

流體連成이 작용하는 同軸 圓筒形 쉘의 고유진동

(The Natural Frequency of a Coaxial Cylindrical Shell with Fluid Coupling)

안 병준*(전북대 대학원), 정 경훈(한국원자력연구소), 이 성철(전북대 기계공학과)

B.J. AHN(Chonbuk Univ.), K.H. JEONG(KAERI) and S.C. LEE(Chonbuk Univ.)

ABSTRACT

The experimental and finite element studies of a coaxial cylindrical shell filled with liquid in the annular gap were performed to understand its vibration characteristics. Finite element analysis was achieved by using ANSYS code. From the investigation of the changing trend of natural frequencies for the change of annular gap we know that the natural frequency of the coaxial cylindrical shell varies according to the mode shape. that is, in case of in-phase mode the natural frequency decrease as annular gap increase, but in case of out-of-phase mode the natural frequency increase. Finite element analysis results show the excellent agreement with the experimental results both in air and in water case, so that analysis on other cases will be possible without experiment.

Key Words : Coaxial Cylindrical Shell(동축 원통쉘), Natural Frequency(고유진동수),
Coupling Effect(연성 효과), Added Mass Effect(부가 질량 효과)

1. 서 론

유체로 채워져 있는 많은 원통형 구조물들이 원자력 발전소나 각종 화학공장에서 사용되고 있다. 이러한 구조물들은 유체로 인한 連成效果(coupling effect) 및 附加質量效果(added · hydrodynamic mass effect)가 항상 나타나게 된다. 특히 가압경수로 원자로같이 매우 근접한 간격을 가지고 유체로 연성된 同軸 원통형 쉘에서 이와 같은 현상은 더욱 복잡하게 나타난다. 따라서 이러한 구조물들의 안전성을 확보하기 위해서 유체내 구조물의 정확한 동특성 해석이 반드시 필요하다. 이를 위해 공기 중의 동특성으로부터 水中에서의 특성치 변화를 질량의 변화, 즉 hydrodynamic mass 변화로 이해하는 해석적인 방법이 사용되고 있다. 이러한 해석적인 방법은 신뢰도를 높이기 위해서 진동특성의 실험적 고찰이 필수적이다.

본 논문에서는 먼저 비어있는 원통형 쉘의 진동특성을 구하고, 다음으로 동축 원통형 쉘의 내부와 외부 실린더 사이에 물을 참가하여 진동특성을 실험하였다. 또

한, ANSYS 코드를 사용하여 유한요소 해석을 수행하고 실험치와 비교함으로써 동축 원통형 쉘의 진동특성을 밝히고 유한요소법을 통한 해석기법의 타당성을 밝히고자 한다.

2. 유한요소 해석

동축 원통쉘의 이론 해석은 상용 컴퓨터 프로그램인 ANSYS 코드를 사용하였다. 참고 문헌 4)로부터 2차원 유한요소를 사용하더라도 3차원 유한요소 모델을 사용하여 해석한 결과와 거의 동일함을 알 수 있다. 따라서 여기에서는 시간과 노력을 줄일 수 있는 2차원 축대칭 요소를 사용하여 내부와 외부의 실린더는 2절점 축대칭 쉘 요소(STIF 61)로, 구조물 내의 유체는 4절점 축대칭 유체 요소(STIF 81)로 모델링했다.

유한요소 모델링시 경계면은 여러쌍들의 절점, 즉 구조물에 대한 축대칭 고체요소의 절점과 물에 대한 축대칭 유체요소의 절점들로 표현되며, 경계면에 직각방향의

자유도는 고체요소와 유체요소의 절점이 동일한 변위를 가지나 경계면 접선방향의 자유도는 고체요소와 유체요소의 절점이 서로 다른 변위를 가질 수 있다.

구조물과 유체의 경계면에서 생기는 접선방향으로의 미끄러짐을 고려하기 위해 ANSYS의 변위에 대한 구속 조건 CP(Coupled DOF)를 적용하였다.

