

# 산업용 원심분리기의 진동저감을 위한 로터다이나믹 해석

## A Rotordynamic Analysis of a Industrial Centrifuge for Vibration Reduction

김 병 옥\* · 이 안 성\*

Byung Ok Kim and An Sung Lee

(2008년 6월 3일 접수 ; 2008년 7월 7일 심사완료)

**Key Words** : Centrifuge(원심분리기), Rotordynamics(회전체동역학), Critical Speed(위험속도), Campbell Diagram(캠벨선도), Whirl Natural Frequency(선회 고유진동수)

### ABSTRACT

A rotordynamic analysis was performed with a decant-type centrifuge, which is a kind of industrial centrifuge. The system is composed of screw rotor, bowl rotor, driving motors, gear box, and support rolling element bearings. These rotors have a rated speed of 4300 rpm, and were modeled utilizing a rotordynamic FE method for analysis, which was verified through 3-D FE analysis. Design goals are to achieve wide separation margins of lateral critical speeds, and favorable unbalance responses of the rotor in the operating range. Then, a complex analysis rotordynamic analysis of the system was carried out to evaluate its forward synchronous critical speeds and mode shapes, whirl natural frequencies, and unbalance responses under various balance grade. As a result of analysis, the rotordynamic analysis performed by separating a screw rotor and bowl rotor may cause an error in predicting critical speed of entire system. Therefore, the rotordynamic analysis of a coupled rotor combining a screw and bowl rotor must be performed in order to more accurately estimate dynamic characteristics of the decanter-type centrifuge as presented in this paper. Also, rolling element bearings with suitable stiffness should be selected to keep enough separation margin. In addition, in establishing balance grade of a screw and bowl rotor, ISO G2.5 balance grade is more recommended than ISO G6.3, in particular balancing correction of a screw rotor based on ISO G2.5 grade is strongly recommended.

### 1. 서 론

원심분리기는 원심력과 혼합물의 밀도차를 이용하여 특정물질을 분리·정제시키는 기계장치이다. 이러한 원심분리기의 특성을 활용하여 최근에는 환경관

련 산업의 한 분야로서, 슬러리(slurry)를 정제하고 무해한 상태로 폐기하기 위한 처리방안으로 그 사용이 확대되고 있다. Fig. 1은 원심분리기의 한 종류인 디칸터(decanter)형 원심분리기의 개략적인 구조를 나타낸 것이다. 우측의 feed inlet 파이프를 통하여 혼합액이 공급되고, 이 혼합액은 회전하는 스크류 로터(screw rotor) 내부로 모여 스크류 표면에 있는 구멍을 통하여 분출되며, 분출된 혼합액은 보울 로터(bowl rotor)에 간히게 된다. 보울의 회전으로 인하여 혼합액은 원심력을 받아 자유표면을 가진 풀(pool)을 형성하며, 풀 내부에는 액체보다 비중이 높

† 교신저자 : 정회원, 한국기계연구원 시스템엔지니어링 연구본부 회전기계연구팀  
E-mail : kbo2612@kimm.re.kr

Tel : (042)868-7491, Fax : (042)868-7440  
\* 정회원, 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부 회전기계연구팀

은 고체 슬러지가 보울 내면에 모인다. 보울보다 약간 높은 속도(대략 5~10 rpm)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.

디켄터형 원심분리기에 대한 연구개발은 유럽과 일본을 중심으로 성능향상을 위한 핵심인자와 연관된 기하학적 구조, 함수율(percentage of water content), 내부의 유동현상, 소요동력, 부유/침강 등에 관한 논문과 보고서를 매년 발표하고 있다<sup>(2)</sup>. Leung 등<sup>(3,4)</sup>은 디켄터의 효율성 향상과 함수율 최소를 위한 최적의 기하학적 구조를 제시하였으며, Laval<sup>(5)</sup> 등은 디켄터 용적과 함수율에 관한 관계를 제시하였다. Leung<sup>(6)</sup>은 스크류와 보울의 속도차이에 대한 디켄터 소요 토크관계를 제시하였고, Bart 등<sup>(7)</sup>은 conical beach 각도에 따른 최적의 풀 깊이를 제시하였다. 국내 관련 선행연구로는 Suh<sup>(8)</sup>는 원심분리기 설계를 위한 기초공식으로 입자의 임계직경에 대해 언급하였고, Suh<sup>(9)</sup> 등은 현장 적용이 가능한 원심분리기 소요동력 예측을 정식화 하였다. Shin<sup>(10)</sup> 등은 디켄터형 원심분리기의 동특성을 파악하고 고장유형을 체계화 하였으며, Han<sup>(11)</sup> 등은 스크류 블레이드의 형상변화에 따른 응력 및 진동해석을 수행

