

유한요소법을 이용한 의료용 원심분리기 로터의 응력 및 고유치 해석

김성민[#], 양인철^{*}, 김도균^{**}, 김학철^{**}

Stress and Modal Analysis for the Rotor System of a Medical Centrifuge using Finite Element Method

Sung Min Kim[#], In Chul Yang^{*}, Do Gyoon Kim^{**} and Hak Chul Kim^{**}

ABSTRACT

In this study, we performed finite element analysis for the design of a medical centrifuge and two-types of centrifuge were compared with each other. The types of centrifuge are 2-arm straight type and 3-arm type. Structural analysis was done with respect to the change of the rotational speed of the rotor of a centrifuge. When the rotor of centrifuge was rotated, the von Mises stress of 2-arm straight type-rotor was compared with the von Mises stress of 3-arm type. The margin of safety was estimated from the result. We found the critical speed of centrifuge from the campbell diagram by modal analysis.

Key Words : F.E.M. (유한요소법), Centrifuge (원심분리기), von Mises Stress (등가응력), 2-arm straight type (2-Arm 직선형), 3-arm type (3-Arm 형), Safety Factor (안전계수), Margin of Safety (안전여유), Campbell Diagram (캠벨선도), Modal Analysis (모우드 해석)

기호설명

σ_e = von Mises stress
 F_s = Safety Factor
 S_{LA} = Limit Allowable Strength
 S_{UA} = Ultimate Allowable Strength
 M_s = Margin of Safety

1. 서론

원심분리기는 밀도차를 이용하여 혈액 및 각종 혼합물로부터 특정의 물질을 분리 및 정제시키기 위한 기계로 응용 산업계와 기초 연구실 및 병원 등에서 널리 사용되고 있다.¹ 처리량의 규모에 따라 공업용과 실험실용으로 분류하는데 공업용은 처리량이 많은 반면 실험실용은 처리량은 적으나 분리 효과가 좋은 특징을 갖으며 회전속도에 의해 저속, 고속 및 초고속 원심분리기로 나누어진다. 본 연구에 사용된 원심분리기는 저속으로 회전하여 혼합물을 분리하기 때문에 안전하게 작동됨과 동시에 우

접수일: 2006년 9월 28일; 게재승인일: 2007년 4월 9일
교신저자: 건국대학교 의공학부
E-mail: smkim@konkuk.ac.kr Tel. (043) 851-7205
* 건국대학교 일반대학원 신기술융합학과
** (주)한렘 기술개발연구소

수한 분리 특성을 보장하기 위해서 원심분리기 시스템의 세심한 설계 해석이 필수적이다.^{2, 3}

본 논문에서는 현재 개발 중인 2-arm straight type centrifuge와 3-arm type centrifuge가 작동할 때 각 부품들의 응력해석 및 고유치해석을 수행하여 원심분리기의 정적·동적 안정성을 평가하였다.

2. 연구 방법

2.1 원심분리기 로터의 유한요소해석 모델

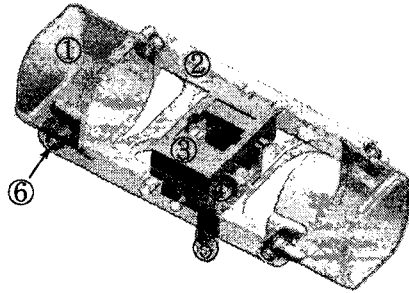
원심분리기로터의 유한요소해석은 상용소프트웨어인 Ansys Workbench 10.0 Design Modeler를 사용하여 모델링을 하였으며, Ansys Workbench 10.0 Design Space를 사용하여 해석하였다. 요소는 등방성, 등질성, 선형탄성으로 가정하고 해석하고자 하는 부품들과 그 부품들의 각 Node와 Element의 개수는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 The number of mesh element

Part Name	Material	2-Arm Straight Type		3-Arm Type	
		Node	Element	Node	Element
Side Arm	Aluminum Alloy	19117	11397	3872	1841
Side Arm Pin1	Structural Steel	3523	2185	1506	856
Side Arm Pin2	Structural Steel	4305	2703	1519	866
Side Arm Pin3	Structural Steel	4486	2838	1286	725
Side Arm Pin4	Structural Steel	3641	2275	1399	809
Side Arm Pin5	Structural Steel	-	-	1309	741
Side Arm Pin6	Structural Steel	-	-	1313	743
Bucket1	Aluminum Alloy	7350	3668	7487	3815
Bucket2	Aluminum Alloy	7368	3686	6802	3469
Bucket2	Aluminum Alloy	-	-	2621	3472
Total		49790	28752	29,114	17,337

각 부품의 명칭은 Fig. 1에 나타내었다.

