

경사날개형교반기회전축계의 진동특성

리호준, 윤창진

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《우리는 과학기술을 발전시켜도 남들이 걸은 길을 따라만 갈것이 아니라 우리 과학자들의 애국충정과 우리 인민의 슬기와 민족적자존심을 폭발시켜 년대와 년대를 뛰어넘으며 비약해나가야 합니다.》(《조선로동당 제7차대회에서 한 중앙위원회사업총화보고》 단행본 39페이지)

교반기는 화학, 식료, 화장품생산, 야금, 종이제작, 석유, 물처리 등 공업의 많은 분야에서 광범히 응용되고있으며 기술의 발전에 따라 교반축의 진동에 대하여 연구할 문제들이 더욱 절박하게 제기되고있다. 진동에 의하여 교반축과 기타 관련토막에 풀림과 균열이 발생하게 되며 경우에 따라 생산이 정지되거나 균열로 파괴를 일으켜 엄중한 사고를 조성할수 있다.

교반체계의 구조가 상대적으로 복잡하므로 계의 고유진동과 강제진동에 대한 연구를 심화시켜왔다.[1, 2] 또한 뿔프나 수력타빈에서 날개바퀴와 날개의 류체고체연성진동, 축계의 진동특성에 대한 연구들이 진행되였다.[3-6]

론문에서는 유한요소법을 리용하여 6경사교반날개바퀴를 가지는 교반축계의 고유진동과 강제진동특성을 연구하였다.

1. 교반축계의 모형화와 진동방정식

론문에서는 끝부분에 6경사날개바퀴를 가지는 돌출보형의 교반축계에 대하여 연구한다. 교반축계모형에서 축의 중간부의 직경은 30mm로서 주요설계파라미터의 하나이다.(그림 1)



앞으로 이 값이 22~30mm사이에서 변화될 때의 진동특성에 대하여 고찰한다. 축의 중간부의 길이는 580mm이다. 그림에 보여준 교반날개바퀴는 직경이 200mm이며 이 값이 120~240mm범위에서 변할 때의 진동특성에 대하여 고찰한다. 교반날개는 너비 20mm이고 두께는 3mm이다. 중심보스부의 외경은 40mm이고 내부구멍은 직경이 25mm이다. 축의 끝부분에는 용수자리쇠를 끼운 다음 주머니나트를 채운다. 축의 재료는 1Cr18Ni9Ti로 한다.

이 교반축계를 유한요소법에 의하여 모형화하면 다음과 같은 형태의 방정식이 얻어진다.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

여기서 $\{x\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{\ddot{x}\}$ 는 각각 계의 변위, 속도, 가속도벡터이고 $[M]$, $[C]$, $[K]$, $\{f(t)\}$ 는 각각 질량행렬, 감쇠행렬, 역세기행렬과 외력벡터이다.[2]

교반축이 교반과정에 주요하게 받는 부하는 류체작용력, 입구모멘트, 교반기편심원심력과 자체의 중력 등이다. 이런것들의 공동의 작용으로 교반축에 작용하는 부하는 틀음부

하, 축방향부하, 가로방향(반경방향)부하의 세가지 부류로 나눈다.

축계의 진동에 중요한 영향을 주는 가로방향(반경방향)의 류체작용력 F_h 는 날개바퀴의 매개의 날개에 작용하는 비평형적인 류체작용력에 의하여 발생한다. 일반점도의 류체에 대하여 류체가로방향힘의 진폭값은 아주 크고 가로방향힘평균값의 $\pm 100\%$ 에 달할수 있다. 류체가로방향힘의 주파수가 교반축림계회전속도의 공진구역에 위치할 때 그 값은 증폭되고 가로방향힘평균값의 $\pm 200\%$ 에 달할수 있다.[1]

