

산업용 원심분리기의 실린더와 스크류 진동해석

권용수*, 홍도관, 김동영(동아대 대학원 기계공학과),
안찬우, 한근조(동아대 기계·산업시스템공학부)

The Vibration Analysis of Cylinder and Screw for Industrial Centrifuge

Y. S. Kwon, D. K. Hong, D. Y. Kim(Mech. Eng. Dept., Dong-A Univ.),
C. W. Ahn, G. J. Han(Mech. & Ind. Syst. Eng. Div., Dong-A Univ.)

ABSTRACT

This paper estimated the stability of centrifuge as its rotating speed compared with the natural frequency of cylinder and screw by finite element analysis. It shows that the one of exciting causes is the tooth passing frequency of input and output parts by the periodic characteristics of transmission error due to an planetary gear having three stages. Also, it proposed the critical speed of cylinder and screw by the Campbell diagram.

Key Words : Centrifuge(원심분리기), Transmission error(치합전달 오차), Tooth passing frequency(치통과주파수), Planetary gear (유성기어), Campbell diagram(캠벨선도)

1. 서론

원심분리기는 밀도차를 이용하여 혼합물로부터 특정의 물질을 분리·정제시키기 위해 사용되는 회전 기계로, 기초 연구 및 응용 산업계에서 널리 사용되고 있다. 하수처리장 등과 같은 오페수 처리장에서 사용되는 산업용 원심분리기는 중·대용량형으로 실제 혼합물을 분리하는 실린더 및 스크류와 여기에 동력을 전달하는 기어의 파손이 많은 실정이며, 특히 혼합물을 원심력을 이용하여 분리하는 두 개의 회전체인 실린더와 스크류는 고속회전에 큰 진동을 유발한다. 일반적으로 고속 회전체가 장착된 기계는 회전체의 운전속도가 변함에 따라 계의 고유진동수를 통과하게 된다. 이 영역을 통과할 때 계에 진동이 심하게 발생되어 기계 자체는 물론 기계 부품에도 큰 영향을 미치게 되는데, 3,500 rpm 정도로 고속회전하는 원심분리기의 실린더와 스크류는 기계자체의 안정성과 작업자의 안정성을 확보하기 위하여 고려되어야 할 사항이다.

본 논문에서는 오페수 처리에 사용되는 중·대용량 원심분리기를 3,500 rpm으로 작동할 때 실린더와 스크류에 대한 진동해석을 수행하였으며 동력을 전달하는 3단 유성기어의 치통과주파수(Tooth passing

frequency)에 의한 실린더와 스크류 진동해석을 수행하여 원심분리기의 안정성을 평가하였다.

2. 실린더와 스크류의 유한요소해석

2.1 유한요소모델

원심분리기의 유한요소해석은 상용 소프트웨어인 ANSYS 5.7을 사용하여 실린더와 스크류의 3차원 모델링을 하였으며, 요소는 등방성, 등질성, 선형탄성으로 가정하고, 요소의 개수는 각각 26,909개와 59,780개이다. 실린더와 스크류는 4절점 3자유도 솔리드요소(Solid element)를 사용하여 삼각형요소로 분할하였다. Fig. 1~2는 실린더와 스크류의 유한요소모델을 나타내며, Fig. 3은 단면도를 나타내었다. 또한 Table 1에 실린더와 스크류의 기계적 성질을 나타내었다.

2.2 하중조건 및 경계조건

하중조건은 실린더와 스크류의 회전속도와 내부의 여액에 의한 원심력이며 구속조건으로는 베어링 지지부의 반경방향을 고정하였고 여액축 축의 축방향 병진변위를 고정하였다.

