

## 최적화기법에 의한 베어링 동특성 계수의 규명

### Identification of Bearing Dynamic Coefficients Using Optimization Techniques

김용한\* · 양보석\*\* · 안영공\*\* · 김영찬\*\*

Y. H. Kim, B. S. Yang, Y. K. Ahn, Y. C. Kim

**Key Words** : Parameter Identification(파라미터 규명), Bearing Dynamic Coefficients(베어링 동특성계수), Hybrid Algorithm(조합 알고리즘), Genetic Algorithm(유전자 알고리즘), Simulated Annealing(시뮬레이티드 어닐링),

#### ABSTRACT

The determination of unknown parameters in rotating machinery is a difficult task and optimization techniques represent an alternative technique for parameter identification. The Simulated Annealing(SA) and Genetic Algorithm(GA) are powerful global optimization algorithm. This paper proposes new hybrid algorithm which combined GA with SA and local search algorithm for the purpose of parameter identification. Numerical examples are also presented to verify the efficiency of proposed algorithm. And, this paper presents the general methodology based on hybrid algorithm to identify unknown bearing parameters of flexible rotors using measured unbalance responses. Numerical examples are used to illustrate the methodology used, which is then validated experimentally.

#### 1. 서 론

유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)과 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing, SA) 알고리즘과 같은 최적화 알고리즘은 90년대에 들어서면서 컴퓨터의 비약적인 발전에 힘입어 전자, 화학, 조선, 항공, 기계 등 전 공학분야에 걸쳐서 활발히 활용되어져 오고 있다. 회전체역학(rotordynamics) 분야에서는 위험속도 회피, 평형잡기(balancing), 진동제어 등의 목적에 최적화 알고리즘이 이용되어 왔으며, 최근에는 축계의 형상이나 베어링의 최적설계(optimal design) 분야에도 활발한 연구가 진행되고 있다<sup>(1)</sup>.

최근 주목 받고 있는, 최적화 알고리즘이 효율적으로 이용되고 있는 또 하나의 중요한 분야가 역문제(inverse problem)로서, 주로 시스템의 실제의 출력(output)으로부터 불확실한 모델의 여러 파라미터를 추정(parameter identification)하는 것이다. 통상적으로 모델개선(model updating)의 분야와 함께 분류되기도 한다<sup>(2)</sup>.

가스터빈, 스팀터빈, 압축기, 모터, 공작기계 등의 회전기계는 많은 공학분야에서 중요한 역할을 하고 있으며, 지속적인 고출력과 고속화와 안정적인 운전의 요구로 인해 이러한 회전기계의 동적 거동을 정확히 예측하는 것이 더욱 더 중요해지고 있다. 베어링은 회전기계의 동적 거동에 가장 큰 영향을 미치는 핵심 부분으로서, 베어링의 동특성의 이론적인 추정은 항상 로터베어링 시스템의 동적거동의 파악에 있어서의 오차를 포함해왔다. 베어링의 동특성계수를 규명하기 위한 연구는 실험장치를 통해서 베어링 동특성 파라미터를 추정하는 방법이 주로 행해졌으며, 가진기를 이용하여 정·동적 하중을 부가한 후 유막베어링의 강성계수를 구한 방법이 널리 사용되었다. 그 후 응답에 기초하여 저널베어링 및 구름베어링의 동특성계수를 규명하는 방법들이 연구되었다.<sup>(3,4)</sup> 기지(known)의 불평형력이 의한 불평형 응답으로부터 유막의 선형화된 동특성계수를 규명하거나, 불평형에 대한 정보 없이 구름베어링의 동특성계수를 구하기도 하였다<sup>(5)</sup>. Tiwari 등<sup>(6,7)</sup>은 베어링에서의 랜덤응답에 기초하여 구름베어링의 비선형 동특성계수를 구하였고, 탄성 회전축계에 대한 다자유도계의 접근법으로서 측정된 불평형응답을 통해서 회전수 증속의 베어링의 동특성계수를 구하는 알고리즘을 유도하였다. 한편, 홍 등<sup>(8)</sup>은 국부적으로 매개변수 추정이 어려운 불확정 변수가 있는 경우, 유

\* 부경대학교 기계공학부 대학원  
E-mail : yonghan@mail1.pknu.ac.kr  
Tel : (051) 625-1604 Fax : (051) 620-1405

\*\* 부경대학교 기계공학부

한요소모델과 실측된 불평형응답을 결합하여 측정이 어려운 위치에서의 불평형응답을 추정하는 방법을 제시하고, 베어링의 매개변수를 규명하였다. 이 등<sup>9)</sup>은 민감도해석과 최소자승법을 이용하여 실험적으로 구한 케도형상데이터로부터 동특성계수를 규명하는 방법을 제시하였다.

