

형상 및 치수 변화에 따른 고속 회전 벨 컵의 진동 특성 해석

Vibration Characteristics Analysis of High Speed Rotary Bell Cup with Different Shapes and Dimensions

박정민* · 최승복** · 손정우†

Jiong-Min Park, Seung-Bok Choi and Jung Woo Sohn

(Received October 5, 2016 ; Revised November 23, 2016 ; Accepted November 23, 2016)

Key Words : Vibration Characteristics(진동 특성), Critical Speed(위험 속도), Unbalance Vibration(불평형 진동), Bell Cup(벨 컵), Rotary Atomizer(회전 무화기), Paint Robot(도장 로봇)

ABSTRACT

In the present work, vibration analysis of high speed rotary bell cup model for paint atomizer application is carried out through numerical simulation. At first, eight bell cup models, considering four different cup shapes and two different cup diameters, are proposed and corresponding dynamic characteristics are investigated. To evaluate the operating stability, critical speed analysis is conducted using Campbell diagram and separation margin between operating speed and critical speed is identified. Unbalance vibration responses are also studied according to operating speed and balancing quality grade of G. Finally, the stability and adequacy of the proposed bell cup models are discussed for field application.

1. 서 론

도장 공정은 제품의 디자인적 특성을 향상시킬 수 있는 중요한 공정으로, 자동차, 전차 제품 등 다양한 산업 분야에서 적용되고 있다. 화학 도료가 많이 사용되는 공정의 특성으로 인해 사람에게 유해한 작업 환경이 형성될 수 있으며, 갑작스러운 폭발 등의 위험이 있어, 최근에는 로봇을 이용한 도장 시스템이 많이 활용되고 있다. 벨 컵은 회전 무화기의 기계 부품으로 터빈과 직접 연결되어 고속으로 회전하면서 도료를 미립화하여 분사시키게 된다.

회전 무화기의 성능 특성에 대한 연구는 오래 전

부터 진행되어 오고 있다. 1950년대 Hinze와 Milborn은 회전하는 컵을 이용한 액체의 미립화에 대하여 발표하였으며, 1970년대 중반, Dombrowski와 Lloyd는 회전형 무화기의 분사 특성을 결정하는 인자들에 대한 실험적 고찰을 수행하고 작동 조건에 따른 특성의 변화를 확인하였다^(1,2).

1980년대 후반, Lefebvre는 액체의 미립화와 분사 특성에 대한 기술을 정리하고 다양한 응용 분야를 소개하였다⁽³⁾. Corbeels 등은 유체의 물성치와 회전 속도와 유량 등의 작동 조건에 따른 미립화 특성을 실험을 통하여 고찰하였다⁽⁴⁾. 점성이 높은 유체의 경우 벨 컵 표면에 고르게 막을 형성하고, 점성이 낮은 유체의 경우 불규칙한 막을 형성하는 것을

† Corresponding Author; Member, Department of Mechanical Design Engineering, Kumoh National Institute of Technology
E-mail : jwsohn@kumoh.ac.kr

* Member, Department of Mechanical Design Engineering, Kumoh National Institute of Technology

** Member, Department of Mechanical Engineering, Inha University

A part of this paper was presented at the KSNVE 2016 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Gi-Woo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

확인하였으며, 20 000 r/min 이상의 회전 속도에서는 유량과 점성이 변하더라도 평균 입자 크기는 영향을 받지 않는 것을 확인하였다. Hines는 정전 방식 미립화 현상과 정전 분사 도장에 대하여 분석하였으며, 입자 크기와 입자의 전하량 등에 대한 실험적 자료를 제공하였다⁽⁵⁾. Im 등은 정전 회전 무화기의 성능을 실험을 통해 평가하였다⁽⁶⁾. 도료의 유량, 주변 공기량, 벨 컵의 회전 속도, 정전기 전압 등 다양한 운전 상태에 따른 미립화된 입자의 크기와 분사 속도 등을 평가하였다. 국내에서도 관련 연구가 진행되었는데, Cha 등은 실험을 통하여 회전 디스크 형상에 따른 미립자의 도착 성능을 평가하였다⁽⁷⁾. 또한 Lee와 Cha는 회전 무화형 도장 기기 개발을 위한 설계, 해석, 성능 평가를 위한 시스템을 구성하였고, 회전 터빈과 노즐의 특성에 따른 도장 기기의 회전수 및 유량에 대한 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 우수성을 확인하였다^(8,9). Park과 Kim은 벨 디스크의 표면 위에 발생하는 박막의 특성을 반영하여 회전무화기의 형상을 설계하는 기술에 대한 연구를 수행하였다⁽¹⁰⁾. 이러한 도장 기기에 대한 대부분의 연구들은 액체의 미립화와 유동 특성, 분사된 도료의 도착 성능 예측 등 유체역학적 관점에서 이루어지고 있다. 산업 현장에 사용되고 있는 회전 기계의 진동 특성에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. Yang은 회전 기계의 진동 해석 기법들을 정리하고, 실제 회전 기계 시스템의 진동 평가 방법과 설계 대책 등을 제안하였다⁽¹¹⁾. Hong 등은 고속 유도 전동기의 회전 시스템에 대하여 위험 속도와 불평형 응답 해석을 수행하였으며, 미국석유협회(American Petroleum Institute, API) 표준 611과 국제표준기구(International Standardization Organization, ISO) 1940-1 규정을 바탕으로 결과의 적정성을 확인하였다⁽¹²⁻¹⁴⁾.

