

압축기의 소음 진동 연구 경향

왕 세 명*

A Trend of Noise and Vibration Research in Compressor

Semyung Wang*

Key Words : Noise and Vibration(소음, 진동), Compressor(컴프레서), Sound Quality(사운드 퀄리티), Valve Dynamics(밸브 동역학), Purude Compressor Conference(퍼듀 압축기 학회)

ABSTRACT

There are a lot of efforts to improve noise and vibration in compressor. It had depended on experiments to reduce the annoying noise and vibration raised by costumer complaints until the twentieth century. But a trend of noise and vibration research changed tremendously by simulation techniques. Simulation techniques are also applied to fields on acoustic and valve dynamics etc, to validate a experiment and improve the performance of various fields in noise and vibration.

1. 서론

용적형 압축기의 소음 진동은 냉장고에서 작동을 하며 소비자에게 피부로 가장 민감하게 느껴지는 부분 중에 하나이다. 용적형 압축기의 역사가 깊은 만큼 성능과 소음의 두 부분에서 많은 노력들이 이루어져 왔고, 이러한 노력들은 용적형 압축기의 많은 발전을 이루어 왔다. 그러나 삶의 질이 더욱 향상되며 성능만을 높여왔던 가전제품들이 소비자와 가장 가깝게 느껴지는 소음 진동 부분에 더욱 더 많은 노력을 쏟고 있는 것은 제품의 경쟁력을 보유함과 동시에 가전제품의 평가를 받는 가장 중요한 부분에서의 선두를 가지기 위한 필수 조건이라고도 말할 수 있다. 이러한 노력들이 과거에서는 소음 진동 등의 문제들에 접근하는 방식이 실험을 통하여 개선 작업을 하여 왔으며, 그로 인한 많은 개선 시간과 노력을 들여왔다.

그러나 근래에 들어 여러 소음 진동 FEA Code와 수치적인 개발과 같은 Simulation기법들이 소음 진동 개선에 수반되어 지며, 과거 오랜 시간을 들여 문제 개선을 했던 부분에 정확하고 빠르게 접근하여 제품개발의 Cost 및 개발 경쟁력을 높여 오고 있다.

이러한 노력들이 어떤 식으로 이루어 졌는지 용적형 압축기의 전문 학회인 퍼듀 학회에서의 소음 진동 논문들의 경향을 살펴본다.

2. 압축기의 소음 진동과 관련된 논문

2.1. 압축기의 소음 진동 관련 학회

압축기 학회중 가장 손꼽히는 것이 퍼듀대학에서 매 2년마다 열리는 퍼듀 압축기 컨퍼런스이다. 용적형 압축기만이 아닌 스크롤과 로터리 압축기등 압축기에 관련된 모든 연구 등이 발표되는 학회로서 미국 퍼듀 대학에서 열린다. 모든 압축기의 개발을 담당하는 연구소와 압축기에 관련된 연구단체들의 논문을 발표하는

* 광주과학기술원 기전공학과 교수

smwang@gist.ac.kr,

학회로서 성능 향상이나 유체 유동 그리고 압축기 재질 개발 및 피로 등 여러 분야에서 연구하고 있는 부분들에 대해 연구한 결과들을 발표한다. 현재는 리니어 압축기와 카본 디옥사이드 압축기 등의 세션등이 추가 되면서 압축기의 동향에 민감하게 대응하는 학회이다. 그중 소음 진동과 관련된 부분에 대해 과거에서 현재까지 어떠한 경향으로 관심이 옮겨졌는지 보도록한다.

2.2. 퍼듀 압축기 학회에서의 논문

과거의 퍼듀 압축기 학회에서 1972년 부서의 논문들을 개최된 순서대로 정리하였다. 처음으로 전체 발표된 논문들에서 소음 진동과 관련된 부분의 논문수를 정리하였다.

