

# Impact를 이용한 정밀 고속 회전체 불평형 보정

## Correction of mass imbalance of a high precision rotor

이상봉\*·인용석\*·구자춘†·오동호\*\*·김하용\*\*\*·이호성\*\*

S.B. Lee, Y.S. Ihn, J.C. Koo, D.H. Oh, H.Y. Kim, H.S. Lee

**Key Words** : Unbalance(불평형), Compensation(보정), High Precision Rotor (고속 정밀 회전체)

### ABSTRACT

The unbalanced mass of a high precision rotor deteriorates mechanical performance of the rotor. The geometrical center of a rotor generally corresponds to the rotational axis of the rotor. However, this alignment carried out with a stationary rotor does not guarantee the dynamic rotor balance. There have been a number of schemes for the correction of the imbalance published for decades especially in the hard drive industry where the issues are directly affecting manufacturing costs and product performances. Realizing the significance of the problem, the present work tries to refine one of the methods that works by applying external impact during a rotor spins. A systematic way to apply the external impact to a rotating rotor has been introduced to minimize imbalance correction process time.

### 1. 서 론

축의 회전은 많은 기계의 움직임에서 필요 불가결한 것 중에 하나이다. 시대가 발전해감에 따라 축의 회전속도가 점점 빨라지게 되고 현재에는 수천~수만 rpm 이상의 회전 속도가 사용되는 곳을 찾는 것이 그렇게 어렵지 않다. 회전속도가 빨라진다는 것은 회전체의 무게중심과 회전중심이 이 조금만 다르거나 수 그래프의 질량 불균형이 존재할 경우에 무시하지 못할 정도의 큰 힘이 법선방향(축에 수직 방향)으로 나타나게 된다. 그로 인해 단기적으로 진동, 소음이 나타나게 되고 장기적으로는 수명 단축과 같은 좋지 않은 결과가 나타나게 된다.

불평형을 보정하는 방법은 편심되는 방향의 축을 얇게 잘라 내거나 또는 편심 반대 방향에 Counter Mass를 더하는 방식은 가장 일반적인 방식이다. 축에 회전체가 맞물려서 회전하는 방식 또한 많은 부분에서 사용되고 있는데 이런 경우 축이 아닌 회전체를 조금씩 가공하여서 편심을 잡아

주게 된다. 하지만 이렇게 절삭 또는 질량을 더하여 주는 방법은 한계점을 가지게 되는데 걸 표면을 가공한 축이나 회전체의 가공은 그 물체의 전체적인 특성을 변화시킬 수 있기 때문이다.

보정하는 방법에 대한 연구는 주로 하드디스크 쪽에 많은 연구가 되고 있는데 이것은 하드디스크의 회전속도가 큰 만큼 작은 불평형에도 큰 문제를 발생할 수 있기 때문이다. 일반적으로 디스크의 중심과 회전축의 중심을 맞춘 후에 조립하는 방식을 사용한다[1][2][3]. Branislav Hredzak는 회전축을 8등분하여 각 방향마다 steel ball을 넣고 불평형에 맞추어 electromagnetic device를 이용하여 위치를 보정하는 방법을 사용했다[4]. 하지만 회전체(디스크)의 중심과 무게 중심점이 완벽하게 동일 할 수 없고, 회전축에 임의의 가공을 해야 하기 때문에 복잡한 형태나 또 다른 불평형을 가져올 수 있다.

이에 본 연구에서는 회전체가 회전축에 마찰로 맞물려 같이 회전하는 경우에 회전축에 순간적인 Impact Force를 주어 회전체는 제자리에 있고 회전축만 이동을 하게 하는 방식의 불평형 보정방법의 가능성에 대해 설명 및 검증하고자한다[5][6].

