

## 연속 주조기의 주형 진동 진단 시스템의 개발

최재찬\*, 이성진\*\*, 조강형\*\*\*, 전형일\*\*\*\*

### Development of Diagnosis System of Mold Oscillation in a Continuous Slab Casting Machine

Jae-Chan Choi\*, Sung-Jin Lee\*\*, Kang-Hyeong Cho\*\*\* and Hyeong-Il Jun\*\*\*\*

#### ABSTRACT

In order to prevent shell sticking by providing sufficient lubrication between the strand and the mold, the mold oscillation has been used. Now it is well known that the shape of the oscillation curve has a decisive effect on the surface quality of the cast product. Besides, oscillation parameters such as stroke and frequency are also very important. In order to guarantee that parameters which have been found to be optimal for a certain grade of steel do not change with time, periodical checks of the physical condition of the whole equipment are necessary.

The portable mold oscillation analyzer with integrated computer, developed by POSCO, records the movement of the mold in every spatial direction. The system uses the gap sensors to measure the mold movement (displacement) in the two horizontal directions according to the mold narrow and broad faces and the vertical strokes in the four corners of mold. The gap sensor is a non-contacting minute displacement measuring device using the principle of high frequency eddy current loss. The mold oscillation diagnosis system integrates the gap sensors, their converters and the industrial portable computer with plug-in data acquisition boards. The all programs, such as the fast Fourier transformation module (amplitude and phase spectrums) and harmonic analysis module, was coded by LabVIEW™ software as the graphical language. In an own 'expert module' which is included in the diagnosis program, one can obtain much information about the mold oscillation equipment.

**Key Words :** Mold Oscillation (주형 진동), Diagnosis System(진단 시스템), Continuous Casting Machine(연속 주조기), Spectral Analysis (스펙트럼 분석)

\* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터  
 \*\* 부산대학교 대학원, 포항제철 기술연구소  
 \*\*\* 포항제철 기술연구소  
 \*\*\*\* 포항제철 광양설비기술부

## 1. 서 론

연속 주조 슬래브의 표면은 스트랜드(strand)와 주형 간에 충분한 윤활을 해줌으로써 응고 셸의 고착(sticking)을 방지할 목적으로 도입된 주형의 진동에 의해 주기적으로 진동 마크(oscillation mark)가 형성된다.<sup>(1,2)</sup> 또한 진동 곡선의 형태는 연주 주편의 표면 품질에 큰 영향을 미치고 있다.<sup>(3,4,5)</sup> 따라서 진동에 관련된 파라미터, 예를 들면 진폭, 주파수 등은 주형 진동의 매우 중요한 인자로서 진동 상태가 불안정하게 되면 응고 표면이 찢어지거나 파괴되어 브레이크 아웃(breakout)을 유발시키게 된다.<sup>(6,6,7,8)</sup> 따라서 주형 진동 장치의 필수 조건은 모든 속도 구간에 걸쳐서 충격이나 흔들림 없이 안정된 정현파(sinusoidal wave)의 진동 운동을 해야 한다.

현재까지는 양호한 주편 표면 상태를 얻기 위해서 주로 주형 파우더(powder)의 개선, 진동수의 증가 등의 조치가 취해지고 있다. 하지만 주형 운동 상태를 정확하게 측정 분석할 수 있는 측정장치의 미개발로 인해 진동 이상 발생으로 주조 작업의 중단, 슬래브의 코너 크랙(corner crack)발생에 직접 영향을 미치는 주형 진동 상태에 대한 정확한 검사가 곤란하여 구속성 브레이크 아웃이 발생하기도 한다. 또한 만곡성 연주기의 중탄강 고속 주조화 기술을 위한 데이터 부재 및 주형 진동 조건의 최적화 패턴의 수립 곤란 등의 많은 문제점이 있다.

정비 측면으로는 주형 진동 장치의 주형 테이블의 4개 확장대(externder)에 고무 재질의 패킹(packng)이 사용되어져 주조중에 용강이 주형 밖으로 흘러 넘치는 경우 열화되거나 장시간 사용으로 인한 마모 및 재질상의 탄력성 상실로 각 확장대에 연결된 주형 테이블 상하간, 좌우간에 불균형이 발생되어 운전원 및 현장 점검원에 의한 오감 점검에 의존하므로 부품 마모 등 이상 상태의 조기 포착이 곤란하다. 이에 따라 경향 관리 및 상태의 정밀 점검의 불가로 주형 진동 장치의 최적 교환 시기의 설정이 곤란하였다.

본 논문에서는 연속 주조기의 주형 장치의 진동을 비접촉식 변위 센서를 이용하여 측정하고 이를 고속 애널로그-디지털 변환기를 내장한 컴퓨터에서 실시간으로 주파수 분석, 위상차 계산 등의 각종 신호 처리할 수 있는 소프트웨어를 포함한 연속 주조용 주형 진동 진단 시스템을 개발하고 이를 온라인에서 주형 장치의 최적 상태를 유지할 수 있도록 주조 품질 및 설비에 관련된 상관 인자를 도출하였다.

## 2 이론적 고찰

### 2.1 주형 진동 장치

주형 진동 장치(mold oscillation device)는 턴디쉬(tundish)에 담겨져 주형에 주입되는 용강을 주형내 당면을 일정하게 유지하도록 레벨 제어(level control)를 한다. 주형의 사면은 수냉장치가 부착된 동판으로 구성되어 용강이 동판 벽에 붙지 않고 응고 셸이 형성된다. Table 1은 주형 진동 장치의 특성을 나타낸 것으로 주형의 형식은 만곡형(curved type)이며 주형의 진동은 직류 모터에 의해 구동된다.