유한요소 해석은 유체가 채워지지 않은 경우의 안쪽 셀과, 안쪽과 바깥쪽 실린더의 간격이 17mm, 37mm, 57mm인 동축 원통셀에서 유체가 가득 채워져 있는 경우, 그리고 간격이 17mm인 경우에서 유체가 75%, 50% 채워져 있는 경우에 대하여 수행하였다.

3. 실험

3.1 실험 장치

그림 1은 본 연구에 사용된 동축 원통형 셀 구조물을 보여주고 있다. 이 구조물은 안쪽과 바깥쪽의 알루미늄 원통셀과 이 셀을 지지하고 있는 사각형 지지판으로 구성되어 있다. 구조물 내의 유체는 밀도가 1000kg/m^3 인 물을 사용하였고 알루미늄 원통셀의 사양은 다음과 같다.

내부 원통 : 내반경 115mm, 두께 3mm, 높이 365mm
외부 원통1 : 내반경 135mm, 두께 3mm, 높이 365mm
외부 원통2 : 내반경 155mm, 두께 3mm, 높이 365mm
탄성 계수 : $0.69 \times 10^{11}\text{N/m}^2$

Poisson 비 : 0.30

밀도 : 2700kg/m^3

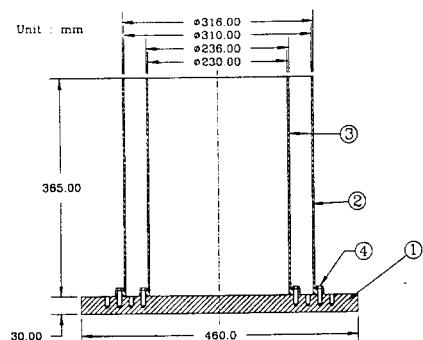


Fig.1 Experimental Set-up

3.2 실험 방법

본 연구의 실험장치 개략도를 그림 2에 나타냈다. 안쪽과 바깥쪽 셀은 각각 등간격으로 원주방향으로 16개,

축방향으로 12개씩 총 192개의 절점으로 나누었다. 비어 있는 경우의 셀에서 진동 측정은 내반경 115mm인 내부 원통에 대해서 행했다. 물이 차있는 동축원통의 실험은 안쪽 셀과 바깥쪽 셀의 간격이 17mm, 37mm인 경우에 대하여 안쪽 셀과 바깥쪽 셀에 가속도계를 부착한 후 A/D신호변환기를 통해서 개인용 컴퓨터에 연결하고, 마찬가지로 A/D신호변환기를 통해서 개인용 컴퓨터에 연결된 충격햄머로 바깥쪽 셀을 가진하여 행하였다.

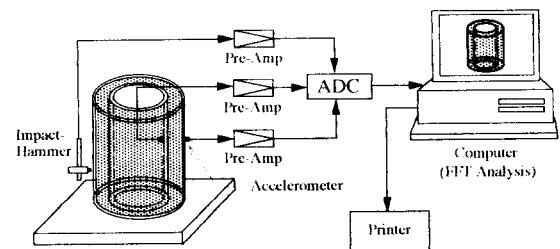


Fig.2 Schematic diagram of system

이때 충격햄머로부터 입력되는 신호와 가속도계로부터 출력되는 신호는 전하증폭기로 증폭된 다음 컴퓨터 내에서 메모리에 저장되고 SIGNAL MATH 프로그램에 의해 고속 프리에(fourier) 변환되어, 가진점과 응답점간의 전달함수가 계산된다. 본 실험에서는 가진점을 고정하고 안쪽과 바깥쪽의 모든 절점에 가속도계를 옮겨가며 부착시켜 주파수 응답함수를 구하였다. 이로부터 두 개의 셀과 유체가 연성된 고유진동수가 얻어지며 이에 해당하는 모우드 형상이 구해진다.

