

## 고효율 초박형 FFU 시스템

○ 문인호 | (주)신성이엔지 기술연구소 부장  
E-Mail : moonih@shinsung.co.kr

### 1. 서 론

클린룸 기술은 정해진 레벨로 오염이 관리되는 청정 공간을 구성하는 기술로서 반도체, FPDs 및 정밀제조분야에서 제품의 입자 및 화학오염 방지를 위해 필수 설비로 활용되고 있다. 클린룸은 제조 장비의 최적가동 조건으로 온습도 및 압력, 청정도를 유지하기 위하여 소비되는 에너지가 집약적이고 대량이기 때문에 일반 산업설비에 비하여 다소비 에너지 설비로 분류된다. 특히 국내에서는 최근에 FPDs 산업의 급속한 발달로 인하여 클린룸이 대형화되고 건설 수량 또한 많이 늘어나고 있는 추세이다. 따라서 반도체 및 FPDs 제조용 클린룸에서의 에너지절약 대책은 발생한 온실가스 의무감축과 관련되며, 에너지원을 거의 대부분 외국에 의존하는 우리나라로서는 매우 중요한 요소가 될 수밖에 없다.

최근 들어 유가의 오름세가 심상치 않게 급속도로 고공 행진을 지속하고 있다. 에너지가 생산되지 않는 우리나라는 중동 발에서부터 미국 텍사스까지 연일 사상 최고치를 경신하는 국제 유가의 흐름이 가장 먼저 우리의 일상생활에 실시간으로 직접 영향을 미칠 수밖에 없는 것이 현실이다. 국제 유가는 조금씩 인상되기 시작하여 지금은 거의 배럴 당 100달러 시대를 눈앞에 두고 있다. 배럴 당 50달러

미만에서 거의 수년 내에 두 배 이상 오른 것이다. 국가 에너지원의 거의 전부를 차지하고 있는 것이 석유에너지이므로, 이러한 현상은 우리나라만 그러한 것이 아니라 세계 국가 모두의 공통된 현상이며 이러한 문제를 해결하기 위하여 대체에너지인 풍력 및 바이오 에너지, 태양광 발전사업 등의 개발과 이용을 촉진하는 활동이 매우 다양하게 전개되고 있지만 아직도 석유자원을 대체할 에너지원은 없는 것이 사실이다.

현재 우리나라의 반도체 분야는 본격적인 300 mm 웨이퍼 양산, FPDs 분야는 8세대 글라스를 이용한 LCD 패널의 양산 시대에 돌입하고 있으며, 물론 동반기술의 발전을 전제로 하지만 머지않아 450 mm 웨이퍼 및 10세대 크기의 글라스를 이용한 클린룸의 출현이 예상되고 있다. 클린룸이 건설되어 활용되는 반도체, FPDs 제조 및 전자관련 산업은 노동집약적이고 에너지 다소비산업인 것은 기지의 사실이다. 마땅히 대체에너지를 이용하여 활용하지 못하는 분야라면 우리의 현실에서는 모든 장치나 설비를 고 효율화하여 에너지를 절약하는 정책이 우선되어야 한다고 판단된다. 특히 우리나라의 클린룸 산업은 에너지 다소비 산업임에도 불구하고 경제발전의 기치에 눌러 사용되는 에너지는 민감하게 고려되지 않았던 것이 사실이며, 클린룸

건설사와 사용자가 분리되는 구조에 의하여 그 동안 초기 투자비 절약 우선전략이 에너지 절감 전략 보다는 상위였음을 부인할 수 없다.

최근 공기청정연구조합을 필두로 클린룸의 청정도 등급평가를 위한 작업을 실시하고 있다. 우리나라는 특히 클린룸이 많이 건설되어 운영되고 있으므로 이 제도가 어느 정도 정착이 되면 클린룸에서의 에너지 소비형태를 분석하고 평가하는 제도도 고려해 보아야 할 것이라고 생각된다. 본 고에서는 클린룸의 형태에 따른 특성을 검토하고 현재 FFU가 설치되어 운전되고 있는 클린룸에서 사용자들이 요구하고 있는 새로운 기술개발의 요구와 클린룸의 한 예를 들어 FFU의 설치 형태에 따른 에너지 소비상황을 검토한 다음 클린룸 시스템의 고효율화 방안을 소개하고자 한다.