한 바 있다. 그러나 대부분의 선행연구들은 유동해석, 강도해석, 고액분리(solid and liquid separation) 성능 및 효율성 향상에 치중한 연구성과를 제시하였으며, 디켄터형 원심분리기 로터-베어링 시스템의 저진동 설계기술과 관련한 연구결과는 거의 소개되지 않고 있다. 통상 고액분리를 위해서는 3000 G(G: 중력가속도) 이상의 원심력이 요구되기 때문에 보울과 스크류는 4000 rpm을 상회하는 고속 회전이 불가피하다. 회전체 부의 고속회전은 진동문제를 일으킬 확률이 높고, 진동으로 인한 내구성 및 성능저하는 물론 장비수명에도 치명적인 영향을 끼칠 수 있다. 이러한 진동문제의 발생을 예방하기 위해서는 설비제작 및 가동에 앞서 철저한 설계절차를 이행·제작함으로써 갑작스러운 비계획 비상정지 또는 사고 등을 예방 처치하여야 한다. 따라서, 이 논문에서는 디켄터형 원심분리기 로터-베어링 시스템의 저진동 설계기술 개발의 일환으로 회전체 동역학(로터다이내믹, rotordynamics) 설계절차<sup>(12)</sup>를 적용코자 하며, 이를 위해 로터-베어링 시스템에 상세 FE(finite element) 모델을 적용하여 지지베어링 강성에 따른 시스템의 위험속도 해석과 모드형상 분석, 위험속도와와의 분리여유 검토, 불균형 응답해석 등 체계적인 동역학 설계절차를 제시하고자 한다. 설계 대상 디켄터형 원심분리기의 대략적인

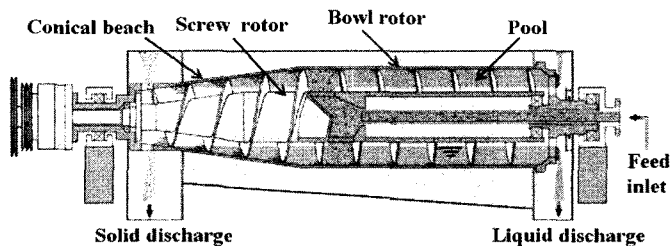


Fig. 1 Schematic structure of a decanter-type centrifuge<sup>(1)</sup>

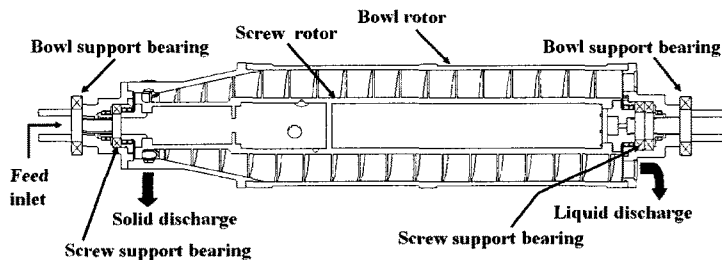


Fig. 2 Schematic structure of a proposed decanter-type centrifuge

디자인을 Fig. 2에 나타내었다. 보울의 정격속도는 4300 rpm이며, 고체 이물질의 이송·압축·탈수를 위하여 스크류의 정격속도는 5rpm이 높은 4305 rpm이다.

