

연속주조기 Mold Oscillation 진단시스템 개발

Development of Diagnostic System for Mold Oscillation in a Continuous Slab Casting Machine

○이성진* · 전형일** · 이경순***

Sung-Jin Lee, Hyeong-Il Jun and Kyung-Soon Lee

Key Words : Mold Oscillation(주형진동), Diagnostic System(진단시스템), Continuous Casting Machine(연속주조기), Spectral Analysis(스펙트럼 분석)

ABSTRACT

A portable mould oscillation analyzer with an integrated computer, developed by POSCO, records the movement of the mould in every spatial direction. The system uses the gap sensors to measure the mould movement (displacement) in two horizontal directions according to the mould narrow and broad faces and the vertical strokes in the four corners of mould. The gap sensor is a non-contacting minute displacement-measuring device using the principle of high frequency eddy current loss. The mould oscillation diagnostic system integrates the gap sensors, their converters and the industrial portable computer with plug-in data acquisition boards. In an own expert module, which is included in the diagnosis program, one can obtain much information about the mould oscillation equipment.

1. 서 론

연속 주조 슬래브의 표면은 스트랜드(strand)와 몰드 간에 충분한 윤활을 해줌으로써 응고 쉘의 고착(sticking)을 방지할 목적으로 도입된 몰드 진동에 의해 주기적으로 진동 마크(oscillation mark)가 형성된다. 또한 진동 곡선의 형태는 연주 슬래브의 표면 품질에 큰 영향을 미치고 있다. 따라서 진동에 관련된 파라미터, 예를 들면 진폭, 주파수 등은 몰드 진동의 매우 중요한 인자로서 진동상태가 불안정하게 되면 응고 표면이 찢어지거나 파괴되어 브레이크 아웃(breakout)을 유발시키게 된다. 따라서 몰드 진동 장치(mold oscillation device)의 필수 조건은 모든 속도 구간에 걸쳐서 충격이나 흔들림 없이 안정된 정현파(sinusoidal wave)의 진동 운동을 해야 한다.

* 포스코 기술연구소
E-mail : sj1008@dreamx.net
Tel : (061) 790-8724, Fax : (061) 790-9287

** 포스코 기계설비부

*** (주)파워콤

현재까지는 양호한 슬래브 표면 상태를 얻기 위해서 주조 몰드 파우더(powder)의 개선, 진동수의 증가 등의 조치가 취해지고 있다. 하지만 몰드 운동 상태를 정확하게 측정 분석할 수 있는 측정 장치가 없는 관계로 진동 이상 발생으로 주조 작업의 중단, 슬래브의 코너 크랙(corner crack)발생에 직접 영향을 미치는 몰드의 진동 상태에 대한 정확한 검사가 곤란하여 구속성 브레이크 아웃이 발생하기도 한다. 또한 만곡형 연주기의 중탄강 고속 주조화 기술을 위한 데이터 부재 및 몰드 진동 조건의 최적 패턴 수립 곤란 등의 많은 문제점이 있어왔다. 정비 측면으로는 몰드 진동 장치의 몰드 테이블의 4개 확장대(extender)에 고무 재질의 패킹이 사용되어져 주조 중에 용강이 몰드 밖으로 흘러 넘치는 경우 열화되거나 장시간 사용으로 인한 모모 및 재질상의 탄력성 상실로 각 확장대에 연결된 몰드 테이블 상하간, 좌우간에 불균형이 발생되나 운전자 및 현장 점검원에 의한 오감 점검에 의존하므로 부품 마모 등 이상 상태의 조기 포착이 곤란하다. 이에 따라 경향 관리 및 상태의 정밀 점검의 불가로 몰드 진동 장치의 최적 교환시기 설정이 곤란하였다.

본 논문에서는 연속 주조기의 몰드 진동 장치의 움직임을 비접촉식 변위 센서를 이용하여 측정하고 이를 아날로그-디지털 변환기를 내장한 컴퓨터에서 실시간으로 주파수 분석, 위상차 계산 등의 각종 신호 처리할 수 있는 소프트웨어를 포함한 연속주조기용 몰드 진동 진단 시스템을 개발하고 온라인에서 몰드 진동 장치가 최적 상태로 유지되도록 주요 품질 및 설비에 관련된 상관 인자를 도출하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 몰드 진동 특성

몰드 진동 장치는 텀디쉬(tundish)에 담겨져 몰드에 주입되는 용강을 몰드 내 탕면을 일정하게 유지하도록 레벨 제어를 한다. 몰드의 사면은 수냉 장치가 부착된 동판으로 구성되어 용강이 동판 벽에 붙지 않고 응고 쉘이 형성된다.