원통형 셀의 3차원 모우드 형상은 구조물의 384개 절점(안쪽 셀 192 + 바깥쪽 셀 192)에 대해서 모두 주파수 응답함수를 구한 후 MATLAB 프로그램으로 curve-fitting을 수행하여 구하였다.

4. 고찰

각 경우에 대한 실험과 이론치를 표 1,2,3에 정리했다. 모든 경우에 대해 실험과 이론치가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그림3은 내부와 외부 원통의 간격이 17mm, 접수율이 75%인 표2의 데이터중 in-phase 모우드에 대한 실험과 이론치를 나타낸 그래프이다. 실제 실험에서 구성한 바닥에서의 경계조건이 완벽한 고정조건을 만족시키지 못하기 때문에 저차 원주방향 모우드($n < 2$)에서 다소 오차가 발생하고 있으나 고차 원주방향 모우드로

같수록 이런 영향에 의한 오차는 감소한다.

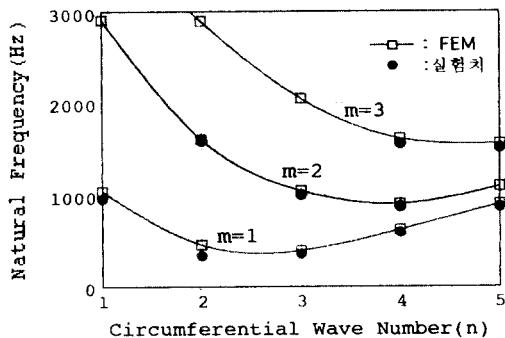


Fig.3 Natural frequency of a coaxial shell (gap=17mm, water level=75%, in-phase mode)
(n : 원주방향의 wave 수, m : 축방향의 모우드 수)

각 주파수대에서의 모우드 형상 또한 매우 잘 일치하고 있다. 동축 원통의 모우드 형상은 In-phase와 Out-of-phase의 두가지 모우드 형태로 나타나고 있다. In-phase 모우드는 안쪽쉘과 바깥쪽 쉘이 같은 방향으로 운동하는 모우드이고, Out-of-phase 모우드는 안쪽 쉘과 바깥쪽 쉘이 반대방향으로 운동하는 모우드로써 그림4, 그림5와 같다.

위에서 알 수 있듯이 실험결과와 FEM결과가 진동 모우드의 형태에 관계없이 매우 잘 일치하므로 유한요소해석이 매우 적절하게 되었다고 할 수 있다. 따라서 실제 실험을 통하지 못한 다른 경우에 대해서도 정확한 데이터를 얻는 것이 가능하다.

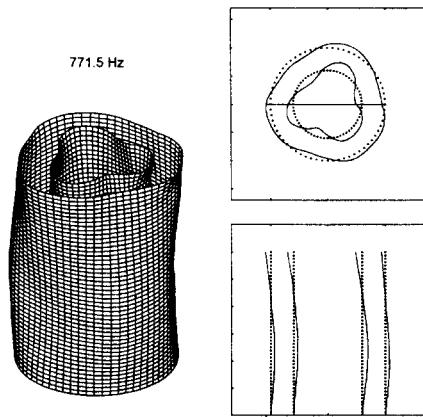


Fig.4 Typical mode shape of In-phase
(n=3 m=2, f_n (Natural freq.)=771.5 Hz)

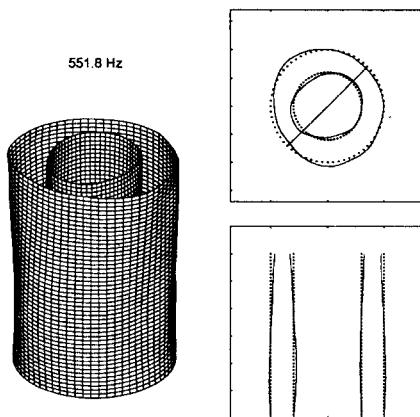


Fig.5 Typical mode shape of Out-of-phase
(n=2 m=2, $f_n=551.8$ Hz)

