

# 다구찌 법을 이용한 에어컨용 회전압축기 공명기에 관한 실험적 연구 Experimental Analysis Using Taguchi Method on the Resonator in the Rotary Compressor for Air Conditioner

이 병 찬\* · 김 진 동\*

Byung-Chan Lee and Jin-Dong Kim

(2003년 3월 7일 접수 : 2003년 12월 9일 심사완료)

**Key Words** : Resonator(공명기), Rotary Compressor(회전압축기), Taguchi Method(다구찌 방법), Noise Reduction(소음저감)

## 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 진동 소음은 사용자의 귀를 매우 거슬리게 하므로 진동소음 저감에 대한 연구가 오래 전부터 활발히 논의되어 왔다. 이에 관한 연구 분야를 살펴보면 냉장고용 압축기와는 달리 셀의 구조변경에 의한 진동소음 저감보다는 셀 내부에 장착되어 있는 머플러 및 토출부의 가스 맥동에 관한 연구<sup>(1~9)</sup>가 주류를 이루고 있으며, 흡입쪽의 셀 외부에 달려있는 어큐뮬레이터(accumulator)에 관한 연구<sup>(10~12)</sup>와 소음원(noise source) 및 전달경로의 규명에 관한 연구<sup>(13~15)</sup>가 진행되었다. 진동을 줄이기 위해 밸런싱에 관한 연구<sup>(16, 17)</sup>도 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) 역할을 하는 공간을 마련한다.<sup>(18)</sup> 이때 형성된 공명기의 소음저감효과를 해석적으로 규명하기가 매우 어렵다. 가장 큰 난이점은 공명기를 통과하는 냉매의 물성치를 정확히 규명하기 어려운데, 그 이유는 냉매와 오일이 혼합되어 있어서 그 혼합비율을 예측하기가 쉽지 않다. 또한 시간에 따라 토출포트를 빠져나가는 냉매 속도, 온도 등이 다르므로 냉매물성치가 변하여 해석적으로 정확히 공명기 성능을 규명하기는 어려운 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 실험을 통하여 압축기 효율저감은 최소화하면서 소음저감효과가 큰 최적의 공명기 형태와 설계값을 도출하고자 한다. 최적의 설계치를 구하기 위해 다구찌 방법<sup>(1,19,20)</sup>을 이용하였다.

## 2. 공명기 형태 결정

토출포트 부근의 공간부족과 타 업체의 공명기특허 등 여러가지 이유 때문에 공명기 형태 결정은 창조적

† 책임저자 : 정희원, 충주대학교 환경공학과  
E-mail : bclee@mail.changju.ac.kr  
Tel : (043) 841-5358, Fax : (043) 841-5350  
\* 정희원, LG전자 디지털어플라이언스연구

사고를 요구한다. 회전압축기에 부착되는 공명기로서의 요구조건은 좁은 공간에서 소음저감 효과를 낼 수 있어야 하며, 모양은 타 회사에서 특허로 출원된 형태와는 상이하여야 한다.

또한 압축기 효율을 감소시키지 않는 것이어야 하고, 가공비 증가도 작아야 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.

아래 5가지 형태에 대해서 각 2대씩 총 10대를 제작하여 압축기 효율 및 소음을 측정하고 결과 링(ring) 형태의 공명기가 기존의 회전압축기에 비해서 0.5% 이내의 효율저하를 나타내었고, 소음저감 효과가 기존대비 2dB저감으로 나타나 압축기효율과 소음을 동시에 고려할 때, 효과가 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 영향정도를 정확히 파악 할 수 있고, 실제 적용시 별도의 랜덤화 기법이 요구되지 않으므로 실험이 쉽고 경제적인 다구찌 기법을 사용하도록 한다.

다구찌 기법에서 제시하는 품질공학적 이론<sup>(1)</sup>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.

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

Table 1 Resonator Type

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

여기서, 측정값과 목표값 사이에 편차가 없는 경우 손실은 0이고 또한 최소가 되므로  $L(m) = L'(m) = 0$ 이 된다. 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. 주요 인자는 링형 공명기를 구현하는데 필요한 기하학적 치수로서 현실적으로 변경 가능한 인자를 선정하였다. 수 차례의 실험에서 얻은 결과도 주요 인자 선정에 참고가 되었다. 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 베인힘으로 침투하는 면적 ( $F$ )이 발생되는데, 이 부위의 면적도 인자로 선정하였다.