Table 1은 몰드 진동 장치의 개략적인 사양으로써 몰드의 형식은 만곡형(curved type)이며 몰드의 진동은 직류 모터에 의해 구동된다.

Table 1 Specification of casting mold in Kwangyang's No.2 casting machine

Slab size	230 t * 820 ~ 1600 w(mm)
Casting speed	max. 2.2m/min
Type	Curved mold
Mold oscillation stroke length	±3.5mm
MO Frequency	Max. 235cpm
MO Pattern	Sinusoidal wave
Oscillation generation	Eccentric cam (4SET)

Fig. 1은 몰드 진동 장치의 외관을 나타낸 그림이다. 몰드 진동 장치는 모터에 의한 구동력이 유니버살 축에 의하여 중심 분배 기어로 전달되며 양쪽 단부 기어 박스(corner gear box)와 연결된 축에 의해서 편심 축(cam shaft)를 구동시킨다. 이 편심 축에 의해 4개의 연결 로드(rod)에 의해 몰드 테이블을 상하로 진동하게 되며 몰드 측면에 붙어 있는 판 스프링에 의해 연주기 곡률에 따라 호선 운동을 하게 된다.

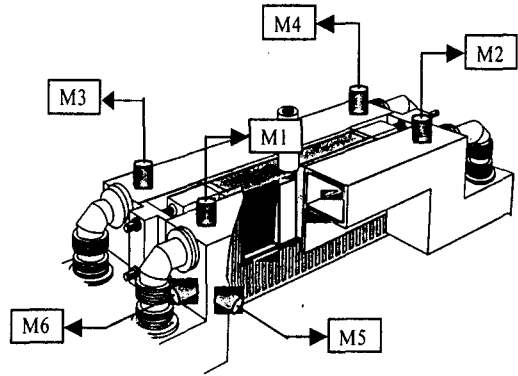


Fig. 1 Mold oscillation device (M1~M6: Sensing points)

몰드 진동으로 정현파를 채용한 경우 몰드 속도 (V_m)에 대한 주조 속도(V_c)의 관계는 Fig. 2에서 알 수 있다. 그림에서는 몰드의 하강 속도가 주조 속도를 상회하는 구간의 시간을 negative strip 시간(T_n) 혹은 heal time (θ_h) 이라하고 이를 반 주기시간에 대한 negative strip 시간의 비율을 negative strip 율(N_n) 이라 정의한다.

$$V_m = D \sin(2\pi ft)$$

$$N_n = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\frac{V_c}{\pi f S} \right] * 100 (\%)$$

$$\theta_h = \frac{60}{\pi f} \cos^{-1} \left[\frac{V_c}{\pi f S} \right]$$

단 f: 주파수 (cpm)

S: 스트로크 (mm)

t: 시간 (min)

D: 몰드 속도 파형의 진폭 ($=\pi f S$)

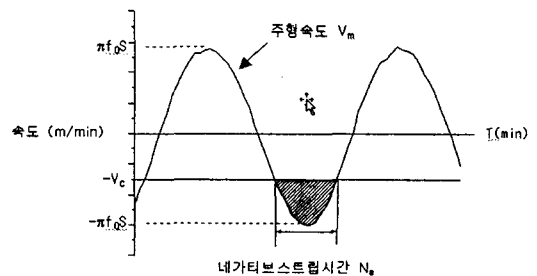


Fig. 2 Relation between mold velocity and casting speed

연주 슬래브의 진동 마크는 negative strip 시간에 초기 응고 셸이 몰드보다 압축을 받아 용강 측으로 굴절되고 positive strip 시간에 응고셸 선단에서 부풀어 올라 생성되며 몰드 진동 마크의 깊이는 negative strip 시간 즉 heal time 이 증가하면 몰드 진동 마크(oscillation mark)의 깊이가 깊어져 면가로 크랙 발생이 증가하고 $\theta_h = 0$ 에서 진동 마크가 소멸된다는 보고가 있으나 Takeuchi 등에 의하면 $N_n < 0$ 즉 $\theta_h = 0$ 의 경우에도 진동마크는 소멸되지 않고 생성된다는 실험 결과도 있다. 실제 조업 시에는 진동 마크를 줄이기 위해서 negative strip 시간을 짧게 하여야 하며 이를 위해서는 몰드 진폭을 작게 하거나 진동수를 크게 하는 방법을 사용한다.