Figs. 2, 3은 원심분리기 2-arm straight type과 3-arm type의 유한요소모델을 나타내었으며 요소분할은 삼각형요소로 하였다.



- ① Bucket
- ② Side arm
- ③ Upper housing
- ④ Middle housing
- ⑤ Shaft
- ⑥ Side arm pin

Fig. 1 The part name of a centrifuge

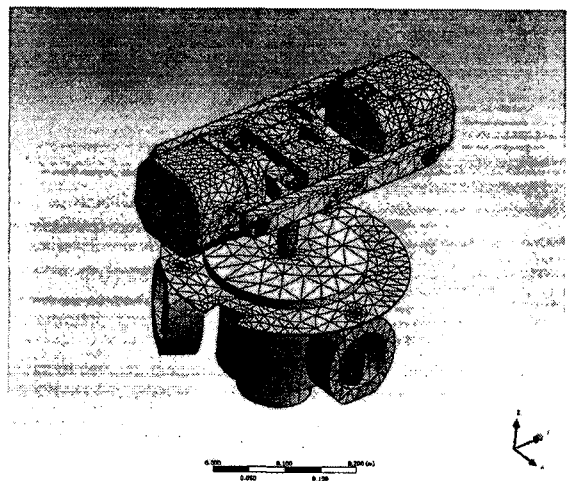


Fig. 2 The finite element model of 2-arm straight type centrifuge

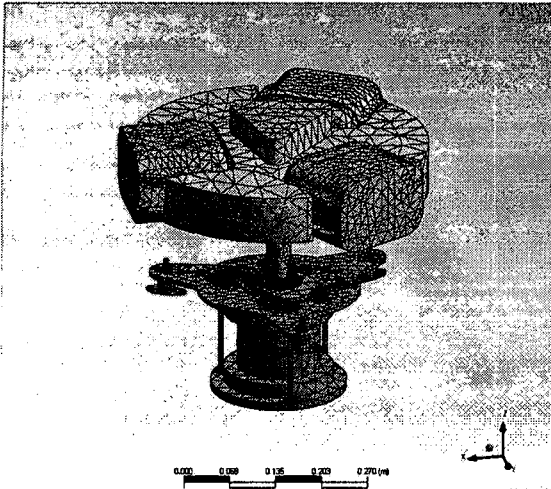


Fig. 3 The finite element model of 3-arm type centrifuge

2.2 접촉조건 및 구속조건

유한요소해석을 할 때 가장 중요하다고 할 수 있는 것이 경계 조건이다. 경계 조건들로는 접촉조건과 구속조건이 있는데 접촉조건은 Solid와 Solid 사이의 연관관계를 말하는 것이다. 구속조건은 접촉조건이 정의된 모델에 해석 기준을 설정하는 것으로 여러 가지의 변위 값으로 정의할 수 있다.

Ansys Workbench 10.0에서의 접촉조건은 크게 4가지로 나눌 수 있다. Table 2에서 접촉조건과 그 특징을 나타내었다.

Table 2 The condition of contact

Condition	Drop	Slide	Repetition Calculation
Bonded	×	×	×
No separation	×	○	×
Frictionless	○	○	○
Rough	○	×	○

Table 2의 조건을 근거로 하여 회전 시 원심력에 의해 90° Rotation을 하는 Bucket과 맞닿는 Side arm pin만 No separation 조건을 적용하였고 나머지 부품들은 모두 구속되는 Bonded 조건을 적용하였다. No separation 조건을 적용한 part는 Fig. 4에 나타내었다.

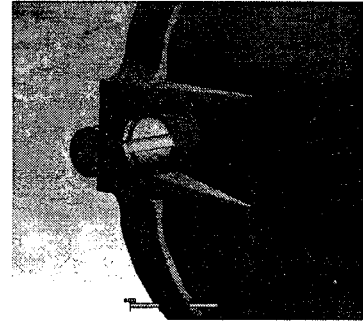


Fig. 4 The parts of no separation condition

접촉조건을 위와 같이 준 후 Shaft를 축으로 회전시키기 위해 원심분리기 모델에 구속조건을 주었다. 구속조건을 정의하는 것은 정확한 결과를 얻기 위해서는 아주 중요한 작업이다. 만약 축방향의 고정 값이나 변위 값을 잘못 주었을 땐 모델의 이탈이 발생하여 해석자체가 불가능한 경우가 초래된다. 따라서 본 원심분리기 로터는 모터부에 구속되어 저속으로 회전하기 때문에 X축, Y축, Z축에 대하여 구속하기 위해 모터와 연결되는 Shaft의 바닥부의 변위를 구속하였고, 회전은 축방향을 제외하고 구속하였다. 이와 같이 정의한 구속조건은 Fig. 5에 나타내었다.