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

상의 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 18 case의 시료를 제작하여 실험하기로 한다. 본 실험에 적용된 인자와 그에 해당되는 직교배열표는 Table 2에 나타내었다. 직교배열표에 나타난 순서가 반드시 실험의 순서는 아니며, 특정인자의 조합 특성에 따라 실험결과와 방향성이 결정될 수도 있으므로 실험순서는 랜덤하게 실시한다. 본 실험의 목적은 소음뿐만 아니라 효율도 같이 평가해야 하므로 실험의 일관성을 유지하기위해서 각각의 압축기에 대하여 에너지 효율을 먼저 측정한 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 중간높이 부위이며, 각도는

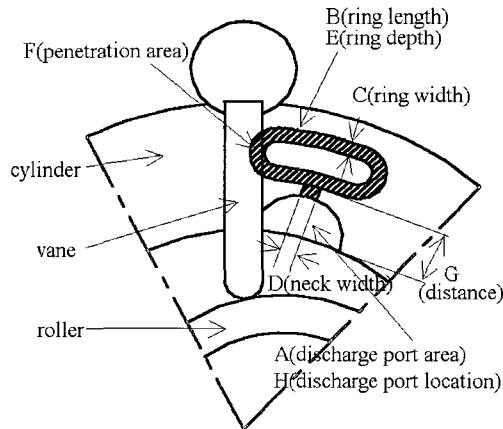


Fig. 1 Major factor of ring type resonator

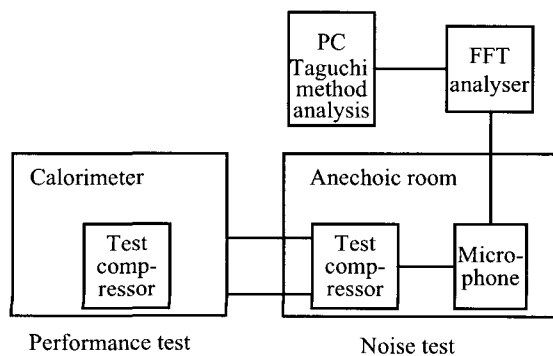


Fig. 2 Experimental setup of performance and noise

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.

### 3.3 실험 결과 및 분석

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

인자별 소음 산포 분석을 통하여 각각의 인자에 의한 효과가 선형적으로 조합되었다고 가정했을 때, 인자 수준별 소음 데이터의 수준 및 산포 경향을 파악하는 것이 가능하다. Fig. 3에 각 인자들의 수준별 소음값의 분포도를 도시하였다. 각 인자의 어느 수준이 소음값을 낮게 표시하는지 살펴보면, B인자(ring length)의 2수준, C인자(ring width)의 3수준, D인자(neck width)의 3수준, E인자(ring depth)의 2수준, F인자(penetration area)의 2수준이 소음이 작음을 알 수 있다. G인자(distance)는 1수준과 2수준이 비슷한 값을 보이므로 어느 수준이 소음값이 낮다고 판정하기가 곤란하다.

Table 2 Experiments by using  $L_{18}$  orthogonal array

Factor	A	B	C	D	E	F	G	H
No.	(-)	(3level)	(3level)	(3level)	(3level)	(3level)	(3level)	(-)
# 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	-

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

Table 3 Test results for noise and performance

Factor No.	A	B	C	D	E	F	G	H
	(-)	(3level)	(3level)	(3level)	(3level)	(3level)	(3level)	(-)
# 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	-

Table 4 Interaction analysis for noise using response surface methodology

○Small Interaction    △Middle Interaction    ×Big interaction

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

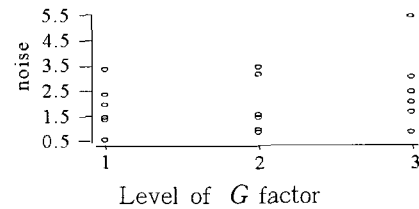
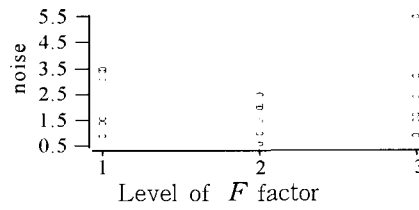
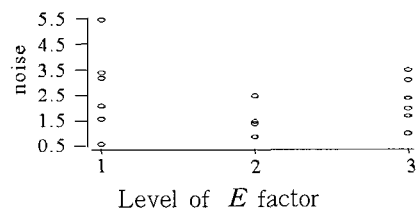
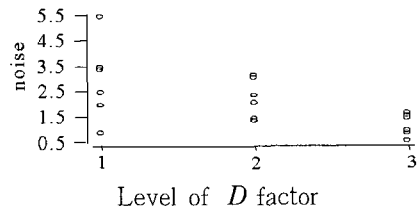
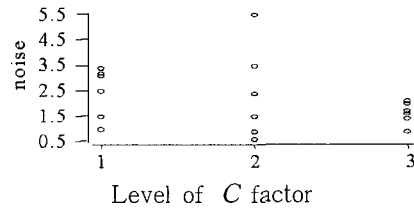
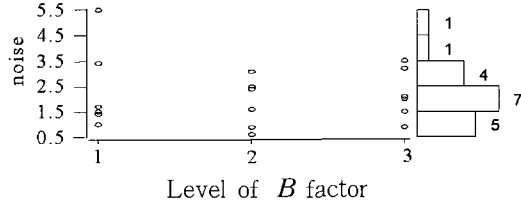


