

FIV 시험루프의 유동기인 진동 신호분석

이강희[†]·강흥석*·윤경호*·송기남*

Flow-Induced Vibration Signal Analysis of the FIV Test Loop

Kang-Hee Lee, Heung-Soek Kang, Kyung-Ho Yoon and Kee-Nam Song

Key Words: Flow-Induced Vibration(유동유발진동), Test Loop(시험루프), Pressure Perturbation(압력섭동), Acoustic Resonance(음향공진), Blade Passing Frequency(회전의맥동주파수)

Abstract

Vibration spectrums of the test loop according to flow conditions were analyzed in order to identify the sources of vibration at peak frequencies. While a flow condition of the sweep test was changed by varying pump rotational speed from 450 rpm to 1500 rpm by the step 150 rpm, midspan acceleration of the test section in width-direction and dynamic pressure perturbation in the test section were measured. Other sources of vibration due to the flow structure interactions, such as acoustic resonance, blade pulsing frequency and bellows wrinkles, were investigated. Pressure perturbation in the section and acoustic resonance due to branch pipe give major effects to the vibration of the test section in high frequency range of 1.5 kHz to 2.8 kHz.

서 론

한국원자력연구소 고성능지지격자개발과제는 경수로용 원전연료집합체의 주요 부품인 지지격자체를 개발하는 일과 이와 관련된 기초연구를 함께 수행하고 있다. 경수로 핵연료집합체는 대략 3년 동안 원자로 안의 가혹한 환경조건에서 연소되기 때문에 원전연료집합체를 이루는 주요한 부품들은 성능에 관련된 여러 시험을 거쳐야 한다. 이번에 구축된 시험루프는 5×5 부분집합체(지지격자 5개, 연료봉 23개, 안내관 2개)를 이용하여 유동유발 진동시험과 압력강하 시험을 수행할 수 있도록 설계되었으며, 기계적인 진동시험과 열수력적인 압력측정시험을 동시에 수행할 수 있기 때문에 유체유발진동 및 압력강하 시험장치

(Flow-Induced Vibration and Pressure Drop Experimental Tester; FIVPET)로 명명되었다[1]. Fig. 1은 시험루프의 개략도를 나타낸다.

시험시설 완공에 따라 계획되어 있던 부분집합체를 이용한 유동시험 예비단계로서, 시험루프의 자유진동특성 파악을 위한 유한요소 해석과 모달 시험이 수행되었으며[2], 유동조건 변화에 따른 루프 성능확인을 위해 Sweep 시험이 진행되고 있다. 시험루프를 구성하는 배관 내부로 유체가 순환되면 순환유체와 배관의 상호작용에 의해 배관은 여기진동하게 되고, 부분집합체가 설치되는 시험관도 함께 진동하게 된다. 따라서 실제 유동시험으로부터 정확한 부분집합체의 진동특성을 파악하기 위해서는 시험루프의 동특성 파악이 선행되어야 한다. 본 연구는 부분집합체가 장입될 시험관의 유동조건에 따른 진동스펙트럼으로부터 특정주파수에서의 진동발생 원인을 분석하는데 목적이 있다. 문헌[3]에 제시된 여기진동 기구를 본 시험루프(FIVPET)에 적용하고 시험관 압력섭동을 측정하여 시험관 진동과의 상관관계를 분석하였다.