## 2. 형식별 클린룸 시스템

본 장에서는 반도체 및 FPDs 분야의 수율개선을 위해 제조환경과 작업환경을 분리하는 기술 및 최소의 환기량으로 최적의 청정환경을 구현하는 방법으로 클린룸이 변천하고 있으며, 이에 따라 FFU 또한 대형화 고품속 및 고효율화를 지속적으로 요구받고 있으므로, 관련 클린룸 시스템에 대하여 간단히 검토하여 보고자 한다.

클린룸은 통상적으로 사용되는 목적에 따라 입자상/가스상 오염물질을 제어하는 산업용 클린룸(Industrial Cleanroom, ICR)과 공기 청정화뿐 아니라 세균이나 미생물을 제어하는 바이오 클린룸(Biological Cleanroom, BCR)으로 분류될 수 있다. 산업용 클린룸의 대표적인 분야는 반도체, FPDs 패널 제조공장을 들 수 있으며, 이들은 에너지 및 자원효율, 건설비용 절감 및 생산성 효율화를 위한 저비용, 고효율화 및 화학오염물질에 대한 대책을 주로 실시하고 있다. 바이오 클린룸은 배양실 및 무균 사육실과 같은 곳에서는 무균을, 수술실과

격리실 및 신생아실과 같은 곳은 감염방지에 초점을 두고 있다. 뿐만 아니라 바이오테크놀로지 관련 시설에는 바이오 해저드(Bio Hazard)에, 식품공장에서는 HACCP(Hazard Analysis & Critical Control Points)에, 제약공장에서는 GMP (Good Manufacturing Practices)에 초점을 맞추고 있다. 산업용 클린룸은 청정도가 높은 부분이 양압을 유지하도록 설계하지만 바이오 클린룸은 상황에 따라 양압(Positive pressure)뿐 아니라 내부의 세균성 오염원들이 외부로 유출되지 않도록 하기 위하여 상대적 음압(Negative pressure)으로 유지하여야 하는 조건으로 설계하는 경우도 있다.

다음은 클린룸의 발전과정에서 나타난 형태에 따른 분류를 살펴보면, Ballroom type, Service chase type, Minienvironment type 클린룸으로 나눌 수 있다.

1980년대에 반도체 분야가 발전하면서 점점 규모의 경제로 이동되는 시기에 대형의 System Ceiling 방식 클린룸이 출현하여 가장 보편적으로 적용하였던 시스템이 그림 1.에 나타내고 있는 Ballroom type의 클린룸이다. 이 방식의 클린룸은 FFU(Fan Filter Unit) 도입 초기방식의 클린룸에서도 많이 적용된 시스템으로, 한꺼번에 대형의 공간을 필요한 청정도로 유지하기 위해 대량의 환기 시스템이 필요하므로 운전비용이 많이 들어가는 단점은 있으나, 공사기간이 짧아 건설비용이 상대적으로 저렴하여 초기투자비가 낮은 특징이 있다.

그러나 대형공간을 동시에 동일한 기류시스템으로 관리하므로 편류가 발생하기 쉽고 공정중인 제품이 직접 작업자가 이동하는 대형공간에 노출되어 있어 오염측면에서 매우 불리한 시스템이므로 교차오염에 대한 대응방안이 필요하다. 따라서 상대적으로 수율개선에 필요한 기류편류 개선의 요구가 많은 시스템이라고 할 수 있다.

