

# 스크롤 압축기의 공동 소음 규명을 위한 음향모드 분석 Acoustic Mode Analysis to Identify Cavity Noise of Scroll Compressor

김승엽\*·이동수†·서정환\*·허대녕\*

Seung Yup Kim, Dong Soo Lee, Jeong Hwan Suh and Dae Nyung Heo

Key Words : Scroll Compressor, Cavity Noise, Acoustic Mode Identification

## ABSTRACT

Acoustic modes of internal region of 4-hp scroll compressor are identified by measuring transfer functions between a reference and 84 measuring points. The corresponding acoustic mode-shapes and natural frequencies were calculated by analysis software SYSNOISE. There exist two clearly distinguishable dipole modes of vertical and horizontal direction and a single quadrupole mode in the frequency region of interest. It shows that the natural frequencies of the identified modes are linearly sensitive to suction pressure ( $P_s$ ) but relatively in sensitive to discharge pressure ( $P_d$ ) in operating condition.

## 1. 서론

1990년대 중반을 넘어서면서 에어컨에 대한 수요가 늘어남에 따라 에어컨의 경쟁력 확보를 위한 성능개선 기술개발이 진행중이며 에어컨의 핵심 부분이라 할 수 있는 압축기에 대한 연구가 지속적으로 이뤄지고 있다. 압축기의 성능 가운데 진동·소음 분야는 소비자들에게 직접적으로 인지되는 요소이기 때문에 그 중요성도 크다고 할 수 있다. 스크롤 압축기(scroll compressor)는 1981년 자동차 에어컨용으로 처음 시장에 등장한 이래로, 1996년 국내 자체 개발에 성공하여 전세계에 수출되고 국내에 판매되고 있으며 에어컨의 대용량화 추세에 따라 비교적 용량이 큰 스크롤 압축기의 사용이 증가되는 추세이다.

스크롤 압축기의 소음은 소음원과 소음 경로에 따라 분류되며 소음 경로 중 한 가지로 공동 소음이 있다. 기존의 공동 소음에 대한 연구는 토출계에 한정적이었고, 실험적인 방법을 통해 수행되었다<sup>(1)</sup>. 하지만, 본 논문에서는 압축기 전체를 모델로 삼아 연구를 수행했다.

공동 소음은 내부 형상에 의해서 달라지므로 실험적인 접근 방법으로 규명하는데 많은 시간과 비용을 필요로 한다. 본 논문에서는 해석적인 접근 방법을 적용하기 위해 공동 소음의 모드를 규명하고 유효 인자 해석을 통해 실험 결과와 비교하여 공동 소음을 분석한다.

## 2. 공동 소음 현상

공동 소음이란 유동이나 다른 가진원에 의해 공동(空洞, cavity)이 가진 되어 발생하는 소음으로, 압축기의 경우 압축기의 밀폐된 공간을 흐르는 냉매에 의해 이러한 공동 소음이 발생하게 된다. 공동 소음은 형상에 의해서 결정되는 고유 모드가 존재하지만 여러 인자들에 의해 모드 주파수가 변한다. Fig. 1은 R22 냉매를 사용하는 스크롤 압축기이다.

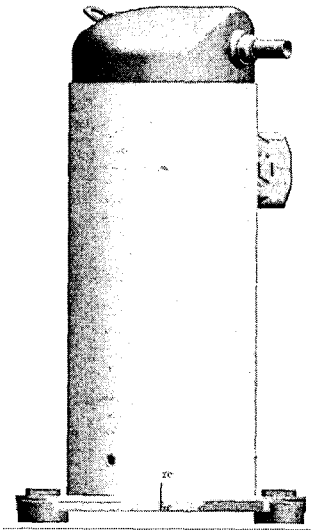


Fig. 1 Scroll compressor

† LG 전자 DA 연구소

E-mail : songdang@lge.com

Tel : (02) 818-7946, Fax : (02) 867-3941

\* LG 전자 DA 연구소

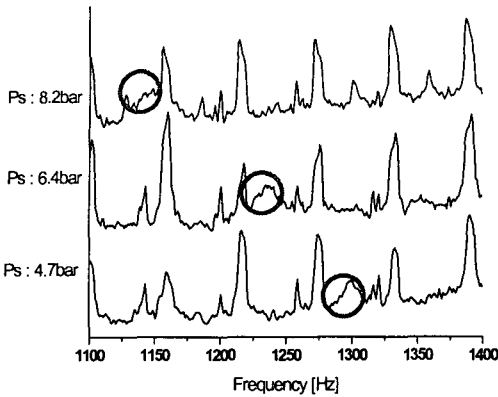


Fig. 2 Spectrum of cavity noise characteristics depending on suction pressure level

