

Fan Filter Unit 소음 · 진동 특성과 청정실에 미치는 영향성 평가에 관한 연구

°백재호*, 손성완*

A Study on the noise & vibration properties of Fan Filter Unit and evaluation of effect to Clean Room

Jae-Ho Baek, Sung-Wan Son

ABSTRACT

FFU are used increasingly by the microelectronics industry to provide clean recirculating air for the fabrication of integrated circuits and laminar flow air. There may be several hundred ffu in a large cleanroom, covering 100% of the ceiling area. Hence, there is of often knowledge in the inside and outside of the country the ffu give rise to noise & vibration trouble to microelectronics industry.

Noise & Vibration control for satisfaction about noise & vibration criteria in TFT-LCD factory cleanroom be in need of exact noise & vibration data of accurence from utility & equipment that can be exert a bad influence upon cleanroom. In this pater, hence we found out noise and vibration properties of ffu by using experimental method. And, we performed noise & vibration analysis about noise & vibration level in cleanroom using semiempirical method for quantative approach about noise & vibration level in cleanroom.

1. 서론

FFU(Fan Filter Unit)는 정밀 전자산업에서 집적회로의 제작 또는 TFT-LCD 가공시 청정공기 제공과 공기의 층류흐름을 제공하기 위하여 사용이 증대 되고 있다. 대형 청정실의 경우 천장면 전체에 수백~수천개의 FFU가 설치되며 각 FFU는 천장의 현가장치시스템(suspension system)으로 지지되어 설치한다. 이에 외부에서 소음 및 진동을 저감시킬 공간확보가 어렵다. 따라서 청정실 내에 적합한 소음·진동 환경을 유지할 수 있는 가장 전형적인 방법은 소음 진동 허용치를 만족시키는 FFU를 선택하는 것이다.

FFU는 일반적으로 다양하게 속도변화를 시킬 수 있는 모터에 직기동으로 송풍장치를 연결한 구조로 소형의 배출중실(discharge plenum), 그리고 HEPA 또는 ULPA 필터로 구성된다. FFU

의 소음·진동 수준은 설계방식, 팬의 선택, 팬의 작동 속도등에 의해 달라진다

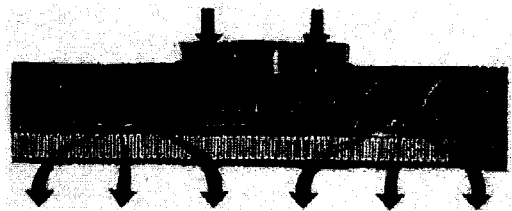


그림 1.1 FFU 단면도

TFT-LCD 생산공장에는 생산·검사를 위한 각종 정밀장비를 사용한다. 이러한 장비는 공장내 소음·진동으로 인하여 정상가동에 악영향을 끼치는 경우가 자주 발생하고 있다. 이에 이러한 공장구조물은 건설초기 설계시부터 공장내 소음·허용규제를 결정하여 만족시킬수 있도록 설계·시공되어야만 한다. 소음·진동 허용규제치를 만족시켜 주기 위한 방음/방진설계를 위해서는 청정실에 미칠

*. RMS TECHNOLOGY CO., LTD.

수 있는 유틸리티와 설비로부터 발생하는 진동과 소음에 대한 정확한 데이터가 필요하다. 그 중에서도 청정실의 소음·진동의 크기와 특성을 결정하는 수많은 요인들중의 하나가 FFU의 음향특성(주파수 별 음향파워레벨 : PWL)과 진동특성(주파수 별 동하중(動荷重) : Dynamic Load)에 대한 정확한 데이터이다. 그리고 이러한 데이터를 기본으로 하여 청정실 내부의 소음레벨과 진동응답에 대한 정량적인 접근을 위한 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하는 음향 및 동적 해석이 수행된다. 즉, FFU에 대한 단독 실험은 단지 청정실의 진동 및 소음 영향성을 평가하기 위한 FFU에 대한 기초자료이다. 이러한 까닭으로 FFU에 대한 소음·진동특성은 장비 제작사에서 사용자에게 제시하는 일반적인 사양의 하나로 정착되고 있다. 이러한 초보적인 문제를 간과한 결과로 FFU 장비로 기인하는 소음과 진동문제가 종종 발생하는 것이 국·내외적으로 알려지고 있다.

