폭
 r = 이끝원 (addendum circle)의 반경
 r_c = 기어 중심에서 접촉점까지의 거리 (반경)
 $d\theta$ = 시간 dt 동안의 회전각도

하첨자 1과 2는 각각 구동기어와 종동기어의 매개변수를 표시한다. 연료이송펌프 설계를 위한 기어부에 대한 초기치를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. The Design Values of the Fuel Transfer Pump

Design Parameter	Fuel Transfer Pump
Pump Type	Circumscribed Gear Pump
Gear Type	INVOLUTE
Gear Outer Diameter	19.7 mm
Pitch Circumference	16.25 mm
Gear Module	1.25
No. of Gear Teeth	13
Gear Teeth Wideness	20 mm

기어펌프에 의해 송출되는 평균 이론유량은 단일의 펌프 배제체적이 2개의 인접한 기어 이 사이의 체적과 동등하다고 가정함으로써 근사화 된다. 따라서 구동기어는 회전 중에 모든 기어 이 사이의 전체 기어체적과 동등한 유체체적을 공급하며, 종동기어도 동일한 작용을 하게 된다. 이에 따라 1회전 동안 기어 펌프에 의해 송출되는 유체체적은 하나의 기어의 이끝원 (addendum circle)과 이뿌리원(dedendum circle) 간의 환형체적과 동등하다고 가정하는 것이 적절하다.

이 체적의 피치반경(r_p), 이의 개수(n), 이폭(w) 및 이 높이(h)로부터 유도될 수 있다. 또한 h 는 기어 맞물림 중에 피치점에서는 상부 랜드(구동)와 하부 랜드(종동) 간에 전혀 간극이 없다고 가정할 때, 기어 모듈(m)의 2배와 동등한 이끝 높이와 이뿌리 높이의 합과 동등하다. 따라서 배제체적 D_p 는 다음과 같다.

$$D_p = 4\pi r_p m w = 2\pi n m^2 w \quad (4)$$

이 식에 아래 표의 기어펌프 사양을 대입하여 1회전 당 이론 송출량은

$$\begin{aligned} D_p &= 2\pi n m^2 w = 2\pi (13) (1.25)^2 (20 \times 10^{-3}) \\ &= 2.55 \text{ (cc) / rev} \end{aligned}$$

펌프의 용적 효율을 고려하여 속도에 따른 송출량을 Fig. 7과 같이 보정한다[5].

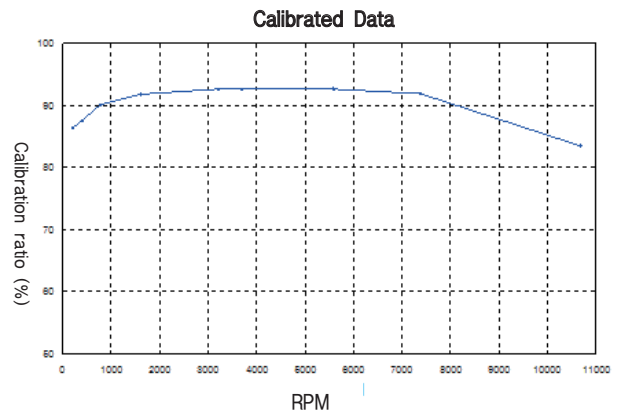


Fig. 7 Calibrated Transfer Value According to RPM

4.2. 하우징 형상설계

4.2.1. 기어 하우징

기어의 외경을 고려하여 적당한 간극(clearance)을 갖도록 설계하였으며, 이 부분은 맞물리는 한 쌍의 기어에 대해 유량이 결정될 수 있는 주요 인자이므로 기어 제작이 완료된 후에 맞춤연삭(match Grinding) 하도록 설계하였다.

