

회전압축기 공명기에 관한 실험적 연구

°이병찬*, 김진동**

Experimental Analysis on the Resonator in the Rotary Compressor

Byung-Chan Lee, Jin-Dong Kim

ABSTRACT

This paper introduces the experimental analysis of the resonator in the rolling piston type compressor for air conditioner. The resonator located between cylinder and bearing is a major factor in the noise reduction of the rotary compressor. Several shapes for the resonator which can be built in the space limitations are derived. Then optimal resonator type for the noise reduction is determined by noise tests. 6 design parameters of the type are found and optimal level for each design factor is deduced from Taguchi method.

1. 서 론

가정용 에어컨에 장착되는 회전압축기에 대한 진동소음은 사용자의 귀를 매우 거슬리게 하므로 진동소음 저감에 대한 연구가 오래 전부터 활발히 논의되어왔다. 이에 관한 연구 분야를 살펴보면 냉장고용 압축기와는 달리 셀의 구조변경에 의한 진동소음 저감보다는 셀 내부에 장착되어 있는 머플러 및 토출부의 가스 맥동에 관한 연구⁽¹⁻⁵⁾가 주류를 이루고 있으며, 흡입쪽의 셀 외부에 달려있는 어큐뮬레이터(Accumulator)에 관한 연구^(6,7)도 진행되고 있다.

소형 회전압축기에서는 진동 소음의 크기가 심하지 않아 회전압축기 토출포트 근처에 공명기를 형성하지 않는 경우도 있지만, 중대형 가정용 회전압축기에서는 진동소음 정도가 심하여 대부분 토출포트 근처에 공명기 또는 사이렌서(silencer)역

할을 하는 공간을 마련한다⁽⁸⁾. 이때 형성된 공명기의 소음저감 효과를 해석적으로 규명하기에는 어려운 점이 많다. 가장 큰 난이점은 공명기를 통과하는 냉매의 물성치를 정확히 규명하기 어려운데, 그 이유는 냉매와 오일이 혼합되어 있어서 그 혼합비율을 예측하기가 쉽지않다. 또한 시간에 따라 냉매물성치도 변하므로 해석적으로 정확히 공명기 성능을 규명하기는 어려운 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 실험을 통해서 압축기 효율저감은 적으면서 소음저감 효과가 큰 최적의 공명기 형태와 설계값을 도출하고자 한다. 최적의 설계값을 구하기 위해 다구찌 방법을 이용하였다.

2. 공명기 형태 결정

토출포트 부근의 공간부족과 타 업체의 공명기 특허 등 여러 가지 이유 때문에 공명기 형태 결정은 창조적 사고를 요구한다. 회전압축기에 부착되는 공명기로서의 요구조건은 좁은 공간에서 소음저감 효과를 낼 수 있어야 하며, 모양은 타 회사에서 특허로 출원된 형태와는 상이하여야 한다.

* 해천대학 환경관리과

** LG전자 디지털어플라이언스연구소

또한 압축기 효율을 감소시키지 않는 것이어야 하고, 가공비 증가도 적어야 하며, 공정관리도 용이하여 대량생산에 문제가 없어야 한다. 이러한 요구조건에 맞는 10개의 공명기 형태를 도출한 후, 각 요구조건 항목별로 가중치를 주어 선택된 5개의 공명기 형태를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Resonator Type

No.	Type
1	Pipe Type
2	Ring Type
3	By Pass Type
4	Valve Type
5	Roller Type

위 5가지 형태에 대해서 각 2대씩 총 10대를 제작하여 압축기 효율 및 소음을 측정된 결과 링(Ring) 형태의 공명기가 효율저하도 미미하고 소음저감 효과도 가장 큰 것으로 판명되었다.

3. 링형 공명기 최적화

3.1 다구찌 실험기법

위에서 도출된 링형 공명기의 소음 및 성능을 고려한 최적 설계치를 제시하기 위해 인자별 영향 정도를 정확히 파악 할 수 있고, 실제 적용시 별도의 랜덤화 기법이 요구되지 않으므로 실험이 쉽고 경제적인 다구찌 기법을 사용하도록 한다.

