

디켄터형 원심분리기의 로터다이나믹 특성해석

An Analysis of Rotordynamic Characteristics of a Decanter-type Centrifuge

김병옥† · 이안성*

Byung Ok Kim, An Sung Lee

1. 서 론

원심분리기는 원심력과 혼합물의 밀도차를 이용하여 특정물질을 분리·정제시키는 기계장치이다. Fig. 1은 원심분리기의 한 종류인 디켄터(decanter)형 원심분리기의 개략적인 구조를 나타낸 것이다. 우측의 feed inlet 파이프를 통하여 혼합액 혹은 슬러리가 스크류 로터(screw rotor)에 공급됨과 동시에 분출되며, 분출된 혼합액은 보울 로터(bowl rotor)에 간헐하게 된다. 보울보다 약간 높은 속도(대략 5~10rpm)로 회전하는 스크류는 보울에 대한 상대운동으로 인하여 보울 내면에 모인 고체 이물질을 이송·압축·탈수시켜 케이크(cake) 형태로 배출시킨다. 동시에 액체는 적정 수위에 도달하면 액체배출구를 통해 배출된다.

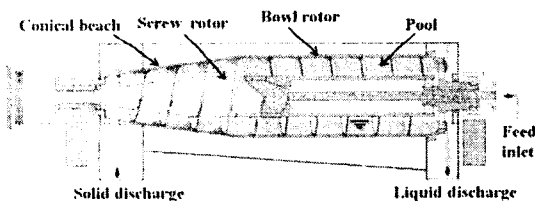


Fig. 1 Schematic structure of a Decanter-type centrifuge

통상 고액분리를 위해서는 3000G(G:중력가속도) 이상의 원심력이 요구되기 때문에 보울과 스크류는 4,000rpm을 상회하는 고속 회전이 불가피하다. 회전체 부의 고속회전은 진동문제를 일으킬 확률이 높고, 진동으로 인한 내구성 및 성능저하는 물론 장비수명에도 치명적인 영향을 끼칠 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 디켄터형 원심분리기 로터-베어링 시스템의 저진동 설계기술 개발의 일환으로 회전체 동역학(로터다이나믹, Rotordynamics) 설계절차를 적용코자 하며,

† 교신저자; 한국기계연구원 회전기계연구팀
E-mail : kbo2612@kimm.re.kr
Tel : (042) 868-7491, Fax : (042) 868-7440

* 한국기계연구원 회전기계연구팀

이를 위해 로터-베어링 시스템에 상세 FE(finite element) 모델을 적용하여 지지 베어링 강성에 따른 시스템의 위험속도 해석과 모드형상 분석, 위험속도와 분리여유 검토, 불균형 응답해석 등 체계적인 동역학 설계절차를 제시하고자 한다.

2. 로터다이나믹 설계해석

Fig. 2는 본 연구에서 개발된 로터다이나믹 FE 모델로써, 로터 축은 빔 요소, 스크류부는 등가질량과 관성으로 등가 치환하였다. 디켄터형 원심분리기 로터-베어링 시스템의 저진동 운전 신뢰성 확보를 위해 시스템의 위험속도(critical speed) 및 모드형상(mode shape) 해석, 캠벨선도(Campbell diagram), 그리고 불균형(unbalance)에 의한 진동 응답해석을 수행하였다.

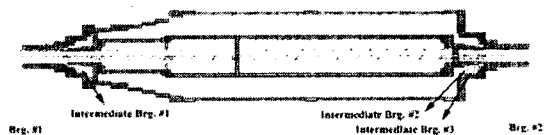


Fig. 2 FE model of combined screw and bowl rotor

2.1 위험속도 해석

위험속도 해석은 시스템의 감쇠를 고려하지 않은 상태에서 지지강성의 크기와 지지점 위치에 따른 로터-베어링 시스템의 전반적인 동특성을 빠르게 평가할 수 있기 때문에 로터다이나믹 설계절차에서 우선적으로 수행된다. 스크류와 보울 로터에 대한 위험속도 맵해석을 각각 수행하였다. 일반적인 강성영역($5 \times 10^7 \sim 5 \times 10^8$ N/m) 내에서 스크류 로터와 보울 로터는 정격속도(4,300rpm) 근방에서 위험속도가 존재하지 않는다. 그러나 두 로터의 연성효과를 고려할 경우, 1차 정선회 동기 위험속도가 설정된 강성영역에서 약 4,270~7,289 rpm으로 낮은 강성영역에서는 정격속도와 위험속도가 일치하여 공진 발생 가능성이 예측되었다(Fig. 3 참조). 그 이유는 스크류 로터의 베어링 지지강성과 스크류

를 지지하는 보울 로터의 지지강성이 직렬로 조합(serial combination)되어 스크류 로터의 지지강성이 실질적으로 감소하였기 때문이다.