† 책임저자, 정회원, 성균관대 기계공학부  
E-mail : jckoo@skku.edu  
Tel : (031) 290-7454, Fax : (031) 290-5849

\* 성균관대학교 기계공학과  
\*\* 삼성전자

### 2. 불평형량의 다물체 동역학 해석

Imbalance에 의한 문제는 회전 속도에 따라 법선 방향으

로 생기는 Force가 지속적으로 회전축에 무리를 주게 되는 것이다. 이것은 회전축의 상태에 따라 휨이나 마모 등의 현상을 야기하게 되고 소음, 진동의 커다란 원인이 된다. 여기서는 임의의 모델을 다물체 동역학 해석 프로그램인 Adams를 이용하여 시뮬레이션 해보고 임의의 모델에서 편심에 따른 Imbalance의 양을 회전축의 중심과 회전체의 중심 간의 거리량으로 측정한다. 그리고 연산을 통하여 이론의 타당성을 검증하려한다[7][8].

## 2.1 Modeling

### (1) Model의 가정

- 적절한 Modeling 을 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.
- 물체는 강체로 가정한다.
  - 마찰계수는 0.44, 질량은 Adams의 채택 값을 사용한다.
  - Impact Force는 0.0008s 동안 입력되는 사인과 형태의 입력 값을 사용한다.(Fig 2.1 참조)
  - 회전체를 축에 고정시키는 Force(수직항력)는 28N 이다.
  - 축은 3600rpm으로 회전한다.

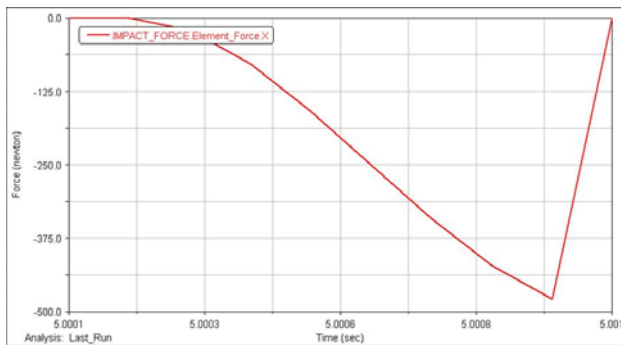


Fig 2.1 Impact Force의 파형

### (2) Modeling

이 모델은 중심축의 중간에 턱이 있고, 이 턱에 중심축보다 내경이 조금 더 큰 회전체가 걸쳐져 있다.(Fig-2.2 참조) 그 회전체 위에 매우 얇고 작은 디스크를 올리고 이 디스크에 중력방향으로 지속적인 힘을 입력하여, 턱과 큰 디스크 사이에 마찰력이 생기도록 모델링하였다. 작은 디스크는 축에 고정되어 축방향으로만 움직일 수 있게 모델하여, Impact 이후에 회전체에 생기게 될 변수를 최소화했다. Impact Force는 스프링, 템퍼방향으로 반대쪽에서 입력하게 하였다.

### (3) Simulation

일반적으로 회전축과 회전체의 내경의 공차가 그렇게 크지 않은 것이 일반적이므로 공차는 0.02mm 정도라고 가정하고, 회전체의 중심을 축의 중심에서 0.02mm 떨어져 있게 하여 불평형이 일어나게 했다. 불평형량이 Impact 되는 위치의 반대방향에 위치하였을 때 Impact Force로 450N을 입력한 그래프는 Fig 2.3과 같다.