## 2. 모델링 개발

설계 대상 디켄터형 원심분리기는 일반적인 회전 기계 로터와는 달리 스크류 형상으로 인해 다소 복잡한 형태를 띤다. 이런 경우 모델형상이 변경될 때마다 매번 3차원 형상으로 모델링하여 동특성 해석을 수행하는 것은 시간 및 비용적인 측면에서 다소 비효율적이다. 이 절에서는 3차원 형상 모델링 결과와 로터다이나믹 FE 모델링 결과를 비교·검토함으로써 좀 더 효율적인 모델링 방법을 제시하고자 한다. 모델링 검증을 위해 스크류 로터를 대상으로 3차원 유한요소모델 결과와 로터다이나믹 FE 결과를 비교하였다. Fig. 3은 상용프로그램 ANSYS를 활용한 스크류 로터의 3차원 유한요소 모델을 나타내며, Fig. 4는 이 연구에서 개발된 로터다이나믹 FE 모델로써, 로터 축은 빔 요소, 스크류부는 등가질량과 관성으로 등가 치환하였다. 1차 굽힘 고유진동수(natural frequency)의 결과 비교를 위하여 경계조건은 자유단(free-free)으로 설정하여 해석을 수행하였으며,

해석결과 3차원 모델링과 제시한 로터다이나믹 FE 모델과의 해석오차(Table 1 참조)가 1.2%로, 모델링에 대한 세밀한 수정을 하지 않아도 이 절에서 제시한 FE 모델 즉, 로터다이나믹 FE 모델과 해석기법으로도 설계 대상 원심분리기 로터-베어링 시스템의 동역학 해석을 수행할 수 있음을 알 수 있다. 이를 바탕으로 보울 로터에 대한 FE모델도 Fig. 5와 같이 구축하였다.

로터다이나믹 FE 모델의 수치해석은 개개의 빔 요소, 등가질량·관성요소, 베어링 요소 그리고 불균형 가진 요소 등을 조합하여 얻어진 다음의 방정식으로부터 수행된다.



Fig. 3 3-D FE model for screw rotor

Table 1 Comparison of result of 1st bending natural frequency (boundary condition : free-free)

3-D FE model (ANSYS)	Developed rotordynamic FE model	Error(%)
310.137 Hz	306.513 Hz	1.16

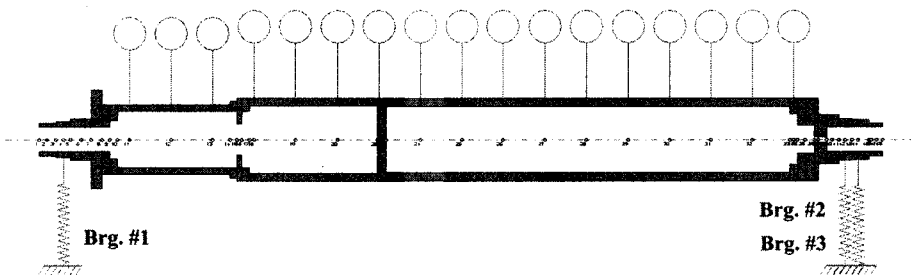


Fig. 4 FE model of screw rotor(total mass : 130 kg, total length : 1622 mm)

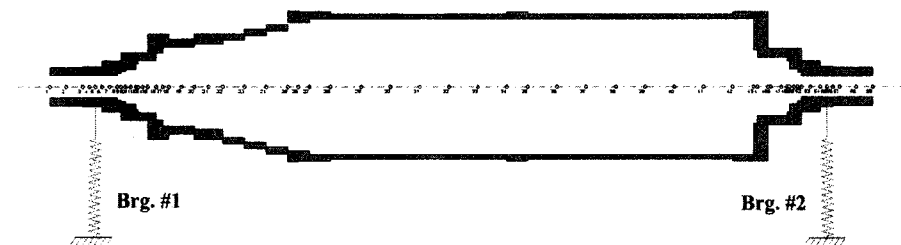


Fig. 5 FE model of bowl rotor(total mass : 210 kg, total length : 1970 mm)

$$[M]\{\ddot{q}\} + ([C] + [G])\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{Q\} \quad (1)$$

여기서,  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[G]$ ,  $[K]$ 는 각각 관성, 감쇠(damping), 자이로스코픽(gyroscopic), 강성행렬을, 그리고  $\{q\}$ 와  $\{Q\}$ 는 일반화된 변위와 외력벡터를 나타낸다.

### 3. 로터다이나믹 설계해석

설계 대상 디센터형 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.

