

연료전지 Humidifier의 수명향상 개선을 위한 구조진동해석

Securing Reliability Analysis of Humidifier Fuel Cell

하 정 민*. 이 종 명*. 장 용 호*. 김 선 화**. 최 병 근†

Jeong-Min Ha, Jong-Myeong Lee, Yong-Ho Jang, Seon-Hwa Kim and Byeong-Keun Choi

(Received May 30, 2014 ; Revised July 16, 2014 ; Accepted July 16, 2014)

Key Words : Humidifier(가습기), Natural Frequency(고유진동수), Piping Vibration(배관 진동), Flow Induced Vibration(유동여기진동), Modal Test(고유치 분석), Harmonics Response(조화 응답)

ABSTRACT

A few Humidifier have vibration problems caused by velocity of flow, piping vibration and karman vortex. The crack is generated on pipe wall and humidifier are damaged. Vibration analysis is conducted to prevent pipe damage during the design. But the other problem are caused after analysis of vibration. Therefore in this paper, the vibration and static analysis have been measured and analyzed for pipes and curve. Also modal test is conducted for analysis of natural frequency.

기 호 설 명

- S_t : Strouhal 수
- U : 평균 유속(m/s)
- D : 관 직경(m)

1. 서 론

배관 내에 흐르는 유체의 유속 증가는 배관에 대한 과도한 유동여기진동을 유발하여 관손상을 초래하며⁽¹⁾, 특히 열교환기(가습기)의 경우에는 출력상승을 위하여 유체의 흐름이 고속화하는 경향이 있는데 이는 Karman vortex에 의한 진동 대책만으로는 대처할 수 없는 진동문제가 발생되고, 일반적으로는 두 가지의 주된 진동형태를 가진다. 첫째는 관의 고

유진동수를 여기(exciting)시키는 진동이고, 둘째는 shell의 acoustic 진동수를 여기시키는 운동이다.

이들 형태의 진동을 여기 시킬 수 있는 유동현상은 유체속도와 유동방향의 기하학적 형태에 의존하며, 관이 진동할 수 있는 에너지는 유동에 의해 공급된다. 유동으로 여기된 진동수는 유체의 속도가 증가함에 따라 연속적으로 증가하며, 이 진동수가 관의 고유진동수와 일치할 때 공진이 일어날 수 있다. 이로 인하여 공진이 지속적으로 발생한 관은 높은 스트레스를 받으며 역학적 파괴를 일으켜 결국 leak현상을 발생시킬 가능성이 있다.

이러한 관 손상을 사전에 방지하기 위해서는 설계단계에서 철저한 진동해석이 수행되어야 한다. 그러나 이러한 해석수행 후에 제작하여 운전하였을 시에 다른 문제점들이 야기 될 수 있다⁽¹⁻²⁾.

따라서 이 논문에서는 현재 제작된 MCFC 용융탄산염 연료전지 시스템의 필수장비인 열교환기

† Corresponding Author ; Member, Department of Energy and Mechanical Engineering at Gyeongsang National University in Korea
E-mail : bgchoi@gnu.ac.kr

* Department of Energy and Mechanical Engineering at Gyeongsang National University in Korea

** Posco energy

A part of this paper was presented at the KSNVE 2014 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor SungSoo Na

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

(humidifier)의 관 내부 전체에 원래 수명보다 빠르게 leak가 발생되고 있는 현상에 대하여 구조, 재료 측면에서 static해석을 full model과 local model(유체의 기화가 일어나는 지점)로 나누어 수행하였으며, 진동측면에서 modal test 및 해석을 통하여 고유진동수와 유체의 가진주파수(flow induced vibration)로 인한 공진가능성을 평가하고, 조화응답분석을 통해서 문제 등을 파악하여 수명향상 개선을 위한 방안을 고찰하였다.

