

# 회전체의 진동신호분석을 위한 신호보간의 오차분석

論 文  
53D-12-5

## Comparison Error of Signal Interpolation Methods for Vibration Signal Analysis of Revolution Machine

朴 俊 鏞\* · 朴 鍾 演\*  
(Jun-Yong Park · Chong-Yeon Park)

**Abstract** - In this paper, studied error of various signal interpolation methods in vibration signal analysis with digital order tracking. Because, interpolation errors are related with sampling rate and amount of calculation. Applied Signal interpolation methods are Lagrange, Newton and Cubic-spline. This paper proposed more proper interpolation method. Also, we suggest guideline for adaptive application of signal interpolation methods with Calculated results.

**Key Words** : Signal Interpolation, Error, Adaptive Application

### 1. 서 론

산업현장, 공장은 물론 일상생활 속에서 사용하는 회전기기의 크기는 비교적 작기 때문에 작은 고장을 미리 예측하고 감시하는 일은 없다. 그러나 공장이나 대형의 회전기기를 사용하는 발전소의 경우 이들 회전기기의 고장은 곧 큰 사고를 유발하게 된다. 따라서 회전기기에 이상이 있는지에 대해 감시하고 고장을 미리 예측하는 것은 매우 중요한 일이다.<sup>[1]</sup> 회전체는 회전하면서 고유의 진동신호를 발생하게 되는데 이 진동신호의 변화를 통해 회전기기의 이상을 파악할 수 있다. 회전기기의 상태를 분석하기 위해서는 일반적인 주파수 스펙트럼 결과보다는 차수영역(Order-spectrum)에서 표현되는 진동신호의 분석결과가 회전체의 이상 유무를 판단하는데 더 유용한 정보가 되며 이를 차수분석 또는 차수추적이라 한다.<sup>[1][2][7]</sup>

차수분석방법에는 적응형 필터(Adaptive-filter), 가보변환(Gabor transform), 재 표본화(Re-sampling)방법이 있으며,<sup>[4][5]</sup> 본 논문에서는 재 표본화 방법으로 차수분석을 하는 경우에 사용되는 보간법의 오차와 연산량을 비교분석 하였다. 분석한 결과로부터 회전체의 속도와 연산량을 고려하여 시스템 설계자가 원하는 오차범위를 만족하는 보간방법을 선정할 수 있는 기준을 제시하였다.

### 2. 차수분석

차수분석의 방법 중 재 표본화 방법이 일반적인 주파수 분석과 크게 차이를 가지는 것은 회전체의 속도에 동기를

맞춰서 샘플링 한다는 것이다. 동기를 맞추어 샘플링 하는 방법에는 아날로그 방식과 디지털 방식이 있으며, 디지털 방식으로 동기를 맞추는 경우에는 각 보간(Angle Interpolation), 신호보간(Signal Interpolation)의 방법이 사용된다.

본 논문에서는 신호보간을 위해 사용되는 여러 가지 보간법들을 실제의 상황과 유사한 상황에서 시뮬레이션 하여 보간 오차가 얼마나 발생하는지 분석하였다.

#### 2.1 디지털 차수추적 및 재 표본화의 원리

디지털 차수추적(Order-tracking)의 결과는 1차 진동신호와 그 고조파에 해당하는 성분이다. 1차 진동신호는 회전체가 일 회전하는데 걸리는 시간의 역수이다. 따라서 1차 진동신호는 회전체가 일 회전하는 동안 한 주기를 이루는 정현파로 나타낼 수 있다. 재 표본화 방법에 의한 차수추적을 위해서는 그림 1과 같이 회전체의 속도를 측정하는 가속도계와 진동센서가 필요하다.<sup>[7]</sup>

