

권선각 변화에 따른 철도차량 스크류압축기용 로터의 커터설계

김연수* · 박성혁* · 최부희** · 최상훈***

Cutter Design of Rotors in Screw Compressor for Railway Vehicle

Yeon-Su Kim, Sung-Hyuk Park, Boo-Hee Choi and Sang-Hoon Choi

Key Words: screw compressor(스크류압축기), rotor(로터), cutter design(커터설계), wrap angle(권선각)

Abstract

This paper describes the development of simulation program which is able to design cutter profiles and 3-dimensional geometry for rotors in screw compressor. Based on the symmetric rotor profiles developed previously, cutters are designed and 3-dimensional geometries of rotors are generated used by simulation program. Symmetric rotors are manufactured by a universal milling machine, and surface geometries of them are measured by a 3-dimension scanner. It is shown that simulation program developed is useful to design cutter for rotor manufacturing and to generate the 3-dimensional helicoid geometry of rotor in screw compressor.

기호설명

- N_c : helix angle of rotor
- R_c : pitch radius of cutter
- R_0 : pitch radius of rotor
- S : center distance between cutter and rotor
- t : time
- U : wrap angle of rotor
- v : feeding velocity of rotor
- ϕ : setting angle of cutter
- ω_c : angular velocity of cutter
- ω_r : angular velocity of rotor
- X, Y, Z : coordinates of rotor
- X', Y', Z' : coordinates of rotor profile perpendicular to Z axis
- X_4, Y_4, Z_4 : coordinates of cutter

1. 서론

지하철과 경량전철 등의 도시철도 차량에서는 제동장치, 승객용 출입문, 경적, 창닫이 장치, 현가장치인 공기스프링 등에 압축공기 또는 압력유 공급을 위해 압축기가 설치된다. 철도차량에 적용되는 압축기의 종류에는 피스톤식과 스크류식이 있으나 최근에는 토출압력이 일정하고 소음 및 진동이 적으며 장시간 사용에도 효율이 일정한 스크류식 압축기가 주로 사용되고 있으며, 국내 대부분의 도시철도 차량에서는 스크류식 공기압축기가 사용되고 있다.

스크류식 공기압축기는 밀폐용기 내에서 암로터와 수로터가 서로 맞물려 회전하면서 로터의 홈과 하우징 사이의 용적이 공기를 연속적으로 흡입, 압축, 토출하여 압축공기를 생성한다. 또한 스크류식 공기압축기는 윤활식과 비윤활식이 있으며, 공기정화장치가 필요하지만 높은 사용압력 범위, 누설방지, 저가, 용이한 온도조절이 가능한 윤활식이 주종을 이루고 있다. 스크류식 압축기를

* 한국철도기술연구원

** 서울정수기능대학

*** 건국대학교 기계설계학과

구성하는 암로터와 수로터는 매우 복잡한 3차원 형상을 가지고 있으며, 특히 치형과 가공 정밀도에 따라 압축기의 성능이 민감하게 변화하므로 설계 및 가공에 어려움이 많은 장치이다. 해외에서는 로터에 대한 다양한 치형과 가공에 대한 다양한 방법론이 개발되어 있다[1-3].

최근 국내에서는 스크류 로터의 기하학적인 특성과 제한사항을 고려하여 대칭형 치형과 비대칭 치형이 개발되었다[4-5]. 또한 개발된 치형을 이용하여 가공용 커터를 설계하고 암로터와 수로터를 가공하여 제안된 가공방법 및 커터설계 방법의 타당성을 입증하였다[6-7].

본 연구에서는 기존의 연구를 이용하여 스크류식 압축기의 중요한 성능 파라미터인 로터의 권선각 변화에 따른 커터설계 기능과 로터의 3차원 형상을 자동 생성할 수 있는 가공 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 이를 이용하여 권선각 변화에 따른 대칭형 로터에 대해 커터를 설계하고, 로터를 가공하여 형상 정밀도를 측정함으로써 시뮬레이션 프로그램의 타당성을 확인하였다.

