

# 덕트 회전체에서 발생하는 소음저감에 대한 연구

## Study on the noise reduction occurred to rotation in duct

박홍을\* · 김유재\*\* · 박성관\*\*

Hongul Park, Youjae Kim, Sungkwan Park

Key Words : SSR(Solid State Relay), NR(Natural Rubber), ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)

### ABSTRACT

Noise reduction has become a major issue of the duct air-conditioners. This paper describes the reduction of noise and vibration of rotational slim duct system. The design of slim duct system is the most important point of noise reduction in terms of the motor of 2f line noise, resonance noise between forced frequency and natural frequency of Sirocco fan, unbalance noise of motor axis and the noise induced refrigerant. The noise of duct system is mainly measured from diffuser and bottom of duct. The optimal design was implemented after measuring the effect of noise and vibration in each part which is composed of duct system.

In this paper, experimental results show that the main elements in air-conditioner duct design. These elements are anti-vibration rubber of motor, axis length of motor, rubber coupler, materials of sirocco fan and control method of motor which are the most vital factors in reducing noise.

### 1. 서론

건물의 냉난방 시설을 위하여 덕트 형태의 냉 난방기 수요가 증가하고 있다. 따라서, 덕트 형태의 공조기는 천정에 매달아서, 흡입 출구 덕트를 사용하여 사무실 공간에 냉 온풍을 제공한다. 본 논문에서는 천장의 높이 공간이 협소한 곳에서도 사용할 수 있고, 슬림형 덕트(Slim duct)의 구조에서 발생할 수 있는 모터 회전체의 불균형 및 모터의 진동에 의한 발생할 수 있는 이상소음 발생을 저감 할 수 있는 방안을 모색하였다. 덕트 제품의 소음을 평가할 때 토출구 끝단 및 덕트 본체 하부에서의 소음을 측정하며, 이때 모터의 발생하는 자기음, 팬의 고유진동수와 가진 주파수의 일치에 다른 공진음, 모터 회전축 불균형에 의해 발생하는 소음, 냉매 순환에 의한 냉매음 등을 제거하는 것이 덕트 설계에 있어서 중요한 요소이다.

에어컨 실내 덕트 구성품은 실내의 열 교환을 하는 증발기(Evaporation), 냉매를 팽창시키는 캐필러리 튜브(Capillary tube), 모터, 시로코 팬(Sirocco fan)크게 네 가지로 나눌 수 있다.

그 중에서도 소음을 유발하는 시키는 요인은 모터 회전체와 관련 있는 설계 인자, 즉 모터, 모터 축 길이에 따른 불평형, 모터 방진고무, 시로코 팬이 주요 부품이다. 실내 냉난방 능력 및 전원 주파수에 따라서 모터용량을 선정하는데, 모터 탭(Tap) 제어 방식은 덕트 용량에 맞는 풍량을 만들기 위해 강, 중, 약을 조절하는데 있어서 많은 종류의 모터가 필요로 한다. 이러한 단점을 보완하는 방법으로 모터의 제어방식을 SSR(Solid state relay) 제어 방식으로 하였을 경우, 팬의 회전수 조절을 가변하기 쉬운 장점이 있다. 그러나, 입력 전원 전류에 불연속 구간이 발생하므로 모터의 진동은 TAP 제어 방식에 비하여 소음진동 측면에서 불리하다. 이에 따라서, 모터 진동을 흡수 및 절연할 수 있는 방진고무 설계가 중요하다. 또한 덕트를 천정고가 낮은 곳에서도 설치가능 한 구조로 만들기 위해서는 덕트 높이를 줄이고, 폭은 길게 설계하였다. 이에 따라서, 모터 축 길이도 1299mm 정도의 길이를 요구하게 된다. 모터 축 길이가 길면 축의 동심도, 직진도를 0.05mm 오차 범위로 가공하기 위해 정밀도가

