

역공학 기술을 이용한 스크류 유량계 개발 및 성능평가에 관한 연구

김형일* · 황종대** · 정윤교**

Study on the Development and Performance Test of Screw Flowmeter using Reverse Engineering

Hyeong-Il Kim*, Jong-Dae Hwang**, Yoon-Gyo Jung**

Key Words : Screw Type Flow Meter(스크류유량계), Reverse Engineering(역공학), Performance Test(성능평가)

ABSTRACT

This research presents a modeling and a manufacturing method of screw flow meter. This paper introduces the efficient design and manufacturing method of screw type flow meter using reverse engineering and test technology. The methods introduced this paper utilize the reverse engineering that is increasing accuracy of modeling and manufacturing of reverse model. And then it can be used in performance test with hydraulic test equipment. Hence this can be used in the basic document for development of the quite accurate flowmeter.

1. 서론

오늘날 유량계는 산업 현장에서 없어서는 안되는 중요한 계측기로서 생산 및 공정 자동화측면에서 원격 유량감시 및 제어의 기능까지 갖추고 있으며 갈수록 더욱 정밀한 유량계측 정도를 요구하고 있다. 유량계의 역사는 약 100년 정도이며, 전통적인 유량계는 차압식 유량계이지만 그 동안 주변 기술(특히 전자, 컴퓨터 기술)의 발달과 함께 용적식 유량계를 비롯한 전자유량계 등 혁신적인 유량계들이 차례로 개발되어 그 중 일부는 성공적으로 시장에 진입하였다.

최근 각광받는 용적식 유량계 중에서도 스크류 타입 용적식 유량계는 정교한 기어치형을 갖는 암, 수 스크류간의 맞물림을 이용하므로 동일한 용적식 유량계인 베인, 기어 휠 유량계나 오발기어타입 유량계 등

에 비해서도 정밀도가 높고, 잔고장이 없으며 압력손실이 적고 맥동의 영향이 거의 없으며 설치위치 및 유체의 점도에 관계없이 정확한 유량계측이 가능하다는 장점을 가진다. Table 1은 유량계마다 출력할 수 있는 정밀도를 비교한 것으로 스크류 유량계가 가장 높은 정밀도를 나타냄을 알 수 있다.

스크류 유량계의 위와 같은 장점에도 불구하고 정교한 암, 수 스크류의 회전을 위해서는 스크류 곡면 Profile에 대한 설계 및 해석과 복잡한 형상 가공 기술, 성능평가 기술 등의 접목이 요구되므로 전세계적으로

Table 1 Accuracy comparison of each flow meter

No	A kind of flow meter	Accuracy(%)
1	Screw flow meter	0.1
2	Vane anemometer	0.5
3	Gear wheel flow meter	3
4	Oval gear type flow meter	3

* 창원대학교 기계공학과

** 창원대학교 기계공학과

E-mail : hikim80@naver.com

도 오스트리아의 Kobold, Kral, 독일의 Leistritz 등 소수의 업체만이 생산하고 있다.

따라서 본 논문에서는 Kobold 사 제품을 Master model로 선정하여 역공학 기술을 적용한 후 특징있는 신제품으로 거듭나기 위한 독자적인 설계 과정을 연구하고, 스크류기어의 가공단계에서는 기존의 기어가공 방법인 호브나 셰이퍼를 사용하지 않고 CAD/CAM 기술과 총형공구설계 기술을 이용한 복합가공 기술을 적용하고자 한다. 제품의 성능평가 단계에서는 정밀도 측정을 위한 평가장치의 개발 및 시험평가 방법에 대하여 연구하고 이를 위하여 본 보에서는 유량계측의 핵심요소인 보정계수(K-factor)를 중심으로 연구를 진행함으로써 신뢰성있는 성능평가를 수행하기 위한 기반 데이터를 구축하고자 한다.

2. 역공학기술을 이용한 스크류의 설계

2.1 스크류샴플의 3차원 측정

스크류 유량계는 정교한 스크류의 맞물림을 통하여 유체의 유량을 측정할 수 있는 계측기로서 Fig. 1과 같이 유체가 유입되면 스크류를 회전하는 힘으로 작용하고, 이 때 갭(gap)센서에 의한 펄스의 카운팅을 통하여 유량 측정을 수행할 수 있다.