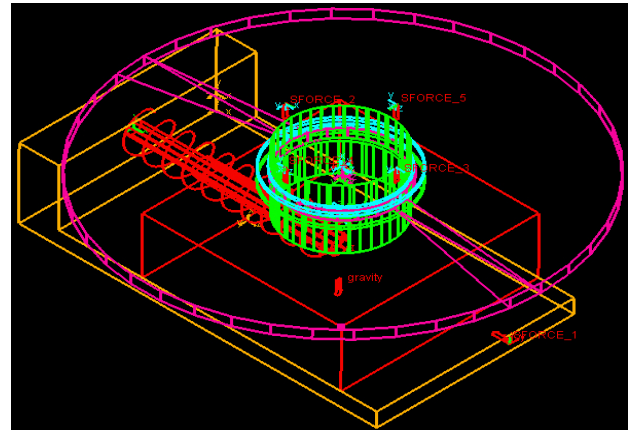


Fig 2.2 Adams를 이용한 Modeling

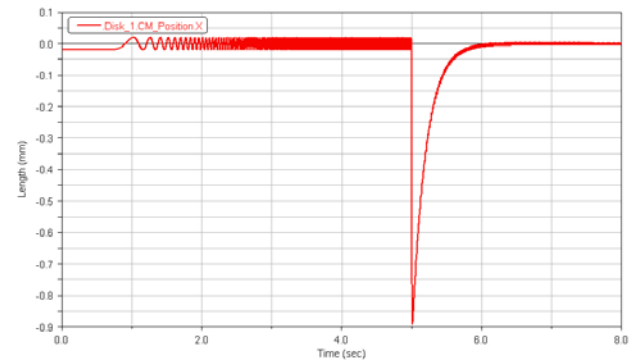


Fig 2.3 Impact 후의 편심 위치 변화

그래프의 x축은 시간이고, y축은 변위를 나타낸다. 초기에 0.02mm ~ -0.02mm 사이를 오가는 형태의 그래프가 나타나는데 이것은 기준좌표계에서 바라본 회전체의 중심의 변화량이다. 다시 말해서, 기준중심에서 0.02mm 편심되어 있는 회전체의 중심이 기준중심을 중심으로 회전하는 형태가 되면서 이러한 형태의 그래프가 나타난다. 그 이후에 Impact Force와 스프링 템퍼에 의해 순간적으로 큰 움직임을 한번 보이고 나서 기준중심과 회전체의 중심차가 크게 줄어들었음을 볼 수 있다. Impact 후의 편심량은 0.0029mm로 85.5%가 감소했음을 알 수 있다.

## 2.2 연산을 통한 Simulation의 증명

## (1) Impact Force에 의한 Model 전체의 가속도

Fig 2.1에서 나타난 형태의 Force가 입력될 경우에 Model 전체에 입력되는 가속도를 구해보았다. Impact에 의해 움직이는 전체 시스템의 질량은 0.3975kg 이다. Newton의 제2법칙을 이용하면 Impact Force가 450N 일 때의 가속도  $a_{max}$ 는  $1131.97m/s^2$ 이 된다. 단순하게 연산된  $a_{max}$  값은 Runge-Kutta Method를 이용하여 검증하였을 때, 0.1% 이하의 오차율을 보였다[9]. 이것은 Impact가 순간적이기 때문이다.

입력되는 Force에 의한 가속도를 간단한 식으로 나타내기 위해서 초기가속도 0을 최소값, 최종가속도  $1131.97m/s^2$ 을 최대값으로 갖는 3차방정식으로 가속도의 그래프를 공식화 해보면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$a = -4.4217 \times 10^{12}t^3 + 5.3061 \times 10^9t^2 \quad (1)$$

$$v = -1.1054 \times 10^{12}t^4 + 1.7687 \times 10^9t^3 \quad (2)$$

$$s = -0.2211 \times 10^{12}t^5 + 4.4217 \times 10^9t^4 \quad (3)$$

## (2) 마찰력의 고려

Impact에 의한 가속도가 마찰력에 의한 가속도를 넘어서야 회전체와 축 사이에 슬립이 일어나게 되므로 먼저 마찰력에 의한 가속도를 구한다. 초기 가정에 의하면 수직 방향의 힘은 28N이고, 마찰계수는 0.44 이므로 다음 식으로 간단하게 마찰력을 구할 수 있다.

$$f = \mu N = 0.44 \times 28 = 12.32N \quad (4)$$

슬립이 일어나서 움직이게 되는 것은 회전체 이므로 회전체의 질량인  $2.09967 \times 10^{-2}kg$ 을 이용하여 슬립이 일어나기 시작하는 가속도  $a_D$ 를 구하면 다음과 같다.

$$a_D = \frac{f}{m_D} = 586.75m/s^2 \quad (5)$$

이는 Impact에 의한 가속도가  $a_D$ 보다 커지는 순간부터 슬립이 일어난다는 것이다. 그러므로 식 (1)에서 구한  $a$ 에  $a_D$ 를 대입하여 슬립이 일어나는 시간을 구하면, 0.0004098 s를 구할 수 있다. 이것으로 Impact에 의해 슬립이 0.0004098~0.0008s의 시간동안 일어난다는 것을 알 수 있다. 이를 이용하여 (1)절에서 구한 가속도, 속도, 변위의 식을 0.004098s에 초기가속도가 0인 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$a_f = -4.4217 \times 10^{12}t^3 - 1.2983 \times 10^8t^2 + 2.1212 \times 10^6t \quad (6)$$

$$v_f = -1.1054 \times 10^{12}t^4 + 0.4328 \times 10^8t^3 + 1.0606 \times 10^6t^2 \quad (7)$$

$$s_f = -0.2211 \times 10^{11}t^5 + 0.1082 \times 10^8t^4 + 0.3535 \times 10^6t^3 \quad (8)$$