Table 1 Paper number in Purdue Conference

Year	Total	NVH	Percent
1972	89	8	9%
1974	74	6	8%
1978	59	5	8%
1980	70	9	13%
1982	66	2	3%
1986	86	9	10%
1988	92	5	5%
1990	110	12	11%
1992	160	14	9%
1994	129	20	16%
1996	133	19	14%
1998	154	20	13%
2002	115	16	14%
2004	104	16	15%

표1에서 보면 1990년대 이전에는 전체 투고 논문들이 적었다. 전체 논문 수와 같이 소음 진동 관련 부분의 논문들도 10% 안팎으로 발표된 것을 볼 수 있다. 그러나 1990년대부터는 많은 소음 진동 관련 논문들이 게재 된 것을 알 수 있다. 그러면서 소음 진동의 연구들도 활발하게 진행되어 온 것도 볼 수 있다.

Table 2 Papers in 80' and 90' Noise and Vibration

	Overview	valve	Piping system	Rigid Body	Shell	Cavity/pulsation	FEM Simulation	Measure.	Etc.
70'	4	3	2	4	-	2	-	4	1
80'	1	2	1	2	7	5	4	4	4

이는 1980년대와 그 이전에는 실험 적인 접근들이 실제 물리적인 현상을 설명하고 문제점을 해결하는 데에는 부족했음을 짐작할 수 있다.

그러나 1990년대에 들어서면서 Simulation 기법들이 압축기 개발 회사나 연구 단체들에서 활발히 적용하기 시작하였으며, 과거 접근하지 못하였던 실험의 확인들이 이루어지며 도약적인 소음 진동의 발전도 이루어졌다고 볼 수 있다.

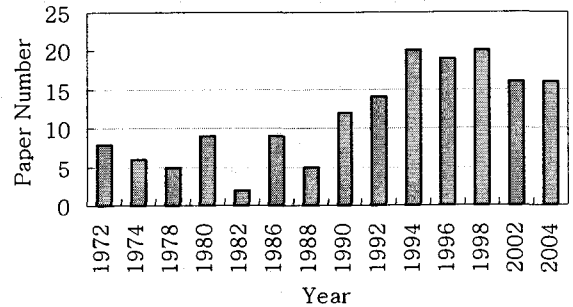


Fig. 1 NVH Paper number at each conference

주목할 만 한 것은 2000년 이후로 논문수가 줄고 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 영국, 중국 등의 압축기 학회가 생기면서 논문이 분산된 것으로 추정되며, 2006년에 아시아 압축기 학회가 생기면 더욱 분산될 것으로 전망된다.

3. 분야별 소음 진동 관련 논문들 현황

3.1. 1970,80년대 소음 진동 관련 논문 현황

초기 압축기 관련해서 소음 진동의 현황들을 보면 Simulation이 적용되기 전의 실험 측정에 관련된 논문과 냉매의 순환 소음 그리고 압축기 내부의 Cavity 관련 소음 진동 논문들이 주를 이루었다. 특히 표2에서와 같이 70년대에는 소음 진동의 전체 개괄적인 내용과 함께, 밸브, Piping System, Cavity와 실험과 수학적 모델링이 논문의 주를 이루고 있다.

그리고 80년대에는 Shell에 관련된 연구가 많이

이루어졌으며, FEM(Finite Element Method)의 Simulation기법을 이용한 Modeling이 시작되었다. 그리고 유체 유동과 관련된 Gas Pulsation, Cavity문제 등이 주를 이루었다고 볼 수 있다. 초기 용적형 압축기의 개발에서 문제시 되었던 것들에 초점을 두어 그 부분의 연구 등이 진행되었으며, 실제적인 제품 개발에 적용시키는데 쉽지 않은 문제들이 있었던 것을 알 수 있었다. 그리고 Simulation기법들이 처음으로 다루어졌으나, 그 활용정도는 상당히 낮았으며, 초기 1D문제로 모든 문제를 간략화 하였으며, 비선형 문제들을 선형 문제로 고려하는데 많은 어려움이 있었음을 알 수 있다.