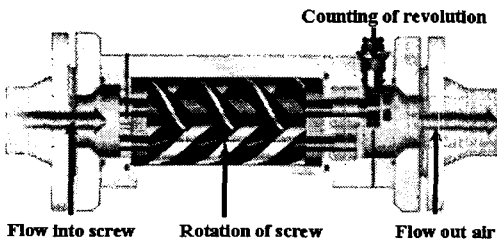


Fig. 1 Measuring mechanism of screw type flow meter

스크류 유량계에서 가장 중요한 핵심 부품은 Fig. 1에 나타낸 암, 수 한 쌍의 스크류이다. 정교하게 제작된 하우징 안에서 서로 맞물려진 한 쌍의 고정도 스크류는 유체의 유동을 거스르지 않고 미소압력으로도 회전한다. 스크류의 형상 설계가 잘못되면 유량계는 하우징 내부에서 조립 및 회전할 수 없게 되며, 설계가 양호하더라도 가공 시 형상정밀도가 떨어진다면 평형을 유지할 수 없으며 표면조도가 저하될 경우에는 저항이 커지므로 압력에 의한 유량 손실률이 커지게 되어 측정정도가 저하된다.

Fig. 2는 정밀 형상 역공학 실현을 위한 3차원 측정 결과를 보여주는 것으로서 3차원측정을 통하여 얻을 수 있는 형상정보와 위치정보를 사용하여 기어치형에 대한 참조 데이터를 획득할 수 있다.^[1]



Fig. 2 Measurement of geometry by Laser scanner

2.2 스크류의 설계

기어 치형을 생성하기 위한 각각의 요소들은 Laser scanner에서 획득한 참조 데이터를 활용하였으며 참조 데이터를 그대로 사용하지 않고 치형 설계 프로그램에서 수정설계를 수행하였다. 수정설계 시의 기준은 역공학의 형상복원정밀도인 $50\ \mu\text{m}$ 을 만족할 때 까지 기어생성을 위한 입력조건을 수정하는 방법을 사용하였다. 그 결과 Table 2와 같은 기어생성 요소를 도출하였으며 기어치형을 생성한 후 상용소프트웨어인 CATIA의 GSD 모듈을 사용하여 곡면모델링을 수행하였다. 그 결과 Fig. 3과 같이 기어치형을 단면곡선으로 하고 헬릭스커브를 가이드커브로 하는 기어곡면을 생성하였다.^[2, 3, 4]

Table 2 Entities for generation of gear profile

Division	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

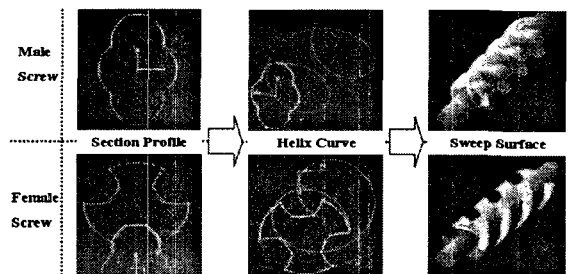


Fig. 3 Modeling process of screws

암, 수 스크류의 곡면이 $50\mu\text{m}$ 이내로 모델링되었는지 검증하기 위한 방법으로 비접촉식 3차원 측정기인 레이저스캐너를 사용하였다. Fig. 4와 같이 레이저스캐너를 사용하여 획득한 점데이터와 모델링된 곡면을 포개어 점과 곡면간의 거리를 측정한 결과 평균오차는 약 $5\mu\text{m}$ 이고 오차의 범위는 대부분 $\pm 50\mu\text{m}$ 이내로 피팅되었다.

