

## 자동 나사 체결기의 체결력 제어 방법

Fastening Torque Control Mechanism for Automatic Screw Driver

오의진 (충북대학교 대학원), 정규원\* (충북대학교 기계공학부)

Wi-Jin Oh (Chungbuk Nat'l Univ., Graduate School), K. W. Jeong (Chungbuk Nat'l Univ. )

### ABSTRACT

A screw driver is essentially used in assembling machine parts and electronic products such as the printed circuit board with a housing. As the parts to be assembled becomes small and precise, the higher precision of the controlling screw driver torque is required. However, because the operator controls the fastening torque by his experience, it must be inexact. Thus the screw driver which can exactly control the fastening torque by a bellows is designed and developed in the study. The bellows is expanded by the inner air pressure and contracted and by the spring operation. The bellows driver is composed of the entrance solenoid valve, the exit solenoid valve and the pressure sensor. The pressure sensor senses the bellows pressure. When the pressure sensor output reaches the setting value, it operates the exit solenoid valve not to deliver further torque by letting the air of the bellows out. Through a series of experiments, the performance is studied and verified.

### I. 서 론

나사 체결기는 기계 부품의 조립 또는 하우징에 PCB를 조립할 때 필수적으로 사용되고 있다. 점차로 조립품의 소형화, 정밀화되는 추세이므로 이를 조립하는 나사 체결기의 조임 토크 또한 정밀화가 요구되어지고 있다.

#### 1-1) 자동 나사 체결기 동작 원리

자동 나사 체결기 토크 조절/클러치의 원리를 Fig. 1과 Fig. 2에서 나타내었다.  $y_w$ 와  $y_{fb}$ 는 경사면과 토크 조절 바(Bar)에 의한 변위이다. 모터에서 나온 회전력은 회전속도가 고속이므로 감속기어에서 회전속도를

감속시킨 후 구동 축으로 동력을 전달한다. 전달된 동력은 볼/경사면 클러치를 통하여 비트(Bit)를 회전시킨다. 나사에 일정 이상의 토크가 걸리면 더 이상 회전을 못하므로 실린더가 볼을 바깥으로 밀고, 이 볼은 서로 접촉되어 있던 경사면을 아래쪽으로 민다. 볼이 바깥으로 밀려가서 실린더로부터 일직선상에 오면 회전토크가 더 이상 전달되지 않아서 공회전만 하게된다. 경사면 밑에는 스프링이 연결되어서 있어서 경사면의 내려오는 힘을 밑에서 지지한다. 그리고, 이 스프링 밑에 있는 토크 조절 바(Bar)를 위 아래로 조절하여 조임 토크를 조절할 수가 있다. 토크 조절 바(Bar)를 위로 올리면 스프링의 변위가 커져 탄성력이 세어지므로 조임 토크가 세지고 반대로 내리면 스프링의 변위가 작아지므로 조임 토크가 작아진다. 본 연구에서 개발된 체결기에서는 스프링 대신에 벨로우즈를 이용하여 경사면의 움직임을 감지하여 체결 토크를 조절한다.

#### 1-2) 체결기 분석

나사 체결기의 모터는 고속이므로 이를 저속으로 바꿔주는 감속기가 필요하다. 감속기는 고속의 회전력을 저속으로 바꿔주면서 회전력을 증가시킨다. 감속기는 2쌍의 유성기어로 구성되어 있다. 감속비는 각각 16/44, 16/44로 동일하다. 나사의 회전속도가 최대 900rpm이며, 모터의 회전속도는 6800rpm이다.