최종적으로 Impact Force에 의해 슬립이 일어나는 변위량  $s_{max}$ 는 0.0187mm 라는 것을 도출해낼 수 있다.

## 2.3 해석과 연산의 비교

Imbalance 변위량의 변화는 동일한 초기 편심량인 0.02mm로 시작하였을 시, Adams에서는 0.0029mm로 감소하였고, 연산 상에서는 0.0013mm 로의 감소하였다. 감소량에서 약간의 차이를 보이고 있는데 연산 상에서 최대한 단순화한 상태에서의 값이기 때문에 거의 유사한 값으로 보아도 무방할 것이다.

## 3. 하나의 회전체를 갖는 회전축의 Imbalance 보정

하나의 회전체를 갖는 회전축에 Imbalance를 최소화 한다. 기본 가정은 2.1절에서와 동일 가정을 사용하였고, 모델 또한 Fig 2.2의 모델을 이용하여 Impact를 입력한다. Fig 3.1를 보면 알 수 있듯이 하나의 회전체를 가질 경우에는 몇 번의 Impact Force만으로 보정이 가능하다.

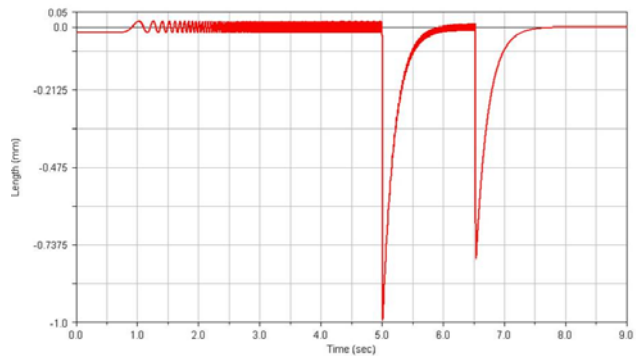


Fig 3.1 하나의 회전체를 가진 축의 Imbalance 보정

초기의 편심량은 0.02mm이고 두 번의 Impact후의 편심량은  $10^{-5}mm$  이하로 나타났다.

## 4. 두개의 회전체를 갖는 회전축의 Imbalance 보정

두 개의 회전체가 동일한 조건을 가질 경우 해석이 단순해지기 때문에 마찰계수가 다른 두 개의 회전체를 가지는 회

전축을 Modeling 한 후에 Imbalance를 보정하는 방법을 찾아보려고 한다. Fig 2.2의 모델에 동일한 질량을 가진 하나의 회전체를 더 추가하여 Fig 4.1 과 같이 모델링 하였다.

두 개의 회전체는 회전축에 따로 따로 고정되어 있고, 고정을 위해 입력되는 Force는 동일하다. 그리고 Dual-Plane으로의 구현을 위해 마찰계수를 다르게 하였는데 위쪽 회전체는 0.44를 아래쪽 회전체는 0.36으로 가정하였다.