Table 2는 연속주조기의 몰드 장치에 대한 진동 특성을 나타내는 항목을 정리한 것으로 주형의 수직 방향의 스트로크가 큰 경우 몰드 탕면 변동을 유발하며 또한 스트로크 길이 및 주파수는 진동 마크의 깊이와 전후 흔들림, 좌우 흔들림의 크기는 슬래브의 장 단변부의 진동 마크의 깊이와 관련이 있다.

Table 2 The effects of mold oscillation in slab quality

Items	Its effects
Vertical stroke length (M1, M2, M3, M4)	Meniscus fluctuation
Back-front movement (M5)	Depth of oscillation mark on the broad faces of slab
Lateral movement (M6)	Depth of oscillation mark on the narrow faces of slab
Phase differences among vertical strokes	Sticker-type breakout initiation
Distortion of oscillation wave	Cracks in slab corners

몰드 내에서 응고 셸의 파단이 되는 구속성 브레이크 아웃의 발생 원인으로는 positive strip 시간에 있어서 몰드내의 응고 셸에 걸리는 인장 응력에 의해 발생된 미세 결함이 negative strip 시간에 확대되어 발생하는 경우가 대부분이다. 특히 몰드 파우더 중에 탄소가 응고 셸 선단부에 찍힘(pickup)되어 응고 셸의 고온 강도가 저하되어 몰드와 스트랜드 간의 마찰력을 이기지 못하는 현상이 국부적으로 발생되기 때문에 몰드 파우더의 특성 및 몰드 진동 조건의 영향이 매우 크다. 특히 몰드 코너부의 수직 방향 스트로크 파형의 위상차가 발생하면 응고 셸에 전단력이 발생하여 슬래브의 코너부에 구속성 브레이크 아웃이 일어난다.

3. 주형 진동 진단시스템 개발

3.1 시스템의 구성

몰드 진동 진단시스템은 고주파의 와전류 손실 원리를 이용한 비접촉식 변위센서를 사용한다. 진단 시의 측정 포인터는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 몰드의 네모서리에서의 수직 스트로크 4개(M1~M4)와 몰드의 전후 흔들림 1개(M5), 좌우 흔들림 1개(M6) 등으로 전체가 6개이다. 또한 실제 주조 중의 몰드 속도와 주조 속도와의 관계에서 진동 마크가 발생하는 조업 조건에 관련된 인자인 네가티브 스트립율을 계산하기 위하여 온라인 상에 조업 중에 변하는 주조 속도 신호를 주형 진동과 동시점으로 받아들인다. 상기 몰드의 진동 신호와 주조 속도 신호를 컴퓨터에서 수집 저장한 후, 이를 몰드 진동 특성 진단에 필요한 각종 파라미터를 계산하고 이미 설정된 기준값과 비교하여 몰드의 진동 특성을 진단하는 마이크로프로세서가 내장된 휴대용 진단장치와 진단 결과를 디스플레이하는 액정모니터와, 진단 결과를 작업자가 현장에 보관할 수 있도록 출력가능한 프린터가 내장되어 있으며 컴퓨터의 기동과 신호처리에 필요한 전원이 자체 공급되는 내장형 배터리로 구성되어 장소간의 이동이 용이하도록 일체형으로 구성되어 있다.