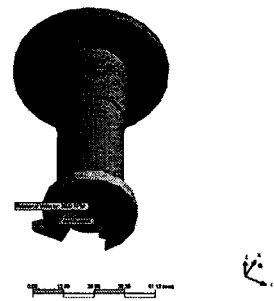


Fig. 5 Constraint condition of a rotor

2.3 재료의 물성치

해석에 사용된 재료의 물성치는 해석모델의 정확한 특성을 나타내기 위해 대단히 중요한 자료이다. 원심분리기는 Aluminum Alloy와 Structural Steel 두 가지의 재료를 사용하였다. 이들 재료의 구체적인 물성치는 Table 3에 나타내었다.⁴

Table 3 Material properties of centrifuge

Type	Aluminum Alloy	Structural Steel
Young's Modulus (GPa)	71	200
Poisson's Ratio	0.33	0.3
Density (kg/mm ³)	2.77e-006	7.85e-006
Tensile Ultimate Strength (MPa)	310	460

2.4 등가응력(von Mises stress) 해석

원심분리기를 가동하게 되면 축을 중심으로 반시계방향으로 회전운동을 한다. 회전운동을 통해 정지 시 바로 걸려 있던 Bucket은 원심력에 의해 각도변화와 함께 Bucket 속에 들어 있던 시료에 원심력을 전달하게 된다. Bucket의 변화는 Fig. 6에 나타내었다.

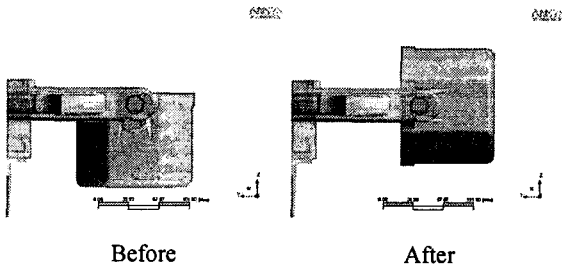


Fig. 6 The during rotation of the bucket

등가응력해석은 정지 상태에서 속도를 증가시켜 정격속도에 도달 하는 과정에서의 원심분리기의 각 부품에 대한 응력변화를 해석하였다.

유한요소해석에서 Equivalent(von Mises) stress를 해석하였고 관계식은 다음과 같다.⁵

$$\sigma_e = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서 σ_e 는 von Mises stress이고 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 은 삼차원의 각 축에 대한 주응력이다.

2.5 안전여유(Margin of Safety, M_s) 계산

구조물의 실제 응력은 허용강도보다 작아야 한

다. 실제 응력의 허용 강도에 대한 비를 안전계수, F_s 라 한다. 파단을 방지하기 위해서는 F_s 는 1.0보다 커야 한다. 경우에 따라서 1.0보다 약간 크거나 충분한 안전 계수 값이 사용된다. 안전계수가 너무 적으면 파단 될 확률이 높기 때문에 구조물은 부적합하며, 안전계수가 너무 크면 구조물의 재료가 낭비되고 기능발휘에 부적합 할 것이다. 안전여유, M_s 는 안전계수에서 1을 뺀 값으로 원심분리기의 최적 설계 여부를 판단하는 파라미터이다. M_s 가 0 이나 또는 그 이하로 떨어지는 경우 구조물은 파단 될 것으로 판정된다. F_s 와 M_s 에 관한 유도방정식은 다음과 같다.⁵

$$F_s = \frac{S_{LA}t}{\sigma_e} \quad (2)$$

$$M_s = F_s - 1 = \frac{S_{LA}}{\sigma_e} - 1 \quad (3)$$

여기서 F_s 는 안전계수(Safety Factor), S_{LA} 은 항복강도(Limit Allowable Strength), σ_e 는 등가응력(von Mises stress), M_s 는 안전여유(Margin of Safety) 이다.

