

유체와 연성된 두 직사각형 평판의 모드 해석

유계형*·정경훈**·이성철***

Modal Analysis of Two Rectangular Plates Coupled with Fluid

Gye-Hyoung Yoo, Kyeong-Hoon Jeong and Seong-Cheol Lee

Key Words: Rectangular plate(직사각 평판), Fluid-structure interaction(유체-구조 상호작용), Vibration characteristics(진동 특성), Modal analysis(모드 해석), FEM(유한요소법)

Abstract

In order to investigate the vibration characteristics of fluid-structure interaction problem, we modeled two rectangular identical plates coupled with bounded fluid. The fixed boundary condition along the plate edges and an ideal fluid were assumed. An experimental modal analysis in order to extract the modal parameters of the system was performed. Finite element analysis was performed using ANSYS to verify modal parameters and analytic results were compared with experimental results. As a result, comparison of experiment and FEM showed good agreement and the transverse vibration modes, in-phase and out of-phase, were observed alternately in the fluid-coupled system. The effect of distance between two rectangular plates on the fluid-coupled natural frequency was investigated.

1. 서론

유체와 연성된 구조물의 동특성을 연구하기 위한 방법에는 유한요소법이나 경계요소법과 같은 수치 해법을 이용한 해석적 방법과 모드 해석과 같은 실험적 방법이 있다. 유한요소해석은 많은 가정과 단순화 과정을 포함하므로 이들의 검증은 위해서는 실험적 방법이 필요하다. 실험에 의한 동특성 해석법은 모드 해석이 널리 알려져 있고, 이를 이용하여 구한 모달 모델로부터 해석적으로 구한 모델을 수정하거나 보완하는 방법들이 제안되고 있다.⁽¹⁾

최근까지 유체와 접하고 있는 다양한 형태의 구조물에 대한 진동해석이 수행되고 있다.

Kwak⁽²⁾은 무한한 유체 영역에 대해 한쪽 면이 물과 접하고 있는 직사각 평판의 고유 진동을 연구하였다. 그는 NAVMI 계수(Non-dimensionalized Added Virtual Mass Incremental factor)를 도입하여 유체-구조계에서 고유진동수에 대한 유체의 영향을 추정하였다. Song⁽³⁾ 등은 냉각재에 의한 노심 지지원통(core support barrel)의 진동을 해석하기 위해 축소 모델을 만들어 모드 해석을 수행하고 유한요소 모델과 비교하여 서로 잘 일치함을 보였다. Jeong⁽⁴⁾ 등은 유공 직사각 평판이 고정되어 있는 경우에 대해 공기 중에서도 접수시의 모드 해석을 수행하여 모드 매개변수를 구하고 그 특성을 분석하였다.

최근에는 마주 보고있는 동일 크기의 두 원판 사이에 유체가 채워진 경우에 대해 해석적인 방법에 의해 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 고정된 동일 크기의 두 직사각 평판 사이에 유체가 가득 채워진 경우에 대해 모드 해석을 수행하고, 이를 유한요소 해석 결과와 비교 검토하였다. 두 평판사이의 유체는 강제력

* 전북대학교 대학원

** 한국 원자력 연구소

*** 전북대학교 기계공학과, 공업기술연구소

에 의해 구속되도록 모델링을 하였고, 두 직사각 평판사이의 거리를 변화시켜 담긴 유체의 양에 따른 동특성을 비교하였다. 또한 모드 해석을 통해 구한 모드형상으로부터 유체와 구조물의 연성 효과에 의한 역위상(out-of-phase) 및 동위상(in-phase) 모드를 구하여 그 특성을 알아보았다.

2. 모드 해석

2.1 실험 장치

유체로 연성된 두 개의 평판 구조물의 모드 해석을 수행하기 위해 Fig. 1과 같은 실험장치를 준비하였다.