그러나, 도장 시스템의 설계에 필요한 회전체의 진동 특성 등 구조적 특성에 관한 연구는 많이 이루어지지 않고 있다. 현장에서 사용되고 있는 도장 로봇에 적용되는 회전 속도는 30 000 r/min에서 50 000 r/min으로 알려져 있으며, 도장 시스템의 터빈과 벨 컵은 이러한 요구 운전 속도에서 안전하게 사용될 수 있도록 설계되어야 한다. 또한, 현재는 사용하는 도료나 광택제의 점도에 따라 운전 속도를 달리하게 되고, 그에 따라 형상 또는 크기가 다른 벨 컵을 교체하여 사용하여야 하므로, 불필요한 작

업 시간의 증가가 발생하게 된다. 따라서, 최근에는 하나의 벨 컵을 30 000 r/min에서 80 000 r/min까지 다양한 운전 속도에서 사용하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 그러나 아직 이러한 운전 속도에서 사용하기 위한 벨 컵 설계에 관한 연구는 알려지지 않고 있으며, 국내에서도 관련 연구가 전무한 상황이다. Park 등은 도장 로봇에 사용되는 벨 컵 모델에 대하여 지름과 길이 변화에 따른 진동 특성을 해석하고, 벨 컵 설계를 위한 기초 자료로 제공하였다⁽¹⁵⁾. 그러나, 해석 결과를 바탕으로 실제 벨 컵을 제작하는 과정에서 문제가 발생하게 된다. 벨 컵의 실제 제작에서는 가공 후 밸런싱 작업을 수행하게 되는데, 제안된 모델의 경우 벨 컵 끝 단의 두께가 너무 얇아 밸런싱 작업에 어려움이 발생한다. 따라서, 기존 제안된 모델을 바탕으로 밸런싱 작업이 용이한 형태의 수정된 모델을 제안하고, 이들 모델에 대한 진동 특성을 다시 확인해야 한다.

이 연구에서는 도장 로봇에 사용되는 고속 회전 벨 컵에 대하여 운전 속도에 대한 안정성과 불평형 진동 특성을 고찰하였다. 기존 연구에서 제안된 벨 컵 모델을 기본으로 3가지 수정된 형상을 갖는 벨 컵 모델들을 제안하고, 각 모델에 대하여 두 가지 크기의 지름을 고려하여 전체 8가지 모델에 대하여 진동 특성과 안정성의 변화를 비교하고 확인한다. 첫 번째 단계로 제안된 모델들의 고유 진동수와 모드 형상의 변화를 확인하였다. 두 번째 단계에서는 캠벨 선도를 이용하여 운전 속도에 대한 위험 속도를 분석하였다. 세 번째 단계에서는 불평형 진동 특성을 회전 속도와 평형 특성 등급에 따라 관찰하였다. 본 연구에서 도출된 결과들을 바탕으로 목표 회전 속도에서 운전이 가능한 벨 컵의 설계에 필요한 기본 가이드 라인을 제시하였다.

