

# 스크류 유량계의 개발 및 정밀 성능평가에 관한 연구

## A Study on the Development and Precise Performance Test of a Screw Type Flowmeter

황종대<sup>1,✉</sup>, 오지영<sup>2</sup>, 정윤교<sup>2</sup>, 이상렬<sup>3</sup>  
Jong Dae Hwang<sup>1,✉</sup>, Ji Young Oh<sup>2</sup>, Yoon Gyo Jung<sup>2</sup> and Sang Ryul Lee<sup>3</sup>

1 창원대학교 메카트로닉스 기술혁신센터 (Mechatronics Technology Innovation Center, Changwon Univ.)

2 창원대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Changwon Univ.)

3 아산텍 주식회사 (Asantek corporation)

✉ Corresponding author: hjd2123@korea.com, Tel: 055-213-2867

Manuscript received: 2008.6.9 / Revised: 2008.12.8, 2009.1.30 / Accepted: 2009.2.7

*This research introduces the efficient modeling and manufacturing method using reverse engineering combined with rotational simulation of a pair of screw and mill-turn machining realized a proposed NC program. Because previously developed model had insufficient flow measuring accuracy, we considered that matter in the aspect of method of modeling and performance test. For that reason we modified the modeling which could minimize a gap between male and female screw, and developed precise tester which consists of constant tank, flowmeter and load cell, etc., and then conducted the test for defining characteristic and accuracy of flowmeter and repeated same test 5-times. Consequently we could obtain satisfied measuring accuracy and reproducibility indicated in the catalog of master model. Hence we give our conclusion as to the validity of developing accurate screw type flowmeter using the proposed process such as reverse engineering, mill-turn machining and precise performance test.*

Key Words: Screw Type Flowmeter (스크류 유량계), Reverse Engineering (역공학), Rotational Simulation (회전 시뮬레이션), Mill-turn Machining (복합가공), K-factor (K-특성값), Precise Performance Tester (정밀 성능평가 장치)

### 1. 서론

오늘날 유량계는 유체기계 관련 산업에서 없어서는 안 되는 중요한 계측기로서 최근에는 그 사용 범위가 더욱 광범위해지고 있을 뿐만 아니라 에너지 절약과 환경보존, 유체기계의 효율을 극대화하기 위하여 더욱 더 정밀한 유량측정 정밀도를 요구하고 있다. 최근 각광받는 유량계 중에서도 Fig. 1 과 같은 스크류 타입 유량계는 유체가 유입되는 압력에 의하여 서로 맞물려 있는 암, 수 스크류가 반대 방향으로 상호 회전하고 이 때 마그네틱 픽업센서에서 펄스를 감지하여 유량으로 출력하는 구조를 갖는다. 스크류 유량계는 컴팩트한

케이싱 내부에서 특유의 기하학적 기어치형을 갖는 암, 수 스크류가 연속적으로 일정한 용적의 유량을 흡입, 회전, 배출하므로 여타 유량계에 비하여 높은 측정 정밀도 특성을 가질 뿐만 아니라 맥동, 설치위치 및 유체점도의 영향을 적게 받는다.

그러나 스크류 유량계의 이러한 장점에도 불구하고 저항 없이 연속적으로 스크류를 회전시키기 위해서는 상호 간섭이 없는 암, 수 스크류 단면치형에 대한 설계, 해석과 치면에 대한 가공기술 및 유량측정 정밀도 평가 기술 등 다양한 기술적 과제를 안고 있다.

국내외의 스크류 설계 관련 연구는 주로 맞물림 회전 운동을 하는 단면형상에 대한 해석을 위

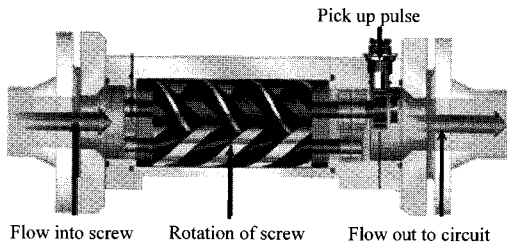


Fig. 1 Measuring mechanism of screw type flow meter

주로 이루어졌다. Stosic<sup>1</sup> 등은 스크류 로터의 단면 형상 설계에 있어 로터 간의 간섭을 배제하기 위한 수학적 미분 알고리즘의 개념을 제시하였고, Litvin<sup>2</sup> 등은 컴퓨터를 사용한 로터 단면 형상 설계 원리와 로터 치형의 접촉선에 관한 연구를 수행하였다. Lee<sup>3</sup> 는 대칭형 스크류 치형의 특성값에 대한 연구를 수행하였고, Kim<sup>4</sup> 등은 임의 단면 형상이 스크류 운동을 할 때 생성되는 스윙 볼륨을 생성하기 위하여 곡면의 분할과 분류를 통한 스윙 볼륨 생성 알고리즘을 개발하였다. 그러나 이러한 해석적 접근은 스크류 치형을 사용한 스크류 제품군에 적용하여 새로운 제품을 개발하고자 할 때 산업현장에서 손쉽게 접근하기 어려운 문제를 안고 있다. 따라서 본 연구에서는 스크류 유량계의 개발 시 치형설계를 단순화하고 개발기간을 단축하기 위하여 검증된 특성 형상을 가지는 원형모델을 참조값으로 하여 정밀형상 역공학 방식으로 스크류 치형을 설계하였다. 또한 이전연구<sup>5</sup> 에서 개발한 스크류 유량계의 성능을 개선하기 위하여 디지털목업의 회전시뮬레이션 해석 기법을 적용하여 압, 수 스크류간의 간격을 일정하게 하고자 하였다.

