

회전형 압축기용 머플러의 연구(1): 다구찌技法觀點에서

Study of Muffler for Rotary Compressor by Taguchi Method Viewpoint

박성근 (LG 전자 리빙시스템연구소)
S.K. Park (LG Electronics Inc. Living System Lab.)

Key Words : Optimal Design(最適設計), Muffler(消音器), Rotary Compressor(회전형 압축기), Noise Reduction(소음 저감), Taguchi Method(다구찌기법), The Smaller the better Characteristic(望小特性), Neural Network(신경회로망)

ABSTRACT : As the concern for a global energy conservation and environmental protection are increasing, it has been more important thing to correspond with CFC depletion. Alternate refrigerants have merit such as lower global warming effect, but also have demerits such as lower efficiency, miscibility, increasing noise and poor reliability problems. Then we have to develop more efficient, silent and robust compressors to satisfying world-wide demand. In this paper, parametric study on rotary compressor muffler for a room air-conditioner was carried out to investigate the effect of important design variables on noise by using Taguchi robust design method with signal-to-noise (S/N) ratio. Taguchi method seems to be helpful for finding optimum value of design variables for noise level. We also applied neural network to find optimal value of design variables.

1. 서론

최근 제품 및 공정의 설계 개선 및 성능 향상을 위한 획기적인 방법으로써 다구찌 품질공학 기법이 국내에서도 관심을 끌고있으며 논의의 대상이 되고있다. 기존의 실험계획법은 현장에서 근무하는 엔지니어들이 습득하기에 어려웠을 뿐만 아니라 많은 시간 및 경비가 요구되었고, 제품간 또는 시간적, 환경적 오차 요인에 의한 잡음인자(noise parameter)를 배제한 채 실험이 행해지고 있는 대부분의 산업현장에서는 실험 결과의 신빙성 및 재현성에 대한 의심을 가지게 되었다. 또한 복잡한 기계 요소에 대해 기존의 실험계획법을 채택하는 경우 설계변수가 많아지게 되어 다양한 변수를 동시에 고려하여 최적화 가능한 방법을 찾아내는 것은 거의 불가능하였다. 이러한 기존의 실험계획법에 의한 최적설계 방식의 단점을 보완하여 제품의 성능 변동을 최소화하는 것이 필요하게 됨에 따라 잡음인자의 영향이 존재하는 환경에서도 재현성이 뛰어난 다구찌기법을 적극적으로 활용하려고 하는 동향이 증가하고 있다.

다구찌기법을 적용하여 냉장고용 왕복동 압축기의 에너지효율(EER) 및 소음과 밀접한 영향관계를 가지는 압축기 헤드밸브계(Head-valve system)의 설계 과정을 최적화한 사례가 있으며⁽¹⁾, 이로부터 다구찌기법을 통한 저소음 설계 및 시리즈전개 개

발에도 도움을 줄 수 있음을 보여주었다.

현재, 공조기용 회전형 압축기에 있어서는 지구 오존층의 파괴와 온실효과를 방지하기 위해서 기존의 냉매를 폐기하려는 움직임이 급박한 상황이다. 기존의 공조용 냉매(R22)로부터 신냉매(R410A 또는 R407C)로의 변경은 지구 온난화계수와 오존층 파괴지수 면에서 환경문제에는 도움이 되나, 냉동용 오일과의 상용성 문제 및 이로 인한 신뢰성 저감, 냉매 특성 변화로 인한 효율 저감 및 소음 증가 문제로 기술력이 열악한 국내 기업에는 상당한 원가상승 문제는 물론, 단시간에 대응하는데 많은 어려움을 야기시켰다. 따라서, 보다 효율이 높으면서 동시에 낮은 소음이 발생하는 압축기를 단시간에 개발하여 고객의 요구 사항인 저소음 에어컨을 개발할 필요성이 증대되고 있다.

본 논문에서는 창문형 에어컨에 장착되는 회전형 압축기의 소음 저감을 위하여, 소음 저감 성능에 주목한 머플러의 최적설계에 다구찌 품질공학 기법을 적용함으로써 그 효과를 실험적으로 확인하였다. 또한, 설계 인자 변경에 따른 소음저감 특성 및 유효 주파수대역을 파악하여 저소음 설계에 활용하는 것을 목적으로 하였다.