† 한국원자력연구소

E-mail : ex-leekh@kaeri.re.kr

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

* 한국원자력연구소

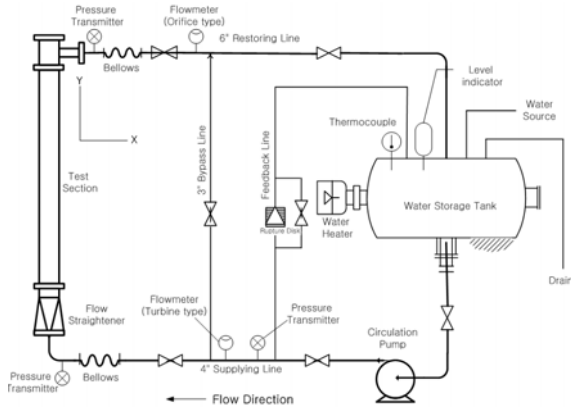


Fig. 1 Schematic Diagram of the Test Loop

2. 시험루프의 유동기인 진동현상

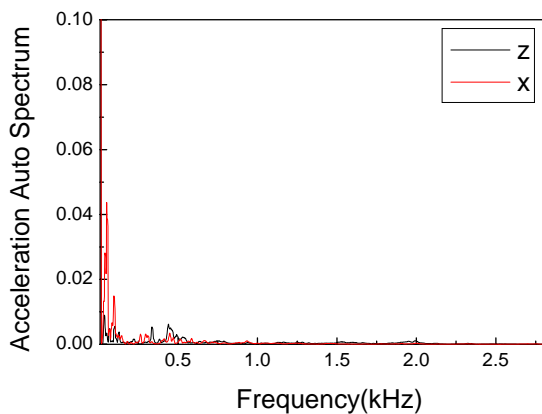
배관 내부로 유체가 유동하면 유체와 배관의 상호작용에 의해 배관은 여기진동하게 된다. 이러한 관점에서 유체유동으로부터 기인된 시험루프 (Fig. 1에서 주로 시험관을 중심으로 한 상류 영역)의 진동에 대한 정량적인 분석을 위해 유동조건에 따른 시험관의 진동응답 스펙트럼을 측정하였다. 펌프회전수를 변화시킴으로써 Table 1에서와 같이 순환유체의 입구유량과 유속을 조정하였으며, 갑작스런 유동조건에 따른 공기방울 형성 및 과도진동을 방지하기 위해 유동이 안정화될 수 있도록 충분한 지연시간을 적용하였다. 진동측정 위치는 진동변위가 가장 클 것

Table 1 Flow Conditions for the Sweep Test

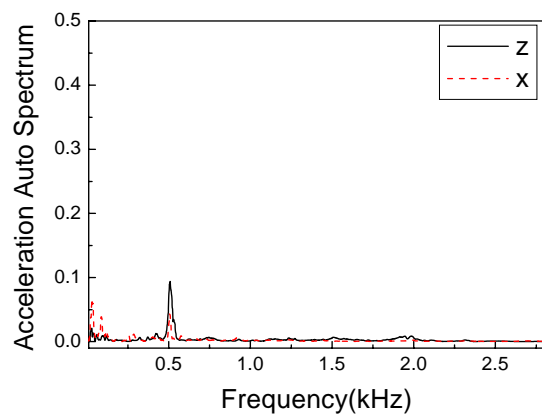
Pump Speed (rpm)	Flow Rate (LPM)	Velocity(m/s)
450	843	3.0
600	1172	4.22
750	1489	5.39
900	1806	6.56
1050	2103	7.55
1200	2355	8.49
1350	2616	9.42
1500	2866	10.34

으로 예상되는 시험관 길이방향(Fig. 1의 y축) 중심으로 선정하였고, 관심주파수 영역은 지지격자의 고주파 진동 주파수 범위를 포함할 수 있도록 3 kHz까지 확장하였다. Fig. 2(a)~(h)는 펌프 회전수에 따라 측정된 시험관의 폭 방향(Fig. 1의 z, x축)의 진동 스펙트럼을 나타낸다.

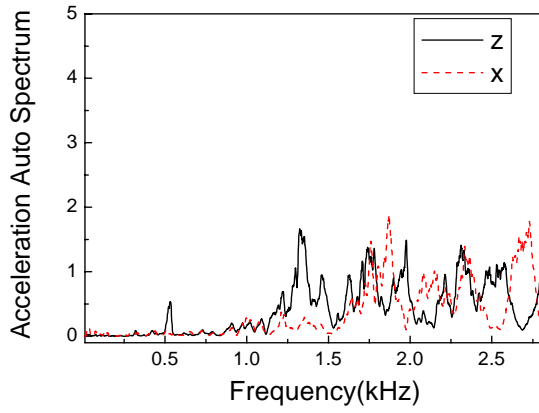
진동응답 스펙트럼에 나타나는 Peak들은 펌프 회전수에 따른 조화진동성분이거나 내부 유체유동에 의해 발생하는 유동기인 진동 주파수성분이 배관계의 고유진동수에 근접함에 따라 발생한 공진(Resonance)이다. 시험관의 폭방향 진동특성은 방향성을 거자며, 유동조건에 따라 넓은 주파수 범위에 걸쳐 복잡한 주파수 응답 특성을 나타낸다. 또한 서로 다른 유속과 유량 조건에 대해 상이한 패턴의 진동응답 스펙트럼을 보여준다.