기어치형을 갖는 스크류를 제작하기 위한 전통적인 방식은 호빙머신을 사용하는 방식이다. Choi<sup>6</sup> 등은 “대칭형 스크류 로터의 커터설계와 진동특성에 관한 연구”에서 호빙머신을 사용한 스크류 제작을 위하여 커터와 치면의 교선군을 해석함으로써 절삭간섭이 발생하지 않는 커터형상, 공구 기울임 각도 및 경로를 선정하였다. 그러나 전용 호빙머신을 보유하지 않은 일반 가공업체에서 이 방법을 적용하기는 쉽지 않은 현실이다. Lee<sup>7</sup> 등은 “3 축 선반에서의 스크류 가공을 위한 CAM 시스템 개발”에서 다양한 단면형상을 가진 스크류의 CAM 시스템을 개발하였다. 본 연구는 5 축(X-Y-Z-B-C) 복합가공기를 사용하여 스크류를 제작하였으며 가공 데이터의 단순화를 피하고 현장기술자가

직접 공구경로를 생성할 수 있도록 매뉴얼 NC 프로그램 기본 코드를 제한하였다.

이와 같이 국내외의 스크류 관련 유체기계에 대한 연구는 주로 설계 및 제작에 주안점을 두고 진행되어 왔다. 그러나 정확한 성능을 파악하고 해석하기 위한 성능평가 관련 연구<sup>6</sup> 는 진동특성 해석에 국한되어 있어 정확한 성능평가 방법과 분석이 필요한 시점이다.

이전 연구에서는 스크류 유량계를 개발하기 위한 기초연구를 수행한 바 있으나 개발 자체에 주안점을 두었으며 성능평가 측면에서는 유량계측 특성값(K-factor)을 중점적으로 평가하였다. 따라서 스크류의 회전특성 및 유량 측정시의 계측정밀도 특성 평가 등 정밀 성능평가에 대한 추가 연구의 필요성이 제기되었다.

따라서 본 연구에서는 다음과 같은 연구방법과 목적을 토대로 연구를 진행하였다. 즉 역공학 기법과 회전시뮬레이션 해석을 통하여 치형 설계의 용이성과 정확성을 기하고, 매뉴얼 NC 프로그램을 적용한 5 축 복합가공을 통하여 스크류를 제작하는 표준을 마련함으로써 일반 가공업체에서 접근하기 쉽도록 하였으며, 회전특성 및 유량계측 특성값(K-factor)을 사용한 개발 유량계 특성을 파악하고 실제유량과 도시유량의 오차를 분석하여 유량측정 정밀도를 평가하였다. 특히 이전 연구에서 개발된 스크류의 성능을 개선하고 간이성능 평가 장치의 오차 요인을 제거하기 위한 정밀 성능평가 장치의 설계, 제작 및 적용을 통하여 스크류 유량계의 개발과 정밀성능평가를 위한 기반데이터를 마련하고자 하였다.

## 2. 역공학기술을 이용한 스크류의 설계

### 2.1 스크류의 설계

스크류 모델링을 생성하기 위한 방법으로 본 연구에서는 역공학 기법을 적용하였다. 역공학 기법을 적용하기 위한 참조데이터로 사용한 원형모델은 성능이 검증된 오스트리아 Kobold 사의 스크류 유량계이며 유량측정 정밀도가 0.1%에 이르는 세계 최고 수준의 제품이기 때문에 본 연구에서 역공학 기술을 비롯한 연구개발 프로세스를 통하여 개발하고자 하는 스크류 유량계의 목표 정밀도를 원형모델의 제시 정밀도인 0.1%로 설정하였다.

역설계에 사용된 치형 설계 인자는 CMM 파래이저 스캐너에서 획득한 참조 데이터를 활용하

였다. 스크류 기어 프로파일의 역설계시 참조 데이터를 그대로 사용하지 않고 치형 설계 프로그램에서 수정설계를 수행하였으며 형상복원정밀도인 50  $\mu\text{m}$ 을 만족할 때 까지 기어생성을 위한 입력조건을 수정하였다. 그 결과 Table 1 과 같은 치형 생성 요소를 도출하였으며 기어 치형을 생성한 후 상용소프트웨어인 CATIA 의 GSD 모듈을 사용하여, 생성한 기어 치형을 단면곡선으로 하고 리드(Lead)가 각각 20mm(수 스크류), 30mm(암 스크류)인 헬릭스 커브를 안내곡선으로 하는 스크류 곡면을 Fig. 2 와 같이 생성하였다. 역설계된 곡면이 허용 오차를 만족하는지 검증하기 위하여 레이저 스캐너를 사용하여 획득한 점데이터와 역설계된 곡면