2. 다구찌기법

본 논문에 적용된 다구찌기법은 기존의 실험계획법과 비교하여 다음과 같은 특징을 가진다.

기존의 실험계획법이 인자의 평균응답에 관한 수학적 모형화가 목적인 반면, 다구찌기법은 제품 성능의 변동을 최소화하면서 경제적인 면을 강조한다. 또한 기존의 F분포를 이용한 유의성 실험과는 달리 총변동(total sum of square)를 각 인자의 기여도로 분해하여 나타내므로 인자별 영향 정도를 정확히 파악할 수 있으며, 향상된 품질을 손실함수의 품질손실이 감소하는 것으로 입증하여 이로부터 허용차도 구할 수 있다. 더우기 실제 적용 시 별도의 랜덤화 기법이 요구되지 않으므로 실험이 훨씬 쉽고 경제적이다.

다구찌기법에서 제시하는 품질공학적 이론은 다음과 같다. 일반적으로 측정값이 y 이고 목표치가 m 이라고 할 때 손실함수(loss function) $L(y)$ 를 m 에 대하여 테일러 급수전개(Taylor series expansion)하면 다음과 같은 식을 얻게 된다.

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

여기서, 측정값과 목표값 사이에 편차가 없는 경우 $L(m)=L'(m)=0$ 이 되어야 하므로, 식(1)에서 3차 이상의 항을 무시하면 손실함수는 다음과 같이 간략하게 정의할 수 있다.

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

이때 품질 특성값이 작으면 작을수록 좋은 특성을 망소특성(the smaller the better characteristics)이라 하며, 대표적인 특성으로는 마모, 진동, 소음, 불량률 등을 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 MSD는 0으로부터의 평균제곱편차(mean squared deviation)을 의미하며, 데시벨 값으로 나타나는 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio; S/N 비)를 정의하는데 사용된다.

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

망소특성인 경우 S/N 비 값을 크게 하는 것이 좋은 것으로 설정하기 위하여 다음과 같은 식으로

S/N 비(η)를 정의한다⁽²⁾.

$$\eta = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (5)$$

3. 압축기용 머플러의 설계인자

그림1에 소음저감에 이용된 머플러와 제어인자를 나타내었다. 8개의 제어인자의 선정은 경험있는 엔지니어에 의해 수행되었으며, 그림1에 나타난 바와 같이 베어링 머플러의 주요 설계 사양을 고려하여 소음 특성에 많은 영향을 주는 머플러 유로의 목부 단면적과 머플러의 출구 크기에 중점을 두고 선정하였다. 또한, 설계 변경이 비교적 용이하면서 소음에 영향을 줄 수 있는 개스킷이나 머플러커버의 두께 및 표면상태를 함께 고려하였다.

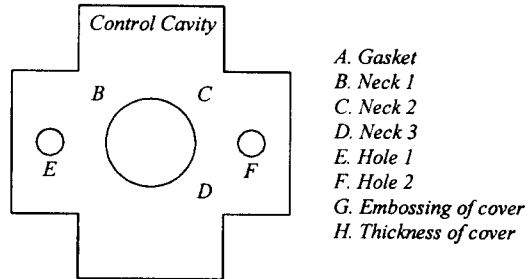


Fig.1 Simplified Geometry of test muffler and effective parameters for noise reduction

4. 직교배열표를 활용한 실험

다구찌기법을 활용한 실험에 이용할 수 있는 직교배열표는 2수준, 3수준계 및 혼합수준계가 있으나 인자간의 교호작용을 정확히 모를 때에는 L18 직교배열표를 이용하는 것이 유리하며, 실제 교호작용을 정확하게 추출한다고 해도 최적설계시에는 많은 도움이 안된다는 것이 다구찌기법의 입장이다. L18 직교배열표를 이용함으로써 4,374 ($2^4 \times 3^3$)회의 조합실험의 효과를 18번의 경우의 수에 해당하는 실험만으로 확인해 볼 수 있고, 동시에 재현성을 확인할 수 있다는 장점이 있다.