2. 시스템 모델

이 연구에서 고려된 벨 컵의 네 가지 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 지름이 작은 쪽이 회전하는 터빈과 연결되는 부분이고, 지름이 큰 쪽이 도료가 미립화되어 이탈하는 부분이다. Fig. 1(a)는 기존 연구 결과를 바탕으로 설계된 초기 모델이고, 전체 높이는 45 mm이고, 도료가 이탈하는 컵의 가장 바깥쪽의 지름은 65 mm, 두께는 0.11 mm이다. Fig. 1(b), (c),

(d)는 제작 과정에서 밸런싱 작업을 용이하게 하기 위해 새롭게 제안된 형태이다. Fig. 1(b)는 벨 컵 안쪽 면의 두께를 증가시킨 형태이고, Fig. 1(c)는 벨 컵 바깥쪽 면의 두께를 증가시킨 형태이며, Fig. 1(d)는 안쪽과 바깥쪽 모두 두께를 증가시킨 형태이다. 또한 이 연구에서는 각 모델에 대하여 가장 넓은 부분의 지름이 50 mm인 경우도 함께 고려하여 전체 8개의 모델에 대한 해석을 수행하고 결과를 비교하였다.

먼저, 전체 8개 모델에 대한 모드 해석을 수행하여 동특성을 확인하였다. 경계 조건은 터빈과 결합되는

면이 고정되어 있다고 가정하였다. 지름이 65 mm인 경우와 50 mm인 경우에 대하여 초기 4개 모드에 대한 고유 진동수 변화를 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다. 모드 형상은 Fig. 2에 나타내었으며, 각 모델의 모드 형상은 유사하여 지름 65 mm인 모델 S에 대한 모드 형상을 나타내었다. Table 1에 나타난 바와 같이 지름 65 mm인 경우, 동일 모드 형상에 대하여 벨 컵의 내부와 외부를 보강한 model R3에서 model S에 비해서 고유 진동수가 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 이는 보강에 의한 벨 컵의 형상 변화로 강성이 증가한 결과로 판단된다. 또한, 벨 컵의 외부를 보강한 model R2보다 벨 컵의 내부를 보강한 model R1의 동일 모드 형상에 대한 고유 진동수가 더 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 따라서 외부 형상 보강보다 내부 형상 보강에 의한 강성 증가가 더 큰 것으로 판단된다. 따라서, 실제 제작 시에는 벨 컵 형상이 보강이 필요한 경우 강성 증가를 고려하여 내부 및 외부 보강을 결정해야 할 것으로 판단된다. Table 2의 지름 50 mm 모델의 경우, (2,1) 모드에서는 지름이 65 mm인 모델과 동일한 경향을 가지나, 나머지 모드에서는 고유 진동수가 비슷하게 나타났다. 이는 벨 컵의 지름이 작으므로 초기 강성이 더 크게 되고, 내부와 외부 보강에 의해 증가하는 강성의 양이 유사하기 때문인 것으로 판단된다.

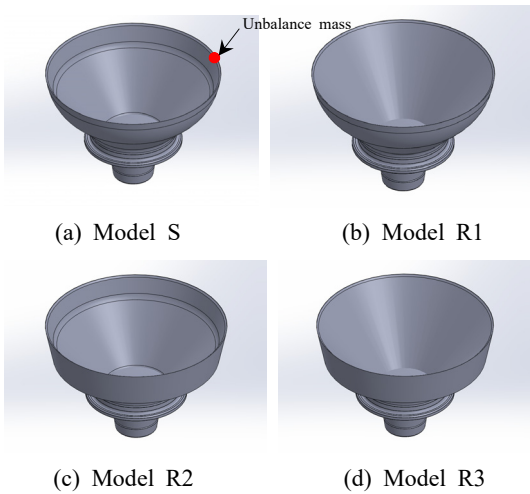


Fig. 1 Configurations of the modified bell cup models

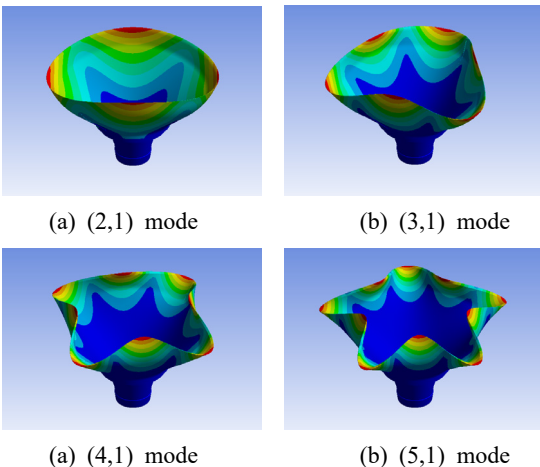


Fig. 2 Fundamental four mode shapes for model S with diameter of 65 mm

Table 1 Natural frequencies of the bell cup (diameter: 65 mm) unit: Hz

	S	R1	R2	R3
(2,1) mode	2,667	3,994	3,356	4,718
(3,1) mode	4,264	8,831	7,186	11,273
(4,1) mode	6,721	15,212	11,880	19,624
(5,1) mode	9,588	22,488	16,326	28,753