가로와 세로가 336mm×256mm이고, 두께가 2.5mm인 직사각형 알루미늄 평판을 실험에 이용하였다. 평판 가장자리 8mm의 여유는 판의 고정을 위하여 사용되었다.

직사각 평판을 고정하기 위한 프레임과 홀더는 가로와 세로가 각각 420mm×340mm인 강판의 내부에 320mm×240mm 크기의 직사각형 구멍이 뚫린 구조물로, 홀더는 두께가 일정한 20mm의 강판이다. 평판사이의 거리변화에 따른 영향을 알아보기 위해 두께가 각각 20, 40, 80mm인 세 종류의 지지 프레임을 사용하였다.

해석을 위한 직사각 평판을 지지 프레임과 홀더 사이에 놓고 볼트로 이들을 체결하여 고정단의 경계조건을 모사하였다. 볼트는 20mm 간격으로 각 면에 60개씩을 사용하였고, 토크렌치를 이용하여 모든 볼트가 일정한 힘으로 체결되도록 하였다.

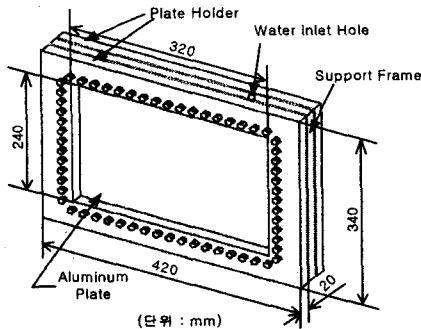


Fig. 1 Configuration of plate holder and support frame

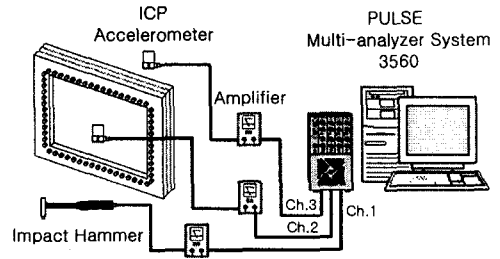


Fig. 2 Experimental apparatus

직사각 평판 사이의 유체는 물을 사용하였고, 지지 프레임 상단에 있는 구멍을 통해 채웠다. 이때, 평판 주위는 실리콘으로 방수 처리하여 물이 새지 않도록 하였다.

2.2 실험 방법

충격 햄머로 사각판을 가진 후 각 절점에서 주파수 응답 함수를 구하여 실험적으로 모드 해석을 수행하였다. 실험에 사용된 실험장치의 개략도는 Fig. 2와 같다.

충격 햄머(PCB, 086C03)로 가진하여 얻은 신호를 신호증폭기(PCB, 480E09)로 증폭시킨 후, FFT(B&K, 3560)의 Front end를 통해 컴퓨터에 입력시켰다. 양쪽 평판의 바깥면에 각각 한 개의 가속도계(PCB, 353A17, A353A17)를 왁스로 부착하였고, 햄머가진 시 가속도계에서 나온 신호를 신호증폭기에서 증폭시킨 후 FFT의 Front end를 통해 컴퓨터에 입력시켰다. 주파수 응답 함수를 구하기 위해 FFT는 1600Hz, 1600개의 스펙트럼 라인을 갖도록 설정하여 데이터를 샘플링하였다.

완전 구속 조건을 갖는 사각 평판의 경우 절점이 홀수개가 되면 측정점이 절점에 위치하게 되어 모드에 따라 주파수 응답함수를 구하기 어렵게 된다. 따라서, 본 실험에서는 직사각 평판을 각각의 고정단에서 20mm가 떨어지도록 하여 40mm 간격으로 가로 8개, 세로 6개씩 48개의 절점을 갖도록 등분하였다. 이들 절점마다 가속도계를 이동하면서 측정된 입력신호를 5회 평균하여 96개의 주파수 응답함수를 구하였다. 이때 직사각형 평판의 응답특성을 고려하여 판의 가장자리에 가까운 절점을 가진점으로 선정하였고 이곳을 지속적으로 가진하였다.