3.2. 1990,2000년대 소음 진동 관련 논문 현황

1990년대로 들어서면서는 두드러지게 나타난 것이 Sound Quality부분인데, 이는 실제 Sound Power의 척도로 소음을 판별한 것과 다르게 소비자에 따른 실제적인 소음 진동의 판별기준이 중요해지고 있다는 것을 보여준다. 그리고 기존과 같이 Gas Flow와 Gas Pulsation이 실험적으로 많이 연구되어져 왔다. Simulation기법등도 구조의 문제를 다루는 것에서 Acoustic부분의 BEM부분에도 적용되며, 방사 음향 부분의 전성기를 맞이하였다고 볼 수 있겠다. 그리고 1990년대까지 많이 이루어져왔던 실험에 관련된 같은 연구 단계에서의 동일 주제의 논문이 쏟아졌던 반면에, 2000년대부터는 특정 주제에 대한 다각적인 분석과 Simulation의 검증이 들어가며 논문의 질이 높아졌음을 알 수 있다.

표 3과 4는 1990년부터 현재까지 Purdue 학회에서 발표된 소음 진동 학회 논문등을 실험과 Simulation으로 분류해 놓은 것이다.

Table 3 Related to Experiment in Purdue Conference

	Acoustics	Structural Vibration	Gas Flow and Pulsation	Sound Quality
1994	6	4	4	1
1996	2	2	5	1
1998	4	3	5	-
2000	4	2	3	1
2002	3	1	1	3
2004	2	2	2	-

방사 소음과 관련된 Simulation기법인 BEM과 같이 Structural Vibration의 구조 모드들과 관련된 소음 저감 활동도 활발히 보이고 있다. 특히 문제시 되는 Target 주파수의 문제를 Cavity와 Cavity가진 주파수 목적체 연성 해석 등의 부분들이 많다. 이러한 해석을 가지고 개발 기간을 줄인 사례들이 많이 보인다.

이러한 특수 사례들에 대해서는 4장에 보이도록 하겠다.

Table 4 Related to Simulation in Purdue Conference

	Acoustics	Structural Vibration	Gas Flow and Pulsation	Sound Quality
1994	1	2	1	-
1996	1	3	2	-
1998	4	2	1	-
2000	2	3	2	-
2002	2	2	3	-
2004	3	3	3	-

4. Simulation 기법을 이용한 소음 저감 사례

4.1. 압축기 고주파 소음 저감 관련 사례

이상과 같이 소음 진동을 저감시킨 사례들이 많이 있다. 그중 Tecumseh에서 진행한 소음 저감의 사례를 들어 보겠다. 이 논문은 압축기에서 발생하는 고주파 음에 대한 Sound Quality관점에서 연구한 논문이며, 용적형 압축기의 토출 맥동과 소음 분석을 통해 토출 머플러를 설계한 사례를 보여주고 있다. Acoustic BEM의 사용틀인 Sysnoise를 이용하여 머플러의 음장해석을 실시하였으며, 이를 통해 각 소음원의 Factor를 분석하여 List Up을 실시 하였으며, 이를 토대로 차기 개발시에도 사용할 수 있도록 하였으며, 이런 프로세스를 세워 됨으로서 차기 동일한 소음 진동 문제 발생시 유연하게 대처 할 수 있도록 한 사례이다.