본 논문에서는 가장 널리 사용되고 있는 GA와 SA를 합성한 새로운 알고리즘을 개발하여 그 탐색성능을 확인하고, 이 알고리즘을 이용하여 측정된 불평형응답으로부터 베어링의 동특성계수를 규명하는 방법론을 제시한다. 본 방법은 추정할 파라미터를 설계변수로서 설정하고 로터베어링 시스템에 대한 유한요소해석을 통해서 불평형응답을 계산하고 실측된 불평형응답과의 오차를 최소화하도록 설계변수를 변경하면서 최적화를 수행한다. 본 방법을 이용하면 일반적인 역문제의 수학적인 유도과정이나 민감도 해석이 필요치 않은 장점이 있으며, 베어링뿐만 아니라 지지부(pedestal)의 영향도 함께 포함된 회전축계의 실제의 거동을 가장 잘 모사할 수 있는 지지부의 동특성계수를 구할 수 있으며, 또한 불평형 정보가 없더라도 위상과 크기를 규명할 수 있는 장점이 있다. 수치적인 모사실험을 통해서 그 성능을 확인하고 실제의 구름 베어링으로 지지된 단순 로터-베어링 시스템에 적용하여 그 결과를 검토하였다.

## 2. 제안된 조합 알고리즘

제안된 알고리즘은 전역탐색과 국부탐색으로 구성되어 있으며, 전역탐색에서는 유전 알고리즘과 시뮬레이티드어닐링 알고리즘이 사용되고 국부 탐색 알고리즘에는 Simplex법이 사용되었다. 알고리즘의 흐름은 아래와 같다.

- 1단계) GA : GA를 이용하여 초기 전역해 탐색
- 2단계) SA : GA의 최적값을 초기값으로 SA 탐색
- 3단계) Simplex method : SA탐색의 최종값을 초기값으로 국부 집중 탐색

각 단계의 알고리즘은 향상된 유전알고리즘(EGA), 적응형 시뮬레이티드어닐링(ASA) 및 수정된 Simplex법이 도입되었다.

### 2.1 EGA(Enhanced Genetic Algorithm)

유전 알고리즘이란 생명체가 변화하는 주위환경에 적응하기 위해서 세대를 걸쳐 진화하는 현상을 최적화에 이용한 알고리즘이다. GA의 특징으로는 주어진 해공간 내에서 다점 탐색을 동시에 수행하기 때문에 단일점 탐색을 이용하는 알고리즘에 비해 더욱 빠른 계산속도를 갖는 특징이 있다. GA는 90년대 이후로 수많은 수정된(또는 향상된) 알고리즘들이 개발되었으며, 그중의 하나인 EGA는 탐색정도와 탐색시간을 대폭 향상시킨 알고리즘으로서 다음과 같은 특징을 가지고 있다.<sup>(10,11)</sup>

**변동 돌연변이 :** 변동돌연변이 전략을 도입함으로써 기존

의 정수형 또는 지수함수형의 돌연변이를 적용한 경우보다 더욱 빨리 한 세대에서 탐색에 필요한 개체 수를 구성할 수 있도록 하였다.

**전역탐색 인정기준 :** 초기 후보해 집단의 수는 설계자에 의해서 요구되는 해의 수를 고려하여 선택되며, 초기 전역 탐색의 수렴성은 함수인정기준(function assurance criterion:FAC)에 의해 결정한다.