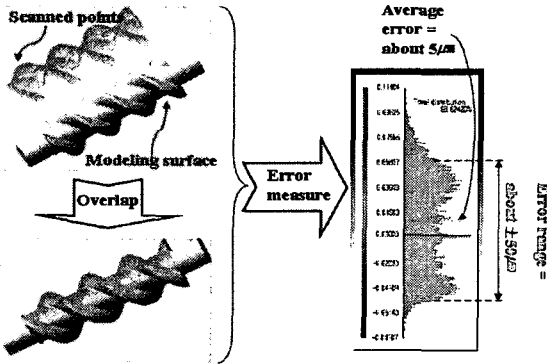


Fig. 4 Error analysis of reverse modeling

2.3 스크류 모델링의 기구학적 검증

스크류의 역공학에 있어서 형상복원 정밀도 보다 중요한 요소는 수 스크류와 암 스크류의 조립성 및 운동 기구학적 정확성이다. 설계 단계에서 상호 운동거동을 파악하지 않으면 제작 후 실시하는 회전 시험평가 시 양호한 결과를 기대하기 힘들다. Fig. 5의 (a)는 CATIA를 사용하여 상호 조립성과 운동성에 대한 검증장면을 보여주고 있으며 검증 결과 간섭부분이 발생하였다. 간섭을 해결하기 위하여 암 스크류의 치형 프로파일을 간섭이 발생하지 않을 때 까지 수정 설계를

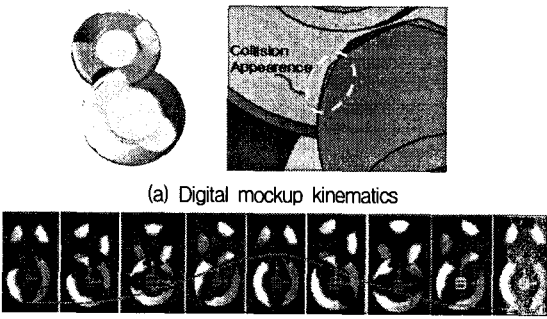


Fig. 5 Verification of assembly and collision

수행하였다. 수정 모델링된 암, 수 스크류는 조립성과 운동성 모두 양호하였으며 Fig. 5의 (b)와 같이 1회전 (pitch=20 mm) 동안의 각 단면에서의 결합상태로부터 확인할 수 있다.

3. 복합가공기술을 이용한 스크류의 제작

3.1 총형공구설계 및 공구경로 생성

기어 치형을 가공하기 위해서는 호빙머신이나 기어 세이퍼를 사용한다. 그런데 개발단계에서 새로운 호브를 설계하여 시제품에 적용하려면 시간과 비용이 커지므로 본 연구에서는 CAD/CAM 기술을 접목한 통합5축가공을 적용하였다. 복합가공은 선삭과 밀링작업을 하나의 기계에서 순차적으로 작업할 수 있기 때문에 작업도중에 피삭재를 탈착할 필요가 없고, 심압대를 사용하므로 가공시 강성이 높아져 가공효율이나 표면조도 및 동심도의 측면에서 기존의 기어가공법 보다 양호한 가공결과를 얻을 수 있다. Fig. 6은 본 연구에서 사용한 Integrex-200 복합가공기로서 밀링축의 최대 회전수는 12,000 rpm이고 2개의 회전이송축이 부가된 5축복합가공기이다.

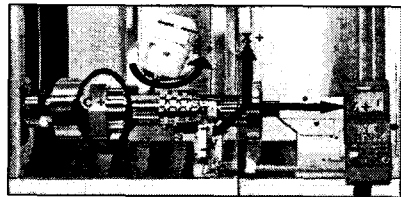


Fig. 6 Integrex-200 Mill-Turn machine

암, 수 스크류의 가공 시 가공 효율을 배가하고 정밀한 치형을 생성하기 위하여 기어치형과 동일한 형상을 갖는 총형공구를 설계하였다. Fig. 7은 총형공구를 설계하기 위한 개념도이다. Fig. 7의 (a)의 ①번 단면에서 공구의 치형을 얻을 경우 파절삭이 발생하므로 헬릭스곡선에 Normal한 ②번 단면에서 공구의 치형을 얻어야 한다. 헬릭스 각 θ 는 식 (2)로부터 얻을 수 있으며 이렇게 얻은 치형으로부터 Fig. 7의 (b)와 같은 총형공구 설계를 수행할 수 있다. 총형공구를 사용할 경우 공구경로는 수동프로그램으로 구할 수 있으며 회전각은 식 (3)과 같이 구할 수 있다.^[5]



(a) Determination of helix angle (b) Adaptation of tool
Fig. 7 Schematic design of formed tool

$$\tan \theta = (\pi \times D_1) / L_1 \quad (2)$$

(여기서 D_1 은 암 스크류의 외경, L_1 은 암 스크류의 리드이다.)

$$L:2\pi = (A - B):C \quad (3)$$

(여기서 L 는 리드, A 는 가공시점의 Z좌표, B 는 가공중점의 Z좌표, C 는 회전각도이다.)