평판 사이의 거리변화에 따른 모드 매개변수를 구하기 위해 두께가 20, 40, 80mm인 지지 프레임

을 교체해 가며 실험을 수행하였다.

2.3 실험적 모드 해석

유체가 채워진 두 평판사이의 거리가 20, 40, 80mm인 경우를 각각 20D, 40D, 80D라 정하고, 실험으로 얻은 주파수 응답함수로부터 모드 매개변수를 구하기 위해 모드 해석 소프트웨어인 ME'scope (Vibrant Technology, Inc.)를 이용하였다. 2개의 가속도계를 이용하여 48개의 절점에서 구한 96개의 주파수 응답함수를 PC에 저장하여 ME'scope의 해석 데이터 포맷으로 변환시켰다. 변환된 주파수 응답함수 값들을 ME'scope에서 구현한 3차원 모델의 응답점에 대응하도록 하여 모드 매개변수를 구한 후 모드형상을 확인하였다.

측정된 주파수 응답함수로부터 모드 매개변수를 구하는 과정에서 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위해, 모든 주파수 응답함수의 진폭을 더한 총합 주파수 응답함수(summed FRF)를 이용하였다. 이를 이용함으로써 가속도계의 질량 효과에 의한 공진점의 이동을 보정할 수 있고, 측정 중 피크가 작아서 찾기 어려운 모드를 구할 수 있다. Fig. 3은 40D의 해석에 사용된 총합 주파수 응답함수의 예로, 허수값을 이용하여 총합 주파수 응답함수를 구하였고, 각 피크에 대응하는 점에서 고유진동수를 찾았다.

커브 피팅을 통해 구축한 모달 모델의 정확도를 확인하기 위해 MAC(Modal Assurance Criterion)을 이용하였다.⁽⁹⁾

MAC은 두 모드형상 사이의 기하학적 연관성을 평가하는 것으로 두 모드사이의 선형 종속관계가 성립하면 1에 근접한 값을 갖고, 서로 독립이면 직교성이 성립하므로 0에 가까운 매우 작은 값을 갖는다. 구해진 모드형상이 모두 고유진동 모드인 경우 거의 대각행렬이 되어, 모든 모드형

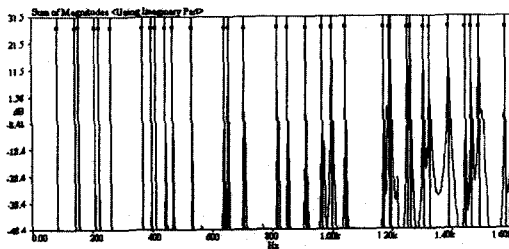


Fig. 3 Summed FRF and poles of 40D

상이 서로 독립적임을 알 수 있다.

2.4 유한요소 모드 해석

실험으로 구한 고유진동수와 모드형상을 확인하기 위해 ANSYS(release 5.53)를 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다.

해석에 사용된 모델은 모드 매개변수를 구하기 위해 실험에 사용된 것과 동일하게 모사하였다. 해석모델은 두께가 2.5mm이고, 320mm×240mm의 크기를 갖는 직사각 평판과 직사각 평판 사이에 채워진 320mm×240mm×20, 40, 80mm의 체적을 갖는 유체로 구성되었다.

유한요소 해석에서 사용된 3차원 모델은 3개의 변위 자유도를 갖는 8개의 노드로 구성된 3차원 유체요소 FLUID80과 6자유도를 갖는 4개의 노드로 구성된 탄성 셸요소 SHELL63으로 구성되어 있다.