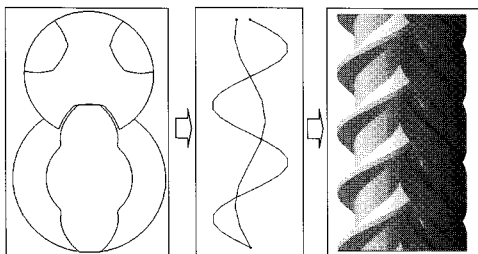
을 포개어 오차분석을 수행한 결과 Fig. 3 과 같이 평균오차는 약 5  $\mu\text{m}$ 이고 오차의 범위는 대부분 50  $\mu\text{m}$ 을 만족하였다.

**2.2 디지털 목업의 회전시뮬레이션 해석**

스크류의 역공학에 있어서 형상복원 정밀도와 함께 압, 수 스크류의 조립성 및 회전특성은 매우 중요한 요소이다. 설계 단계에서 스크류간의 간섭, 스크류와 케이싱의 간극 및 정확한 회전운동비 등 운동거동을 파악하지 않으면 양호한 결과를 기대하기 힘들다. Fig. 4 의 (a)는 회전시뮬레이션을 통하여 상호 조립성과 간섭 해석을 수행한 것으로 검증 결과, 초기 모델링된 스크류간의 간섭이 발생하였다. 이는 스캐닝 데이터를 참조데이터로 하여 기어치형을 설계할 때 축직각 단면에서 설계하게 되므로 헬릭스 곡선을 따라 생성되는 스윕곡면에서 발생하는 오류와 압, 수 스크류 축간 거리의 설계 오류에 의한 것이다. 간섭을 제거하기 위한 방법으로 각 회전 단면에서의 압, 수 스크류간 결합상태를 파악하여 압, 수 스크류의 치형 프로파일을 수정 설계하였다. 또한 이전 연구에서 개발하였던 스크류는 암, 수 스크류간 간극의 변동이 커서 안정적인 회전운동 특성을 저하하는 요인으

Table 1 Entities for generation of gear profile

Design Parameters	Male screw	Female screw
Case inner circle	R6.504mm	R5.504mm
Addendum circle	R6.49mm	R5.49mm
Screw length	36mm	32.925mm
Lead	20mm	30mm
Bearing outer circle	R6.5mm	R5.5mm



(a) Gear profiles (b) Guide curves (c) Swept surfaces

Fig. 2 Modeling process of a pair of screw

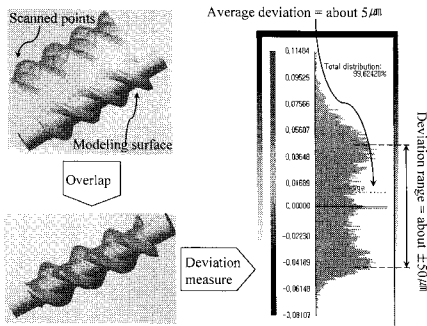
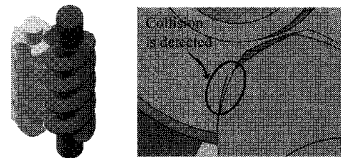
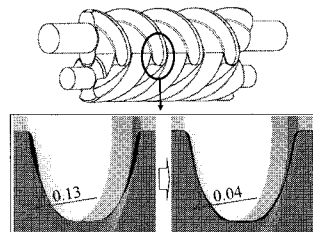


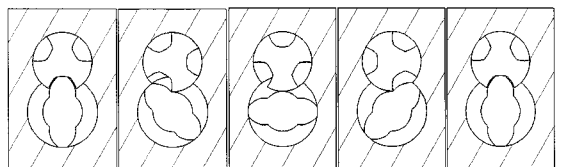
Fig. 3 Deviation analysis of reverse modeling by overlapping scanned points and modeling surface



(a) Verification of assembly and collision



(b) Gap minimization between male and female screw



(c) Assembly state for a half revolution

Fig. 4 Analysis of rotational simulation

로 판단되었으므로 본 연구에서는 Fig. 4 의 (b)와 같이 모델링을 수정하여 간극을 일정하게 유지하도록 하였다. 이는 기존의 축직각 단면에서의 기어 프로파일로 생성한 3-D 모델링에 대하여 치직각 단면에서의 상호 결합 상태를 분석한 후 간극 변화량 만큼을 재차 축직각 단면 프로파일에 반영 및 수정하는 방식을 통하여 수행하였다. Fig. 4 의 (c)는 1/2 회전 동안의 각 단면에서의 결합상태를 나타내는 것으로서 스크류간의 간극 및 스크류와 케이싱간의 간극이 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

