한국공작기계학회 2005 춘계학술대회 논문집 pp.132~137

스크류유량계 개발에 있어서의 역공학 및 성능평가에 관한 연구

김종윤*, 황종대+, 이상열++, 정윤교+++

Study on the reverse engineering and performance test in the development of screw flowmeter

Jong-Yoon Kim*, Jong-Dae Hwang+, Sang-Ryul Lee++, Yoon-Gyo Jung+++

Abstract

This research presents a modeling and a manufacturing method of screw type 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 flow meter.

Key Words : Screw type flow meter, Reverse engineering, performance test

1. 서 론

오늘날 유량계는 산업 현장에서 없어서는 안 되는 중요한 계측기기로서 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 주변기술(특히 전자, 컴퓨터 기술)의 발달과 함께 용적식 유량계를 비롯한 전자유량계 등 혁신적인 유량계들이 차례로 개발되어 그 중 일부는 성공적으로 시장에 진입하였다.

전통기술이라 할 수 있는 차압식 유량계 시장은 전 세계적으로 이미 성숙 단계를 넘어 답보상태를 면치 못하는 반면 용적식 유량계는 시장의 변화가 급진전하고 있으며 이러한 흐름을 주도하는 신기술이 스크류 타입 유량계를 비롯한 용적식 유량계의 설계 및 제작 기술이다.

용적식 유량계 중에서도 스크류 타입 용적식 유량계는 정교한 기어치형을 갖는 암,수 스크류간의 맞물림을 이용하므로 동일한 용적식 유량계인 베인, 기어 휠 유량계나 오발기어타입 유량계 등에 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 타입 유량계가 가장 높은 정밀도을 나타냄을 알 수 있다.

* 발표자, 창원대학교 대학원 산업기계공학과 (hjd2123@korea.com)
주소: 641-773 창원시 사림동 9번지 창원대학교 58103호
+ 창원대 대학원 기계공학과
++ (주)아산텍 대표
+++ 창원대 기계공학과

Table 1 Accuracy comparison of each flow meter

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

스크류 타입 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 집목이 요구되므로 전세계적으로도 오스트리아의 KRAK, 독일의 LEISTRITZ, KOBOLD 등 소수의 업체만이 생산하고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 기존의 선진 제품을 Master model로 선정하여 역공학 기술을 적용한 후 특징있는 신제품으로 거듭나기 위한 독자적인 설계 과정을 연구하고, 제품의 가공과정에서는 CAD/CAM 기술과 총형공구설계 기술을 이용한 복합가공 기술을 적용하며, 제품의 성능평가 단계에서는 신뢰성있는 정밀도 측정을 위한 평가장치의 개발 및 시험평가 과정에 대하여 연구함으로써 초정밀 스크류유량계의 개발에 기여하고자 한다.

2. 역공학기술을 이용한 스크류의 설계

2.1 스크류 샘플의 3차원 측정

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

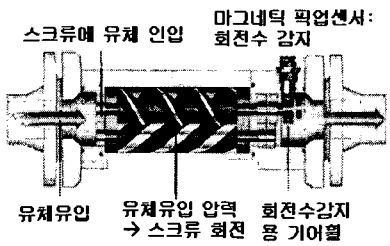


Fig. 1 Measuring mechanism of screw type flow meter

스크류 타입 유량계에서 가장 중요한 핵심 부품은 Fig. 2에 나타낸 스크류이다. 정교하게 제작된 하우징 안에서 서

Fig. 2 A set of cycloid gear profiled screw

로 맞물려진 한 쌍의 고정밀 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. 3은 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.