이에, 본 논문에서는 TFT-LCD 공장에 설치를 하기 위한 3개사 FFU에 대한 소음·진동에 대한 평가를 위하여 FFU 정상가동시 발생하는 소음·진동(동하중) 특성을 실험을 통하여 구하였고, 이를 기본 데이터로 사용하여 실 구조물에 설치후 발생할 수 있는 소음·진동 응답에 대한 예측을 수행하였다.

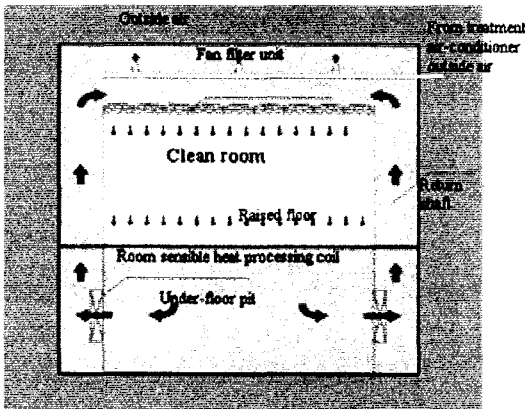


그림 1.2 청정실 단면도

2. 청정실내의 소음·진동 설계 목표치

TFT-LCD 공장의 진동허용규제치를 결정하기 위해서는 생산 및 검사공정에 설치되는 각종 생

산·검사장비 전체 장비에 대한 소음·진동허용규제치를 수집·정리하고 이에 대한 비교·검토, 분석 및 평가를 하여 건설되고자 하는 공장구조물의 소음·진동허용규제치를 결정한다. 보다 정확하고 합리적인 소음·진동허용규제치의 결정은 설비의 소음·진동을 제어하기 위한 기본자료가 될 뿐만 아니라 사전의 초기설계 단계에서부터 소음·진동 문제를 사전예방과 과다한 방진설계 및 구조적인 동적 설계의 비효율적인 측면을 배제할 수 있다. 참고로 아래 표 2.1에는 국내 TFT-LCD 공장 구조물의 소음·진동 목표치를 정리하였다.

표 2.1 청정실 소음·진동 허용규제치

	진동			소음
	변위 [μm]	가속도 [gal]	주파수 범위 [Hz]	
제진대	2	2	4~80	NC65 or 70dB(A)
Access Floor	2	2		
격자보	0.5	0.5		
Office부분 Lab.	-	-		

3. 제원 및 동하중과 음향특성

3.1 FFU 구성 및 제원

실험이 수행된 3개사 FFU의 크기, 중량, 그리고 풍속 및 유량등의 제원에 대한 정보는 각 제조사에서 제시된 자료로 아래 표에서 나타내었다.

표 3.1 FFU 제원

	A사	B사	C사	Unit	Remarks
Filter 유효사이즈	780 × 1,383	756 × 1,352	778 × 1,386	mm	-
평균풍속	0.25 0.35 0.45	0.25 0.35 0.45	0.25 0.35 0.45	m/s	0.25m/s 0.35m/s 0.45m/s
평균유량	0.270 0.378 0.485	0.256 0.358 0.460	0.270 0.377 0.485	m ³ /s	0.25m/s 0.35m/s 0.45m/s
rpm	970 1,050 1,170	1,060 1,152 1,248	1,060 1,142 1,221	rad/s	0.25m/s 0.35m/s 0.45m/s
Total Weight	39.8	54.5	40.7	kg	-

3.2 실험방법 및 기본이론

(1) 소음 실험 방법 : 3개사 FFU가 10대씩 설치되어 있는 각 청정실에서 풍속을 0.25, 0.35, 0.45m/s

의 3가지 경우에 대하여 FFU가 정상가동하는 상태에서 각 청정실의 동일한 위치(중앙 1지점)에서 소음을 측정하였다.

(2) 동하중 산출 기본이론 : FFU 정상가동시 발생하는 동하중을 산출하기 위한 여러 가지 방법중에서 본 경우는 간접실험방법으로 수행되었다. 이때 적용된 이론은 다음과 같다.

그림 3.1과 같은 1자유도 시스템에서 Mass Block에 임의의 동하중 $|F_0|\sin(\omega t)$ 가 가해질 때 Mass Block의 진동응답은 $|x|\sin(\omega t)$ 이다.