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

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

Fig. 1은 주형 진동 장치를 포함하여 온라인에서 신속하게 교환이 가능하도록 구성된 quick change unit 를 나타낸 그림이다.

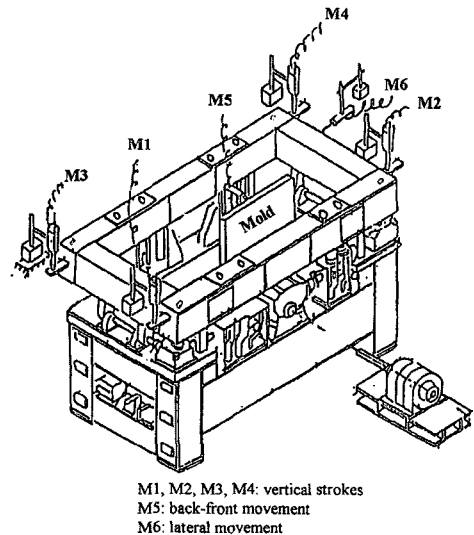


Fig. 1 Quick change unit with mold oscillation device

주형 진동 장치는 Fig. 2와 같이 모터에 의한 구동력이 유니버설 축에 의하여 중심 분배 기어로 전달되며 양쪽 단부 기어 박스(corner gear box)와 연결된 축에 의해서 편심 축(cam shaft)을 구동시킨다.

이 편심 축은 4개의 연결 로드(rod)에 의해 주형 테이블을 상하 진동하게 되며 주형 측면에 붙어 있는 판 스프링에 의해 연주기 곡률을 따라 호선 운동을 하게 된다.

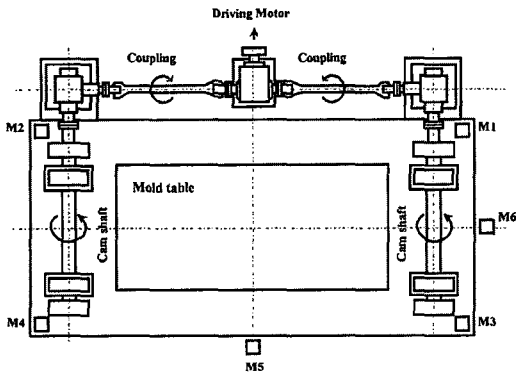


Fig. 2 Schematic of mold oscillation device and location of non-contacting displacement measuring sensors

### 2.2 주형 진동 특성

주형 진동으로 정현파를 채용한 경우 주형 속도( $V_m$ )에 대한 주조 속도( $V_c$ )의 관계는 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 그림에서는 주형의 하강 속도가 주조 속도를 상회하는 구간의 시간을 negative strip 시간( $T_n$ ) 혹은 heal time ( $\theta_h$ )이라 하고 이를 반 주기시간에 대한 negative strip 시간의 비율을 negative strip 율 ( $N_e$ )이라 정의하였다<sup>(9,10)</sup>

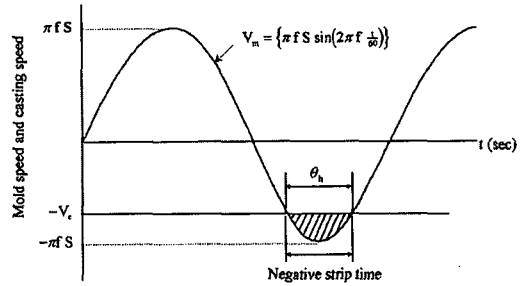
$$V_m = D \sin(2\pi f t) \quad (1)$$

$$N_e = \frac{2}{\pi} \cdot \cos^{-1} \left[ \frac{V_c}{\pi \cdot f \cdot S} \right] \times 100(\%) \quad (2)$$

$$\theta_h = \frac{60}{\pi \cdot f} \cdot \cos^{-1} \left( \frac{V_c}{\pi \cdot f \cdot S} \right) \quad (3)$$

단  $N_e$ : negative strip 율 (%)  
 $\theta_h$ : heal time (sec)  
 $f$ : 주파수 (cpm)

$S$ : 스트로크 (mm)  
 $V_c$ : 주조 속도 (mm/min)  
 $t$ : 시간 (min)  
 $D$ : 주형 속도 파형의 진폭 ( $=\pi f S$ )



$V_m$ : Mold speed (mm/min)  
 $V_c$ : Casting speed (mm/min)  
 $\theta_h$ : Heal time (sec),  $S$ : Stroke length (mm)  
 $f$ : Frequency (cpm)

Fig. 3 Relation between mold speed and casting speed

연주 주변의 진동 마크는 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 negative strip 시간에 초기 응고 셸이 주형보다 압축을 받아 용강측으로 굴절되고 positive strip 시간에 응고 셸 선단에서 부풀어 올라 생성되며 주형 진동 마크의 깊이는 negative strip 시간 즉 heal time ( $\theta_h$ )이 증가하면 주형 진동 마크(oscillation mark)의 깊이가 길어져 먼가로 크랙 발생이 증가하고  $\theta_h=0$ 에서 진동 마크가 소멸된다는 보고<sup>(11,12,13)</sup>가 있으나 Takeuchi 등에 의하면  $N_e < 0$  즉  $\theta_h=0$ 의 경우에도 진동 마크는 소멸되지 않고 생성된다는 실험 결과도 있다.<sup>(10)</sup> 실제 조업 시에는 진동 마크를 줄이기 위해서 negative strip 시간을 짧게 하여야 하며 이를 위해서는 주형 진폭을 작게 하거나 진동수를 크게 하는 방법을 사용한다.