\* 삼성전자 주식회사 공조개발팀

hongul.park@samsung.com

\*\* 삼성전자 주식회사 공조개발팀

요구 되어 진다. 모터 축 가공에 있어 비용 증가 및 기술적 고난위도가 요구되어, 축의 길이를 줄이면서 축 사이에 고무 커플러 사용함으로써 해결방안을 찾을 수 있다. 그러나 축 길이 가공 및 고무 커플러의 구조설계가 전체 회전 시스템에 맞지 않을 경우 축 불균형이 발생하기 쉽다. 따라서, 축의 불균형에 의한 이상 소음이 발생한다

2. 덕트 회전체 진동 개요

에어컨 실내기 슬림 덕트의 진동을 발생시키는 주원인은 모터 가진원에 따른 진동과 시로코 팬 진동이 디퓨저 토출구 및 덕트 하단부로 소음이 전파된다.

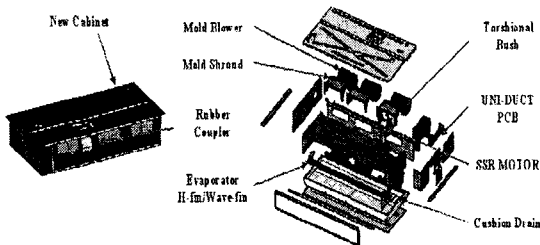


Fig.1 The schematic of slim duct

그림1은 슬림 덕트의 구조를 보여주고 있다. 이에 대한 등가 모델을 표현하면 그림2와 같이 등가 그림으로 표현 할 수 있다. 축 커플러 위치는 1, 2지점에서 보조 축 길이를 바꾸면서 모터 진동 및 축 불균형을 평가하였다. 축 커플러가 1번 위치에 있을 경우 보조 축 길이는 몰드 베어링 끼우는 위치까지의 길이가 668.3mm이고, 2번에 위치할 경우 축 길이는 388mm이다. 이상소음 발생에 영향을 미치는 구성품은 모터 축 불균형, 시로코 팬 3개, 축 커플러, SSR 제어에 따른 모터 진동을 들 수 있다.

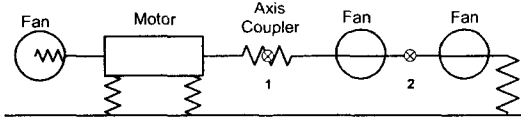


Fig2. Equivalent model of the slim duct system.

Table1은 실내기 덕트의 소음과 진동에 영향을 미치는 인자에 대한 물성값이다.

Table1: Specification of slim duct system.

	Item	Unit	Specification
Dimension	Net(W*H*D)	mm	1400*295*690
	Indoor Net	g	51000
Weight	Motor	g	4900
	Blower(1EA)	g	450
	Shaft Axis	g	648

덕트 회전체의 이상소음 발생에 기인하는 요소를 중요 인자를 순서대로 나열하면, 모터 및 모터 방진 고무, 모터 축 길이, 축 커플러, 크로스 팬의 재질, 몰드 베어링 형상 및 재질을 들 수 있다. 다음은 각각 요소 부품에 대해 덕트 설계시 소음진동에 영향을 줄일 있는 방향을 제시하였다.

2.1. 모터 축 길이 변화

모터 축의 전체 길이는 1295mm, 지름 15mm로 한 개의 축 길이로 가공하기 어렵기 때문에 두 개의 축으로 나누어서 제작을 하였다. 따라서 두 개의 축을 연결하기 위해서 고무 커플러를 적용하여 축 연결을 하였다.

고무 커플러는 비틀림 모멘트 및 축 불균형을 제어하기 위해 경도 및 형상의 설계가 중요하다. 축 커플러는 알루미늄 다이캐스팅(Die casting)에 고무를 감싼 형태로 경도는 70도로 하였다. 고무의 경도는 40, 50, 60, 70도의 경도에 따른 비틀림 모멘트를 고려하여 70도를 선정하였다. 모터 회전수는 1050~720rpm 대역을 사용하며 이에 따른 회전 토크는 8~15kgf/mm<sup>2</sup>을 요구하게 된다.