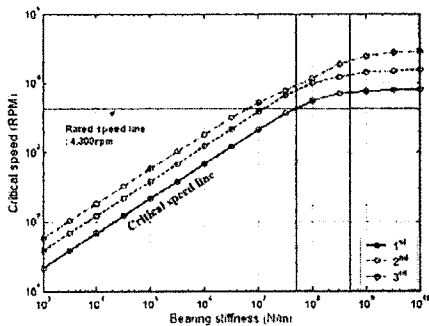


Fig. 3 Forward synchronous critical speeds for combined screw and bowl rotor

2.2 캠벨선도(Campbell diagram)

스크류와 보울 연성 로터-베어링 시스템의 감쇠를 고려한 정선회 고유진동수(forward whirl natural frequency)를 회전속도에 대해서 나타난 캠벨선도를 작성하여 정격속도와 분리여유를 검토하였다(Fig. 4 참조). 이 때 적용된 베어링 강성은 모두 1×10^8 N/m이며, 베어링 감쇠계수(10% 감쇠 적용)는 2.22×10^4 N·s/m로 가정하였다. 자이로스코픽 영향으로 정선회 감쇠 고유진동수가 5,523~5,539 rpm까지 변화하며, 1X-동기회전수선과 정선회 감쇠 고유진동수선이 교차되는 곳인 1차 정선회 위험속도(5,534rpm)는 정격속도와 충분한 분리여유(28.6%)를 가짐을 알 수 있다.

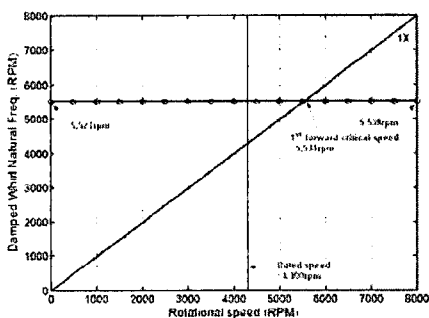


Fig. 4 Campbell diagram of combined screw and bowl rotor

2.3 불균형응답해석

불균형 작용 시 로터-베어링 시스템의 진동량을 예측하기 위해 권고 불균형량(ISO G6.3과 G2.5등급)에 해당하는 시험불균형을 스크류 로터와 보울 로터에 부가하여 불균형 응답해석을 수행하였다. 시험불균형을 부착하였을 때 로터에 발생하는 최대 진동변위 제한치($42 \mu\text{m}$ Pk.-Pk.)는 API 617

기준을 적용하였다. G6.3등급의 불균형량을 부가하였을 경우, 정격속도에서 최대 진동응답 위치는 스크류 로터와 보울 로터 각각 Stn. #24와 Stn. #80이며, 결과로서, 보울 로터의 최대 진동변위는 $34.6 \mu\text{m}$ Pk.-Pk.으로 제한기준을 만족하지만 스크류 로터는 $74.4 \mu\text{m}$ Pk.-Pk.으로 제한기준을 초과하는 진동변위 발생이 예측되었다. G2.5등급인 경우, 보울 로터와 스크류 로터의 최대 진동변위는 각각 $13.7 \mu\text{m}$ Pk.-Pk.과 $29.6 \mu\text{m}$ Pk.-Pk.으로서 제한기준을 만족하는 진동변위가 예측되었다(Fig. 5 참조). 상기 결과로부터 설계 대상 원심분리기의 보울과 스크류 로터는 G2.5 이하의 비교적 정밀한 밸런싱(balancing) 교정작업이 요구되며, 특히 스크류 로터는 최소한 G2.5 밸런싱 등급기준을 엄격히 적용하여야 한다.

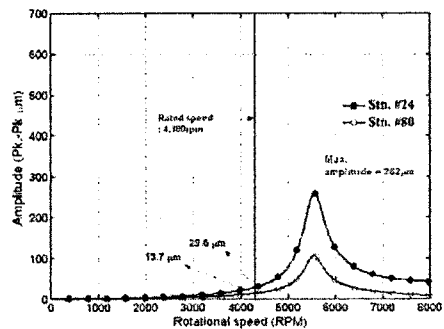


Fig. 13 Unbalance responses of combined screw & bowl rotor at Stn. #24 and Stn.#80 (balance grade G2.5)

3. 결 론

본 연구에서는 산업용 원심분리기 중 디켄터형 원심분리기 진동저감 해석기술 개발을 위하여 종합적인 로터다이나믹 해석을 수행하였다. 설계 대상 원심분리기의 로터다이나믹 해석 시, 스크류와 보울 로터를 독립적으로 해석하면 전체 시스템의 위험속도 예측에 오류를 범할 수 있다. 따라서, 스크류와 보울 로터는 반드시 연성시켜 해석을 수행하여야 한다. 로터 연성으로 인해 지지 강성이 감소되기 때문에 위험속도와와의 적절한 분리여유를 위해서는 적용 베어링의 강성계수가 1×10^8 N/m 이상을 가지도록 선정하여야 한다. 로터의 밸런싱 등급 설정 시, ISO G6.3 보다 ISO G2.5 등급을 추천하며, 특히 스크류 로터의 밸런싱 교정작업은 ISO G2.5 등급에 의거한 정밀밸런싱을 권고한다.