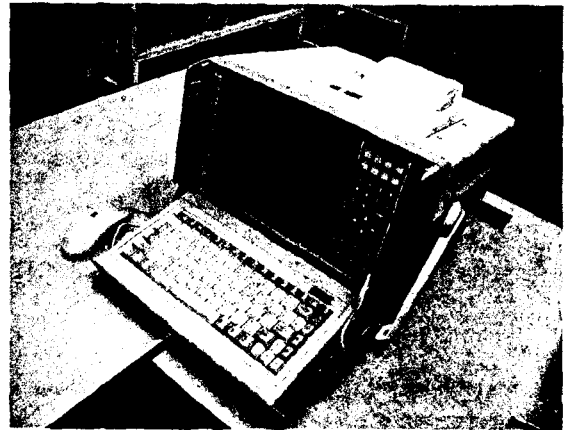


Fig. 3 Mold oscillation diagnostic system

3.2 진단 알고리즘

3.2.1 진동 데이터 수집 및 전처리

물드의 변위 신호를 변환기를 통하여 거리 변화에 비례하는 전압 변화로 출력되며 이를 플러그 인 보드 형식의 아날로그-디지털 변환기를 통하여 컴퓨터에 입력한다.

FFT 알고리즘은 DFT가 취득한 시간파형이 모든 기간을 통해 주기적으로 정확히 일치한다는 가정에 의한 것으로 파형의 시점과 종점이 다른 경우 스펙트럼 누설(spectral leakage)가 발생한다. 이 파형을 취득하는 방법에 의한 스펙트럼의 차이를 될 수 있는한 줄일 목적으로 취득된 파형을 시작점과 끝점을 서서히 작게 만들어 다음 주기로 이동할 때는 "0"이 되도록 1주기에 걸쳐 윈도우(window)라는 가중 함수(weighting function)을 취한다. 윈도우에는 고조파의 분리가 양호한 hanning 등 여러 가지의 윈도우함수를 사용하였다. 또한 진동 신호에 대한 필터링을 위해 임펄스 응답(impulse response)이 유연한 디지털 필터 방식의 유한 임펄스 응답 필터(finite impulse response filter)를 사용하였다.

3.2.2 스펙트럼 분석

컴퓨터에 입력된 수직 스트로크와 전후, 좌우 흔들림 파형에서 진동의 진폭(peak to peak)과 수직 스트로크 정현파 파형의 상대위상 차이를 계산하기 위해서 먼저 각각의 수직 스트로크 파형을 위상 스펙트럼(phase spectrum) 변환하고, 앞에서 구한 기본 주파수에 대해 각각의 수직 스트로크 위상을 구한다. 한 개의 수직 스트로크 신호를 자동 파워 스펙트럼(Auto Power Spectrum)과 위상 스펙트럼 분석한 결과를 나타낸 그림으로써 수직 스트로크 파형을 자동 파워 스펙트럼 변환을 통해 진폭이 가장 큰 위치의 주파수 크기를 기본 주파수(f0)로 설정한다.

이 때 기본 주파수는 주형의 진동(oscillation) 주파수로서 모터의 속도제어에 의해 설정되어 진다. 주형의 네 꼭지점의 수직스트로크의 위상을 계산하는 방법으로는 네 지점의 수직 스트로크 신호를 동시에 위상 스펙트럼(x축은 주파수, y축은 위상) 처리하고 그림과 같이 동일한 기본 주파수에 해당하는 수직 스트로크의 위상을 얻고 이들 위상간의 차이를 계산하게 된다.

수직 스트로크간의 위상차는 다음의 요소와 관련된다.

M1-M3, M4-M2 : 캠 샤프트

M1-M2, M4-M3 : 커플링

M1-M4, M2-M3 : 대각선 방향

앞에서 설명한 방법으로 계산된 주형 진동 특성값과

Table 3에 나타난 기준치를 비교하여 다음과 같이 주형 진동을 평가한다.

수직 스트로크 진폭 < 기준진폭 ±1mm

전후, 좌우 흔들림량 < 0.3mm

수직 스트로크의 위상차 < 2.0°

Table 3 The diagnosis criterion for good mold oscillation

Items		Marks	Criterion
Vertical stroke (mm)		M1	Reference stroke ±1.0mm
		M2	
		M3	
		M4	
Back-front movement (mm)		M5	±0.3mm
Lateral movement (mm)		M6	±0.3mm
Phase difference (deg)	Cam shaft	M1 - M3	2.0°
		M4 - M2	
	Coupling	M1 - M2	2.0°
		M4 - M3	
Diagonal corners	M1 - M4	2.0°	
	M2 - M3		