클러치의 경사면을 지지하고 있는 스프링 힘과 회전 토크의 관계를 기하학적인 관계와 정력학적인 관계를 구하면 다음과 같다.

$$F_{Spr} = \frac{T}{r} \cdot \frac{(C_1 - \mu C_2)}{(C_3 + \mu)} \cdot \frac{1}{C_4}$$

$$T = r \cdot C_4 \cdot F_{Spr} \cdot \frac{(C_3 + \mu)}{(C_1 - \mu C_2)}$$

여기에서

$$C_1 = (\cos \theta_B - \mu \sin \theta_B)$$

$$C_2 = (\sin \theta_B + \mu \cos \theta_B)$$

$$C_3 = \frac{(\cos \theta_S + \mu \sin \theta_S)}{(\sin \theta_S - \mu \cos \theta_S)}$$

$$C_4 = \cos \theta_T + \mu \sin \theta_T$$

$\theta_B$  와  $\theta_T$ 의 관계식은 삼각함수를 이용하여 다음과 같이 된다.

$$\therefore \theta_T = 90^\circ - \theta_B$$

$$= 90^\circ - \sin^{-1} \left( \frac{r_{co}}{r} \cdot \sin(180^\circ - \theta_B) \right)$$

나사체결과정은  $\theta_0$ 가  $25^\circ$ 일 때 시작되고  $\theta_0$ 가  $0^\circ$ 일 때 끝난다. 나사체결 과정은  $\theta_0$ 가 처음에  $25^\circ$ 일 때 회전토크가 실린더에 접한 볼을 회전시켜서 나사체결이 이루어지고, 작업물체에 체결이 다 이루어져 더 이상 회전이 일어나지 않으면 실린더는 볼을 바깥으로 밀어낸다.  $\theta_0$ 가  $0^\circ$ 일 때까지 바깥 볼이 밀려져 나가서 실린더와 밀려져 나간 볼의 중심이 서로 일직선상에 있으면 더 이상 회전토크가 전달되지 않아, 나사체결기의 클러치 작동이 일어나는 것이다. 밀려져 나온 볼은 볼과 접촉되어 있는 경사면을 밀어낸다. 경사면은 회전체와 결합되어 있어 아래로 이동한다. Ball에 의해 내려오는 경사면의 변위  $y_w$ 는 Fig.2에서 도시적으로 표현을 하였고, 변위는 삼각함수를 이용해서 구할 수 있다.

$\theta_0$ 가  $25^\circ$ 일 때  $y_w$ 는  $0 \text{ mm}$ 이고  $0^\circ$ 일 때는  $1.44 \text{ mm}$ 이다. 볼에 의한 변위  $y_w$ 는 변위  $x$ 에 따라 변한다. 초기변위  $x_i$ 는  $5.447 \text{ mm}$ 이고 나사체결이 이루어지면서 실린더에 의해 밀려난 Ball의 변위  $x$ 는 아래 식과 같다.

$$x = (r \cos \theta_o + r_B \cos \theta_B) - x_i$$

볼에 의해 밀려 내려간 경사면의 변위  $y_w$ 는 아래 식과 같다.

$$y_w = 1.44 * x / 3.369 \text{ 으로 나타낸다.}$$

## II. 벨로우즈 나사 체결기

기존의 나사 체결기 스프링 밑에 있는 토크 조절링을 조절하여 토크 조절 바(Bar)를 위아래로 조절함으로써 나사 체결기의 회전 토크를 제어하였다. 본 논문에서는 압력에 따라 팽창·수축하여 스프링 작용을 할 수 있는 벨로우즈를 설계하고 제작하여 나사체결기를 개발하였다. 벨로우즈의 기본적인 개략도를 Fig.3에서 나타내었다. 벨로우즈를 두 개 사용하여 바깥쪽 벨로우즈의