3.2 절삭가공

총형공구와 복합가공기를 사용하여 Fig. 8과 같이 순차적으로 선삭, 밀링 작업을 수행하였다. 가공 중에 소재의 탈락이 없기 때문에 보다 양호한 동심도를 얻을 수 있었다.

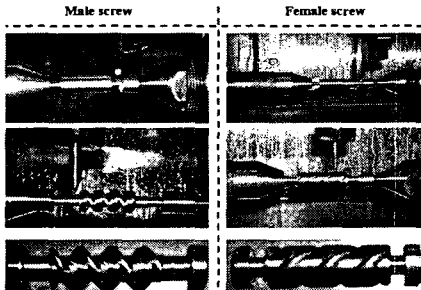


Fig. 8 Machining by Mill-Turn machine

최종적으로 가공된 유량계의 부품과 조립된 형상은 Fig. 9와 같다.

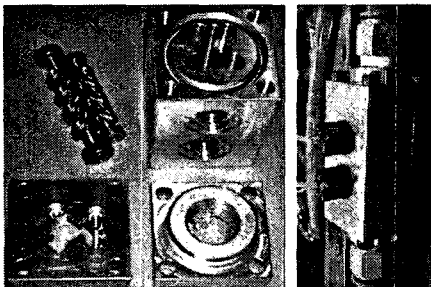


Fig. 9 Development of screw flowmeter

4. 성능평가

역공학 기술을 사용하여 스크류 유량계의 개발을 완료한 후 성능평가를 위한 프로세스를 Fig. 10과 같이 구성하였다.

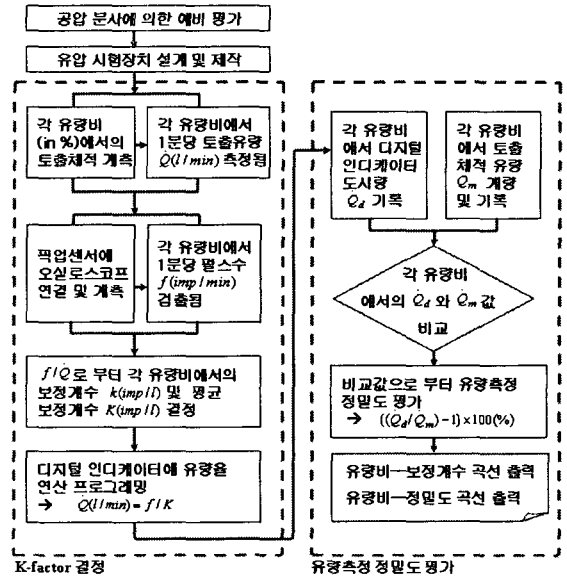


Fig. 10 Process of performance test

먼저 공압 분사를 통한 예비 평가를 수행하여 스크류 유량계의 기능 상 타당한지를 검증한다. 타당하다면 다음 단계로 유압 시험장치를 설계 및 제작한 후 유압 성능평가를 수행한다. 먼저 각 유량비에서의 실제 토출체적을 비이커에서 계측하고 또한 그 때의 회전수를 픽업센서에 연결한 오실로스코프를 사용하여 계측함으로써 각 유량비에서의 보정계수 및 평균보정계수를 결정한다. 이 과정을 원형모델과 역공학모델 양자에 대하여 수행하여 1차적인 성능 비교를 수행한다. 차 후 연구에서는 디지털 인디케이터에 유량을 연산 프로그램을 탑재함으로써 인디케이터의 도시값과 실제 계량값을 상호 비교할 예정이다. 즉 본 보에서는 유량측정의 핵심요소인 보정계수(이하 K-factor)를 중심으로 성능평가를 수행한다.