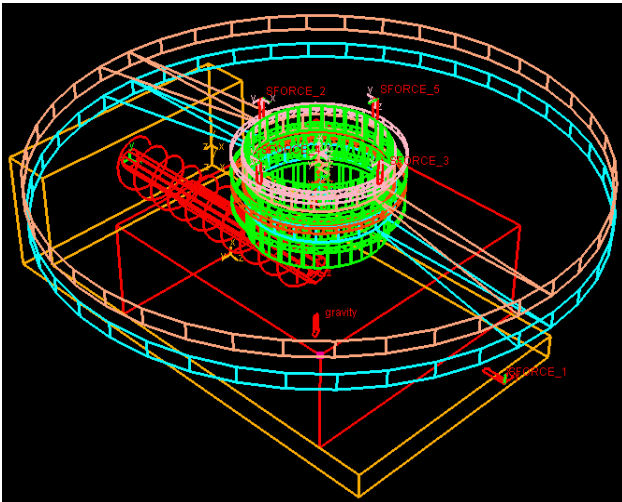


Fig 4.1 두 개의 회전체를 가진 회전축

### (1) 보정 방법에 대한 알고리즘

두 회전체의 마찰계수가 다르기 때문에 편심량이 같은 상태에서 Impact를 입력하여도 보정량이 다를 것이라는 것은 당연한 것이다. 또한, Impact에 따라 움직이는 양이 다르기 때문에 두 회전체의 편심방향 사이에는 위상차가 존재하게 된다. 그렇기 때문에 완벽하게 보정할 수 있는 알고리즘을 구현 할 수는 없었고, 상황에 따라서 어느 곳에 Impact를 주는 것이 가장 현명한 것인가에 대해서 간단히 설명하고자 한다. 편심되어있는 회전체와 회전축을 Fig 4.2에서 보는 것과 같이 알기 쉽게 재모델링 하였다.

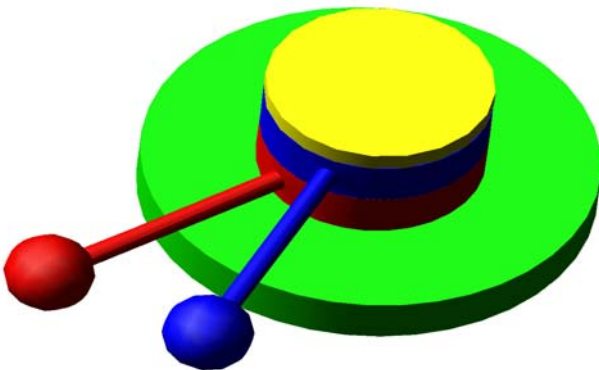


Fig 4.2 두 개의 회전체를 가지는 회전축의 재모델링

여기에서 붉은 구와 푸른 구는 각 회전체가 편심되었을 때 편심에 의해 나타나는 편심 질량을 나타내고, 구에 연결되어있는 축은 회전축의 중심에서 편심된 회전체의 중심까지의 거리이며 구는 회전체의 축에 회전에 따라 회전한다고 가정하였다. 이 모델을 기본으로 하여 편심량과 위상차에 따른 Impact의 위치에 대한 것을 설명하고자 한다.

### (2) 편심량과 위상차를 줄이기 위한 알고리즘

두 회전체의 마찰계수가 다른 만큼 각각의 편심량과 회전체 사이의 위상차는 Imbalance보정에 많은 영향을 준다. 또한 Impact에 의해 위상차와 편심량이 반비례하는 관계를 보이기 때문에 적절한 위상차보정과 편심보정을 병행하여 최종적으로 원하는 0에 가까운 편심 보정을 목표로 하였다.

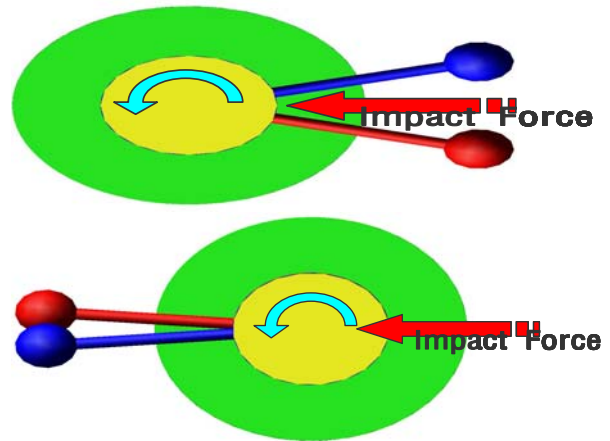


Fig 4.3 위상 보정과 편심 보정

Fig 4.3의 첫 번째 그림에서처럼 편심방향이 Impact 위치 앞에 왔을 때 위상차의 중간부분에 Impact Force를 입력하면, 두 회전체 사이의 위상차가 줄어든다. 이것은 중심축이 왼쪽으로 이동하기 때문이다. 그렇지만 그로 인해 편심량이 커지게 된다. Impact의 방향이 편심을 크게 만드는 방향이기 때문이다. 반대로 아래의 그림처럼 편심방향이 Impact 위치의 반대일 경우에 Impact를 입력하면, 편심량의 감소를 확인할 수 있지만 대신에 위상차가 증가하게 된다.