2. 연구 모델 및 해석 프로그램

2.1 연구 모델 정보

연구 모델은 MCFC 용융탄산염 연료전지 시스템의 필수 장비인 열교환기이며, Fig. 1과 같이 관의 직경은 0.038 m, 주입구와 배출구가 상부와 하부 구조물에 의해 고정되어져 있고, 주입구에서 374.1 °C의 유체가 평균 30 m/s의 속도로 이동하며 곡관을 지날 때 기화가 이루어져 점차 온도가 상승하여 배출구에서 유체의 온도는 516 °C가 되어 통과한다. 또한 관의 외부 전체에 걸쳐 핀이 부착되어있는 형상이며, 곡관 부위에 돌기7개를 설치하여 열교환기를 지지하고 있다.

해석 시에 사용된 물성 정보로는 Table 1에 나타내었으며, 핀은 SS301L, 관은 stainless steel을 사용하였으나 기화가 일어나는 곡관부위는 높은 열로 인하여 재료의 특성이 변할 것을 가정하여 항복강도 등을 낮춰 해석하였다.

2.2 해석프로그램

이 연구 대상의 해석을 위해 3D상용프로그램인 Catia v.5r20을 사용하여 모델링 하였으며, Ansys Workbench v.14 소프트웨어를 사용하여 해석을 수행하였다.

Modal test는 pulse 3560C, amplifier(T-2692), accelerometer(T-4371), impact hammer를 사용하여 고유치 분석을 실시하였다.

3. Static 해석

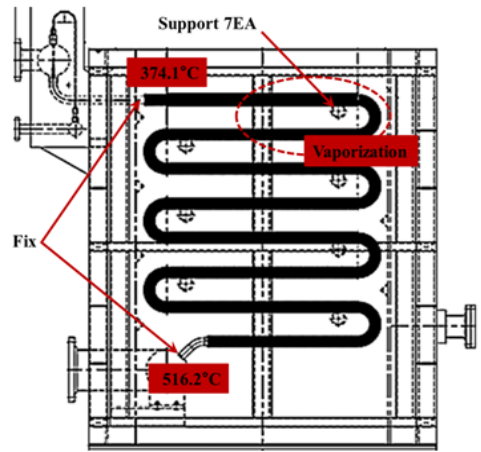
3.1 Full Model

연구모델에 대한 전체의 구조적인 특성을 분석하

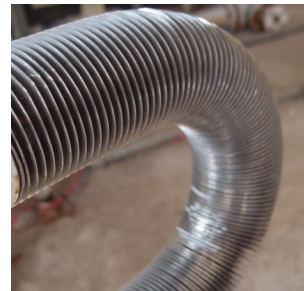
기에 앞서 해석 전처리 과정으로 열교환기의 주입구와 배출구에 고정하였으며, 지지부 위치에는 자중방향으로만 실제 설치 조건과 같게 고정하였다.

핀의 경우, 주입구부터 배출구까지 나선 형태로 매우 촘촘하게 부착되어있어 곡관주변부의 형상이 매우 복잡하므로 mesh로 해석을 진행하게 되면 해의 수렴성이 낮기 때문에 point mass형태로 핀의 질량을 일정구간씩 나누어 적용하였다⁽³⁾.

상온(22 °C)상태에서 7개의 지지부 유·무에 따라



(a) Structure of humidifier



(b) Fin

Fig. 1 Structure of humidifier

Table 1 Material properties

Materials	Density (kg/cm ³)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)
Stainless steel	8,000	200	0.3	310	620
25 % down	8,000	150	0.3	232.5	465
50 % down	8,000	100	0.3	155	310
SS316L	7,999.5	193	0.3	250	565

관내에 압력(15 psig)으로 인한 영향정도를 파악하였으며, 상기의 방법과 마찬가지로 운전[관내 온도변화 고려-(Fig. 2)]상태에서 압력과 온도로 인하여 발생하는 변형 및 응력 해석을 수행하였다.

(1) 상온상태, 지지부 유·무에 따른 해석

Table 2와 같이 상온상태에서 지지부를 설치하였을 때, 자중에 의한 응력은 지지부와 고정지점 부근에서 최대 1.29 MPa 발생하였으며, 지지부 제거 시에 곡관부에서 최대응력 57.26 MPa 발생하였다. 이는 상온상태에서 지지부 설치로 인하여 더욱 안정적인 것으로 판단된다⁽⁴⁾.