FLUID80은 유체 압력과 유체 구조 상호작용(fluid-structure interaction) 문제를 모델링하기에 적합한 요소로, 평판 사이의 거리가 20mm인 경우 평판 사이에 두께방향으로 4개의 요소를 갖도록 ESIZE를 0.005로 설정하였고, 40mm와 80mm인 경우는 각각 6개와 12개의 요소를 갖도록 0.007로 설정하였다. 해석 모델의 물성치는 직사각형 평판의 경우 실험에 사용된 것과 같은 탄성계수 $E=72\text{GPa}$, 포아송비 $\nu=0.34$, 밀도 $\rho=2700\text{ kg/m}^3$ 이고, 평판사이의 유체는 물로서 체적탄성계수 $B=2.22\text{GPa}$, 밀도 $\rho=1000\text{kg/m}^3$ 이다. 또한 해석에 사용된 요소와 요소의 수는 Table 1과 같다.

유체와 구조물의 연성해석을 하기 위해서는 두 요소 사이의 적합조건이 필요하다. 이를 위해 유체와 판의 인접하는 노드 쌍에서 선택된 자유도를 판의 횡방향(transverse)으로 연결하여 노드를 연결시키는 CPINTF 명령을 이용하였다.

실험과 최대한 유사한 경계조건을 주기 위해 직사각 평판의 가장자리를 고정단을 설정하였고, 평판사이의 유체는 강체벽(rigid wall)에 접하는 면에서 강체벽면에 수직한 방향의 변위만을 구속하여 모델링하였다.

유한요소해석을 수행할 때 Block Lanczos법을 이용하여 20Hz와 4000Hz 사이에서 50개의 모드를 구하도록 하였다.

Table 1. Number of elements and nodes

Case	Model	Element	Element number	Node number
20D	Plate	SHELL63	6144	6370
	Water	FLUID80	12288	15925
40D	Plate	SHELL63	3220	3384
	Water	FLUID80	9660	11844
80D	Plate	SHELL63	3220	3384
	Water	FLUID80	19320	21996

3. 실험 및 유한요소 해석 결과

3.1 실험 결과

유체와 연성된 두 개의 직사각형 평판으로부터 얻은 출력신호와 가진 햄머로부터 얻은 입력신호를 고속 푸리에 변환(FFT)하여 구한 주파수 응답 함수로부터 모드 매개변수를 구하였다. 계측된 모델의 신뢰도를 얻기 위해 MAC을 이용하였다. Fig. 4는 40D에 대한 MAC을 나타낸 것으로 30번째 모드와 33번째 모드의 교차점은 상대적으로 큰 값(60.4%)을 갖고 있는데 이는 이 두 모드가 선형 종속관계를 갖고 있음을 나타내고 있다. 즉, 30번째 모드는 33번째 모드의 선형조합으로 나타낼 수 있으므로 고유진동 모드가 아님을 알 수 있다. 이와 같은 방법으로 커브 피팅을 통해 추출된 모드 매개변수를 구하여 Table 2에 정리하였다.

Fig. 5는 평판사이 거리가 40mm인 40D인 모드 형상들을 보여주고 있는데 동위상 모드와 역위상

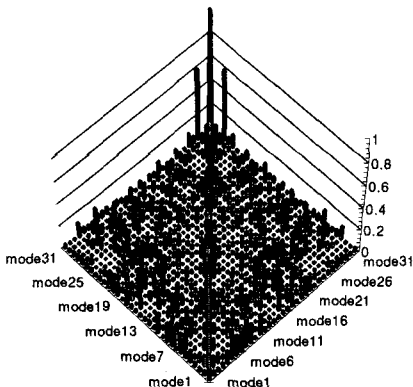
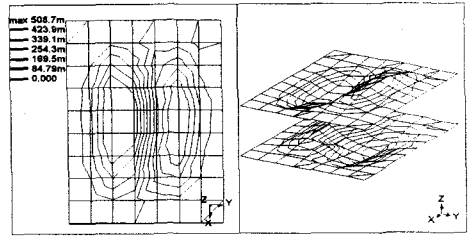
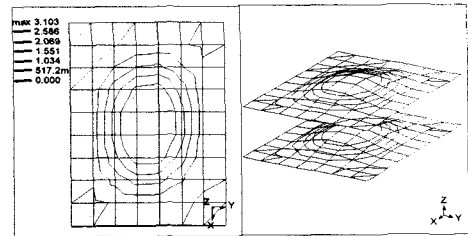