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

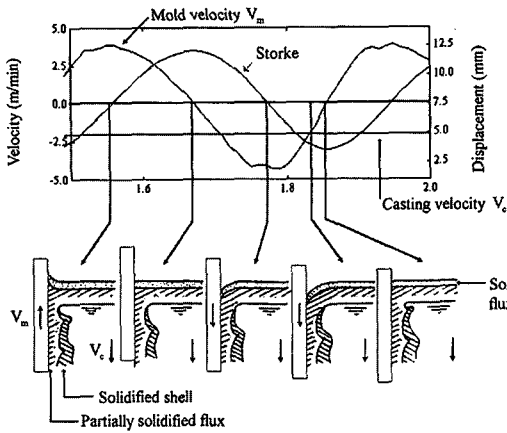


Fig. 4 Mechanism of oscillation mark initiation in a continuous casting mold

Table 2 Estimated items of mold oscillation and its effects on slab quality

Items	Effects
Increasing	→ Increasing
Vertical stroke lengths (M1, M2, M3, M4)	Meniscus fluctuation
Back-front movement (M5)	Depth of oscillation mark on the broad face of a slab
Lateral movement (M6)	Depth of oscillation mark on the narrow face of a slab
Phase differences among M1, M2, M3 and M4	Sticker-type breakout initiation
Distortion of oscillation wave-form	Cracks in slab corners

주형내에서 응고 쉘의 파단이 되는 구속성 브레이크 아웃(sticker-type breakout)의 발생 원인으로는 positive strip 기간에 있어서 주형내의 응고 쉘에 걸리는 인장 응력에 의해 발생된 미세 결함이 negative strip 기간에 확대되어 발생되는 경우가 대부분이다.

특히 주형 파우더 중에 탄소가 응고 쉘 선단부에 픽업(pickup)되어 응고 쉘의 고온 강도가 저하되어 주형과 스트랜드간의 마찰력을 이기지 못하는 현상이 국부적으로 발생되기 때문에 주형 파우더의 특성 및 주형 진동 조건의 영향이 매우 크다. 특히 주형 코너부의 수직 방향 스트로크의 파형의 위상차가 발생하면 응고 쉘에 전단력이 발생하여 스투브의 코너부에 구속성 브레이크 아웃이 일어난다.

### 3. 주형 진단 시스템

#### 3.1 시스템의 구성

주형 진동 진단 시스템은 Fig. 5와 같이 고주파수의 와전류 손실(eddy current loss) 원리를 이용한 비접촉식 변위 센서와 이를 교류 전원으로 1MHz의 발전기를 접속하여 목표물과 센서간의 거리에 따라 변하는 발전 전압을 측정하여 이를 직선화 회로를 통해 측정 거리와 전압 변화를 비례되게 하는 변환기와 이를 측정 장소간의 이동이 용이하도록 포터블 컴퓨터를 사용하여 데이터 수집은 플러그 인 보드(plugin board) 형식의 애널로그 디지털 변환기를 사용하였다.

진단용 소프트웨어로는 주형의 측정점과 센서간의 변위를 전압 신호로 수집하고 이를 윈도우(han, hamming, blackman-harris, exact blackman, blackman, flat top), 필터링(low-pass filter, high-pass filter, band-pass filter) 등의 데이터의 전처리 기능과 진동 신호의 특성 주파수, 진폭, 각 신호간의 위상차 및 하모닉 분석 등을 그래픽 기반 언어(graphical-based language)인 LabVIEW™로 코딩(coding)하였으며 이를 데이터 베이스화하고 진단 결과를 자동 형식(auto-formatted)으로 출력하는 기능은 MS ACCESS™ 패키지를 이용하여 개발하였다.

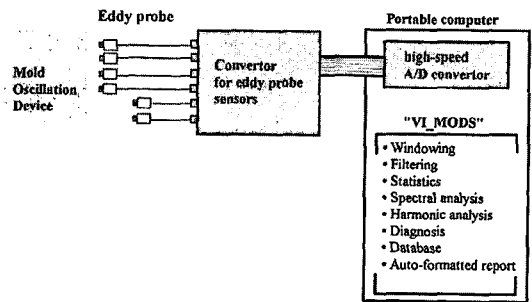


Fig. 5 Schematic diagram of mold oscillation diagnosis system

Fig. 6은 주형 진동 진단 프로그램("VI\_MODS": Virtual instrumentational Mold Oscillation Dignosis System)의 처리 순서를 나타낸 것으로 진동 신호의 데이터 취득(data acquisition), 이들 진동 데이터에 대한 스펙트럼 및 하모닉 분석(spectral and harmonic

analysis), 각종 데이터 분석에 의한 진단 모듈(Expert module), 수집 데이터와 진단 결과의 데이터 베이스 및 자동 형식 진단 보고서의 발행 등의 순서로 진행된다.