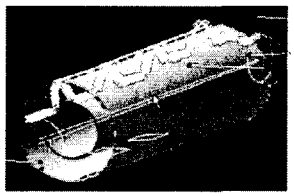


Fig. 3 Measurement of geometry by CMM

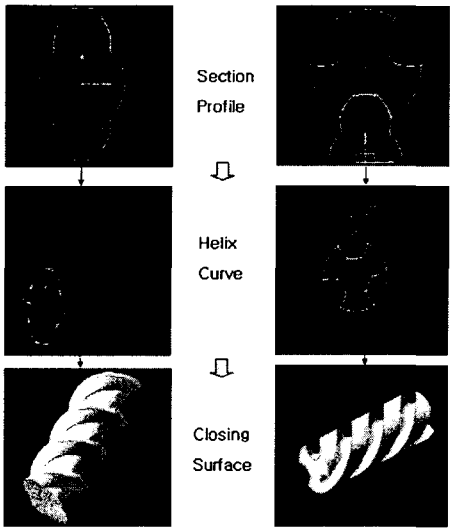
2.2 스크류의 설계

기어 치형을 생성하기 위한 각각의 요소들은 CMM에서 획득한 참조 데이터를 활용하였으며 참조 데이터를 그대로 사용하지 않고 치형 설계 프로그램에서 수정설계를 수행하였다. 수정설계 시의 기준은 역공학의 형상복원정밀도인 50 μm을 만족할 때 까지 기어생성을 위한 입력조건을 수정하는 방법을 사용하였다. 그 결과 Table 2와 같은 기어생성 요소를 도출하였다. 기어치형을 생성한 후 상용소프트웨어인 CATIA의 GSD 모듈을 사용하여 곡면모델링을 수행하였다. 그 결과 Fig. 4와 같이 기어치형을 단면곡선으로 하고 헬릭스커브를 가이드커브로 하는 기어곡면을 생성하였다.

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

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



(a) Male screw (b) Female screw

Fig. 4 Modeling process of screws

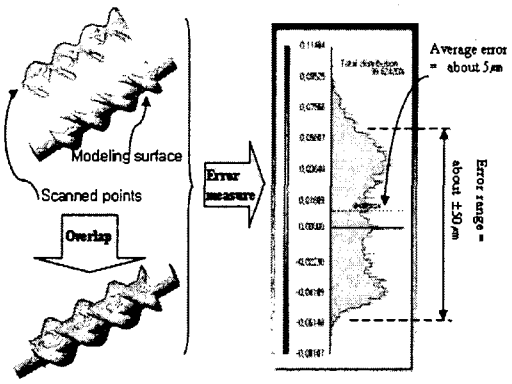
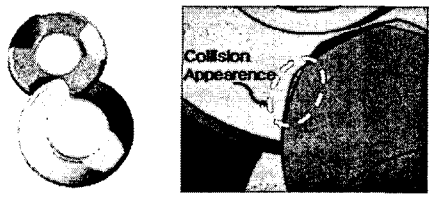


Fig. 5 Distance measurement between scanned points and surface modeling

2.3 스크류 모델링의 기구학적 검증

스크류의 역공학에 있어서 형상복원 정밀도 보다 중요한 요소는 수 스크류와 암 스크류의 조립성 및 운동기구학적 정확성이다. 설계 단계에서 상호 운동거동을 파악하지 않으면 제작 후 실시하는 회전 시험평가 시 양호한 결과를 기대하기 힘들다. Fig. 6의 (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 Offset 하였으며 그 결과 0.05mm(반경방향)와 0.2mm(치형두께) offset된 프로파일로 수정 모델링하였다. 수정 모델링된 암, 수 스크류는 조립성과 운동성 모두 양호하였으며 Fig. 6의 (b)와 같이 1회전 동안의 각 단면에서의 결합상태로부터 확인할 수 있다.



(a) Digital mockup kinematics

(b) Assembly state for one revolution

Fig. 6 Verification of assembly and collision

3. 복합가공기술을 이용한 스크류의 제작

3.1 총형공구 설계 및 공구경로 생성

기어 치형을 가공하기 위해서는 호빙머신이나 기어 세이퍼를 사용한다. 그런데 개발단계에서는 새로운 호브를 설계하여 시제품을 개발하는 시간과 비용이 커지므로 본 연구에서는 CAD/CAM 기술을 접목한 복합5축가공을 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. 7은 본 연구에서 사용한 Integrex-200 복합가공기로서 밀링축의 최대 회전수가 12,000 rpm이며 2개의 회전이송축이 부가된 5축복합가공기이다.