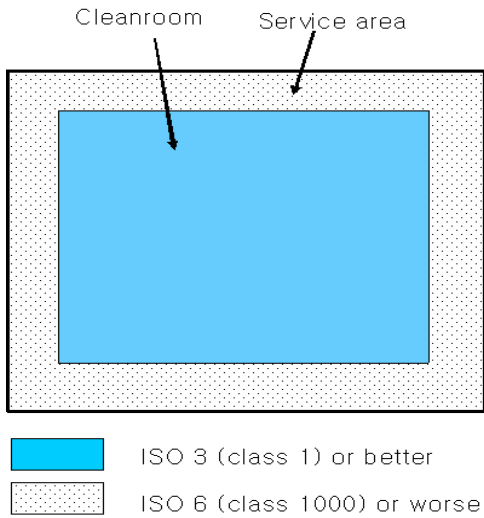


그림 1. Ballroom type C/R

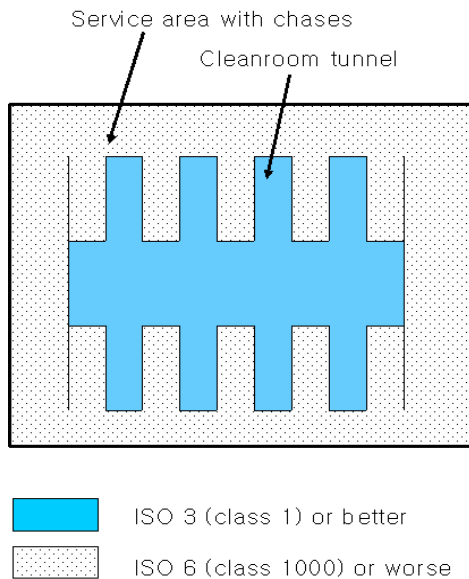


그림 2. Service chase type C/R

그림 2.에 나타난 Service chase type 클린룸은 고청정도가 요구되는 부분과 저청정도 구역을 분리 시킴으로서 환기 횟수가 줄어들에 따라 운전 에너

지를 절약할 수 있으며, 작업자가 직접 청정구역에 들어가지 않아도 메인テナンス를 할 수 있는 특징이 있다. 천장에서의 청정도 구분은 별다른 장치를 구비하지 않아도 청정도가 낮은 지역은 천장에 설치되는 FFU의 수량을 줄이고 청정도가 높은 지역은 FFU를 전면에 모두 설치함으로써 간단히 시공할 수 있다. 이러한 방식의 클린룸은 Ballroom type 클린룸을 건설한 다음 필요한 프로세스에 따라 구획만 처리하면 되므로 LCD 패널제조 분야에서는 거의 6세대부터 많이 적용된 방식이라고 할 수 있다.

반도체 집적도가 증가됨에 따라 점점 초청정 공간의 요구가 증가되고, 대형 클린룸 공간에서의 교차오염에 의한 수율 개선의 요구가 증가함에 따라 중요 부분을 밀폐시키는 기술이 증가되고 있다. 그림 3.과 같이 장비가 설치되는 특정 부분만을 고청정도로 유지하기 위하여 밀폐시키는 방식인 Minienvironment type의 클린룸이 요구되고 있다. 따라서 최근에는 반도체 제조공장과 LCD 패널 제조공장에서 모두 오염으로부터 제품을 보호할 수 있는 수단으로 Minienvironment type의 클린룸을