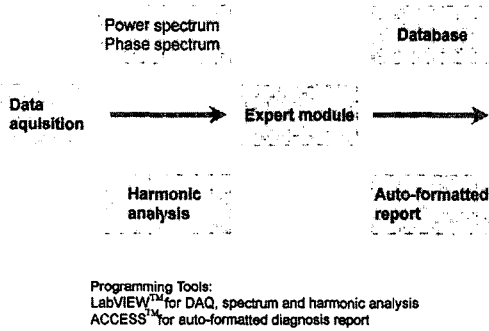


Fig. 6 Procedure of mold oscillation diagnosis program "VI\_MODS"

### 3.2 변위 측정

주형의 진동을 정확히 평가하기 위해서 Fig. 1과 Fig. 2에서 나타난 것처럼 주형의 수직 변위와 전후 흔들림과 좌우 흔들림을 동시에 측정하여야 한다. 측정 위치는 주형 진동을 정밀하게 관찰하기 위해 주형의 코너부의 수직 변위 4 개(M1, M2, M3, M4)와 전후 및 좌우 흔들림(M5, M6)을 측정하기 위해 선정했으며 분석 항목은 Table 2에 정리한 바와 같이 주편의 표면 품질에 대한 인과 관계를 고려하여 설정하였다. 또한 각 평가 항목에 대한 기준 값은 연속 주조기의 설비 형식, 조업 조건 등을 고려하여 경험적으로 정해진 것으로 공장별로 다소 차이가 있을 수 있다.

주형의 진동을 측정하는 방식으로는 가속도계를 이용하여 이를 변위 신호로 변환하는 방법<sup>(11)</sup>이 사용되고 있으나 저주파 대역에서는 가속도 신호를 2차 적분함으로써 진폭과 위상을 가진 변위 파형을 정확히 재생하기는 어렵다. 고감도의 저주파 대역의 측정이 가능한 가속도 센서를 사용하더라도 가속도 신호의 경우 주형 진동에 대해 매우 민감하기 반응하기 때문에 가속도 파형이나 이를 적분한 변위 파형에서 정확한 위상 차이를 얻기는 곤란하다.

따라서 본 연구에서는 주형 진동의 변위 신호에 대한 정확한 측정 및 분석을 위하여 비접촉식 변위 센서를 사

용하였다. Fig. 7(a)는 변위 검출의 기본적인 형식을 나타내며 Fig. 7(b)는 이의 전기적 등가 회로를 표시한 것이다. 이 센서의 측정 원리에 대해 간단히 설명하면 센서 내의 코일(coil) "L<sub>2</sub>"와 변환기 내의 용량 "C" 및 코드(cord) 부위 용량은 발전기에서 전송된 1MHz의 정현파와 공진하여 "L<sub>2</sub>"에 의하여 발전된 자력선에 의해 대상물 표면에 와전류(eddy current)를 생기게 한다.

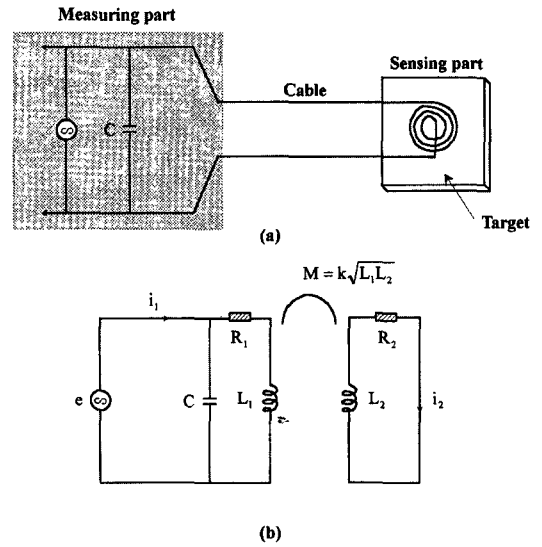


Fig. 7 Block diagram of non-contacting displacement measuring device

이 와전류의 세기는 자력선의 강도 즉 코일과 대상물의 거리에 의존하기 때문에 와전류의 강도에 의해서 코일의 인덕턴스(inductance) "L<sub>2</sub>"는 거리에 따라 비례한다. 이 변화는 1MHz에 대한 L<sub>2</sub>의 공진점을 변경하는 결과가 되어 발전 진폭의 변화로 나타난다. 이 발전 진폭의 변화를 검파하여 센서와의 대상물과의 거리를 교류 전압으로 얻어 낸다. 이 교류 전압은 변환기에서 직선화 회로(linearizer)에 의해 처리되어 필요한 측정 거리내에서 전압 변화와 거리 변화가 비례적인 관계를 얻는다.

### 3.3 진동 데이터의 수집 및 전처리

변위 신호를 변환기를 통하여 거리 변화에 비례하는 전압 변화로 출력되며 이를 플러그 인 보드 형식의 애널로그-디지털 변환기를 통하여 포트를 컴퓨터에 입력한다. 애널로그-디지털 변환기의 선택은 입력되는 신호 특성

에 따라 매우 신중하게 선택되어야 한다. 진동 센서나 음성 센서에서 나오는 신호는 교류 성분을 가지고 있기 때문에 통상적인 multiplexer 방식의 애널로그-디지털 변환기를 사용하면 샘플링 시간의 차이로 위상차가 생길 가능성이 있다. 따라서 본 시스템에서는 Table 3에 나타낸 고속 신호 취득 보드(dynamic signal acquisition board)를 사용하였다.