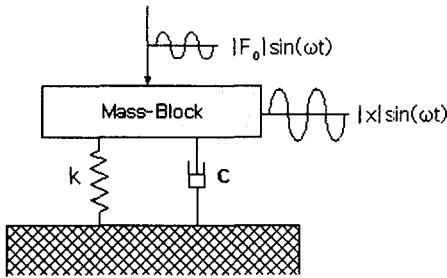


그림 3.1 1자유도 시스템

상기 시스템에서 임의의 응답을 알고있을 경우에 Mass Block에 가해지는 동하중 계산식은 아래 식 (3.1)에 정리하였다. 식 (3.1)에서 보면 동하중 (F_0)을 계산하기 위해서는 Mass Block에서의 가속도 레벨 (\ddot{X}), 스프링 강성(k), 감쇠계수(ζ), 1자유도 시스템의 고유진동수(ω_n), 가해지는 진동수(ω)를 알면된다.

$$|F_0| = k \cdot |X| \cdot \sqrt{\left[\frac{1}{\omega^4} + \frac{1}{\omega_n^4} - \frac{2 - 4\zeta^2}{\omega^2 \cdot \omega_n^2} \right]} \quad (\text{식 3.1})$$

(3) 진동 실험 방법 : 3개사의 FFU중에 샘플로 1개를 선택하여 실험을 위하여 별도로 제작된 지그(Jig)위에 금속코일스프링을 설치하고 스프링 위에 FFU를 설치하였다. 이때 FFU 가동시 발생하는 공기유동에 의하여 바닥구조물에서의 역풍에 의한 영향을 최소화 하기 위하여 지그높이는 1.0m로 제작하였다. 실험수행시 풍속이 0.25, 0.35, 0.45m/s의 3가지 경우의 정상가동 상태에서 FFU 상단 모서리 4개 지점에 가속도 센서를 부착하여 4개 지점에서 동시에 진동가속도를 측정하였다.(그림 3.2 참고)

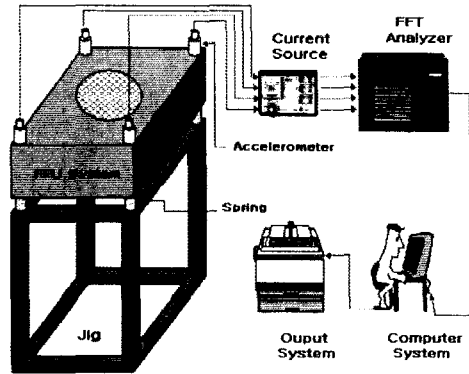


그림 3.2 FFU 동하중 실험 시스템

3.3 음향특성 및 동하중 실험결과

상기 실험 방법으로 FFU 정상가동시 발생하는 소음·진동 특성에 대한 결과를 각 사별로 아래표에 정리하였다.

(1) 소음 실험 결과 : 3개사 FFU를 각 10개씩으로 이루어진 각각의 청정실에서 동일한 지점 1개소(중앙)에서 0.25, 0.35, 0.45 m/s 풍속으로 가동시 1/1 Octave Band로 소음을 측정/분석하였다. 측정 결과 청정실 내부에서 소음의 주요 주파수 성분은 3개사 모두 125Hz로 확인되었다. 이는 모터 회전수와 팬 Blade 수량과 복합되어 나타나는 주파수이다. 또한, 125Hz 이하인 31.5~63Hz의 소음레벨은 B사가 나머지 2개사(A사, C사)보다 약 +2~5dB 정도 높게 나타났다. OverAll 값으로는 B사와 C사의 소음수준은 약 ±1dB 이내로 비슷한 수준이지만, A사는 상기 2개사보다 약 +5dB 정도 높은 수준이다. NC 기준으로 B사는 C사보다 약 +2~5 정도, A사가 C사보다 약 +2~7정도 높은 수준이다.

표 3.2 소음 실험 결과 OverAll Unit : dB(A)

	A사	B사	C사	Remarks
OverAll	65.7	59.1	60.2	0.25m/s
	65.8	61.5	61.6	0.35m/s
	69.0	63.5	63.1	0.45m/s
NC	65.8	58.3	56.2	0.25m/s
	62.6	60.6	58.2	0.35m/s
	71.0	63.8	58.0	0.45m/s