3.5 축 복합가공 기술을 이용한 스크류의 제작

3.1 총형커터 설계 및 공구경로 생성

기어 치형을 가공하기 위한 전통적인 방법은 호빙머신이나 기어세이퍼를 사용하는 것이다. 그러나 개발단계에서 새로운 호브를 설계하여 시제품에 적용하려면 시간과 비용이 커지므로 본 연구에서는 일반 가공업체에서 접근성이 용이한 3 축 이상의 복합 선반을 대상으로 CAD/CAM 기술을 접목한 스크류 제작 방법을 제안하였다. 이를 위하여 선반 기반의 5 축 복합가공기를 적용하였다. 복합가공은 선삭과 밀링 작업을 하나의 기계에서 순차적으로 작업할 수 있기 때문에 작업도중에 피삭재를 탈착할 필요가 없고, 심압대를 사용하므로 가공시 강성이 높아져 가공효율이나 표면조도 및 동심도의 측면에서 양호한 가공결과를 얻을 수 있다. Fig. 5 는 본 연구에서 사용한 Integrex-200 5 축 복합가공기로서 밀링축의 최대 회전수는 12,000 rpm 이고 2 개의 회전 이송축(B, C)이 부가된 스피들 킬팅, 테이블 로테이션 구조를 갖는다. 5 축 복합가공기를 사용한 암, 수 스크류의 가공 시 3 축 이상의 복합선반 기계구조에서 호환성을 가지도록 엔드밀 타입의 총형 커터를 설계하였다. Fig. 6 은 총형 커터를 설계하기 위한 개념도로서 축직각 단면인 Fig. 6 의 ①번 단면에서 커터의 치형을 얻을 경우 과절삭이 발생하므로 헬릭스 곡선에 수직한 치직각 단면인 ②번 단면에서 공구의 치형을 얻어야 한다. 치직각 단면과 스크류 중심축이 이루는 헬릭스 각,  $\theta$ 는 식 (1)로부터 얻을 수 있으며 이로부터 Fig. 6 의 (b)와 같은 총형 커터 설계를 수행하였다.

$$\tan \theta = (\pi \times D) / L \tag{1}$$

여기서  $D$  는 스크류의 직경,  $L$  은 스크류의 리드이다.

엔드밀 타입의 총형 커터를 사용하고 3 축 이상의 복합 선반을 적용할 경우 공구경로는 다음의 식 (2)와 같은 매뉴얼 파트 프로그램으로 구할 수 있으며 가공 종료점의 회전각,  $C_j$ 는 식 (3)과 같이 구한다.

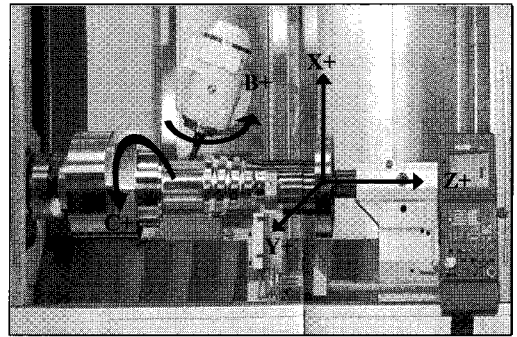
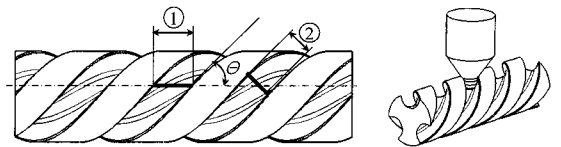


Fig. 5 Mill-Turn machine tool with 5-axis control



(a) Section of cutter profile (b) Design of cutter  
Fig. 6 Analysis of rotational simulation

```

for i, j = 0 to 2π, step 2π/Z } (2)
  G0 Pa Ci;
  for k = 1 to Δ step Δ/δ
    G0 Pk;
    G1 Pr Cj;
    G0 Pr Cj;
    G0 Pa;
    G0 Pk;
  next k
next i, j
    
```

$$L : 2\pi = (P_{fz} - P_{kz}) : C_j \tag{3}$$

여기서 식 (2)와 식 (3)의 각 기호는 다음의 Table 2 와 같이 정의한다.

Table 2 Explanation of each notation for Eq. 2 and Eq. 3

Notation	Explanation
$Z$	Number of tooth
$G0$	Rapid feedrate code
$G1$	Linear interpolation code
$\delta$	Depth of cut for 1 pass
$\Delta$	Depth of cut
$P_a$	Approach point ( $P_{ax} = R_s + S, P_{az} = z \text{ coord. of } L_s + 2R_c$ )
$P_k$	Start point ( $P_{kx} = R - k\delta, P_{kz} = P_{az}$ )
$P_f$	Finish point ( $P_{fx} = R_{kx}, P_{fz} = z \text{ coord. of } L_f - 2R_c$ )
$P_r$	Retract point ( $P_{rx} = P_{ax}, P_{rz} = P_{fz}$ )
$L_s$	Start point of lead
$L_f$	Finish point of lead
$R_s$	Radius of screw
$R_c$	Radius of cutter
$S$	safety distance
$C_i$	Rotation angle of table in the $P_a$
$C_j$	Rotation angle of table in the $P_f$

### 3.2 절삭가공

식 (2)에서 제안한 프로그램과 총형 커터 및 5축 복합가공기를 사용하여 순차적으로 선삭, 밀링 작업을 수행하였다. 가공중에 소재의 탈락이 없기 때문에 양호한 동심도를 얻을 수 있었으며 최종적으로 가공된 스크류와 개발된 유량계의 각 부품 및 조립된 형상은 Fig. 7 과 같다.