Table 3 Specifications of dynamic signal acquisition board

Model	AT-A2150C
Maker	National Instruments
Number of channels	4 single-ended, simultaneously sampled
Resolution	16bits 1 in 65,536
Sampling rates (kS/s)	max. 51.2
Input signal range	± 2.828V (2Vrms)
Phase linearity	± 0.5 ° DC to 20kHz
Interchannel phase	± 1.0 ° DC to 20kHz
Filter	Analog and digital antialiasing Passband ripple: ± 0.01 dB pk-pk, DC to 20kHz Stopband attenuation: 86 dB Attenuation rate: 90 dB in 1/6 octave

FFT 알고리즘은 DFT가 취득한 시간 파형이 모든 기간을 통해 주기적으로 정확히 일치한다는 가정에 의한 것으로 파형의 시점과 중점이 다른 경우 스펙트럼 누설(spectral leakage)이 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 여러가지의 윈도우 함수를 사용하였다.

또한 진동 신호에 대한 필터링을 위해 임펄스 응답(impulse response)이 유한한 디지털 필터 방식의 유한 임펄스 응답 필터(finite impulse response filter)를 사용하였다.<sup>(14)</sup>

### 3.4 스펙트럼 분석

시간 t의 함수 x(t)의 푸리에 변환대는 식(4)으로 정의된다.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp(-j2\pi ft) dt \quad (4)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \exp(j2\pi ft) df \quad (4')$$

복소함수 X(f)는 x(t)의 주파수 스펙트럼이라 하지만 이 실수부와 허수부를 사용하여 각 주파수 성분의 진폭과 위상이 계산된다. 여기서 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transform, DFT)은 식(4)에 대해 이산 시간 시퀀스(discrete time sequence)를 이산 주파수 표현으로 변환한 것으로 아래와 같이 주어진다.<sup>(15)</sup>

$$X_k = \sum_{i=0}^{n-1} x_i \exp(-j2\pi \frac{ik}{n}) \quad \text{for } k=0,1,2,\dots,n-1, \quad (5)$$

단 x : 입력 시퀀스

X<sub>k</sub> : 이산 푸리에 변환(DFT)

n : 이산 시간 및 이산 주파수 영역에서의 샘플 수

각 주파수 성분마다의 파워(power)를 알기 위해 스펙트럼 X(f)를 사용하여 파워 스펙트럼 밀도가 다음과 같이 정의된다.

$$P(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[ \frac{1}{T} |X(f)|^2 \right] = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[ \frac{1}{T} X(f) X^*(f) \right] \quad (6)$$

일반적으로 같은 파워 스펙트럼 밀도를 가지더라도 X(f)의 위상각 φ(f)의 분포에 의해서 x(t)의 파형은 달라진다. 이 위상각은 식(7)에 의해 주어지며 이것을 주파수 f에 대해서 표현한 것을 위상 스펙트럼(phase spectrum)이라 부른다.

$$\varphi(f) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[X(f)]}{\text{Re}[X(f)]} \quad (7)$$

X(f)를 |x(f)| 및 φ(f)를 사용하여 극좌표 표시하면 식(8)이 된다.

$$X(f) = |X(f)| \exp\{j\varphi(f)\} \quad (8)$$

지금, 변수 x(t)에 시간 지연 τ가 있을 때의 파형 x(t-τ)의 푸리에 변환은 식(4)를 사용하여 식(9)로 주어진다.

$$X(f)e^{-j2\pi f\tau} = |X(f)|e^{i\varphi(f)}e^{-j2\pi f\tau}$$

$$= |X(f)|\exp[j\{\varphi(f) - 2\pi f\tau\}] \quad (9)$$

이 때 위상 스펙트럼은  $\varphi(f) - 2\pi f\tau$  가 되어  $x(t)$ 의 위상 스펙트럼에서  $2\pi f\tau$ 에 비례하는 항을 빼는 것이 된다. 따라서 이 시간 지연을 가진 파형의 위상 스펙트럼은 식(8)에 의해  $\pm\pi$ 간을 톱니 모양으로 분포한다. 이것을 이용해서 위상 스펙트럼에서 지연시간을 검출할 수 있다. 한편 각주파수  $\omega = 2\pi f$  로서 다음과 같이 정의한 위상 스펙트럼도 있다.

$$\Phi(\omega) = \tan^{-1} \left\langle \text{Im}\{X(\omega)X^*(\omega_p)\} / \text{Re}\{X(\omega)X^*(\omega_p)\} \right\rangle \quad (10)$$

이것은 파워 스펙트럼이 극대값이 되는  $\omega_p$ 를 기준각 주파수로서 각 각주파수성분의 편각의 상대적 편각

$$\varphi'(\omega) = \varphi(\omega) - \varphi(\omega_p) \quad (11)$$

과 각주파수와의 관계를 나타낸 위상 스펙트럼이다.

### 3.5 고주파 왜곡률 해석

보통 기계 진동계 등에서 관찰되는 진동 파형은 통상 기본파 성분 이외에 다른 고조파 성분이 포함되어 있다. 또한 전송계에 전형파를 가하면 전송계의 비선형 특성이 원인이 되어 출력 신호에 왜곡 성분이란 부르는 가해진 정현파의 고조파 성분이 나타난다. 이 왜곡에 착안하여 진동파형과 출력 신호의 고조파 성분을 분석하여 진동의 특성과 전송계의 충실도 등을 검토할 수 있다.