앞에서 고려한 8개의 소음 관련 제어인자를 각 적용수준에 따라 분류하여 18번의 직교조합 실험에 사용되는 머플러의 설계 사양을 결정하게 되며, 본 실험에 사용된 직교배열표는 Table 1과 같다. 실험을 실시할때 직교배열표에 의해 정해진 순서가 반드시 실험 순서와 일치해야 하는 것은 아니

며, 특정인자의 조합 특성에 따라 실험 결과의 방향성이 결정되는 경우도 있으므로 정해진 순서와는 무관하게 랜덤한 실험을 하는 방법이 유효하다고 볼 수 있다.

Table 1. Decision of order of Experiments by using L_{18} orthogonal array

Factor Exp.	A (2 level)	B (3 level)	C (3 level)	D (3 level)	E (3 level)	F (3 level)	G (2 level)	H (3 level)
1	Spring	8	6.6	13	4	4	X	1.2
2	Spring	8	3.3	7	7	7	X	3.2
3	Spring	8	0	1	10	10	0	5.2
4	Spring	4	6.6	13	7	7	0	5.2
5	Spring	4	3.3	7	10	10	X	1.2
6	Spring	4	0	1	4	4	X	3.2
7	Spring	0	6.6	7	4	10	X	5.2
8	Spring	0	3.3	1	7	4	0	1.2
9	Spring	0	0	13	10	7	X	3.2
10	O-ring	8	6.6	1	10	7	X	1.2
11	O-ring	8	3.3	13	4	10	0	3.2
12	O-ring	8	0	7	7	4	X	5.2
13	O-ring	4	6.6	7	10	4	0	3.2
14	O-ring	4	3.3	1	4	7	X	5.2
15	O-ring	4	0	13	7	10	X	1.2
16	O-ring	0	6.6	1	7	10	X	3.2
17	O-ring	0	3.3	13	10	4	X	5.2
18	O-ring	0	0	7	4	7	0	1.2

제어인자의 변경에 따라 각 머플러를 제작하고 실험용 압축기 지그를 이용하여 머플러를 바꾸어 가면서 장착한 상태에서 소음 평가 시험을 실시하였다. 실험에 사용된 장치 구성도를 그림 2에 나타내었다. 압축기의 운전조건을 일정하게 유지하기 위하여 정밀한 온도 및 압력 제어기를 갖춘 열량계(calorimeter)를 사용하였다.

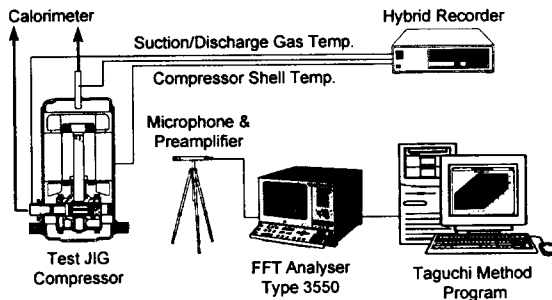


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

5. 다구찌기법에 의한 실험결과 및 분석

산포를 유발시키는 오차요인을 관리하지 않고 오차의 원인을 최소화하여 생산 및 제조 적용 단계에서의 안정적 재현성을 확보하기 위해 동특성(dynamic characteristic)⁽⁴⁾⁽⁵⁾을 이용하면 설계변수의 최적조건을 찾는 데 유리하지만 신모델 개발 시간의 단축 및 실무 적용상 편의성을 위해 비교적 시

간적인 면에서 유리한 정특성을 사용하였으며, 특성값은 제어인자를 변경시킬 때 압축기에서 측정된 소음 신호의 음압값(sound pressure level)을 그대로 이용하였다.

Table 2에 18 번의 실험을 통하여 음압값으로 측정된 소음량과 함께 정특성으로 변화시킨 S/N 비를 나타내었다.