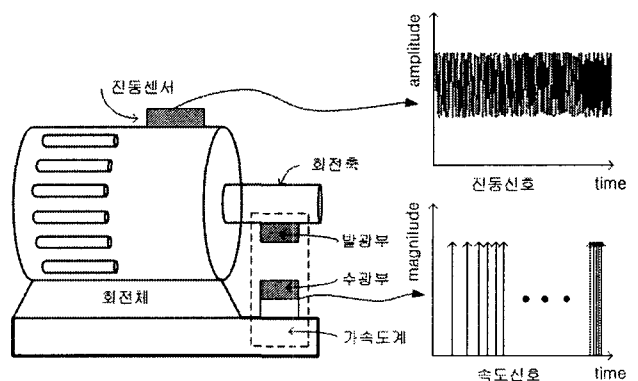


그림 1 차수분석을 위한 구성  
Fig. 1 Composition for order analysis

\* 교신저자, 正會員: 江原大 工大 電氣工學科 碩士課程  
E-mail: prince1386@hotmail.com

\* 正會員: 江原大 工大 電氣工學科 教授 · I·博  
接受日字: 2004年 8月 11日  
最終完了: 2004年 11月 21日

## 2.2 속도가변 회전체의 차수추적

1차 진동신호는 회전체가 일 회전하는데 걸리는 시간의 역수임으로 회전속도가 증가하면 1차 진동신호의 주파수도 증가하게 된다. 따라서 속도가 증가하고 있는 회전체의 1차 진동신호를 그림 2와 같은 칩 신호(Chirp signal)로 가정할 수 있다.

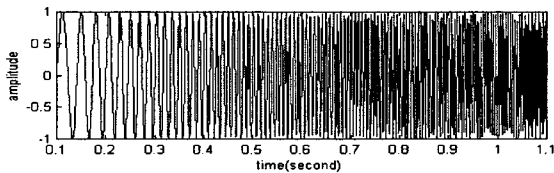


그림 2 칩 신호 ( $t=0.1\sim 1.1$ ,  $y=\sin(2\pi(100t) \cdot t)$ )

Fig. 2 Chirp signal( $t=0.1\sim 1.1$ ,  $y=\sin(2\pi(100t) \cdot t)$ )

그림 2와 같이 회전속도가 증가할 때 발생하는 진동신호를 주파수 분석하는 경우에는 일정한 간격으로 샘플링 하고 푸리에변환을 한다. 그림 2의 진동신호를 확대하여 일정한 간격으로 샘플링 하면 그림 3과 같이 샘플링 되는 위치를 표시할 수 있다.

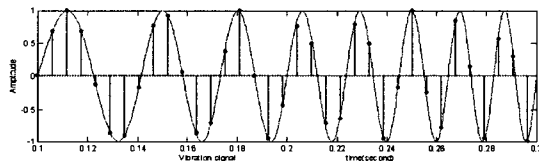


그림 3 일정간격으로 샘플링 ( $t=0.1\sim 0.3, y=\sin(2\pi(100t) \cdot t)$ )

Fig. 3 Time-constant sampling ( $t=0.1\sim 0.3, y=\sin(2\pi(100t) \cdot t)$ )

그림 3과 같이 일정한 간격으로 그림 2의 진동신호를 샘플링 한 후 주파수 분석하면 그림 4와 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림 4의 결과를 통해 발생시킨 진동신호에 약 25hz~225hz의 주파수가 섞여 있다는 것을 알 수 있다.

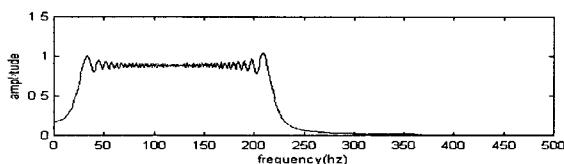


그림 4 그림 2의 주파수 스펙트럼  
Fig. 4 Frequency spectrum of fig. 2

그러나, 진동신호에 포함되어 있는 진동신호의 주파수성분에 대한 정보는 회전체의 이상유·무를 모니터링 하기 위한 정보로 이용하기 어렵다. 그림 4의 결과로는 회전체에서 발

생한 주파수의 범위와 크기만을 알 수 있다. 차수분석은 그림 1에서와 같이 회전체의 속도를 측정하고 그 속도에 동기를 이루는 샘플링을 통해 그림 4의 스펙트럼보다 유용한 정보로 표현한다.

## 2.3 각 보간 (Angle Interpolation)

매 회전당 회전체의 동일한 각도에서 샘플링을 하기 위한 재 표본화의 과정 중 하나이다. 각 보간은 Potter and Mike Griber가 제시한 수식을 이용한다.<sup>[6]</sup> 각 보간 과정을 거치면 그림 5에서와 같이 어떤 가속도로 증가하고 있는 회전체의 각 각도에 도달하는 시간을 계산할 수 있다.<sup>[1][3]</sup>

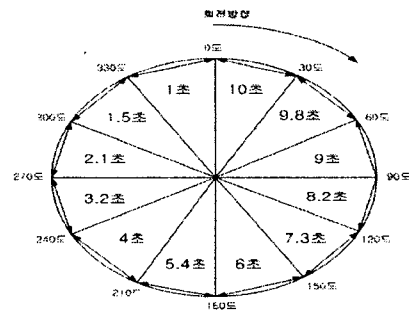


그림 5 각 보간의 원리  
Fig. 5 Principle of angle interpolation

각 각도에 도달하는 시간을 각 보간 방법을 이용하여 계산하고, 계산된 시간에서 그림 2의 진동신호를 등각 샘플링 하면 샘플링 된 진동신호는 그림 6과 같이 일정한 위치에서 샘플을 얻는다.