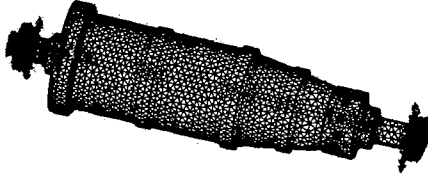


Fig. 1 The FEM model of cylinder

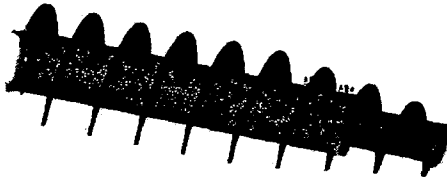


Fig. 2 The FEM model of screw

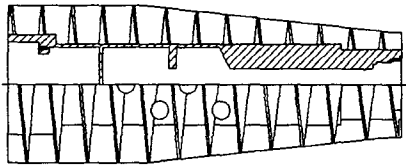


Fig. 3 The cross-section of cylinder and screw

Table 1 Mechanical properties of cylinder and screw

E30931-2-03-04	
Item list	Description
ρ [kg/m ³]	7,900
E_1 [GPa]	200
ν_{12}	0.3
σ_y [MPa]	254.6
σ_t [MPa]	619.4

2.3 고유진동수 해석

유한요소해석에서 비감쇠 자유진동에 관한 지배 방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (1)$$

선형계에 대해서 자유진동은

$$\{u\} = \{u_0\} \cos \omega t \quad (2)$$

형태의 조화거동을 보이고, 식 (2)를 식 (1)에 대입하면 다음과 같다.

$$([K] - \omega^2[M])\{u_0\} = \{0\} \quad (3)$$

식 (3)에서 $\{u_0\} \neq 0$ 이므로, $|[K] - \omega^2[M]| = 0$ 식에서 고유치 ω^2 을 얻을 수 있고, 고유벡터 $\{u_0\}$ 를 이용하여 모드형상을 나타낼 수 있다.

이를 기본으로 본 해석에서는 솔리드모델과 셸(Shell) 모델에 많이 적용되는 Block lanczos method를 이용하였다.

2.4 치합전달오차에 의한 치통과주파수

Fig. 4는 유성기어의 단면을 나타내고 있으며 각 제원은 Table 2에 나타내었다.

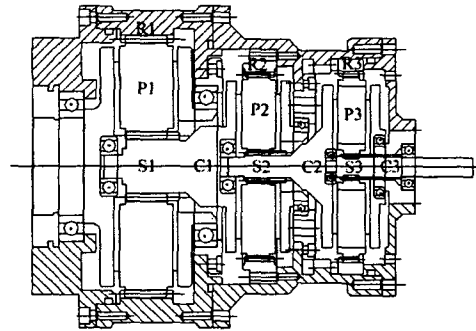


Fig. 4 Planetary gear

Table 2 The specification of planetary gear

Type	Sun	Planet	Ring	Module	RPM
Step 1st	17	45	107	1.5	3020.16
2nd	18	34	86	2	3416.95
3rd	19	35	89	2.5	3485.39

Fig. 5~6은 유성기어열이 1단과 2단일 때 각각의 상대속도에 대한 회전속도 식을 선기어와 플레닛기어 및 링기어의 속도로 나타내고 있다. Table 3은 상대속도식을 나타낸다.

Cylinder가 3,500 rpm으로 회전할 때의 감속비에 관한 식은 다음과 같다.

Fig. 5에서 선기어가 고정이므로 Carrier의 속도는

$$V_c = \frac{1}{2} V_r \quad (4)$$

$$V_{cl} = r_{cl}\omega_{cl} = (r_{sl} + r_{pl})\omega_{cl} \quad (5)$$

$$V_{rl} = r_{rl}\omega_{rl} \quad (6)$$

이다.

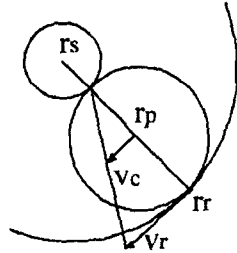


Fig. 5 Planetary gear(1st)

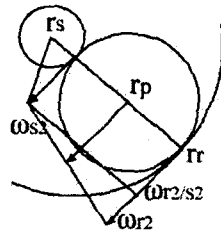


Fig. 6 Planetary gear(2nd)