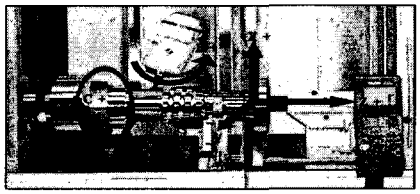
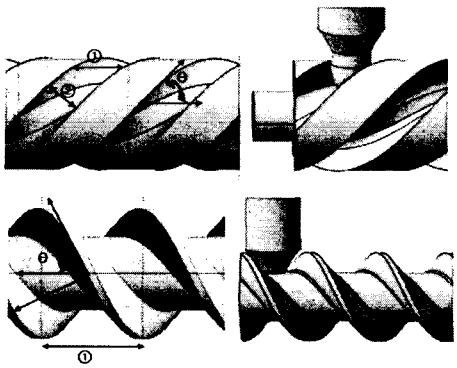


Fig. 7 Integrex-200 Mill-Turn machine

암, 수 스크류의 제작 시 가공 효율을 배가하고 정밀한 치형을 생성하기 위하여 기어치형과 동일한 형상을 갖는 총형공구를 설계하였다. Fig. 8은 총형공구를 설계하기 위한 개념도로서 각각 암스크류와 수스크류이다. Fig. 8의 (a)의 ①번 단면에서 공구의 치형을 얻을 경우 과절삭이 발생하므로 헬릭스 각 만큼 기울어진 ②번 단면에서 공구의 치형을 얻어야 한다. 헬릭스 각 θ는 식 (2)로부터 얻을 수 있으며 이렇게 얻은 치형으로부터 Fig. 8의 (b)와 같은 총형공구 설계를 수행할 수 있다. 총형커터를 사용할 경우 공구경로는 수동프로그램으로 구할 수 있으며 회전각은 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

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

(여기서 D_1은 암 스크류의 외경, L_1은 암 스크류의 리드이다.)



(a) Determination of helix angle (b) Adaptation of tool

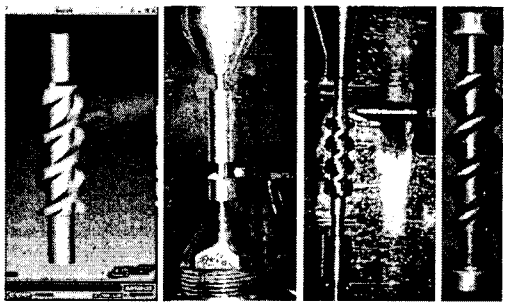
Fig. 8 Schematic design of formed tool

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

(여기서 L=리드, A=가공시점의 Z좌표, B=가공종점의 Z좌표, C=회전각도이다.)

3.2 모의 가공 및 절삭 가공

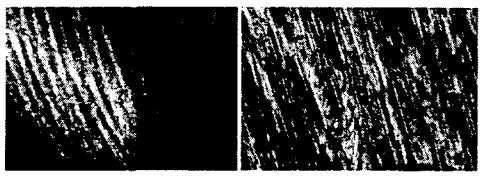
생성된 공구경로의 충돌 및 과절삭 여부를 판단하기 위하여 컴퓨터 상에서 디지털 가공 즉 모의 가공을 수행하였다. Fig. 9의 (a)는 스크류에 대한 모의 가공 수행 장면이다. 모의 가공을 수행한 후 복합가공기에서 실제 가공을 수행하였으며 Fig. 9의 (b), (c)와 같이 선삭과 밀링을 순차적으로 수행하여 가공을 완료하였다.



(a) Veri-cut (b) Turning (c) Milling (d)End

Fig. 9 Machining by Mill-Turn machine

가공 결과 Fig. 10과 같이 이전에 사용하였던 볼엔드밀에 의한 가공 방식에서 생성되었던 Cusp이 사라지고 표면 품위가 향상된 것을 확인할 수 있었다. 최종적으로 가공된유량계의 부품들을 Fig. 11에 나타내었다.



(a) Using ball endmill (b) Using formed tool

Fig. 10 Cusp removed surface by formed tool

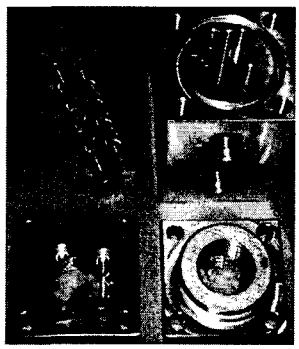


Fig. 11 Development of screw type flowmeter

4. 성능평가

4.1 공압에 의한 회전성능평가

성능평가 장치를 제작하여 유압 회로 상에서 유량측정 정밀도를 평가하기에 앞서 Fig. 12와 같이 에어 건에 의한 공압 분사 시 회전 성능 검사를 수행하였으며 성능 검사 결과 에어를 분사하기 시작하면 저항 없이 고속으로 회전함을 확인하였다.