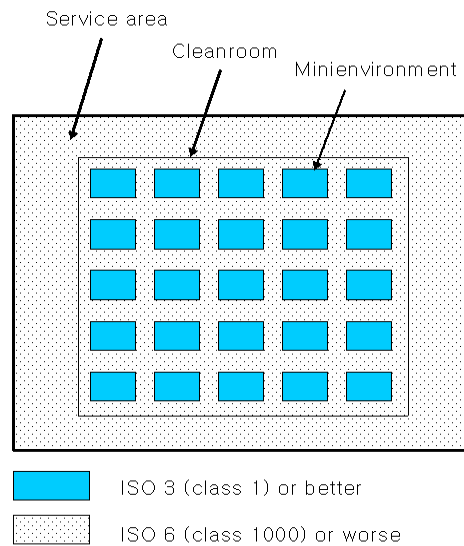


그림 3. Minienvironment type C/R

건설하고 있는 추세이다. 특히 7세대 이후의 LCD 패널 제조공장용 클린룸은 천장에 설치되는 FFU의 수량을 급속도로 감소시키고 있는 특징을 보이고 있다. 대량생산으로 이윤을 추구하는 시스템에서 국소청정 방식의 클린룸 시스템을 적용할 경우 기업의 이윤증가 측면에서 살펴보면, 다른 시스템에 비하여 클린룸 내부에도 격리시키는 장치가 많이 추가되므로 클린룸 건설에 필요한 투자비는 증가하나, 제품의 수율이 초기 투자비에 비하여 더 큰 인자로 회수될 수 있으므로 적극 도입하고 있는 상황이다. 그러나 최근에 들어오면서 초기 투자비뿐만 아니라 운전 에너지의 절감을 함께 요구하고 있는 실정으로, 고효율 FFU를 비롯한 새로운 개념의 클린룸 시스템의 출현을 요구받고 있다.

### 3. 고효율 초박형 FFU 개발 배경

국내 반도체 제조용 클린룸 시스템이 본격적으로 발전한 것은 FFU가 개발되어 적용되기 시작한 1990년대 이후라고 할 수 있다. 그 이전까지의 클린룸은 시스템 셸링(System Ceiling) 방식으로, 내부의 청정도를 유지하기 위하여 대형 축류 Fan을 이용하여 청정 공기를 순환시키는 오픈 플레넘(Open Plenum) 방식과 천장에서 필터와 Fan을 하나의 모듈로 제작하여 청정공기를 공급하는 클린 터널 모듈(CTM, Clean Tunnel Module) 방식이 주류를 이루었다.

FFU 방식의 클린룸은 상대적으로 건물의 층고를 낮출 수 있어 건축비의 절감은 물론, FFU를 필요한 지역에만 간단하게 설치하는 방법으로 청정도 class 1까지 유지할 수 있으므로, 특히 반도체 분야의 고청정도 유지용 클린룸을 건설하는데 많은 공헌을 하였다고 판단된다. 아울러 초기의 FFU 방식은 대부분 단일 풍속으로만 운전되었으나, 최근에는 다양한 방식의 제어 개념을 도입하여 클린룸을 설치한 이후에도 공정 및 사용조건, 레이아웃 변경

에 따라 풍속을 자유로이 변경할 수 있고, 저소음 저진동으로 운전할 수 있다는 장점 때문에 지금까지 많이 적용되고 있다.

클린룸에서 사용되는 시스템 구성기기의 에너지 소비량 변동은 부하특성, 기상조건, 실내조건, 제조장치 부하, 공급되는 공기의 온도차, 각종 방해물에 의한 압력차이와 유지되는 청정도에 따라 매우 다양하게 나타나는 특징을 보이고 있으므로 장비 선정에 주의가 필요하다.

FFU를 포함한 현재 클린룸 시스템에서 운전되는 청정도 및 온습도 제어용 장비들은 에너지절약 개념까지는 도입하지 못하고 있는 실정이나, 향후 건설되는 클린룸이나 개보수 되는 클린룸은 에너지절약 개념 도입이 적극적으로 검토되어야 할 시점이라고 판단된다.

### 3.1 현존 기술의 취약점

국내의 클린룸 기술개발 관련 회사가 대부분 중소기업의 업체이며 기술력 보다는 원가에 치우친 과다경쟁 체제로 운영되고 있는 것이 기술발전과 관련한 가장 큰 취약점이라고 판단된다. 특히 사용자 측면에서는 고효율 저가의 유니트를 공급하여 줄 것을 요구하고 있지만 공급자 측면에서는 에너지절약의 고효율 유니트 개발의지 보다는 초기투자비 측면에서의 제조기술에 관한 투자가 우선함으로써 고효율의 FFU 기술개발을 저해하고 있는 실정이라고 사료된다. 따라서 지금까지는 중장기적 안목에서의 기술개발과 개발비 투자가 가져오는 성능개선 효과가 단기간에 가시적인 성과로 나타나기 어렵고 투자를 하더라도 개발비 회수 또한 쉽지 않으므로 기술개발의 참여도가 현저하게 저조한 실정이다.