관내에 압력으로 인하여 발생하는 응력은 지지부 유·무와 관계없이 1 MPa 이하의 차이를 가지므로 압력에 의해 발생하는 응력은 거의 없다고 볼 수 있다.

(2) 운전상태, 지지부 유·무에 따른 해석

운전 시에 관내의 온도 변화를 고려하여 해석한 결과⁽⁵⁾, Fig. 3과 같이 지지부 유·무(with/without support)에 따라 나타내었으며, 상기의 상온상태 해석에서 관내압력으로 인한 영향은 매우 낮은 것으로 판단된바 지지부 유·무와 상관없이 모두 압력을 적용하였다.

최대변형은 모두 곡관부 주위에서 발생하였으며, 지지부를 제거하였을 때 변형이 12.815 mm로 더욱 크게 나타났다.

응력의 경우, 지지부 유·무와 상관없이 매우 높게 나타났으며, 최대 응력은 주입구와 배출구에서 확인되었다. 이는 운전 상태 시, 높은 열에 의하여 배관이 팽창하게 될 때, 고정된 주입구와 배출구가 열팽창을 방해하는 요인으로 작용하여 과도한 응력이 발생한 것으로 판단된다.

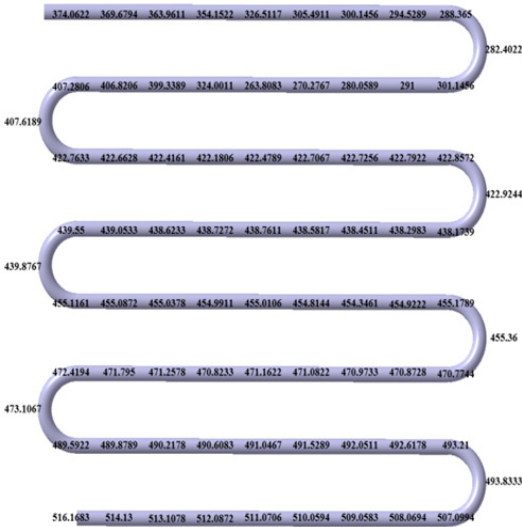
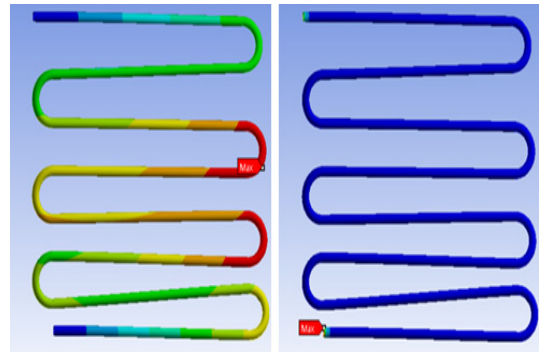


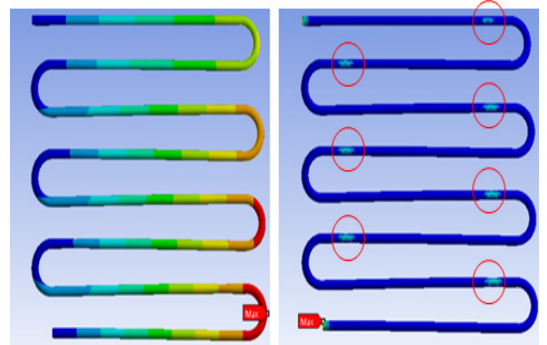
Fig. 2 Skin temperature

Table 2 Analysis result of room temperature

		Deformation (mm)	Stress (MPa)
Without support	Without pressure	10.248	57.26
	With pressure	10.248	57.99
With support	Without pressure	0.0181	1.29
	With pressure	0.0186	1.83



Deformation:12.815 mm Stress:1,800.3 MPa (a) Without support



Deformation:9.5186 mm Stress:1,794.2 MPa (b) With support

Fig. 3 Results of when considering with/without support(apply pressure)

또한 Fig. 3(b)의 원으로 표시된 지지부에서도 항복강도(620 MPa)이상의 응력(788.02 MPa)이 발생하여 운전 상태의 온도 변화에 따른 관의 열팽창 문제를 해소하기에는 어려움이 있을 것으로 보이며, 즉 지지부 설치로 인한 효과가 낮을 것으로 사료된다.

