

플레이트형 지지구조체로 지지된 실린더형 관 군의 고주파 유동유발진동 및 압력손실에 대한 실험적 고찰

이강희[†] · 김형규^{*} · 윤경호^{*} · 엄경보^{**} · 김진선^{**} · 서정민^{**}

Experimental investigation on the high frequency flow-induced vibration and pressure drop of cylindrical tube bundle with plate type supporting structures

Kang-Hee Lee, Hyung-Kyu Kim, Kyung-Ho Yoon, Kyong-Bo Eom,
Jin-Sun Kim and Jung-Min Suh

Key Words: High frequency flow-induced vibration(고주파 유동유발진동), Pressure drop(압력손실), Cylindrical tube bundle(실린더형 관 군), Plate type supporting structure(플레이트형 지지구조체), Hydraulic test loop(수력시험루프)

Abstract

A plate type supporting structure of a tube bundle in axial flow generates a certain band of a high frequency periodic excitation of a vortex shedding and/or a flow separation due to sharp edge of the plate thickness and a severe pressure drop due to a cross-sectional area of the supports. With a design consideration of the low vibration and a small flow resistance, the analysis method is uniquely confined to an experimental approach because a complex geometry of a cylindrical tube bundle and/or physical phenomena related to the fluid-structure interaction of tube bundle in a flow impede a theoretical or a numerical approach. A 5x5 cylindrical tube bundle with 5 supports which were discretely located along the bundle's axis was tested in the FIVPET hydraulic test loop for a design evaluation and an analysis perspectives. A high frequency flow-induced vibration of the supporting structures of the cylindrical tube bundle was measured at a outer surface of a supporting structure through a transparent flow housing by the laser dopper vibrometer. Pressure drop in-between three measurement distances was measured by the differential pressure transmitter. High frequency vibration and pressure drop fairly depends on the geometric design of supporting structure. So, these two parameters would be used as a qualitative design variables for design evaluation and analysis.

1. 서 론

축류에 놓인 실린더형 관군을 지지하는 플레이트형 지지구조체는 지지구조체의 두께 선단에서 발생하는 와류여기와 난류, 유체박리 등으로 인하여 일정 주파수폭(bandwidth)을 갖는 고주파 여기진동을 만들어 내며, 지지구조체 단면에 걸친 형상손실에 의한 압력손실을 만들어 낸다.

축방향 유동에 잠긴 관 군의 진동 저감설계와 수력저항성을 고려해야 하는 경우, 상기 두 가지 문제에 대한 해석은 대상 관군의 기하형상과 물리적인 현상의 복잡성으로 인하여, 이론적인 해가 존재하지 않으며, 최근에 개발된 수치해석적인 기법의 적용 역시 기술적인 한계(계산결과가 관군 내 유동분포와 후류유동의 정확도에 의존하므로)를 갖는다. 특별히 관 군의 거동보다는 관군을 지지하는 개별 지지구조체의 설계특성을 파악하는 것이 관심의 대상이므로, 이러한 고주파 유체-구조 상호작용의 거동(혹은 특성)과 지지구조체의 형상에 따른 수력특성을 이해하기 위해서는 전적으로 실험적인 방법에 의존해서 문제를

[†]책임저자, 회원, 한국원자력연구원

E-mail : leekh@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-2298 FAX : (042)863-0565

* 한국원자력 연구원

** 한국원자력연료주식회사

풀어야 한다.

상기와 같은 이유로 인해서, 본 연구에서는 상온/상압 유동루프에 플레이트형 지지구조체로 연속지지된 5x5 시험용 관군을 삽입하여 지지 구조체의 고주파 여기 진동과 구간 압력손실을 정량적으로 측정하였다. 동일한 시험시편을 대상으로 참조시험 루프에서 시험한 결과를 비교하여 시험장치의 유효성을 확인하였고, 이(異)종의 지지구조체에서 발생하는 고주파 여기진동 특성과 압력손실 측정값으로부터 플레이트형 지지구조체의 설계특성을 비교평가 및 고찰하였다.