식(3)을 다음의 식(4)로 변환하여 표현할 수 있다.

$$M_s = F_s - 1 = \frac{S_{UA}}{\sigma_e \times 1.5} - 1 \quad (4)$$

여기서 S_{LA} 대신에 S_{UA} (허용인장강도) /1.5 를 사용하였다.

2.6 모드 해석(Modal Analysis)

유한요소해석에서 비감쇠 자유진동에 관한 지배방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = \{0\} \quad (5)$$

선형계에 대하여 자유진동은

$$\{U\} = \{U_0\} \cos wt \quad (6)$$

형태의 조화거동을 보이고, 식 (6)을 식(5)에 대입하면 다음과 같은 식(7)을 얻을 수 있다.

$$([K] - w^2[M])\{U_0\} = \{0\} \quad (7)$$

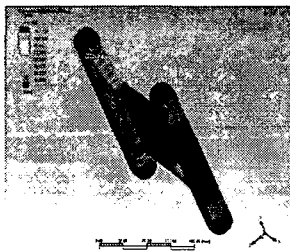
식(7)에서 $\{U_0\} \neq 0$ 이므로 $|([K] - \omega^2[M])| = 0$ 식에서 고유치 ω^2 을 얻을 수 있고, 고유벡터 $\{U_0\}$ 을 이용하여 모드형상을 나타낼 수 있다.

모우드 해석을 통해 구조물의 정규모드(Normal mode) 해석을 수행하였다. 결과로부터 얻어진 모드형상과 고유진동수로부터 각 모드에서 배가되는 회전주파수를 나타내는 Campbell Diagram을 도시하였으며, 이로부터 구조물에 나타날 수 있는 공진가능성을 판정하였다.

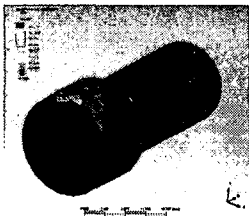
3. 해석결과

3.1 등가응력(von Mises Stress) 해석

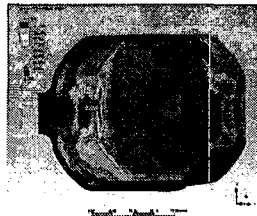
시료완충상태(45-45)에 따른 선형 정하중 해석을 3450 rpm으로 회전 시의 응력해석을 수행하였다. Fig. 7에 각 부품별 응력해석 결과 그림을 나타내었다.



(a) Side Arm



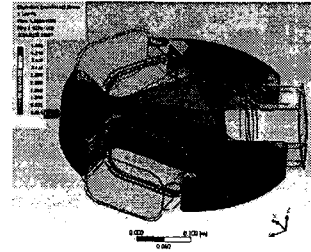
(b) Side Arm Pin 1



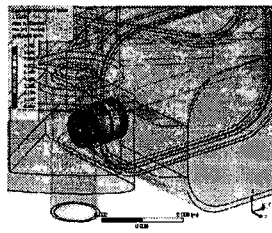
(c) Bucket 1

Fig. 7 The von Mises stress plot of 2-arm straight type centrifuge

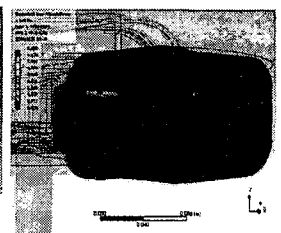
3-arm type은 시료완충상태(44-44-44)에 따른 선형 정하중 해석을 4800 rpm으로 회전 시의 응력해석을 수행하였다. Fig. 8에 각 부품별 응력해석 결과 그림을 나타내었다.



(a) Side Arm



(b) Side Arm Pin 1



(c) Bucket 1

Fig. 8 The von Mises Stress plot of 3-arm type centrifuge

3.2 안전여유(Margin of Safety, M_s) 해석결과

2-arm straight type의 3,450rpm으로 회전 시와 3-Arm Type의 4800rpm으로 회전 시의 Margin of Safety (M_s)의 계산 결과를 Table 4, 5에 나타내었다

Table 4 The margin of safety of 2-arm straight type centrifuge at 3,450rpm

Velocity (rpm)	Part	S_{UA} (Pa)	σ_e (Pa)	M_s
3450	Side Arm	3.10E+08	9.19E+07	1.25
	Side Arm Pin 1	4.60E+08	3.64E+07	7.43
	Side Arm Pin 2	4.60E+08	4.61E+07	5.65
	Side Arm Pin 3	4.60E+08	3.74E+07	7.20
	Side Arm Pin 4	4.60E+08	4.17E+07	6.36
	Bucket 1	3.10E+08	1.32E+08	0.57
	Bucket 2	3.10E+08	1.32E+08	0.57