Fig. 2 는 운전 중인 압축기의 소음 스펙트럼이다. 위에서부터 차례대로 흡입 압력이 각각 8.2, 6.4, 4.7bar 일 때를 나타낸다. 여러 가지 공동 소음 모드가 존재할 수 있으나 확인한 주파수 대역은 Fig. 2 에서 표시된 부분이다. 이 부분의 peak 가 1150Hz 에서 1300Hz 로 150Hz 정도 움직이는 것을 확인할 수 있다. 이는 운전 중의 압축기 내부의 압력, 온도, 유동 등의 변화에 따른 결과라 추정된다.

### 3. 공동 소음의 음향 모드 분석

공동 소음의 해석과 실험을 상온 공기상태 조건에서 행하여 운전 중의 공동 소음을 예측하였다. 파장은 형상에 의해서 결정되므로 매질에 관계없이 일정하다. 그러므로, 음속과 주파수의 관계인 식(1)을 이용하여 상온 공기상태의 주파수와 운전 중의 주파수로 환산할 수 있다<sup>(2)</sup>.

$$f_{R22} = \frac{c_{R22}}{c_{air}} \cdot f_{air} = \frac{176}{340} \cdot f_{air} \approx 0.518 \cdot f_{air} \dots\dots(1)$$

$c_{R22}$  : wave speed at R22,  $f_{R22}$  : frequency at R22

$c_{air}$  : wave speed at air,  $f_{air}$  : frequency at air

실험에서 공동 소음의 모드 주파수는 압축기 운전시에 1150~1240Hz 사이에 존재하였다. 다른 모드가 존재할 수는 있지만, 그 크기가 작거나 harmonics 또는 noise 에 의해 구별이 되질 않았다. Fig. 2 에 표시된 모드 주파수는 식(1)에 의해 공기상태에서는 2220~2390Hz 에 존재하는 것으로 추정할 수 있다.

Fig. 3 은 본 연구에서 음향 모드 분석을 위한 순서도로 이와 같은 순서로 실험과 해석을 수행하였다.

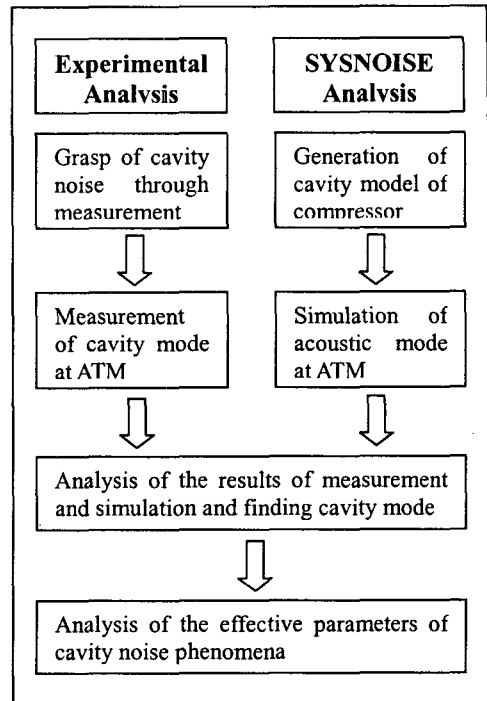


Fig. 3 Block diagram of analysis

#### 3.1 음향 모드 해석

공동 소음을 예측하고, 공동 소음의 유효 인자 분석을 위해 Fig. 4 와 같은 3 차원 해석 모델을 이용하여 SYSNOISE 에서 acoustic mode 해석을 수행하였다.