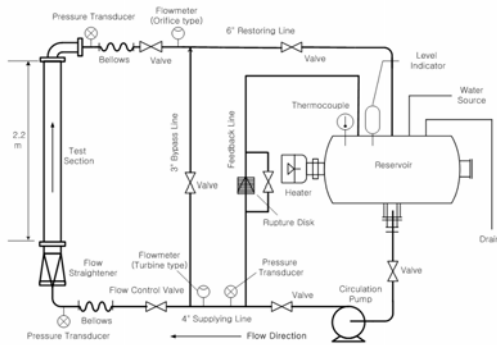


Fig 1. Flow diagram and overall layout of the hydraulic test loop (FIVPET).

2. 시험장치 및 방법

2.1 시험장치

FIVPET(Flow-Induced Vibration and Pressure Drop Experimental Tester, FIVPET)은 개방형 수력 루프(hydraulic loop)로, 단상, 상온, 상압, 순수를 순환유체로 사용한다. FIVPET의 주요 구성은 지지구조체를 포함한 5x5 관군 집합체가 장입될 시험관(flow housing), 각종 지지구조물, 입구/출구의 주 배관(직경 4"의 입구 배관, 직경 6"의 출구 배관) 및 지관/분기관(수동 유량조절을 위한 직경 3"의 우회관 및 밸브, 비상용 직경 2"의 되먹임관), 밸브 및 플랜지 등 배관계와 저수조, 펌프, 그리고 루프 내부 순환유체의 유동조건을 감시하고 계측하기 위한 유동측정장비 등을 포함한다. 저수조에서 온도조절 된(수동온도조절방식) 순환유체는 원심펌프의 회전력에 의해 시험관 상류으로 송출되며, 우회관과 되먹임관을 거쳐 시험관 내부를 축방향·상향으로 유동하게 되고, 회수관

을 통해 저수로(대기압) 되돌려 진다. Fig. 1은 FIVPET를 개략도를 나타낸다. FIVPET은 최대 유량 2.3 m³/min, 루프내 압력허용치 8 kg/cm²로, 최대 유체온도 80 °C이다. 시험은 상온 조건에서 수행되었고, 반복시험과 온도조절을 위하여 수조내 순환유체의 방류와 급수를 반복하였다.

2.2 시험용 관군 집합체

Fig. 2는 고주파 진동 및 압력 강하 시험용 5x5 시험 집합체 형상 및 지지격자 형상을 도시한다. 5개의 지지구조체를 길이방향의 일정간격으로 배열시켜, 25개의 dummy 시험봉을 삽입시켜 관군 집합체를 구성하였다. 시험집합체의 조립에 사용된 지지구조체는 노내 조건을 감안하여 고온 베이킹 처리(630 °C)된 것으로, 열변형 후 이완(thermal relaxation)되어 연료봉 삽입 시에 삽입저항이 거의 없다. 시험집합체를 수직방향으로 세우거나 유체를 방류할 때 유동방향이 아래쪽을 향하게 되면, 이때의 중력 혹은 수력작용력으로 시험봉들이 아래쪽으로 떨어져 지지구조체의 고정위치가 변화되는데(구조체내의 지지력이 작아서), 이것은 유동의 방향이 정방향을 향하게 되면, 다시 정상위치로 회귀되며 1000 rpm 이상의 고속회전으로 노즐의 유로구멍에 삽입되었던 dummy봉을 다시 정위치로 환원시키는 별도의 작업을 데이터 획득 전에 수행하였다.

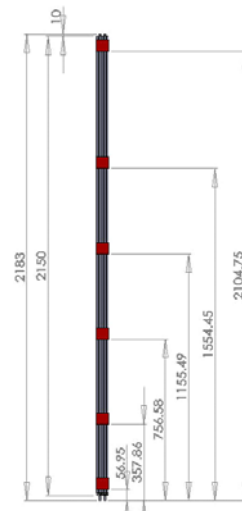


Fig 2. Test assembly (5x5 rod bundle).