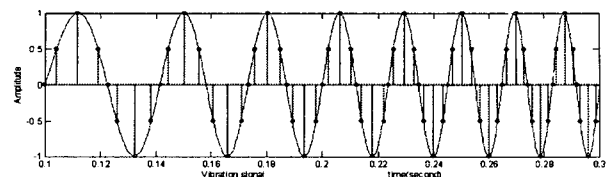


그림 6 각 보간에 의한 재 표본화  
Fig. 6 Re-sampling by angle interpolation

그림 6은 1차 진동신호를 발생시킨 것임으로 정현파가 한 주기를 이룰 때 회전체가 일 회전을 한다. 회전체가 일 회전할 때 마다 동일한 위치에서 1차 진동신호가 샘플링 됨으로 분석결과는 매 회전마다 동일하다. 따라서 분석된 결과를 시간-주파수 영역으로 표현하게 되면 항상 같은 신호가 발생하게 된다. 회전체의 진동신호는 회전체의 속도와 관련됨으로 등각 샘플링을 하여 차수정보를 얻는다.

## 2.4 신호보간 (Signal Interpolation)

그림 6에서 진동신호는 연속적인 신호로 표현하였으나 실제로 진동신호는 A/D 컨버터에 의해 샘플링 된 이산신호이다. 따라서 각 보간에 의해 계산된 표본시간에 실제로 진동

신호의 값은 대부분 존재하지 않는다. 따라서 주변의 샘플들을 이용하여 재 표본하려는 시점에서의 진동신호의 값을 추정하여야 한다. 주변의 샘플들을 이용하여 값을 추정하는 방법에는 여러 가지가 있으나 본 논문에서는 Lagrange 선형, 이차, 삼차보간, Newton 선형, 이차, 삼차보간, Cubic spline보간에 대하여 비교분석 하였으며, 보간을 하지 않은 경우 과 표본화 율이 얼마나 증가하는지 나타내었다.

2.4.1 Lagrange 보간법

그림 7은 이산 값인  $x_0, x_1$  사이의 값을 추정하려고 할 때 원래의 값들 사이를 선형이나 이차, 삼차의 함수로 근사하여 값을 추정하게 된다. 그림 7에서는  $x_0, x_1$  사이를 선형으로 근사하여 값을 추정하고 있는 것을 도식화 한 것이다.<sup>[10]</sup>

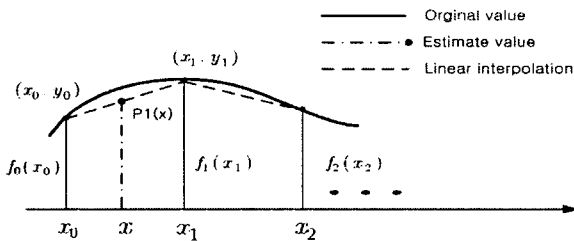


그림 7 Lagrange 선형보간  
Fig. 7 Lagrange linear interpolation

n차 Lagrange 보간의 보간다항식은 식 (1)이며,  $L_n(x)$ 는 식 (2)와 같다.

$$P_n(x) = y_0L_0(x) + y_1L_1(x) + \dots + y_nL_n(x) \quad (1)$$

$$L_i = \frac{(x-x_0) \cdot \dots \cdot (x-x_{i-1})(x-x_{i+1}) \cdot \dots \cdot (x-x_n)}{(x_i-x_0) \cdot \dots \cdot (x_i-x_{i-1})(x_i-x_{i+1}) \cdot \dots \cdot (x_i-x_n)} \quad (2)$$