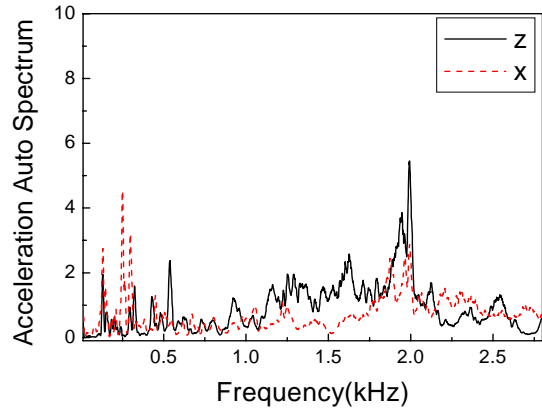
(a) At Pump Rational Speed of 450 RPM



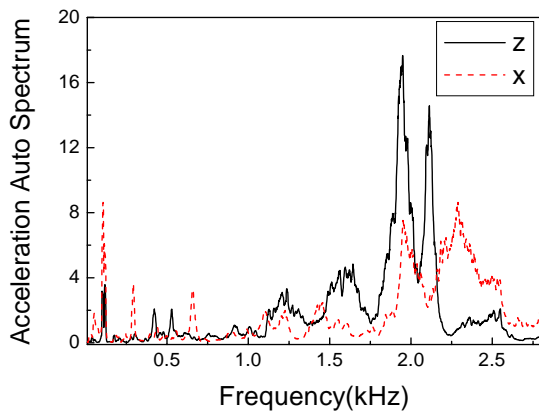
(b) At Pump Rational Speed of 600 RPM



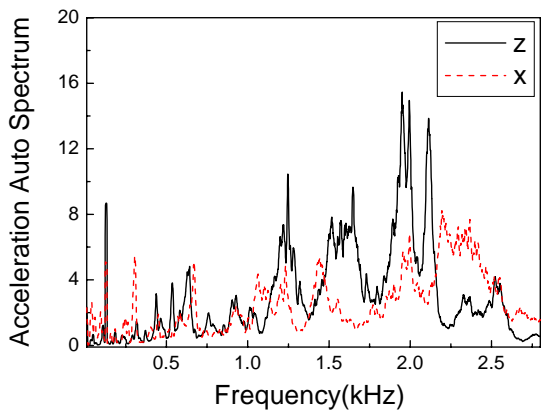
(c) At Pump Rational Speed of 750 RPM



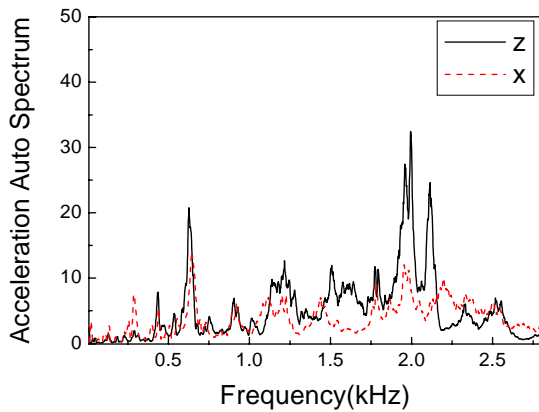
(d) At Pump Rational Speed of 900 RPM



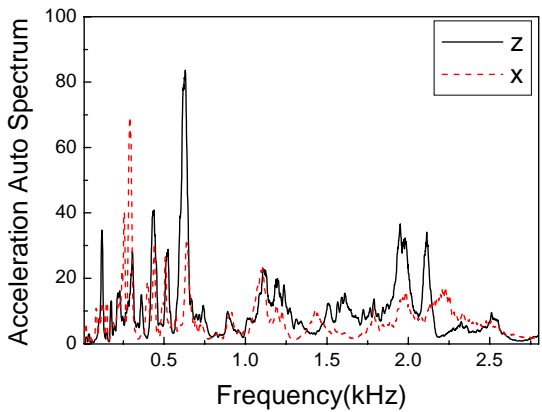
(e) At Pump Rational Speed of 1050 RPM



(f) At Pump Rational Speed of 1200 RPM



(g) At Pump Rational Speed of 1350 RPM



(h) At Pump Rational Speed of 1500 RPM

Fig. 2 Vibration Spectrum of the Test Section Measured at Midspan

3. 진동발생 원인 분석