아울러 최근에 들어오면서 현재 시행되는 관련법 및 제도상의 개선이 이루어짐과 병행하여 한시적인 기술개발의 발전이 아닌 미래 지향적인 시각이 선

행되어야 하며, 에너지 절약기술의 개발과 함께 고효율 시스템 적용이 기존 시스템에 접목되어 지속적으로 개선되어질 수 있는 발판이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

### 3.2 FFU Slim화 필요성

FFU의 높이변화에 따른 압력손실 변화를 검토하기 위하여 선정된 모델은 클린룸의 전체 길이가 90 m이고 천장에 설치되는 FFU는 전체 면적의 50%, FFU의 풍속을 0.4m/s를 기준으로 설정하여 클린룸 내의 전면풍속은 0.2m/s가 되도록 설정하였다.

그림 4.는 FFU가 천장에 설치되어 있는 모습을 나타낸 것으로 일반형 FFU를 설치할 경우는 유동 통로가 700 mm이고 100 mm 낮춘 고효율 초박형 FFU를 설치할 경우는 유동 통로가 800 mm라고 설정하였다.

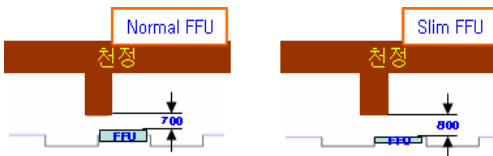


그림 4. FFU 설치 조건

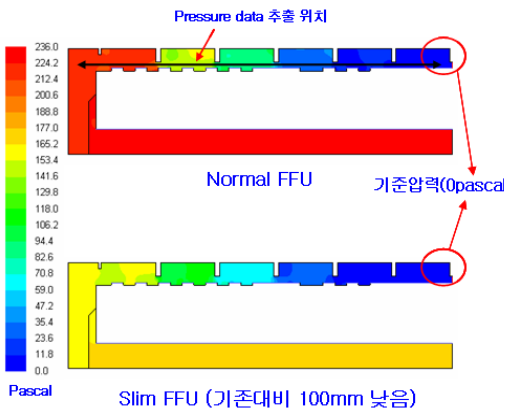


그림 5. Pressure contour

그림 5.는 표준형 FFU를 설치하였을 경우와 고효율 초박형 FFU를 설치하였을 경우의 수치해석 결과이다. 클린룸은 대칭 조건으로 가정하여 수치해석 시 길이를 45 m 로 설정하여 계산하였다. 상대적인 압력변화를 확인하기 위하여 가장 압력이 낮은 부분을 기준압력으로 설정하고 나타낸 pressure contour이다. 이 결과를 이용하여 위치에 따른 압력변화를 그래프로 표현한 것이 그림 6.이다. 이 그래프에서 알 수 있는 바와 같이 천장에서 의 압력손실은 FFU 높이 100 mm가 낮아짐에 따라 최대 약 60Pa 이상 줄어들 수 있으며, 이는 결국 FFU 시스템의 운전에너지 절감으로 나타나게 된다는 것을 확인할 수 있다.

### 3.3 기술개발시 에너지 절감 효과

지금까지 국내에서 운전되고 있는 반도체 제조분야의 클린룸은 약 30여개, FPDs 제조분야의 클린룸은 약 20여개, 의약품 제조분야를 비롯한 기타 중소규모의 클린룸이 약 30여개가 운영되고 있다고 추정된다. FPDs 제조분야의 클린룸은 대부분 난류방식을 채용하고 있으며, 반도체 제조분야에서는 대부분 단일방향류 방식의 클린룸을 적용하고 있다. 반도체 제조공장을 기준으로 대략적인 순환 풍

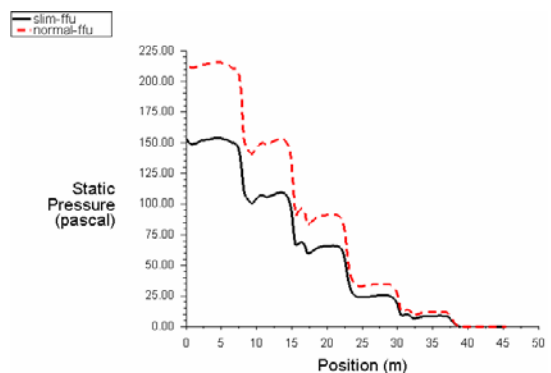


그림 6. Pressure data 추출위치에서의 압력

량을 검토하여 보면 다음 표 1.과 같이 나타난다.