다구찌 기법에서 제시하는 품질공학적 이론⁽¹⁾을 소개하면 다음과 같다. 측정값이 y 이고 목표치가 m 이라고 할 때 손실함수(loss function) $L(y)$ 를 m 에 대하여 테일러 급수전개(Taylor series expansion)하면 다음 식이 된다.

$$L(y) = L(m) - L'(m)(y - m) + \frac{L''(m)}{2}(y - m)^2 + \Delta \quad (1)$$

여기서, 측정값과 목표값 사이에 편차가 없는 경

우 $L(m) = L'(m) = 0$ 이 되어야 하므로, 식(1)에서 3차 이상의 항을 무시하면 손실함수는 간략하게 정의된다.

$$L(y) = k(y - m)^2 \quad (2)$$

이때 품질 특성값이 작으면 작을수록 좋은 특성을 망소특성(the smaller the better characteristics)이라 하며, 마모, 진동, 소음, 불량률 등을 예로서 들 수 있다. 망소특성인 경우 $m=0$ 이므로 손실함수는 측정값만의 함수로 된다.

연속적인 측정을 통하여 반복 측정 데이터 y_1, y_2, \dots, y_n 이 얻어진 경우에 기대값 $E(y^2)$ 의 추정값은 다음 식으로 표현된다.

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (3)$$

여기서 MSD(mean squared deviation)는 0으로부터의 평균제곱편차를 의미하며, 데시벨 값으로 나타나는 신호대 잡음비(S/N 비:signal-to-noise ratio)를 정의하는데 사용된다.

$$S/N = 10 \log_{10} [MSD] \quad (4)$$

3.2 주요인자 선정 및 실험

Fig.1에 링형 공명기의 소음 주요인자를 표시하였다. 인자선정은 과거 수 차례의 실험에서 얻은 경험적 지식을 바탕으로 하였다. 공명기의 목(neck)을 결정하는 인자로서 목부의 폭(D)과 길이를 실린더에서 공명기 체적에 해당되는 링부위 입구까지의 거리(G)로 설정하였으며, 공명기 체적을 결정하는 인자로서 링 폭(C), 길이(B), 깊이(E)를 인자로 하였다. 또한 제한된 공간 때문에 배인홀으로 침투하는 면적(F)이 발생되는데, 이 부위의 면적도 인자로 선정하였다.

인자간의 교호작용이 불 명확 할 때 유리한 L_{18} 직교배열표를 사용하기 위해 2수준 1인자와 3수준 7인자를 선정하려고 하였으나, 설정인자가 많으면

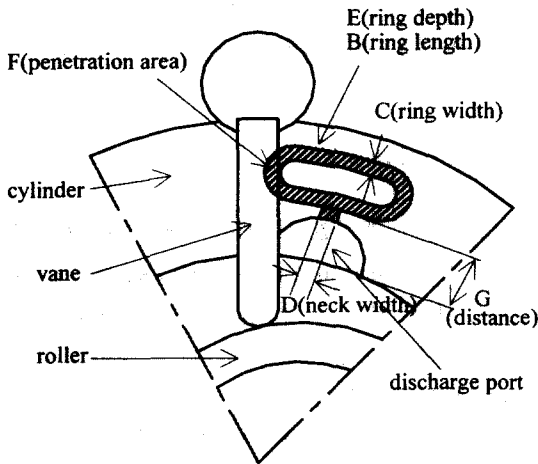


Fig.1 Major factor of ring type resonator

조립상의 오차수준과 가공상의 문제가 더 커질 것 같으므로 반드시 필요한 6인자만을 3수준으로 하고 나머지 2인자는 생략하였다. 설정된 인자와 수준을 조합하여 평가 사양을 결정한 뒤, 각 조합에 대하여 18case의 시료를 제작하여 실험하기로 한다. 본 실험에 적용된 인자와 그에 해당되는 직교 배열표는 Table 2에 나타내었다.

직교배열표에 나타난 순서가 반드시 실험의 순서는 아니며, 특정인자의 조합 특성에 따라 실험 결과의 방향성이 결정될 수도 있으므로 실험순서는 랜덤하게 실시한다.

본 실험의 목적은 소음뿐만 아니라 효율도 같이 평가해야 하므로 실험의 일관성을 유지하기 위해서 각각의 압축기에 대하여 에너지 효율을 먼저 측정 한 후, 무향실에서 소음을 측정하였다. 소음 측정은 칼로리메타에서 압축기 상태를 제어하여 입력과 냉력의 변동이 없는 안정상태가 30분 이상 지속될 때 측정하였다. 측정위치는 압축기 표면에서 30 cm 떨어진 위치에서 압축기 중간 높이부위이며, 각도는 압축기 상부에서 바라볼 때 중심에서 어큐뮬레이터 방향을 기준으로 반시계 방향으로 90° 되는 위치와 180° 되는 위치 두 곳에서 측정하였다. 압축기 효율과 소음측정장치를 간략히 Fig.2에 도시하였다.