배관계의 유동기인 진동을 발생시키는 주요 요인은 시험관 내 압력섭동, 음향공진, 펌프 회전에 의한 압력맥동, 신축관의 주름에 의한 진동 그리고 공동현상(Cavitation) 등으로 알려져 있다[3]. 여기서 공동현상은 유체압력이 기체의 포화압력 이하로 떨어질 경우에 발생되므로, 유동 단면적의 큰 변화가 없는 본 시험루프의 경우에는 논외로 한다.

3.1 시험관 내 압력섭동(Pressure Perturbation)

고정된 배관내부의 유체유동으로 인해 발생하는

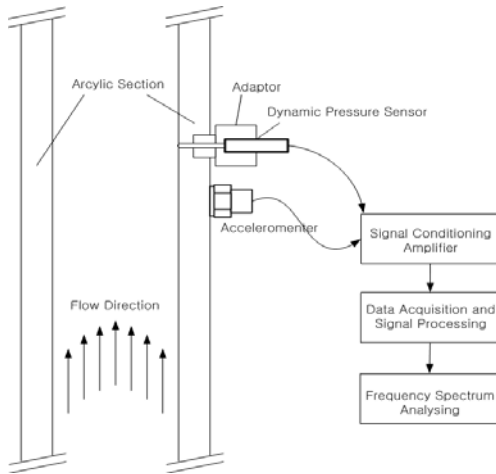
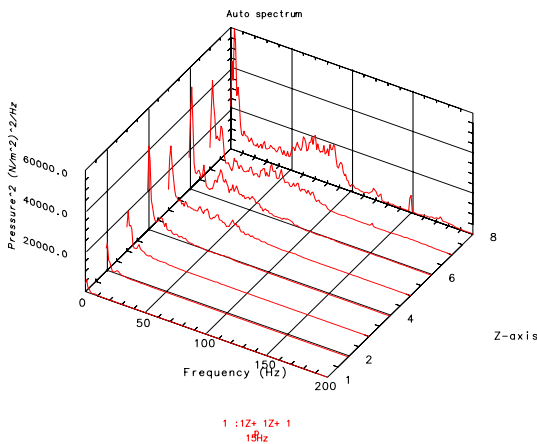


Fig. 3 Dynamic Pressure Measurement Test Layout

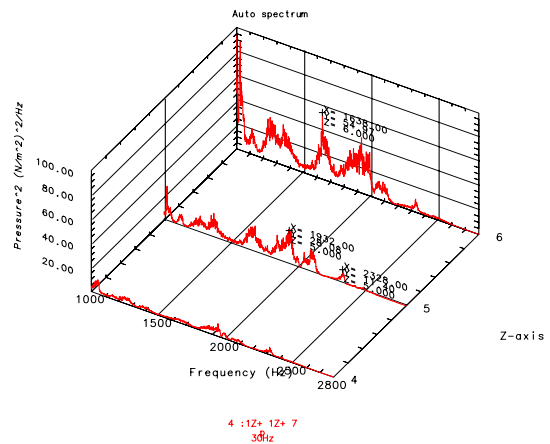
압력섭동에 의해 배관계는 매우 넓은 주파수 범위에 걸쳐 크기가 불균일한 진동을 경험하게 된다. 이에 따라 유동조건을 변화시키면서 시험관 내부의 실시간 압력변화량을 측정하였다. 압력센서는 일반목적의 동압력계(PCB type 111A21)를 사용하였고, 가속도 센서에서 측정된 진동신호와 함께 신호증폭기를 거쳐 데이터 저장장치에 기록된다. Fig. 3은 동압측정시험의 개략도를 나타낸다. Table 2는 시험의 유동조건과 측정된 압력의 크기(RMS)를 보여준다. Fig. 4는 유량과 유속 증가에 따른 시험관 내 압력변동에 대한 저주파수 영역의 스펙트럼 (a)과 펌프회전수 900 rpm에서 1200 rpm까지에 대한 고주파수 영역 (b)의 스펙트