3.2.3 고조파 왜곡율 계산

보통 기계 진동계에서 관찰되는 진동파형은 기본파 성분 이외에 다른 고조파 성분이 포함되어 있다. 또한 전송계에 정현파를 가하면 전송계의 비선형 특성 등이 원인이 되어 출력 신호에 왜곡 성분이라 부르는 가해진 정현파의 고조파 성분이 나타난다. 이 왜곡에 착안하여 진동파형과 출력 신호의 고조파 성분을 분석하여 진동의 특성과 전송계의 충실도 등을 검토할 수 있다. 일반적으로는 기본주파수 f₁ 및 제 2고조파 f₂, 제 3고조파 f₃ 등의 고조파 성분으로 형성되어 있을 때 각각의 실효치를 A(f₁), A(f₂), A(f₃) 으로 두면 고조파 왜곡율(the percent total harmonic distortion) (%THD)는 다음과 같이 표현된다.

$$\%THD_l = \frac{\sqrt{A(f_2)^2 + A(f_3)^2 \dots + A(f_5)^2}}{A(f_1)} * 100$$

$$\%THD_m = \frac{\sqrt{A(f_6)^2 + A(f_7)^2 \dots + A(f_{15})^2}}{A(f_1)} * 100$$

$$\%THD_h = \frac{\sqrt{A(f_{16})^2 + \dots}}{A(f_1)} * 100$$

여기서 %THD_l은 제 2고조파에서 제 5고조파 성분의 저주파수 고조파왜곡율을 의미하며 %THD_m은 제 6고조파에서 제 15고조파 성분의 중주파수 고조파왜곡율, %THD_h은 제 16고조파 이상 성분의 고주파수 고조파왜곡율을 의미한다.

위의 식에서 고조파왜곡율은 "0"이 도달되어야 하는 목표이지만 실제 주형을 계속적으로 사용하는 경우 장치 구성부재의 손상이나 느슨함으로 왜곡 성분이 나타나게 된다.

각 고조파왜곡율은 다음의 요소와 관련된다.

- 저주파수 고조파왜곡율 : drive shaft 커플링 느슨발생
drive motor 혹은 shaft 정렬불량
- 중주파수 고조파왜곡율 : 베어링 손상 및 파손
- 고주파수 고조파왜곡율 : 부적절한 윤활

상기와 같이 계산된 고조파왜곡율은 다음의 조건에 따라 주형 진동장치의 이상유무를 판단한다.

$$\text{고조파왜곡율} (\%THD_l, \%THD_m, \%THD_h) < \text{기준값}$$

3.3 진단 프로그램

Mold Oscillation 장치에 대한 진단 순서는 Fig. 4에 나타낸 것과 같다. 먼저 A/D 변환기를 통해 입력된 변위신호를 주파수 및 위상 분석을 하여 각 신호 파형의 스트로크 길이, 특성 주파수, 위상차 및 위상 순서 등의 계산 결과로 일차 진단을 행한다. 진단 방식은 각 항목별로 정해진 기준값과의 비교를 통해 이루어지며 일차 진단 시에는 각 항목별로 모두 기준 범위에 들면 양호 판정을 하며 이상 시는 항목별로 미리 정해진 주형 장치 부위를 점검하고 정비한다. 일차 진단이외에 조업 시 주형 진동 장치에 의한 주조 품질의 상관성을 조사하기 위해 하모닉 분석, 정밀 파형 분석, negative strip 율 및 주형 속도, 가속도 등에 대한 정밀 진단을 행한다.

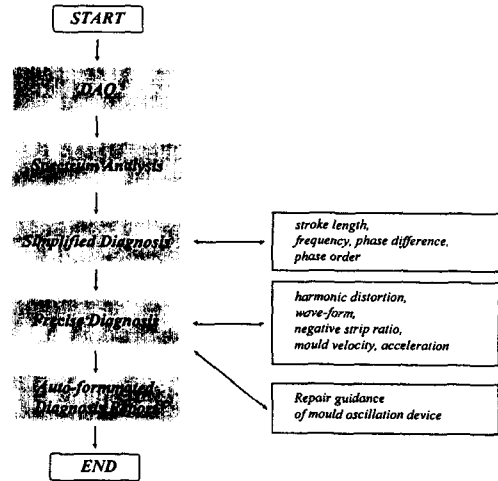


Fig. 4 Procedure of mold oscillation diagnosis

Fig. 5는 몰드의 코너부의 수직 스트로크 파형을 나타낸 것이다. 그림에서 스트로크 램은 파형의 진폭으로서 최대값과 최소값의 차이를 의미한다.

