

# 리니어 타입 크로스 롤러 가이드 공압 액추에이터의 신뢰성 평가에 관한 연구

최진화<sup>#</sup>, 신봉철<sup>\*</sup>, 조명우<sup>\*\*</sup>, 강성민<sup>\*\*\*</sup>, 이수진<sup>\*\*\*</sup>

## A Study on the Reliability Analysis for a Linear Type Pneumatic Actuator with Cross Roller Guide

Jin Hwa Choi<sup>#</sup>, Bong Cheol Shin<sup>\*</sup>, Myeong Woo Cho<sup>\*\*</sup>, Sung Min Kang<sup>\*\*\*</sup> and Soo Jin Lee<sup>\*\*\*</sup>

### ABSTRACT

This research presents the performance analysis of the linear type pneumatic actuators that are used in semi-conductor assembly line to transfer some product with high accuracy. To increase positioning and repetitive accuracies, a cross roller guide is implemented inside the pneumatic actuator. The finite element method is used to verify the force against working moments, and reliability analysis is performed to classify the breakdown cases. Also, reliability, failure rate, probability density function, and  $B_{10}$  life are estimated under the boundary of thrust or air leakage conditions. In this study, the failure probabilistic function of the pneumatic actuators is analyzed using Weibull distribution.

**Key Words** : Pneumatic actuator (공압 액추에이터), Finite Element Method (유한요소법), Reliability (신뢰성), Weibull distribution (와이블 분포)

### 1. 서론

오늘날 공압 액추에이터는 다양한 형태의 동작 구현뿐만 아니라 고정도의 위치정밀도 구현이 가능함에 따라 공장 자동화를 이루는데 있어 없어서는 안되는 중요한 요소기기로 평가 받고 있다.

본 연구의 평가대상물인 공압 액추에이터는 직선왕복운동이 가능한 고정도의 크로스 롤러 가이드를 내장하여 반도체 전·후 공정의 조립라인, 산전분야, 그 밖의 정밀 직선 이송이 요구되는 분야

에서 제품의 공급 및 이송 장치, 스톱퍼로써 활용된다. 즉, 고정도의 위치정밀도 구현을 필요로 하는 곳에 사용되는 제품으로 산업 전반의 미세화와 국부정밀도를 요구하는 시장추세에 따라 성능 및 신뢰성 평가가 요구되는 제품이다. 여기서 신뢰성이란, 아이템이 주어진 기간 동안 주어진 조건에서 요구기능을 수행할 수 있는 가능성을 일컫는 말로써 평가를 통해 해당 아이템이 처음 설계되는 시점에서부터 최종적으로 수명이 다하여 폐기되는 시점에 이르기까지 고장 원인을 분석하고 이를 최소

접수일: 2005년 10월 24일; 게재승인일: 2006년 4월 14일

# 교신저자: 인하대학교 산업과학기술연구원

E-mail wantiny@lycos.co.kr Tel. (032) 860-7306

\* 인하대학교 기계공학과 대학원

\*\* 인하대학교 기계공학과

\*\*\* (주)프로텍 부설연구소

화하는 것을 일컫는다. 현재까지 전기, 전자부품에 대한 사례와 데이터는 많이 축적이 되었으나 기계 부품에 대한 신뢰성 연구는 아직 미진하여 확보된 데이터가 많지 않은 실정이다.<sup>1,2</sup> 본 연구에서는 설계, 제조, 조립 단계를 제외한 완제품 상태에서부터 수명이 다하는 시점에 이르기까지 다양한 고장원인을 분석하고 이를 최소화하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 신뢰성의 지표가 될 수 있는 고장률과 고장 형태 등을 분석한 고장이력 데이터와 신뢰성시험 데이터를 활용하여 제품에 대한 신뢰성 향상을 추구하고자 하였다. 추가적으로 유한요소 해석을 이용하여 대상물인 공압 액추에이터의 모멘트 대응력을 평가하였다.