**후보해 집단의 유사도 평가 :** 전역탐색에 의해 선택된 초기 후보해들에 대한 집단 상호간의 유사도 평가함수(affinity evaluation function:AEF)를 이용하여 평가한다.

**탐색범위의 재설정 :** 최종 선택된 전역 후보해 집단은 후보해 인장벡터에 의해 재탐색에 적용될 후보해 집단을 선택한다.

### 2.2 ASA(Adaptive Simulated Annealing)

SA 알고리즘은 느린 냉각에 의한 금속의 어닐링 과정이나 용액의 결정화 과정에서 유추된 알고리즘으로서, Metropolis 기준에 의해 국부해의 탈출이 가능한 전역 최적화 알고리즘이다. 일반적으로 초기온도와 냉각일정(cooling schedule) 및 새로운 탐색치의 생성방법이 SA에서 최적해의 신뢰성에 많은 영향을 미친다.

많은 SA의 변형된 알고리즘 중에서 적응 시뮬레이티드 어닐링(adaptive simulated annealing, ASA)은 상당히 진보된 알고리즘으로 알려져 있으며, 여러 문제에 적용하여 그 우수성이 입증된 바 있으며, 인터넷상(www.ingbor.com)에 그 소스가 공개되어 있어 누구라도 직접 또는 수정하여 이용할 수 있는 장점이 있다.

ASA알고리즘의 특징은 첫째, 먼저 매우 빠른 냉각스케줄을 사용하여(Very Fast Simulated Annealing, VFSA) 기존의 볼츠만 냉각, 빠른 냉각보다 훨씬 빠른 수렴속도를 가지며, 둘째로 재-냉각(Re-annealing)을 도입하므로써 변수에 대한 감도값(sensitivity)을 이용하여 주기적으로 냉각시간을 조정하는 방법을 도입하여 보다 효율적이고 빠르게 해에 수렴하는 것이 가능하게 된다.<sup>(12,13)</sup>

### 2.3 Simplex method

Simplex법은 기하학적인 방향성을 이용하여 현재의 정보로부터 새로운 위치의 정보를 탐색하는 탐색이론으로서, 탐색진행방향으로 진행과 반사를 반복하면서 국부적인 해를 탐색하며, 해에 수렴해가는 속도가 상당히 빠른 장점이 있으며, 일반적으로 GA와 같은 전역탐색알고리즘과 결합하여 사용되기도 한다.<sup>(10)</sup>

### 2.4 조합 알고리즘(Hybrid Search Algorithm)

본 연구에서 제안하는 조합 알고리즘은 이상의 두 가지 전역탐색 알고리즘 및 국부 집중탐색 알고리즘을 결합하여 전역해의 탐색 능력을 향상시키는 한편 해의 수렴속도를 향상

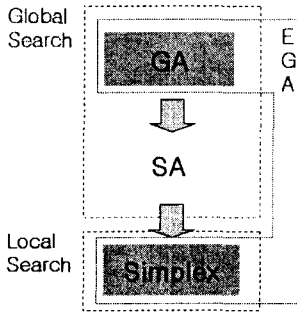


Fig. 1 Flowchart of hybrid search algorithm

시킨 알고리즘이다.

Fig. 1에 알고리즘의 흐름도를 보여주며, GA의 초기전역 탐색의 결과값을 SA의 탐색값으로 사용하며, GA를 이용해서 놓칠 수 있는 전역해를 재탐색하므로써 국부해에 수렴률을 낮추었다. 한편 SA 탐색을 통한 최종값은 다시 국부탐색의 초기값으로 사용되어 해의 정도를 향상시키게 된다.

#### 2.4 탐색 성능 비교

먼저 기본적인 탐색능력을 확인하기 위해 5가지의 2차원 테스트함수에 대해 EGA와 ASA 알고리즘을 비교하였다.

Test function 1 : multi-modal function <sup>(10)</sup>

Test function 2 : test function <sup>(10)</sup>

Test function 3 : chan's function <sup>(10)</sup>

Test function 4 : banana function <sup>(11)</sup>

Test function 5 : rastrigin function

$$f(x) = (N \times 10) + \sum_{i=1}^N (x_i^2 - 10 \cos(2\pi i)) \quad (1)$$

Table 1에 ASA알고리즘과 EGA의 탐색결과를 비교하여 나타내었으며, func. call은 함수호출 횟수로서 최적화문제에서 실질적으로 계산시간을 나타낸다. 비교적 간단한 함수인 1, 2, 3번의 테스트함수에서는 거의 같은 정도의 해를 같은 계산시간으로 얻을 수 있었지만, 4번의 banana함수의 경우는 국부탐색을 도입한 EGA가 우수한 탐색정도를 보여준다. 5번의 rastrigin 함수의 경우의 경우는 ASA에서는 해의 정도는 떨어지지만 전역해를 탐색하는 반면, EGA에서는 36%는 국부해에 수렴하는 문제가 발생한다.