내경안에 안쪽 벨로우즈를 넣은 후 위와 아래를 원형판으로 용접한 후 바깥쪽 벨로우즈와 안쪽 벨로우즈 사이에 공압을 넣어서 벨로우즈를 팽창·수축시킨다. 이를 기존의 나사 체결기의 스프링 대신 벨로우즈를 넣어 벨로우즈 나사체결기를 설계하였고, Fig.4에 벨로우즈 클러치 나사 체결기의 기본적인 개략도를 나타내었다. 압력 조절기를 이용해서 초기 공압을 조절한 후 입구 솔레노이드 밸브에 전압을 주어 공압을 벨로우즈 클러치 나사 체결기에 들어가게 한 후, 입구 솔레노이드 밸브에 전압을 끊으면 입구 솔레노이드 밸브가 단혀 일체의 압력 출입이 없게 된다. 나사 체결이 이루어지면 나사가 더 이상 회전하지 못해, 볼과 접촉되어 있던 경사면이 바깥으로 밀리면서 밑에 있는 벨로우즈에 힘을 가한다. 벨로우즈 내의 압력의 변화는 압력 센서를 통해서 볼 수 있다. 설정 이상의 압력 값이 나오면 출구 솔레노이드 밸브에 전압을 주어 출구 솔레노이드 밸브를 열어 벨로우즈내의 압력을 대기로 내보낸다. 그러면, 벨로우즈는 수축을 하게 되어 이와 접촉하고 있던 경사면도 같이 내려온다. 이때 경사면과 접촉하고 있던 볼도 같이 밀려나서 더 이상 회전 토크를 전달하지 못한다.

### 2-1) 벨로우즈 특성

압력에 따른 벨로우즈에서 받는 힘을 측정하기 위해서 로드셀을 사용하였다. 벨로우즈에 압력을 넣지 않은 초기 상태를 고정시킨 후 공압을  $0.5 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ 씩 증가시키면서 로드 셀에서 출력되는 값을 이용해서 벨로우즈에서 받는 힘의 관계를 구하여 Fig.5에 나타내었다. Fig.5에서 기울기  $6.16 \text{ cm}$ 은 벨로우즈에서 받는 힘을 압력으로 나눈 값으로 유효 단면적이다.

벨로우즈에 공압을 넣지 않은 초기 상태 높이는  $35.7 \text{ mm}$ 이다. 여기에 공압을  $0.5 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ 씩 증가시키면  $7 \text{ mm}$ 씩 커진다. 벨로우즈 성능 실험표에서의 스프링상수  $k$ 는 다음과 같다.

$$k = \frac{\beta \pi E D t^2}{2n W^2}$$

벨로우즈 나사 체결기의 벨로우즈 압력특성을 알기 위해서는 압력에 따른 벨로우즈에서 받는 힘을 알아야 한다. Fig.6에서 실험 장치를 도시하였다. 팽창높이를  $37.1 \text{ mm}$ 로 고정한 이유는 벨로우즈에 전혀 압력이 들어가지 않은 상태의 벨로우즈 높이는  $35.7 \text{ mm}$ 이고 벨로우즈에 압력이 들어간 후 나사 체결하는 동안 설정 이상의 조임 토크 값이 나오면 벨로우즈의 압력을 빼서 클러치 작용을 하기 위해서는 최소 변위가  $1.4 \text{ mm}$ 는 있어야 하기 때문에  $37.1 \text{ mm}$  고정한 것이다. 입구 솔레노이드 밸브를 열어 벨로우즈에 초기 압력을 넣고 입구 솔레노이드 밸브를 닫아 일체의 압력 출입을 없게 한 후 추의 무게를  $1 \text{ kgf}$ 에서부터  $1 \text{ kgf}$ 씩 증가하면서 이때

벨로우즈 압력의 변화를 압력센서를 이용해서 구하였다. 각 압력과 무게에 따른 벨로우즈 클러치 압력의 변화를 여러번 실험을 하여 평균값과, 최대·최소값을 구하여 Fig.7에 나타내어 벨로우즈 클러치 압력 특성을 구했다. 온도에 따른 영향은 온도가 낮을수록 벨로우즈 클러치 압력의 변화가 약간 작아짐을 실험을 통해 알 수 있었다.