3.2 Local Model

운전상태 시에 유체가 기화되는 부분이자 가장 큰 변형이 일어난 부분에 대하여 3.1절에서와 같은 해석 조건에서 핀의 간격(fin pitch)을 변경(#7,5,3/Inch) 함으로써 이에 대한 변형 및 응력을 해석하였으며, 해석 진행은 Table 3에서와 같이 상온과 운전 상태 로 나누어 수행하였다.

전처리 과정으로는 Fig. 4와 같이 주입구를 고정, 관 내부에 분포압력(15 psig)을 적용하였으며, 자중을 고려하였다. 또한 운전 상태 시 온도는 Fig. 2를 참고하여 해당 관 내부에 각각 적용하였으며, 지지부 역시 마찬가지로 해당 지점에 자중방향으로만 고정하였다.

(1) 상온상태, 핀의 간격에 따른 해석

상온상태에서 해석결과 지지부 제거 시에 핀의 간격이 가장 넓을 때(#3/Inch) 변형과 응력에 비해 가장 좁을(#7/Inch) 때 관의 변형(5.171 mm)과 응력(35.18 MPa)이 높게 나타났으며, 이는 핀 간격이 좁을수록 열교환기의 무게가 증가하여 처짐의 영향을 많이 받기 때문이다.

지지부 설치 시에는 위 결과와 반대로 핀의 간격이 가장 좁을 때 변형과 응력이 감소하였으며, 영향을

많이 받는 부분에 지지가 되고 핀이 증가할수록 강성의 상승효과도 볼 수 있는 것으로 확인되었다.

(2) 운전상태, 핀의 간격에 따른 해석

운전 시에 기화가 일어나는 부분에 대해 온도를 고려하여 핀 간격에 따라 각각 해석한 결과 Table 4와 같이 나타났다.

지지부 설치 시에 핀에서 발생하는 변형 및 응력을 확인한 결과, Fig. 5(a)와 같이 핀 간격에 상관없이 곡관부위에서 최대변형(약 6.5 mm)이 발생하였으며, 핀 간격이 가장 넓을 때 1164.0 MPa의 응력이 지지부에서 발생되었고, 핀 간격이 가장 좁을 때 1022.7 MPa의 응력이 지지부에서 발생하여 응력이 감소하는 경향을 보였으나, 항복강도 이상의 응력이 발생하였다.

또한 관에서 발생하는 변형 및 응력을 확인한 결과, Fig. 5(b)와 같이 변형은 마찬가지로 곡관부위에서 최대변형(6.4 mm)이 발생하였으며, 핀 간격이 가장 넓을 때 1913.2 MPa의 응력이 지지부와 주입구에서 발생되었고, 핀 간격이 가장 좁을 때 2121.6 MPa의 응력이 지지부와 주입구에서 발생하여 관에 발생하는 응력과는 반대로 증가하는 경향을 보였다.

운전 시에 핀 간격이 좁을수록 응력을 분산시키는 면적이 늘어나 응력이 감소하는 경향을 보이는 것이며, 관의 경우에는 핀 간격이 좁을수록 열팽창에 저항하는 힘이 커져 응력이 증가하기 때문에 핀 간격을 줄여서 관의 손상문제를 해결하는데 어려움이 있을 것으로 판단된다.