2. 로터의 치형

로터의 치형은 스크류식 압축기 성능의 중요한 인자이며, 치형은 로터의 기하학적 특성과 제한사항에 따라 임의의 치형함수를 결정하고 로터의 회전에 따른 포락선(envelope curve)을 계산하여 설계된다. 또한 실라인(seal line)의 길이, 블러우홀(blow hole)의 면적, 용적곡선(volume curve) 등의 특성값의 해석을 병행하여 설계되는 치형의 유효성을 향상시킨다. 이와 같은 방법으로 국내에서 설계된 다양한 로터의 치형 중에서 여러 개의 원들을 조합한 대칭형 치형[4]은 Fig.1과 같다. 치형 A46은 수로터의 로브(lobe)가 4개, 암로터의 로브가 6개이며, A56은 수로터의 로브가 5개, 암로터의 로브가 6개이다.

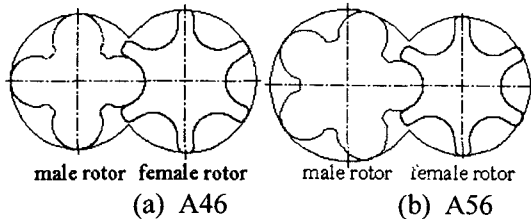


Fig.1 Symmetrical tooth profiles of rotor

3. 가공 시뮬레이션 프로그램의 개발

시뮬레이션 프로그램에서 로터의 가공은 호빙머신과 만능밀링머신을 대상으로 하였다. 호빙머신을 이용하여 로터를 가공하는 경우 로터와 커터가 동시에 회전하고, 로터가 축방향으로 이동하면서 모든 로브를 동시에 가공하게 된다. 만능밀링머신을 이용하는 경우에는 1개의 로브를 가공한 후 다른 로브를 차례대로 가공하게 된다.

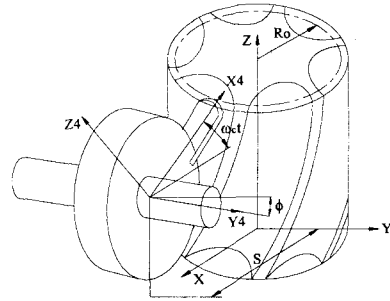


Fig.2 Manufacturing concept drawing of rotor

3.1. 커터의 가공경사각

호빙머신으로 로터를 가공하는 경우 로터와 커터가 동시에 회전하고, 로터가 중심축 방향으로 이동하면서 나선형 치면을 가공하므로 로터와 커터의 피치원 반경과 회전속도, 로터의 나선각을 고려하여 커터와 로터의 회전축은 임의의 경사각을 가져야 하며, 관계식은 다음과 같다.

$$\phi = N_e - \sin^{-1} \left(\frac{R_0 \omega_r \cos(N_e)}{R_c \omega_c} \right) \quad (1)$$

만능밀링머신으로 로터를 가공하는 경우 호빙머신과는 달리 로터의 회전속도는 존재하지 않으므로 커터의 가공경사각은 로터의 나선각과 동일한 값을 가지게 된다.

$$\phi = N_e \quad (2)$$

3.2. 로터의 치면 방정식

로터의 나선형 치면을 방정식화 해서 커터를 해석하는 것은 너무 복잡해서 곤란하므로 로터의 축직각 단면을 이용하여 방정식화 하였다.