이 rastrigin함수를 Fig. 2에 나타내었으며 총 120여개의 국부 최소해를 가지며 중간에 단 한개의 전역해(0)를 가지는 함수이다. EGA와 제안된 조합알고리즘을 비교하여 Table 2에 정리하였다. GA의 주요 파라미터(세대수, 교차율, 개체수)를 변경시키면서 rastrign 함수에 대한 전역해 탐색 성공율을 비교하였으며, ASA알고리즘의 파라미터들은 기준 설정값(defaults)값들을 그대로 사용하였다. EGA만을 사용한 경우에는 파라미터를 변화시키며 계산시간이 늘어나도 성공률의

Table 1 Comparison EGA with ASA to test function

	ASA		EGA	
	Func. call	Value	Func. call	Value
func. 1	1338	-19.09172	1376	-19.09172
func. 2	1327	-186.73091	1539	-186.73090
func. 3	1376	-1.95848	1283	-1.95648
func. 4	1396	-0.11631	1765	0.0000
func. 5	1347	0.07034	1737	0.0000 (64%)

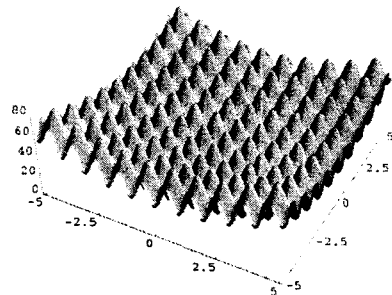


Fig. 2 Test function 5 (Rastrigin function)

Table 2 Comparison EGA with hybrid algorithm

	Gen. No	Cross Ratio	Pop. No.	Success(%)	func. call
EGA only	70	60	60	76	8400
	50			70	6000
	30			74	3600
	20			64	2400
	15			63	1800
	15	60	100	74	3000
Hybrid (EGA+ASA)	20	50	60	97	3200
	15	60		97	2600
	10	50		94	2300
		60		98	2300
		70		96	2300
	50	60		98	7300

큰 향상을 없음을 알 수 있으며, 이러한 다봉성의 문제에서는 GA를 이용하면 실패할 확률이 높음을 알 수 있다. 반면, 제안된 조합알고리즘을 이용한 경우에는 보다 적은 시간내에 95%이상의 전역탐색의 성공률을 보여주고 있다. 실제로 많은 공학 문제는 대부분 다변수 최적화문제이기 때문에 그 목적함수의 형상 즉, 얼마나 많은 국부최소해가 존재하는지를 예상할 수 없음을 감안할 때, 이러한 전역해의 탐색능력의 향상은 최적화 문제에서 매우 중요한 부분이라고 할 수 있다.

### 3. 베어링 파라미터의 규명

#### 3.1 수학적 해석 모델

통상 회전축의 진동해석은 디스크와 축 및 베어링으로 구성된 유한요소법을 이용하며, 다음식과 같이 선형의 운동방정식으로 정식화된다.<sup>(14)</sup>

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (2)$$

여기서  $M$ 은 질량행렬,  $C$ 와  $K$ 는 베어링 동특성계수가 포함된 감쇠 및 강성행렬이고, 자이로스코픽행렬은 감쇠행렬  $C$ 에 포함된다.  $F$ 는 가진력으로서, 불평형에 의한 외력은 주기 외력으로 표현되고 비동차해를 풀이하면 불평형응답이 구해진다.