Table 2 Test Flow Condition and Magnitude of Dynamic Pressure

Pump Speed (RPM)	Flow Rate (LPM)	Inlet Pressure (kg/cm ²)	Velocity Square (m/s) ²	Dynamic Pressure [RMS](Pa)
450	843	0.7	9.2	143.5
600	1174	0.99	17.8	257.1
750	1501	1.37	28.8	373.8
900	1809	1.82	42.4	535.6
1050	2100	2.4	57.5	704.0
1200	2368	3.08	72.0	854.0
1350	2617	3.88	88.9	1078.6
1500	2868	4.76	106.7	1396.0



(a) Low Frequency Range(0~200Hz)



(b) High Frequency Range(1000~2800Hz)

Fig. 4 Dynamic Pressure Pulsation Spectrum

럼을 나타낸다.

3.2 음향공진 주파수(Acoustic Resonance)

주배관에서 분기되는 분기관에 의한 음향공진 주파수는 다음 식 (1)과 같이 계산된다.

$$f_c = \frac{(2n-1)c}{4L} \text{ 또는 } f_o = \frac{nc}{2L} \quad (1)$$

여기서, f_c , f_o 는 각각 닫혀진 것과 열려진 분기관에 대한 음향공진 주파수를 나타낸다. c 는 상온 수중에서의 음속을, L 은 분기관의 길이를 나타낸다. Table 3은 시험루프의 입구 신축관 앞쪽에 위치한 우회관에 의해 발생하는 음향 공진주파수를 유동조건에 따라 변화될 수 있는 음속을 감안하여 계산한 것이다.

3.3 펌프 회전익에 의한 압력맥동

펌프 회전익에 의한 압력맥동 주파수(Blade Passing Frequency, BPF)는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$f_p = \frac{WN}{60} \quad (2)$$

여기서, W 는 펌프 회전수(RPM)이고, N 은 회전익의 수를 나타낸다. 회전익의 압력 맥동에 의한 진동은 기본 진동주파수의 정수배를 갖는 주기성분으로 증가되고, 차수가 커짐에 따라 가진 에너지

Table 3 Acoustic Resonance Frequency according to the Sound Velocity

c(m/s)	Frequency(Hz)			
	1st(n=1)	2nd(n=2)	3rd(n=3)	4th(n=4)
1400	437.5	1312.5	2187.5	3062.5
1440	450.0	1350.0	2250.0	3150.0
1480	462.5	1387.5	2312.5	3237.5

Table 4 Fundamental Blade Passing Frequency

P/S(RPM)	600	750	900	1050	1200	1350	1500
BPF(Hz)	60	75	90	105	120	135	150

도 작아지는 특성을 갖는다. Table 4는 회전익에 의한 압력맥동의 기본 주파수를 나타낸다.

3.4 신축관 주름에 의한 여기진동

진동감소와 시험관 하류 쪽에서 순환유체를 타고 들어오는 조화진동 성분의 감쇠를 위해 설치된 신축관(bellows) 하류에는 일정한 간격으로 반복되는 내부 주름(Wrinkle)과 유속에 의해 주기적인 진동이 발생하게 된다. 이로 인한 진동주파수는 신축관 주름 개수를 유속에 곱하여 계산한다. 시험관 입구 앞쪽에 위치하는 하단 신축관의 길이는 0.52m, 신축관 주름 수 40개(4" 신축관의 pitch 13mm)일 때, Table 5과 같이 정수 배로 일정하게 증가되는 진동주파수가 순환유체에 포함된다.