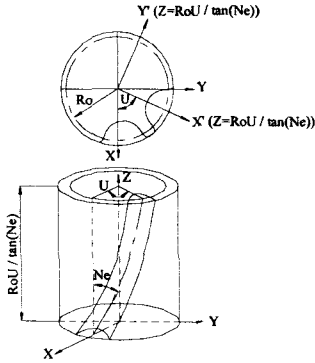


Fig.3 Wrap angle and helicoid surface of rotor

로터의 나선형 치면은 Fig.3과 같이 로터의 길이에 대해 권선각 U만큼 회전하므로 나선형의 치면 방정식은 로터의 축직각 단면을 이용하여 유도된다. 암로터의 치면 방정식은 식(3), 수로터의 치면 방정식은 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} X &= X' \cos\left(\frac{Z \cdot \tan N_e}{R_0}\right) - Y' \sin\left(\frac{Z \cdot \tan N_e}{R_0}\right) \\ Y &= X' \sin\left(\frac{Z \cdot \tan N_e}{R_0}\right) + Y' \cos\left(\frac{Z \cdot \tan N_e}{R_0}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} X &= X' \cos\left(\frac{Z \cdot \tan N_e}{R_0}\right) + Y' \sin\left(\frac{Z \cdot \tan N_e}{R_0}\right) \\ Y &= -X' \sin\left(\frac{Z \cdot \tan N_e}{R_0}\right) + Y' \cos\left(\frac{Z \cdot \tan N_e}{R_0}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

3.3. 커터와 로터 치면의 교선군

Fig.2에서 커터의 치형곡선과 로터의 나선형 치면의 교선군을 얻기 위해 커터의 좌표계와 로터 치면의 좌표계의 관계식을 유도한다.

암로터와 커터의 좌표계 관계식을 치면방정식인 식(3)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 커터와 암로터 치면과의 교선군 방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} X' \cos \alpha - Y' \sin \alpha - S + X_4 \cos(\omega_c t) &= 0 \\ X' \sin \alpha + Y' \cos \alpha - Y_4 \cos \phi & \\ + X_4 \sin(\omega_c t) \sin \phi &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

위식에서

$$\alpha = \frac{\tan N_e}{R_0} [-X_4 \sin(\omega_c t) \cos \phi - Y_4 \sin \phi + vt]$$

암로터의 경우와 동일한 방법으로 커터와 수로터 치면의 교선군 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X' \cos \alpha + Y' \sin \alpha - S + X_4 \cos(\omega_c t) &= 0 \\ -X' \sin \alpha + Y' \cos \alpha - Y_4 \cos \phi & \\ - X_4 \sin(\omega_c t) \sin \phi &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

위식에서

$$\alpha = \frac{\tan N_e}{R_0} [-X_4 \sin(\omega_c t) \cos \phi + Y_4 \sin \phi + vt]$$

식(5), (6)에서 ϕ 는 커터의 가공경사각이며, 호빙머신에 대한 커터를 설계할 경우에는 식(1)을 대입하고, 만능밀링머신에 대한 커터설계는 식(2)를 대입한다.

3.4. 가공 시뮬레이션

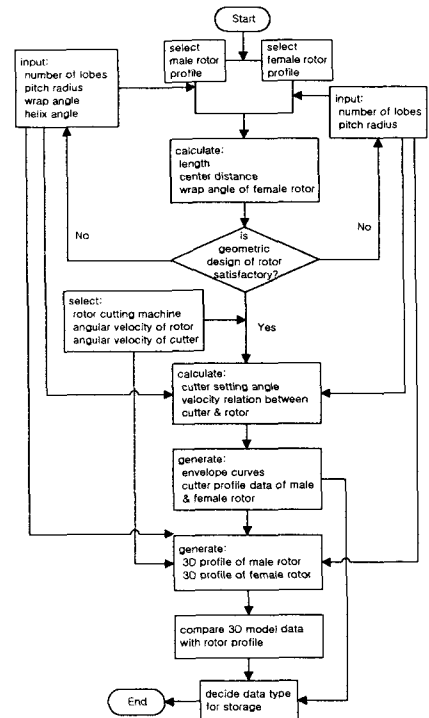


Fig.4 Flow chart of simulation program

본 연구에서 개발한 가공 시뮬레이션 프로그램은 로터의 치형 데이터 또는 치형함수, 로터의 피치원지름과 길이, 로브의 수, 수로터의 권선각, 나선각을 입력하면 Fig.1과 같은 로터의 축직각 치형을 생성한다. 또한 로터의 치형을 이용하여 식(5), (6)과 같은 커터와 로터의 교선군 연립방정식을 Newton Method로 수치해석을 수행하여 교