※. 압소음레벨 => OverAll : 31.0dB(A), NC : 22.1

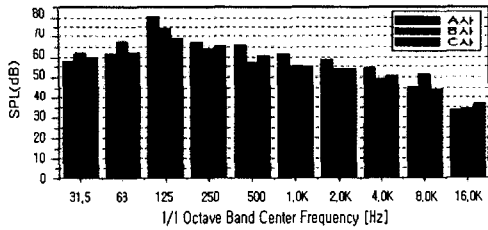


그림 3.3 0.25m/s의 경우 소음레벨 비교

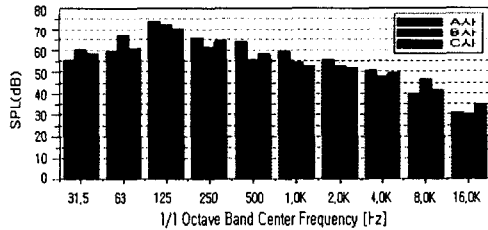


그림 3.4 0.35m/s의 경우 소음레벨 비교

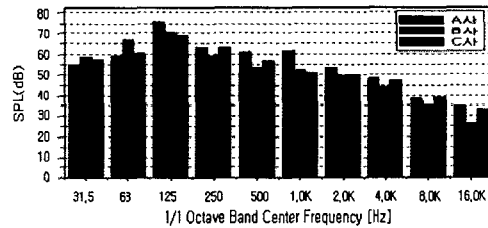


그림 3.5 0.45m/s의 경우 소음레벨 비교

(2) 진동 실험 결과 : 3개사 FFU중에 각사별로 1개씩을 선정하여 앞서 설명한 간접실험법을 이용하여 0.25, 0.35, 0.45m/s 풍속으로 가동시 진동을 측정하여 동하중을 산출하였다. 측정결과 3개사 모두 풍속의 변화로 회전수가 변화됨에 따라 약 110~140Hz 범위의 동하중이 높게 나타났다. 이는 모터 회전수와 팬 Blade 수량과 복합되어 나타나는 주파수이며, 앞서 소음에서 나타나는 125Hz 성분과 동일한 주파수이다. 특히, A사에서만 약 15~20Hz 이내에서 동하중이 높게 나타나는 성분이 발생하고 있다. 이는 모터의 회전수와 관련된 것으로 확인된다. 또한, B사는 60~100Hz, C사는 20~60Hz에 동하중이 넓게 분포하는 특성이 나타났다.