Fig. 2 3-D Waterfall of Refrigerator Sound

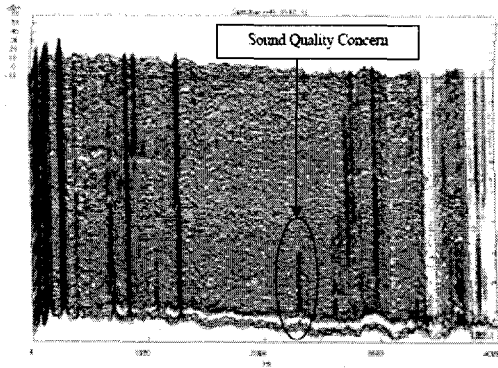


그림 2는 냉장고 Sound의 Waterfall 데이터로 이 데이터에서 문제시 되는 2350Hz의 고주파 영역을 타겟으로 이부분의 소음을 압축기 전체에서 분석해보고 이부분이 Discharge Pulsation과 관계가 있는 것을 알아내서 Discharge System에 대한 Acoustic FEM을 실시해서 Discharge System에서 관련 있는 모든 주파수 성분들을 List Up하여 초기 문제와 관련 있던 주파수 영역에서의 소음 저감을 실현 한 사례를 보여 준다.

Fig. 3 Frequency Slices of the Discharge Pulse and Sound at 2352Hz Compared

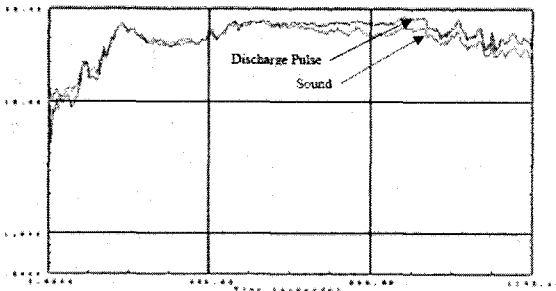
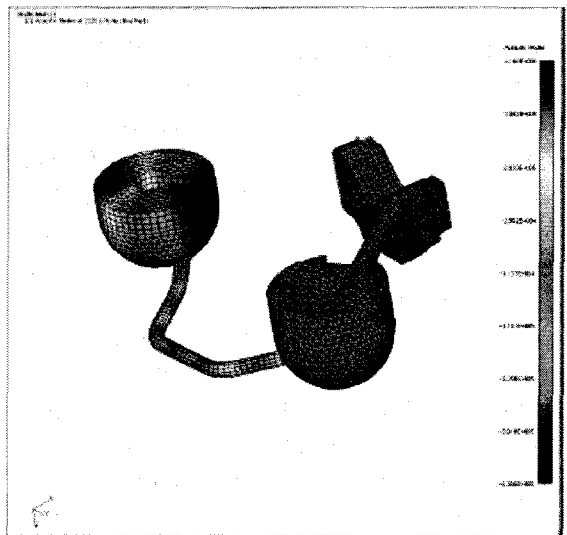


그림 3에서 보듯이 Discharge Pulse와 압축기 방사 소음 특성이 유사한 것을 방사 소음 측정으로 알 수 있고, Discharge의 소음 List Up은 다음과 같다는 것을 Simulation으로 알아 낼 수 있다.

Fig. 4 Discharge Muffler Resonance Modes from Model and Acoustic Resonance Result of Simulation

Mode	Frequency	Description
21	75.3	Muffler Helmholtz
32	187	Discharge Plenum to Muffler Helmholtz
43	816	Tube half wave
54	958	Helmholtz within Discharge Plenum
65	1620	Tube full wave
6	1738	Discharge passage half wave
7	2344	Muffler chamber Diameter resonance
8	2369	Muffler chamber Diameter resonance
9	2270	Muffler chamber Diameter resonance
10	2292	Muffler chamber Diameter resonance
11	2442	Discharge chamber half wave
12	2447	Tube 3 half waves
13	2561	Muffler chamber length
14	2592	Muffler chamber length
15	3267	Tube 2 full waves