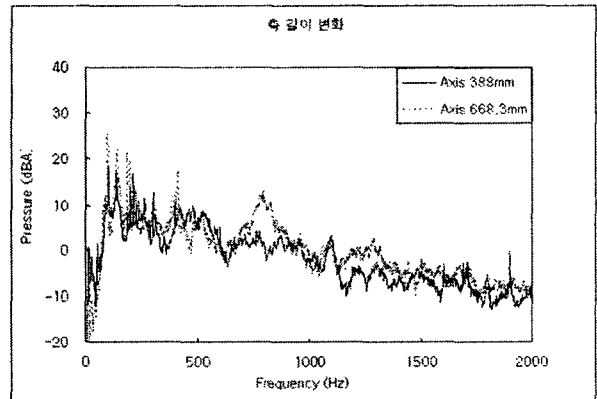


Fig.3. Comparison of spectrum by axis length

그림3은 축 길이가 388mm, 668.3mm 길이에 따른 소음 피크음(Peak noise) 감소 변화를 나타낸 것이다. 축 길이의 기준은 축 커플러와 몰드 베어링에 끼워지는 축까지의 길이를 나타낸 것이다. 축 길이가 668.3mm 경우 최대 피크음의 경우 27.4dBA를 나타내고 있으면, 축 길이를 줄였을 경우에 19.1dBA 까지 감소함을 볼 수 있다. 이때의 축 커플러의 경도는 70도로 적용하였다.

표2는 축 길이에 따른 고유진동수를 유한요소 해석과 모달 시험값을 비교하였다. 덕트 운전 소음에 문제가 되었던 4차 모드 116Hz에서의 피크 소음을 축 길이를 388mm로 수정하여 피크음을 감소 8.3dBA 감소 시킬 수 있다.

Table2. : Comparison of natural frequency by axis length.

Mode Number	Natural Frequency(Hz)			
	Axis Length 668.3mm		Axis Length 388mm	
	FEM	TEST	FEM	TEST
1	38	40	39	41.7
2	45.1	47.4	46.1	47.7
3	65.4	68.6	65.6	68.5
4	117	116	129	126
5	125	127	139	144
6	143	144	140	148
7	176	169	179	167

2.2 모터 구동제어 방식에 따른 진동.

모터 SSR 제어 원리는 릴레이 스위치로 동작하는 SSR의 신호에 따라 ON/OFF시간을 조절함으로써 모터의 RPM을 제어하는 구동방식이다.

마이컴(Maicom)의 모터의 구동신호가 SSR의 포토 트라이액(Photo triac)에 여기 되면 SSR이 점점이 불으면서 모터가 회전하게 된다. 실내 팬 모터 제어는 제로크로싱(Zero crossing) 회로로부터 AC220V의 0V인 지점을 인식하면 마이컴에서는 포토트라이액을 이용하여 AC220V 정현파의 일정구간을 차단시켜 회전수를 제어한다. 즉, 220VAC 전압의 일정구간을 커팅(Cutting) 함으로써 전류를 0으로 만드는 시간을 조절하여 RPM을 제어한다.

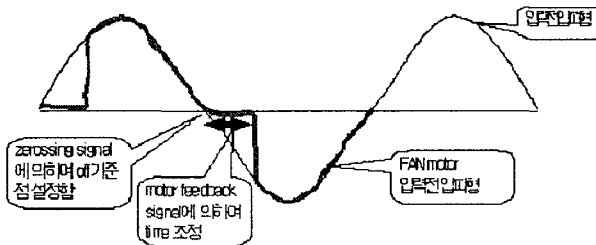


Fig.4. The wave characteristic of SSR Control

그림4와 같이 사인파형의 불연속 구간에서는 모터 진동값이 Tap 제어 방식에 비하여 커지게 된다. 따라서, 불연속 구간에서의 진동을 줄이기 위해서는 지연시간의 구간을 줄이거나 또는 진동을 흡수 할 수 있는 방진고무에서 진동 전달률을 줄여야 한다. 지연시간을 3m Sec 이하로 가져갈 경우에는 그 이상의 회전수를 사용할 수 없는 단점이 있으므로 사용 회전수 영역을 미리 설정하여 모터 설계 사양을 확보해야 한다.