선군을 얻는다. 이 때 커터의 피치원 지름을 입력하고, 로터 가공용 공작기계를 만능밀링머신과 호빙머신에서 선택하여 가공 경사각을 계산한다. 이렇게 계산된 교선군의 공통접선을 계산하면 커터의 치형 곡선을 얻을 수 있다. 계산된 가공경사각과 설계된 커터를 이용하여 암로터와 수로터에 대해 각각 가공 시뮬레이션을 수행하여 3차원의 로터를 얻는다. 3차원의 로터 모델은 설계된 커터의 데이터와 로터 원통의 교점을 해석함으로써 얻을 수 있으며, AutoCAD의 스크립트(Script) 파일 또는 수치데이터 파일로 생성될 수 있다. 이렇게 시뮬레이션 프로그램으로부터 얻은 3차원 로터의 축직각 단면과 입력 데이터인 치형곡선을 상호 비교하여 치형오차를 확인하면 프로그램은 종료하게 된다. 개발된 가공 시뮬레이션 프로그램의 순서도는 Fig.4와 같다.

4. 해석 및 결과

4.1. 커터 설계

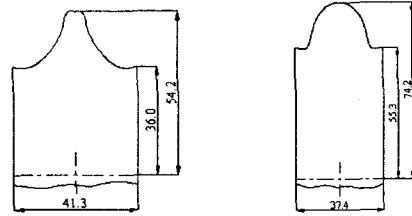
본 논문에서 개발된 가공 시뮬레이션 프로그램에 입력된 로터의 주요제원은 Table 1과 같으며, Fig.1의 2종류 대칭형 치형에서 수로터의 권선각을 각각 300°, 250°, 200°로 변화시킨 6가지 로터를 이용하였다.

Table 1 Specifications of rotors

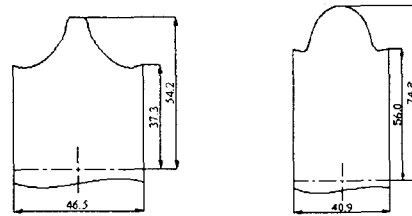
type	number of lobes		pitch radius (mm)		length (mm)	wrap angle of male (degree)	helix angle (degree)
	male rotor	female rotor	male rotor	female rotor			
A46	4	6	28.8	43.2	150.0	300	45.2
A56	5	6	36.0	43.2	187.5	300	51.5
B46	4	6	28.8	43.2	150.0	250	40.0
B56	5	6	36.0	43.2	187.5	250	46.3
C46	4	6	28.8	43.2	150.0	200	33.8
C56	5	6	36.0	43.2	187.5	200	40.0

본 논문에서는 로터 가공용 공작기계를 만능밀링머신으로 선택하였다. 또한 암로터의 경우 커터의 피치원 반경을 58mm, 수로터의 경우 50mm로 입력하여 커터와 로터의 나선형 치면의 교선군을 해석하였다. 이러한 교선군은 로터의 가공시 회전하는 커터와 로터가 서로 접하는 교점들의 집

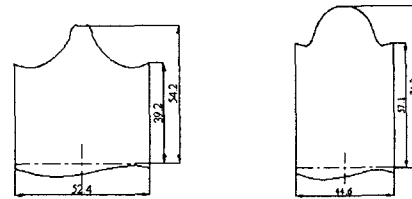
합이다. 결국 커터의 치형은 교선군의 공통접선 이므로 Table 1의 A46, B46, C46에 대해 가공 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 설계된 커터는 Fig.5와 같다. 또한 각각의 설계된 커터의 주요제원을 정리하면 Table 2와 같다.



(a) male cutter and female cutter of A46



(b) male cutter and female cutter of B46



(c) male cutter and female cutter of C46

Fig.5 Cutters designed by manufacturing simulation program

Table 2 Specifications of designed cutters

type		pitch radius (mm)	setting angle (degree)	width (mm)	length (mm)
A46	female	58	45.2	37.4	74.2
	male	50	45.2	41.2	54.2
A56	female	58	51.5	32.7	74.2
	male	50	51.5	34.1	54.2
B46	female	58	40.0	40.9	74.2
	male	50	40.0	46.5	54.2
B56	female	58	46.3	36.6	74.2
	male	50	46.3	38.9	54.2
C46	female	58	33.8	44.6	74.2
	male	50	33.8	46.5	54.2
C56	female	58	40.0	40.9	74.2
	male	50	40.0	44.9	54.2