Table 2. Sound pressure level obtained from 18 tests and corresponding S/N ratio

No. of Trial	SPL (dB[A])	S/N Ratio	No. of Trial	SPL (dB[A])	S/N Ratio	No. of Trial	SPL (dB[A])	S/N Ratio
1	61.3	-35.75	7	59.4	-35.48	13	60.9	-35.69
2	60.9	-35.69	8	60.7	-35.66	14	60.9	-35.69
3	60.9	-35.69	9	59.2	-35.45	15	61.2	-35.74
4	60.5	-35.64	10	61.5	-35.78	16	60.6	-35.65
5	61.9	-35.83	11	59.6	-35.50	17	59.9	-35.55
6	60.9	-35.69	12	60.3	-35.61	18	61.1	-35.72

다구찌기법에 제어인자와 S/N 비와의 관계를 표현하는 그래프를 요인효과도라 하며, 각 제어인자의 소음에 미치는 기여도를 비교·평가하는 지표로 사용된다. 실험을 통하여 얻어진 방사소음의 총합값에 대하여 다구찌기법을 적용하여 각 제어인자의 수준에 따라 얻어진 S/N 비를 Fig. 3에 나타내었다. Fig.3 으로부터 소음의 총합값에 대한 기여도가 큰 인자는 B 인자(neck 1)의 3 수준, D 인자(neck 3)의 1 수준, H 인자(thickness of cover)의 3 수준으로 판정할 수 있다.

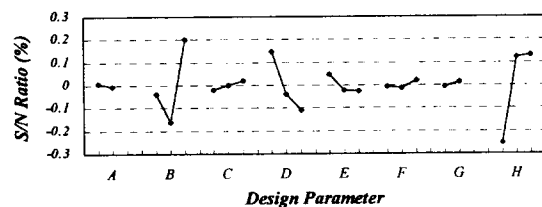


Fig. 3 S/N ratio versus design parameters for the overall level of radiated noise from compressor

Fig.3 에서 제어인자 변경에 따른 소음 저감 특성이 우수한 인자 B는 다소의 교호작용이 존재하는 것을 볼 수 있으나, 3 수준 인자의 값이 다른 수준에 비해 무시할 수 없는 정도이기 때문에 유효한 인자로 판정할 수 있다. 그 외의 인자에 의한 효과는 영향이 미미한 것으로 볼 수 있다. 각 제어인자의 수준별 S/N 비가 선형성을 유지하므로 전체적인 요인효과도의 경향으로부터 판단할 때 본

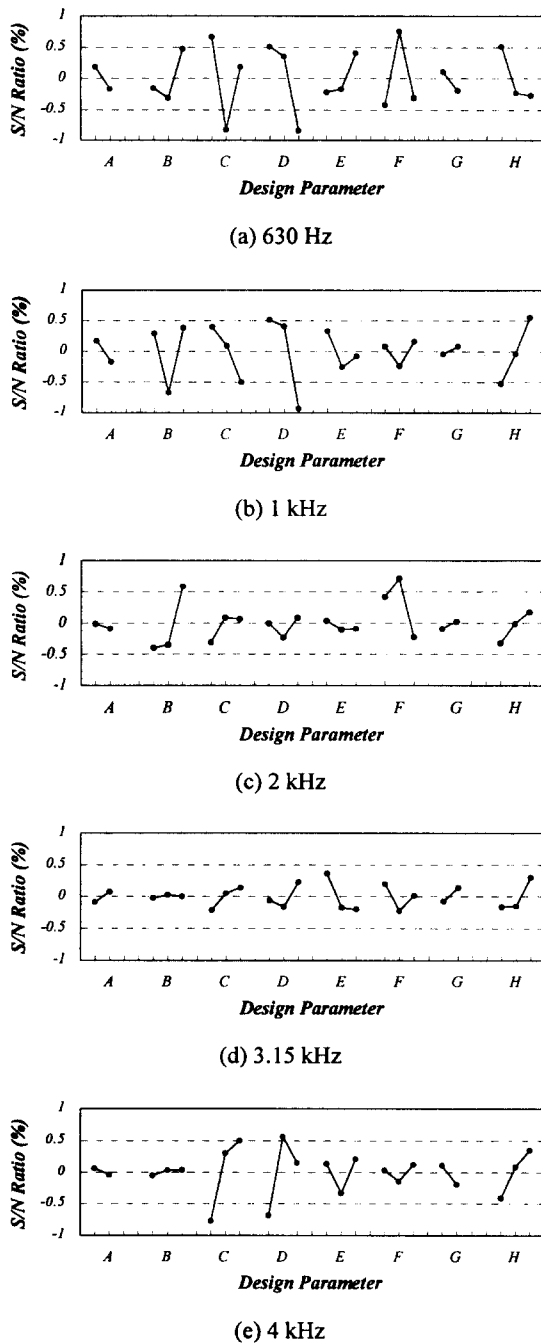


Fig.4 S/N ratio versus design parameters for 1/3 octave band level of radiated noise at various center frequencies

실험의 재현성은 보장할 수 있다.