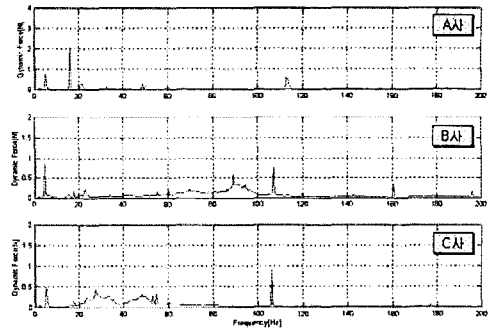


그림 3.6 0.25m/s의 경우 동하중 레벨 비교

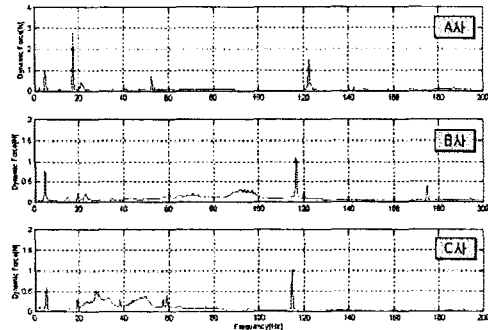


그림 3.7 0.35m/s의 경우 동하중 레벨 비교

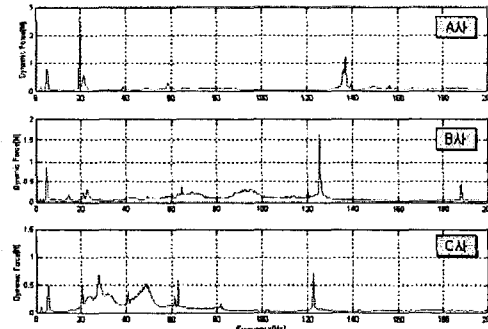


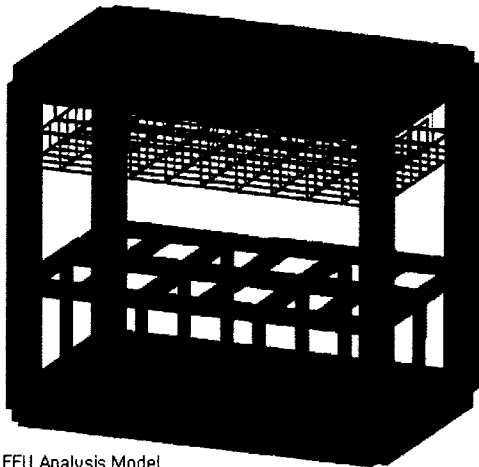
그림 3.8 0.45m/s의 경우 동하중 레벨 비교

4. 청정실내 소음레벨 · 진동응답 예측

4.1 진동응답예측

(1) 예측절차 : FFU가 설치될 청정실내 주파수별

진동 응답 특성을 평가하기 위해 조화해석을 이용하여 주파수별 진동응답이 수행되었으며 이때 FFU에 의한 입력 하중으로는 앞에서 서술한 간접 실험결과에 의해 평가된 FFU의 동하중 데이터가 사용되었다. 주파수별 진동특성을 살펴보기 위해 그림 4.2에 나타난 바와 같이 청정실내 바닥 및 FFU가 설치될 현가장치의 각각 3위치에서 각 사별로 정상 가동 상태에서의 주파수 응답 특성을 계산하였다.



FFU Analysis Model

그림 4.1 진동응답예측 모델링

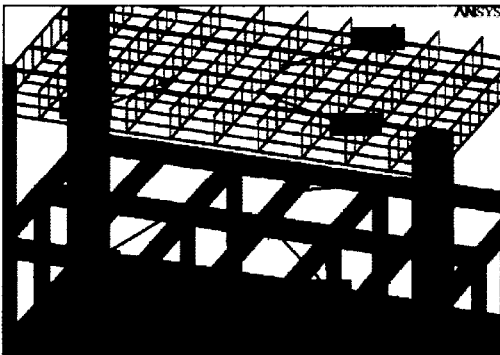


그림 4.2 진동응답예측 모델링 확대전경

(2) 예측결과 : 일반적으로 구조물의 동적응답은 구조물이 가지고 있는 동특성(dynamic properties)과 입력으로 작용하는 동하중(dynamic force)에 의해 결정되며 통상 구조물 설계시 이렇게 결정되어지는 각 주파수별 동적응답중 최대 변위를 고려하여 안정성 및 작업성 확보를 위한 방진 설계가 이루어진다. 이상에서 구해진 각 사별 가동조건에 의

한 주파수별 응답특성중 최대 변위가 일어나는 주파수에서의 거동특성을 살펴보았다.

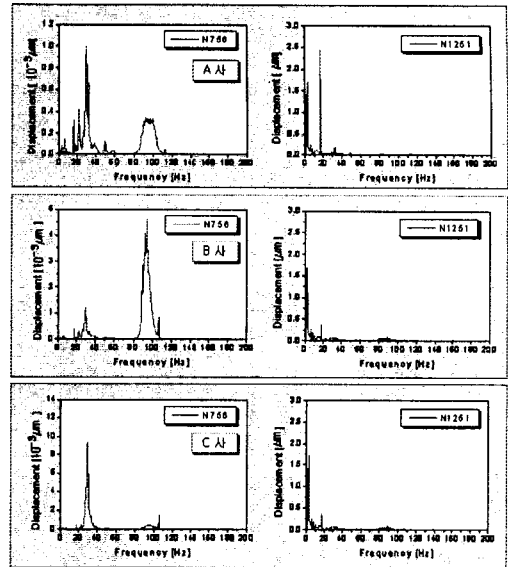


그림 4.3 천장 FFU 설치 현가장치 및 청정실 바닥에서 진동응답(at 0.25m/s)

앞에서 계산된 주파수 응답 특성에서 알수 있듯이 FFU의 동하중에 의한 청정실 바닥에서의 진동응답은 아주 미미한 수준으로 나타나며 최대 응답은 FFU가 설치될 청정실 상부의 현가장치에서 나타나고 있다. 표 4.1 에서 FFU 설치 현가장치에서의 최대 변위 응답 수준을 제조사별 3가지 가동조건에 대해서 나타내었으며 그림 4.4, 4.5는 최대 변위를 나타내는 주파수에서 청정실의 동적 거동양상을 도시하였다.