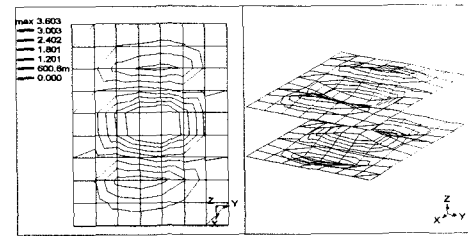
Fig. 4 Modal assurance criteria (MAC) of the fluid-coupled two rectangular plates for 40D



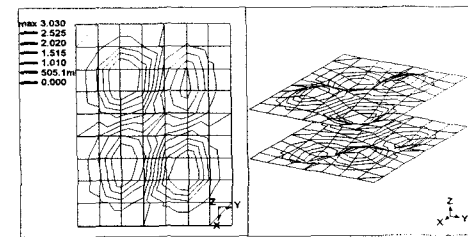
(a) (1,2) out-of-phase mode, 144.01Hz



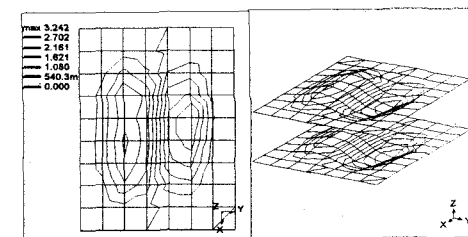
(b) (1,1) in-phase mode, 156.4Hz



(c) (3,1) out-of-phase mode, 210.7Hz



(d) (2,2) out-of-phase mode, 224.7Hz



(e) (1,2) in-phase mode, 367.6Hz

Fig. 5 Mode shapes of the fluid-coupled two rectangular plates for 40D

모드가 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 이와 같이 유체로 연성된 두 직사각형평판에는 개별 모드에 대해 동위상 모드와 이에 대응되는 역위상 모드가 존재함을 유한요소해석을 통해 구한 모드형상으로부터 확인할 필요가 있다. 실험에서 구한 모드형상을 확인한 결과 고차 모드로 갈수록 역위상 모드 보다 동위상 모드가 잘 나타나고 있음을 알 수 있었다.

본 논문의 (m,n) 모드에서 m 과 n 은 각각 길이 320mm인 장변과 240mm인 단변의 모드수를 나타내고 있다.

3.2 유한요소해석 결과

실험으로 구한 고유진동수와 모드형상의 타당성을 검토하기 위해 상용컴퓨터코드인 ANSYS를 이용하여 유한요소해석을 수행하였고, 그 결과를 실험결과와 비교하여 Table 2에 정리하였다. 유한요소해석 결과, 실험을 통해 확인하였던 것과 같이 개별 모드에 대해 동위상 모드와 역위상 모드가 존재하고 있었고, 두 평판사이의 거리가 변함에 따라 각각의 모드에서 고유진동수 변화가 나타났다.

Fig. 6은 유한요소 해석을 통해 구한 고유진동수 가운데, 단변의 모드수 $n = 1$ 일 때 장변의 모드수 m 이 변함에 따라 나타나는 모드의 경향을 20D, 40D, 80D에 대해 도시한 것으로 동위상 모드가 이에 대응되는 역위상 모드보다 크게 나타났다. 또한 점선으로 표시된 동위상 모드의 경우 평판사이의 거리가 증가함에 따라 진동수가 감소하는 반면, 실선으로 표시된 역위상 모드는 진동수가 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 7은 평판사이의 거리가 40mm인 40D의 경우에 대해 유체로 연성된 평판의 고유진동수를 도시한 것으로, (a)는 역위상 모드를 (b)는 동위상 모드를 나타내고 있다. 그림에서 실선은 유한요소 해석을 통해 구한 고유진동수를 나타내고 있고, 점선은 실험을 통해 구한 고유진동수를 나타내고 있다. 유한요소해석 결과와 실험결과를 비교해보면 각각의 고유진동수들이 서로 근접하고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 유한요소 해석을 통해 구한 고유진동수가 모드 해석을 통해 구한 값보다 크게 나타나고 있었는데, 이는 실험 시 직사각형 평판의 경계조건이 볼트체결로 인하여 유한요소 해석과 같이 완전한 고정단 조건이 되