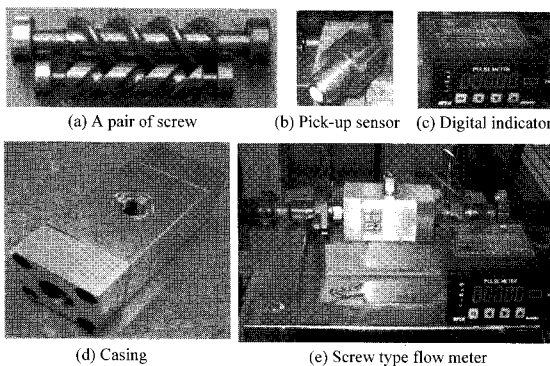


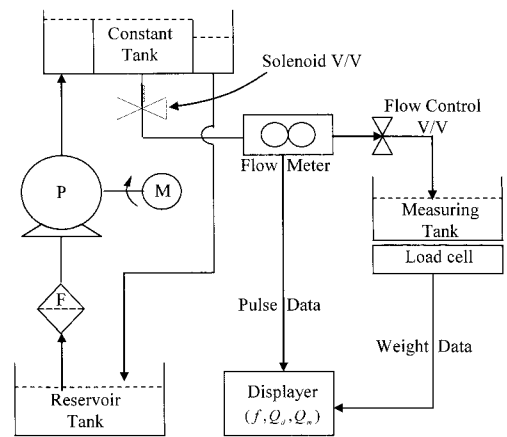
Fig. 7 Developed screw type flowmeter

## 4. 정밀 성능평가

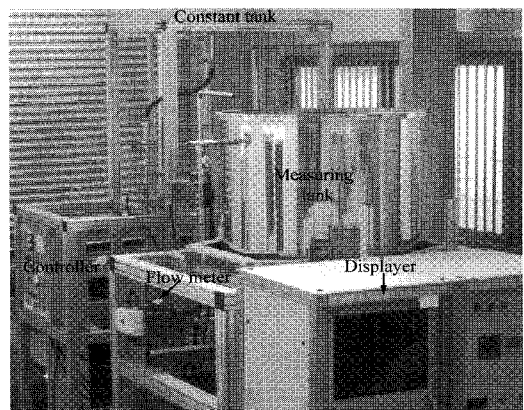
### 4.1 정밀 성능평가 시스템의 개발

개발한 유량계의 유량측정 정밀도를 평가하기 위하여 유량측정 현장과 유사한 시스템을 구성하였다. 정밀 성능평가 시스템의 회로도도는 Fig. 8 의 (a)와 같고 Fig. 8 의 (b)와 같이 제작하였다. 성능평가 시스템을 구성하는 각 부품의 역할과 유체이동 경로 및 성능평가는 다음과 같은 순서로 진행된다.

먼저 저장 탱크(Reservoir tank)로 부터 흡입된 유체는 펌프에서 토출되어 일정유량 탱크(Constant tank)로 집수된다. 이전 연구에서 수행한 간이 성능평가 장치의 펌프압력 변화에 의한 유속변동과 이로 인한 유량계의 측정 오차를 최소화하기 위한 방법으로 일정유량 탱크 내부를 Fig. 8 의 (a)와 같이 3 단으로 나누어 항상 일정한 유량을 유지하도록 하였다. 일정유량 탱크에 집수된 일정 체적의 유량은 단지 자중에 의하여 유출되도록 하며 항상 일정한



(a) Schematic design



(b) Photograph of system

Fig. 8 System for precise performance test of flowmeter

유량이 유지되어 압력변화에 따른 유속변동이 억제된다.

유출된 유량은 유량계를 통과하여 로드 셀 (Load cell)이 부착된 측정 탱크(Measuring tank)에 집수되며 시간당 유량의 제어는 유량제어 밸브 (Flow Control V/V)와 솔레노이드 밸브(Solenoid V/V)에서 제어한다. 유량계에서는 시간당 통과 유량에 따른 스크류의 회전수를 마그네틱 픽업센서에서 펄스(Pulse) 수로 감지하여 화면(Displayer)에 출력한다. 이 때 출력된 펄스 수를 유량으로 환산하여 도시유량으로 나타내고 로드 셀에서 측정한 실제 유량과의 차이를 평가함으로써 개발한 유량계의 유량측정 정밀도를 파악할 수 있다.

