

## 동등체적을 갖는 중공축의 변위거동 안전성에 관한 유한요소해석

김청균

홍익대학교 트리보·메카·에너지기술 연구센터  
(2015년 12월 28일 접수, 2016년 6월 27일 수정, 2016년 6월 28일 채택)

### Finite Element Analysis on the Displacement Behavior Safety of Hollow Shafts with Equivalent Volume

Chung Kyun Kim

Research Center for Tribology, Mechatronics and Energy Technology  
Hongik University, Seoul 121-791, Korea

(Received December 28, 2015; Revised June 27, 2016; Accepted June 28, 2016)

#### 요약

본 연구에서는 여러 가지의 절단면 형상을 구비한 중공축이 동등한 체적을 갖는 경우에 대한 변위거동 안전성을 유한요소법으로 해석하였다. FEM 해석결과에 의하면, 외측튜브, 중간튜브, 내측튜브와 이들 튜브 사이를 연결하기 위해 X-타입 또는 Y-타입의 칼럼을 설치하였을 때 중공축 길이의 중간부에서 발생하는 최대 변위량을 줄여주는 것으로 나타났다. 특히, 하중을 지지하기 위해 구비된 X-타입 또는 Y-타입의 칼럼을 위상차 없이 외측튜브와 내측튜브를 중심축을 향해 직접 연결하면 중공축의 변위량을 줄이는 효과가 있는 것으로 나타났다. 그리고 동등한 체적을 갖는 중공축에서 발생하는 수직 변위량을 줄여주고, 변위거동 안전성을 높이기 위해서는 하중을 지지하기 위한 칼럼의 두께를 두껍게 설계하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

**Abstract** - This paper presents the displacement behavior safety of hollow shafts with an equivalent volume for various cross sectional area using a finite element method. The FEM results indicate that the hollow shafts with X-type or Y-type columns between outer tube, middle tube and inner tube may reduce a maximum displacement at the middle length of hollow shafts. Especially, the load-bearing column of X-type or Y-type hollow shaft is directly connected between outer tube and inner tube without a shift for reducing the vertical displacement. And increased thickness of a load-bearing column is recommended for reducing the vertical displacement and increasing the displacement behavior safety for an equivalent volume of a hollow shaft.

**Key words** : hollow shaft, column, maximum displacement, equivalent volume, FEM

#### I. 서 론

가스터빈이나 송풍기, 압축기 등에서 동력을 전달하기 위해서는 원통형의 회전축 또는 중공축을 사용한다. 이들 회전축은 변형거동, 응력강도 등에 관련된 강도 안전성이 확보되어야 회전하중을 지지하는 베어링의 부하를 줄이면서 전달력을 충분히 확보할 수 있다.

특히 대형 회전축에서는 베어링에 전달되는 회전하중을 줄이기 위한 경량화가 중요한 설계요소이기 때문에 회전축의 절단면을 어떠한 형상의 중공축으로 설계하느냐가 큰 관심사이다.

대형 회전축의 경우 길이의 중간부에서 발생하는 최대 변위량을 줄이기 위해 베어링의 설치간격을 최대한 줄이는 설계를 많이 한다.

최근에 발표한 논문[1]에서는 중공롤러의 중간부에 디스크 형상의 원판을 설치하여 중공롤러의 처짐량을 최대한 줄인 사례가 발표되었다.

<sup>†</sup>Corresponding author:ckkim\_hongik@naver.com  
Copyright © 2016 by The Korean Institute of Gas

따라서 중공축에서 발생하는 최대 변형량을 줄이면서 강도 안전성을 확보하기 위해서는 중공축의 직경과 연결하는 칼럼의 두께를 적절히 조정하고, 축간 거리를 최대한 길게 설계하는 것이 바람직하다.

특히 대형 회전축의 경우는 전력소비를 줄이기 위해 경량화를 추구하면서 강도 안전성을 확보하는 최적설계가 중요하다. 이것을 위해 중공축에서는 직경과 축간거리, 하중 지지용 칼럼의 두께 비율을 최적화하는 설계기술의 극대화를 추구한다. 또 다른 사례에서는 중공롤러의 절단면 형상을 다양하게 변형한 설계 케이스의 변형거동 안전성에 대한 연구결과[2]가 관심을 끈다.

본 연구에서는 중공축에 대한 경량설계 기준을 유지하면서 변형거동 안전성을 FEM[3]으로 해석하고자 한다. 특히 동등한 체적을 갖는 중공축에서 절단면의 형상, 칼럼의 두께와 외경의 크기를 달리한 중공축의 변위거동 안전성을 상대적으로 비교·고찰하고자 한다.