관군 집합체의 대각 중심선 상에 위치하는 두 개의 고정용 봉에는 지지구조체를 고정할 수 있도록 길이방향의 일정간격으로 위치시킨 5개 조

의 걸림 pin이 설치되어 있으며, 고정봉의 상/하단에는 FIVPET의 입출구 노즐 plate에 체결 볼트를 이용하여 고정될 수 있도록 탭을 형성하였다. 고정봉의 끝단이 cone형상을 가짐에 따라 노즐의 flow hole에 일부 삽입되는 문제점으로 인하여 상/하단 노즐과의 연결 길이를 맞출 수 있는 임시의 조치(washer 및 너트삽입)를 취하여 관군집합체를 FIVPET에 설치하였다. 모든 dummy봉(고정봉 포함)은 상류쪽 끝단 형상을 뿔(cone)모양으로 설계하여, 축방향 유동 중에 놓인 구조물의 수력적 저항성을 작게 하는 것과 불연속 단면에 따른 박리형성과 와류발생을 최소화하였다.

2.3 시험방법

지지구조체 판의 고주파 진동 측정시험은 통상 단위 cell strap의 길이 및 폭 방향으로 10 ~ 20개의 측정점에 대하여 개별 봉다발 유속에서의 광대역(통상 10000 Hz까지) 응답 스펙트럼을 측정한다. 따라서, 개별 측정점 각각에 대하여, 전체 시험유속 범위를 불연속 유속 구간(discrete flow condition)으로 나누어 유동소인(flow sweep)하므로, 고주파 진동시험에서 측정하고자하는 측정점의 수에 따라 전체 FIVPET 시험시간이 결정된다. 본 시험에서는 예비시험과정에서 관심 유속(관심 유속범위의 몇 가지 유속)에서만 전체 strap 측정점(15개소)에 대하여 측정하고, 두 개의 관심 측정점을 선정하여 이에 대해서만 전체 봉다발 유속에 대한 중간 지지구조체 판의 고주파 진동을 측정하였다. Fig. 3은 플레이트 형 5x5 지지구조체를 보여준다. 예비시험의 측정점은 중심에 위치한 단위 cell에 대하여 길이방향으로 좌, 우 측정위치를 포함하여 15개소로 구분하였다.

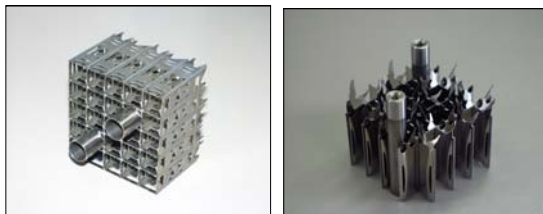


Fig. 3 Typical shapes of 5x5 plate type supporting structure.

목표유속에 대응되는 펌프 회전수의 측정/확인 은 시험 집합체가 장입된 상태로 수행되는 예비 시험에서 정해진 양식의 표로 작성되었다. 그러

나 초기 펌프 회전수는 실제 시험수행과정에서 0.1~0.2 Hz(3~6 rpm) 가량 봉다발 유속에 따라 변화될 수 있다.

Fig. 4는 시험데이터의 측정과 기록에 대한 흐름도를 도시한다. 레이저 진동계(LDV, Laser Doppler Vibrometer)에서 측정된 구조체 판의 진동속도와 시험관 진동 모니터용 단축 가속도 센서 및 LDV 진동계 헤드 모니터링용 센서의 진동 측정 데이터는 신호증폭기와 Breakout box를 거쳐 VXI에 기록되고 IDEAS/TDAS(Test data analysis software) 프로그램의 데이터 저장 및 기록 모듈(Signal processing module)에 스펙트럼 형식으로 저장, 기록하였다.