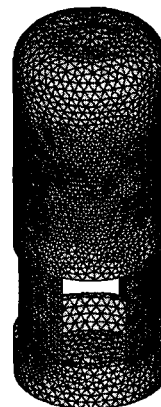


Fig. 4 3D model of analysis

### 3.2 음향 모드 측정

실험적으로 음향 모드를 얻기 위하여 Fig. 5 과 같이 스피커(speaker)와 탐침 마이크로폰(probe-microphone)을 설치하였다. 그리고, 압축기 외부에 구멍을 내고 스피커로 가진을 하여 내부의 소음을 측정하였다.

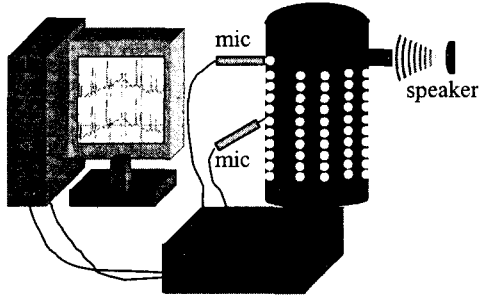


Fig. 5 Schematic diagram of measurement method

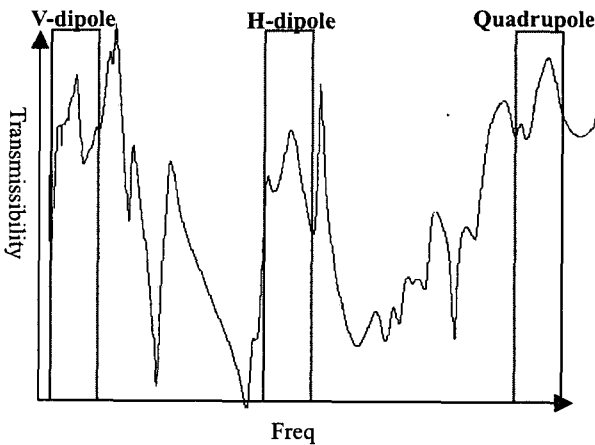


Fig. 6 Spectrum of measurement

Fig. 6 은 84 개를 측정한 결과의 전달 함수(transmissibility) 스펙트럼 중 하나이다. 여러 가지 모드가 존재하지만, 크기가 크지 않은 국부적인 모드 또는 크기가 크더라도 상부 토출계 쪽의 모드는 제외하고 표시된 영역의 모드만을 살펴 보면 모터 주위에서 모드 형상을 갖는 모드다. V-dipole(vertical dipole)은 수직방향 모드를, H-dipole(horizontal dipole)은 수평방향 모드를 의미하고, 고주파 영역에서의 모드는 quadrupole로 존재한다.

### 3.3 음향 모드 비교

3.1 에서 해석된 음향 모드와 3.2 에서 측정된 3 가지의 음향 모드를 비교한 결과를 Fig. 7 에 나타내었다.