4. Modal Test 및 해석

4.1 대상 모델의 유체 가진주파수

운전 시에 Karman vortex에 의한 배관진동⁽⁶⁾이

Table 3 Range of analysis

Fin pitch	Room temperature (22℃)	Operating temperature
#7,5,3/Inch	Without support	With support
	With support	

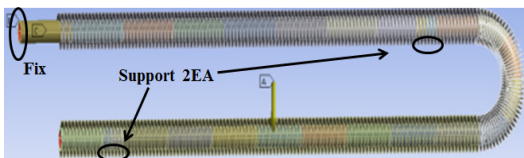


Fig. 4 Boundary condition

Table 4 Analysis results at the operating temperature

Fin pitch	Sorting	With support	
		Deformation (mm)	Stress (MPa)
#3/Inch	Fin	6.509	1164.0
	Tube	6.453	1913.2
#5/Inch	Fin	6.508	1060.3
	Tube	6.452	2050.8
#7/Inch	Fin	6.507	1022.7
	Tube	6.450	2121.6

발생하게 되는데 주기적인 소용돌이의 방출은 원주에 작용하는 양력을 주기적으로 변화시킴으로 원주의 흐름과 직각방향으로 진동시키는 가진력이 된다. 이러한 가진력을 가지는 유체 가진주파수(f_k)는 다음의 식 (1)과 같이 계산될 수 있다.

$$f_k = S_t \cdot U/D \quad (1)$$

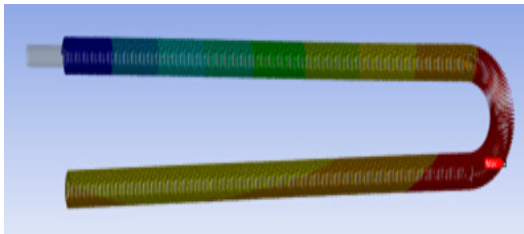
S_t 는 Reynolds수가 500넘어서면, 거의 일정한 값을 취하고 0.21이라는 것이 알려져 있으며⁽⁷⁾, 위의

식 (1)에 의해서 산출된 연구모델의 유체 가진주파수는 165.4 Hz이다.

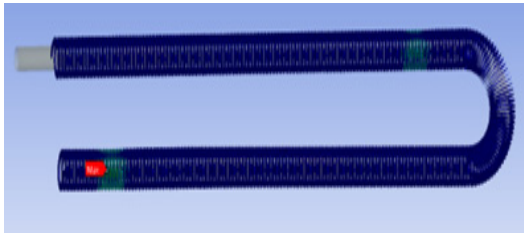
4.2 측정 내역 및 결과

측정은 Fig. 6(a)에서와 같이 열교환기의 상단곡관, 중단곡관, 하단곡관에 impact hammer를 이용하여 타격하였고, 가속도 센서를 중앙 중단, 중단, 하단에 걸쳐 부착시켜 측정하였으며⁽⁸⁾, Fig. 6(b)는 실제 측정과정을 나타낸다.

측정 시 4.1절에서 산출한 유체 가진주파수(관심영역)를 중심으로 300 Hz대역까지 분석하여 주파수 응답(frequency response function), 위상(phase)의 스펙트럼을 확인하였다.