표 4는 물이 차있지 않은 안쪽 실린더와 간격이 각각 17mm, 37mm, 57mm인 동축원통쉘의 고유진동에 대한 FEM결과 값들이다. 그림 6과 7은 간격이 증가함에 따른 동축원통쉘의 in-phase모우드와 out-of-phase모우드의 진동특성 변화를 보여준다. 그림으로부터 간격이 증가할 수록 in-phase 모우드에서는 고유진동수가 지수적으로 감소하며, 반대로 out-of-phase 모우드에서는 서서히 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 in-phase 모우드에서는 양 실린더가 같은 방향으로 움직이므로 그 사이의 물도 같이 운동을 하게 되어 Hydrodynamic mass 효과가 일어나지만, out-of-phase 모우드에서는 양 실린더의 운동이 반대로 일어나기 때문에 물이 압축, 팽창되어 in-phase에서와 같은 효과가 일어나지 않기 때문이다. 즉 실린더 사이의 유체에 의한 Hydrodynamic 효과는 모우드에 따라 매우 다른 양상을 보이고 있음을 알 수 있다.

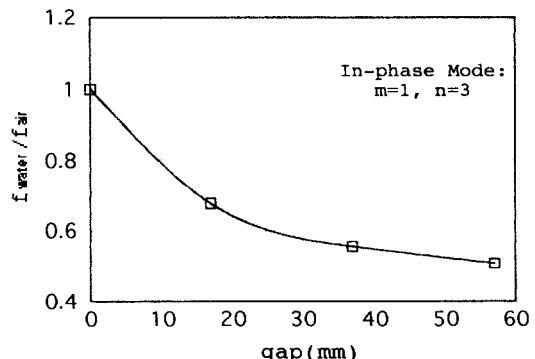


Fig.6 Comparison of natural frequencies according to the change of the annular gap (in-phase mode)

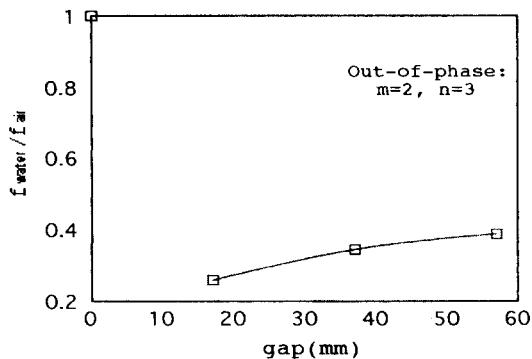


Fig.7 Comparison of natural frequencies according to the change of the annular gap (out-of-phase)

표 5는 간격이 17mm인 동축 원통쉘에서 각각 물이 100%, 75%, 50% 채워져 있는 경우에서의 고유진동에 대한 FEM해석 결과이다. 그럼 8은 $m=2$, $n=3$ 인 모드에서 접수율에 대한 고유진동수의 변화를 보여준다. $f_{100\%}$ 는 원통 사이에 물이 가득찬 경우에서의 고유진동수를 나타낸다. 그림에서 접수율이 감소할 수록 고유진동수가 비선형적으로 증가함을 알 수 있다. 따라서 유체가 부분적으로 채워진 동축 원통형 쉘의 고유진동수를 예측할 때, 단순히 유체의 수위에 따른 비례 가중치를 주어 계산하면 실제의 고유진동수에서 크게 벗어난 값을 얻을 수 있다. 한편 in-phase와 out-of-phase에 따라 증가율이 매우 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. in-phase 모우드에서의 고유진동수는 완만하게 증가하면서 비어 있는 경우의 고유진동수로 접근하고 있지만 out-of-phase에서는 매우 큰 증가율을 보이고 있다.