2.4.2 Newton 보간법

Newton 보간법은  $\Pi-1$  설명한 Lagrange보간법과 개념은 동일하며, 근사함수를 구하는 다항식만 다르다. Lagrange보간 다항식은 분모를 한번씩 계산한 뒤에도  $2(n+1)$ 번의 곱셈과 나눗셈 및  $(2n+1)$ 번의 덧셈과 뺄셈이 필요하다. 이것을 Newton 분할차 보간 다항식을 사용하면 n번의 곱셈과 n번의 덧셈만이 필요하기 때문에 Lagrange 보간법에서 발생한 보간의 오차와 비슷한 오차 값을 가진다고 가정하면 연산량의 측면에서 상당한 장점을 가진다. 또한, Lagrange 보간법에서는 차수가 증가할 때마다 완전히 새로운 다항식이 필요하지만 Newton 보간의 경우 원래계산한 차수의 다항식에 간단히 다른 항 하나를 추가함으로 쉽게 차수를 증가시킬 수 있는 장점을 가진다.<sup>[10]</sup> Newton 1차 분할차를 계산하는 방법은 식 (3)과 같으며 식 (4)은 2차 분할차를 계산하는 방법이다. 더 높은 차수의 분할차는 식 (3)에서 식 (4)이 되는 과정의 반복계산으로 얻을 수 있다. 법은 식 (3)과 같으며

식 (4)은 2차 분할차를 계산하는 방법이다. 더 높은 차수의 분할차는 식 (3)에서 식 (4)이 되는 과정의 반복계산으로 얻을 수 있다.

$$f[x_0, x_1] = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} \quad (3)$$

$$f[x_0, x_1, x_2] = \frac{f[x_1, x_2] - f[x_0, x_1]}{x_2 - x_0} \quad (4)$$

Newton 보간법의 보간 다항식은 식 (5)와 같다.

$$p_n = f(x_0) + (x - x_0)f[x_0, x_1] + \dots + (x - x_{n-1})f[x_0, x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (5)$$

2.4.3 Cubic-Spline 보간법

Cubic-Spline보간법은 주어진 어떤 함수  $f(x)$ 에서 임의의 위치  $p_1(x)$ 에서 값을 추정하기 위해 원래의 이산적인 값들 사이를 3차함수의 형태로 근사한다.<sup>[8]</sup>

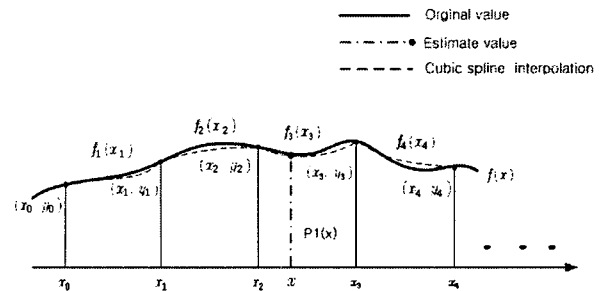


그림 8 Cubic spline 보간법  
Fig. 8 Cubic spline interpolation

1차 보간법이나 2차 보간법에서는 두 점 또는 세 점에 대한 정보를 이용하여 어떤 한 구간에 대한 함수를 구했으나, Cubic-Spline 보간방법의 경우에는 다섯 개의 점들로부터 얻은 정보를 이용하여 네 개의 구간에 대한 함수를 구할 수 있다. Cubic-Spline 보간방법의 경우 각 점을 연결하는 구간 사이에 대한 3차의 함수가 계산되는데 각 보간 후에 재 표본화 시점이 항상 한번에 구해지는 네 개의 구간에 존재하지 않기 때문에 첫 번째 구간에서 얻어지는 함수만을 이용하여 값을 추정할 때 발생하는 오차, 두 번째 구간에서 얻은 함수만을 사용하여 값을 추정할 때 발생하는 오차를 비교하였다. 그림 8에서 각 구간의 함수들은 다섯 개의 샘플이 주어져야 구할 수 있으며, 보간함수의 일반식은 식 (6)이다.

$$f_i(x_i) = f''(x_{i-1}) \frac{(-x_i + x)^3}{6(-x_i + x_{i-1})} + f''(x_i) \frac{(x - x_{i-1})^3}{6(x_i - x_{i-1})} + \left[ \frac{f(x_{i-1})}{(x_i - x_{i-1})} - f''(x_{i-1}) \frac{(x_i - x_{i-1})}{6} \right] (x_i - x)$$

$$+ \left[ \frac{f(x_i)}{(x_i - x_{i-1})} - f''(x_i) \frac{(x_i - x_{i-1})}{6} \right] (x - x_{i-1})$$

$$x_{i-1} \leq x \leq x_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

2.4.3 비교 (Comparison)에 의한 방법

비교에 의한 값의 추정은 그림 9와 같이 보간 다항식을 이용하지 않고 샘플링을 조밀하게 한 후 재 표본화할 시점에서의 전후 샘플인 x(i) 과 x(i+1)와의 시간 간격을 비교하여 가까운 쪽의 샘플 값을 그대로 사용하는 방법이다. (a)의 경우 x(i)샘플과의 거리가 가까우므로 x(i)의 샘플 값을 그대로 사용한다.