Fig. 3 Noise distribution of the factors

제어인자와 S/N비와의 관계를 표현하는 그래프인 요인효과도는 다구찌 기법에서 각 인자들이 실험의 목적값에 영향을 미치는 기여도를 비교분석하는 자료로 활용된다. 본 실험에서 구한 소음값과 효율치를 사용하여 각 인자들의 수준에 따른 S/N비와 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 불 대인자 C(ring width)를 제외하고 모두 같음을 알 수 있다. 소음에 대한 기여율로 판단하여 보면 소음에

영향을 미치는 주인자는 D인자와 E인자 이고, 그 외의 인자는 큰 영향을 나타내지 못함을 알 수 있다. 효율에 영향을 주는 주인자는 D, F, B 인자임을 효율과 기여율 그래프에서 보이고 있으며, 다행히도 인자 C의 소음과 효율에 대한 기여율이 높지 않으므로 인자 C의 수준을 최소 소음값이 되는 3수준이나, 최대 효율값인 1수준으로 하더라도 소음과 효율에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 예상된다. 소음과 효율의 제어인자 수준에 따른 요인효과도를 바탕으로 각 인자의 최적조합으로 예측한 공정평균 및 이득(gain)값을 구할 수 있다. 이를 이용하여 각인자의 수준을 최저소음조합으로 소음을 예측하여 보면 기존 대비 3.5 dB저감이 예상되고 효율은 EER 0.2상승되는 것으로 예상된다. 또한 각인자의 수준을 최고효율 조합으로 소음을 예측하여보면 기존대비 3 dB저감이 예상되고, 효율은 EER 0.3상승되는 것으로 예측된다. 이상에서 구한 요인별 최적인자 수준으로 시료를 조립하여 실험한 결과 최저소음조합으로 제작된 시료는 기존대비 2.5 dB의 소음저감을 보였으며, 효율도 0.15 상승함을 확인하였다. 기존의 기준 시료와 링형 공명기 적용 시료 중 각각 대표적인 1대의 소음레벨 스펙트럼을 Fig. 5에 도시하였다. 측정위치는 압축기 표면에서 30 cm 떨어진 위치에서 압축기 중간높이 부위이며, 각도는 압축기 상부에서 바라볼 때 중심에서 어큐뮬레이터 방향을 기준으로 반시계 방향으로 90° 되는 위치이다. 2~3 kHz 부근과 4.6 kHz이상의 고주파 부위의 소음 저감이 뚜렷함을 볼 수 있다. 예측값과 실험값이 차이를 보이는 이유는 시료제작상의 오차와 측정 평가시의 오차가 합쳐진 것과 인자간의 교호작용을 무시한 것으로 판단된다.

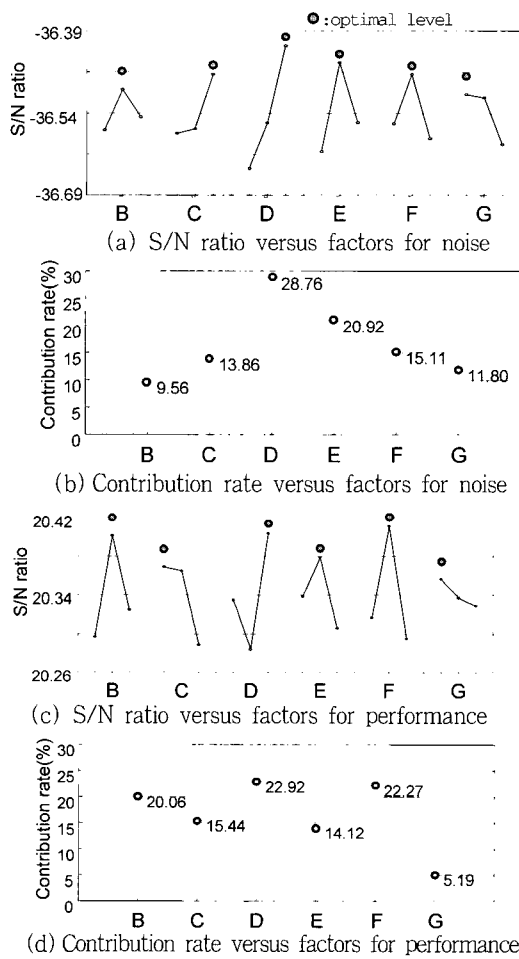


Fig. 4 S/N ratio or contribution rate versus design factors for the noise level and performance