하우징과 기어 사이의 간극 δ 는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다[7].

$$\delta = (2\pi t d)^{1/2} \cdot (\mu n / p)^{1/2} \quad (5)$$

$$d = 19.70 \text{ mm} = 1.97 \text{ cm (기어외경)}$$

$$\mu = \rho\nu = 1.3 \times 10^{-2} \text{ g/cm-sec}$$

$$n = 5,000 \div 60 = 83.3 \text{ radius/sec (단위시간당회전수)}$$

$$P = 6 \text{ psi} = 0.42 \text{ kg/cm}^2 = 413685 \text{ dyne/cm}^2 \text{ (압력)}$$

$$t = n(\text{치수}) \times \text{원주길이} = 13 \times 0.028 = 0.364$$

$$\begin{aligned} \delta &= (2\pi \times 0.364 \times 1.97)^{1/2} \times (1.3 \times 10^{-2} \times 83.3 \div 413685)^{1/2} \\ &= 0.0034 \text{ cm} \end{aligned}$$

식 (5)에서와 같이 반경방향 간극이 34 μm 인 것으로 계산되었다. 기어와 기어 하우징은 상이한 재질로 제작되는데 각 재질의 열팽창률도 상이하므로 온도 변화를 고려하여 간극을 결정하는 것이 바람직하다. 유체온도 변화를 고려하여 하우징과 기어 사이의 간극을 30~50 μm 로 설정하였다.

4.2.2. 하우징 측면부

기어의 측면과 하우징의 간극은 펌프의 성능을 좌우하는 매우 중요한 인자이므로 간극을 신중하게 선정해야 한다. 간극이 너무 작으면 용적효율은 증가하나 소비동력이 증가하고 또한 측면의 온도가 상승하여 경우에 따라서는 소착(燒着) 현상이 발생하기도 한다. 측면에 대한 간극의 적정 값을 계산하는 식은 식 (6)과 같다[8].

$$S = c d_2 (\mu n / p)^{1/2} \quad (6)$$

여기서, $c = 1.5$ (펌프에 따라 정해지는 상수)

$$\begin{aligned} S &= 1.5 \times 1.97 \times (0.13 \times 10^{-2} \times 83.3 / 413685)^{1/2} \\ &= 0.0015 \text{ cm} \end{aligned}$$

그리고 다른 부품과의 인터페이스면은 평면도를 규제하여 조립면의 접촉에 의한 축의 흔들림이 발생하지 않도록 설계하였다.

4.3. 기타 구성품 설계

4.3.1. 베어링 선정

베어링은 설치관계 치수를 참고한 공차를 고려하여 선정하였으며, 펌프의 회전수보다 허용회전수가 높은 값인 29,000 rpm을 보증하는 베어링으로 선정하였다.

4.3.2. Seal 형상 설계

기어의 연료이송펌프에 적용된 Seal 규격은 유압기기(압축기, 펌프 등 포함)의 패키징, 글랜드(gland) 등에 대한 미군사규격인 MIL-G-5514 또는 Metric Seal Groove 규격에 따라 설계하였다.

5. 축동력 및 회전속도

연료이송펌프는 모터를 이용하여 구동하게 되는데 이때 모터 사양의 적절한 선정을 위해서는 연료이송펌프 구동에 필요한 수동력과 축동력의 계산이 수행되어야 한다.

5.1. 수동력

수동력은 펌프 양수(pumping water) 시의 이론 동력을 뜻하며 비중과 펌프 토출량, 그리고 펌프 전양정에 의해 계산된다. 여기서 펌프 전양정은 실양정, 배관 마찰손실 수두, 기기저항 수두를 포함한 값이며, 상수 0.163은 단위 환산(W)을 위해 사용되었다[9].

$$P_w = \frac{\gamma Q H}{102 \times 60} \text{ (kW)} \quad (7)$$

P_w : 수동력(kW)

γ : 비중(g/cm^3)

Q : 펌프 토출량(m^3/min)

H : 펌프 전양정(m)

본 연구의 기본 조건을 식 (7)에 대입하면 연료이송펌프에서 필요한 수동력을 구할 수 있다[Table 2]. 여기서 전양정은 연료이송펌프의 입구/출구의 압력차에

의해 구할 수 있다[10].

Table 2. The Design Results of Water Horse Power for the Fuel Transfer Pump

Temperature [°C]	43 (High temp.)	-40 (Low temp.)	20 (Normal temp.)
Specific Gravity [g/cm ³]	0.79	0.85	0.81
Discharge amount [kg/hr]	431	431	431
Total head [M]	4.21	4.21	4.21
Pressure Difference [kPa]	41.3	41.3	41.3
Water Power [W]	4.93	4.93	4.93

토출압과 토출유량만 고려하면 수동력은 온도 변화의 영향을 받지 않는다. 그러나 일반적인 기어펌프에서는 기계적 마찰이나 온도에 따른 유체의 점성에 의해 구동 토크가 증가한다.