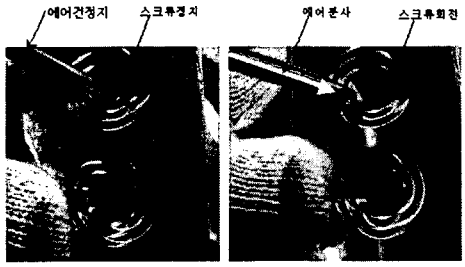


Fig. 12 Revolution test by air pressure

4.2 유압 성능평가 장치의 제작

유압회로 상에서의 실제적인 유량측정 정밀도를 평가하기 위하여 유압 성능평가 장치를 설계하였다. Fig. 13은 유압회로도와 제작된 성능평가 장치를 보여준다. 장치는 크게 전원박스, 모터, 펌프 등의 Pressure supply unit과 유량계, 디지털인디케이터, 압력계 등의 Flow counting unit으로 나눌 수 있으며 압유가 유동하는 관로 상에 개발한 유량계를 연결하였다.

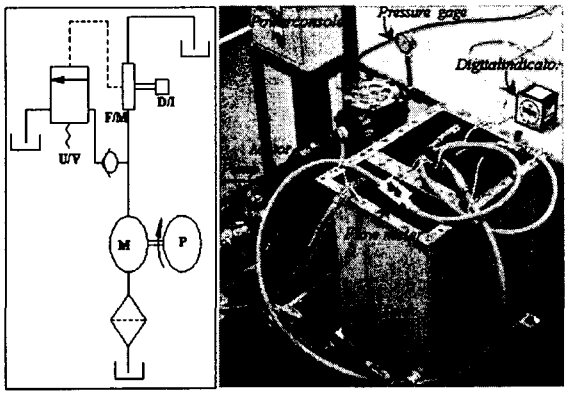


Fig. 13 Hydraulic circuit & performance test equipment

4.3 유량측정 메카니즘 및 측정시험

스크류의 1회전당 토출유량 단면적은 Fig. 14와 같이 회전시 수스크류에 의해 밀폐되는 암스크류부를 제외한 수스크류부로부터 구할 수 있다. Fig. 14는 임의 각도에서의 토출단면적이며 1회전(360°)이 완료될 때까지의 진행 길이는 1*Pitch*(20mm)이므로 이 때의 체적을 Fig. 15와 같이 계산할 수 있으며 이를 1회전당 토출유량, $\hat{Q}(l/rev)$라 한다. 또한 1리터 당 회전수를 구할 수 있으며 1회전당 2회 펄스가 생성되므로(수나사는 2줄 스크류임) 1리터 당 이론 펄스 수, $K_{th}(imp/l)$를 구할 수 있다.

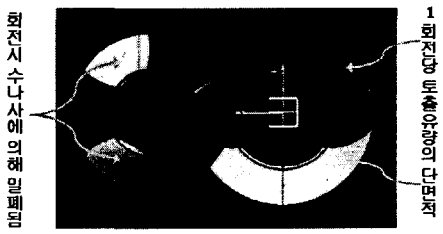


Fig. 14 Area of suppling flow per revolution

구분	Master model	Reverse model
1회 토출체적		
1회 토출유량 (*l/rev*)	$1.117\times10^{-6}m^3/rev$ $=1.117cc/rev$	$1.167\times10^{-6}m^3/rev$ $=1.167cc/rev$
1리터당 회전수 (*rev/l*)	896.29	856.9
1리터당 펄스수 (*imp/l*)	1790.5	1713.8

Fig. 15 Supply of flow and pulse count

1초당 픽업센서에서 얻어지는 펄스 수를 주파수, $f(imf/s)$라 하고 1분당 실제 토출 유량을 $Q(l/m)$이라 하면 실제 1리터당 펄스 수인 $K(imp/l)$를 구할 수 있으며 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$K(imp/l)=\frac{f(imp/m)}{Q(l/m)} \tag{4}$$

위와 같은 이론에 근거하여 K값을 구하기 위하여 실제 유량 $Q(l/m)$를 구하였다. 유량은 1분당 흐르는 압유를 수거하여 부피를 측정하는 방식을 사용하였다. 또한 그 때의 각 유량에 대한 펄스 값을 오실로스코프를 사용하여 측정하였다. Tab. 3의 *K-factor*는 실측치들을 이용하여 식 (4)로 부터 계산된 값들이다.