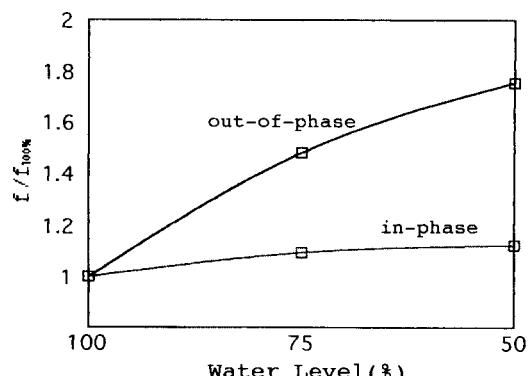


Fig.8 Comparison of natural frequencies(Hz) according to the change of the water level ($m=2$, $n=3$)

5. 결 론

유체로 채워진 동축 원통형 쉘의 고유진동에 대해 실험과 유한요소해석을 수행하고, 간격(gap)과 접수율의 변화에 대한 진동특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) in-phase 모우드의 경우, 내부와 외부 원통사이의 간격이 증가함에 따라 고유진동수가 지수적으로 감소하며, out-of-phase 모우드의 경우에는 간격이 증가함에 따라 고유진동수가 완만하게 증가한다. 따라서 실린더 사이의 유체에 의한 Hydrodynamic 효과는 in-phase 및 out-of phase에 따라 매우 다른 양상을 보이고 있음을 알 수 있다.

(2) 접수율이 감소할수록 고유진동수는 비선형적으로 증가하며, in-phase 모우드에서는 고유진동수가 완만하게 증가하여 비어있는 경우의 고유진동수로 접근하지만 out-of-phase에서는 상당히 큰 증가율을 보이고 있다.

(3) 실험결과와 FEM결과가 진동 모우드의 형태에 관계없이 매우 잘 일치하고 있어 유한요소 해석이 매우 적절함을 알수 있으며, 이를 통해 실험을 통하여 않고 정확한 데이터를 얻는 것이 가능하다.

참고문헌

1. J.Tani, K.Ohtomo, T.Sakai, M.Chiba, 1989, "Hydroelastic Vibration of Partially Liquid-Filled Coaxial Cylindrical Shells", Sloshing and Fluid Structure Vibration, Vol.157, pp.29-34.
2. J.Tani, T.Sakai, M.Chiba, 1989, "Dynamic Stability of Fluid-Coupled Coaxial Cylindrical Shells under Vertical Excitation", Sloshing and Fluid Structure Vibration, Vol.157, pp.47-53.
3. 권대규, 정경훈, 이성철, 1994, "부분적으로 흐름체가 채워진 고정-자유단 원통형 쉘의 자유振動", 대한기계학회 94년도 추계학술대회 논문집(I), pp.588-592.
4. 김태룡, 정승호, 박진석, 박진호, 1992, "원자로 내부구조물의 동특성에 관한 연구", 한국원자력연구소, KAERI/RR-1263/92.
5. T.Chiba, N.Kobayashi, 1983, "A Comparison of Experimetal and Theoretical Vibration Results for Fluid-Coupled, Coaxial Cylinder", 7th SMIRT, pp.507-514.

6. 권대규, 1995, “液體로 채워진 圓筒形 셀의 振動特性에 관한 연구”, 석사학위논문, 전북대학교 대학원

| m | Phase | Method | Circumferential Wave Number(n) | | | | | |
|---|-------|--------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | In | FEM | 936.6 | 386.6 | 329.3 | 519.4 | 820.4 | 1197 |
| | | Exper. | -- | -- | 292.97 | 498.05 | -- | 1157.2 |
| 2 | Out | FEM | -- | -- | -- | -- | 352.5 | 575.3 |
| | | Exper. | -- | -- | -- | -- | 341.8 | 551.8 |
| 3 | In | FEM | 2740 | 1491 | 955.2 | 823.2 | 982.2 | 1319 |
| | | Exper. | -- | 1450.2 | 917.97 | 791.02 | 952.15 | 1274.4 |
| 3 | Out | FEM | 535 | -- | 334.7 | 348.1 | 465.6 | 676.5 |
| | | Exper. | -- | -- | 327.2 | 336.9 | 454.1 | 659.2 |