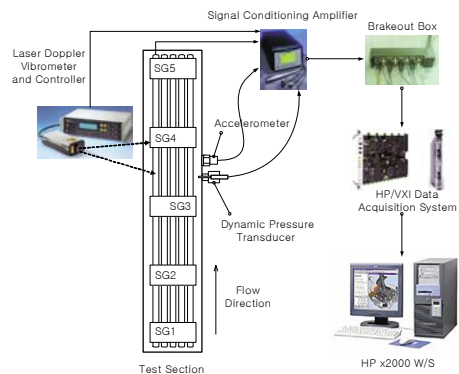


Fig. 4 Test data measurement diagram.

고주파진동 시험의 경우, 한 측정점에서의 데이터 획득이 종료되면, 다음 측정점으로 LDV 를 다시 초점설정하고, 시험유속의 전 범위에 대해서 다시 시험을 반복하게 된다. 고주파 진동시험의 측정방법에 관련해서 신속하고 용이한 측정을 위하여, 유속을 일정하게 유지한 상태에서 측정점을 변경하는 측정방법이 있겠으나, 유속을 장시간(1시간에 약 0.5도 정도 변화됨) 일정하게 유지할 경우 pump heating에 의해 순환유체의 온도가 변화되며, 고 유속에서의 LDV의 초점설정이 어렵고, 반복된 조정(변경)에 따른 측정점의 위치가 임의로 변경될 가능성이 크기 때문에, 상기에 기술한 바와 같이 개별 측정 점들에 대하여 유동조건을 반복하면서 시험하는 방법을 준용하고 있다. 상기의 방법은 측정점을 동일하게 유지할 수 있으나, 유동조건이 근소한 차이가 예상되며, 다만 동일한 유량과 유속에 대한 개별 측정점의 진동데이터를 얻어낼 수 있다.

압력강하 측정시험의 경우, 통상 고주파 진동 측정시험과 동시에 이루어지나 시험절차 상의 구분을 위해 아래와 같이 나누어 기술한다. 차압은 입구유량, 입구압력, 입구온도와 함께 각각의 계측기로부터 변환기(isolator 또는 converter)와 데이터 획득장치(DAS)를 통해서 컴퓨터에 1000개의 sample 단위(sample rate는 500 sample/sec)로 저장되며, 봉다발 유속은 측정된 유량으로부터 스팬 위치(bare bundle)의 유로단면적을 고려하여 실시간으로 계산되어 컴퓨터 화면의 제어패널에 기록된다. 수력시험의 결과는 유동시험조건에 대한 반복성 확인과 시험장치의 검증에 활용가능하다. 차압 데이터는 중간 지지격자를 기준으로 차압 D1, D2를 측정하고, 4번 지지격자 이상에 위치한 압력측정 점(DP3)을 이용하여 압력강하의 중첩특성도 확인한다. 차압측정 데이터에 관한 구간길이와 측정위치는 Fig. 5에 도시한다.

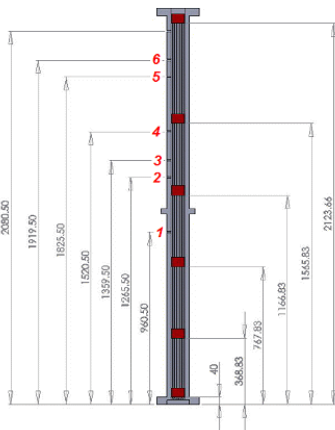


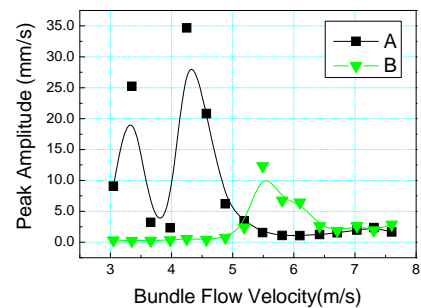
Fig. 5 Pressure drop measurement location. (DP1:1-4, DP2:4-6, DP3:1-6)