류체가로방향힘의 평균값은 많은 경우 날개에 작용하는 류체균등분포힘을 날개의 3/4 반경위치에 작용하는 등가인 집중힘으로 환산할수 있다. 류체가로방향힘은 이 집중힘과 가로방향힘결수의 승적이며 그 계산식은 다음과 같다.[1]

$$\bar{F}_h = K_I \frac{M_{nq} \times 10^3}{3D_J / 8} \quad (2)$$

식에서 K_I 는 류체가로방향힘결수이고 그 값은 실험에 근거하여 확정한다. 경사날개타빈식날개에 대하여 일반적으로 0.15~0.2, 날개통과주파수가 공진구역에 있을 때 0.25로 취한다.[1] M_{nq} 는 교반날개바퀴출력이 생성하는 톨음모멘트(단위 Nm), D_J 는 교반날개바퀴직경(단위 mm)이다.

론문에서는 Solidworks프로그램의 선형동적모의해석기능을 리용하여 위상차가 90° 인 2개의 시누스함수형태의 부하를 축에 작용시킨다.

여기에서 취급하는것은 6경사날개바퀴이며 그에 대응하게 6날개막이판의 교반설비에서 류체가로방향힘의 합력은 작용점이 교반기축중심에 위치하고 최대진폭주파수가 회전속도의 6배이며 방향변화주파수가 회전속도와 일치하는 집중힘이다.(그림 2) 류체가로방향힘변동진폭값을 평균값 \bar{F}_h 의 100%로 취하면 가로방향힘크기 F_h 의 함수는

$$F_h = \bar{F}_h + \bar{F}_h \sin(6\omega t) \quad (3)$$

x, y 의 두 방향에 가해지는 부하함수는

$$F_x = F_h \sin(\omega t) = [\bar{F}_h + \bar{F}_h \sin(6\omega t)] \sin(\omega t) \quad (4)$$

$$F_y = F_h \sin(\omega t + \pi/2) = [\bar{F}_h + \bar{F}_h \sin(6\omega t)] \sin(\omega t + \pi/2) \quad (5)$$

로 된다.[1]

류체작용력의 주파수는 축회전의 기본주파수 ω 외에 $5\omega, 7\omega$ 가 있다는것을 알수 있다. 또한 축과 동기회전하는 주파수로서 6ω 가 있다. 축의 회전속도를 1000r/min으로 보면 축의 기본주파수 16.67Hz외에 각각 83.35, 100.02, 116.69Hz가 존재한다.

2. 교반축계의 고유진동특성

교반축계는 주요하게 교반축과 교반날개로 이루어진다.

교반축의 고유진동특성은 교반축계의 진동특성평가에서 중요한 기초로 된다. 축에서 옷부분중심구멍을 고정경계로 주고 그것의 고유진동특성을 Solidworks프로그램의 선형동

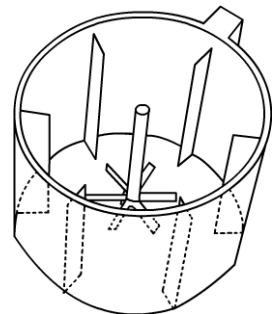


그림 2. 교반탱크내부

적모의 해석기능을 리용하여 계산하면 축의 직경에 따르는 고유진동수변화는 표 1과 같다.

표 1. 축의 직경에 따르는 고유진동수의 변화

모드차수	축직경/mm				
	30	28	26	24	22
1	53.13	49.272	45.325	41.579	38.103
2	326.16	303.52	280.36	258.09	236.86
3	891.78	833.03	772.75	713.87	656.37
4	1 237.8	1 227.4	1 215.1	1 208.1	1 206.7
5	1 696.9	1 592.4	1 484.4	1 376.8	1 269.0
6	1 954.3	1 948.3	1 939.5	1 934.1	1 935.6

구부림진동모드는 주요하게 4개로서 1, 2, 3, 5모드이며 4모드는 축방향진동모드, 6모드는 틀음진동모드이다. 표를 통하여 알수 있는바와 같이 작업주파수대역의 최대값 1 000r/min에서 축직경이 22~30mm의 범위에 있을 때 축이 공진에 걸릴 가능성이 없다는 것을 알수 있다. 특히 축방향진동모드와 틀음진동모드는 주파수가 매우 높으므로 공진에 걸릴 가능성이 존재하지 않는다.