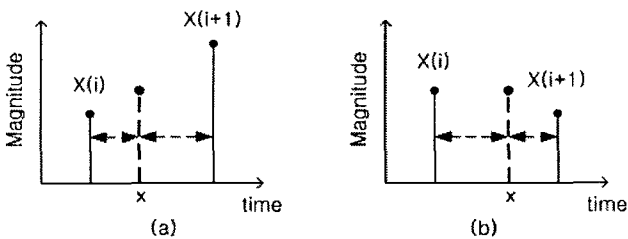


그림 9 비교에 의한 값의 추정  
Fig. 9 Comparison method

3. 시뮬레이션 및 검토

3.1 회전속도와 진동신호의 모의

어떤 회전체가 13rps의 가속도로 회전하고 있다면 회전체는 초당 13바퀴를 회전하며, 1차 진동신호는 13주기가 발생하게 된다.<sup>[10]</sup> 또한 회전체가 매 일회전 하는  $\sqrt{n/13}$  sec 마다 가속도계로부터 펄스가 발생한다. 여기서, n는 회전수이다. 시뮬레이션을 위해 가정한 회전체의 가속도와 가속도계의 펄스발생시간은 표 1와 같다.

표 1 시뮬레이션을 위한 회전체의 조건

Table 1 Condition of revolution machine for simulation

회전체의 가속도	13rps 로 가속도 증가
진동신호의 주파수	13 hz/second 로 주파수 증가
가속도계 펄스발생 시간	$\sqrt{\frac{n}{13}}$ second , n=1,2,3...(회전수)

표 1의 조건을 만족하는 1차 진동신호의 함수는 식 (7)와 식 (8)을 이용하여 발생시켰다. 발생시킨 진동신호의 주파수와 가속도계 발생시간은 표 2에 나타내었다.

$$Tachometer \ pulse \ (n) = \sqrt{\frac{n}{13}} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (7)$$

Vibration signal (first order)

$$f = \sin(2\pi \times (13 \times Tachometer \ pulse(n)) \times t) \quad (8)$$

회전체가 기동하여 13rps 의 속도로 가속하면 각 회전수에서 발생하는 1차 진동신호는 식 (10)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$rps(revolutions \ per \ second) = \frac{rpm}{60} \quad (9)$$

$$one \ cycle \ revolution = \frac{1}{rps} = \frac{1}{frequency} \quad (10)$$

식 (7)~(10)을 이용하여 1초부터 9초까지 1차 진동신호의 주파수와 회전체의 속도를 계산하면 진동신호는 13hz에서 104hz까지 증가하며, 회전체의 속도는 780rpm에서 6240rpm 까지 증가하게 된다. 시뮬레이션에서 분석하려는 진동신호의 차수는 50차임으로 최대 회전속도에서 발생한 1차 진동신호의 50배 주파수인 5.2khz가 측정하려는 최대 주파수가 된다. 발생시킨 최대 주파수가 5.2khz 임으로 Nyquist 샘플링 주파수는 10.4khz이다. 표 2는 1차 진동신호를 1초부터 8초까지 시뮬레이션 할 때 발생하는 진동주파수와 회전속도를 나타낸 것이다.

표 2 시뮬레이션 조건

Table 2 Simulation condition

시간 (sec)	주파수 f(hz)	회전속도 (rpm)	회전수 (n)
1~2	13~26	780~1560	13~52
2~3	26~39	1560~2340	52~117
3~4	39~52	2340~3120	117~208
4~5	52~65	3120~3900	208~325
5~6	65~78	3900~4680	325~468
6~7	78~91	4680~5460	468~637
7~8	91~104	5460~6240	637~832

1초에서 8초까지 회전체의 회전수는 13회전에서 832회전까지 증가하므로 819번의 가속도계 펄스가 발생한다. 매 일회전 마다 200개의 재 표본 시점을 각 보간(Angle interpolation)을 통해 계산하고 매 시점에서 신호보간이 가지는 오차를 누적하여 일회전마다 제곱평균값을 얻었으므로 계산된 MSE(mean square error)의 개수도 819개가 된다. 식 (11)에서 x(i) 는 근사 값이며, X(i) 는 원래 값(Original value)이다.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (x(i) - X(i))^2 \quad (11)$$