표 1. 청정도에 따른 공조순환 횟수와 FFU 풍속  
(반도체 제조공장 기준)

청정도 class	기류 방식	순환 횟수 ( 회/Hr )	FFU 풍속 ( m/s )	비고
1	층류형	400 ~	0.35	
10		300 ~	0.25	
100		100 ~	0.2	
1000	난류형	60 ~ 80	-	

결국 순환 풍량이라는 것은 클린룸 내부 체적에 해당하는 풍량을 1 시간에 1번 순환하는 양이 순환 횟수 1회에 해당한다. 표 1.에서 나타나는 바와 같이 순환 횟수가 300 ~ 400회 정도 되므로 청정도 class를 유지하기 위하여 대량의 풍량이 필요한 시스템을 알 수 있다. 따라서 초기투자비 증가가 없는 상태에서의 클린룸 운전 에너지 20% 절감은 제조에 소요되는 비용절감이 되므로, 상대적으로 제조하는 제품의 원가를 그만큼 줄일 수 있고 원가 경쟁력도 높아지게 된다. 결국 고효율화된 클린룸 시스템은 제조사 측면에서는 해외수출이나 시장 판매에서 그만큼 원가경쟁력이 우수하게 되어 경제성이 뛰어난 시스템이라고 할 수 있다. 특히 2000년 이전에 건설한 클린룸에 설치된 FFU는 소비전력이 최근에 출하되는 1200×600(mm) 유니트 소비전력의 약 2배 정도가 되는 제품이 설치되어 있으므로 평균 소비전력을 기준으로 계산할 수밖에 없다. 따라서 아래의 단순계산을 참고로 한다면 많은 운전 에너지가 절약될 수 있음을 알 수 있다.

**(계산 예제 1 : 에너지 절감 효과)**

여기의 한 예로서 단순하게 반도체 제조공장에서 효율 증가에 따른 운전비용만을 계산하여 보기로 한다. 계산에 사용된 가정조건은 다음과 같다.

- ① 건물의 조건 : 클린룸 1동 FFU 설치수량 : 약 5,000대 기준
- ② FFU 사양 : 1200 × 600(mm)
- ③ FFU 1대당 평균 소비전력 : 160W
- ④ FFU 효율개선 목표 20%
- ⑤ 국내 반도체 제조공장 : 30개라고 가정하면,

따라서, 1년간 FFU 운전되는 소비전력을 P라고 하면

$$P = (160W \times 5,000\text{대}) \times (24h \times 365\text{일}) \times 30\text{개} \div 106 = 210,240 \text{ MWh}$$

효율 20% 증가시 운전비용 절감액 C 라고 한다면 (55원/kWh 적용)

$$C = [(210,240 \times 1000)kWh \times 20\%] \times 55\text{원/kWh} \div 106 \approx 2,312\text{백만원}$$

이 계산에서 나타나는 바와 같이 우리나라에서 운전되고 있는 클린룸에서 내부 환기를 담당하고 있는 FFU와 관련된 운전에너지는 효율 20% 증가될 경우 1년에 절약될 수 있는 금액이 약 23억원이 넘고 있음을 알 수 있다.

**(계산 예제 2 : 에너지자원 효과)**

운전에너지 절감에 따른 에너지자원 효과를 검토하기 위하여 우리나라 전체 클린룸 기준으로 가정된 조건을 다음과 같이 설정하였다.