유효 주파수대역을 파악하여 저소음 설계에 활용하기 위하여 1/3 옥타브 밴드의 주요 중심주파수에서 얻어진 소음값에 대하여 다구찌기법을 적

용하여 각 제어인자의 수준에 따라 요인효과도를 Fig. 4에 나타내었으며, 이를 바탕으로 예측한 공정평균 및 이득(gain)값을 Table 3에 나타내었다. 여기서 최적인자의 조합에 의한 이득값이 양(+)의 값을 가지는 경우 재설계에 의한 소음저감을 기대할 수 있으며, 음(-)의 값을 가지는 경우에는 현재의 설계가 어느 정도 최적조건에 근접하기 때문에 설계변경에 의해 추가적 개선효과를 기대할 수 없는 것을 의미한다. 본 Table 3의 결과로부터 630 Hz와 2 kHz 대역의 소음 성분은 재설계에 의해 저감되기 어렵다고 볼 수 있으며, 1 kHz, 3.15 kHz 및 4 kHz 대역의 소음 성분은 최적인자의 조합에 따라 상당량 개선될 수 있음을 나타내고 있다.

이와 같은 결과를 활용하면 총합값 및 주파수별 소음 저감성능에 주목하여 최적 제어인자를 결정할 수 있으며, 머플러의 소음 저감 목표주파수를 조정(tuning)하는데 유용한 자료를 제공할 수 있다.

Table 3. Predicted value of S/N ratio and gain according to optimum level of factors

Frequency	Condition	Level of Factors	Predicted Value of η (S/N)	Gain
Overall	Optimum	A1B3C3D1E1F3G2H3	-35.4459	0.055
	Current	A1B3C2D1E2F2G1H2	-35.5011	
630 Hz	Optimum	A1B3C1D1E1F3G1H1	-33.2806	-0.146
	Current	A1B3C2D1E2F2G1H2	-33.1346	
1 kHz	Optimum	A1B3C1D1E1F3G2H3	-33.3304	0.369
	Current	A1B3C2D1E2F2G1H2	-33.6996	
2 kHz	Optimum	A1B3C2D3E1F2G2H3	-33.6117	-0.177
	Current	A1B3C2D1E2F2G1H2	-33.4346	
3.15 kHz	Optimum	A2B2C3D3E1F1G2H3	-33.1939	0.509
	Current	A1B3C2D1E2F2G1H2	-33.7026	
4 kHz	Optimum	A1B3C3D2E3F3G1H3	-33.5817	0.304
	Current	A1B3C2D1E2F2G1H2	-33.8860	

소음의 총합값에 대하여 다구찌기법에 의한 최적조건을 설정하여 예측된 이득값으로부터 소음 저감값을 예측하면 1.3 dB(A) 정도이나 최적조건 실험결과 2 dB(A) 저감됨을 확인할 수 있었다.