Table 2 Natural frequencies of the bell cup (diameter: 50 mm) unit: Hz

	S	R1	R2	R3
(2,1) mode	4,678	4,917	4,742	5,289
(3,1) mode	7,588	9,470	9,531	11,540
(4,1) mode	10,673	14,803	15,169	19,269
(5,1) mode	14,627	21,045	21,331	27,822

3. 위험 속도 해석

설계된 8개의 모델에 대하여 0 r/min에서 200 000 r/min까지의 회전 속도에 대하여 캠벨 선도를 작성하여 위험 속도 해석을 수행하였다. API Standard 611에서는, 회전체의 운전 속도와 위험 속도와 사이에 20 % 이상의 분리 여유가 확보되어야 한다고 규정하고 있다⁽¹⁴⁾. 지름이 65 mm와 50 mm인 경우의 각 모델에 대한 캠벨 선도를 Fig. 3과 Fig. 4에 각각 나타내었다. 캠벨 선도에서 발생하는 위험 속도는 삼각형 점으로 나타내었고, 도장 기기에서 많이 사용되고 있는 운전 속도 35 000 r/min 기준으로 상하 20 %의 분리 여유 영역(28 000 r/min ~ 42 000 r/min)은 왼쪽 빗금으로, 제안된 벨 컵의 최대 목표 운전 속도인 80 000 r/min 기준으로 상하 20 % 분리 여유 영역(64 000 r/min ~ 96 000 r/min)은 오른쪽 빗금으로 나타내었다. Fig. 3과 4에 나타난 바와 같이 35 000 r/min과 80 000 r/min 운전 속도에서는 위험 속도에 대한 문제가 전혀 없는 것으로 판단된다. Fig. 3(a)에 나타나 있는 지름 65 mm의 초기 모델의 경우 운전 속도 98 000 r/min 부근에서 위험 속도가 있으나 분리 여유 20 % 밖에 있어 문제가 되지는 않을 것으로 판단된다. 외부 보강이 이루어진 model R2 보다 내부 보강이 이루어진 model R1에서 강성 증가가 크므로 위험 속도도 더 높은 운전 속도 영역으로 이동한 것을 Fig. 3(b)와 (c)에서 확인할 수 있다. 또한 model R3의 경우, Fig. 3(d)에 나타난 바와 같이 가장 높은 운전 속도 영역으로 위험 속도가 이동한 것을 확인할 수 있다. 벨 컵의 지름이 50 mm인 경우에는, Fig. 4에 나타난 바와 같이 모든 경우에 위험 속도에 대한 문제는 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.

4. 불평형 진동 해석

불평형 진동은 회전하는 기계에 소음을 유발하고, 베어링을 파손하는 등의 문제를 일으킬 수 있으며, 특히 도장 시스템의 경우 도장 품질 저하를 발생시킬 수 있으므로 설계시 반드시 고려되어야 한다. 일반적으로 불평형 진동은 재료의 불균일성이나 제작에서의 오차 등에 따른 불평형 질량에 의해 발생된

다. 본 연구에서는 Fig. 1(a)에 나타낸 바와 같이 지름이 가장 큰 벨 컵의 끝 단에 불평형 질량이 위치하는 것으로 가정하였다. 불평형 진동 결과는 ISO-1940-1을 기준으로 검토하였으며, 평형 특성 등급은 0.4와 1을 고려하였다.

제안된 모델의 허용 불평형 편심량 e_{per} 은 평형 특성 등급 G 를 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽¹⁵⁾.

$$e_{per} = G \times \frac{1}{\omega} \times 10^3 (g \cdot mm / kg) \tag{1}$$

여기서, ω 는 rad/s 단위의 회전 속도이다. 허용 불평형량 U_{per} 은 다음과 같이 허용 불평형 편심량과 회전체의 유효질량 m 의 곱으로 표현된다.