4.1 공압 분사에 의한 예비 평가

성능평가 장치를 제작하여 유압 회로 상에서 유량측정 정밀도를 평가하기에 앞서 Fig. 11과 같이 에어 건에 의한 공압 분사 시 회전 성능 검사를 수행하였으며

성능 검사 결과 에어를 분사하기 시작하면 저항 없이 고속으로 회전함을 확인하였다. 따라서 기능 상 타당성이 검증되었다.

$$K' = \frac{f}{Q} \quad (4)$$

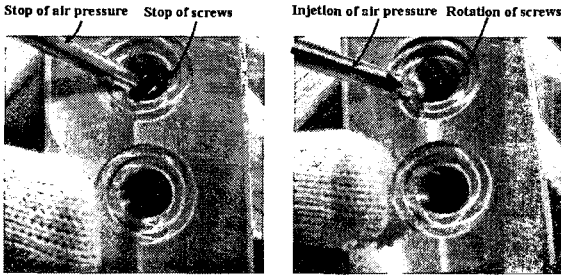


Fig. 11 Revolution test by air pressure(Pre-test)

4.2 유압 성능평가 장치의 개발

유압회로 상에서의 실제적인 유량측정 정밀도를 평가하기 위하여 유압 성능평가 장치를 설계하였다. Fig. 12는 유압회로도 및 제작된 성능평가 장치를 보여준다. 장치는 크게 전원박스, 모터, 펌프 등의 압력공급부(Pressure supply unit)와 유량계, 디지털인디케이터, 압력계 등의 유량계측부(Flow counting unit)로 나눌 수 있으며 압유가 유동하는 관로 상에 개발한 스크류 유량계를 연결하였다.

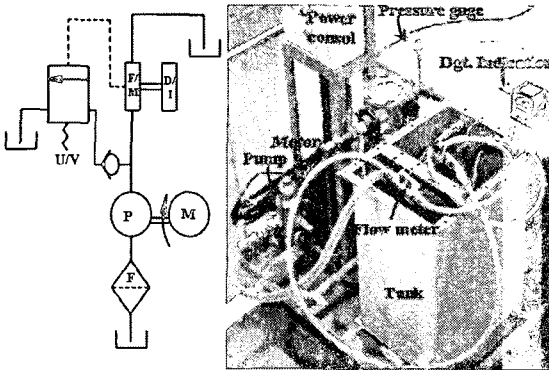


Fig. 12 Hydraulic circuit & performance test equipment

4.3 유압 성능평가(K-factor를 중심으로)

1분당 픽업센서에서 얻어지는 펄스 수를 분당 주파수, $f \text{ (imp/min)}$ 라 하고 1분당 토출 유량을 $Q \text{ (l/min)}$ 라 하면 1리터당 펄스 수인 $K' \text{ (imp/l)}$ 을 구할 수 있으며 식 (4)와 같다.

위와 같은 이론에 근거하여 K' 값을 구하기 위하여 실제 유량 $Q \text{ (l/min)}$ 를 구하였다. 유량은 1분 동안 흐르는 압유를 수거하여 부피를 측정하는 방식을 사용하였으며 그 때의 각 유량에 대한 펄스 값을 오실로스코프를 사용하여 측정하였다.^[6] Tab. 3의 K -factor, K' 은 실측치들을 이용하여 식 (4)로 부터 계산된 값들이다. 여기서 FR(Flow Ratio)은 개발된 유량계가 측정할 수 있는 최대 유량인 약 25 (l/min) 를 100%로 두었을 때의 비율을 의미하며 MM은 Master Model(이하 MM)을, RM은 Reverse Model(이하 RM)을 의미한다.

Table 3 Measured K-factor

Measured flow, $Q \text{ (l/min)}$			Frequency, $f \text{ (imp/min)}$		K -factor, $K' \text{ (imp/l)}$	
FR (in %)	MM	RM	MM	RM	MM	RM
30	8.02	8.15	8998	8820	1121.10	1082.21
50	13.290	15.79	14940	17160	1144.06	1086.76
70	18.749	22.47	21000	24060	1120.06	1070.59
90	24.1429	27.41	26940	28320	1115.85	1032.91
Average K -factor, K					1125.26	1096.35
Maximum deviation					28.21	53.85