6. 신경회로망(Neural Network)에 의한 최적설계 인자 분석

신경회로망은 다수의 실험인자(즉, 설계인자)와 실험을 하여 얻은 각각의 결과의 상호관계를 추론하고, 최종적으로 다구찌기법의 최적인자수준과 비교하기 위해 채용하였다. 본 연구에서는 다구찌기법에서 사용하였던 총 8개의 설계인자를 이용하여, 직교배열표에 의거하여 얻어진 실험결과를 신경회로망을 이용하여 다차원의 data를 모델링하고, 그 결과를 이용하여 소음에 크게 기여하고 있는 인자의 영향을 파악하여 보았다. 직교배열표에 따라 실험에 적용되는 설계인자의 조합과 그때의 소음이 학습패턴이 되고, 신경망은 이를 미리 정해준 학습조건에 따라 허용된 오차범위내에 그 학습오차가 접근할 때까지 반복적으로 학습하고, 자기자신을 학습패턴에 맞게 적용시켜 나간다. 학습오차란, 신경망이 제시된 학습패턴에 대해 제시하는 출력이 가지는 학습패턴과의 차이를 말한다. 이 학습오차가 매우 적은 값으로 수렴되었을 때, 우리는 학습이 끝난 것으로 간주한다. 일반적으로 신경망은 Fig.5에 나타난 바와 같이 최소한 하나의 입력층(input layer)과 하나의 출력층(output layer)을 가지며, 또한 모델링하고자 하는 학습패턴에 따라 은닉층(hidden layer)을 사용한다. 각각의 층에는 미리 결정된 수만큼의 neuron이 놓여져 있다. 은닉층의 사용여부, 그리고 사용되는 은닉층의 수에 따라 신경망이 구현할 수 있는 출력의 형태가 달라진다. 인자의 수가 많아지고 소음이 각각의 인자에 대해 단조증가 혹은 단조감소하는 성격의 것이 아니라면 반드시 은닉층을 사용해야 한다. 본 연구에서는 비교적 복잡한 경우에 대하여 문제를 해결할 수 있도록, 두개의 은닉층을 가지는 신경망을 사용하였다. 이때 각층(layer)에 놓인 각 neuron 간의 연결강도(synaptic weights)결정에 있어서는 가장 보편적인 back-propagation method를 채택하였다. 한편 수렴의 고속화를 위해 momentum term을 첨가하여, 학습오차정도에 따라 momentum을 증가/감소시키는 방법을 사용하였다. 은닉층 1에서의 뉴런의 수는 4-6개, 은닉층 2에서의 뉴런의 수는 3-5개로 총 6개의 조합이 발생토록 하였다(Table 4 참조). 이상의 6가지의 경우에 대해 최소소음을 낼 것으로 예측되는 설계점의 설계값을 정리하였는데, 그 결과 첫번째 설계인자의 대부분의 경우와 case F의 여섯번째 설계인자의 경우에 대해서 상이한 추천치를 제시하였다. 그러나, 이 정도의 수준이라면 양호한 경우라 할 수 있다. 다시말해 추론의 결과에 대해 충분한 신뢰성이 있

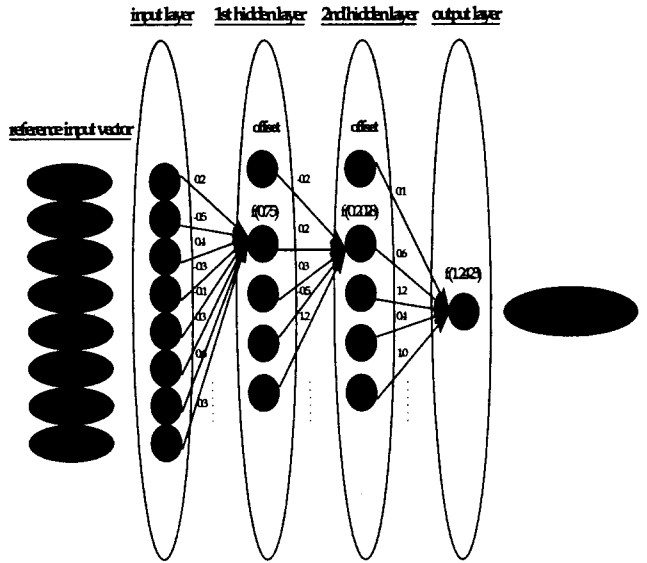


Fig.5 Structure of 4-layer neural network model

Table 4. Optimal Design by Neural network

No. of neurons	case A	case B	case C	case D	case E	case F
in Hidden Layer 1	4	4	5	5	6	6
in Hidden Layer 2	3	4	4	5	5	6
Learning Coefficient	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Momentum Coefficient	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

No. of Learning	1900	4000	4500	6000	5000	8200
Error of Learning	0.104742	0.119857	0.112582	0.101157	0.110623	0.101217