지 않았거나 해석에 사용된 물성치의 차이에 기인하는 것으로 생각된다.

4. 결론

유체와 연성된 마주보는 동일한 두 직사각 평판의 진동 특성을 구하기 위해 실험을 수행하였고, 이를 확인하기 위하여 유한요소해석을 수행하여 실험결과와 비교하였다.

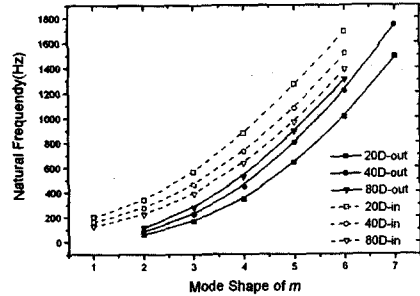
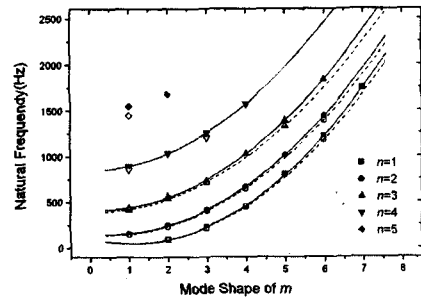
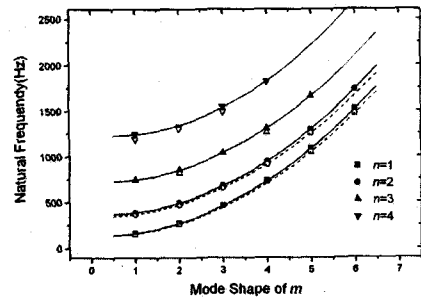


Fig. 6 Distance effect on natural frequency for $n=1$



(a) Out-of-phase mode



(b) In-phase mode

Fig. 7 FEM and Experimental natural frequencies of the fluid-coupled two rectangular plates with 40D (solid symbol & continuous line = FEM, open symbol & dashed line = Experiment)

그 결과 실험을 통해 구한 고유진동수와 모드 형상이 해석치와 서로 잘 일치하였다. 유체와 연성된 동일한 두 직사각형 평판의 고유진동에서 동위상 모드와 역위상 모드가 번갈아 가며 나타나고 있음을 확인할 수 있었다.

평판 사이의 거리에 관계없이 항상 동위상 모드의 고유진동수가 이에 해당되는 역위상 모드의 고유진동수보다 크게 나타났다. 또한 평판사이의 거리가 증가함에 따라 동위상 모드의 고유진동수는 감소하는 반면, 역위상 모드는 진동수가 증가하는 경향을 보임을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Minas, C. and Inman, D. j., 1990, "Matching Finite Element Models to Modal Data," J. of Vibration and Acoustics, Transaction of the ASME, Vol. 112, Jan., pp. 84~92.
- (2) Kwak, M. K., 1996, "Hydroelastic Vibration of Rectangular Plates," J. of Applied Mechanics, Transaction of the ASME, Vol. 63, Mar., pp. 110~115.
- (3) Song, S. H. and Jhung, M. J., 1999, "Experimental Modal Analysis on the Core Support Barrel of Reactor Internals using a Scale Model," KSME International Journal, Vol. 13, No. 8, pp. 585~594.
- (4) Jeong, K. H., Ahn, B. K. and Lee, S. C., 2001, "Modal Analysis of perforated Rectangular Plates in Contact with Water," Structural Engineering and Mechanics, Vol. 12, No. 2, pp. 189~200.
- (5) Heylen, W. and Janter, T., 1990, "Extensions of the Modal Assurance Criteria," J. of Vibration and Acoustics, Transaction of the ASME, Vol. 122, Oct., pp. 468~472.
- (6) Ewins, D. J., 1986, Modal Testing : Theory and Practice, Research Studies
- (7) 유계형, 정경훈, 이성철, 2001, "유체와 연성된 두 직사각 평판의 고유진동 해석," 한국정밀공학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp.752~755.