## 2. 신뢰성 데이터 분석

### 2.1 데이터 수집 및 분석 방법

분석에 사용된 공압 액추에이터는 ㈜프로텍에서 생산되고 있는 크로스 롤러 타입(Cross Roller Type)의 직선이송용 공압 액추에이터 PST12NS로서 주로 반도체 생산라인 장비에 많이 사용되는 부품이다. 따라서 고정도의 이송 정밀도와 반복 정밀도 및 모멘트에 대한 대응력이 일반적인 공압 액추에이터에 비해 월등해야 하는 조건으로 인해 약 100PPM 표본을 기준으로 이상부분에 대한 고장원인을 밝히고자 하였다. 시험방법으로는 여러 개의 시험편을 무부하 상태에서 1cycle/sec 왕복운동으로 1000만회에 이르기까지 실시하였으며 이와 같은 시험이 수행되는 과정 중 일정 구간마다 양불 판정을 위해 추력시험(Thrust test), 공기누설시험(Air leakage test)을 구분지어 실시하였다. 이상의 시험들은 공압 액추에이터의 성능을 추정할 수 있는 기준 팩터로서 대부분 생산업체의 자체기준에 따라 시험되며 출하검사성적서에 반영되고 있다. 본 연구에서 추력시험은 Fig. 1(a)에서와 같이 무부하의 상태로 헤드 및 로드 부에 로드셀(Load cell)을 설치한 뒤 최고 사용 압력의 1.5배의 공기압을 교대로 약 1분간 가압 유지하여 그 수치를 측정하였으며 이때 각 부의 이상 유무를 조사하였다. 또한, 공기누설시험은 Fig. 1(b)에 나타난 시스템을 이용하여 실린더를 정지 상태로 놓고, 헤드 및 로드 부에 정밀 레귤레이터로 1kgf/cm<sup>2</sup> 및 3.5kgf/cm<sup>2</sup>의 정량 압축공기를 교대로 가한 다음 일정시간 후 유입되었던 압축공기의 압력과 초기 유입된 압축공기의

압력 편차를 비교하여 누설 여부를 판단하였으며 약 1000만회의 왕복시험을 수행하는 동안 각 부품의 상태를 확인하였다. 이상의 시험방법으로 획득된 데이터와 외부사례로 획득된 데이터를 종합하여 사용조건, 고장개수, 고장시간, 고장 형태, 고장 원인으로 정리하여 신뢰성 분석 작업을 수행하였다. 데이터 중 고장시간과 사용조건, 고장 개수는 고장율과 평균고장시간을 예측하기 위해 사용되었으며, 고장모드 혹은 고장 메커니즘 등은 고장의 원인을 규명하여 제품 개발 및 설계 시에 활용할 수 있도록 하였다. Fig. 2는 본 연구에서 수행한 신뢰성 분석과정을 나타내고 있다.

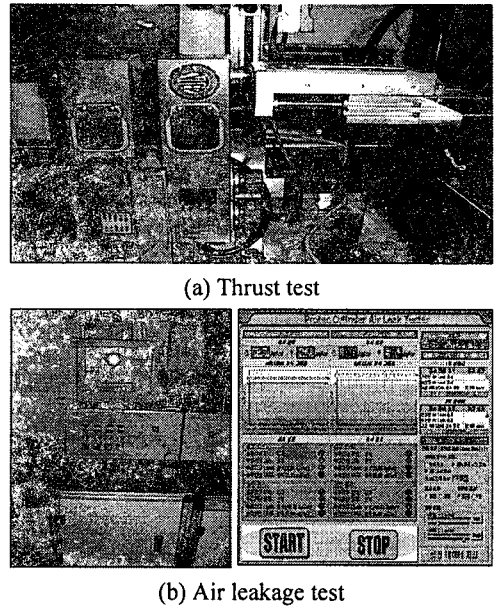


Fig. 1 Pneumatic actuator performance test

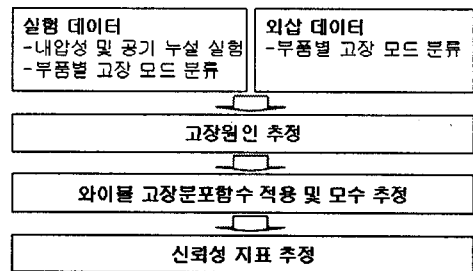


Fig. 2 Flow chart for reliability data analysis

Table 1 Functions of trouble probability distribution

	Weibull
Probability density function, $f(t)$	$f(t) = (\frac{\beta}{\eta})(\frac{t}{\eta})^{\beta-1} \exp[-(\frac{t}{\eta})^\beta]$
Reliability, $R(t)$	$R(t) = \exp[-(\frac{t}{\eta})^\beta]$
Failure rate, $\lambda(t)$	$\lambda(t) = (\frac{\beta}{\eta})(\frac{t}{\eta})^{\beta-1}$