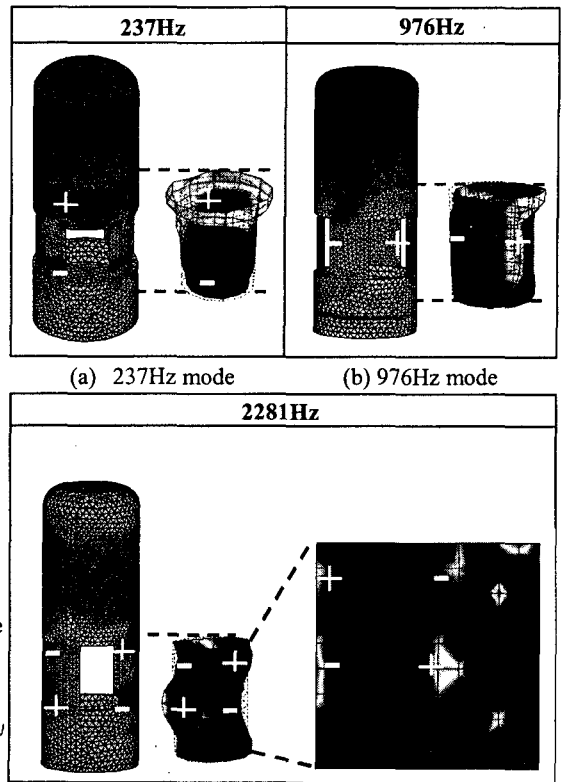


Fig. 7 Shape of acoustic mode

각각의 모드에서 왼쪽은 해석 결과이고 오른쪽은 실험 결과로 점선으로 높이 위치를 동일하게 하였고, +, -는 모드의 요철(凹凸)을 의미한다. 각각의 모드에 대한 실험, 해석 결과는 서로 유사함을 알 수 있다. 그리고, Fig. 7 (a), (b) 는 이극(dipole), Fig. 7 (c)는 사극(quadrupole)의 모드 형상을 이루며<sup>(3)</sup> 평면으로 봤을 때 모드 형상이 더 잘 확인 할 수 있다.

Fig. 2 에서 나타난 공동 소음의 모드 주파수는 1190Hz 대역으로 식(1)에 의해 공기 상태의 모드 주파수로 환산하면 2290Hz 대역이 된다. 이 주파수는 Fig. 7 (c)의 모드 주파수라고 할 수 있다.

Table 1 은 물성치를 상온 공기와 냉매가스의 경우를 서로 비교한 결과로 모드 주파수가 유체의 음속에 비례함을 알 수 있다.

Table 1 Natural frequency depending on wave speed

Fluid	Wave speed [m/s]	V-dipole [Hz]	H-dipole [Hz]	Quadrupole [Hz]
Air	340	237	976	2281
R22	176	121	506	1182

#### 4. 공동 소음의 유효 인자 분석

공동 소음에 영향을 미치는 가장 큰 인자가 어떤 것인지를 파악하기 위해서 내부 형상과 냉매 가스의 유동과 온도, 압력 그리고 오일량에 따른 유면 높이 등에 대해 조사를 하였다. 모델은 압축부, 기구부 변경에 의한 내부형상의 변경은 없고, 냉매 가스의 유동은 유체의 가진원으로 작용한다고 가정하여 본 논문에서는 내부 형상은 그대로 둔 채 냉매가스의 온도, 압력의 변화에 따른 공동 소음의 모드 주파수의 변동에 대한 유효 인자 분석을 하였다.

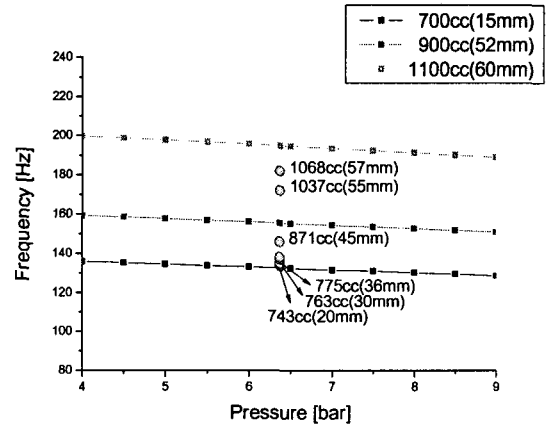
공동 소음의 영향을 미치는 인자 중에 형상을 제외한다면 냉매 압력, 냉매 온도, 오일량 등이 있다. 그런데 냉매 온도는 냉매압력과 교호된 인자로 일반적으로 냉매 가스는 압력이 커질 경우, 냉매 온도는 커지는 비례관계가 되고, 실험 시에 냉매 온도는 제어인자가 아니므로 냉매 압력과 오일량만 고려한다.

실제 압축기의 운전 상태에서 내부 냉매 온도 분포는 모터의 방열 및 냉매 유동에 의해 달라지게 된다. 압축기의 내부 온도 측정시험 결과, 냉매 온도는 약 섭씨 30~50 도로 분포형태가 되지만, 해석 시에는 상수 값을 주어 계산하였다. 또한 냉매 압력은 흡입 압력과 토출 압력이 있으나 본 논문에서 대상으로 삼은 모델은 모터 주위가 흡입 압력으로 형성되는 압축기이므로 흡입 압력만 고려했다.