Table 3의 각 유량비에서 측정된 유량과 주파수를 사용하여 계산된 보정계수인 K' 값들에 대한 평균을 구하면 평균 보정계수인 K 가 구해지며 MM은 1125.26, RM은 1096.35이다. 차 후에 디지털 인디케이터를 탑재할 유량환산 프로그램의 식은 식 (5)와 같으며 위에서 구한 K 값을 적용한다.

$$Q = \frac{f}{K} \quad (5)$$

그러므로 K 값을 구할 때 사용되는 각 FR에서의 보정계수인 K' 값의 편차가 적어야 유량 측정 시 오차가 적어짐을 알 수 있다. 위와 같은 관점에서 볼 때 MM의 최대편차는 28.21인데 비하여 RM의 최대편차는 53.86이므로 RM의 오차가 MM에 비하여 큰 것을 알 수 있다. 이와 같은 최대편차의 차이는 보정계수 곡선인 Fig. 13을 통하여 쉽게 확인할 수 있다. 그래프에서 MM의 K곡선은 거의 직선적인 반면 RM의 K곡

선은 그렇지 못한 것을 확인할 수 있다.

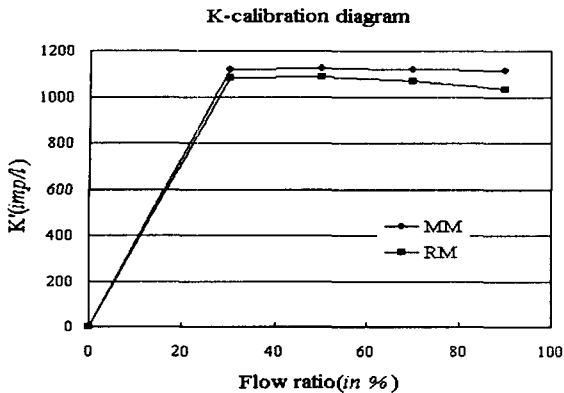


Fig. 13 K-calibration diagram

이는 결과적으로 유량측정 시 측정 정밀도와 직결되는 성능 변수가 되므로 이 편차의 원인을 파악하고 오차를 줄이기 위한 방안이 강구되어야 한다. 본 연구에서는 그 원인으로서는 유량 계측 시 스크류의 표면조도 영향에 따른 저항의 변화에 기인하는 것으로 판단하였으며 따라서 항 후 스크류 치면에 대한 연삭 방법 및 후처리 기술 등에 대한 연구가 필요한 것으로 사료되었다.

5. 결론

위와 같은 과정을 통하여 역공학 및 복합가공기술을 신제품 개발 시 효과적으로 적용할 수 있는 방법과 성능평가 방법을 제시하였으며 다음과 같은 결론 및 향후과제를 도출하였다.

1. 역공학 기술을 활용하여 스크류유량계를 개발하였으며 형상복원 정밀도를 $50\mu\text{m}$ 이내로 하였다.
2. 복합가공기에 의한 기어 치형 가공 방법을 제시하였으며 이를 위하여 총형공구의 설계 및 제작을 수행하였다.
3. 공압 분사에 의한 회전성능 결과 제품의 기능상 타당성이 확인되었다.
4. 유압 시험 평가 장치를 설계 및 제작하였다.
5. K -factor를 구한 결과 MM의 최대편차는 28.21인데 비하여 RM의 최대편차는 53.85로 크게 나왔으며 이 결과로부터 RM의 정밀도가 저하됨을 알 수 있다.
5. 보정계수의 편차를 줄이기 위한 대책으로 치면의 표면조도 개선 및 후처리를 항 후 과제로 설정하였다.

후기

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

참고문헌

1. Hwang, J. D., Jung, J. Y., Jung, Y. G., "Modeling of Functional Surface using Modified B-spline," *J. of KSPE*, Vol. 20, No. 10, pp. 156-163, 2003.
2. Choi, B. K., "Surface Modeling for CAD /CAM," Elsevier, Amsterdam, 1991.
3. Gerald F., "Curves and Surfaces for CAGD," 1999.
4. Vera B. Anand, "Computer Graphics & Geometric Modeling for Engineers," 1996.
5. Choi, B. K., Chon, C. S., "CAD/CAM system and CNC machining," Seoul, 2001.
6. James W., Dally, William F., Riley., Kenneth G., Mcconnell, "Engineering Measurements," 1993.