**4.2 회전 특성 평가**

유량측정 정밀도를 높이기 위한 첫번째 조건은 임의 유량이 토출될 때 스크류 유량계의 픽업센서가 오차변동 없이 정숙하게 펄스 값을 출력하는 것이다. 만약 압, 수 스크류기어 상호간의 맞물림 회전운동 시 스크류의 표면조도나 가공정밀도가 낮거나 스크류간의 간극 및 스크류와 케이싱간의 조립상태가 불량하다면 저항증가로 인하여 픽업센서에서 출력하는 펄스 값의 변동은 매우 커질 것이며 결과적으로 정밀한 유량측정 결과를 기대하기 어렵다. 회전특성 시험은 안정적인 펄스 값이 출력되는지에 대한 평가로서 정량적인 평가 항목으로 평균 주파수에 대한 임의시간에서의 주파수 변화율을 선정하였다. 유량계의 출력 펄스에 따른 주파수 변동이 안정적인 진폭을 보인다면 유량계 내부에서의 저항이 적어짐을 의미하고 이는 양호한 회전운동 및 조립상태를 평가하기 위한 기준이 될 수 있다.

유량제어 밸브를 10%에서 100%까지 각 유량비(Flow rate)로 고정된 상태로 일정시간 동안 유체를 통과하면서 유량계의 픽업센서에서 감지하는 펄스 신호를 출력한 결과 Table 3 과 같은 주파수 및 회전특성 결과를 얻을 수 있었다. 여기서 일정한 주파수 출력 및 각속도에서 벗어나는 정도를 나타내는 주파수 및 속도변화율은 식 (4)와 같고 Table 3 에 나타내었듯이 평균 0.08(%) 범위 내에서 주파수 및 속도변동폭이 매우 작음을 알 수 있다.

Fig. 9 는 개발되어진 유량계를 작동시켰을 때, 시간의 경과에 대한 주파수의 변화를 측정한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 작동 초기에는 유량제어 밸브 조작의 영향으로 주파수의 변화폭이

크지만 약 20 초 후부터는 약 0.05(p/s)의 진폭 범위 이내에서 안정된 진폭으로 수렴함을 알 수 있다. 이러한 사실은 유량토출이 안정적으로 이루어지고 있음을 의미한다.

Table 3 Velocity change rate of developed flowmeter

Ave. frequency, $\bar{f}(p/s)$	Std. dev. of freq., $f_s$	Ave. Angular velocity, $\bar{w}(rad/s)$	Std. dev. of Angular velocity, $w_s$	velocity change rate, $\eta_w$ (%)
11.39589	0.038	35.80124	0.11938	0.333454
33.31528	0.026	104.663	0.08168	0.078042
58.50373	0.0265	183.7949	0.08325	0.045296
80.7461	0.0333	253.6713	0.10461	0.04124
93.57878	0.043	293.9863	0.13508	0.045951
119.279	0.047	374.726	0.14765	0.039403
139.2322	0.052	437.4108	0.16336	0.037348
161.7254	0.113	508.0752	0.35499	0.069872
182.1324	0.125	572.1857	0.39269	0.068631
197.629	0.129	620.8697	0.40526	0.065274
Average				0.082451

$$\eta_w = \frac{f_s}{\bar{f}} \times 100(\%) = \frac{w_s}{\bar{w}} \times 100(\%) \quad (4)$$

여기서  $\eta_w$  는 주파수 및 속도변화율,  $\bar{f}$  는 평균주파수,  $f_s$  는 주파수의 표준편차,  $\bar{w}$  는 평균 각속도,  $w_s$  는 각속도의 표준편차이다.

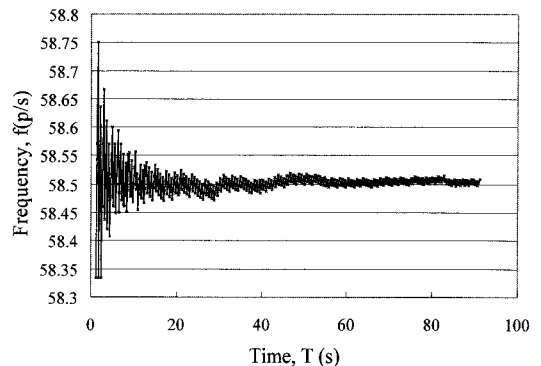


Fig. 9 Frequency graph of the developed flowmeter

**4.3 유량측정 정밀도 평가**

이전 연구<sup>8</sup>에서 유량측정 정밀도를 평가한 결과 원형 모델인 Kobold 사 제품은 약 0.17%였고

개발 모델은 약 0.38%의 정밀도를 보였다. 개발 모델의 정밀도가 목표 정밀도인 0.1% 보다 저하한 이유는 압, 수 스크류 사이의 간극이 일정하지 않아서였던 것으로 파악되었으며 본 연구를 통하여 이에 대한 수정 및 보완이 이루어졌다.