표 4.1 천장 Frame에서의 최대변위응답 예측레벨

	0.25m/s		0.35m/s		0.45m/s	
	Freq	Dis	Freq	Dis	Freq	Dis
	[Hz]	[μm]	[Hz]	[μm]	[Hz]	[μm]
A사	16.25	2.45	17.25	5.44	2.5	1.80
B사	2.5	1.73	2.5	1.78	2.5	1.82
C사	2.5	1.77	2.5	1.79	2.5	1.81

결과에서 알 수 있는 바와 같이 A사를 제외한 나머지 회사의 최대 거동은 모든 가동 조건에서 2.5 Hz에서 최대 응답 변위를 나타내며 이것은 FFU가 설치될 현가장치 시스템의 1차 굽힘 모드 의 영향으로 판단된다. A사 FFU의 경우는 앞장의 예측결과에서 나타난 바와 같이 모터의 1차 성

분에 의한 동하중이 다른 제품들 보다 상대적으로 크기 때문에 1차 모터 성분의 근처에서 최대 변위 응답이 발생되고 있다.

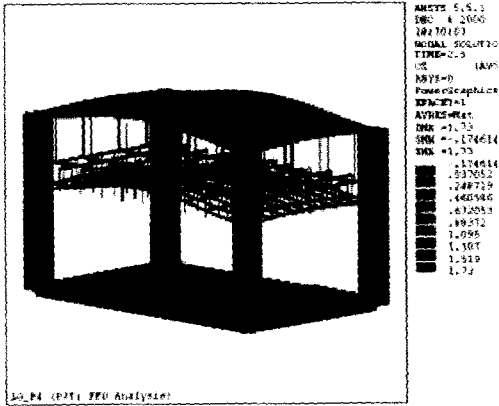


그림 4.4 2.5Hz에서 변위 거동양상

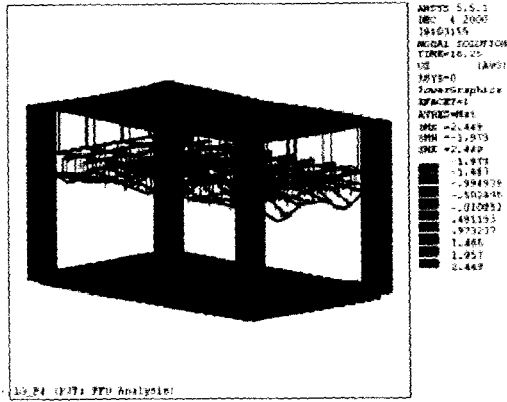


그림 4.5 16.25Hz에서 변위 거동양상

4.2 소음레벨예측

(1) 예측절차 : 음장해석을 위한 절차는 다음과 같다. 즉, 해석 모델을 불러오고 해석영역에서의 음속 및 밀도를 설정한다. 또한, 옥타브밴드별 흡음률 및 음원에 대한 음향파워레벨을 설정하고 해석을 수행한다. 이때, 음원의 음향파워레벨(PWL)은 측정된 음압레벨(SPL)과 가정한 흡음률 및 실의 조건으로부터 실정수(R)를 계산하여 결정하였으며, 다음의 식 4.1 에서 Q는 음원의 지향계수를, R은 실정수를 의미한다.

$$\overline{SPL} = PWL + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) [dB] \quad (식 4.1)$$

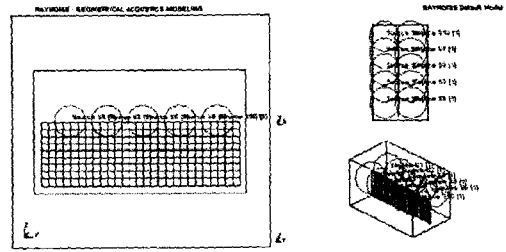


그림 2.1 해석 모델 및 음원의 출력

그림 4.5 소음예측 모델링

(2) 예측결과 : 청정실 내부의 예측 소음 분포를 알아보기 위해 상용 소음 해석 프로그램인 Ray-Noise를 이용하여 해석한 결과는 그림 4.6과 같다. 측정결과와 비교하기 위해 실 중앙에서의 소음 수준 및 NC를 정리하였다.