#### 3.2 최적화문제의 정식화

측정된 불평형응답을 이용한 베어링 동특성계수의 규명을 위한 최적화는 아래와 같이 정식화 될 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Objective : } & \text{Minimize } F(x) = (U_{\text{measured}} - U_{\text{analysis}}) \\ \text{Subject to : } & x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \end{aligned}$$

여기서  $U_{\text{measured}}$ 는 측정된 불평형 응답이고,  $U_{\text{analysis}}$ 는 해석에 의해 구해진 응답이며, 설계변수  $x_i$ 는 베어링의 동특성계수들( $k_{xx}, k_{yy}, k_{zz}, c_{xx}, c_{yy}, c_{zz}$ )과 불평형 등과 같은 규명하고자 하는 파라미터들이다.

#### 3.3 수치해석 예

본 방법의 유용성을 확인하기 위해 먼저 간단한 모델<sup>(15)</sup>로서 베어링 동특성계수를 추정하였다. 대상 모델을 Fig. 3에 나타내었으며, 총 13개의 유한요소와 3개의 디스크를 가지며 양단에 베어링으로 지지되어 있으며, 베어링은 비동방의 강성계수와 감쇠계수를 가지며, 연성항(coupled term)은 없다. 원 모델의 강성계수는  $k_{xx}=5e7$  N/m,  $k_{yy}=7e7$  N/m와 감쇠계수는  $c_{xx}=5e3$  N·s/m,  $c_{yy}=7e3$  N·s/m이며, 불평형량은 두 번째 디스크에  $2 \text{ g} \cdot \text{mm}$  부가되었다.

이 수치 해석모델에 대해서 0rpm에서 15000rpm까지의 2번결점과 12번 결점에서의 수직, 수평의 응답을 측정된 값으로 가정하여 원래의 강성계수와 감쇠계수 및 불평형량을 제대로 추정하는지를 시뮬레이션하였다. 그 결과를 Table 3에 정리하였으며, 각 최적화단계후의 결과값과 최종 결과값 기준값과 함께 나타내었다. 강성, 감쇠계수 및 불평형량이 정확하게 규명됨을 확인할 수 있으며, GA보다는 SA단계에서 보다 전역해에 근접한 값을 탐색하는 것을 알 수 있다.

#### 3.4 실험적 검증

실험장치는 Bently-Nevada사의 Rotor-Kit을 이용하였으며, Fig. 4에 실험장치의 구성도를 나타내었다. 양측 베어링은 깊은 홈 볼베어링(6200)으로 지지되고, 구동축과는 유연

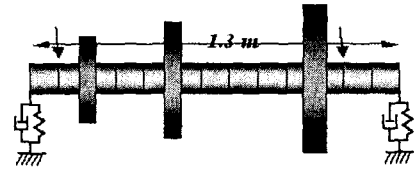


Fig. 3 Test model for numerical simulation

Table 4 Simulation results for test model

	Kxx	Kyy	Cxx	Cyy	$U_6$	$F(x)$	func. call
Refer. value	5e7	7e7	5e3	7e3	2e-4		
GA	2.254e7	6.196e7	1.986e4	1.396e4	1.96e-4	1.053e1	2401
SA	4.499e7	7e7	4.998e3	6.99e3	2e-4	2.28e-3	5460
Final	5e7	7e7	5e3	7e3	2e-4	4.3e-12	6178

커풀링으로 연결되며, 축의 직경은 10mm, 길이는 560mm이다. 볼베어링으로 지지되었기 때문에 낮은 감쇠로 인해서 위험속도 통과시 진폭이 과대하게 되어 미리 정밀하게 평형잡이 작업을 수행하였으며, 최종 잔류불평형량은  $1.02 \text{ g} \cdot \text{mm}$ 로 측정되었다. 레이저변위계로서 수직방향, 수평방향의 축진동 신호를 취득하고 회전체 전용 신호처리틀인 108DAI(Bently-Nevada)로서 데이터를 취득하고, ADRE for Windows(Bently-Nevada)를 이용하여 분석하였다. 4000 rpm에서 감속하면서 위험속도를 통과하여 데이터를 취득하였으며, 1X 필터링된 데이터를 응답으로 이용하였다. 최적화문제의 정식화는 아래와 같이 설정하였다.