일반적으로는 기본 주파수  $f_1$  및 제 2고조파  $f_2$ , 제 3고조파  $f_3$  등의 고조파 성분으로 형성되어 있을 때 각각의 실험치를  $A(f_1), A(f_2), A(f_3)$ 라 두면 전고조파 왜곡률(the percent total harmonic distortion) (%THD)는 식(12)와 같이 표현된다. <sup>(14,16)</sup>

$$\%THD = \frac{\sqrt{A(f_2)^2 + A(f_3)^2 + \dots + A(f_N)^2}}{A(f_1)} \times 100(\%) \quad (12)$$

단  $A(f_1)$  : 기본 주파수의 진폭

$A(f_n)$  : N차 고조파의 진폭  
N : 고조파 수

이것을 각각의 주파수의 파워 스펙트럼의 요소의 합 sum(APS)에서 DC 와 기본 주파수 근처의 요소를 빼면 다음과 같이 전고조파 왜곡률+노이즈 (%THD+noise)를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\%THD + noise = \frac{\sqrt{\text{sum}(APS)}}{A(f_1)} \times 100(\%) \quad (13)$$

### 3.6 데이터 베이스 및 자동 진단 보고서 작성

주형의 진동 신호는 데이터베이스화되어 디스크에 저장된다. 주형 진동 신호를 데이터베이스화 함으로써 기존의 일반 계측기는 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. 주형 진동 진단 데이터베이스 시스템은 Fig. 8과 같이 구성된다.

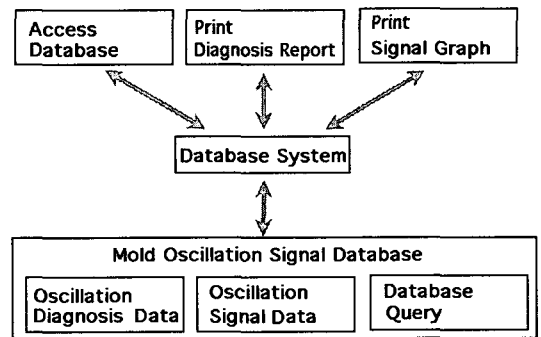


Fig. 8 Database system with auto-formatted diagnosis report

데이터베이스는 주형 진단 결과 데이터, 주형 진동 신호 데이터, 그리고 데이터베이스 쿼리로 구성된다. 주형 진동 신호 데이터는 주형 진동 진단 시스템에 의해서 취득된 진동 신호를 날짜별, 측정 횟수별, 센서의 위치별로 구분되어 저장된다. 주형 진단 결과 데이터는 주형 진동 진단 시스템에 의하여 계산된 진단 결과를 저장하며 진단

보고서를 인쇄하거나 검색할 때 사용된다. 데이터베이스 쿼리는 진동 신호나 진단 결과를 검색하거나 인쇄할 때 사용된다. 사용자는 ACCESS 데이터베이스 시스템을 통해서 특정 날짜의 진단 데이터와 진동 신호를 검색하거나 인쇄할 수 있다. ACCESS 데이터베이스 시스템은 사용자를 위한 편리한 화면 인터페이스를 제공하며 저장된 데이터베이스를 이용하여 사용자의 요구 사항을 처리한다.

### 3.7 진단 프로그램

주형 진동에 대한 진단 순서는 Fig. 9에 나타낸 것과 같다. 먼저 애널로그-디지털 변환기를 통해 입력된 변위 신호를 주파수 및 위상 분석을 하여 각 신호 파형의 스트로크 길이, 특성 주파수, 위상차 및 위상 순서 등의 계산 결과로 단순 진단을 행한다. 진단 방식은 각 항목별로 정해진 기준값과의 비교를 통해 이루어지며 단순 진단 시에는 각 항목별로 모두 기준 범위 내에 들면 양호 판정을 하며 이상시는 항목별로 미리 정해진 주형 장치 점검 부위를 개선타다.

단순 진단이외에 조업시 주형 진동 장치에 의한 주조 품질의 상관성을 조사하기 위해 하모닉 분석, 정밀 파형 분석, negative strip을 및 주형 속도, 가속도 등의 정밀 진단을 행한다. 또한 진단 결과는 데이터베이스를 통해 관리되며 자동 형식 진단 보고서를 출력할 수 있다.

본 시스템에 의한 주형 진단은 데이터 수집으로부터 진단 보고서의 발행까지 미리 정해진 순서에 의해 자동적으로 실행되도록 구성되어 있다.

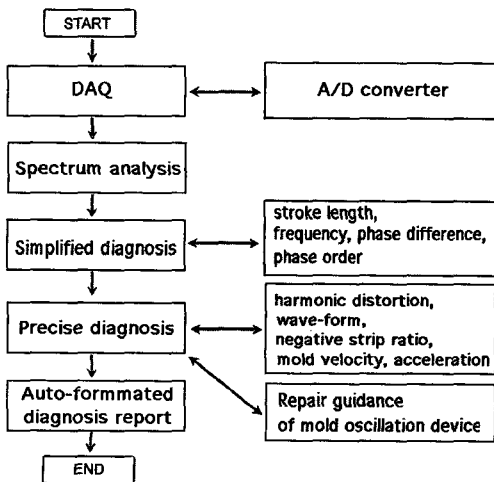


Fig. 9 Procedure of mold oscillation diagnosis

### 4. 적용 테스트 및 결과

Fig. 10은 주형의 코너부의 수직 스트로크 파형을 나타낸 것이다. 그림에서 스트로크 길이는 진폭의 최대값과 최소값의 차이를 의미한다.