Table 1 The natural frequency(Hz) of a coaxial shell with 17mm gap and 100% water level.

| m | Phase | Method | Circumferential Wave Number(n) | | | | | |
|---|-------|--------|--------------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | In | FEM | 1041 | 460.5 | 395.6 | 622.9 | 900.4 | -- |
| | | Exper. | 961.9 | 341.8 | 361.3 | 595.7 | 869.14 | -- |
| 2 | Out | FEM | -- | -- | -- | -- | 404.4 | 618.4 |
| | | Exper. | -- | -- | -- | -- | 390.6 | -- |
| 3 | In | FEM | 2909 | 1606 | 1046 | 902.9 | -- | -- |
| | | Exper. | -- | 1592.3 | 1001 | 874.02 | -- | -- |
| 3 | Out | FEM | 758.9 | 591.5 | 496.2 | 525.2 | 668.6 | 862.9 |
| | | Exper. | -- | -- | 473.6 | -- | 644.5 | 830.1 |
| 3 | In | FEM | 3972 | 2900 | 2053 | 1615 | 1561 | -- |
| | | Exper. | -- | -- | -- | 1562.5 | 1513.7 | -- |
| 3 | Out | FEM | 1436 | 1166 | 976.6 | -- | -- | 1246 |
| | | Exper. | -- | -- | 952.2 | -- | -- | 1245.1 |

Table 2 The natural frequency(Hz) of a coaxial shell with 17mm gap and 75% water level.

| m | Phase | Method | Circumferential Wave Number(n) | | | | | |
|---|-------|--------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | In | FEM | 814.9 | 333.9 | 270.5 | -- | 700.1 | 1052 |
| | | Exper. | -- | 244.14 | 249.02 | -- | 683.6 | 1020.5 |
| 2 | Out | FEM | 225.7 | -- | -- | 202.4 | 334.4 | 517.7 |
| | | Exper. | -- | -- | -- | 190.4 | 317.4 | 498.1 |
| 3 | In | FEM | 2279 | 1245 | 797.1 | 684.1 | -- | 1158 |
| | | Exper. | -- | -- | 771.5 | 664.1 | -- | 1142.6 |
| 3 | Out | FEM | 714.8 | 552 | 445.7 | 446.6 | 492.3 | 637.3 |
| | | Exper. | -- | 551.8 | 439.5 | 434.6 | 483.4 | 615.2 |
| 3 | In | FEM | 3110 | 2240 | 1610 | 1269 | 1208 | 1421 |
| | | Exper. | -- | -- | -- | 1254.9 | 1191.4 | -- |
| 3 | Out | FEM | 1328 | 1129 | 972 | 869.9 | 872.8 | 927.9 |
| | | Exper. | -- | -- | 952.2 | -- | 874 | 913.1 |

Table 3 The natural frequency(Hz) of a coaxial shell with 37mm gap and 100% water level.

7. J.H Park, J.S Park, J.S Ryu, S.H Jung and T.R Kim, 1994, "A Study on the Change in Dynamic Characteristics of a Submerged Coaxial Cylindrical Structure", ICVE'94 Beijing, pp.669-674.