3. 시험결과 및 토의

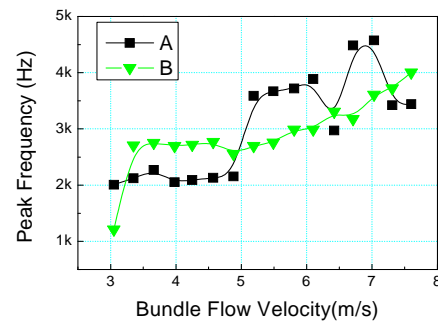
3.1 고주파 유동유발진동

Fig. 6은 두 가지 유형의 플레이트 형 지지구조체(A, B)로 지지된 시험 집합체의 봉다발 유속 변화에 따른 피크(peak) 진폭과 피크 주파수 특성을 각각 나타낸다. 각 시험집합체를 대상으로 수행된 fine sweeping 시험(3.05~7.60 m/s 범위를 약 0.3 m/s 간격으로)으로부터 얻은 개별 지지격자판의 속도 진동스펙트럼에서 최대 진폭을 갖는 피크 주기성분을 확인하고, 이때의 진폭과 주파수

를 해당 봉다발 유속에서의 최대진폭과 피크 주파수로 선정하여 기록한 것이다. A형 지지구조체의 측정결과에서, 최대 피크진폭이 나타나는 봉다발 유속(4.29 m/s)과 유속의 변화에 따른 피크 주파수의 변화가 예전 타 시험루프에서의 시험결과와 전반적으로 일치하는 경향을 보임에 따라, 시험에 사용된 FIVPET 수력시험장치의 유효성을 확인할 수 있었다. B형 시험집합체 중간 지지구조체에 대한 최대 진폭은 A형 보다 높은 유속인 5.48 m/s에서 12.34 mm/s의 상대적으로 작은 진폭으로 나타났다.



(a) peak amplitude



(b) peak frequency

Fig. 6 High frequency flow-induced vibration of plate type supporting structure.

지지구조체 판의 고주파 진동은 특정 봉다발 유속 부근에서 최대값을 갖으며, 이외의 다른 유속에서는 상대적으로 작은 진폭을 나타내는데, 봉다발 유속이 최대유속으로 증가하여도 전반적인 피크 진폭이 커지지 않는 것으로부터, 지지구조체 판의 고주파 진동이 대부분 유동 내부에 포함된 주기적인 고주파 가진원(말하자면, 고주파 와류 여기)에 대하여 자기응답 혹은 강제진동 응답의 형태로, 마치 대역 필터처럼 반응(혹은 응

답)함을 알 수 있다.

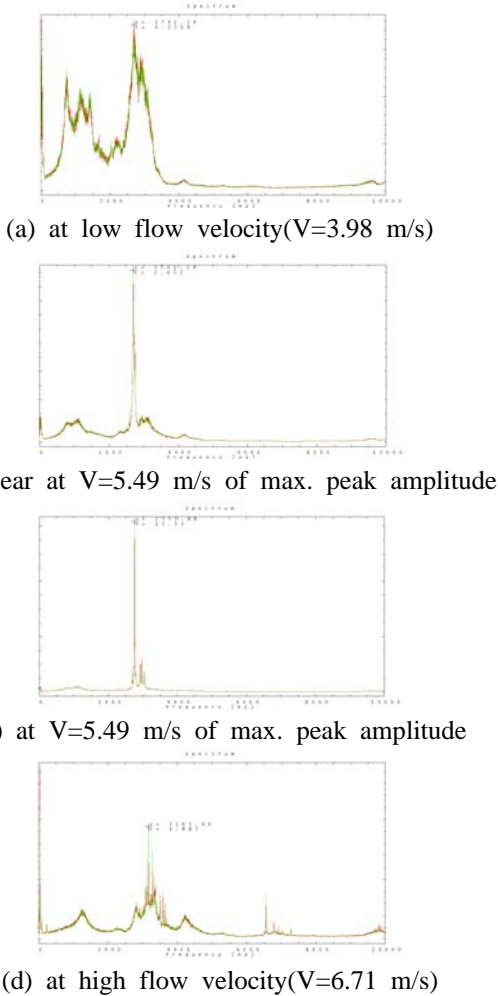


Fig. 7 Flow-induced frequency response spectrum.