2.2 고장 확률 분포 함수

고장 데이터를 이용해 부품이나 제품의 고장률을 알기 위해서는 여러 가지 고장분포함수를 사용하여 고장률 함수를 추정할 수 있다. 일반적으로 지수 분포(Exponential distribution), 와이블 분포(Weibull distribution), 대수정규 분포(Log-normal distribution) 등이 있으나 본 연구에서는 마모나 열화(Degradation)를 고려하여 와이블 분포를 사용하였다. 이는 많은 기계류 부품에 대하여 증가, 감소, 상수 고장률을 모두 포함하는 응용범위가 매우 넓은 분포이다.<sup>3,4</sup> 관련 파라미터들로 구성된 함수식들은 Table 1과 같다. 수식에서 형상모수(Shape parameter)인  $\beta$ 는 분포의 모양을 결정하는 함수이며  $\eta$ 는 척도모수(Scale parameter)로써 가로축의 척도를 규정한다.

2.3 고장형태 분류

일반적 기계 부품류에 발생하는 고장메커니즘으로는 단일 부하에 의하여 고장이 발생하는 우발 메커니즘과 시간의 경과에 따른 부하축적으로 인한 마모 메커니즘으로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 시간에 따른 고장형태와 원인을 파악하기 위해 외부 사용 환경 및 동작조건으로 허용중량 내에서 1000만회 반복운동을 하도록 실험조건을 조성하였다. 고장판별은 규정된 위치 정밀도가 나타나지 않을 경우 또는 불규칙 동작을 수행하는 경우, 동작을 수행하지 않는 경우 모두를 고장으로 분류하였다. Table 2는 외삽 데이터와 함께 분류된 특징 고장형태를 나타내고 있다.

2.4 고장 이력 데이터 분석

실험을 통해 일정 횟수마다 기록한 추력과 공기 누설에 대한 열화 데이터를 분석함으로써 액추에

Table 2 Failure modes and causes

부품종류	고장모드	고장원인
Seal	Air Leakage	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Rod와의 마찰마모</li> <li>● 편하중</li> </ul>
Roller Guide	V-groove Damage	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 롤러와의 마찰마모</li> <li>● 불균일한 경화처리</li> <li>● 윤활 부족</li> </ul>
Roller & Cage	Stick Slip	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 외부 충격 및 허용 모멘트 초과</li> <li>● 적정 윤활 부족 및 습동부의 표면 손상</li> <li>● 공급압력의 저하</li> <li>● 실린더의 피스톤과 로드패킹의 면압을 상승 및 로드와 피스톤 부의 습동부하 발생</li> <li>● 열처리 경화층의 불량</li> </ul>

이터의 동작특성을 분석하고 이를 통해 고장률 및 수명 등을 예측하기 위해 2-모수 와이블과 최우추정법(MLE: Maximum Likelihood Estimation)을 사용하였다. Table 3은 추력 실험을 통해 획득한 고장 데이터이며 Table 4는 모수 추정결과이다. 계산된 와이블 확률 분포의 형태는 Fig. 3과 같다. 시간과 신뢰성의 관계 그래프에서  $1.00 \times 10^7$ 회 일때 0.60의 신뢰도 즉, 전체 제품 중 60%는 고장 없이 작동함을 알 수 있다. 고장률 그래프와 확률밀도함수 그래프에서도 약  $1.00 \times 10^7$ 회 또는  $1.20 \times 10^7$ 회까지는 고장률이 급격하게 증가하지만 그 이후로는 일정한 고장 빈도 양상을 보이고 있다. 90% 신뢰구간에서 추정된 제품의 평균수명(MTTF: Mean Time To Failure)은  $1.2997 \times 10^7$ 회,  $B_{10}$  수명은  $3.3843 \times 10^6$ 회로 각각 산출되었다. 여기서  $B_{10}$  수명은 제품 중 10%가 고장을 일으키는 시점을 의미한다.