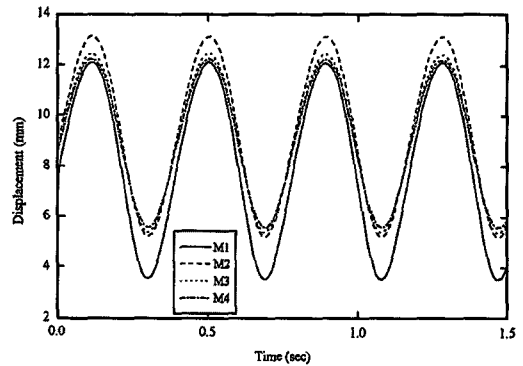


Fig. 10 Time-wave form of the vertical strokes in the four corners of mold oscillation device

Fig. 11은 주형 진동의 수직 스트로크와 이를 1차 미분함으로써 얻어진 주형 속도 파형을 나타내고 있다. 주형 속도는 주형의 스트로크와 주파수에 의해 결정되며 이 경우  $-4.4 \sim +3.9 \text{m/min}$ 로 진동 하고 있으며 이 때의 주조 속도는  $2.06 \text{m/min}$ 이다. 식(3)에 의해 negative strip을 계산하면  $Ne=72\%$ 로  $Ne>50\%$ 에서는 高진동수 短

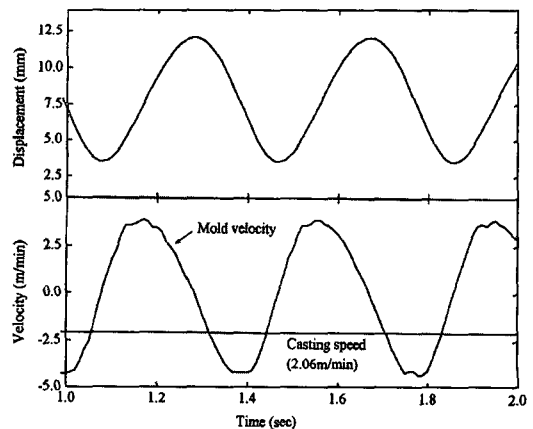


Fig. 11 Displacement and velocity in a continuous casting mold



스트로크화에 의해  $\theta_h$ 는 작아진다.  $0 < Ne < 50\%$ 의 범위에서는  $f$ 와  $S$ 의 미소변동에 의해  $\theta_h$ 는 크게 변하기 때문에 실조업에서는 제어가 곤란한 특징이 있다. 따라서 진동마크의 깊이를 저감하기 위해서는  $Ne > 50\%$ 에서 고진동수 短스트로크화가 효과적인 방법이다.

Fig. 12는 수직 방향의 스트로크(M1)에 대한 파워 스펙트럼의 결과이다. 하모닉 분석에 의해 기본 주파수에 대한 하모닉 주파수의 하모닉 진폭을 구할 수 있다. 이러한 하모닉 분석을 통해 앞에서 언급한 전고조파 왜곡을 %THD와 %THD+noise를 계산하면 Table 4와 같다. 전고조파 왜곡율은 주형 진동 장치의 사용 기간이 경과함에 따라 가해지는 정현파의 진동 곡선이 ultra bush의 탄성 저하 등의 기계적인 느슨함(looseness)으로 발생하는 고조파 성분의 크기를 평가하는 척도로서도 사용될 수 있다.

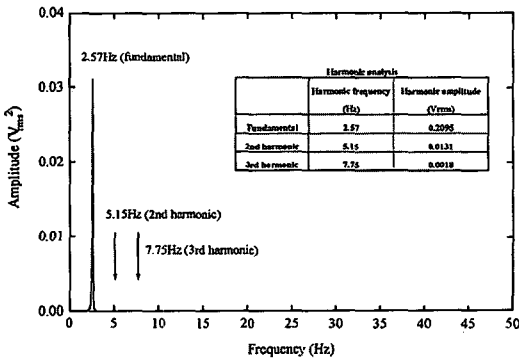


Fig.12 Power spectrum and harmonic analysis of vertical stroke (M1)

Table 4 Result of harmonic analysis of four vertical strokes

	Harmonic frequency	Harmonic amplitude (Vrms)			
		M1	M2	M3	M4
#1harmonic	2.57	0.2095	0.1937	0.1716	0.1633
#2harmonic	5.15	0.0131	0.0095	0.0089	0.0076
#3harmonic	7.75	0.0018	0.0010	0.0011	0.0010
%THD		6.3025	4.9485	5.2051	4.6881
%THD+noise		31.254	30.982	31.052	30.959

Fig. 13은 수직 방향의 스트로크(M1, M2, M3, M4)에 대한 위상 스펙트럼 분석 결과를 나타낸 것으로 주형

진동의 기본 주파수에 대한 각 위상 스펙트럼의 상대각도를 계산하면 각 파형에 대한 위상차이를 계산할 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 각 파형간의 위상차는 기준값인 2° 범위안에 들며 위상 순서는 M2←M4←M1←M3 이다.

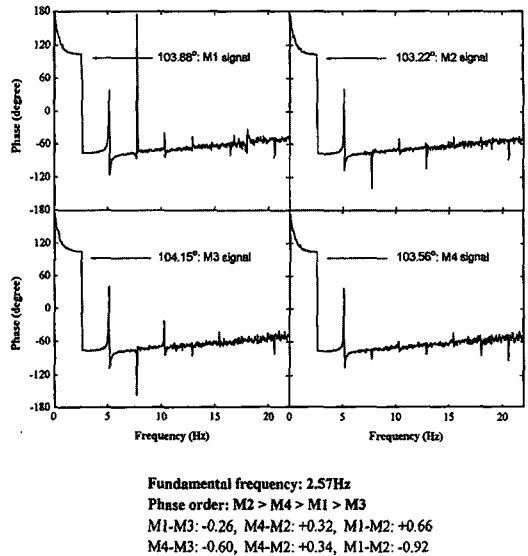


Fig. 13 Phase spectrums of four vertical strokes of a mold (M1, M2, M3 and M4)