Table 5 The margin of safety of 3-arm type centrifuge at 4,800rpm

Velocity (rpm)	Part	S_{UA} (Pa)	σ_e (Pa)	M_s
4800	Side Arm	3.10E+08	4.67E+08	-0.557
	Side Arm Pin 1	4.60E+08	9.75E+07	2.144
	Side Arm Pin 2	4.60E+08	1.47E+08	1.093
	Side Arm Pin 3	4.60E+08	1.06E+08	1.895
	Side Arm Pin 4	4.60E+08	8.39E+07	2.653
	Side Arm Pin 5	4.60E+08	7.22E+07	3.246
	Side Arm Pin 6	4.60E+08	8.62E+07	2.556
	Bucket 1	3.10E+08	6.38E+09	-0.967
	Bucket 2	3.10E+08	2.80E+09	-0.926
	Bucket 3	3.10E+08	2.67E+09	-0.922

2-arm straight type의 M_s 는 “0” 이하로 떨어지지 않은 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 2-arm straight type은 기능발휘에는 문제없음을 예측할 수 있었다. 그러나 3-arm type의 경우 Side arm과 Bucket 부분에서 M_s 가 “0” 이하 이므로 부품의 응력집중이 예상되고 응력집중 위치는 Fig. 8에서 확인 할 수 있다. 또한 하중이 심할 경우 부품의 손상이 예상되었다. 따라서 설계의 검토 및 변경이 필요할 것으로 판단된다.

3.3. 모우드 해석(Modal Analysis) 결과

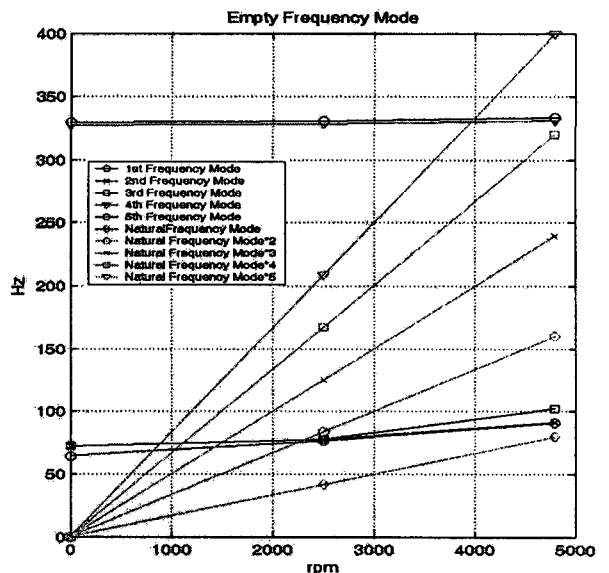
모우드 해석은 원심분리기의 회전진동수와 고유진동수와의 상관관계를 도출하기 위한 해석이며 공진이 일어나지 않는 회전주파수를 찾는 데 그 목적이 있다. 해석은 3-arm type의 시료가 비어 있는 상태와 시료가 완충되어 있는 상태에 0rpm, 2500rpm, 4800rpm으로 회전시켜 실시하였다.

따라서 Table 6에서 각 모드에서의 회전주파수를 확인 할 수 있다. 그 결과를 토대로 Fig. 9에 Campbell diagram을 도시하였으며 각 모드의 5배에 해당하는 고유진동수까지 나타내었다. 시료가 비어

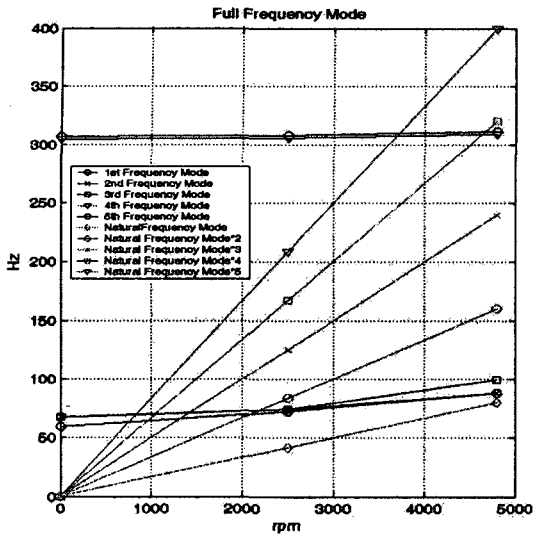
있는 상태나 완충상태에서 모두 고유진동수와 회전진동수가 만나지 않아 공진이 발생하지 않을 것으로 예측되었다.