3.2 보간오차

본 논문에서는 50차의 진동신호까지 분석하였다. 각 그림

의 (a)는 가장 주파수가 높은 50차 진동신호만을 8초간 발생시켜 최대주파수 5.2kHz가 될 때 보간를 계산했으며, (b)는 임의의 크기(Amplitude)를 가지는 31차 ~50차 까지 20개의 진동신호를 섞었을 때 보간 방법별 오차를 계산한 것이다. 또한 오차가 -70dB이하가 되도록 나이퀴스트 샘플링 주파수에 과 표본화 율을 적용하여 신뢰도가 향상되는 주이를 분석하였다. 과 표본화 율의 적용은 각 그림의 우측 하단에 표시되어 있다.

### 3.2.1 Lagrange 1차 보간법

오차가 -70dB 이하가 되는 과 표본화 율은 (a)의 경우 9배 (b)의 경우 11배 이상으로 하여야 하며 1차 보간의 경우 여러 개의 진동신호가 섞여 있을 때 보간 오차가 상당히 증가하고 있음을 알 수 있다.

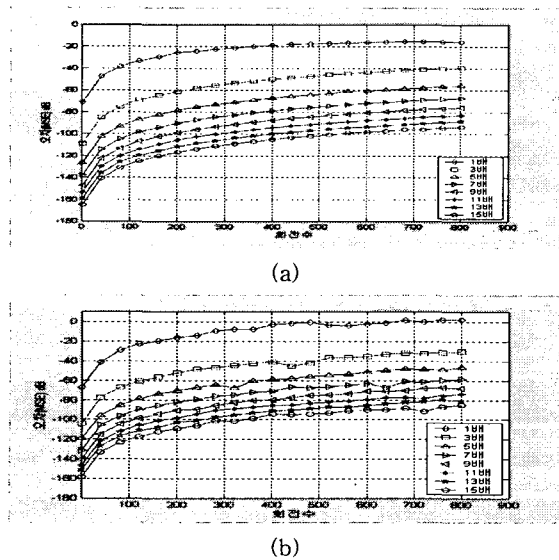


그림 10 Lagrange 1차 보간의 MSE  
(a) 50차 진동신호 (b) 20개의 진동신호  
Fig. 10 MSE of lagrange linear interpolation

### 3.2.2 Lagrange 2차 보간법

(a)와(b)의 경우에는 모두 과 표본화 율을 7배 이상으로 하였을 때 보간의 오차가 -70dB 이하로 나타난다. 2차 보간의 경우 진동신호가 많이 섞이더라도 보간 오차가 크게 증가하지 않음을 알 수 있다.

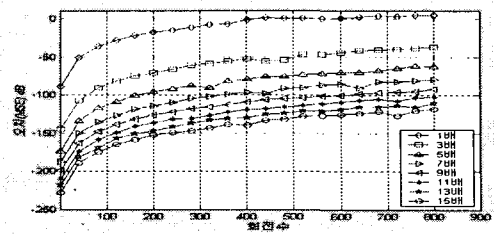
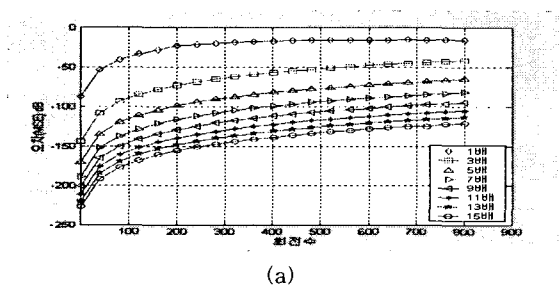


그림 11 Lagrange 2차 보간의 MSE  
(a) 50차 진동신호 (b) 20개의 진동신호  
Fig. 11 MSE of lagrange square interpolation

### 3.2.3 Lagrange 3차 보간법

Lagrange 3차 보간의 경우에는 과 표본화 율을 5배 이상으로 하였을 때 보간의 오차 -70dB 이하로 떨어짐을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과 최대주파수에서 Lagrange 3차 보간이 2차 보간 보다 약 -10dB정도 작은 보간 오차를 가진다.