Table 5 Frequency Induced by Bellows Wrinkle(Hz)

No.	Pump Rotational Speed(RPM)						
	600	750	900	1050	1200	1350	1500
	Flow Velocity(m/s)						
	2.5	3.2	3.8	4.5	5.0	5.6	6.1
1	99	126	153	179	200	222	243
2	199	253	307	357	400	444	487
3	298	379	460	536	600	666	730
4	398	506	613	714	800	888	973
5	497	632	766	893	999	1110	1216
6	597	758	920	1071	1199	1332	1460
7	696	885	1073	1250	1399	1554	1703
8	796	1011	1226	1428	1599	1776	1946
9	895	1138	1380	1607	1799	1998	2189
10	995	1264	1533	1785	1999	2221	2433
11	1094	1390	1686	1964	2199	2443	2676
12	1194	1517	1840	2142	2399	2665	2919
13	1293	1643	1993	2321	2599	2887	
14	1393	1769	2146	2499	2799		
15	1492	1896	2299	2678	2998		
16	1592	2022	2453	2856			
17	1691	2149	2606				
18	1791	2275	2759				
19	1890	2401	2913				
20	1990	2528					

4. 결과 및 토의

시험관 내 압력변동 스펙트럼은 저주파수 영역에서 고주파수 영역으로 일정하게 감쇠되다가 1.2 kHz 이상부터 시험관의 진동스펙트럼과 유사한 변화양상을 보이며, 가진 에너지 측면에서는 작은 값이지만 시험관 진동주파수 근방에서 관련성이 큰 주파수 성분들(1.25 Hz, 1.65 Hz, 1.95 Hz, 2.3 Hz)이 다수 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 고주파수 영역에서의 압력변동 스펙트럼은 유동조건이 변화되어도 일정한 패턴을 갖는다.

음향공진에 의한 주파수성분은 유동조건에 따라 변화되지 않으므로 시험관의 진동스펙트럼에 일정하게 나타나고 있다. 900 rpm 이상의 시험관 진동스펙트럼에서 공통적으로 나타나는 0.45 kHz, 1.3 kHz, 2.1 kHz 부근의 진동성분은 우회관에 의한 3차까지의 음향공진 주파수인 것으로 판단된다.

펌프 회전익에 의한 압력맥동 주파수는 기본주파수에서부터 일정간격으로 계속 증가되기 때문에 배관의 고유진동수와 중첩될 가능성이 크다. 하지만 고차로 갈수록 가진 에너지가 작아지는 관계로 고주파수 영역의 시험관 진동에는 큰 영향이 없는 것으로 생각된다. 또한 신축관 주름에 의한 여기 진동은 펌프 회전익의 압력맥동 주파수와 같이 넓은 범위에 걸쳐 일정배수로 증가되기 때문에, 진동 스펙트럼에 넓게 분포되어 나타나지만, 영향은 크지 않은 것으로 생각된다.

이상의 분석으로부터 시험루프 시험관의 고주파수 영역에서의 진동발생원인은 주로 시험관 내 압력섭동과 분기관에 의한 음향공진 주파수가 배관계의 고유진동수에 근접하여 발생하는 것으로 판단된다. 추후 실제 유동시험에서 관심주파수 영역 내에 공진이 발생되지 않도록 배관 지지조건을 변경하여 고유진동수의 변화를 유도하거나, 유로를 단순화시켜 난류나 Vortex 요인을 제거하고, 곡관형상을 변경하는 등의 유동조건을 변화시킬 필요성이 있다

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력개발사업인 경수로용 신형핵연료 개발(대과제) 고성능지지격자 개발과제(세부과제)의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] Kang, H.S., Yoon, K.H., Kim, H.K., Song, K.N., Jung, Y.H., 2001, "Development of the Flow-Induced Vibration Loop for a 5×5 Partial Fuel Assembly", *Proc. of the KNS 2001 Autumn Annual Conference*
- [2] Lee, K.H., Kang, H.S., Yoon, K.H., Song, K.N., 2004, "Free Vibration Characteristics of the FIV Test Loop and Evaluation of the Supporting Performance", KAERI, KAERI/TR-2734/2004
- [3] Blevins, R.D., 1990, "Flow-Induced Vibration", Van Nostrand Reinhold, 2nd Edition.