4.2. 로터의 3차원 형상

가공 시뮬레이션 프로그램은 Fig.4와 같이 로터 커터를 설계한 후 이를 이용하여 모의 가공을 수행한다. 본 논문에서는 공작기계를 만능밀링머신으로 선택하였으므로 Table 2의 가공 경사각으로 커터를 로터의 중심축과 경사지게 한 후 회전시켜 커터와 로터 원통과의 교점을 계산하여 3차원의 형상을 얻게되며, Table 1의 A46, B46, C46에 대한 3차원 형상은 Fig.6과 같다.

Fig.6과 같이 모의 가공된 로터의 축직각 단면과 Fig.1의 치형 데이터를 비교하면 최대 10^{-4} mm 이하의 오차를 나타냈다.

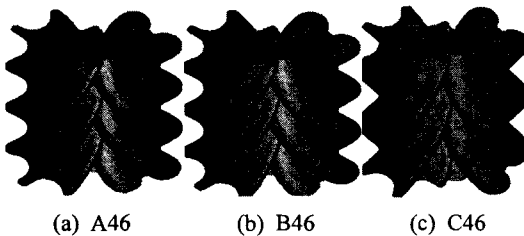


Fig.6 3-dimensional geometry of rotors

5. 로터의 가공

5.1 커터의 제작

Fig.5와 같이 설계된 로터 가공용 커터는 치형 데이터를 G code와 NC code로 변환시킨 후 Fig.7과 같은 와이어 방전가공기로 제작하였다. 커터의 재질은 고속도강을 선택했으며 측면 여유각이 5° 가 되도록 제작되었다.

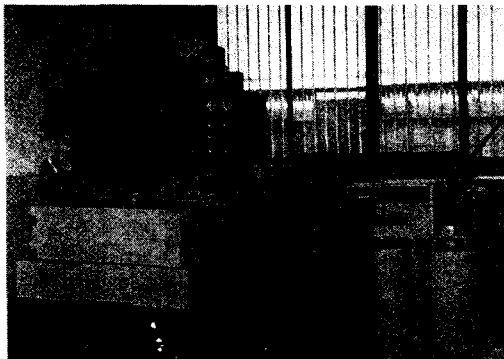


Fig.7 Wire electrodischarge machine for cutter manufacturing

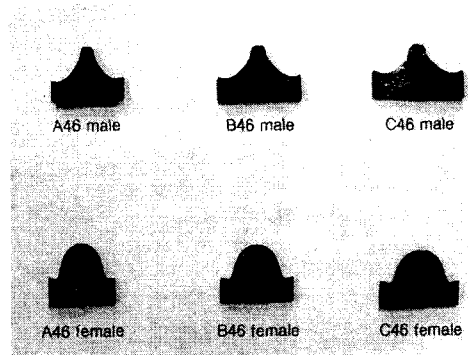


Fig.8 Shapes of manufactured cutters

Fig.8은 Table 2의 설계된 커터 중에서 수로터의 권선각이 300° 인 A46, 250° 인 B46, 200° 인 C46의 암로터와 수로터 가공용 커터를 Fig.7의 와이어 방전가공기로 제작한 것이다.

5.2 로터의 가공

만능밀링머신을 이용하여 수로터의 권선각이 300° 인 A46, 250° 인 B46, 200° 인 C46의 암로터와 수로터를 아크릴을 재료로 하여 가공하였다. 각각의 커터는 Table 2와 같은 가공 경사각으로 Fig.2, 9와 같이 설치되며, 로터의 나선각은 만능밀링머신의 차동변속기어장치를 이용하여 조정된다. 특히 암로터와 수로터의 나선은 서로 반대 방향이므로 수로터의 가공 시 차동변속기어장치는 역회전이 되도록 하였다. 또한 로브 수에 따라 만능밀링머신의 분할판을 이용하여 암로터와 수로터를 가공하였다. Fig.9는 로터를 가공하는 만능밀링머신을 보여준다.