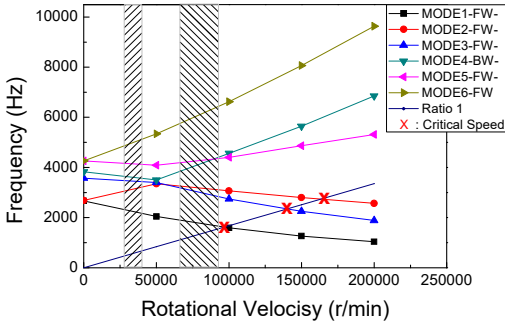
$$U_{per} = e_{per} \times m \tag{2}$$

API Standard 611에 따르면 불평형 진동의 응답은 다음과 같이 정의되는 최대 진동 크기를 초과하지 않아야 한다⁽¹⁵⁾.

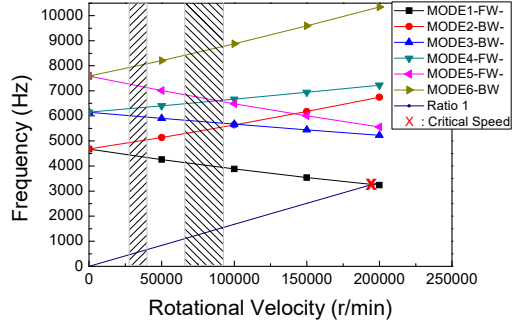
$$V_{max} = 25.4 \sqrt{\frac{12000}{N}} (\mu m, peak\ to\ peak) \tag{3}$$

여기서 N 은 r/min 단위의 회전수이다. 식 (3)에 따라 회전 속도가 35 000 r/min인 경우에는 최대 진동 크기는 14.87 μm 이고, 회전 속도가 80 000 r/min인 경우에는 최대 진동 크기는 9.84 μm 이다.

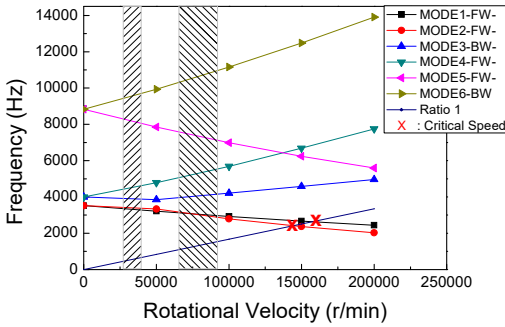
지름 65 mm의 벨 컵의 운전 속도가 35 000 r/min인 경우에 대하여 평형 특성 등급에 따른 불평형 진동 특성을 Fig. 5에 나타내었다. 평형 특성 등급 0.4와 1의 두 경우 모두 해당 운전 속도 영역에서 기준보다 큰 불평형 진동은 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 동일 평형 특성 등급인 경우, model S는 160 000 r/min 운전 속도에서 큰 불평형 진동이 발생하고, 형상 수정에 의한 강성 증가가 있는 model R1과 model R2의 경우 200 000 r/min 이상의 운전 속도에서 기준을 초과하는 불평형 진동이 발생하게 되지만, 운전 속도와는 충분한 분리 여유가 있으므로 문제가 되지는 않을 것으로 판단된다. 평형 특성 등급이 높은 0.4의 경우, Fig. 5(b)에 나타난 것과 같이 불평형 진동이 발생한 경우에도 진동의 크기는 감소하며 기준을 초과하는 진동은 발생