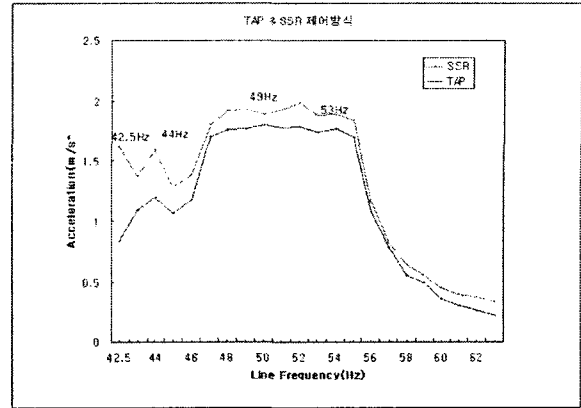


Fig.5. Vibration levels by SSR and Tap control method

그림5는 SSR 제어 방식과 Tap제어 방식의 가진 주파수에 따른 가속도 값을 나타낸다. 따라서 SSR제어 방식에 따른 진동값의 절연 및 감쇠를 위한 방진 고무 설계의 중요한 요소가 된다.

2.3 모터 방진 고무 형상 설계.

모터제어 방식에 있어 탭과 SSR 제어 경우는 전원주파수의 정수배 되는 주파수에서 진동을 크게 발생시키고 이것이 세트틀 가진하여 소음으로 나타난다. 이 소음을 자기음(2f line Noise) 라고 하는데, 이것을 줄이기 위해서는 모터와 모터 브라켓(Motor Bracket) 사이에 방진고무를 삽입하고 모터에서 발생하는 진동이 캐비닛(Cabinet)에 전달되지 않게 진동을 절연시키는 것이다. 방진 고무 설계 시 고려인자를 살펴보면 방진 고무 재질 및 경도 선정, 방진 고무 형상 결정을 통한 전달률(Transmissibility) 을 고려해야 한다. 방진 고무의 재질은 NR(Natural Rubber)를 가장 많이 사용하고 있으나, 내구성이 요구 되어지는 제품에 대해서는 NBR이 주로 사용한다. 경도(Hardness), 지름, 링의 지름, 고무 두께, 링 형상, 모터 진동 특성을 고려하여 진동 전달률을 0.2이하로 고려하여 설계 하여야 한다.

2.3.1. 모터 방진 고무 시험 결과 분석

일반적인 진동 전달률은 다음과 같이 표현할 수 있다. 방진고무 감쇠특성은 점성 감쇠를 동반하는 1-자유도계 강제진동 모델은 질량 m, 동강성  $k_d$ , 감쇠계수 c, 모터 지지기반과 연결 상태에서 질량 m에 강제 조화 진동이 작용한다고 하면, 모터 브라켓에 전달되는 진동 전달률,  $\tau$ 는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\tau = \frac{F_{TR}}{F_0} = \sqrt{\frac{1 + \eta^2 (f / f_0)}{1 - (f / f_0)^2 + \eta^2 (f / f_0)^2}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_d}{m}}, \quad \eta = \frac{c}{\sqrt{mk_d}}$$

여기서,  $F_{TR}$  은 사시에 전달되는 힘,  $F_0$  는 강제력의 진폭,  $f$  는 가진 진동수,  $f_0$  는 고유 진동수,  $\eta$  는 감쇠비를 나타낸다. 따라서, 방진고무의 특성을 나타내는 진동 전달률은 고유진동수  $f_0$  및 감쇠비  $\eta$  에 많은 영향을 받는다. 외부에서 기진되는 진동수  $f$  가 증가해 가면서 진동 전달률이 정확히 1이 되는 진동수  $f$  는 고유 진동수  $f_0$  에 대해서  $f = \sqrt{2} f_0$  일 때이다.