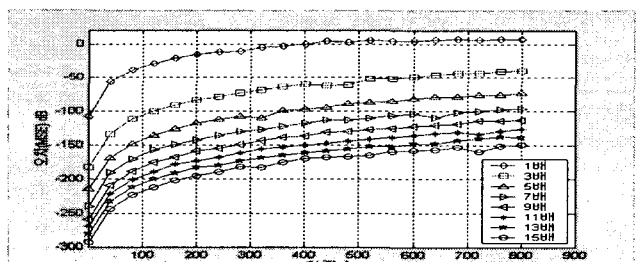
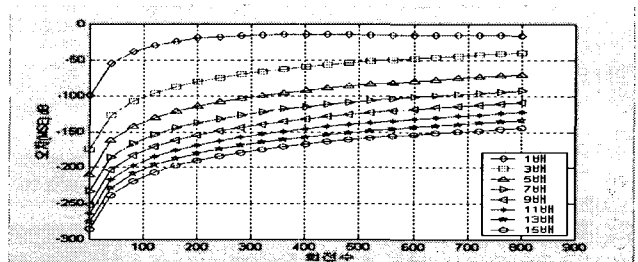


그림 12 Lagrange 2차 보간의 MSE  
(a) 50차 진동신호 (b) 20개의 진동신호  
Fig. 12 MSE of lagrange cubic interpolation

### 3.2.4 Newton 보간법

Newton보간법은 Lagrange보간 다항식을 그대로 사용한다. Lagrange보간 다항식을 계산하기 위해서는  $2(n+1)$ 번의 곱셈과 나눗셈 및  $(2n+1)$ 번의 덧셈과 뺄셈이 필요한데 이것을 분할차를 이용하여  $n$ 번의 곱셈과  $n$ 번의 덧셈만으로 보간 다항식을 계산하는 것이 Newton보간법이다.<sup>[12]</sup> 시뮬레이션 결과도 Newton보간과 Lagrange보간이 같은 보간다항식을 사용하기 때문에 동일한 보간 오차 값을 가졌다.

3.2.5 Cubic-spline 보간법

Cubic-spline보간법의 보간오차는 그림 (a),(b)에서 알 수 있듯이 Lagrange 선형보간과 비슷한 오차를 보였다.

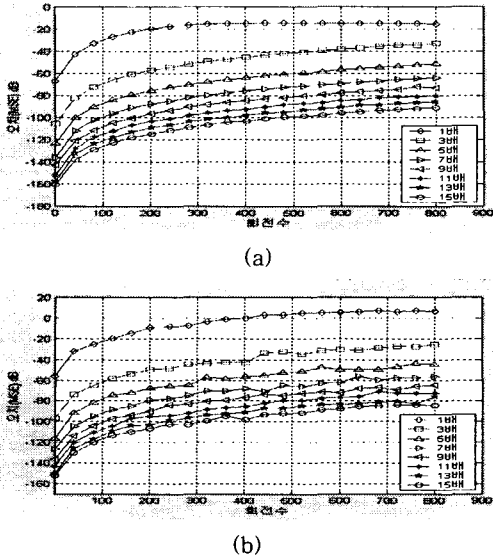


그림 12 Cubic-spline 보간의 MSE  
(a) 50차 진동신호 (b) 20개의 진동신호  
Fig. 12 MSE of cubic-spline interpolation

3.2.6 비교에 의한 방법 (Comparison)

신호보간 방법을 사용하지 않은 경우 오차 값은 그림 14와 같다. (a)의 경우 -70dB 이하의 오차 값을 갖기 위해서는 과 표본화율이 32배 이상 (b)의 경우 80배 이상이 되어

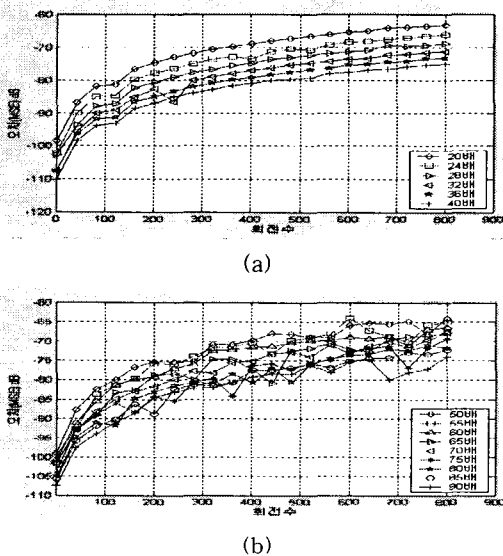


그림 13 비교방법의 MSE  
(a) 50차 진동신호 (b) 20개의 진동신호  
Fig. 13 MSE of comparison

야 하는 것을 알 수 있다. 따라서 연산을 하지 않고 저주파수의 진동신호만을 분석하는 경우에 적용 가능할 것으로 사료된다.