## II. 중공축 설계

회전축의 변형거동 안전성을 높이기 위해서는 직경 대비 축방향의 길이를 짧게 설계하면 된다. 이러한



(a) Hollow shaft



(b) Hollow shaft with a column

Fig. 1. Hollow shaft models.

중공축은 상대적으로 중량이 많이 나가고 축간거리가 짧아짐으로 인해 베어링과 플랜지를 더 많이 설치하는 문제로 회전축의 수평 편위차를 맞추기가 어렵다.

따라서 중공축의 강성도를 확보하기 위해 직경의 크기는 늘리고, 축간거리는 짧게 설계하는 것이 일반적이다. 중공축의 중간부에 디스크 형상의 원판을 설치하는 것도 최대 처짐량을 줄이는데 기여하는 하나의 설계요소이다.

Fig. 1에서는 기존에 많이 사용하는 단순구조의 중공축과 본 연구에서 개발한 복합구조의 중공축 형상 두 가지를 보여주고 있다. Fig. 1(b)에서 보여준 중공축은 외부에서 가하는 하중이 중공축의 전체 구조물에 잘 분산되어 지지되도록 설계한 것이다. Fig. 1에서 보여준 해석모델은 두 가지의 전체체적, 즉 총중량과 중공축의 길이를 동일하게 설계하였다. 따라서 Fig. 1(b)에서 보여준 중공축 모델의 경우를 예로 들어 설명하면 절단면을 구성하는 설계요소인 외경튜브, 중간튜브, 내경튜브, 칼럼의 두께와 배열에 따라서 중공축의 직경과 연결하는 칼럼은 Fig. 1(a)와 같은 기존의 중공축에 비해 중량이 있을 수 있고, 이것을 조절하는 것이 동등한 중량 대비 강도 안전성을 확보하는 것이 핵심 기술이다.

Fig. 1에서 제시한 중공축 설계모델은 압출가공에 의해 제작하는 것이 기계적 강도나 생산성 측면에서 바람직하다.

## III. 해석모델 및 해석조건

### 3.1 해석모델

Fig. 2(a)에서는 단순형의 중공축을 보여주고, Figs. 2(b)~2(h)에서는 외측튜브, 중간튜브, 내측튜브로 구성된 튜브들 사이에 하중을 지지하도록 다양한 형상의 갖는 칼럼을 연결한 구조의 중공축이다. 이 중공축의 외측튜브 또는 내측튜브에 작용하는 회전토크나 굽힘 모멘트와 같은 복합하중이 효과적으로 분산되도록 설계하면 강도 안전성 측면에서 유리한 구조이다.

또한, 중공축 설계에서 동등한 체적 또는 중량을 유지하면서 중공축의 직경과 칼럼의 두께를 조절하는 것이 설계의 핵심 포인트이다. 최상의 중공축은 가벼우면서 강도안전을 확보하는 것이지만, 이들 두 요소는 서로 상반되는 설계인자이다. 그렇지만, 이들 두 요소를 적절히 조화시켜 최고의 강도 안전성을 확보하는 것이 중요하다.