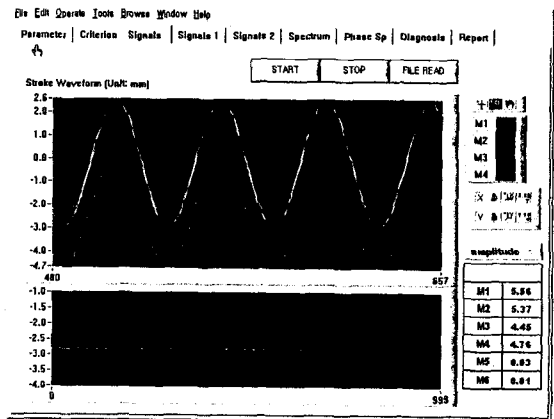


Fig. 5 Time-based graph window of vertical strokes

Fig. 6은 주형 진단 결과를 나타낸 것으로 본 시스템에 의하여 다채널의 주파수 및 위상 스펙트럼 분석이 가능함을 알 수 있다.

		Data	Result	Criterion	
VERTICAL STROKE (MM)	M1	5.56	GOOD	4.88	6.88
	M2	5.27	GOOD	4.88	6.88
	M3	4.45	GOOD	3.58	5.88
	M4	4.76	GOOD	3.58	5.88
BACK-FRONT MOV (MM)		M5	8.82	GOOD	6.88
LATERAL MOV (MM)		M6	8.81	GOOD	6.88
PHASE DIFF (DEGREE)	CAM SHAFT	M1-M3	-1.48	GOOD	-2.88
		M4-M2	1.97	GOOD	-2.88
	COUPLING	M1-M2	1.79	GOOD	-2.88
		M4-M3	-1.28	GOOD	-2.88
	DIAGONAL CORNERS	M1-M4	-8.18	GOOD	-2.88
		M2-M3	-2.26	OVER	-2.88

Fig. 6 Diagnosis result of mold oscillation by software procedure

몰드의 진동 신호는 데이터베이스화되어 디스크에 저장된다. 몰드 진동 신호를 데이터베이스화 하므로서 기존의 일반계측기에서는 제공할 수 없는 진단 실적 관리를 할 수 있다. 데이터베이스를 사용하여 날짜별로 진단 결과나 진동 신호를 검색할 수 있으며 진단 보고서 작성을 용이하게 하고 임의의 날짜의 진동 신호 그래프를 인쇄할 수 있다.

몰드 진동 신호 데이터는 몰드 진동 진단시스템에 의해서 취득된 진동 신호를 날짜별, 측정 횟수별, 센서의 위치별로 구분되어 저장된다. 몰드 진단 결과 데이터는 몰드 진동 진단시스템에 의하여 계산된 진단 결과를 저장하며 진단 보고서를 인쇄하거나 검색할 때 사용된다.

4. 결론

연속 주조 공정에서 주조 품질을 개선하기 위해서는 주형 진동의 특성, 특히 정현파 진동을 부가했을 때 나타나는 주형 진동의 충실도가 매우 중요하다.

주형 진동 장치를 평가하기 위해 비접촉식 센서를 이용하여 진동 변위를 측정하고 이를 아날로그-디지틀 변환기를 내장한 컴퓨터에서 실시간으로 주파수 분석, 위상차 계산 등의 신호처리와 이를 토대로 주형 진동을 진단할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다. 각종 설비의 진단 시에는 다양한 기능을 가진 데이터 수집장치와 분석기 등이 필요한 것을 고려해 볼 때 본 논문에서 사용한 방법과 같이 기존의 하드웨어적인 분석기를 대체할

수 있는 소프트웨어적인 분석 도구(Virtual Instrument)가 편리하며 이러한 방법에 의해 충분한 연산 속도와 고속의 샘플링 데이터를 처리할 수 있다.

참고 문헌

- (1) Morwald, K., Voest-Alpine Industrieanlagenbau (VAI), Linz, Internal Report, Nr.90, pp.15, 1990.
- (2) Jae-Chan Choi, Sung-Jin Lee, Kang-Hyeong Cho and Hyeong-Il Jun, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.13, No.5, pp.84-94, 1996.