Table 3 Step of carrier speed

	Carrier speed	Relative speed
1	$\omega_{c1} = \frac{r_{r1}}{2(r_{s1} + r_{p1})} \omega_{r1}$	$\omega_{r2/s2} = \omega_{r2} - \omega_{s2}$
2	$\omega_{c2} = \omega_{s2} + \frac{r_{r2} \times \omega_{r2/s2}}{2(r_{r2} + r_{p2})}$	
3	$\omega_{c3} = \omega_{s3} + \frac{r_{r3} \times \omega_{r3/s3}}{2(r_{r3} + r_{p3})}$	$\omega_{r3/s3} = \omega_{r3} - \omega_{s3}$

여기서 3단 carrier의 속도가 screw의 회전속도이므로 3단 유성기어열을 사용할 경우 감속비는 1%이다.

유성기어열의 1단 변속의 경우, 입력측 링기어(R1)는 Z_R1(이빨수, 107)이고, 출력측 플레닛 캐리어(C1)는 Z_P1(이빨수, 45)인데 입력측의 회전수(ω_1)를 1X order로 하면 플레닛 캐리어(C1)의 회전수(ω_2)는 $0.86X(=3,020.16/3,500)$ 가 되고, 입력측 기어쌍의 치통과주파수(Ω_1)는 입력측 회전수×기어이빨수이므로 107X가 된다. 출력측의 기어쌍의 치통과주파수(Ω_2)는 $38.7X(=0.86X \times 45)$ 가 된다.

또한, 유성기어열의 2단 변속의 경우, 입력측 기

어쌍의 치통과주파수(Ω_3)는 입력측 회전수×기어이빨수이므로 86X가 된다. 출력측의 기어쌍의 치통과주파수(Ω_4)는 $33.3X(=0.976X \times 34)$ 가 된다.

마지막으로 유성기어열의 3단 변속의 경우, 입력측 기어쌍의 치통과주파수(Ω_5)는 입력측 회전수×기어이빨수이므로 89X가 된다. 출력측의 기어쌍의 치통과주파수(Ω_6)는 $34.83X(=0.995X \times 35)$ 가 된다.

각종 가진원과 비교해보면 문제가 되는 가진원은 맞물린 기어의 치합전달오차와 그 주기적 특성에 의한 입력 및 출력측 치통과 주파수를 고려하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 고유진동수해석

Table 4에는 3,500 rpm으로 정격회전 시 실린더와 스크류의 고유진동수를 나타내었다. 실린더의 경우 전체 진동모드에 의한 고유진동수이며, 스크류의 경우 블레이드(Blade)의 국부적인 진동모드에 의한 고유진동수이다.

Table 4 Natural Frequency of cylinder and screw

	1	2	3	4	5
Cylinder	257.6	365.9	386.8	542.4	667.5
Screw	222.5	254.8	546.2	553	557.9

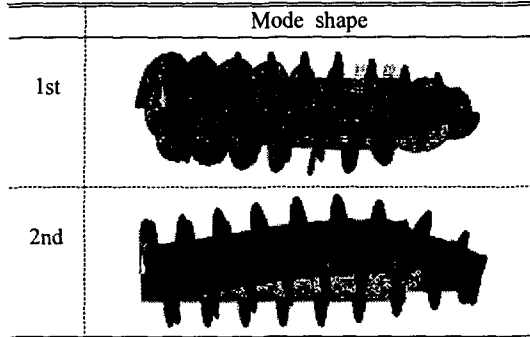
3.2 모드형상

Table 5~6에서는 3,500 rpm으로 정격회전 시 실린더와 스크류의 진동모드를 나타내었다. 실린더는 1차는 굽힘모드이며, 2차는 축방향의 모드가 발생하였다. 스크류의 경우 1차모드는 굽힘모드가 발생하였고, 2차모드는 굽힘모드와 블레이드의 비틀림이 동시에 발생하였다.

Table 5 Mode shape of cylinder

	Mode shape
1st	
2nd	

Table 6 Mode shape of screw



3.3 캠벨선도(Campbell diagram)

Fig. 7~8는 실린더 및 스크류의 고유진동수와 치통과주파수와의 관계를 나타내었으며 원심분리기의 운전속도 범위를 3,500 rpm 놓고 이 범위내에 존재하는 실린더 및 스크류의 고유진동수와 가진원의 하나인 치합전달오차에 의한 치통과주파수가 만나는 위험속도를 나타내었다.