8. 정경훈, 1995, “液體와 接하는 圓筒形 셀의 固有振動 解析”, 공학박사학위논문, 전북대학교 대학원

| m | gap | Phase | Circumferential Wave Number(n) | | | | | |
|---|------|-------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 0mm | Inner | 1121.6 | 504.7 | 485.4 | 806 | 1277.7 | 1862.2 |
| | | In | 936.6 | 386.6 | 329.3 | 519.4 | 820.4 | 1197 |
| | 17mm | Out | -- | -- | -- | -- | 352.5 | 575.3 |
| | 37mm | In | 814.9 | 333.9 | 270.5 | -- | 700.1 | 1052 |
| 2 | 57mm | Out | 225.7 | -- | -- | 202.4 | 334.4 | 517.7 |
| | | In | 722.3 | 304.9 | 247 | 405.3 | 673.1 | 1021 |
| | 0mm | Outer | 204.1 | 167.3 | 147.2 | 177.8 | 270.2 | 405.5 |
| | 17mm | In | 3310.5 | 1956.4 | 1291.6 | 1184.7 | 1484.8 | 2014.1 |
| 3 | 37mm | Out | 535 | -- | 334.7 | 348.1 | 465.6 | 676.5 |
| | | In | 2279 | 1245 | 797.1 | 684.1 | -- | 1185 |
| | 57mm | Out | 714.8 | 552 | 445.7 | 446.6 | 492.3 | 637.3 |
| | 0mm | In | -- | 1103 | 720 | 629.9 | 798.1 | 1126 |
| 3 | 57mm | Out | 813.9 | 629.5 | 501.2 | 460.7 | 459.4 | 538.1 |
| | | Inner | -- | 3789.5 | -- | 2101.1 | 2055.8 | 2396.6 |
| | 17mm | In | 3868 | 2759 | 1944 | 1518 | 1430 | 1616 |
| | 37mm | Out | 1024 | 866.7 | 745.3 | 687.8 | 731.7 | 895.6 |
| 3 | 57mm | In | 3110 | 2240 | 1610 | 1269 | 1208 | 1421 |
| | | Out | 1328 | 1129 | 972 | 869.9 | 872.8 | 927.9 |
| | 0mm | In | -- | 1993 | 1444 | 1160 | 1140 | 1371 |
| | 17mm | Out | 1419 | 1227 | 1058 | 932 | 871.4 | 1299 |

Tabel 4 The natural frequency(Hz) according to the annular gap

| m | Water level | Phase | Circumferential Wave Number(n) | | | | | |
|---|-------------|-------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 100% | In | 936.6 | 386.6 | 329.3 | 519.4 | 820.4 | 1197 |
| | | Out | -- | -- | -- | -- | 352.5 | 575.3 |
| | 75% | In | 1041 | 460.5 | 395.6 | 622.9 | 900.4 | -- |
| | 50% | In | 1110 | 507.1 | 440.2 | 623.1 | 920.5 | 1381 |
| 2 | 0% | Inner | 1121.6 | 504.7 | 485.4 | 806 | 1277.7 | 1862.2 |
| | | In | 2740 | 1491 | 955.2 | 823.2 | 982.2 | 1319 |
| | 100% | Out | 535 | -- | 334.7 | 348.1 | 465.6 | 676.5 |
| | 75% | In | 2909 | 1606 | 1046 | 902.9 | -- | -- |
| 3 | 50% | In | 758.9 | 591.5 | 496.2 | 525.2 | 668.6 | 862.9 |
| | | Out | 2946 | 1649 | 1074 | 949.1 | 1061 | 1411 |
| | 0% | In | 1183 | 751.7 | 588.1 | 785.3 | -- | 1213 |
| | 100% | Inner | 3310.5 | 1956.4 | 1291.6 | 1184.7 | 1484.8 | 2014.1 |
| 3 | 75% | In | 3868 | 2759 | 1944 | 1518 | 1430 | 1616 |
| | | Out | 1024 | 866.7 | 745.3 | 687.8 | 731.7 | 895.6 |
| | 50% | In | 3972 | 2900 | 2053 | 1615 | 1561 | -- |
| | 0% | Inner | -- | 3155 | 2257 | 1781 | 1678 | -- |

Tabel 5 The natural frequency(Hz) according to the water level