Table 5는 공기 누설 실험을 통해 획득한 고장 데이터이며 Table 6은 모수 추정결과이다. 계산된 와이블 확률 분포의 형태는 Fig. 4와 같다. 시간과 신뢰성의 관계 그래프에서  $1.00 \times 10^7$ 회 일때 0.57의 신뢰도 즉, 전체 제품 중 57%는 고장 없이 작동함을 알 수 있다. 고장률 그래프와 확률밀도함수 그래프에서도 약  $1.00 \times 10^7$ 회까지는 고장률이 급격하

계 증가하지만 그 이후로는 일정한 고장 빈도 양상을 보이고 있다. 90% 신뢰구간에서 추정된 평균 수명은  $1.5945 \times 10^7$  회,  $B_{10}$  수명은  $2.7333 \times 10^6$  회로 산출되었다.

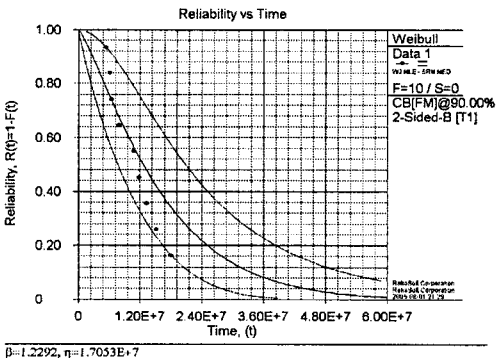
이상의 추력과 공기누설 각각의 수명분포를 통한 신뢰성지표 결과들을 종합해 볼 때 추정된 모수 값들과 그래프가 많이 유사함을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 수행한 신뢰성 분석이 대상물인 PST12NS 공압 액추에이터를 잘 표현하고 있음을 나타낸다.

Table 3 Results of internal pressure test

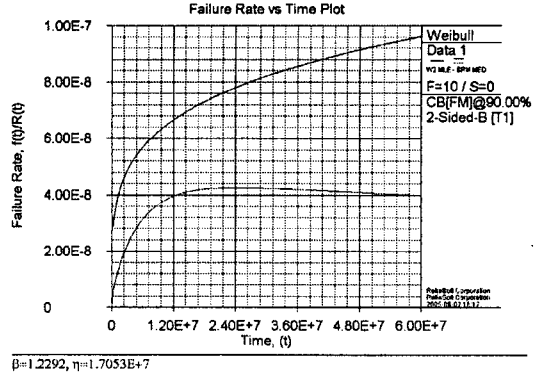
Failure No.	Failure time(cycle)
1	5423185
2	6160956
3	6452923
4	7958071
5	10844487
6	11897887
7	13336761
8	15233626
9	18044238
10	61896071

Table 4 Estimated parameters of Weibull

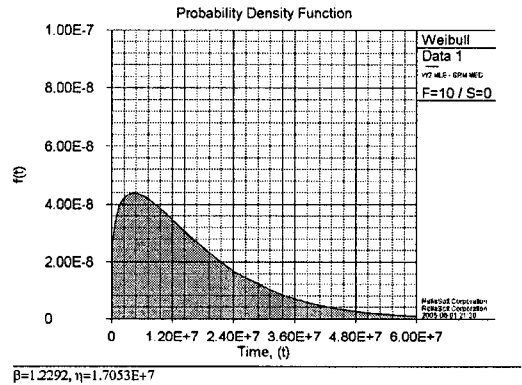
Parameters	Values
Scale( $\eta$ )	$1.7053 \times 10^7$
Shape( $\beta$ )	1.2292



(a) Reliability



(b) Failure rate



(c) Probability density function

Fig. 3 Weibull probability plot

Table 5 Results of air leakage test

Failure No.	Failure time(cycle)
1	4052176
2	5242656
3	5586381
4	6238309
5	6260498
6	13695026
7	15705511
8	17070118
9	22114129
10	32972573

Table 6 Estimated parameter of Weibull

Parameters	Values
Scale( $\eta$ )	$1.4451 \times 10^7$
Shape( $\beta$ )	1.5502

### 3. 역학적 해석

#### 3.1 해석조건 및 방법

본 연구에서는 공압 액추에이터 PST12NS를 대상으로 유한요소해석 툴인 CosmosWorks를 이용하여 정적 모멘트 부하를에 따른 최대 변위량을 구하였다. 이는 고정도의 위치정밀도 구현을 목적으로 한 대상물의 허용용량을 검증하기 위한 방법으로 수행되었으며 결과에서 최대 변위가 허용오차 범위 내에 있을 경우 적절한 것으로 평가할 수 있다.