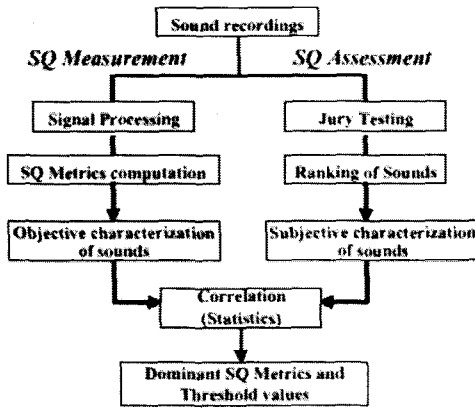
이러한 사례들은 실제적으로 2000년대에 들어선 논문에서 주로 볼 수 있는 것들이다. 물론 Simulation으로 문제 주파수의 원인들을 찾아내는 것으로 끝나지 않고, 이런 결과들과 재해석을 진행함으로써 새로운 설계까지 진행하는 일련의 작업들이 진행되며, 이런 프로세스를 정립화 함으로서 개발 기간을 단축할 수 있다.

4.2. Sound Quality에 대한 정립화 사례

먼저 말한 것과 같이 소음 진동에서 2000년대에 들어서며 가장 두드러지는 것 중 하나는 Sound Quality 부분이다. 이는 현재 냉장고나 압축기의 소음 진동을 평가하는 소음의 척도가 Sound Pressure Level만으로는 부족하다는 것을

보여주는 것이라고도 할 수 있다. 국내의 압축기 연구소나 연구 단체들이 Sound Quality부분에 있어서 많은 노력을 보이고 있지만, 실제적으로 Sound Quality부분의 수학적 정립화가 압축기 부분에 많이 이루어지지 않았기 때문에 실험적인 Sound Quality의 접근이 활발하게 이루어지고 있다. 낮은 Sound Pressure Level의 압축기가 실제적으로 소비자들에게 소음 진동에 대한 불만이 발생하고 있는 것들에 대한 문제를 해결하기 위한 것이 Sound Quality가 중요시 여겨지는 이유라 할 수 있겠다. 이런 Sound Quality에 대한 정립 단계라 할 수 있는데, 외국의 압축기 개발 연구소에서는 다음 그림과 같이 Sound Quality에 대한 정의를 내리고 정립화를 진행 하고 있다.

Fig. 5 Compressor Sound Quality Target development Process



위 연구소[Tecumseh]에서는 압축기의 음향 평가 방법 및 절차를 제시하며, Sound Power의 측정을 통해 Sound Quality를 높여 가는데 중점을 두고 있다. 이 논문에서는 Sound Power와

Sound Quality에 대한 정의를 다음과 같이 하고 있다. Sound Power는 "The time-averaged acoustic power output of a source"로, 그리고 Sound Quality는 "The auditory perception of the source based on customer's expectation"로 정의를 하고 있다.

5. 결론

이상과 같이 압축기의 소음 진동 연구에 많은 노력이 기울어져 왔으며, 초기에는 실험을 통한 소음 진동의 단순한 저감 노력에서 현재는 Simulation을 통한 체계적인 소음 진동 저감의 노력이 보여지고 있다. 또한 밸브의 소음 저감을 봤을 때는 1-Dimension 문제로 시작해서 2-D, 3-D의 Simulation 접근이 이루어지고 있는 것이 소음 진동 연구 경향의 주류이다. 그리고 단순한 소음 진동의 문제를 규명하는 단계에서 Sound Quality 및 최적설계를 얻기 위한 노력들이 이루어지고 있다.

참고문헌

- (1) Purdue Compressor Engineering & Refrigeration and Air Conditioning Conferences at Purdue in 1972 ~ 2004
- (2) Investigation of a High Frequency Sound Quality Concern in Refrigerator and Resulting Compressor Design Study, Tecumseh, 2002
- (3) Sound Quality Evaluation of Compressors, Tecumseh, 2002
- (4) Sound Reduction for Copeland Midsize Semi Hermetic Compressors using Experimental Methods, Emerson-Copeland, 2004
- (5) A Universal Simulation Tool for Reed Valve Dynamics, 2004