다음으로 날개바퀴의 고유진동특성과 그것의 직경에 따르는 변화를 본다.

보스의 중심구멍을 고정경계로 할 때 날개바퀴의 직경에 따르는 고유진동수의 변화는 표 2와 같다.

표 2. 날개바퀴의 직경에 따르는 고유진동수의 변화

모드차수	$D_{\text{날}}/\text{mm}$						
	120	140	160	180	200	220	240
1	1 464.6	946.25	660.54	487.44	374.15	295.97	240.3
2	6 089.5	4 778.8	3 794.1	2 874.3	2 249.4	1 806.2	1 481.4
3	7 609	5 224.9	3 926.6	3 023.3	2 327	1 844.1	1 499.6
4	8 895.3	5 809.7	4 081.9	3 336.1	2 899.4	2 559.9	2 294.5
5	19 394	15 036	11 238	8 362.5	6 453.9	5 125.7	4 171.3
6	23 939	15 867	12 203	8 375	6 460.6	5 132.4	4 174.9

교반축계에 대하여서는 축과 날개바퀴의 각이한 진동모드들이 존재한다. 실험을 들어 날개바퀴의 직경이 200mm일 때 축계의 고유진동수는 다음과 같다.(표 3)

표 3. 날개바퀴의 직경이 200mm일 때 축계의 고유진동수

모드차수	1	2	3	4
주파수/Hz	42.774	278.28	328.15	379.98

표 3에서 보여준 1, 2차수는 기본상 축의 구부림진동형식이며 3, 4차수는 주로 날개바퀴의 진동이 위주인 진동형식들이다.

날개바퀴와 축계의 고유진동주파수들은 날개바퀴의 류체가진력의 주파수들과 일치하지 않으며 축계가 공진에 걸리는 현상은 설정한 설계파라미터범위내에서 발생하지 않을 것이라는것을 알수 있다. 특히 날개바퀴가 교반매질속에서 진동한다고 하여도 선행연구 [1]에서의 실험결과로부터 공기중에서의 고유주파수에 비한 물속에서의 고유주파수의 저하는 거의 없거나 2~3Hz정도로 작으므로 여전히 공진현상은 발생하지 않는다는것을 알수 있다.

3. 교반작업상태에서의 동적응답

식 (3)에 의하여 류체의 가로방향평균작용력을 계산하는 문제를 보자.

문론에서는 한층의 교반기만 사용하며 류체가로방향힘결수 K_f 를 0.15로 취한다.

식 (3)에 의하여 날개바퀴의 직경에 따르는 가로방향평균작용력과 그에 의한 응력과 변형을 계산할수 있다.(표 4) 이때 교반매질은 기름으로 설정하였다.

표 4. 날개바퀴의 직경에 따르는 가로방향평균작용력과 그에 의한 최대응력, 최대처짐의 변화

날개바퀴직경/mm	120	140	160	180	200	220	240
가로방향작용력평균힘 /N	4.490	7.520	11.120	16.666	23.164	30.203	40.950
최대응력/MPa	1.264	2.118	3.132	4.694	6.524	8.507	11.534
최대가로처짐/mm	0.062	0.105	0.154	0.232	0.322	0.420	0.570

식 (3)~(6)에 의하여 결정되는 류체의 가로방향작용력하에서 축계의 응답특성을 고찰하자. 모의는 Solidworks의 선형동적해석모의기능에 기초하여 실현한다. 그를 위하여 Matlab에서 식 (5), (6)에 의하여 류체작용력을 2개의 화일로 생성하고 기록한다. 화일에서 자료점들의 시간간격은 0.001s로 취한다. 축계에 대하여 서로 수직인 축방향을 설정하고 이 방향으로 각각 식 (5), (6)에 해당하는 류체작용력화일을 설정해준다.