#### 3.1 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. 위험속도 해석 중에서 위험속도 맵(map)해석은 지지 베어링 강성변화에 따른 정선회 동기 위험속도(forward synchronous critical speed)를 파악하는 것으로 로터 설계 시 적절한 베어링 강성 선정의 지침으로 활용된다. 정선회 동기 위험속도는 불균형 가진력처럼 회전속도와 동일한 가진력 발생 시 공진을 일으키는 회전속도로서, 시스템의 정격속도는 정선회 동기 위험속도와 충분한 분리여유(separation margin)를 가지도록 설계되어야 한다. 스크류와 보울 로터에 대한 위험속도 맵해석을 각각 수행하였다. 스크류 로터의 경우, Brg. #1, #2와 #3의 강성영역(볼베어링의 일반적인 강성<sup>(13)</sup>)은

$5 \times 10^7 \sim 5 \times 10^8$  N/m, Fig. 6의 음영부분내에서 정격속도선과 위험속도선이 일치하는 곳이 없기 때문에 정격속도(4300 rpm) 근방에서는 위험속도가 존재하지 않음을 알 수 있다(Fig. 6 참조). 보울 로터의

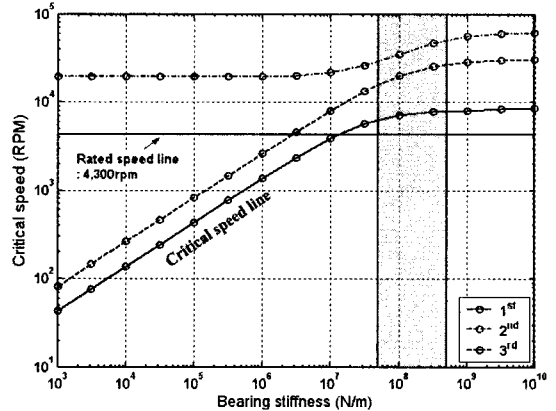


Fig. 6 Forward synchronous critical speeds for screw rotor

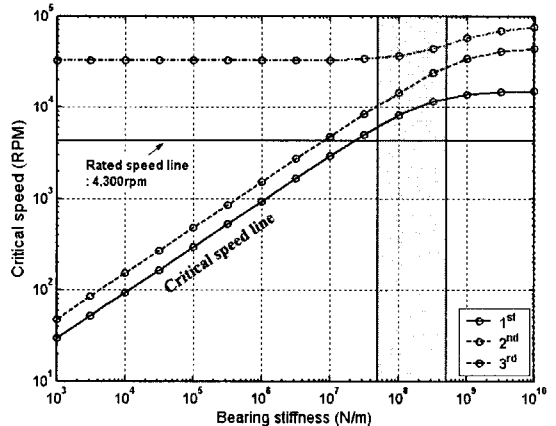


Fig. 7 Forward synchronous critical speeds for bowl rotor

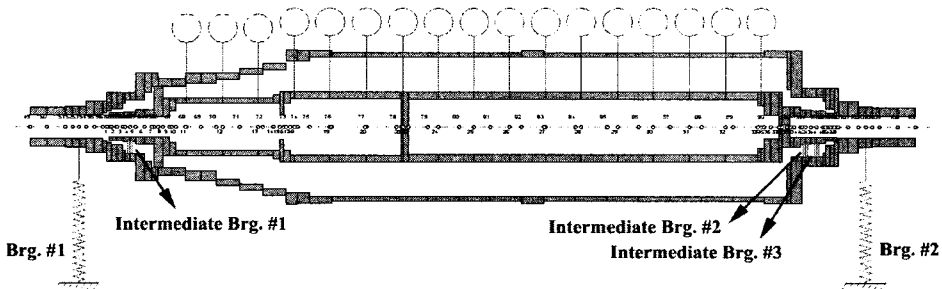


Fig. 8 FE model of combined screw and bowl rotor

경우도 Brg. #1과 #2의 강성영역 내에서 정격속도 선과 위험속도선이 일치되는 곳이 없어 정격속도 경우도 Brg. #1과 #2의 강성영역 내에서 정격속도 근방에서는 위험속도가 존재하지 않는다(Fig. 7 참조).