Objective function : Minimize

$$F(x) = \sum_{\Omega} |U^X(\Omega) - U_{12}^A(\Omega)|$$

Design variables :  $k_{xx}, k_{yy}, c_{xx}, c_{yy}, \bar{u}_d$

Constraints :

$$10^4 \leq k_{xx}, k_{yy} \leq 10^7$$

$$10^0 \leq c_{xx}, c_{yy} \leq 10^4$$

$$10^{-7} \leq \bar{u}_d \leq 10^{-3}$$

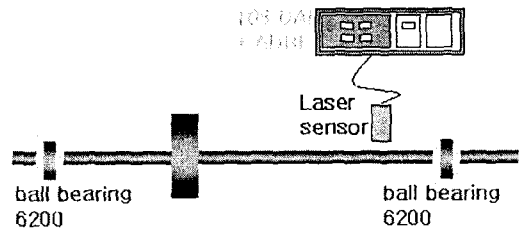


Fig. 4 Test rig

여기서,  $U^X$ 는 수평, 수직방향의 측정된 응답이며,  $U^A$ 는 해석적으로 구해지는 수직, 수평방향의 불평형응답을 나타낸다. 하첨자 12는 측정된 위치에 해당되는 해석모델의 노드를 의미한다. 목적함수는 측정점에서의 실험적인 진폭과 해석적 진폭의 차이의 합을 최소화하는 것으로 설정하였다. 지지부를 포함한 볼베어링의 강성과 감쇠계수 및 원판위치에서의 불평형량을 설계변수로 설정하였으며, 설계변수에 대한 최대·최소값의 구속조건을 설정하였다.

본 실험모델에 대한 최적화 결과를 Table 5에 정리하였다. 총 불평형응답 해석 루틴의 호출 횟수는 8500번이며, GA와 SA 및 국부탐색에 비슷한 시간이 소요되었고, 각 알고리즘 후의 목적함수값의 변화가 크게 없는 것으로 보아 비교적 완만한 기울기를 갖는 함수임을 예상할 수 있다.

정상상태에서의 모드시험을 통해서 구한 고유진동수로부터 역추정된 지지부의 강성계수는  $k_{xx}=9.76e5$  N/m,  $k_{yy}=1.73e5$  N/m였으며, 최적화에 의해 추정된 값이 비교적 근사한 값을 가짐을 알 수 있다. 일반적으로 볼베어링의 감쇠값은 0으로 해석하거나 강성값의 비율로서 가정하는 것이 일반적이지만, 본 규명 결과 1000 N·s/m 정도의 값이 얻어졌으며, 이는 볼베어링의 윤활제에 의한 감쇠뿐만 아니라 재료의 내부감쇠나 마찰 등의 요인들도 모두 포함된 등가 점성감쇠계수로 사용할 수 있을 것이다. 불평형량의 크기도 비교적 근사하게 추정함을 확인하였다.

Fig. 5에 측정된 수직방향의 응답진폭과 최적화된 파라미터로서 계산된 응답을 비교하여 나타내었다. 위험속도 이하에서는 비교적 실측치와 비슷한 값을 가지지만 위험속도 이상에서는 약간 씩 오차가 커지는 경향을 파악할 수 있다. 이의 원인으로는 지지부의 동특성계수들이 회전수의 증가에 따라 조금씩 변화하는 값을 가지거나, 위험속도를 통과할 때의 큰 과도적 진동 때문에 시스템의 결합조건 등이 바뀌거나 변화한 것으로 추정되며, 이 부분에 대해서는 좀 더 다양한 모델로서 보완 연구를 해야 할 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 기존의 전역 탐색알고리즘인 GA와 SA 및 국부 탐색 알고리즘인 Simplex법을 결합한 조합알고리즘을 제안하였고, 시험함수를 통해서 전역탐색 성능의 우수함을 확인하였다. 최적화 기법을 이용하여 측정된 불평형응답으로부터 베어링 파라미터 및 불평형의 크기를 규명하는 방법론을 제시하고 수치실험을 통해서 유용성을 확인하였다. 또한 실험적 검증용을 위해 실험장치를 구성하고, 측정된 보드선도 데이터를 이용하여 구름 베어링을 포함한 지지부의 동특성계수와 불평형의 크기를 파라미터 규명해본 결과, 비교적 정확하게 추정함을 확인하였다.