현재 클린룸에서 운전되고 있는 FFU 크기는 1200×600×304(mm)이고 1대당 소비전력은 평균 160W, 전체 클린룸에 설치되어 운전되고 있는 FFU 수량은 10,000대이다. 이를 기준으로 여기에서 목표로 설정하고 있는 20%의 효율 상승시 운전 에너지 절약 효과를 계산하면 다음과 같다.

0.032kW×24h×365일/년×10,000대  
 ×2,500kcal/kWh×TOE/107kcal  
 ≒ 700.8 TOE/년

기준 단위인 FFU 10,000대당 절감효과가 약 701[TOE/년]이므로 국내 설치되어 있는 총 FFU 대수는 약 100만대이므로 국내 총 절감효과는 70,100[TOE/년]이 된다. 본 계산은 유니트 효율상승에 의한 단순 에너지 절감량에 의한 것이며 연동 제어에 의한 운전비 절감부분은 제외한 결과이다. 표 2.에서는 국내 FFU 수량산출 근거를 클린룸의 수량과 연계하여 나타내고 있다.

표 2. 국내 FFU 수량 산출 근거

분 야	FFU 설치수량	관련 근거
반도체 제조공장	210,000대	30개소 평균 약 7,000대/공장 (S 15개, H 13개, D 2개)
FPDs 제조공장	700,000대	20개소 평균 약 35,000대/공장 (S 8개, L 8개, B 4개)
기타 OLED공장	100,000대	50개소 평균 약 2,000대/공장 (K, S, L사 등)

#### 4. 고효율 초박형 FFU 시스템

FFU는 소형 팬(Fan)과 모터(Motor)가 하나의 케이스에 설치되어 제어기(Controller)에 의해 독립적으로 원하는 풍량을 처리할 수 있도록 구성된 것이다. FFU의 케이스 내/외부에 설치되는 부품들을 기준으로 살펴보면, Fan에 유입되는 공기의 흐름을 원활하게 하고 유동 저항을 최소화하기 위한 유선형의 벨마우스(Bellmouth), Fan을 통해 확산되는 공기를 일정한 유로를 통하여 압력을 형성하면서 흐를 수 있도록 하는 스페셜 하우징(Special housing) 또는 베인(Vane), 이들을 통해 나오는 공기의 흐름을 케이스 내부에 골고루 분포시키고 유

동을 원활하게 하여 장비의 효율을 높이고 소음을 줄일 수 있도록 설치하는 코너 플레이트(Corner plate)가 있다.

FFU에 사용되는 Fan은 개발 초기에는 Multi blade 방식이었으나 이후 효율증가를 위하여 Turbo Fan 중에서 Airfoil blade가 적용되어 왔다. 최근에는 Fan 설계기술과 제작기술이 발달함에 따라 Thin-Plate type의 blade를 가진 Turbo Fan들이 주로 사용되고 있다. 고효율 초박형 FFU는 이를 고정압 및 저소음화, 초박형화를 위하여 2.5D Lean Blade를 개발하여 적용하였으며, 적용되는 FFU의 사이즈도 1200x600(Φ410), 1200x1200(Φ460)(mm)까지 대응할 수 있도록 하였다. Motor 또한 일반용 AC Motor가 주류를 이루고 있는 내륜 구동형(Inner rotor type) Motor에서 동일 용량기준으로 고효율이면서 Compact한 외륜구동형(External rotor type) Motor 100W급을 개발하여 적용하였다. 그리고 천정 높이의 변화 등 환경의 변화에 의한 정압의 변화에 효과적으로 대응할 수 있도록 고효율의 속도 조절이 가능한 리니어 제어기를 채용한 특징을 가지고 있다.

FFU 시스템 고효율화 방안으로 여기에서는 유니트의 높이를 낮추어 천장 상부의 유동저항을 줄이는 방법을 선정하였다. 이 경우 그만큼 건물의 층고를 낮추거나 유동의 흐름을 원활하게 할 수 있어 동력에너지 절감할 수 있는 장점을 갖게 되므로 이 방법에 대하여 기술하고자 한다. 특히 기존 FFU의 효율이 매우 낮은 상태에서 10년 정도 운전된 노후 클린룸은 생산되는 제품의 변화와 클린룸 시스템 저효율화로 인하여 개보수의 필요성이 증대되고 있다. 이런 시장환경에 고효율 초박형 FFU 시스템을 적용할 경우 더 큰 에너지절약효과를 얻을 수 있다고 판단된다.