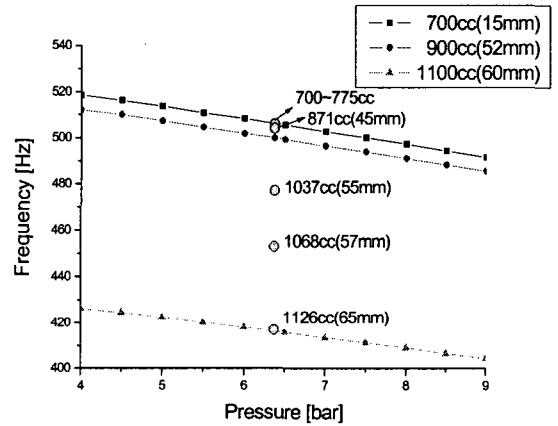
유효 인자 분석을 위해 해석을 통한 접근과 실험을 통한 접근을 하였다. 해석 시에는 오일량을 3 수준으로 하고, 냉매 압력을 12 수준으로 하여 36 번의 해석을 수행하였고, 실험 시에는 오일량, 흡입압, 토출압의 3 인자에 대해서 각각 3 수준으로 하여 27 번의 시험을 하였다.

##### 4.1 해석을 통한 유효 인자 분석

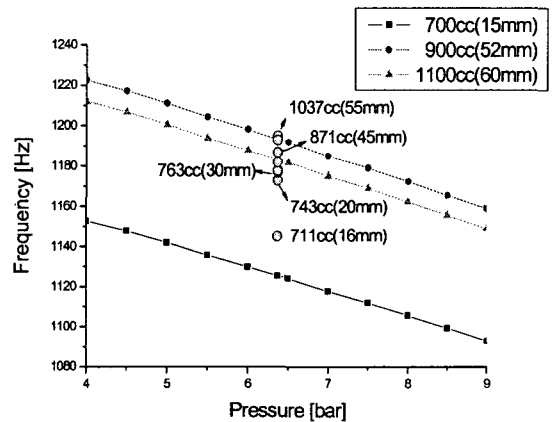
오일량에 따른 해석을 위해서 오일량을 각각 700cc(유면 높이:15mm), 900cc(유면 높이:52mm), 1100cc(유면 높이:60mm)로 압축기 내부의 유면 높이를 달리한 3 가지 모델을 구성하였다. 냉매 압력에 따른 해석을 위해서 ARI 운전 조건의 압력인 6.37bar 를 기준으로 하여 3~9bar 까지 0.5bar 씩 변화시키면서 3.3 에서 구한 3 가지의 모드 주파수의 변동을 살펴봤다. 또한, 모드 주파수가 급변하는 유면 높이를 파악하기 위해 6.37bar 의 압력에서 유면 높이에 따른 주파수 변동 추이를 살펴봤다.



(a) Vertical dipole mode



(b) Horizontal dipole mode



(c) Quadrupole mode

Fig. 8 Natural frequencies of identified acoustic modes depending upon oil level height and suction pressure

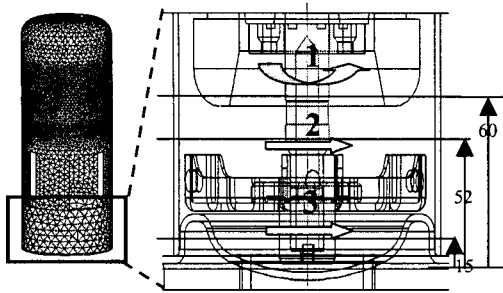


Fig. 9 Path of wave propagation and level height

Fig. 8 은 유효 인자를 검증하기 위한 음향 모드 해석의 결과로 압력 변동에 따른 주파수의 변동치를 각각의 오일량(유면 높이)에 따라서 나타내었다. 그리고 냉매 압력이 6.37bar 일 때의 각 모드별 오일량에 따른 특성은 Fig. 8 에서 점으로 나타내었고 각각의 오일량과 유면 높이를 표기하여 모드 주파수의 추이를 살펴보았다. 여기서 모드 주파수의 변동이 발생 된다는 것은 각 모드에 있어서 Fig. 9 에서 모델의 아래 부분의 높낮이가 영향을 주는 것으로 wave 가 그 부분을 통해 전파되고 있다는 것을 의미한다. Fig. 9 는 이런 wave 의 전파 경로를 나타낸 것으로 높낮이에 따라 60mm(1100cc)의 경우는 고정자 하부의 둘레를 wave 가 지나게 되고(1 번 경로), 52mm(900cc)와 15mm(700cc)의 경우는 아래 면을 따라 wave 가 지나게 된다(2, 3 번 경로).