위상차를 보정하는 방법은 한 가지 방법이 더있는데 Fig 4.4에서 보는 것처럼 위상의 방향과 Impact의 위치가  $\pi/2$ 를 이루었을 시에 Impact Force를 입력하는 것이다.

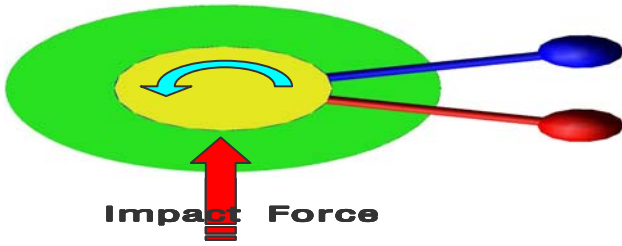


Fig 4.4 위상 보정

이 방법은 위상차를 미세하게 조절할 때에 사용하면 매우 유용한 방법이며, 편심량의 증가가 첫 번째 방법에 비해 적다는 장점도 가진다. 하지만 큰 위상차를 보정해주지는 못하는 단점이 있다.

#### 4. 결론

대부분의 회전체의 불평형을 보정할 때 현재 상태에서 질량을 깎아 내거나 덧붙이는 방식의 불평형 보정을 해왔다. 하지만 회전체에 변형을 주면 안 될 경우에는 이 방법들을 사용할 수가 없다.

본 연구에서는 회전체가 회전축과 마찰로 묶여서 회전할 시에 축에 순간적인 Impact를 입력하여 마찰력을 이겨내고 회전축이 움직이게 하여 회전체와 회전축의 중심을 맞추는 방식의 불평형 보정 방법에 대하여 알아보았다.

동역학 해석프로그램인 Adams를 이용한 이론의 검증과 단순화된 수식으로의 연산으로 검증하여 이 이론이 타당하다는 것을 증명하였다.

두 개의 회전체를 보정할 때, 마찰계수가 다를 경우 상황에 따른 Impact의 위치를 개략적으로 설명하여 Dual Plane에서도 사용이 가능할 것이라는 가능성을 제시하였다.

단순화된 수식으로의 검증에 좀 더 보강이 필요할 것이고, Dual Plane 상황에서 불평형을 보정하는 방법에 대한 것의 연구가 계속 될 것이다.

#### 후 기

본 연구는 삼성전자주식회사의 지원으로 이루어졌습니다.

#### 참 고 문 헌

(1) Hiroshi Kawaguchi, Shizuo Yamazaki, Makoto Horisaki, Katsumi Watanabe, Kenji Tomida, Kusagaya, 2005, "Servo Pattern Writing Method and Apparatus Thereof", U. S. Patent 6,947,244

(2) Lealon R. McKenzie, Robert D. Murphy, 2002, "Method and Apparatus for Minimizing once per Revolution Positional Errors in a Disc Drive", U. S. Patent 6,421,199

(3) Keiko Watanabe, Tetsuya Hamaguchi, Takashi Matsuki, Shizuo Yamazaki, 2005, "Method for Assembling Disc Apparatus", U. S. Patent 6,839,956

(4) Branislav Hredzak, Guoxial Guo, 2006, "New electromechanical balancing device for active imbalance compensation", Journal of Sound and Vibration 294, pp. 737-751

(5) Toshiki Hirano, 2001, "Method for Adjusting Rotation Balance of Disk and Device for the Same", U. S. Patent 6,189,371

(6) Peter Everett Brooks, Lance Allen Gabrielson, 2000, "Method of Centering a Disk Pack of a Disk Drive", U. S. Patent 6,101,876

(7) "Basic ADAMS Full Simulation Training Guide", MSC Software

(8) "Learning ADAMS/View Basics", Msc Software

(9) Robert W. Hornbeck, 1975, Numerical Methods, QUANTUM PUBLISHERS, Inc., New York