### 3.2 하중조건

중공축에 가해지는 모든 하중은 회전축의 양쪽에 설치된 베어링에 의해 지지되므로 내측튜브를 고정한

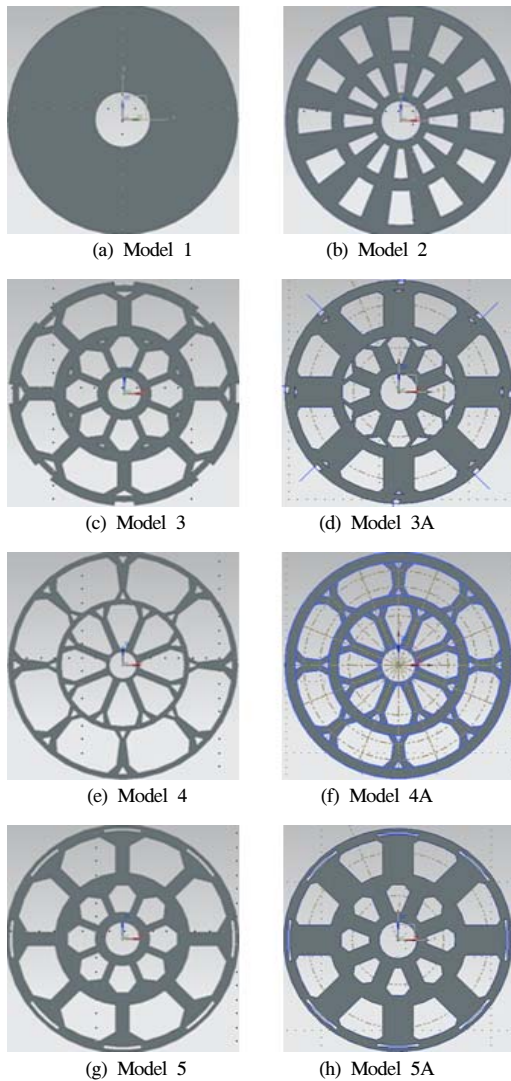


Fig. 2. Hollow shaft models for FEM analysis.

상태로 해석하였다. 또한, 중공축에는 Fig. 3에서 보여준 것처럼 축방향을 따라서 균일하게 작용한다고 가정하고 해석하였다.

중공축의 강도 안전성을 확보하기 위해서는 외측 튜브의 원주면에 가해지는 하중을 중간튜브와 내측 튜브, 칼럼을 통해 잘 분산되도록 설계하는 것이다. 본 해석에 사용한 중공축 소재는 SM45C(ANSI 1045) 강재 [4,5]이다.

Fig. 2에서 제시한 중공축의 외경은 250~423mm로 다르지만, 길이는 1080mm로 같고, 각 모델의 전체 체

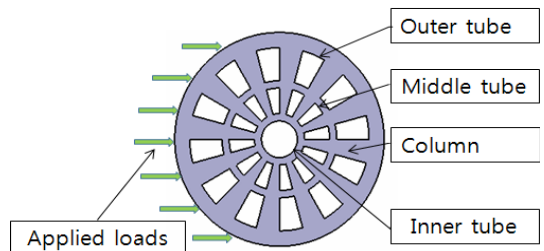


Fig. 3. Applied loads for a hollow shaft model with a column.

적은 42.1~43.6cm<sup>3</sup>으로 거의 동등한 체적을 갖도록 설계하였다.

#### IV. 해석결과 및 고찰

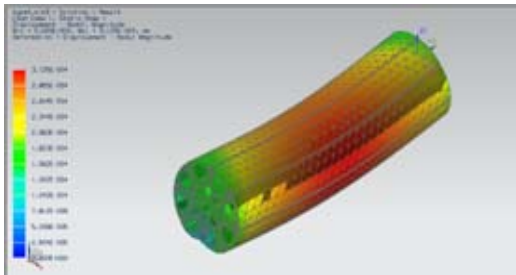
Fig. 4에서 제시한 해석모델의 외경은 300mm로 동일하지만, 체적은 42.1~42.2cm<sup>3</sup>으로 거의 동등한 체적을 갖도록 설계한 중공축이다. 중공축에는 Fig. 3에서 보여준 것처럼 균일하중 100kN을 작용시켰을 때 발생한 변위량 분포도 해석결과를 Fig. 4에서 보여주고 있다.

Fig. 2(d)에서 보여준 모델 3A는 동등한 체적을 갖는 Fig. 2(c)의 모델 3에 비해 외경은 340mm에서 300mm로 줄인 것이고, Y-타입의 칼럼 두께는 두껍게 보강한 수정 모델이다. Fig. 4(a)에서는 두꺼워진 칼럼을 구비한 모델 3A의 변형거동 분포도를 보여준 결과로 최대 변위량 0.313mm는 중공축 길이의 중간부에서 발생한다.

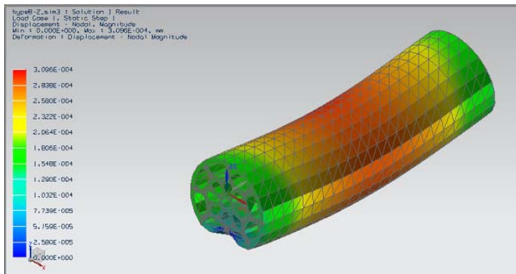
Fig. 2(f)에서 보여준 모델 4A는 동등한 체적을 갖는 Fig. 2(e)의 모델 4에 비해 외경은 423mm에서 300mm로 줄어들었지만, X-타입의 칼럼 두께는 두껍게 보강한 중공축이다. 모델 4A의 변형거동 분포도를 보여준 Fig. 4(b)의 해석결과에 의하면, 모델 4A의 최대 변위량 0.309mm로 모델 3A에 비해 1.3%나 줄어들었다. 이것은 그만큼 강도 안전성이 약간 향상되었다는 것을 의미한다.