유량측정 정밀도 평가를 위한 프로세스는 Fig. 10 과 같다. 즉 유량계의 픽업센서에서 감지한 주파수,  $f$ 와 그 때의 실측 유량,  $\dot{Q}_m$ 과의 상관 관계로부터 식 (5)와 같은 보정계수,  $k$ 를 구할 수 있으며 식 (6)과 같이 주파수,  $f$ 를 유효측정 범위에서의 평균보정계수 값인 유효보정계수,  $K_e$ 로 나눈으로써 구하고자 하는 도시유량,  $\dot{Q}_d$ 를 구할 수 있다.

이 때 읽은 도시 유량,  $\dot{Q}_d$ 와 로드 셀에서 읽은 실측 유체 중량을 체적으로 환산한 실측 유량,  $\dot{Q}_m$ 과의 비교 값으로부터 유량 측정 정밀도를 평가하였다. 여기서 유효보정계수를 원형모델과 같이 상수로 할 경우 각 유량비에서의 보정계수,  $k$  값 변화에 따른 측정오차가 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 주파수에 따른 실측유량을 각 유량비에서 얻은 후 최소자승법을 사용하여 식 (7)과 같은 선형적인 보정식을 구하였으며 구한 보정식을 사용하여 Fig. 11 과 같은 보정계수 특성곡선을 출력하였다. 이 특성곡선은 주파수가 50Hz 이상인 경우에 정도 좋은 측정값을 얻을 수 있음을 의미하며 개발 유량계에서는 30% (약 3l/m) 이상에서 양호한 결과를 얻을 수 있음을 나타낸다.

$$k = \frac{f}{\dot{Q}_m} \tag{5}$$

$$\dot{Q}_d = \frac{f}{k_e} \tag{6}$$

$$K_e = \frac{f}{0.0008198f + 0.00171} \tag{7}$$

Table 4 는 개발 유량계의 각 유량비에서의 유효보정계수,  $K_e$ 와 주파수,  $f$ 를 이용하여 구한 도시유량,  $\dot{Q}_d$ 와 Load cell을 이용하여 구한 실측 유량,  $\dot{Q}_m$ 에 대하여 식 (8)과 같은 정밀도 계산식을 적용하여 구한 유량측정 정밀도로서 원형모델의 제품 카탈로그에 제시된 측정 정밀도 0.1% 보다 낮은 0.07%로서 약 30%의 개선된 결과를 얻었다.

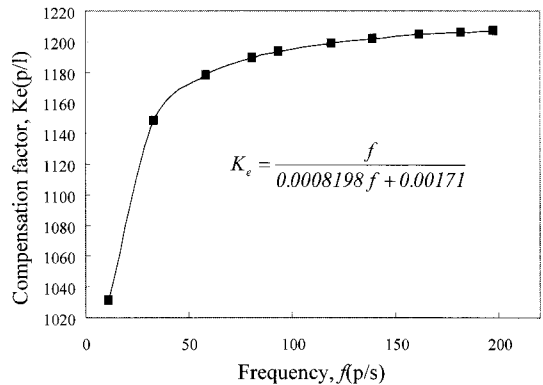
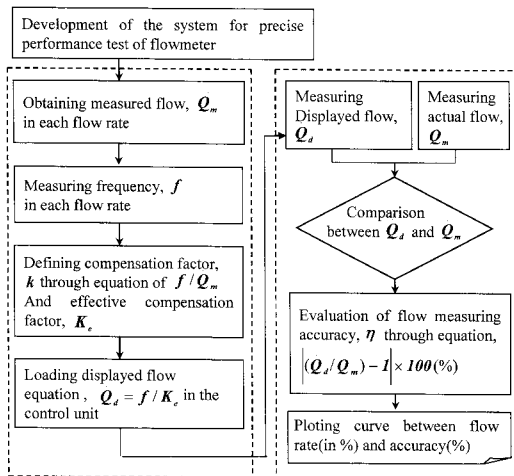


Fig. 11 Characteristic curve of the compensation factor



(a) Definition of K-factor (b) Evaluation of measuring accuracy

Fig. 10 Evaluation process of the accuracy of flow measurement

Table 4 Measuring accuracy of developed flowmeter

Measured flow, $\dot{Q}_m$ (l/m)	Displayed flow, $\dot{Q}_d$ (l/m)	Accuracy, $\eta$ (%)
2.97978	2.979953	0.0058
4.0704	4.073882	0.0856
4.70364	4.705361	0.0366
5.96304	5.96827	0.0878
6.94482	6.950726	0.0850
8.0553	8.058831	0.0438
9.0666	9.063499	0.0342
9.84012	9.824011	0.1637
Average		0.07

$$\eta = \left| \frac{\dot{Q}_d}{\dot{Q}_m} - 1 \right| \times 100(\%) \quad (8)$$

개발 유량계의 재현성을 검증하기 위하여 추가로 5 회의 반복 시험을 수행하였으며 이 때 각 실험에는 기준실험인 #00 실험에서 도출한 식 (7)과 같은 유효보정계수를 공통으로 적용하였다. 실험 결과 Table 5 와 같이 #00 실험을 포함한 전체 실험의 평균 정밀도가 요구정밀도인 0.1%를 만족하였으며 Fig. 12 와 같은 정밀도-유량비 그래프로 출력되었다.