Fig. 8(a)는 수직 방향의 이극원(V-dipole)의 모드 형상으로 모터 고정자에 의해 D-cut 된 슬롯 부분을 Helmholtz 공명기의 목이라 생각할 수 있다. 그러면 오일량이 증가할수록 유면 높이가 상승하여 부피가 줄어들므로 모드 주파수가 높아졌을 것으로 추정할 수 있다. Fig. 8(b)는 수평 방향의 이극원(H-dipole)의 모드 형상이므로 유면 높이에 의한 모드 주파수의 변화가 크게 나타나지 않지만 60mm(1100cc)의 경우는 다른 모델과 달리 둘레로 wave 이 지나가게 되어(Fig. 10 의 1 번 전파 경로) 파장이 길어지게 되어 모드 주파수가 작아지게 되며, 전이(transition) 되는 높이(52~55mm)가 존재한다. 이 높이에서는 1 번, 2 번 경로 둘 다를 통해서 wave 가 전파된다고 예측할 수 있다. Fig. 8(c)는 사극원의 모드 형상으로 수평 방향의 모드와 마찬가지로 wave 가 60mm(1100cc)의 경우 1 번 경로를 통해 전파되고, 15mm(700cc), 52mm(900cc)의 경우(Fig. 10 의 2, 3 번 전파 경로)는 유면 높이가 서로 다르므로 모드 주파수도 다르게 나타나게 된다. 이 모드 역시 전이 되는 높이가 20mm 이하부터 발

생하고 있음을 알 수 있다.

각각의 모드는 고차로 갈수록 기울기가 커지며 압력이 바뀔 때 따라 크게 바뀔 수 있다.

Table 2 Results of Acoustic Mode Analysis

Mode	Oil (cc)	ARI mode freq. [Hz]	Max-Min [Hz]	%
Vertical dipole	700	133	7	5.3
	900	156	8	5.1
	1100	195	10	5.1
Horizontal dipole	700	506	27	5.3
	900	500	27	5.4
	1100	416	22	5.3
Quadru-pole	700	1126	60	5.3
	900	1194	64	5.4
	1100	1183	63	5.3

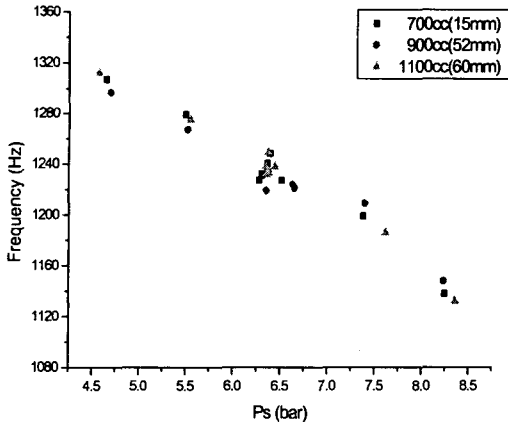
Table 2 는 모드 해석의 결과 중 ARI 조건에서의 모드 주파수와 그 때의 변동폭(Max-Min) 값을 나타낸다. 백분율 값은 모드 주파수에 대한 변동폭의 비 값으로 5.1~5.4%로 거의 일정하게 나타났다. 이를 통해 Fig. 8 에서 그래프의 기울기는 오일량에 상관없이 거의 일정함을 알 수 있다. 결론적으로, 해석의 결과는 공동소음의 모드 주파수는 냉매압력과 오일량 둘 다 주된 유효 인자라고 할 수 있다.

#### 4.2 실험을 통한 유효 인자 분석

실험적 분석은 흡입 압력, 토출 압력, 오일량에 따른 음향 모드의 변동 값을 확인하였다. 실험적으로는 흡입압과 토출압 제어를 통해서 이루어지므로 각 압력에 따라 측정을 하였고, 4.1 의 해석 결과와 비교하기 위한 실험 계획을 Table 3 에 나타내었다. Ps 는 흡입 압력(suction pressure), Pd 는 토출 압력(discharge pressure)을 의미하고 단위는 bar 이다.