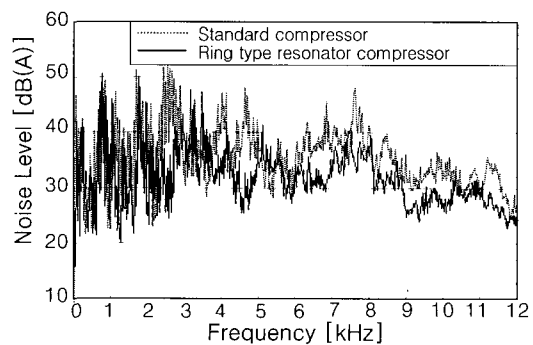


Fig. 5 Noise level for ring type resonator compressor and standard compressor

#### 4. 결 론

공조용 회전압축기의 소음제어에 큰 영향을 주는 공명기에 대해서 제한된 공간에 설치가 가능한 공명기 형태를 여러가지로 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  $D$ 인자(neck width)와  $E$ 인자(ring depth)라는 것을 파악하였으며, 효율저감이 없는 최저소음을 달성하는 인자수준을 구하였고, 그 수준으로 시료 제작하여 소음과 효율을 확인한 결과 기존대비 효율저감은 없었고 소음은 2.5 dB 감소하였다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 박성근, 김진동, 1997, "회전형 압축기용 소음 머플러 개발을 위한 다구찌 기법의 적용." 대한기계학회 춘계학술대회 논문집B, pp. 91~95.
- (2) Akella, S., Anantapantula, V. S. and Venkateswarlu, K., 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) Nieter, J. J. and Kim, H. J., 1998, "Internal Acoustics Modeling of a Rotary Compressor Discharge Manifold." Proceedings of the 1998 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 531~536.
- (4) Liu, Z. and Soedel, W., 1994, "Discharge Gas Pulsations in a Variable Speed Compressor." Proceedings of the 1994 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 507~514.
- (5) Kim, Y. K. and Soedel, W., 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) Suh, K. H., KIM, J. D., Lee, B. C. and Kim, Y. H., 2000, "The Analysis of the Discharge Muffler in the Rotary Compressors." Proceedings of the 2000 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 651~656.
- (7) Ma, Y. C. and Min, O. K., 2000, "On Study of Pressure Pulsation Using a Modified Helmholtz Method." Proceedings of the 2000 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 657~664.
- (8) Lee, J. H. and Kim, J., 2000, "Sound Transmission Through Cylindrical Shell of Hermetic Compressors." Proceedings of the 2000 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 933~940.
- (9) Hwang, I. S., Kwon, B. H. and Kim, C. W., 2000, "Low-frequency Band Noise of Rotary Compressor." Proceedings of the 2000 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 1027~1032.
- (10) Kim, J. D., Lee, B. C. and Bae, J. Y., 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.
- (11) Zhou, W., Kim, H. J. and Kim, J., 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.
- (12) 박상영, 이상현, 이수일, 이장무, 1999, "로터리 컴프레서 방사소음의 실험적 저감." 한국소음진동공학회논문집, 제 9 권, 제 1 호, pp. 189~195.
- (13) 서상호, 임금식, 이내영, 진심원, 1998, "에어컨 실외기의 소음원 규명 및 소음저감." 한국소음진동공학회논문집, Vol. 8, No. 6, pp. 1043~1052.
- (14) Kim, H. J., Cho, Y. M. and Chou, R., 2000, "Noise Source Identification in a Rotary Compressor: A Multidisciplinary Synergetic Approach." Proceedings of the 2000 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 579~586.

(15) Ahn, B. H., Kim, Y. J., Lee, S. J. and Yang, K. S., 2000, "A Study on Noise Identification of Compressor Based on 2 Dimensional Complex Sound Intensity," Proceedings of the 2000 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 595~602.

(16) Seve, F., Berlioz, A., Dufour, R., Charreyron, M., Peyaud, F. and Audouy, L., 2000, "On the Unbalance Response of a Rotary Compressor." Proceedings of the 2000 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 831~838.

(17) Seve, F., Berlioz, A., Dufour, R., Charreyron, M., Peyaud, F. and Audouy, L., 2000, "Balancing of a Variable Speed Rotary Compressor,"

Proceedings of the 2000 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 839~846.

(18) Koai, K. L., Yang, T. and Chen, J., 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.

(19) 오재웅, 조용구, 이규태, 2001, "다구찌법을 이용한 자동차 흡기계의 저소음화에 대한 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제 11 권, 제 2 호, pp. 234~240.

(20) 김명업, 이두호, 1999, "다구찌 직교배열을 이용한 승용차의 실내소음 분석 및 개선," 한국소음진동공학회논문집, 제 9 권, 제 5 호, pp. 998~1004.