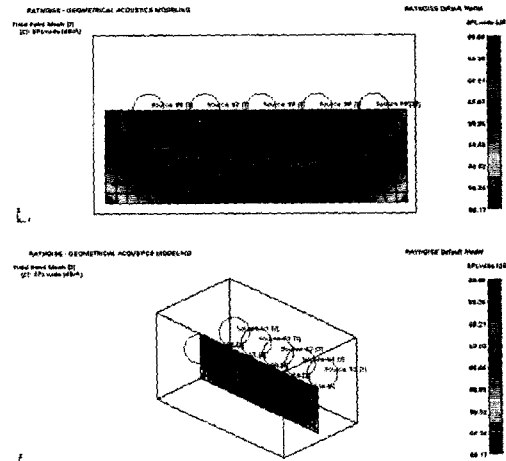


그림 4.6 0.45m/s의 경우 소음 예측 결과

표 4.2 소음 예측 결과 *OverAll Unit : dB(A)*

	A사	B사	C사	Remarks
OverAll	64.6	58.1	59.5	0.25m/s
	64.5	60.2	60.1	0.35m/s
	67.3	61.9	61.3	0.45m/s
NC	64.4	57.3	55.6	0.25m/s
	62.0	58.9	56.9	0.35m/s
	69.3	62.3	57.1	0.45m/s

※. 소음 예측 지점은 실중앙부 바닥에서 1.5m 상부

표 4.2 에서 나타난 바와 같이 청정실 중앙부에서 소음 예측 결과는 표 3.2 실험 결과와 비교하여 약 1~2dB 정도 낮은 수준을 보이고 있으며 전체적인 경향은 계측결과와 유사한 영향을 나타낸다.

4.3 결과정리

실험된 음압수준 및 동하중을 토대로 수행된 해석결과로 FFU의 동하중에 의한 청정실 바닥에서의 진동 응답 수준은 아주 적을 것으로 판단되며 다만 FFU가 설치될 청정실 천장부위 현가장치에서 최대 변위 응답이 나타났다. B사와 C사의 FFU에 의한 최대진동 응답은 모든 가동 조건에서 2 μ m 이하의 진동수준을 보이고 있으나 A사 제품의 경우는 최대 약 5.5 μ m 정도의 상대적으로 높은 진동수준이 모터 1차 기진 성분 근처의 국부 진동 모드를 가진 시킴으로서 발생하고 있다. 청정실 중앙부에서 소음 예측 결과는 계측 결과와 비교하여 약 1~2dB 정도 낮은 수준을 보이고 있으며 전체적인 경향은 계측결과와 유사한 영향을 나타낸다. 해석 결과에 의하면 A사의 FFU를 설치할 경우 정상가동 상태에서 청정실내의 소음 수준이 허용 기준치인 NC65 를 초과할 가능성이 있는 것으로 생각된다.

5. 결론

상기 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) FFU로 기인한 청정실의 소음·진동 예측을 위하여 실제 실험을 통하여 FFU 음향특성 및 동하중 특성을 구하였다.
- (2) 동하중 측정시 1자유도 시스템으로 가정하고 간접실험법을 통하여 동하중을 계산하였다. 이러한 경우 직접실험법을 통한 동하중과 비교·검토를 하여 방법론적인 검증이 필요한 것으로 사료된다.
- (3) 상기 결과를 음향·동적해석에 직접 적용하여 청정실의 소음·진동 응답을 예측하는 절차의 시도의 하나였다.
- (4) 청정실 NC65를 유지하기 위하여는 A사 제품은 모터 및 팬 회전으로 관련한 주파수가 탁월주파수로 소음에 대한 수정·보완이 필요할 것으로

사료된다.

참고문헌

- (1) Colin G. Gordon and Mei Q. Wu, "Noise and Vibration Characteristics of Cleanroom Fan-Filter Units" Annual Meeting of the Institute of Environmental Sciences and Technology(1998).
- (2) Hal Amick, A. M. Yazdanniyaz, K. S. Pearsons, and R. E. Nugent, " A Review of Noise Issues in Semiconductor Clean Rooms" Proceedings of Noise-Con 90 (Oct 1990).
- (3) Michael Gendreau, "Effect of Acoustic Noise on Optical Tooss" SPIE Conference on Current Developments in Vibration Control for Optomechanical Systems Denver (Jul 1999).
- (4) Michael Gendreau and Mei Wu "Environmental Noise Control For Semiconductor Manufacturing Facilities" Inter-Noise99-The 1999 Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Dec 1999).
- (5) Colin G. Gordon, "Vibration prediction and Control in Microelectronics Facilities" Proceedings of Internoise 96, Liverpool, England (July, 1996).
- (6) 백재호, 이흥기, 김강부, "칩마운트(SMD) 장비의 동하중(動荷重) 발생특성에 관한 연구", 한국소음진동공학회 춘계 학술대회 논문집, 2000, pp. 1913~1917