형상과 재질을 바꾼 육각형모양의 NR40, 45, 53도와 돌기 모양의 형상을 바꾼 경도 53도를 비교해 보았을 때 육각 모양의 경도 40도가 진동 전달특성이 우수하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

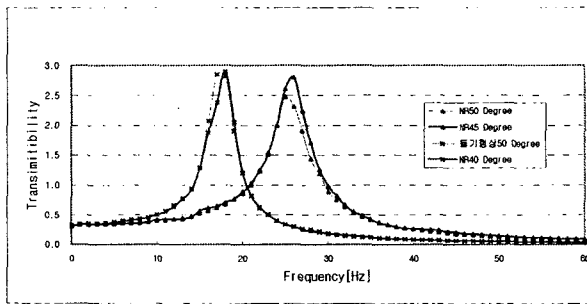


Fig.6. Amplitude curves of the anti-vibration rubber  
그림6은 경도 및 재질특성이 너무 강해서 고유치 자체가 높은 주파수 영역에서 형성되고 이에 따라서 모터 구동 주파수인 50Hz와 60Hz에서의 전달률도 크게 발생함을 알 수 있다. 최종적으로는 방진고무 경도 40도를 적용하여 진동 전달률을 0.2이하로 낮추었다.

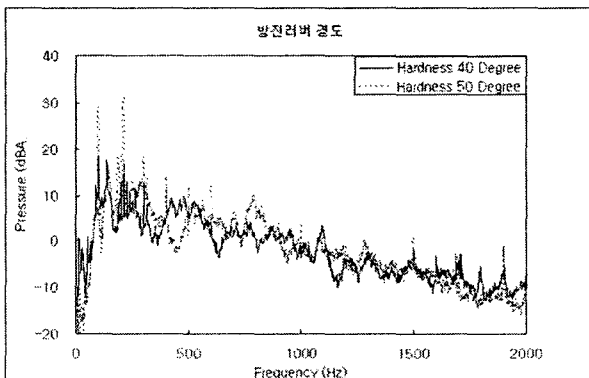


Fig7. Comparison of spectrum by rubber hardness  
그림7은 방진고무 경도에 따른 스펙트럼 형상으로 경도 50도 경우 최대 피크 소음은 31.3dBA였으나, 경도를 40도로 경우에는 19.5dBA 까지 감소함을 볼 수

있다. 경도를 낮게 함으로서 댐핑 효과를 주어 모터진동의 전달률을 감소시켰다. 그러나 모터 무게에 의한 처짐량을 고려 해서, 유한요소 해석을 통한 처짐량이 0.1mm 이하 이라는 것을 확인 할 수 있었다.

2.4 시로코 팬 재질에 따른 영향.

시로코 팬 재질 특성은 전원 주파수(50/60Hz)에 대해 고유 진동수 회피 설계 하여야 하는 데 팬 재질에 따른 고유 진동수 해석을 통하여 고유진동수를 찾고, 모달(Modal) 시험을 통해 비교 평가하였다.

Table3. Comparison of natural frequency by fan materials.

Mode	Natural Frequency(Hz)					
	ABS		ABS+ GF10%		ABS+ GF20%	
	FEM	TEST	FEM	TEST	FEM	TEST
1 <sup>st</sup>	47	46	48	49	46	47
2 <sup>nd</sup>	98	97	99	97	105	106
3 <sup>rd</sup>	132	130	122	120	140	142
4 <sup>th</sup>	175	176	198	200	189	196