Fig. 6과 Fig. 7의 해석결과는 스크류와 보울 로터를 각각 분리시켜 해석한 결과이다. 그러나 실제로 스크류 로터의 지지 베어링은 보울 로터와 동시에 연결되어 있어, 두 로터의 연성효과를 고려할 필요가 있다. 이를 위해 Fig. 8과 같이 스크류와 보울의 연성강성을 고려한 이중 로터(dual rotor) FE 해석 모델을 구축하여 위험속도 맵해석을 수행하였다. 그 결과 1차 정선회 동기 위험속도가 설정된 강성영역에서 약 4270 ~ 7289 rpm으로 낮은 강성영역에서는 정격속도와 위험속도가 일치하여 공진 발생 가능성이 예측되었다(Fig. 9 참조). 그 이유는 스크류 로터의 지지강성과 스크류를 지지하는 보울 로터의 지지강성이 직렬조합(serial combination)이 되어 스크류

로터의 지지강성이 실질적으로 감소하였기 때문이다. 스크류와 보울 로터의 연성해석 결과로부터, 1차 정선회 위험속도와 정격속도가 적절한 분리여유를 가지기 위해서는 지지 베어링이  $10^8$  N/m 이상의 강성을 유지해야 동기 가진력에 의한 공진을 피할 수 있다. 또한 FE 모델 구축의 간편함을 위하여 스크류와 보울 로터를 각각 분리해서 해석할 경우, 실제 시스템의 위험속도 예측에 오류를 범할 가능성이 있으며, 따라서, 이 설계 대상 원심분리기의 경우는 반드시 두 로터를 연성시켜 로터다이나믹 해석을 수행하여야 한다.

위험속도에서 상대적 변위, 즉 모드형상을 예측하고 그 결과를 불균형 응답해석 시 적절한 시험 불균형 위치선정에 활용하기 위하여 모드형상 해석을 수행하였다. 이때 적용한 지지 베어링 강성은 모두  $1 \times 10^8$  N/m으로 가정하였다.

Fig. 10은 1차 정선회 동기 위험속도(5526 rpm)에 대응되는 모드형상을 나타낸 그림으로서, 스크류 로터의 진동모드가 지배적임을 알 수 있다. 시험불균형 부착위치는 스크류 로터의 경우 상대적 변위가 가장 큰 Stn. #24, 보울 로터의 경우는 Stn. #80에 각각 부착하였다.

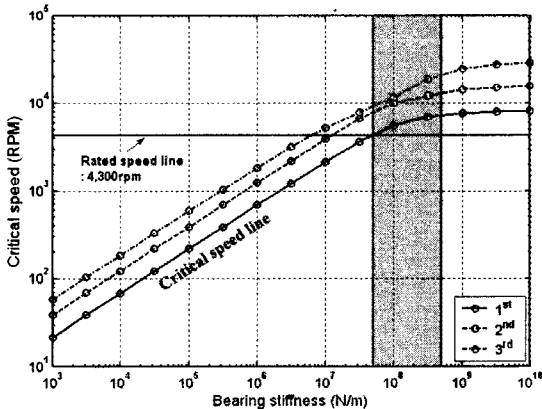


Fig. 9 Forward synchronous critical speeds for combined screw and bowl rotor

### 3.2 캠벨선도(Campbell diagram)

스크류와 보울 연성 로터-베어링 시스템의 감쇠를 고려한 정선회 고유진동수(forward whirl natural frequency)를 회전속도에 대해서 나타낸 캠벨선도를 작성하여 정격속도와의 분리여유를 검토하였다(Fig. 11 참조). 이때 적용된 베어링 강성은 모두  $1 \times 10^8$  N/m이며, 베어링 감쇠계수(10% 감쇠 적용)는  $2.22 \times 10^4$  N·s/m로 가정하였다. 자이로스코픽 영향

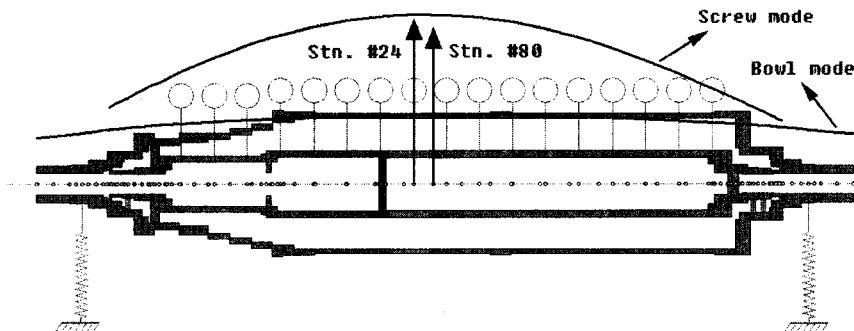


Fig. 10 Mode shape of 1st forward synchronous critical speed for combined screw and bowl rotor