Fig.9 Rotor manufacturing by universal milling machine

로터의 가공조건은 Table 3과 같이 설정하였고 최종적으로 가공된 로터의 형상은 Fig.10과 같다.

Table 3 Manufacturing condition of rotors

material of rotors		acryl
angular velocity of cutters		1400rpm
feeding velocity of table		0.4mm/rev
cutting depth	roughing	2mm
	medium finishing	1mm
	finishing	0.3mm



(a) A46 (b) B46 (c) C46

Fig.10 Manufactured rotors by universal milling machine

5.3 가공된 로터의 정밀도

가공된 로터의 치면 중 1개를 Fig.11과 같은 3차원 측정기로 측정하고 Fig.1의 측정각 단면 좌표값과 비교함으로써 치수 정밀도를 확인했다. 3차원 측정기의 프러그 직경은 0.5mm이고 로터에 직접 접촉해서 좌표점을 측정한다.



Fig.11 3-dimensional scanning of manufactured rotor geometry

Fig.12-17은 가공된 로터의 치면을 3차원 측정기로 측정하여 Fig.1의 로터 치형과 비교한 가공오차이며, 선행된 연구[6-7]에서의 로터 가공정밀

도와 유사한 경향을 갖지만, 커터설계 및 로터가공에서의 문제점을 보완한 결과 최대 가공오차는 약 0.4mm로서 약 10~15% 향상된 결과를 얻을 수 있었다. Fig.12-17에서 수로터의 경우 로브의 정점이 측정위치의 원점이고, 암로터의 경우는 로브의 홈이 측정위치의 원점이다. 또한 음의 가공오차는 로터의 치형 곡선보다 절삭이 더 진행되었음을 의미하고, 양의 가공오차는 절삭이 덜 진행되었음을 의미한다.

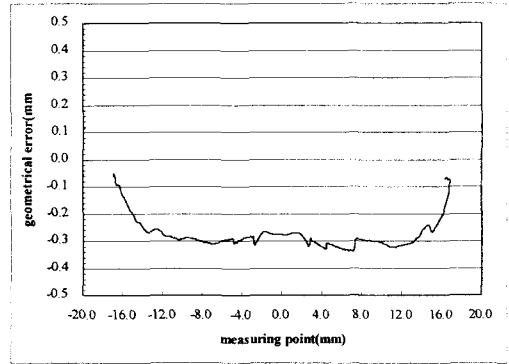


Fig.12 Geometrical error of male rotor in A46

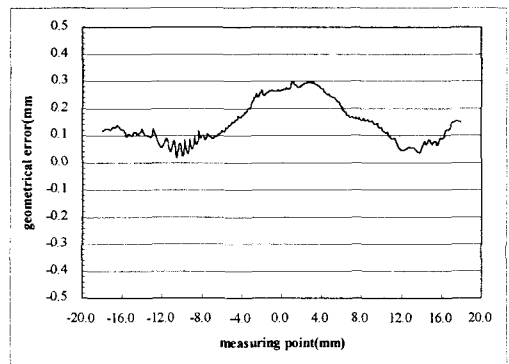


Fig.13 Geometrical error of female rotor in A46

로터의 가공오차는 커터를 설치할 때의 가공경사각 오차, 커터와 로터 중심축의 진직성 오차, 만능밀링머신의 차동변속기어장치 오차, 가공된 로터의 표면조도, 만능밀링머신 자체의 정밀도 등이 복합적인 원인이 된 것으로 분석된다. 가공오차는 다소 크게 나타났으나 개발한 가공 시뮬레이션 프로그램의 타당성은 확인할 수 있었다.

6. 결 론

스크류식 압축기의 중요한 성능 파라미터인 로터의 권선각 변화에 따른 커터설계 기능을 추가하여 커터의 자동설계와 로터의 3차원 형상을 자동 생성할 수 있는 가공 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 또한 설계된 커터를 이용하여 권선각 변화에 따라 3종류의 로터를 가공하고 이론적인 치형곡선과 형상정밀도를 비교함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 권선각의 변화에 따라 설계된 커터를 이용하여 로터를 가공하고 형상정밀도를 측정 한 결과 최대 0.4mm의 가공오차를 나타냈으며, 제안된 가공 시뮬레이션 프로그램 로터 설계에 유효하였다.
- (3) 대칭형 치형 스크류 로터에 대한 가공정밀도가 10~15% 향상되었다.