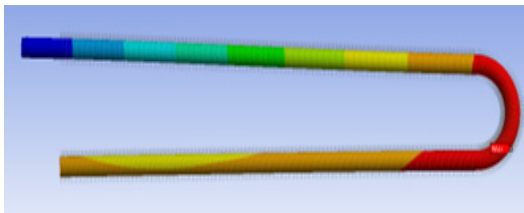


Fin deformation



Fin stress - #7/Inch

(a) Results of fin



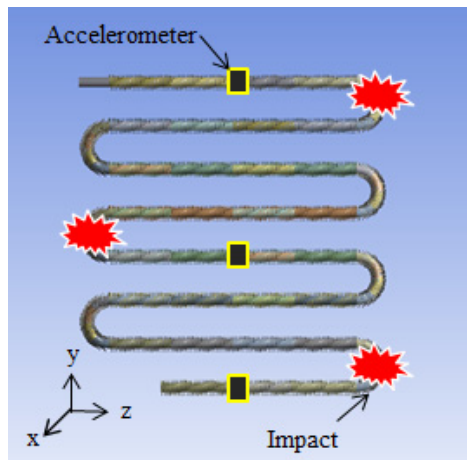
Tube deformation



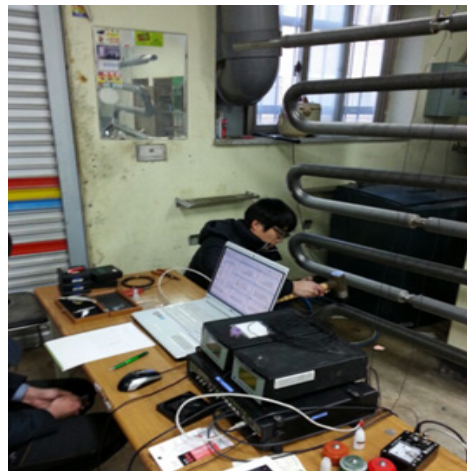
Tube stress - #7/Inch

(b) Results of tube

Fig. 5 Results of considered by fin pitch



(a) Method



(b) Process

Fig. 6 Measurement method & process

Fig. 7은 impact hammer를 이용한 가진 시, 상관 함수(coherence)를 확인하여 가진응답이 양호한(중단 곡관 타격, 하단 센서 취득) 신호에 대해 분석한 스펙트럼을 나타낸다. 고유치는 142 Hz, 163 Hz, 182 Hz, 194 Hz 등이 확인되었으며, 이외에도 고유치가 다수 존재하는 것을 확인할 수 있었다.

고유치의 분리여유 20%이내에 유체 가진주파수가 존재할 경우에 공진 발생 가능성이 있으며, 확인된 고유치 중에서 163 Hz 성분은 Fig. 7의 점선으로 표시된 유체 가진주파수(165.4 Hz)와 1.47%의 분리여유를 보이고 있으므로 공진 분리여유 20%이내의 영역(파란 영역 표시)에 존재하는 것을 확인하였다. 이는 운전 시에 유체의 가진력으로 인해서 공진이 발생할 가능성이 있는 것으로 판단된다.

또한 앞서 확인한 바와 같이 고유치가 다수 존재하므로 공진영역을 피하기는 어려울 것으로 보이며, 공진영역 내에서 진폭을 감소시키는 방향으로 보강작업을 진행해야할 것으로 판단된다.

4.3 Modal Test와 3D 해석결과의 비교

열교환기에 대해 3D modal 해석을 바탕으로 상·하단 부위에 단위하중을 인가하여 조화응답을 확인

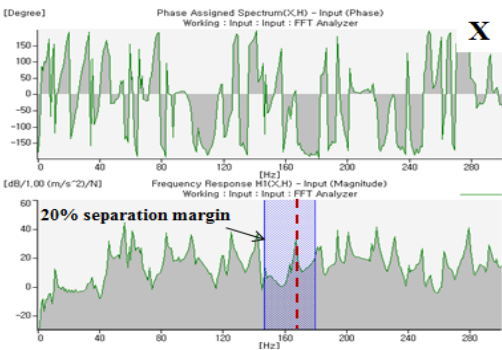


Fig. 7 The measurement results of eigenvalues

Table 5 Comparison of modal test and 3D analysis

Test results (Hz)	3D analysis (Hz)	Error(%)
142	140.46	1.10
163	156.99	3.96
182	175.81	3.40
194	183.66	5.33

하기에 앞서 ansys workbench v.14⁽⁹⁾의 3D modal 해석결과에 대한 신뢰성 확보를 목적으로 modal test 결과와 비교하였다.

3.1절에서와 같이 핀의 질량을 point mass 형태로 가정한 후 해석한 결과, Table 5에서처럼 실제 시험을 통해 얻어진 고유치와의 오차율은 1.10~5.33% 로써 10%이내의 오차율을 보이므로 해석결과에 대한 신뢰성을 확보하였다고 할 수 있다.

또한 실제 시험을 통해서 확인할 수 없는 모드형상을 해석을 통해 확인할 수 있었으며, 관 전체에 대하여 기여도가 높게 나타났다. 이는 유체 가진주파수와 인접한 고유치 성분으로 인해 공진⁽¹⁰⁾이 발생할 때 관 전체에 영향을 줄 것으로 판단된다.