모의는 축계의 날개바퀴의 직경이 200mm인 경우에 대하여 진행하였으며 축계의 가로방향류체작용력에 대한 변위응답과 속도응답을 얻고 그에 대한 스펙트르해석을 진행하였다. 축계의 가로방향진동속도에 대한 스펙트르해석결과를 그림 3에 보여준다.

표 4에 보여준 평균힘작용하에서의 변위는 0.322mm라면 수치모의로 계산한 동적응답은 0.25mm로서 근사한 값을 가진다.

류체의 가로방향작용력에 의한 진동속도값은 40mm/s의 비교적 큰 값에 달한다는것을 알수 있다. 불균형의 견지에서 보면 교반축평균정밀도등급을 16mm/s로 선정하며 이때 교반장치허용편심거리는 $[e]=$

9.55G/mm 이다. 이 식으로부터 계산하면 $[e]=9.55*16/1000=0.153\text{mm}$ 이다. 이 값에

비하여 류체의 가로방향작용력에 의한 진동변위 0.25mm는 매우 크며 정밀도등급 16mm/s에 비하여 진동속도 40mm/s의 값도 크다는것을 알수 있다.

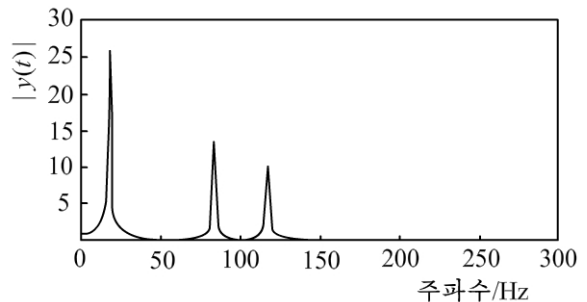


그림 3. 축계의 가로방향진동속도에 대한 스펙트르해석결과

진동속도스펙트럼분석결과를 통하여 알수 있는바와 같이 외력의 주파수성분과 같이 주파수 ω 와 5ω , 7ω 에서 공진봉우리가 나타나며 주파수가 커짐에 따라 진폭값은 작아지지만 그것을 무시할수 없다는것을 알수 있다.

맺는 말

론문에서는 6경사날개바퀴를 가지는 교반축계를 연구대상으로 계에 작용하는 외력의 특성, 축과 날개바퀴, 축계의 고유진동특성, 강제진동특성을 고찰하였다.

고찰되는 범위에서 축직경이 변화될 때 축과 날개바퀴, 축계가 공진에 걸릴 가능성은 존재하지 않는다. 교반날개직경이 커짐에 따라서 류체의 가로방향가진력에 의한 진동이 비교적 큰 값에 도달할수 있다.

참고 문헌

- [1] 李建丰; 悬臂搅拌轴动力特性研究, 北京化工大学硕士学位论文, 1~80, 2003.
- [2] 顾乡; 机械搅拌装置振动的模态试验研究和分析, 北京化工大学硕士学位论文, 5~65, 2006.
- [3] 袁启铭; 轴流泵叶片流固耦合振动特性分析, 扬州大学硕士学位论文, 1~69, 2009.
- [4] 钱玉琴; 高速离心泵流固耦合动力特性的研究, 江苏大学硕士学位论文, 21~86, 2010.
- [5] 刘德民; 基于流固耦合的水轮机振动的数值研究, 西华大学硕士学位论文, 20~94, 2008.
- [6] 胡俐; 化学品船用液下硫磺泵的设计与研究, 江苏大学硕士学位论文, 14~75, 2012.

주체107(2018)년 12월 5일 원고접수

The Vibration Characters of a Rotating Axis System in an Agitator with Inclined Propellers

Ri Ho Jun, Yun Chang Jin

In this paper, we study the characters of the natural vibration and the forced vibration of a rotating axis system in an agitator with inclined propellers and find the natural frequency and dynamic response of the rotating axis system.

Key words: agitator with inclined propellers, dynamic response