해석에 앞서 액추에이터를 구성하는 축의 재질은 SM45C, 가이드는 SUJ2, 케이스는 A16063 이므로 각 소재의 물성치를 구분하였으며 각 축 방향으로의 최대 허용 모멘트를 수치계산을 통해 산출한 후 해석조건으로 사용하였다. 산출 방식은 일반적인 공압 액추에이터의 선정방식을 따라 다음의 식을 이용하였다.

$$F_x(N) = (M_p \times 1000) / (L_x + (A + Stroke))$$

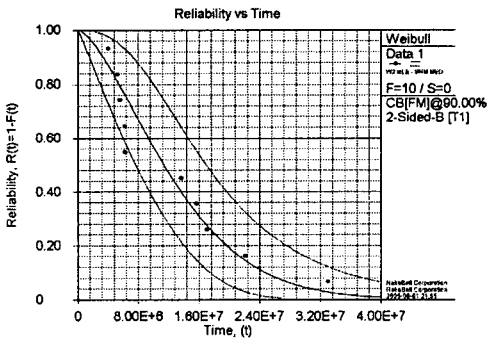
$$F_y(N) = (M_y \times 1000) / (L_y + (A + Stroke))$$

$$F_z(N) = (M_r \times 1000) / (L_x + B)$$

여기서, L은 작용력에서 슬라이드 끝단까지의 거리를, A+Stroke와 B는 모멘트 중심에서 슬라이드 끝단까지의 거리를 의미하며 단위는 밀리미터(mm)이다. 위 식으로부터 행정거리가 50mm이며 최대 허용 적재하중이 2.4kgf인 PST12NS의 경우 3축 방향으로 각각 모멘트 중심거리 보정치를 적용하면  $M_p$ 는 16.3kgf.cm,  $M_y$ 는 16.3kgf.cm, 그리고  $M_r$ 는 37.6kgf.cm인 최대 허용모멘트를 산출할 수 있다. 산출된 값들은 Fig.4에 나타낸 바와 같이 각각의 모델에 적용함으로써 응력과 예측되는 최대 변위를 확인할 수 있다.

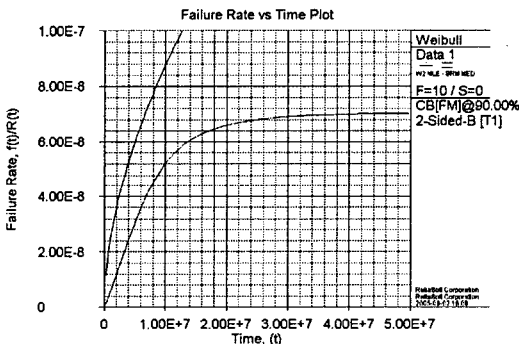
#### 3.2 해석결과

Fig. 5는 각 축 방향으로 최대 허용모멘트를 적용한 결과 나타난 변형거동과 Von-Mises 응력분포 결과이다. 결과에서 각 모멘트에 대한 응력분포는 허용응력의 범위 내에 있음을 알 수 있으며 최대변위의 경우는 0.017~0.080mm 사이의 값을 나타내지만 플레이트 끝단에서의 변위만을 고려할 경우 0.007~0.027mm를 나타내었다. 이는 PST12NS가 보



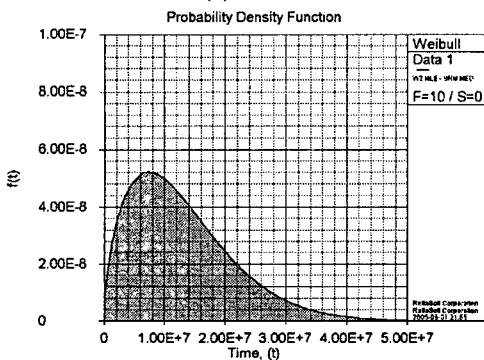
$\beta=1.5502, \eta=1.4451E+7$

(a) Reliability



$\beta=1.5502, \eta=1.4451E+7$

(b) Failure rate



$\beta=1.5502, \eta=1.4451E+7$

(c) Probability density function

Fig. 4 Weibull probability plot

장하는 위치 정밀도  $\pm 0.03\text{mm}$  내의 값이다. 전체적으로  $M_y$ 에 의한 결과 값이  $M_p$ ,  $M_r$ 에 비하여 크게 나타났는데 이는 액추에이터의 구조상 측면하중에 대한 비틀림에 취약함을 잘 나타내고 있다.