실제로, 후자의 고찰(유속증가에 따라 평균적인 진폭이 증가되지 않는 것)로부터 중간 지지격자 판의 고주파 진동은 일반적인 판의 난류 압력섭동에 기인된 응답특성과는 큰 차이를 보인다⁽¹⁾. 봉다발 유속변화에 따른 피크 주파수 특성은 대략 1500 Hz에서 4500 Hz까지 유속증가에 따라 일정하게 증가되는 경향을 보이며, 특정 봉다발 유속에서 갑작스런 도약 등의 불균일한 변화를 확인할 수 있다. 측정결과의 주파수 특성은 유속 변화에 따라 일정한 구간과 선형적으로 증가되는 구간 및 도약 또는 변화구간으로 구분될 수 있는데, 경험적으로 이들 각각은 구조물 고유특성(진동수)의 발현, 유속증가에 따라 일정하게 증가되는 강제진동 가진원에 대한 응답(말하자면, 와류여기 주파수), 이전 피크 진동응답의 천이 구간으

로 볼 수 있다⁽²⁻⁴⁾. Fig. 7은 최대 진폭이 나타나는 봉다발 유속에서의 중간지지격자 응답스펙트럼과 이외의 다른 봉다발 유속에서의 중간지지격자 응답스펙트럼에 대한 전형적인 예를 도시한다. 최대 진폭은 특정 주파수 대역에서 날카롭게 (sharp) 응답이 발현되는 반면 낮은 유속에서의 진동응답은 분포된 피크 특성을 나타내고, 높은 유속에서의 응답은 수 개의 분포된 sharp 피크들이 여러 주파수 대역에서 발생하는 흥미로운 특징을 보인다.

3.2 압력강하

Fig. 8은 A형 지지구조체의 압력강하 측정값에 대한 B형의 상대적인 차이를 백분율로 나타낸 것이다. 평균적인 상대오차는 압력손실 측정구간 1과 2에 대하여 각각 -1.61%, -2.64%로 측정되었고, 음의 부호는 기준이 되는 값(A형)보다 압력손실이 작음을 의미한다. 이들 압력강하 측정값의 상대적인 차이로부터, 지지구조체의 높이 변화와 혼합날개의 각도변화에 따른 압력강하의 민감도를 확인할 수 있다⁽⁵⁾.

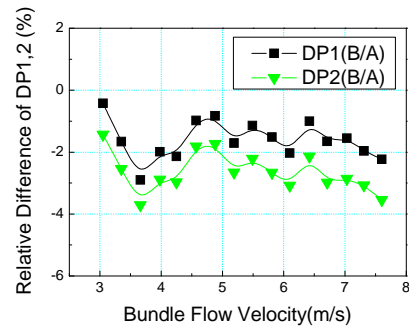


Fig. 8 Relative differences of the pressure drop.

아울러, 압력강하 측정값으로부터 지지구조체에 의한 형상 압력손실과 이것의 마찰 압력손실에 대한 비율을 아래와 같이 계산할 수 있다.

- Bare bundle의 단위길이당 마찰손실을 다음과 같이 가정하면, $DP_{friction} = (DP2 - DP1) / (560 - 399)$.
- 구간 1(DP1 측정구간)에서의 마찰손실 $DP1_{friction} = DP_{friction} \times 560$ (1구간길이, mm)
- 구간 2(DP2 측정구간)에서의 마찰손실 $DP2_{friction} = DP_{friction} \times 399$ (2구간길이, mm)
- 지지격자에 의한 형상손실은 각 구간에서 측정된 전체 압력손실 값(DP1, DP2)에서 각각의 마찰

손실(DP1_friction, DP2_friction)을 빼서 얻을 수 있다. 계산결과는 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Form loss portion of the DP total