Table 6 The modal analysis results of 3-arm type centrifuge

Mode	Shape	Condition					
		Empty			Full		
		Frequency (Hz)					
		0rpm	2500rpm	4800rpm	0rpm	2500rpm	4800rpm
		Natural Frequency (Hz)					
		0	41.8	80	0	41.8	80
1	Bending for XY Plane	64.388	76.622	91.128	59.448	72.491	88.156
2	Bending for XY Plane	72.033	77.786	91.175	67.57	73.857	88.203
3	Rotation for Z-axis	72.11	77.852	102.47	67.64	73.919	99.339
4	Bending for XY Plane	327.76	328.84	331.75	304.73	305.86	308.93
5	Bending for XY Plane	329.91	330.99	333.87	307.05	308.17	311.22



(a) Campbell diagram on empty tube



(b) Campbell diagram on full tube
Fig. 9 Campbell diagram of 3-arm type

그러나 4800rpm에서 높은 고유진동수를 가져 회전주파수와 근사를 이루었으나 정상조건인 원심 분리기 회전 시 공진의 특성은 보이지 않을 것으로 예상된다. Fig. 10에서 Mode shape을 확인 할 수 있으며 구조물에 나타날 수 있는 공진 가능성을 확인 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 원심분리기 로터가 정격속도에서 회전운동을 할 경우 발생하는 등가응력과 안전 여유 값을 도출 하였고 시료의 뱀 상태와 완충 상태 시의 운전 속도 변화에 따른 모드 해석을 수행하였다. 2-arm straight type centrifuge와 3-arm type centrifuge의 각 부품들에 관하여 실시한 유한요소 해석 결과는 다음과 같다.

- 1) 안전여유는 회전속도가 증가함에 따라 감소함을 확인 할 수 있었고 2-arm straight type의 M_s 가 "0"이나 그 이하로 떨어지지 않아 원심 분리기 로터의 분리나 파괴가 발생 하지 않는 안전한 설계임을 예측 할 수 있었다. 그러나 3-arm type의 경우 Side arm과 Bucket의 M_s 가 "0" 이하이므로 과도한 하중이 가해질 경우 부

품의 파손이 예상되므로 설계의 검토 및 변경이 필요할 것으로 판단된다.

	Mode Shape
1st	<p>(a) Bending for XY Plane</p>
2nd	<p>(b) Bending for XY Plane</p>
3rd	<p>(c) Rotation for Z-axis</p>
4th	<p>(d) Bending for XY Plane</p>
5th	<p>(e) Bending for XY Plane</p>

Fig. 10 Mode shape of 3-arm type

- 2) 3-arm type centrifuge의 모우드 해석결과나 로터의 1차 굽힘 모드가 버킷 완충 상태에서 4800rpm 회전 시에도 10% 정도 높은 고유진동수를 가짐을 확인할 수 있고, 따라서 정상조건 원심분리기 사용 시 공진 특성을 보이지 않을 것으로 사료된다.
- 3) Campbell Diagram을 통해 원심분리기의 위험속도를 제시하였으며 향후 시제품의 시험을 통해 Ansys Workbench 10.0의 해석결과를 검증할 것이다.

참고문헌

1. Seo, Y. G., "Development of Design Technique for Centrifuge," Industrial-Academic Joint Work Final Report, Dong-A Univ., 2002.
2. Park, J. K., Kim, Y. H. and Ha, S. K., "Optimal Design of Ultracentrifuge Composite Rotor by Structural Analysis," J. of the KSPE, Vol. 15, No. 1, pp. 130-136, 1998.
3. Han, G. J., Lee, S. W., Shim, J. J., An, D. S., Ahn, C. W., Suh, Y. K. and Kim, T. H., "Stress and Vibration Analysis with respect to the change of the shape of Screw Blade and the Hole for Centrifuge," J. of the KSPE, Vol. 20, No. 9, pp. 118-125, 2003.
4. Gere, J. M. and Timoshenko, S. P., "Mechanics of Materials," forth edition, Thomson Learning, pp. 3-43, 2001.
5. Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., "Theory of Elasticity," McGraw-Hill, pp. 80-83, 1982.