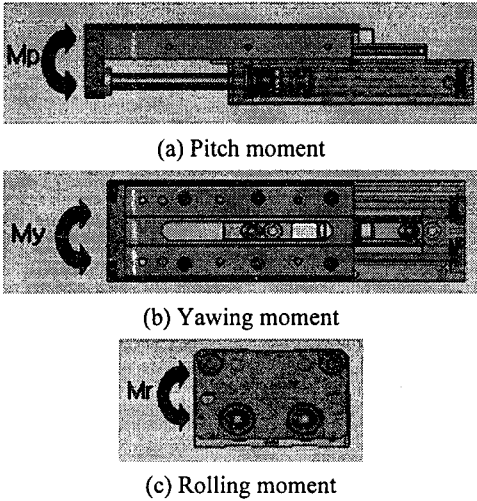


Fig. 5 Maximum effective moments

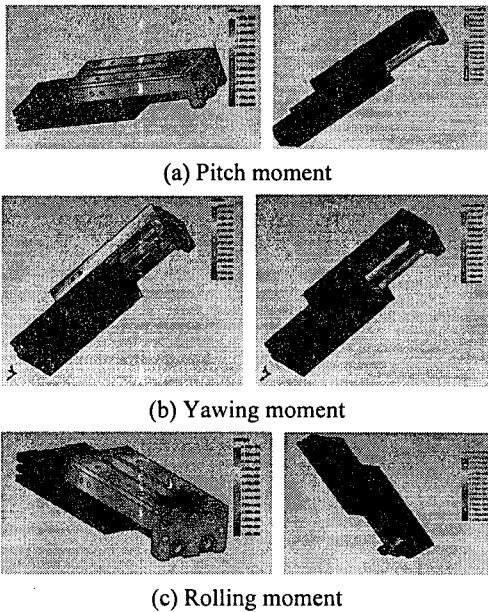


Fig. 6 Deformation and Von-mises stress

#### 4. 결론

본 연구에서는 정밀이송을 목적으로 하는 리니어 타입 크로스 롤러 가이드 공압 액추에이터에 대한 고장이력 데이터 또는 신뢰성 시험 데이터를 이용하여 고장형태를 분석하고 고장률,  $B_{10}$  수명 등의 신뢰성 지표들을 예측함으로써 제품에 대한 신뢰성을 확보하였다. 또한, 유한요소법을 이용하여 제품 성능표현의 하나인 정적허용모멘트에 대한 최대변위를 산출함으로써 제품의 적정성을 판단하였다.

실험과 외삽 데이터에 의한 평가결과를 요약하면 공압 액추에이터의 패키징 셸, 롤러 가이드, 롤러 등이 고장확률이 높은 것으로 나타났으며 이러한 부품들에 대한 신뢰도를 향상을 위해서는 적합한 재료의 선정과 적절한 가공기술의 조합이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 열화데이터로부터 추정된 고장 데이터로 와이בל 고장분포를 이용하여 수명데이터를 해석하였다. 본 연구결과는 향후 기타 유사한 기계 부품류에 대한 데이터 확보를 통해 신뢰성 있는 제품의 설계 및 제조에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. Lee, S. H., Kim, J. S., Song, J. Y., Lee, S. W. and Park, H. Y., "A Study on Reliability Data Analysis for Components of Machining Center," KSPE spring conference, pp. 88-91, 2001.
2. Lee, S. W., Song, J. Y., Hwang, J. H., Lee, H. Y. and Park, H. Y., "Method and Application of Reliability Evaluation for Core Unites of Machine Tools," KSPE spring conference, pp. 43-46, 2001.
3. Lee, H. Y., Park, J. K. and Song, J. Y., "A Case Study on Reliability Analysis of Machining Center," KSMTE conference, Vol. 1, No. 1, pp. 418-421, 2001.
4. Kim, B. S., Kim, J. S., Lee, S. H., Song, J. Y. and Park, H. Y., "A Study on Failure Mode Analysis of Machining Center," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 6, 2001.