4.4 조화응답 해석

3D modal 해석의 신뢰도를 확보한 전처리 과정을 바탕으로 운전온도 및 지지부 설치를 가정하여 유체 가진주파수와 인접한 모드형상에서 기여도가 높은 부위에 대한 응답을 확인하였다.

Fig. 8에서와 같이 단위하중은 열교환기의 상·하단 부위(흰색 점선 표시)에 인가하여 해석한 결과, 최대 응력은 곡관과 지지부에서 발생하였다. 모드형상 역시 최대 응력 발생 부위에서 기여도가 높게 나타나는 것으로 확인 되었으며, 이는 운전 시에 유체 가진주파수와 고유치의 분리여유 부족으로 인한 공진 발생 때, 곡관과 지지부에 과도한 응력이 지속적으로 발생할 가능성이 있는 것으로 판단된다.

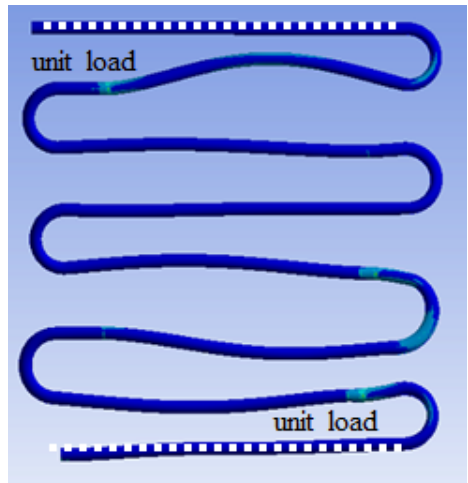


Fig. 8 Analysis result of stress

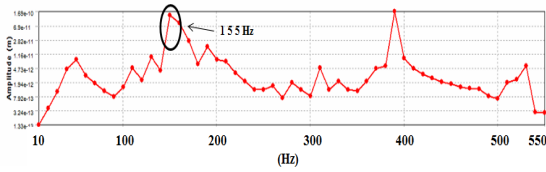


Fig. 9 Frequency response

또한 Fig. 9의 주파수 응답 결과 유체 가진주파수와 가장 인접한 고유치 163 Hz의 분리여유 20 %이 내에서 가장 높은 진폭의 발생(155 Hz대역)을 확인하였으며, 이는 4.2절의 결과와 마찬가지로 공진 여부를 확인하였다.

5. 결 론

이 논문에서는 현재 제작된 MCFC 용융탄산염 연료전지 시스템의 필수장비인 열교환기의 관 내부 전체에 원래 수명보다 빠르게 leak가 발생되고 있는 현상에 대하여 변형 및 응력을 평가하고, 유체 가진 주파수와 고유치에 의한 공진여부를 판단하여 수명 향상을 위한 기초자료를 제시하였다. 해석결과로써 얻은 결론은 다음과 같다.

상온 상태에서 열교환기에 대하여 지지부를 설치하는 것이 더욱 안정적인 것으로 나타났으나, 운전 상태의 온도를 고려하면 관의 열팽창으로 인해 지지부 유·무와 상관없이 항복강도를 크게 넘어서는 결과가 확인되어 지지부 설치로 인한 효과가 낮을 것으로 사료된다.

핀에 발생하는 응력의 경우에는 핀 간격이 좁을수록 응력을 분산시키는 면적이 늘어나 응력이 감소하는 경향을 보인다. 하지만 관은 핀 간격이 좁을수록 열팽창에 저항하는 힘이 커져 응력이 증가하는 경향을 보이기 때문에 핀 간격을 줄여서 관 손상의 문제를 해결하는데 어려움이 있을 것으로 판단되며, 핀의 재료를 바꾸거나 간격을 넓혀 저항하는 힘을 줄이는 방향을 검토해야 할 것으로 사료된다.