Table 2 Experiments by using L₁₈ orthogonal array

Factor No.	A (-)	B (3level)	C (3level)	D (3level)	E (3level)	F (3level)	G (3level)	H (-)
# 1	-	40	1.5	1.5	1	5	6.1	-
# 2	-	40	1.8	2	1.2	7	6.6	-
# 3	-	40	2	2.5	1.5	10	7.1	-
# 4	-	50	1.5	1.5	1.2	7	7.1	-
# 5	-	50	1.8	2	1.5	10	6.1	-
# 6	-	50	2	2.5	1	5	6.6	-
# 7	-	60	1.5	2	1	10	6.6	-
# 8	-	60	1.8	2.5	1.2	5	7.1	-
# 9	-	60	2	1.5	1.5	7	6.1	-
# 10	-	40	1.5	2.5	1.5	7	6.6	-
# 11	-	40	1.8	1.5	1	10	7.1	-
# 12	-	40	2	2	1.2	5	6.1	-
# 13	-	50	1.5	2	1.5	5	7.1	-
# 14	-	50	1.8	2.5	1	7	6.1	-
# 15	-	50	2	1.5	1.2	10	6.6	-
# 16	-	60	1.5	2.5	1.2	10	6.1	-
# 17	-	60	1.8	1.5	1.5	5	6.6	-
# 18	-	60	2	2	1	7	7.1	-

3.3 실험 결과 및 분석

앞 절에서 서술한 방법대로 실험한 압축기 18대의 소음/효율의 결과와 정특성으로 변화시킨 S/N 비를 Table 3에 표현하였다.

인자별 소음 산포 분석을 통하여 각각의 인자에 의한 효과가 선형적으로 조합되었다고 가정했을 때

Fig.2 Experimental setup of performance and noise

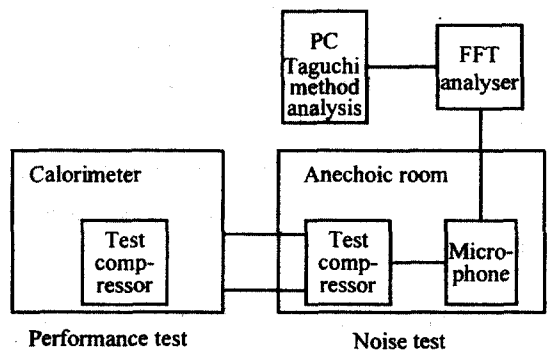


Table 3 Test results for noise and performance

Test No.	Noise		Performance	
	Max (relative evaluation)	Taguchi (S/N)	EER (relative evaluation)	Taguchi (S/N)
#1	3.4	-36.70	0.38	20.32
#2	1.5	-36.46	0.47	20.40
#3	1.7	-36.48	0.20	20.17
#4	2.4	-36.59	0.51	20.43
#5	2.4	-36.57	0.32	20.27
#6	1.5	-36.47	0.43	20.37
#7	3.2	-36.68	0.14	20.12
#8	0.9	-36.38	0.41	20.35
#9	2	-36.52	0.31	20.27
#10	1	-36.39	0.51	20.43
#11	5.4	-36.96	0.33	20.28
#12	1.4	-36.44	0.20	20.17
#13	3.1	-36.66	0.44	20.37
#14	0.6	-36.34	0.68	20.57
#15	0.9	-36.38	0.46	20.39
#16	1.5	-36.46	0.63	20.53
#17	3.5	-36.71	0.37	20.32
#18	2.1	-36.53	0.43	20.37

인자 수준별 소음 데이터의 수준 및 산포 경향을 파악하는 것이 가능하다. Fig.3 에 각 인자들의 수준별 소음값의 분포도를 도시하였다. 각 인자의 어느 수준이 소음값을 낮게 표시하는지 살펴보면, B 인자(ring length)의 2 수준, C 인자(ring width)의 3 수준, D 인자(neck width)의 3 수준, E 인자(ring depth)의 2 수준, F 인자(penetration area)의 2 수준이 소음이 작음을 알 수 있다. G 인자(distance)는 1 수준과 2 수준이 비슷한 값을 보이므로 어느 수준이 소음값이 낮다고 판정하기 곤란하다.