Table 5 Identification results for test rig

	Kxx	Kyy	Cxx	Cyy	$U_6$	F(x)	fun. call
GA	1.91e4	2.14e5	1.11	7.69e2	9.2e-5	2.5e-3	2408
SA	9.43e5	1.75e5	1.67e3	8.22e2	9.9e-5	2.3e-3	5467
Final	9.55e5	1.79e5	1.59e3	8.49e2	9.7e-5	2.2e-3	8468

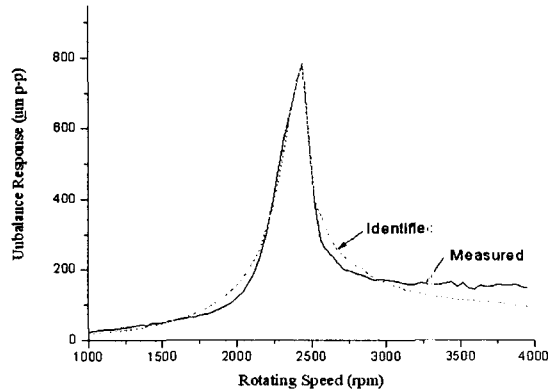


Fig. 5 Measured and identified unbalance response

#### 참고 문헌

- (1) Choi, B. G. and Yang, B. S., 2000, "Optimum Shape Design of Shaft Using Genetic Algorithm," Journal of Vibration and Control, Vol. 6, No.1, pp. 207-22
- (2) R.I. Levin and N. A. J. Lieven, 1998, "Dynamic Finite Element Model Updating Using Simulated Annealing and Genetic Algorithms" Mechanical systems and Signal Processing, Vol. 12, No. 1, pp.91-120
- (3) P.G. Morton, 1971, "Measurement of the Dynamic Characteristics of Large Sleeve Bearings", Trans. of ASME, Journal of Lubrication Technology, Vol. 93, pp.143-150
- (4) J. Kraus, J. J. Blech and S. G. Braun, 1987, "In Situ Determination of Rolling Bearing Stiffness and Damping by Modal Analysis", Trans. of ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, Vol. 109, pp. 235-240
- (5) J. H. Chen and A. C. Lee, 1997, "Identification of Linearised Dynamic Coefficients of Rolling Element Bearings.", Trans. of ASME, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 119, pp.60-69

- (6) R. Tiwari and N. S. Vyas, 1995, "Estimation of Nonlinear Stiffness Parameters of Rolling Element Bearings from Random Response of Rotor Bearing Systems," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 187, pp.229-239
- (7) R. Tiwari etc, 2002, "Identification of Speed-dependent Bearing Parameters", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 254, No. 5, pp.967-986
- (8) 홍성욱 등, 1992, "회전체 베어링계의 불균형응답 간접 추정과 베어링 매개변수 규명", *한국소음진동공학회지*, Vol. 2, No. 3, pp. 193-20
- (9) 이경백 등, 2001, "궤도형상 데이터를 이용한 베어링 파라미터 규명", *한국정밀공학회 추계학술대회논문집*, pp. 300-304
- (10) 김영찬 등, 2002, "전역 및 국소 최적화탐색을 위한 향상된 유전알고리즘의 제안," *대한기계학회논문집 A권*, 제 26권 6호, pp. 1008-1015
- (11) 김영찬 등, 2002, "조합 유전 알고리즘을 이용한 증기 터빈 회전체-베어링 시스템의 최적설계," *한국소음진동공학회논문집* 제 12권 5호, pp.380-388
- (13) L. Ingber and B. Rosen, 1992, "Genetic Algorithms and Very Fast simulated Re-annealing: a Compariosn", *Mathl. comput. Modelling*, vol. 16, pp.87-100
- (12) L. Ingber, 1989, "Very Fast Simulated Re-Annealing", *Mathl. comput. Modelling*, Vol. 12, pp. 967-973
- (14) H. D. Nelson, 1980, "A Finite Rotating Shaft Element Using Timoshenko Beam Theory", *Transaction of the ASME, Journal of Mechanical Design*, Vol.102, pp. 793-803
- (15) M. Lalane, G. Ferraris, 1990, *Rotorodynamics Prediction in Engineering*, WILEY.