표3은 팬의 재질에 따른 고유진동수를 해석과 시험을 통한 비교한 것으로 ABS 및 ABS+GF10%의 재질을 경우 두 번째 모드가 가진 주파수의 2배수인 100Hz 근처에서 발생함을 알 수 있다. 따라서 재질에 대한 강성을 증가 함으로서 고유진동수를 가진 주파수 범위에서 5Hz이상 이동시켰다. 고유진동수의 둘째 모드는 팬의 끝 단에서 발생하는 타원형태의 모드로서 팬의 쉬라우드(Shroud) 두께를 0.8mm에서 1.3mm로 증가 시켜서 고유진동수를 가진 주파수와 이격시켜 팬의 공진 주파수를 회피하였다. 그러나 팬의 형상 변경과 재질의 물성 값을 변경하는 방법을 비교해보면 재질 변경이 유리한 방법이다. 모터 축의 불평균을 보정하는 방법은 팬의 축 가운데 토션날 부상(Torsional Bushing) 적용하여 축 전체의 균형을 유지하도록 하였다.

또한 모터 축 끝 단의 지지부분의 몰드(Mold) 베어링 부분은 축 불균형에 의한 진동을 절연을 위한 몰드 베어링 형상 및 경도는 40도로 적용하였다.

그 밖에도, 캐비닛은 강도 및 진동흡수를 위한 구조설계를 위해서 포밍(Forming)의 형상 및 깊이를 고려하여야 한다. 형상이나 깊이는 구조해석을 통한 결정하였다. 완성된 후 사용 주파수 범위에서 시험한 결과 50~60Hz 주파수 변동에 따른 캐비닛의 공진현상이 발생하지 하지 않았다.

모터 브라켓은 가진 주파수의 정수배, 주파수 대역은 피하여 설계하였으며, 모타 브라켓 지지는 휨과

뒤틀림 방지를 위해 측면과 상부 고정구조 설계하고 모터 브라켓의 형상두께 결정, 모터 방진 고무 지름 값 확정하였다. 마지막으로 모달(FRF) 시험을 통한 공진 회피설계를 검증하며, 모터 방진 고무 장착하는 브라켓 지름을 600mm로 방진 고무 전달률을 0.2이하로 평가 후 결정하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 천장의 높이 공간이 협소한 곳에서도 설치할 수 있고, 슬림형 덕트의 구조에서 발생할 수 있는 모터 축 회전체의 불균형 및 모터의 진동에 의해 발생하는 이상소음을 저감 할 수 있는 방안을 모색하였다. 덕트 제품의 소음을 평가할 때는, 토출구 끝 단 및 덕트 본체 하부에서의 소음 평가를 하며, 이때 모터에서 발생하는 자기음, 팬의 고유진동수와 가진 주파수의 일치에 따른 공진음, 모터 회전축 불균형에 의해 발생하는 소음, 냉매 순환에 의한 냉매음 등을 제거하는 것이 덕트 설계에 있어서 중요한 요소이다.

유한 요소 해석과 모달 시험을 통한 덕트 실내기 요소 부품 각각의 사양에 따른 소음진동 영향을 평가하여 최적 안 설계를 도모하였다. 에어컨 덕트 설계 경우 이상소음 저감의 주요인자의 우선순위는 모터 방진 고무, 모터 축 길이, 고무 커플러, 크로스 팬 재질, 모터 제어 방식이 소음 발생과 가장 큰 관련이 있는 것을 알 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Dimintberg, F.M. Flexural vibrations of rotating of rotating shafts, 1<sup>st</sup> edition. pp123~134.
- (2) J.S, RAO. "Rotor Dynamics", 3<sup>rd</sup> edition. pp207~221.
- (3) M. Karlberg. Investigation of an unbalanced rotor system with bearing clearance and stabilizing rods. Chaos, Solitons and Fractals. 2004. pp363-374
- (4) Seybert AF, Crocker MJ, Moore JW, Jones SR. Reducing the noise of a residential air conditioner. Noise Control Eng J 1973; (2)79-85
- (5) W. Neise and F. Arnold. On sound power determination in flow ducts. Sound and vibration J. 2001;244(3). 481-521