소음에 대한 각 인자간의 교호작용을 살펴보기 위해서 Table 4에 인자간 교호작용 분석표를 도시하였다. 표에 의하면 D인자와 F인자 사이의 교호작용은 매우 미미하므로 두 인자는 소음저감에 대하여 독립적인 효과를 나타낸다고 말할 수 있다. B인자의 경우에는 다른 모든 인자와의 교호작용이 심한 관계로 B인자 단독으로의 효과 파악이

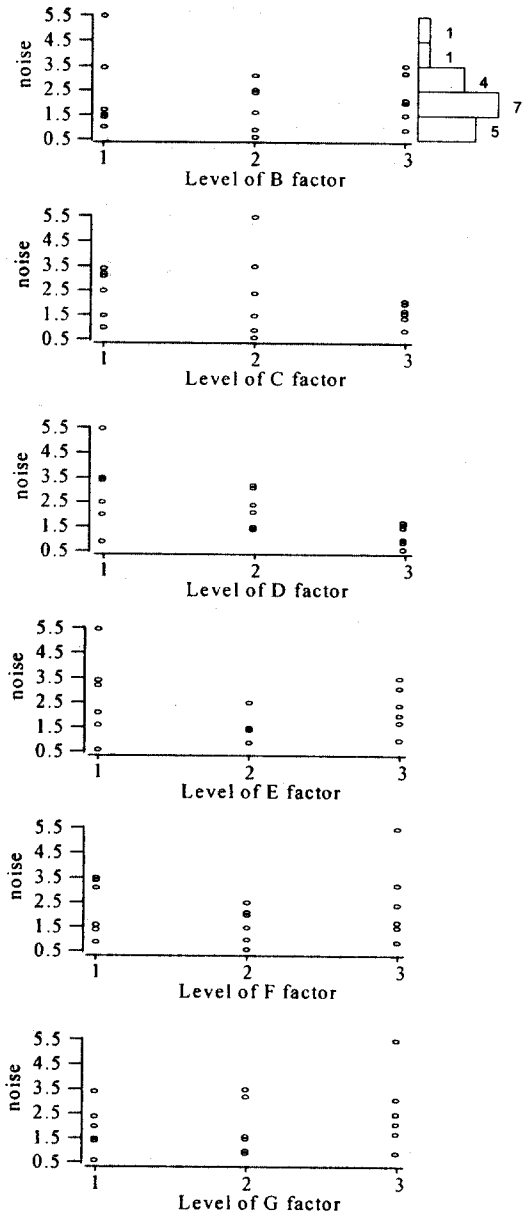


Fig.3 Noise distribution of the factors

어렵게 되었다. 차후의 실험에서는 명확한 효과 파악을 위해서 교호작용이 적은 인자의 선정이 필요함을 알 수 있다.

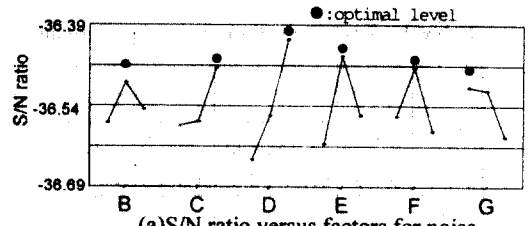
제어인자와 S/N 비와의 관계를 표현하는 그래프인 요인효과도는 다구찌 기법에서 각 인자들이

Table 4 Interaction analysis for noise using response surface methodology

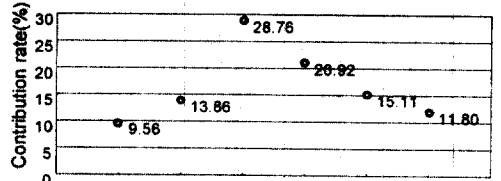
○Small Interaction △Middle Interaction ×Big interaction

B					
×	C				
×	×	D			
×	△	△	E		
×	×	○	×	F	
×	△	△	△	△	G

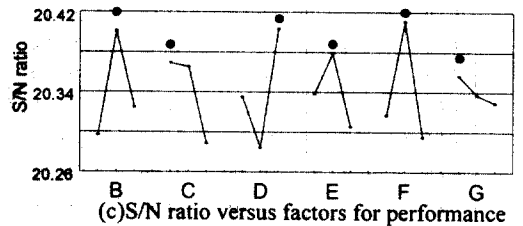
실험의 목적값에 영향을 미치는 기여도를 비교 분석하는 자료로 활용된다. 본 실험에서 구한 소음값과 효율값을 사용하여 각 인자들의 수준에 따른 S/N 비와 기여율을 다구찌 기법을 사용하여 Fig.4에 표시하였다. Fig.4에 (a)는 소음인자의 요인효과도이며, (b)는 소음에 대한 인자별 기여율, (c)는 효율 인자의 요인효과도이며, (d)는 효율에 대한 인자별 기여율이다. Fig.4에서 소음 최적값에 대한 각 인자의 수준과 효율 최적값에 대한 각 인자의 수준을 비교하여 볼 때 인자 C(ring width)를 제외하고 모두 같음을 알 수 있다. 소음에 대한 기여율로 판단하여 보면 소음에 영향을 미치는 주인자는 D 인자와 E 인자 이고, 그 외의 인자는 큰 영향을 나타내지 못함을 알 수 있다. 효율에 영향을 주는 주인자는 D, F, B 인자임을 효율과 기여율 그 래프에서 보이고 있으며, 다행히도 인자 C의 소음과 효율에 대한 기여율이 높지 않으므로 인자 C의 수준을 최소 소음값이 되는 3 수준이나, 최대 효율값인 1 수준으로 하더라도 소음과 효율에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 예상된다. 소음과 효율의 제어인자 수준에 따른 요인효과도를 바탕 7으로 각 인자의 최적조합으로 예측한 공정평균 및 이득(gain)값을 구할 수 있다. 이를 이용하여 각인자의 수준을 최저소음조합으로 소음을 예측하