3.3 보간의 연산량

표 3은 보간 방법 별 연산량을 나타낸 것이다. Cubic-spline 보간 방법 중 두 번째 구간 함수의 연산량이 가장 많으며, Newton 1차 보간방법의 연산량이 가장 적다.

표 3 각 신호보간의 연산량 비교  
Table 3 comparison of calculation amount

보간법 \ 연산	곱셈(회)	나눗셈(회)	덧셈(회)	뺄셈(회)
Lagrange 1차보간	2	2	1	2
Lagrange 2차보간	11	3	2	6
Lagrange 3차보간	30	4	3	12
Newton 1차보간	1	1	1	2
Newton 2차보간	6	2	3	5
Newton 3차보간	14	3	5	10
Cubic-spline 첫 번째 함수	25	13	20	18
Cubic-spline 두 번째 함수	31	15	22	19
Comparison	.	.	.	2

4. 결론

시뮬레이션 결과에 의하면 보간오차의 경우 Lagrange 보간과 Newton 보간의 오차가 동일하였으며 다항식의 차수가 3차일 때 가장 오차가 적었다. Cubic-spline 보간은 고차의 보간법이지만 1차 보간법의 오차와 비슷한 오차 값을 가졌다. 연산량의 경우 Newton 보간이 가장 적은 연산량을, Cubic-spline 보간이 가장 많은 연산량을 필요로 했다. 시스템을 설계할 때 하나의 보간 방법만을 적용한다면 Newton 보간이 오차 값과 연산량을 비교했을 때 가장 적절한 보간 방법이었으며, Cubic-spline 보간은 가장 부적절한 보간 방법으로 나타났다. 본 논문에서 회전체의 진동신호가 가변함에 따른 각 보간별 오차 값을 시뮬레이션을 통해 계산하였으며 이 결과는 시스템 설계자가 보간의 정확성과 연산량을 고려하여 분석하려는 진동신호의 특성에 맞게 보간방법을 적용할 수 있는 기준이 될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] K. R. FYFE and E. D. S. MUNCK, "Analysis computed order tracking" Mechanical System and Signal Processing 11(2), pp. 187-205. 1997.

[2] K. M. BOSSLEY and R. J. MCKENDRICK, "Hybrid computed order tracking" Mechanical System and signal processing 13(4), pp. 627-641. 1999.

[3] National Instrument Corporation, "LABVIEW Order analysis Toolset User Manual", 2003.

[4] HENRIK HERLUFSEN, SVEND GRADE and H. KONSTANTIN HANSEN, "Characteristics of the Vold/Kalman Order Tracking Filter", Article from Sound and Vibration, 1999. 4.

[5] MICHAEL F. ALBRIGHT, National Instruments Corporation, "A Comparison of the newly Proposed Gabor Order Tracking Technique vs. Other Order Tracking Methods.", SAE Noise & Vibration Conference, 2001. 5.

[6] R.POTTER and M.GRIBLER, "Computed order tracking obsoletes older methods." SAE Noise and Vibration Conference, pp. 63-67. 1989.

[7] Hewlett-Packard Company Hewlett-Packard Application Note 243-1, "Dynamic Signal Analyzer Applications.", pp. 1-23. 1998.

[8] SINGIRESU S. RAO, Applied Numerical Method for Engineers and Scientists, Prentice-Hall pp. 364-413, 2002.

[9] 김창근, 수치해석, 교우사, pp. 111-146. 1997.

[10] Alfred L. Wicks, Charles F. Reinholtz, William R. Kelly, "Synchronous Sampling Sideband Orders from Helical Planetary Gear Sets", Master of science in Mechanical Engineering, pp. 29-43. 1998. 3.

저 자 소 개



박 준 용(朴 俊 鏞)

1977년 9월 30일생. 2003년 강원대 전기 전자공학과 졸업. 2003년~현재 동 대학원 전기전자공학과 석사과정  
Tel : 033-250-6290  
E-mail : prince1386@hotmail.com



박 중 연(朴 鍾 演)

1951년 2월 23일생. 1973년 고려대 전자 공학과 졸업. 1984년 경북대 대학원 졸업(공학). 1984년~현재 강원대 전기전자 공학과 교수  
Tel : 033-250-6290  
E-mail : cypark@kangwon.ac.kr