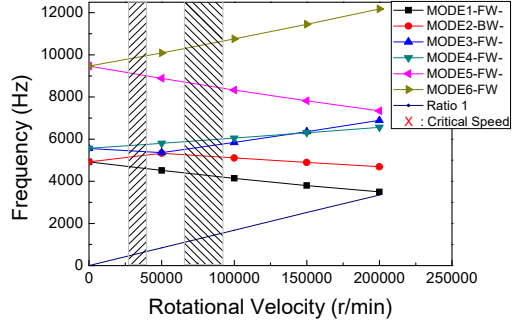
(a) Model S



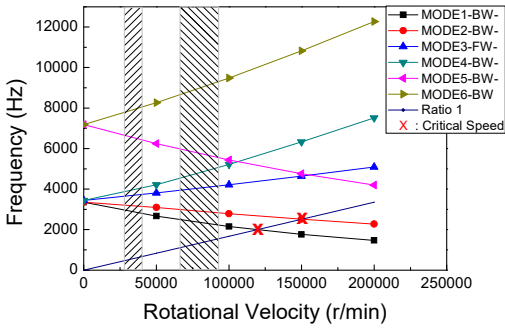
(a) Model S



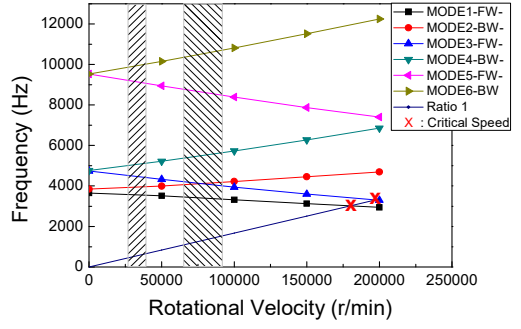
(b) Model R1



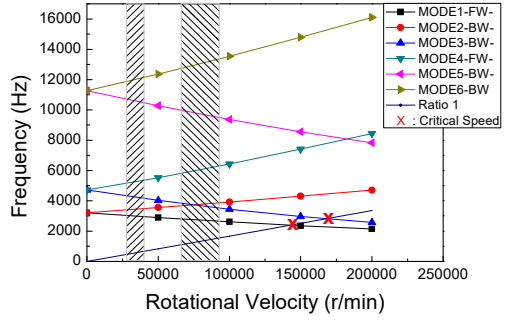
(b) Model R1



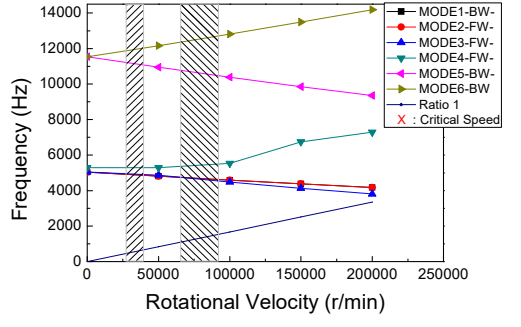
(c) Model R2



(c) Model R2



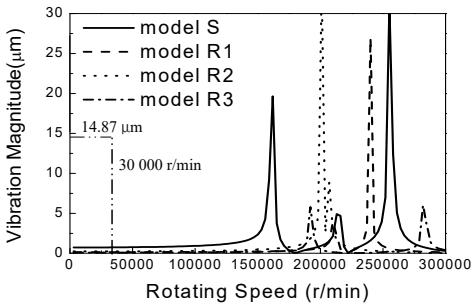
(d) Model R3



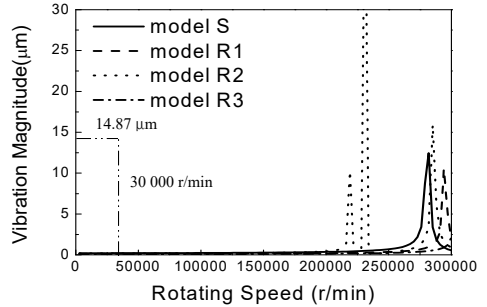
(d) Model R3

Fig. 3 Campbell diagrams of the bell cup models with diameter of 65 mm

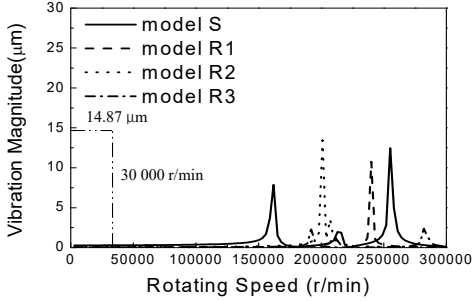
Fig. 4 Campbell diagrams of the bell cup models with diameter of 50 mm