Table 3 Measured *K-factor*

계측유량, $Q(l/m)$		주파수, $f(imp/m)$		*K-factor*(imp/l)	
MM	RM	MM	RM	MM	RM
13.290	15.79	14940	17160	1144.069	1086.764
18.749	22.47345	21000	24060	1120.06	1070.59
24.1429	27.4176	26940	28320	1115.856	1032.913

Fig. 16은 K값을 사용한 보정 그래프이다. Master model(이하 MM)의 *K-factor*는 약 1127이었고 Reverse model(이하 RM)의 *K-factor*는 약 1063(imp/l)이었다. 따라서 각각 픽업센서에서 검출되는 주파수로부터 이 값을 나누면 구하고자 하는 유량 $Q(l/m)$를 얻을 수 있다. *K-factor*의 편차는 MM(Master Model)의 경우 29였으나 RM(Reverse Model)은 54로서 더 큰 값을 출력하였다. 또한 오실로스코프에서 검출하는 주파수 값의 범위도 MM은 ±2(Hz) 였는데 비해 RM은 ±5(Hz)로서 펄스검출 시 펄스폭이 상대적으로 더 큰 값을 나타내었다. 이는 유량 계측 시 스크류의 표면조도 등의 영향에 따른 저항의 변화에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서 향 후 스크류 가공면에 대한 연삭 방법 및 후처리 기술 등에 대한 연구가 필요한 것으로 사료되었다.

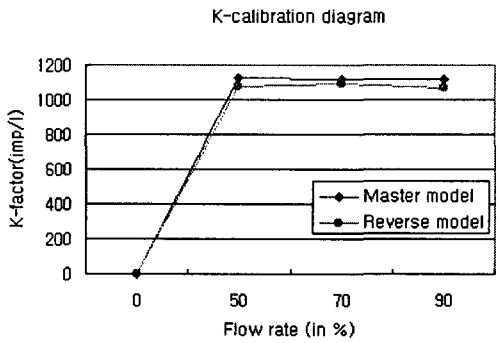


Fig. 16 K-calibration diagram

5. 결론 및 향후과제

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

1. 역공학 기술을 활용하여 기어 치형 설계를 위한 참조 데이터를 생성하였으며 역공학에 의한 형상복원 정밀도를 50μm 이내로 하였다.

2. 기존의 호빙 머신을 사용하지 않고도 복합가공기에 의한 기어 치형 가공 방법을 제시하였고 이를 위한 공구설계를 수행하였으며 가공 결과 양호한 동심도 및 직각도를 얻었다. 또한 스크류 개당 가공 시간을 30분 이내로 줄일 수 있었다.

3. 공압 투사에 의한 회전성능 시 저항 없이 고속으로 회전하였다.

4. 유압 시험 평가 장치를 설계 및 제작하여 유량 계측 시험에 적용한 결과 고유의 보정계수(*K-factor*)를 구할 수 있었다.

5. 펄스 폭이 원형 모델에 비하여 더 크게 검출되었으며 이는 기어 가공면의 조도 불량 때문인 것으로 파악되었다. 따라서 총형연삭공구를 개발하여 표면조도를 개선할 계획이다.

후기

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

참고문헌

(1) Choi, B. K., 1991, Surface Modeling for CAD/CAM, Elsevier, Amsterdam.

(2) James W., Dally, William F., Riley., Kenneth G., Mcconnell, 1993, Engineering Measurements.

(3) Vera B. Anand, 1996, Computer Graphics & Geometric Modeling for Engineers.

(4) Choi, B. K., Chon, C. S., 2001, CAD/CAM system and CNC machining, Seoul.

(5) Gerald F., 1999, Curves and Surfaces for CAGD.

(6) Hwang, J. D., Jung, J. Y., Jung, Y. G., 2003, "Modeling of Functional Surface using Modified B-spline", *J. of KSPE*, Vol. 20, No. 10, pp. 156~163.