Table 3 Oil level, suction and discharge pressure parameters for experimental conditions

oil	Ps	Pd	oil	Ps	Pd	oil	Ps	Pd
700cc	8.25	20.90	900cc	8.24	20.95	1100cc	8.36	20.97
	6.28	16.85		6.32	17.03		6.38	16.93
	7.38	20.80		7.40	20.94		7.62	20.81
	6.31	18.87		6.36	18.83		6.35	18.94
	6.37	20.86		6.38	20.86		6.36	20.82
	6.52	22.66		6.66	22.70		6.45	22.75
	5.50	20.86	6.64	24.68	5.55	20.85		
	6.40	24.74	5.52	20.86	6.38	24.75		
	4.65	20.75	4.70	20.71	4.57	20.79		



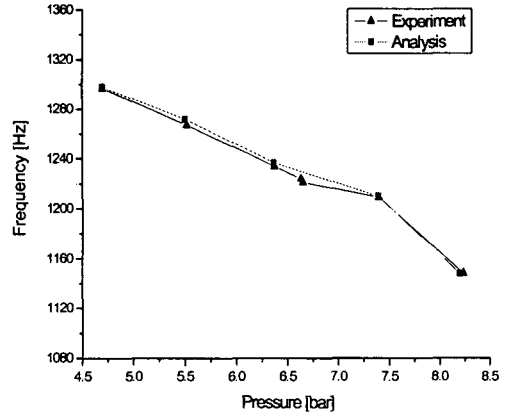
**Fig. 10** Natural frequencies of acoustic mode measurement dependency upon suction pressure and oil level

Fig. 10 은 압축기 운전 상태에서 공동 소음의 실험 결과이다. 흡입 압력이 증가함에 따라 공동 소음 주파수가 낮아지고 있고, 오일량에 따라서는 거의 차이가 없다. 이는 압축기 운전 시에 냉매 유동에 의해 실제 압축기 하부에 가라 앉아 있는 오일량은 유동에 같이 포함되어 흐르기 때문에 실제 운전 시에는 그다지 영향이 없는 것으로 보인다. 결과적으로 냉매 압력이 주된 유효 인자라고 할 수 있다.

#### 4.3 해석 결과와 실험 결과의 비교

실제 압축기의 운전 시에 압력을 변동시키면서 압축기 케이스의 온도 변화를 측정해 보면 고압에서 저압으로 변화할 때 온도는 15°C 정도 상승한다. 이를 바탕으로 내부 온도의 변화를 추정하여 온도와 압력을 동시에 변화시키면서 온도를 29~52°C 로 하여 SYSNOISE 해석을 수행하였다.

Fig. 11 은 냉매 압력에 따라 변동하는 공동 소음의 모드 주파수를 해석 결과와 실험 결과로 비교한 것으로 거의 일치하게 나타남을 알 수 있다. 하지만, 약간의 오차를 유발하는 것은 해석에서 특정 압력에서의 온도를 일정하게 주었기 때문이며 만약, 분포 온도를 주었을 경우에는 오차를 더욱 줄일 수 있을 것이다.



**Fig. 11** Comparison of analysis and experiment

## 5. 결론

스크롤 압축기의 공동 소음은 사극 음원 형상의 모드를 띄며 방사됨을 확인했다. 공동 소음에 영향을 미치는 주된 인자는 압축기 내부의 압력이며 오일량은 유동에 의해 일정하지 않으므로 실험적으로는 평가하기 힘들다. 하지만, 해석 결과로는 영향을 미치는 인자라고 할 수 있다. 상온 공기 중에서 실험과 해석 결과를 일치시키는 작업을 통해 유동을 고려하지 않는 해석 작업만을 하더라도 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 이를 통해 향후 형상 변경에 따른 공동소음의 모드 주파수를 추정할 시에 해석 모델로 가능할 것이다.

## 참고 문헌

- (1) 이진갑, 이동수, 이병철, 1999, "스크롤 압축기 소음원의 실험적 규명", 추계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 710~716.
- (2) Lawrence E. Kinsler, 1982, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 36~37.
- (3) Frank Fahy, 2001, Foundations of Engineering Acoustics, Paston PrePress Ltd, UK, pp. 96~103.