Table 5 Measuring accuracies of each experiments

Flow rate (%)	Accuracy, $\eta$ (%)						Average
	#00	#01	#02	#03	#04	#05	
29.7	0.0058	0.1035	0.0576	0.1118	0.1565	0.0662	0.036
40.7	0.0856	0.0619	0.0433	0.0838	0.1018	0.1714	0.1285
47.0	0.0366	0.0803	0.0756	0.0859	0.0456	0.0519	0.0442
59.6	0.0878	0.0769	0.1167	0.1063	0.1360	0.1119	0.0998
69.4	0.0850	0.1138	0.1786	0.0881	0.0868	0.0946	0.0898
80.5	0.0438	0.0087	0.0416	0.0421	0.0119	0.0519	0.0478
90.6	0.0342	0.1733	0.1524	0.1172	0.0986	0.0039	0.0190
98.4	0.1637	0.2531	0.1757	0.1759	0.1709	0.1554	0.1595
Average	0.07	0.1089	0.1052	0.1014	0.1010	0.0884	0.0792

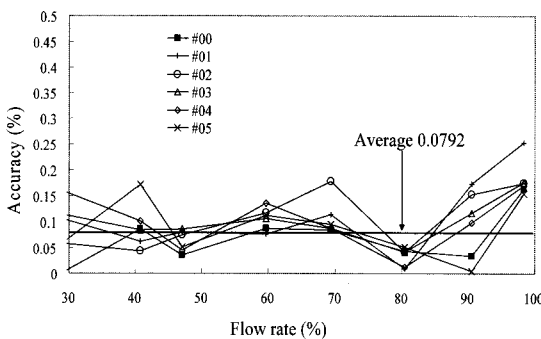


Fig. 12 Accuracy-Flow rate graph of each experiments

5. 결론

1) 스크류 유량계를 개발하기 위하여 역공학 및 회전 시뮬레이션 해석을 수행한 결과 압, 수 스크류 상호간에 간섭 없이 역공학 정밀도를 만족하고 일정한 간극을 유지할 수 있었으며 이는 기존의 해석적인 접근에 비하여 치형 설계를 단순화

하고 개발기간을 단축하는 등 실용적인 방안인 것으로 사료된다.

2) 3 축이상의 복합선반에서 작업자가 매뉴얼로 공구경로를 생성할 수 있도록 파트프로그램을 제시하였으며 5 축 복합가공기를 적용하여 가공함으로써 정확성을 검증하였다. 제안된 방법은 일반 가공업체에서 스크류 제작 시 유용한 기준이 될 것으로 기대된다.

3) 정밀 성능평가 장치를 개발하여 회전특성 시험과 유량측정 정밀도를 평가한 결과 양호한 회전특성을 보였으며 평균 속도변화율과 평균 유량측정 정밀도는 각각 0.082%와 0.07%로 나왔다. 이는 원형모델인 Kobold 제품의 카탈로그에서 제시한 정밀도인 0.1%를 만족하는 값으로서 개발한 유량계 및 정밀 성능평가 프로세스의 신뢰성이 확보된 것으로 파악된다. 또한 5 회 반복 시험 결과 평균 정밀도 0.079%를 만족함으로써 개발 유량계의 재현성이 검증되었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업 (RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Stolic, N. and Hanjalic, K., "Development and Optimization of Screw Machines with a Simulation Model," J. of Fluid Engineering, Vol. 119, No. 3, pp. 659-663, 1997.
2. Litvin, F. L. and Feng, P. H., "Computerized Design Generation and Simulation of Meshing of Rotors of Screw Compressor," J. of Mech. Mach. Theory, Vol. 32, No. 2, pp. 137-160, 1997.
3. Lee, M. S., "A Study on The Geometrical Property and Characteristics Value of Symmetric Screw Profile," A Collection of Learned Papers in the Master Course, Mechanical Engineering Department, Gunguk University, 1997.
4. Kim, J. J., Jung, C. B., Seo, K. C. and Kang, M. W., "Swept Volumes Generated by Polyhedral Objects Through Screw Motions," J. of Korean Society of CAD CAM Engineers, Vol. 7, No. 4, pp. 211-218, 2002.
5. Hwang, J. D., Jung, J. Y., Lee, S. R. and Jung, Y. G.,



- “Study on The Reverse Engineering and Performance Test in the Development of Screw Flowmeter,” J. of Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 4, No. 2, pp. 24-30, 2005.
6. Choi, S. H., “Design of Cutter Profile and the Characteristics of Vibration for Symmetric Screw Rotor,” J. of Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 5, No. 2, pp. 257-264, 1995.
  7. Lee, W. K. and Ahn, J. H., “Development of a CAM System for 3-Axis NC Machining for Screws,” J. of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 21-27, 1998.
  8. Yoon, N. Y., Hwang, J. D., Jung, Y. G. and Lee, S. R., “Precise Performance Evaluation of the Screw - Geared Flowmeter,” Proceedings of KSPE Spring Conference, pp. 309-310, 2007.