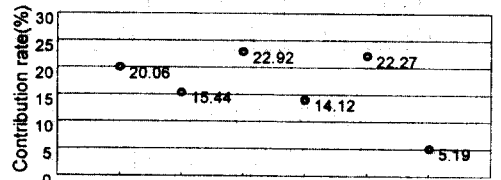
(a) S/N ratio versus factors for noise



(b) Contribution rate versus factors for noise



(c) S/N ratio versus factors for performance



(d) Contribution rate versus factors for performance

Fig. 4 S/N ratio or contribution rate versus design factors for the noise level and performance

여보면 기존대비 3.5dB 저감이 예상되고 효율은 EER 0.2 상승되는 것으로 예상된다. 또한 각인자의 수준을 최고효율조합으로 소음을 예측하여보면 기존대비 3dB 저감이 예상되고, 효율은 EER 0.3 상승되는 것으로 예측된다. 이상에서 구한 요인별 최적인자 수준으로 시료를 조립하여 실험한 결과 최저소음조합으로 제작된 시료는 기존대비 2.5dB의 소음저감을 보였으며, 효율도 0.15 상승함을 확인하였다. 예측값과 실험값이 차이를 보이는 이유는 시료 제작상의 오차와 측정 평가시의 오차가 합쳐져 발생한 것으로 판단된다.

4. 결 론

공조용 회전압축기의 소음제어에 큰 영향을 주는 공명기에 대해서 제한된 공간에 설치가 가능한 공명기 형태를 여러 가지로 도출한 후, 실험적 검증을 통해 소음저감 효과가 뛰어난 링형 모양의 공명기 형태를 제안하였다. 링형 공명기 설계에 영향을 주는 6개의 인자를 설정하여 각인자에 대해서 3수준으로 L_{18} 형의 직교배열표를 사용하여 다구찌기법으로 실험하였다. 그 결과 소음저감에 기여하는 주인자가 링형 공명기의 D인자(neck width)와 E인자(ring depth)라는 것을 파악하였으며, 효율저감이 없는 최저소음을 달성하는 인자수준을 구하였고, 그 수준으로 시료제작하여 소음과 효율을 확인한 결과 기존대비 효율저감은 없었고 소음은 2.5dB 감소하였다.

참고문헌

- (1) 박성근, 김진동, 1997, "회전형 압축기용 저소음 머플러 개발을 위한 다구찌 기법의 적용," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 B, pp. 91-95.
- (2) S. Akella, V.S. Anantapantula, K. Venkateswarlu, 1998, "Hermetic Compressor Muffler Design: Tuning of Mufflers for Noise Reduction," Proceedings of the 1998 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 349-354.
- (3) J.J. Nieter, H.J. Kim, 1998, "Internal Acoustics Modeling of a Rotary Compressor Discharge Manifold," Proceedings of the 1998 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 531-536.
- (4) Z. Liu, W. Soedel, 1994, "Discharge Gas Pulsations in a Variable Speed Compressor," Proceedings of the 1994 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 507-514.
- (5) Y.K. Kim, W. Soedel, 1996, "Theoretical Gas Pulsation in Discharge Passages of Rolling Piston Compressor," Proceedings of the 1996 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 611-626.
- (6) J.D. Kim, B.C. Lee, J.Y. Bae, 1998, "Noise Reduction of a Rotary Compressor Using

Structural Modification of the Accumulator," Proceedings of the 1998 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 355-360.

(7) W. Zhou, H.J. Kim, J. Kim, 1998, "Numerical Prediction of Radiated Noise Level from Suction Accumulators of Rotary Compressors," Proceedings of the 1998 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 373-378.

(8) K.L. Koai, T. Yang, J. Chen, 1996, "The Muffling Effect of Helmholtz Resonator Attachments to a Gas Flow Path," Proceedings of the 1996 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 793-798.