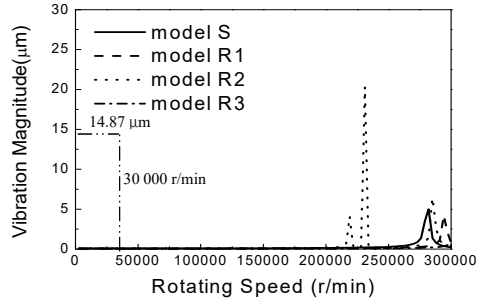
(a) G grade of 1.0



(a) G grade of 1.0



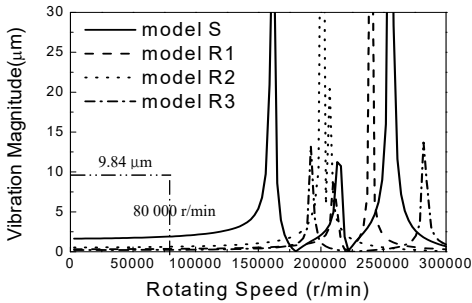
(b) G grade of 0.4



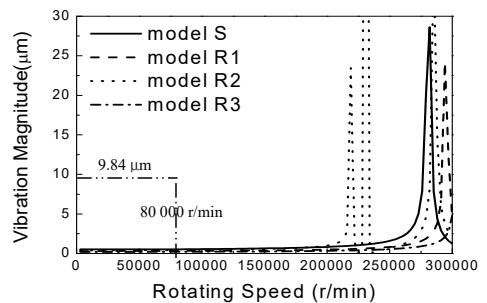
(b) G grade of 0.4

Fig. 5 Unbalance vibration response under 35 000 r/min operation with diameter of 65 mm

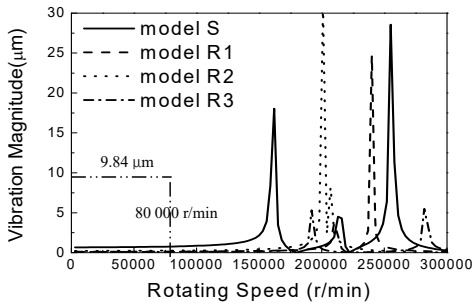
Fig. 7 Unbalance vibration response under 35 000 r/min operation with diameter of 50 mm



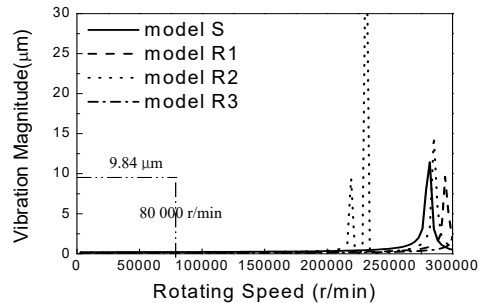
(a) G grade of 1.0



(a) G grade of 1.0



(b) G grade of 0.4



(b) G grade of 0.4

Fig. 6 Unbalance vibration response under 80 000 r/min operation with diameter of 65 mm

Fig. 8 Unbalance vibration response under 80 000 r/min operation with diameter of 50 mm

하지 않는 것을 확인할 수 있다. 지름 65 mm의 벨 컵의 운전 속도가 80 000 r/min인 경우에 대한 불평형 진동 특성은 Fig. 6에 나타내었다. 평형 특성 등급 0.4와 1의 두 경우 모두 해당 운전 속도 영역에서 기준보다 큰 불평형 진동은 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 운전 속도가 35 000 r/min인 경우와 유사한 경향을 보이고 있지만, 회전 속도가 증가함에 따라 불평형 진동의 크기는 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 지름 50 mm의 벨 컵의 운전 속도가 35 000 r/min과 80 000 r/min인 경우에 대하여 평형 특성 등급에 따른 불평형 진동 특성을 Fig. 7과 8에 각각 나타내었다. 지름 65 mm인 경우와 동일하게, 평형 특성 등급 0.4와 1의 두 경우 모두 해당 운전 속도 영역에서 기준보다 큰 불평형 진동은 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서 제안된 8개의 모델 모두 요구 운전 속도에서는 기준을 초과되는 불평형 진동이 발생하지 않고, 불평형 진동이 발생하는 운전 속도는 요구 운전 속도에서 충분히 분리되어 있으므로 실제 시스템에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구에서는 두 개의 다른 지름과 서로 다른 네 가지 형상을 갖는 8개의 고속 회전 벨 컵 모델에 대하여 동적 특성과 위험 속도, 불평형 진동 해석을 수행하고, 특성의 변화를 고찰하였다. 제안된 벨 컵 모델들에 대한 캠벨 선도를 통하여 위험 속도를 확인하였고, 목표 운전 속도와 위험 속도 사이의 분리 여유를 확인하여 목표 운전 속도에서 안전한 운전이 가능한 것을 확인하였다. 또한 불평형 질량에 의해 발생하는 불평형 진동의 크기를 회전 속도와 평형 특성 등급에 따라 확인하여, 요구 운전 속도에서 기준을 초과하는 진동은 발생하지 않는 것을 확인하였고, 불평형 진동이 발생하는 속도도 요구 운전 속도와 충분히 분리되어 있으므로, 제안된 벨 컵 모델들이 적용 가능한 것을 확인하였다. 따라서 실제 벨런싱 작업의 용이성을 확보하기 위하여 초기 모델의 형상을 변경한 세 모델 모두 실제 시스템에 적용 가능할 것으로 판단된다. 이러한 결과는 목표로 하는 고속의 운전 속도에서도 안정된 운전을 할 수 있는 벨 컵을 설계하는데 중요한 자료로 사용될