Table 2 Modal parameters of the fluid-coupled two rectangular plates

Mode No.	20D				40D				80D			
	FEM		Experiment		FEM		Experiment		FEM		Experiment	
	mode shape	frequency (Hz)	frequency (Hz)	damping (%)	mode shape	frequency (Hz)	frequency (Hz)	damping (%)	mode shape	frequency (Hz)	frequency (Hz)	damping (%)
1	(2,1)out	60.7	52.1	8.4	(2,1)out	84.5	84.6	0.5	(2,1)out	114.3	112.0	0.6
2	(1,2)out	108.7	100.6	0.8	(1,2)out	149.8	144.0	0.6	(1,1)in	125.7	125.1	0.6
3	(3,1)out	165.2	-	-	(1,1)in	159.9	156.4	0.2	(1,2)out	197.7	170.2	0.6
4	(2,2)out	177.5	157.7	0.6	(3,1)out	222.6	210.7	0.3	(2,1)in	220.7	213.3	0.2
5	(1,1)in	199.9	185.8	0.1	(2,2)out	240.7	224.7	0.3	(3,1)out	279.1	257.0	0.8
6	(3,2)out	310.6	277.2	1.1	(2,1)in	271.6	262.9	0.1	(2,2)out	306.5	-	-
7	(1,3)out	328.6	-	-	(1,2)in	384.2	367.6	0.1	(1,2)in	317.2	305.9	0.2
8	(2,1)in	336.2	-	-	(3,2)out	409.4	396.8	0.2	(3,1)in	388.7	377.3	0.1
9	(4,1)out	340.4	311.3	0.3	(1,3)out	431.6	412.5	0.3	(2,2)in	415.4	398.8	0.1
10	(2,3)out	428.8	408.4	1.0	(4,1)out	443.2	444.8	0.2	(3,2)out	494.2	-	-
11	(1,2)in	472.5	442.0	0.1	(3,1)in	460.4	-	-	(1,3)out	517.1	-	-
12	(4,2)out	517.6	488.3	0.5	(2,2)in	491.4	469.8	0.1	(4,1)out	524.5	523.8	0.4
13	(3,1)in	562.0	528.4	0.1	(2,3)out	555.5	532.6	0.2	(3,2)out	588.9	565.8	0.2
14	(3,3)out	573.4	-	-	(4,2)out	659.9	641.1	0.2	(4,1)in	636.8	616.1	0.3
15	(2,2)in	599.3	564.6	0.1	(3,2)in	676.3	653.5	0.1	(1,3)in	642.1	-	-
16	(5,1)out	637.1	597.0	0.2	(3,3)out	726.9	705.4	0.1	(2,3)out	652.6	641.2	1.0
17	(1,4)out	710.2	641.2	0.9	(4,1)in	727.6	-	-	(2,3)in	749.0	719.1	0.1
18	(3,2)in	814.6	-	-	(1,3)in	741.2	-	-	(4,2)out	759.7	741.2	0.4
19	(5,2)out	816.2	-	-	(5,1)out	799.1	-	-	(3,3)out	798.6	-	-
20	(4,3)out	826.8	-	-	(2,3)in	849.9	817.226	0.1	(4,2)in	831.1	817.0	0.2