V (m/s)	DP1 (kPa)	S [*]	Friction loss (kPa)	Form loss (kPa)	ratio (friction /form)
3.07	9.19	0.0122	6.83	2.36	2.90
3.38	10.91	0.0145	8.13	2.78	2.92
3.69	12.75	0.0170	9.54	3.21	2.97
3.96	14.72	0.0197	11.01	3.70	2.97
4.29	16.95	0.0228	12.76	4.19	3.04
4.59	19.21	0.0258	14.44	4.77	3.03
4.87	21.56	0.0290	16.22	5.34	3.04
5.18	23.95	0.0322	18.02	5.93	3.04
5.48	26.57	0.0357	19.96	6.60	3.02
5.80	29.41	0.0395	22.14	7.27	3.04
6.14	32.38	0.0433	24.25	8.13	2.98
6.44	35.44	0.0472	26.44	9.00	2.94
6.74	38.43	0.0511	28.64	9.78	2.93
7.02	41.43	0.0549	30.74	10.70	2.87
7.32	44.53	0.0586	32.83	11.70	2.81
7.60	47.75	0.0626	35.06	12.69	2.76

*) Friction loss per unit length of the bare bundle

4. 결론

두 가지 유형(A, B)의 플레이트형 지지구조체로 구성된 5x5 실린더 관군집합체에 대한 유동유발진동 및 수력시험과 측정결과의 분석으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

A형 지지구조체의 시험결과에서 최대진폭이 발생하는 봉다발 유속(4.29 m/s)과 유속의 변화에 따른 피크 주파수의 변화가 참조 루프에서의 시험결과와 전반적으로 일치하는 경향을 보임에 따라, 수력시험장치의 유효성을 확인할 수 있었다. B형 지지구조체의 시험집합체에 대한 최대 진폭은 A형 보다 높은 유속인 5.49 m/s에서 12.34 mm/s의 상대적으로 작은 진폭으로 나타났다. 지지구조체 판의 고주파 진동은 특정 봉다발 유속 부근에서 최대값을 갖으며, 이외의 다른 유속에서는 상대적으로 작은 진폭을 나타내는데, 이것은 중간 지지격자 판의 고주파 진동이 대부분 유동 내부에 포함된 주기적인 고주파 가진원에 대한 응답임을 나타내는 것으로 사료된다. 봉다발 유속변화에 따른 피크 주파수 특성은 대략 1500 Hz에서 4500 Hz까지 유속증가에 따라 일정하게 증가되는 경향을 보이며, 특정 봉다발 유속에서 갑작스런 도약 등의 불균일한 변화를 확인할 수 있었다. A형 지지구조체 압력강하 대비 B형의 평

균적인 상대오차 백분율은 DP1 및 DP2에 대하여 각각 -1.61 %, -2.64 %으로 측정되었다. 측정된 압력강하의 상대적인 차이는 유속변화에 따라 불균일한 특징을 갖으며, 이들 압력강하 측정값의 상대적인 차이로부터, 설계특성에 대한 수력특성의 민감도를 확인할 수 있었다.

아울러, 지지 구조체의 고주파 진동특성과 구조물의 지지부에 발생가능 한 기계적인 마멸손상 사이의 상관관계에 대한 연구가 향후 필요하다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 원자력연구개발사업과 한전원자력 연료(주)의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Shigehiko kaneko, et al., 2008, Flow-induced vibrations; Classifications and Lessons from Practical Experiences, Elsevier publications, pp. 6-27.
- (2) M.P. Paidoussis, 1998, Fluid-Structure Interactions; Slender structure and axial flow. Vol. 1, Academic Press.
- (3) Paidoussis, M.K., 2004, Fluid-Structure Interactions; Slender structure and axial flow. Vol. 2, Elsevier Academic Press, pp. 787-1220.
- (4) 이강희, 윤경호, 송기남, 김재용, 박미연, 시험용 핵연료집합체의 유동유발진동에 대한 실험적 연구, 제4회 한국유체공학학술대회 논문집(2권), p. 1161-1164, 2006.
- (5) 오동석, 전태현, 장성규, 김복득, 천세영, 5x5 봉다발 복합날개 지지격자 압력강하 실험, KAERI/TR-3441/2007.