참고문헌

- (1) D. L. Margolis, 1978, "Analytical modeling of helical screw turbines for performance prediction," *Journal of Engineering for Power*, Vol 100, pp. 482-487
- (2) M. Fujiwara et al, 1984, "Computer modeling for performance analysis," *proc. of the 1984 International Compressor Engineering Conference at purdue*, pp.536-543
- (3) A. Kyusojin, K. Munekata, M. Tanaka, A. Toyama, 1986, "A Finishing Method of Rotor in Screw Compressor by Fly Tool," *Bulletin of JSME*, Vol.29, No.253, pp.2302-2305
- (4) 최상훈, 1995, "대칭형 스크류 로터 치형의 설계와 특성값에 대한 연구," *건국대학교 학술지 제39호*, pp.119-127
- (5) 최상훈, 김동현, 1986, "스크류 로터 치형의 성능 해석에 관한 연구," *한국정밀공학회지*, Vol.13, No.1, pp.69-77
- (6) 최상훈, 1997, "비대칭형 스크류 로터용 플라이 커터의 치형설계에 대한 연구," *대한기계학회 논문집(A)*, Vol.21, No.1, pp.45-52
- (7) 최상훈, 1997, "스크류 로터 가공용 치형설계에 관한 연구," *한국정밀공학회지*, Vol.14, No.10, pp.109-118

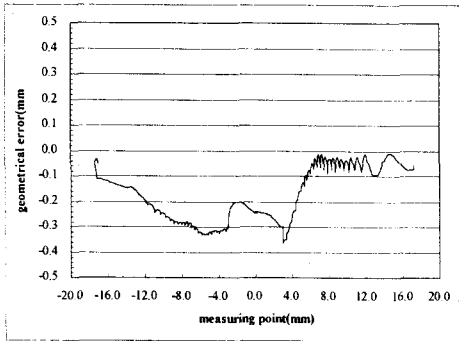


Fig.14 Geometrical error of male rotor in B46

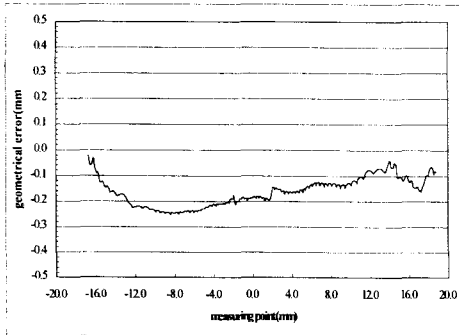


Fig.15 Geometrical error of female rotor in B46

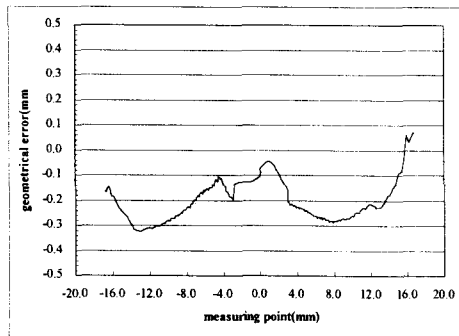


Fig.16 Geometrical error of male rotor in C46

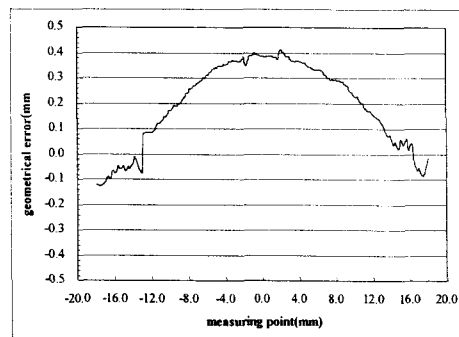


Fig.17 Geometrical error of female rotor in C46