Optimal Design by Neural Network System						
A						
B	0	0	0	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0
D	13	13	13	13	13	13
E	4	4	4	4	4	4
F	4	4	4	4	4	
G	1	1	1	1	1	1
H	52	52	52	52	52	52

다고 말할 수 있다. 첫번째인자에 대해서도 아주 조심스럽게 그 설계치가 1이라고 말할 수 있는데, 그것은 최소소음을 제시하는 설계안의 경우 case A-F의 모든 경우에 대해 0이라고 답했기 때문이다. 그러나, 각각의 경우에 대해 첫번째인자와 같이 서로 불일치하는 설계안을 제시하는 경우, 대개는 소음에 미치는 기여도가 매우 낮은 경우이므로 이때는 가격, 조립성등과 같은 부수적사항을 고려하여 결정하는 것이 적절한 대책이다. 또한 A인자에 대해서는 다구찌직교배열표에서는 2인자이나 신경회로망에서는 3인자수준을 이용하였기에 불일치가 생긴 것이며, 더욱 연구를 해야 할

것이다. 수렴은 전체학습패턴에 대해 신경망이 가지는 상대오차의 합이 0.1%가 되는 것으로 하였다. 수렴에 지대한 영향을 미치는 학습계수와모멘텀계수는 어느 범위내에서는 그 값이 증가하며 수렴이 가속화한다는 특징이 있으나 연결가중치의 변화를 지나치게 유도하는 경향이 있어서 기본적으로 모두 0.2로 통일하였다. 다만 case A에 대해서만은 수렴이 유난히 더딘 관계로 모멘텀계수를 0.4까지 올려 주었다. Case A-F까지의 경우를 다구찌기법의 요인효과도(Fig.3)과 비교한 결과, 거의 모든 인자의 수준이 일치하였다.

결론

다구찌품질공학 기법을 적용하여 창문형 에어컨에 장착되는 머플러의 저소음화에 주목한 최적설계를 수행하였다. 이로부터 압축기 머플러에 있어 유로 목부의 형상과 토출구 크기 및 머플러 커버의 최적 제어인자를 선정하여 설계변경을 통한 총합값 및 목적하는 주파수에서의 소음 저감 성능을 향상시키는 것이 가능함을 알았고, 실제로 정특성의 최적인자 도출을 통하여 총합값으로 2dBA의 소음저감을 하였다. 이와 같은 방법으로 각 주파수대역에 유효한 설계인자를 파악함으로써 현재의 소음저감 성능을 향상시키거나 향후의 신기종에 적용되는 저소음 머플러를 설계하는데 있어 활용될 수 있을 것이며, 신경회로망 이론으로부터 도출된 최적인자수준과 비교하여 볼 때, 거의 그 수준이 일치함을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1)Park. S. K. et al., 1994, "Application of Quality Engineering for Energy Efficiency of Compressors", pp.199-211, *The 12th Annual Taguchi Symposium, Rochester, New York*
- (2)Park. S. K. et al., 1996, "Minimization of Friction Loss of Compressor by using Taguchi Robust Design Method", pp.473-484, *2nd Annual International Total Product Development Symposium, LA*
- (3)Park. S. K. et al., 1996, "The Optimization of Detergent Separating System for Washing Machine", pp. 55-61, *Journal of Quality Engineering Forum, Tokyo, JAPAN*
- (4)Park. S. K. et al., 1997, "Muffler Design for Rotary Compressor by using Taguchi Robust Design Method", pp. 653-662, *3rd Annual International Total Product*

Development Symposium, Detroit, MI

- (5)Taguchi.G., 1991, "Taguchi on Robust Technology Development Bringing Quality Engineering (QE) Upstream", *ASME Press, New York*.
- (6)Taguchi. G., 1987, "Introduction to Quality Engineering", *American Supplier Institute Inc., Michigan*. Phadke. M. S., 1989, "Quality Engineering Using Robust Design", *Prentice Hall*.
- (7)Mori. T., 1994, "Taguchi Techniques for Image and Pattern Developing Technology", *Prentice Hall*.
- (8)안철오, 1998, "Neural Network를 이용한 MWO용 축류팬 연구", 유체기계공업학회 발표논문
- (9)박 성근, 김 진동, 1997, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집