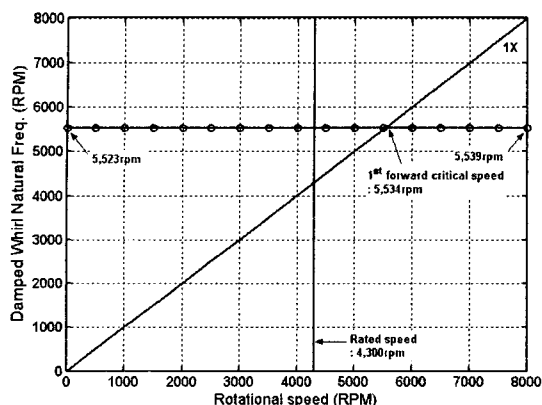


Fig. 11 Campbell diagram of combined screw and bowl rotor

으로 정선회 감쇠 고유진동수가 5523 ~ 5539 rpm 까지 변화하며, 1X-동기회전수선과 정선회 감쇠 고유진동수선이 교차되는 곳인 1차 정선회 위험속도(5534 rpm)는 정격속도와 충분한 분리여유(28.6%)를 가짐을 알 수 있다<sup>(15)</sup>.

### 3.3 불균형 응답해석

불균형 작용 시 로터-베어링 시스템의 진동량을 예측하기 위해 권고 불균형량(ISO G6.3과 G2.5등급<sup>(14)</sup>)에 해당하는 시험불균형을 스크류 로터와 보울 로터에 부가하여 불균형 응답해석을 수행하였다 (Table 3 참조). 시험불균형은 Fig. 10의 모드형상을 참고로 최대 진동변위가 발생할 위치에 집중 부가한 후 진동응답을 조사하였다. 시험불균형을 부착하였을 때 로터에 발생하는 최대 진동변위 제한치(42  $\mu\text{m}$  Pk.-Pk.)는 API 617<sup>(15)</sup>기준을 적용하였다. G6.3등급의 불균형량을 부가하였을 경우, 정격속도에서 최대 진동응답 위치는 스크류 로터와 보울 로터 각각 Stn. #24와 Stn. #80에서 발생되었다. 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(Fig. 12참조). 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. 13 참조). 상기 결과로부터 설계 대상 원심분리기의 보울과 스크류 로터는 G2.5 이하의 비교적 정밀한 밸런싱(balancing) 교정작업이 요구되며, 특히 스크류 로터는 G2.5

Table 3 Test unbalance and its applied location

Screw rotor		Bowl rotor	
Unbalance	Location	Unbalance	Location
G6.3 (g-mm)	1827.56	G6.3 (g-mm)	2913.02
G2.5 (g-mm)	725.22	G2.5 (g-mm)	1167.86
			Stn. #80

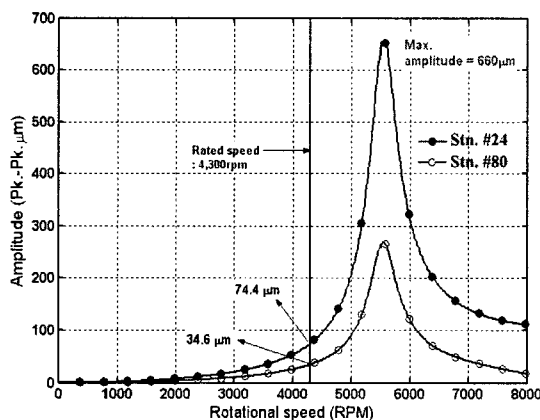


Fig. 12 Unbalance responses of combined screw & bowl rotor at Stn. #24 and Stn.#80 (balance grade G6.3)

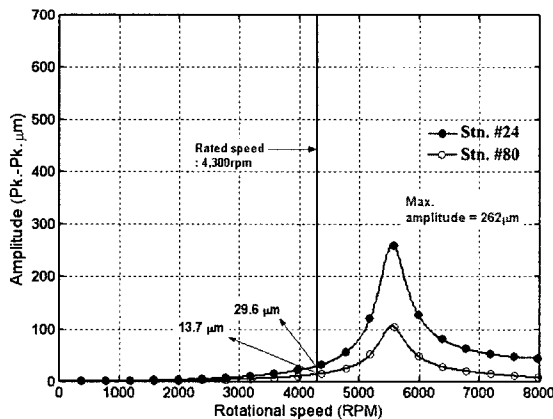


Fig. 13 Unbalance responses of combined screw & bowl rotor at Stn. #24 and Stn.#80 (balance grade G2.5)

밸런싱 등급기준을 엄격히 적용하여 밸런싱 교정이 되어야 한다.