Fig. 2(h)에서 보여준 모델 5A는 동등한 체적을 갖는 Fig. 2(g)의 모델 5에 비해 외경은 340mm에서 300mm로 줄어들었지만, Y-타입의 칼럼 두께를 두껍게 설계한 중공축이다. Fig. 4(c)의 해석결과에 의하면, 보강된 칼럼을 구비한 모델 5A의 최대 변위량은 0.306mm로 가장 우수한 해석모델로 나타났다.

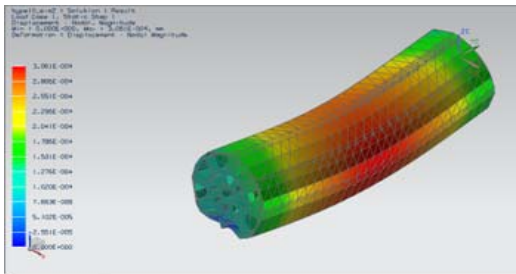
Fig. 4에서 제시한 변위거동 해석결과에 의하면, 동등한 체적을 갖는 중공축에서는 좌굴현상에 영향을 미치는 칼럼의 두께는 가능한 두껍게 설계하는 것이 최대변위 발생량을 줄이는 것으로 나타났다.



(a) Model 3A with modified Y-type column



(b) Model 4A with modified X-type column

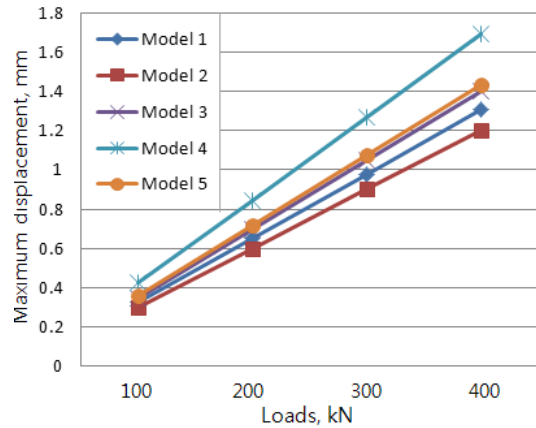


(c) Model 5A with modified Y-type column

**Fig. 4.** Displacement distributions of hollow shaft models with modified X and Y-type columns.

Fig. 5는 Fig. 2에서 보여준 해석모델에서 동등한 체적을 갖지만 직경과 칼럼의 두께를 달리한 중공축 5개 모델에서 발생한 최대 변위량을 제시한 결과이다. FEM 해석결과에 의하면, 대표적인 중공축에 해당하는 모델 1의 직경이 250mm일 때 중공축 길이의 중간부에서 발생한 최대 변위량은 0.326mm이다. 이때 중공축에 가한 하중은 100kN이다.

또한, 모델 2의 경우는 모델 1과 동등한 체적을 갖지만 직경을 250mm에서 288mm로 늘리고 칼럼의 두께를 보강한 경우로 발생한 최대 변위량은 0.3mm로 모델 1에 비해 8%나 줄어들었다. 반면에 모델 4도 모델 1과 동등한 체적을 갖지만 직경은 423mm로 크게 늘어나고, 칼럼의 두께는 상대적으로 줄일 때 발생한 최대



**Fig. 5.** Maximum displacements of hollow shaft models with a thin column.

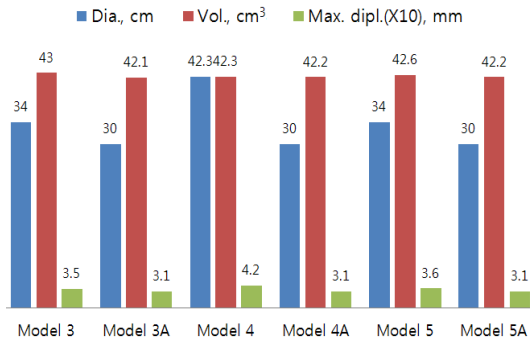
변위량은 0.423mm로 29.7%나 증가하였다. 이것은 직경이 늘어났기 때문에 얇아진 두께의 칼럼에 의해 지지되는 하중이 낮아져 좌굴로 인해 최대 변위량이 증가하면서 강도 안전성은 상대적으로 약화되었다.