### 2-2) 벨로우즈 나사 체결기 제어기

벨로우즈 나사 체결기를 자동으로 제어하기 위해서는 회전 토크가 설정 토크이상이면 회전 토크를 전달하지 않으면 되는 것이다. 회전 각도에 따른 압력의 변화를 압력 센서를 통해서 얻을 수 있고, A/D 변환기를 이용하여 압력 센서의 값을 입력받고, 이 값이 설정값 이상이 되면 릴레이 보드에 연결되어 있는 출구 솔레노이드 밸브를 ON 시킨다. 이때 벨로우즈 안의 공압을 빼주게 되어 더 이상 회전 토크가 전달이 되지 않는다. Fig.8에 벨로우즈를 이용한 체결기의 제어방법을 보였다.

## III. 실험 결과 및 토의

### 3-1) 불/경사면 클러치 방식의 체결기 회전 토크

회전 각도에 따른 불/경사면 클러치의 특성을 실험을 통하여 구하였다. 회전 토크를 손으로 줄 때 백래쉬나 사람의 힘에 따라서 회전 토크의 변화가 심하므로, 유성기어 2쌍을 이용한 감속기어를 사용해서 사람의 힘에 따른 회전 토크의 변화를 없앴다. 감속기에 각도기를 달아서 0.5° 씩 회전 각도를 주면서 나사 체결기의 회전 토크를 구하였다. 나사 체결기의 토크 조절 바(Bar)를 1, 3, 5, 7, 9 씩 조정하면서 각각의 회전 토크를 여러 번의 실험을 통해서 구한 후, 평균 값을 내서 Fig. 9에 나타내었다. 이는 이론값으로 구한 회전 토크와 같은 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. Table 1은 토크 조절 바(Bar)에 따른 최대 토크를 나타낸 것이다.

Table 1 Max torque for the torque bar

Torque bar	1	3	5	7	9
Max torque (Kgfmm)	23	40	50	72	92

### 3-2) 벨로우즈 나사 체결기의 특성

벨로우즈 나사 체결기의 회전 토크를 구하고, 온도에 따라 영향을 보기 위해서 온도가 14, 16, 18, 20℃ 일 때 각각 실험을 하였다. 입구 솔레노이드 밸브를 열어 압력을 1 kgf/cm<sup>2</sup> 넣고 입구 솔레노이드 밸브를 닫아

일체의 압력 출력을 없게 한 후 회전 각도를 0.5° 씩 주면서 회전 토크와 벨로우즈의 압력 변화를 구했고, 압력을 1.5, 2 kgf/cm<sup>2</sup> 씩 주면서 실험을 하였다. 벨로우즈 나사 체결기의 회전 토크와 압력의 변화를 Fig.10,11에 각각 나타내었다. 해당 온도에 대하여 실험을 여러번 한 후 이를 평균, 최대·최소 값을 구하여 결과를 나타내었고, 회전 토크가 압력에 비례하여 커짐을 알 수 있었고, 온도에 따라서 약간의 회전 토크 값이 차이가 난다. Fig. 10과 같은 회전 토크 특성이 나온다. 회전 각도를 점점 증가하면 벨로우즈 압력이 점점 커지다가 회전 토크가 0이 될 때 벨로우즈가 초기 상태의 압력으로 돌아간다는 것을 Fig. 11을 보고 알 수 있다.

### 3-3) 체결기 회전 토크 비교

실제 조립 작업을 할 때와 같은 상황으로, 전기모터를 구동하여 체결작업을 할 경우에 회전토크를 기존의 불/경사면 클러치를 사용한 경우와 벨로우즈를 사용한 체결기에 대하여 실험을 하였다. 모터의 회전 속도가 빠르므로 벨로우즈 클러치 나사 체결기의 회전 토크 값을 얻을 때는 A/D변환기를 이용하여 시간에 대한 회전 토크를 얻었다. 실험방법은 위와 동일하다. 먼저 기존의 전기 모터 구동 나사 체결기를 실험하여 Fig.12에 나타내었고, 벨로우즈 나사 체결기를 전기 모터로 구동하여 시간에 대한 회전 토크로 나타내어 Fig. 13에 보였다. 입력된 회전 토크는 아래와 같다.