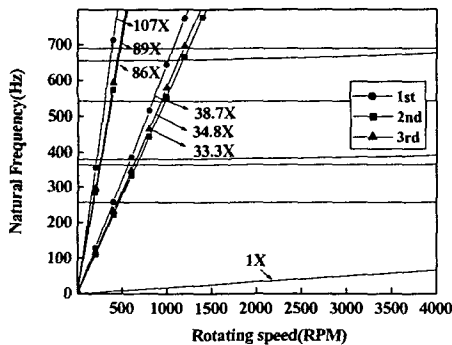


Fig. 7 Campbell diagram of cylinder

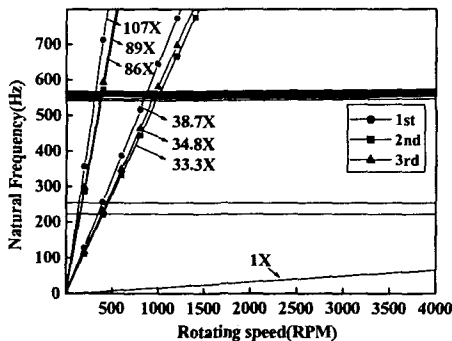


Fig. 8 Campbell diagram of screw

4. 결론

본 논문에서는 용량이 50 m³/Hr인 원심분리기의 유한요소해석을 통한 고유진동수해석을 수행하였고, 실린더 및 스크류의 고유진동수를 정격 속도까지 회전시 치합전달오차에 의한 가진진동수인 3단 유성기어의 치통과주파수와 비교함으로써 원심분리기의 위험속도를 구하였다. 결론은 다음과 같다.

1. 용량이 50 m³/Hr인 원심분리기에서 실린더와 스크류의 진동에 대한 안정성을 평가 해본 결과, 원심분리기의 회전주파수 성분인 1X 성분과 실린더와 스크류의 고유진동수와 일치하지 않으므로 1X 성분에 의한 높은 진동수준은 나타나지 않는다.
2. 가진원 중 하나인 동력전달을 위한 3단 유성기어 치합전달오차의 주기적 특성에 의한 입력 및 출력측 치통과주파수를 구했으며, 캠벨선도를 통해 실린더 및 스크류의 위험속도를 제시하였다.
3. 향후 시작품 원심분리기의 시험을 통해 설계 해석 결과를 검증할 것이다.

참고문헌

1. 김종립, 박종권, "초고속 원심분리기 회전축계의 최적설계," 한국정밀공학회지, 제15권, 제6호, pp. 145-152, 1998.
2. K. Matsuura, "A Study of vibration and Velocity Characteristics of an Accelerated Unbalanced Rotor," Bulletin of the JEME, Vol. 18, No. 125. pp. 1226-1235, 1975.
3. 이형우, 이동환, 박노길, "터보압축기의 진동 특성에 관한 해석적 연구," 한국소음진동공학회지, 제8권, 제6호, pp. 1069-1077, 1998.
4. 박상규, "기어박스로 구동되는 축-저널베어링계의 동적특성에 관한 연구" 한국소음진동공학회지, 제5권, 제4호, pp. 565-576, 1995
5. 이안성, 김영철, 박종권, "100,000 rpm 운전용 원심분리기 로터-베어링 시스템의 회전체동역학 해석," 한국소음진동공학회지, 제8권, 제3호, pp. 450-456, 1998.
6. 배명호, "차량변속기의 치합전달오차에 의한 진동 특성 해석에 관한 연구," 부산대학교 일반대학원 공학박사 학위논문, 2000.
7. 박성환, 오택열, "지지구조물을 고려한 로터-베어링 시스템의 동 특성해석," 한국정밀공학회지논문집, pp. 547-550, 2001.
8. J.S. Rao, "Rotordynamics," New Age International Ltd., pp. 69-350, 1996.