Fig. 5에서 보여준 5가지의 모델을 보면, 중공축에 하중이 높게 가해질수록 중공축 길이의 중간부에서 발생하는 최대 변위량은 선형적으로 증가하는 경향을 보여준다. 또한, 중공축의 외측튜브에서 내측튜브로 연결하는 칼럼을 설치할 때 전달되는 하중을 직접 감당할 수 있도록 모델 2처럼 직선적으로 연결하는 것이 바람직하다는 것이다. 그러나 모델 4에서 보여준 모델 처럼 외경은 늘어나고, 칼럼의 두께를 얇게 설계할 경우에는 최대 변위량이 좌굴에 의해 상대적으로 크게 증가한다는 해석결과를 나타내고 있다.

Fig. 6에서는 거의 동등한 체적(42.1~43cm<sup>3</sup>)을 갖는 6개의 모델에 대해 100kN을 가하였을 때 발생한 최대 변위량을 보여주고 있다. 이때 제시한 모델에서는 동등한 크기의 체적을 갖도록 하기 위해 중공축의 외경과 칼럼의 두께를 서로 다르게 설계한 것이다.

Fig. 6의 FEM 해석결과에 의하면, 모델 3의 직경은 340mm이고, 발생한 최대 변위량은 0.349mm이다. 반면에 칼럼의 두께를 두껍게 설계한 모델 3A의 경우는 직경이 300mm로 11.8%나 줄어들고, 발생한 최대 변위량은 0.313mm로 10.3%나 감소한 데이터를 나타냈다. 이것은 칼럼의 두께를 두껍게 보강한 중공축의 강도 안전성은 상대적으로 높아졌다는 것이다.

또한, 모델 4의 직경은 423mm이고 발생한 최대 변위량은 0.423mm이지만, 칼럼의 두께를 두껍게 설계한 모델 4A의 경우는 직경이 300mm로 줄어들고 최대 변위량은 0.309mm로 11.5%나 감소한 결과를 제시하



**Fig. 6.** Maximum displacement and diameter results for an equivalent volume of hollow shaft models with a thin column or a thick column.

였다.

또한, 모델 5의 직경은 340mm이고 발생한 최대 변위량은 0.358mm이지만, 칼럼의 두께를 두껍게 설계한 모델 5A의 경우는 직경이 300mm로 줄어들고 최대 변위량은 0.306mm로 14.5%나 크게 감소한 결과를 보여 준다. 이렇게 줄어든 최대 변위량은 결국 중공축의 변위강도 안전성이 크게 향상되었다는 것을 의미한다.

Fig. 6의 해석결과에 의하면, 동등한 체적을 갖는 중공축은 외경을 줄이고 칼럼의 두께를 두껍게 설계할 경우 외부에서 전달되는 하중에 의한 좌굴발생을 억제할 수 있다. 따라서 두꺼워진 칼럼은 중공축의 처짐량을 크게 줄여줄 수 있기 때문에 회전축의 변형강도 안전성에 큰 기여를 하는 설계변수이다.

## V. 결론

중공축에 작용하는 하중을 분산하여 회전축에 걸리는 최대 변위량을 줄이기 위해 동등한 체적을 갖는 모델 8개에서 발생하는 변위거동 특성을 FEM으로 해석하였다.

해석결과에 의하면, 중공축의 외측튜브에서 내측 튜브로 연결하는 칼럼은 전달되는 하중을 직접 감당할 수 있도록 반경방향을 따라 일직선으로 설치한 모델 2에서 가장 낮은 0.3mm의 최대 변위량이 발생하였다.

따라서 동등한 체적을 갖는 중공축의 변위거동 안전성을 높이기 위해서는 좌굴현상에 영향을 미치는 칼럼의 두께를 가능한 두껍게 설계하는 것이 회전축의 변위 발생량을 줄이는 효과가 높은 것으로 나타났다.

## REFERENCES

- [1] Chung Kyun Kim, "Characteristic Analysis of Displacement Behavior of Hollow Rollers with Cross Sectional Area Profiles", J. of the KIGAS, Vol. 19, No.4, pp.55~61, (2015)
- [2] Chung Kyun Kim, "A Study on the Displacement Behavior Safety of Cylindrical Hollow Rollers", J. of the KIGAS, Vol. 18, pp.41~45, (2014)
- [3] "NX NASTRAN 7.5", (2011)
- [4] <http://matweb.com>, (2013)
- [5] Robert E. Reed-Hill, "Physical Metallurgy Principles", Litton Edu. Publishing, Inc., (1973)