5.2. 축동력

펌프를 구동하기 위해서는 양수에 필요한 수동력 뿐 아니라 펌프의 효율을 고려한 축동력이 계산되어야 하며, 축동력은 다음식과 같이 수동력에 펌프효율을 나누어줌으로써 얻을 수 있다.

$$P = \frac{P_w (\text{수동력})}{\eta_p (\text{펌프효율})} \quad (8)$$

앞에서 계산된 수동력에 소형 기어펌프 효율과 저온에서의 특성을 고려하여 펌프효율을 적용하면 연료이송 펌프를 구동하는데 필요한 축동력을 산출할 수 있다 [Table 3]. 본 연구에서는 펌프효율을 15%로 추정하여 적용하였다.

Table 3. The Design Results of Shaft Power for the Fuel Transfer Pump

Water Power P _w [kPa]	Efficiency η_p [%]	Axis Power P[W]
4.93	15	32.87

5.3. 회전속도

연료이송펌프의 회전속도는 펌프의 1회전당 용적량이 정해졌을 경우 연료이송펌프의 송출 성능을 결정하게 된다. 연료이송펌프는 43°C에서 약 9.1 LPM(Liter per Minute) 정도가 필요한데, 연료이송펌프의 실제 송출량은 보정 값과 여유율을 고려하여 펌프 성능을 70%로 적용하면 연료이송펌프의 이론 요구 송출량 13.0 LPM과 기어형상설계에서 산출된 연료이송펌프 1회전 당 용적량 2.55 cc를 만족하는 회전속도는 식 (9)로부터 산출할 수 있다.

$$Q = D_p N = 2\pi n m^2 w N \quad (9)$$

$$N = Q / D_p = (13.0) / (2.55 \times 10^{-3}) \approx 5000 (\text{rpm})$$

6. 결론

순수 국내 독자기술로 기어방식의 항공기용 연료이송펌프를 설계하였다. 기어부 설계를 위하여 기어 설계, 하우징 설계 및 간극 선정 등을 수행하였으며 이후 베어링을 선정 및 Seal 형상 설계 등을 통하여 기어부 설계를 수행하였다. 또한 연료계통에서 요구되는 성능 조건을 만족하기 위하여 축동력 및 회전속도를 산출하였다. 설계 완료된 기어방식 연료이송펌프는 시제품의 성능시험, 환경시험 등을 통하여 계통에서 요구하는 성능 만족 여부를 확인할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 ‘ADS-B 기반 무인항공기 충돌회피시스템 개발’사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- [1] Jung-hoon Lee, Sung-chan Kim and Hyun-gi Kim, “Preliminary Design of Helicopter Fuel Tank,” Journal of Aerospace System Engineering, vol. 2, No. 2, pp. 14-19, June 2008.
- [2] Jung-hoon Lee and Joon-tae Kim, “Design and

- Analysis of Fuel Boost Pump for Aircraft,” Journal of Aerospace System Engineering, vol. 6, No. 4, pp. 18-23, December 2012.
- [3] Jung-hoon Lee and Jang-Won Park, “Safety Assessment Analysis of the Rotorcraft Fuel Pumps,” Journal of Aerospace System Engineering, vol. 21, No. 2, pp. 21-25, June 2013.
- [4] Jung-hoon Lee and Joon-tae Kim, “A Study on the Design and Analysis of the Fuel Boost Pump Motor Assembly for the Aircraft,” Journal of Aerospace System Engineering, vol. 12, No. 3, pp. 1-8, June 2018.
- [5] Jung-hoon Lee et al, “Design of Fuel Transfer Pumps Gear Part for Aircraft,” Korean Society for Aeronautical and Space Science 2008 Autumn Conference, November 2008.
- [6] Jung-hoon Lee and Joon-tae Kim, “Trade-off Study of the Fuel Pumps for an Aircraft,” Korean Society for Aeronautical and Space Science 2013 Autumn Conference, November 2013.
- [7] “Reports for Fuel Transfer Pump Design & Analysis”, Korea Aerospace Research Institute, 2008.
- [8] Lev Nelik, "Centrifugal and Rotary Pumps", CRC Press, 1999.
- [9] Igor J. Karassik et al., “Pump Handbook 3rd edition,” McGraw-Hill International Edition, 2001.
- [10] Michael Volk, "Pump Characteristics and Applications 2nd edition", Taylor&Francis, 2005.