유체 가진주파수와 고유치의 분리여유가 1.47 %로써 공진영역 내에 존재하므로 공진이 발생할 가능성이 있으며, 고유치 또한 다수 존재하기 때문에 질량과 강성 등을 변화시켜 고유치 대역을 옮기더라도 공진영역을 피하기는 어려울 것으로 보이며, 불가피하게 공진영역 내에서 진폭을 낮추는 방향으로 보강

작업을 진행해야 할 것으로 사료된다.

조화응답을 통한 공진여부를 확인하기에 앞서 실제 시험을 통해 얻은 고유치와 3D 해석한 고유치를 비교하여 낮은 오차율(최대 5.33 %)을 확보하여 3D 해석에 대한 신뢰도를 확인 하였다.

공진영역 내에서 높은 진폭이 발생하였고, 주파수 응답을 통하여 공진여부를 확인하였다. 또한 응력발생 지점(곡관, 지지부 부근)을 중심으로 열팽창을 고려한 보강작업이 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 연구용역(과제번호: 2013-1127 Humidifier 구조해석, 과제번호: 2014-0140 충격 및 과도진동을 갖는 설비의 최적 진단시스템 운영을 위한 신호분석) 및 경상대학교 산학협력단의 지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- (1) Li, X., Wang, Y., Wang, G., Jiang, M., Sun, Y., 2013, Mode Transitions in Vortex-induced Vibrations of a Flexible Pipe Near Plane Boundary, *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 12, No. 3, pp. 334-343.
- (2) Yang, B., Yang, T., Ma, J. L. and Cui, J. S., 2013, The Experimental Study on Local Scour Around a Circular Pipe Undergoing Vortex-induced Vibration in Steady Flow, *Journal of Marine Science and Technology-Taiwan*, Vol. 21, No. 3, pp. 250-257.
- (3) Malčius, M., Ramanauskas, R. and Augutis, V., 2011, Analysis of Fastening Element Impact on Pipe Modal Vibrations, *Journal of Vibro. Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 157-163.
- (4) Evans, N. D., Capone, D. E. and Bonness, W. K., 2013, Low-wavenumber Turbulent Boundary Layer Wall-pressure Measurements from Vibration Data Over Smooth and Rough Surfaces in Pipe Flow, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 332, No. 14, pp. 3463-3476.
- (5) Chen, R. H., Lin, Y. J. and Lai, C. M., 2013, The Influence of Horizontal Longitudinal Vibrations and the Condensation Section Temperature on the Heat Transfer Performance of a Heat Pipe, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 34, No. 1, pp. 45-53.

(6) Jeong, D. H. and Jeong, J. T., 2003, Non-linear Vibration Analysis for the In-plane Motion of a Semi-circular Pipe Conveying Fluid, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 677~682.

(7) Jerry H. Ginsberg, 1973, The Dynamic Stability of a Pipe Conveying a Pulsatile Flow, International Journal of Engineering Science Vol. 11, pp. 1013~1024.

(8) Kim, W. T., Kim, H. S. and Lee, Y. S., 2003, Vibration Analysis of pipe with Elbow subject to Internal Pressure and Temperature, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 223~226.

(9) Lee, H. H., 2010, Finite Element Simulations with Ansys Workbench v12 SDC Publication, PA.

(10) Wu, Y., Li, Y. and Liu, Z., 2013, The Vibration Analysis in Full Liquid Pipe, Zhendong Ceshi Yu Zhenduan/Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis.

Korea, in 1999. Dr. Choi worked at Arizona State University as an Academic Professional from 1999 to 2002. Dr. Choi's research interests include vibration analysis and optimum design of rotating machinery, machine diagnosis and prognosis and acoustic emission. He is listed in Who's Who in the World, among others.



Jeong-min Ha is unified master's and doctor's course degrees at the Department of Energy and Mechanical Engineering at Gyeongsang National University in Korea. My areas of research is dynamic analysis of the shaft through FEM analysis and measurement for diagnosis.



Byeong-Keun Choi is a Professor at the Department of Energy and Mechanical Engineering at Gyeongsang National University in Korea. He received his Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from Pukyong National University,