프로그램에 의한 위상 차이의 계산 결과를 기존의 FFT 분석기를 이용하여 비교해 보았다. 기존에 사용되는 FFT 분석기는 여러 가지가 있으나 그 중 小野 測器의 2채널 FFT 분석기(모델명: CF-900)를 이용하여 각 파형간의

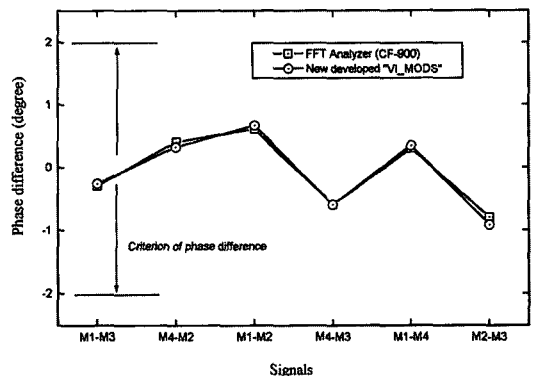


Fig. 14 Calculation of phase difference by new developed package compared with conventional FFT analyzer

위상차를 2채널씩 교대로 위상 차이를 구하여 프로그램에 의해 4채널 동시에 위상 스펙트럼에 의해 구한 결과를 비교하였다. 결과는 Fig. 14에 나타난 것처럼 각 파형간의 상대 위상차는 두 방법이 거의 차이가 없이 동일하게 나타났다.

Table 5는 주형 진단 결과를 나타낸 것으로 본 시스템에 의해서 다채널의 주파수 및 위상 스펙트럼 분석이 가능함을 알 수 있다.

Table 5 Basic result of mold oscillation diagnosis

		Criterion	FFT analyzer CF-900 Ono Sokki	VI_MODS
Vertical stroke length (mm)	M1	8.6 ± 1.0	9.00	
	M2		8.66	
	M3	7.2 ± 1.0	7.62	
	M4		7.46	
Back-front movement (mm)	M5	≤ 0.3	0.17	
Lateral movement (mm)	M6		0.21	
Phase ( ° ) Phase order: M2 > M4 > M1 > M3	M1	≤ 2.0		- 156.40 ③
	M2			- 157.06 ①
	M3			- 156.14 ④
	M4			- 156.74 ②
Phase difference (Δ°)	Cam shaft	M1-M3	- 0.3	- 0.26
		M4-M2	+ 0.4	+ 0.32
	Coupling assembling	M1-M2	+ 0.6	+ 0.66
		M4-M3	- 0.6	- 0.60
	Diagonal corners	M1-M4	+ 0.3	+ 0.34
		M2-M3	- 0.8	- 0.92

참고 문헌

- McManus. G. J., Iron Age, Vol.224, Nr.4, S. 7/11, 1951.
- Herrmann. E., Handbuch des Stranggießens, Aluminium-Verlag, Dusseldorf, 1955.
- Wolf. M. M., 74th Steelmaking Conference Proceedings, pp.51-71, 1992.
- Schwerdtfeger. K., Metallurgie des Stranggießens, Verlag Stahleisen, Dusseldorf, 1992.
- Morwald. K., Voest-Alpine Industrieanlagenbau (VAI), Linz, Internal Report, Nr.90, pp.15, 1990.
- Uchida. S., Masaoka. T., Mori. T., Taniguchi. I., Kobatake. T., Teshima. T., Nippon Kokan Technical Report, 48, pp.1-9, 1987.
- Shirayama. A., Kubota. J., Mori. T., Okimoto. K., Suzuki. M., Teshima. T., Nippon Kokan Technical Report, 52, pp.1-7, 1988.
- Nadif. M., Solimine. A., Ominetti. P., Vellet. P., Blandel. M., Roscini. M., 1st European Conference on Continuous Casting, Florence, 1991.
- 川上公成, 北川 融, 鐵と鋼, Vol.67, No.8, pp.1190, 1981.
- Takeuchi. H., Matsumura. S., Hidaka. R., Nagano. Y. and Suzuki. Y., Tetsu-to-Hagane, Vol.69, No.2, pp.248-253, 1983.

따라서 프로그램에 의한 스펙트럼 분석은 애널로그-디지털 변환기에 의해 취득된 파형 데이터를 소프트웨어적으로 처리한 것으로 이는 기존의 하드웨어적인 애널로그 및 디지털 방식의 분석기와 비교하여 가상 계측기(virtual instrumentation)라 칭하며 본 연구를 통해서서는 가상 계측기에 의한 해석 결과가 충분한 연산 속도와 고속의 샘플링 데이터를 처리할 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

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 이용

11. Reisinger. J., Angerer. R., Furst. C., *MPT International*, No. 5, 1995.
12. Oka. H., Eda. Y., Koshikawa. T., Nakato. S., Nozaki. T. and Habu. H., *Tetsu-to-Hagane*, Vol.69, No.12, S932, 1983.
13. 中戸 参, 江見俊彦, *鐵と鋼*, Vol.67, No.11, S908, 1981.
14. *LabVIEW Analysis VI Reference Manual*, National Instruments.
15. Ramirez. R. W., *The FFT, Fundamentals and Concepts*, Prentice-Hall, 1985.
16. 音聲技術研究室編, *デジタル信号処理基礎用語集* 小野測器, 1986.