## 4. 결 론

이 연구에서는 산업용 원심분리기 중 디센터형 원

심분리기 진동저감 해석기술 개발을 위하여 종합적인 로터다이나믹 해석을 수행하였다. 이 연구에서 개발된 로터다이나믹 FE 모델링 결과를 3차원 상용 FE 해석결과와 비교함으로써, 로터다이나믹 해석절차의 적용 타당성을 확보하였다. 설계 대상 원심분리기의 로터다이나믹 해석 시, 스크류와 보울 로터를 독립적 해석하면 시스템의 위험속도 예측에 오류를 범할 수 있다. 따라서, 스크류와 보울 로터는 반드시 연성시켜 해석을 수행하여야 한다. 로터 연성으로 인해 지지 강성이 감소하기 때문에 위험속도와의 적절한 분리여유를 위해서는 적용 베어링의 강성계수가  $1 \times 10^8$  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.

### 참 고 문 헌

- (1) Flottweg Catalog, 2008, "Innovative Solid Bowl Centrifuge Technology".
- (2) Na, E. S., 2002, "Study on the Characteristics of Solid-liquid Separation from Swine Wastewater by Screw Decanter", Ph. D Dissertation, Chung Nam National University.
- (3) Leung, W. W.-F., Shapiro, A. H. and Yarnell, R., 1999, "Improvements in the Clarification of Finite-particles Slurries Using Decanter Centrifuges", *Filtration & Separation*, Vol. 36, No. 9, pp. 32~37.
- (4) Leung, W. W.-F. and Shapiro, A. H., 1999, "Dewatering of Finite-particles Slurries Using a Compound-beach Decanter with Cake-flow Control", *Filtration & Separation*, Vol. 36, No. 10, pp. 49~56.
- (5) Laval, A. and Corner-Walker, N, 2000, "The Dry Solids Decanter Centrifuge: Capacity Scaling", *Filtration & Separation*, Vol. 37, No. 4, pp. 28~32.
- (6) Leung, W. W.-F., 1998, "Torque Requirement for High-solids Centrifugal Sludge Dewatering", *Filtration & Separation*, Vol. 35, No. 9, pp. 883~887.
- (7) Bart, P. and Stefan, W., 2004, "Relationship between Pool Depth and Internal Washing on the Beach of a Solid Bowl Decanter Centrifuge", *Filtration & Separation*, Vol. 41, No. 6, pp. 36~40.
- (8) Suh, Y. K., 2003, "Channel Design of Decanter-type Centrifuge(I)-Particle's Suspension and the Channel Size", *J. of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 20, No. 10, pp. 148~155.
- (9) Suh, Y. K., 2003, "Analysis of the Power for a Decanter-type Centrifuge(I)-Sludge Removal Power", *J. of the Korean Society of Mechanical Engineering*, Vol. 27, No. 7, pp. 929~937.
- (10) Shin, C. H., Lee, D. C., Kim, W. H., Choi, T. J. and Chung, J. T., 2004, "A Study on the Failure Analysis and Performance Improvement of a Decanter", *J. of the Korean Society of Mechanical Engineering*, Vol. 28, No. 5, pp. 586~592.
- (11) Han, G. J., Lee, S. W., Shim, J. J., et al., 2003, "Stress and Vibration Analysis with Respect to the Change of the Shape of Screw Blade and the Hole for Centrifuge", *J. of the Korean Society of Mechanical Engineering*, Vol. 20, No. 9, pp. 118~125.
- (12) Kim, B. O., Lee, A. S. and Noh, M. K., 2007, "A Rotordynamics Analysis of High Efficiency and Hybrid Type Vacuum Pump", *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 967~975.
- (13) Harris, T. A., 2001, "Rolling Bearing Analysis", John Wiley & Sons.
- (14) ISO 1940-1, 2003, Mechanical Vibration Balance Quality Requirement for Rotors in a Constant (rigid) State.
- (15) API 617, 2002, Axial and Centrifugal Compressors and Expanders-compressors for Petroleum, Chemical and Gas Industry Services.