표 2 Desired torque

Desired torque (kgfmm)	12	20	25
Bellows pressure kgf/cm <sup>2</sup>	1.0	1.5	2.0

실험을 통해 얻은 토크는 입력된 토크에 비해 약간 크게 나왔고 Fig.14에서 오차는 2.3%이내이고 벨로우즈 압력이 클수록 오차가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 기존의 전기 모터 구동 나사 체결기는 설정된 회전 토크가 나와도, 바로 회전 토크의 전달이 중지되는 것이 아니라, 여러 번 돌면서 설정 토크 이상의 회전 토크가 전달되는 것을 Fig.12를 보고 알 수 있다.

그러나, 정밀 토크 제어기는 설정된 회전 토크 값이 나오면 Relay board에서 Relay가 작동되어 출구 솔레노이드가 열리므로 더 이상의 회전 토크를 전달되지 않는 것을 Fig.13을 보고 알 수 있다. 설정된 토크가 나온 후에 약간의 회전 토크가 전달되는 것은 출구 솔레노이드 밸브에서 공기가 빠질 때 전달되는 것이다.

## IV. 결론

본 논문은 단지 작업자의 경험 값으로 조절하는

자동 나사 체결기의 클러치 및 회전 토크 특성을 분석하였고, 압력에 따라 수축·팽창하여 스프링 역할을 할 수 있는 벨로우즈를 개발하였다. 이를 이용하여 정확한 값으로 체결력을 제어 할 수 있는 벨로우즈 나사 체결기를 개발하였고, 벨로우즈 나사 체결기를 정밀하게 제어하는 제어를 개발하는 것으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 벨로우즈 클러치를 온도에 따라 수축·팽창 실험을 수행하여 벨로우즈가 온도가 낮을수록 압력의 변화가 약간 커짐을 볼 수가 있었고, 벨로우즈 나사 체결기의 회전 토크는 온도가 높을수록 약간 커짐을 볼 수가 있었고, 전체적으로는 온도의 영향을 적게 받는 것을 알 수 있었다.
- (2) 제어를 이용해서 벨로우즈 나사 체결기 회전 토크를 측정된 결과 입력된 토크에 대응되는 회전 토크를 얻을 수가 있었고, 전기 모터로 구동하여 얻은 토크는 입력된 토크 값에 비해 약간 크게 나왔고, 오차는 2.3% 이내로 양호한 결과를 얻을 수가 있었다.
- (3) 벨로우즈 나사 체결기는 2개의 슬레노이드 밸브와 압력센서가 있어 크기가 크고, 복잡하므로 이를 체결기에 전용으로 사용되는 크기로 만드는 것을 향후 연구과제로 남겨 놓았다.

### 참고 문헌

- [1] 박상근, "Bellows 거동에 영향을 미치는 인자들에 관한 연구", 한양대학교 석사학위 청구 논문, 1987.
- [2] 이권희, "충격 횡방향 하중을 받는 원호형 bellows의 동적 거동해석", 한양대학교 산업과학 연구소, No. 38, 1990.
- [3] L. Seneviratne, "On the use of mechatronics for intelligent screw insertions", Proc. of IEEE 1996 Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Vol. 1, Nov.18~21, Hawaii, pp.193-198.
- [4] R. F. Wolffenbuttel and J. A. Forester, "Noncontact capacitive torque sensor for use on a rotating axle", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 22, pp. 82-88, 1989.
- [5] J. D. Turner, "The development of a thick film noncontact shaft torque sensor for automotive applications", J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 22, pp. 82-88, 1989.
- [6] S. S. Malek, Y. J. Chiang and J. E. Mason, "Multivariable effects on an automatic screw-torquing process", J Manuf Syst., Vol. 12, No. 6, 1993.
- [7] Ishida. Y and Minamisawa, C, "조립 기능 타이로드의 나사 체결 축력 해석", 精密工學會誌, Vol. 62(8), pp.