수 있으며, 설계의 기본 가이드라인으로 제시될 수 있을 것으로 판단된다. 다음 단계 연구에서는 실제 제작된 벨 컵을 이용하여 실험을 진행하고, 안정성을 확인할 계획이다.

후 기

이 논문은 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 10048059).

References

- (1) Hinze, J. O. and Milborn, H., 1950, Atomization of Liquids by Means of a Rotating Cup, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 17, No. 2, pp. 145~153.
- (2) Dombrowski, N. and Lloyd, T. L., 1974, Atomization of Liquids by Spinning Cups, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 8, No. 1, pp. 63~81.
- (3) Lefebvre, A. H., 1988, *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishing Corporation, New York.
- (4) Corbeels, P. L., Senser, D. W. and Lefebvre, A., H., 1992, Atomization Characteristics of a High Speed Rotary Bell Paint Applicator, *Atomization and Sprays*, Vol. 2, No. 2, pp. 87~99.
- (5) Hines, 1996, Electrostatic Atomization and Spray Painting, *Journal of Applied Physics*, Vol. 37, No. 7, pp. 2730~2736.
- (6) Im, K. S., Lai, M. C. and Yoon, S. J., 2003, Spray Characteristics on the Electrostatic Rotating Bell Cup, *Korean Society of Mechanical Engineers International Journal*, Vol. 17, No. 12, pp. 2053~2065.
- (7) Cha, S. W., Lee, C. and Ko, Y. S., 2002, Effect of Serrated Disk of Electrostatic Rotary Atomizer on Transfer Characteristics, *Clean Technology*, Vol. 8, No. 1, pp. 45~51.
- (8) Lee, C. and Cha, S. W., 2002, Study on the Development System of Rotary Atomizing Painting Equipment and Its Application, *Clean Technology*, Vol. 8, No. 2, pp. 101~110.
- (9) Lee, C. and Cha, S. W., 2003, Study on the RPM Characteristics of Rotary Atomizer for Various Air Turbine and Nozzle Types, *Clean Technology*, Vol. 9, No. 4, pp. 163~168.
- (10) Park, B. S. and Kim, B. H., 2013, Design of

Rotary Atomizer Using Characteristics of Thin Film Flow on Solid Surfaces, Transaction of Korean Society of Mechanical Engineering, A., Vol. 37, No. 12, pp. 1473~1482.

(11) Yang, B. S., 2003, Vibration of Rotating Machinery, Interscience, Seoul.

(12) Hong, D. K., Jung, S. W., Woo, B. C., Koo, D. H. and Ahn, C. W., 2012, Unbalance Response Analysis of Copper Die Casting High Speed Induction Motor, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 7, pp. 642~649.

(13) ISO 1940-1, Mechanical Vibration – Balance Quality Requirements of Rigid Rotors – Part 1: Determination of Permissible Residual Unbalance.

(14) API Standard 611, 2008, General-purpose Steam Turbines for Petroleum, Chemical and Gas Industry Services, Fifth Edition, American Petroleum Institute, Washington, D.C., U.S.A.

(15) Sohn, J. W., Park, J. H. and Choi, S. B., 2015, Vibration Characteristics of High Speed Rotary Bell Cup, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 25, No. 11, pp. 771~778.



Jung Woo Sohn received his Ph.D. degree in the Department of Mechanical Engineering from Inha University in 2008. He is now working as an associate professor in the Department of Mechanical Design Engineering of Kumoh National Institute of Technology. He has interest on the design and control of smart structures and systems.



Seung-Bok Choi received the B.S. degree in Mechanical Engineering from Inha University in 1979, M.S. degree and Ph.D. degrees from Michigan State University in 1986 and 1990, respectively. He is currently Dean of the Graduate School and fellow professor in Inha University. He is a fellow of NAEK (National Academy Engineering of Korea), KAST (The Korean Academy of Science and Technology). His research interests are robust controller design and control of various systems using smart actuators.