1172-1176, 1996.

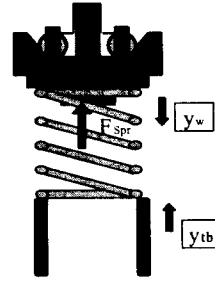


Fig. 1 Ball/Slope clutch mechanism

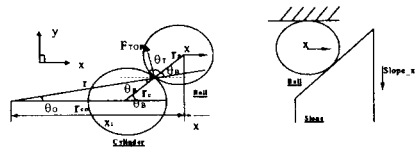


Fig. 2 Free body diagram of the cylinder and the ball

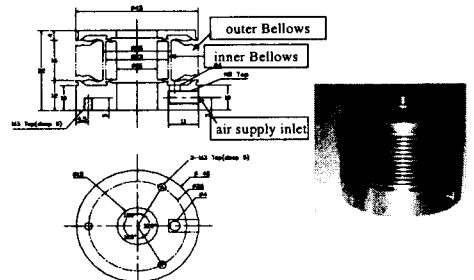


Fig. 3 Bellows

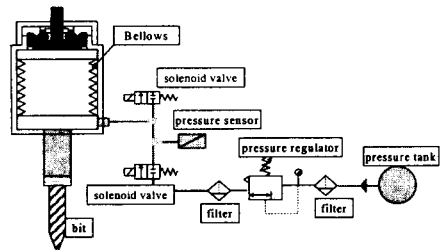


Fig. 4 Bellows screw driver

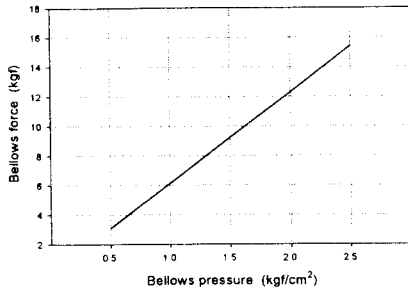


Fig. 5 Experimental relation of the bellows force and the bellows pressure

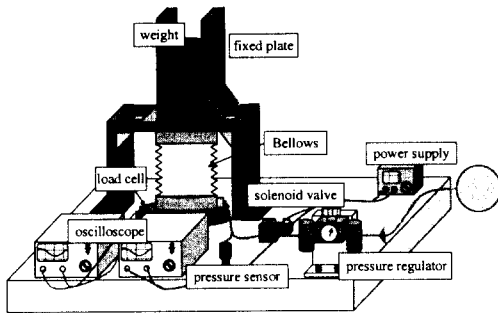
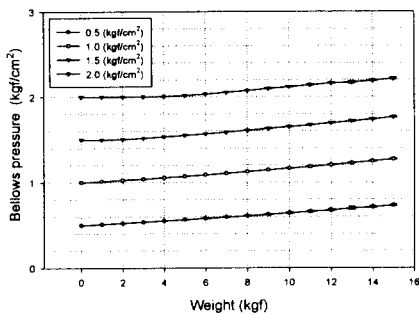
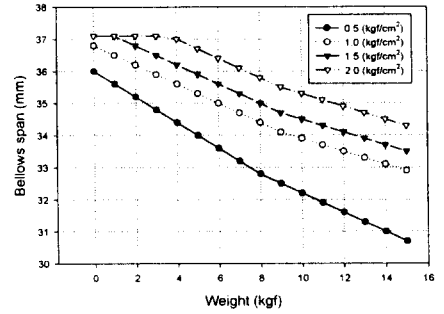


Fig. 6 Experimental setup of the bellows pressure acquisition



(7-a) Bellows pressure



(7-b) Bellows span

Fig.7 Experimental results of the bellows clutch pressure and span for the various bellows pressure and weight

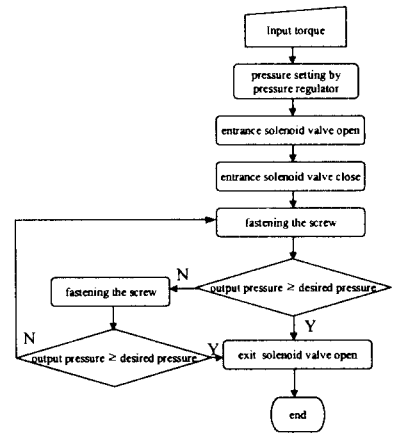


Fig. 8 Flowchart for the bellows screw driver controller

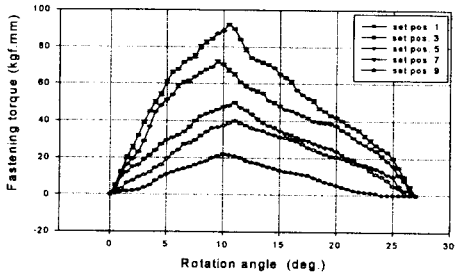


Fig.9 Experimental results of the screw driver torque for the angle and the torque set position

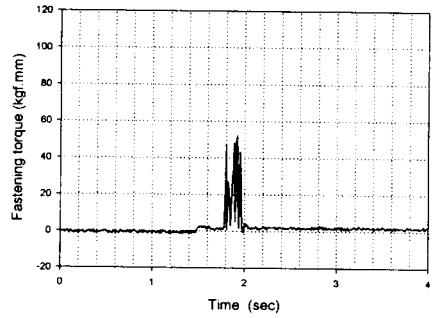


Fig.12 Ball/slope clutch type (TSP=3)

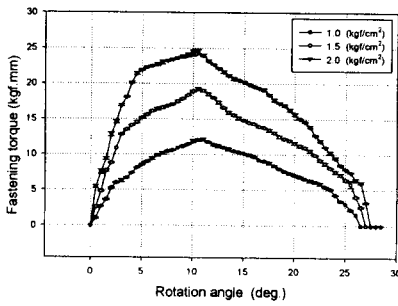


Fig. 10 Fastening torque of the bellows screw driver for the various initial bellows pressure

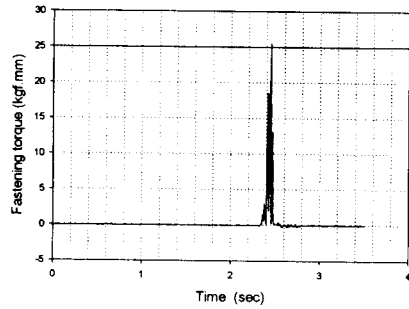


Fig. 13 Bellows type driver ( $P_b=2.0 \text{ kgf/cm}^2$ )

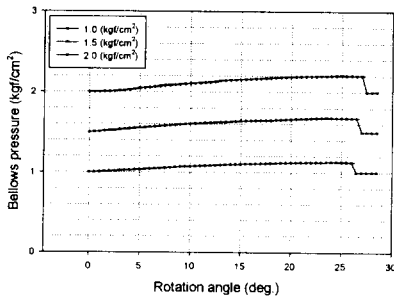


Fig. 11 Experimental results of the bellows screw driver pressure for the various bellows pressure

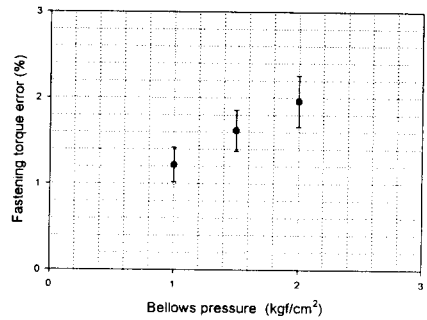


Fig. 14 Error distribution for the fastening torque of bellows type