여기에서는 고효율 초박형(높이 약 200 mm) FFU 시스템의 성능특성과 슬림화에 따른 주요 구성품의 고효율 방법에 대하여 소개하고자 한다.

#### 4.1 FFU 높이 감소에 따른 성능변화

FFU의 구조 특성상 본체의 높이가 높을수록 내부 유동저항이 적게 발생하므로 운전 에너지 측면에서 유리하나 설치하였을 경우는 유니트 상부로 순환공기가 흐르는 공간이 줄어들므로 압력손실로 나타날 수 있다. 고효율 초박형 FFU 시스템은 높이가 낮으면서도 기존의 FFU 시스템에 비하여 효율을 증가시킬 수 있는 장비를 설계하는 기술이다. 여기에서는 동일한 Fan & Motor를 장착한 조건에서 유니트의 높이를 약 300 mm에서 250 (표준대비 -50 mm), 200(표준대비 -100 mm) 으로 낮아질 경우(스페셜 하우징의 높이는 유니트 높이와 조화시킴)의 성능변화를 검토하여 보았다.

그림 7.은 유니트 높이별 외형도를, 그림 8.은 유니트의 성능 실험장치인 Code tester의 외형도를 나타내고 있다. Code tester는 토출형의 풍동관으로 ASHRAE Standard에 맞추어 설계하였다. FFU의 높이 감소에 따른 성능 및 효율 변화를 확인하기 위해 동일한 팬, 모터를 적용하여 비교 실험한 결과, 그림 9.와 같이 높이 50mm 감소함에 따라 유량감소 뿐만 아니라 전압효율 또한 약 3~4% 정도 감소하는 것을 확인하였다.

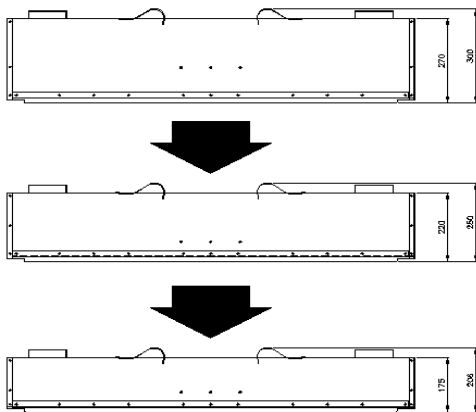


그림 7. FFU 높이 비교  
(위:H=300, 중간:H= 250, 아래:H=200)



그림 8. Code Tester (FFU 성능측정)

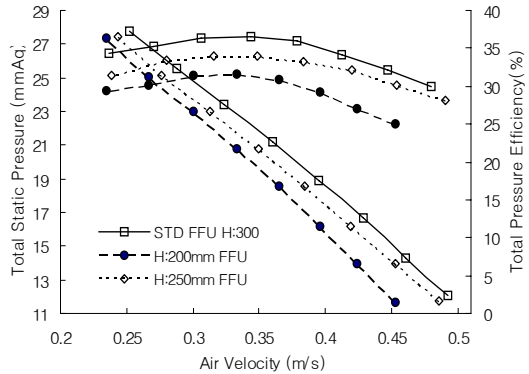


그림 9. FFU 높이에 따른 성능 및 효율

실험결과에서 나타난 바와 같이 유니트의 높이가 감소하면 내부의 유로가 좁아지면서 압력손실이 증가하여 효율이 낮아지는 결과를 보이고 있다. 높이 감소는 유니트 내부의 유속 증가에 따라 소음 및 진동에도 악영향을 미치게 되므로 최적설계를 통하여 팬 및 모터의 고효율화 및 유니트 최적설계를 통한 효율개선이 추가로 진행되어야 함을 확인할 수 있다.

#### 4.2 스페셜 하우징 형상 변경에 따른 성능 및 효율 변화

스페셜 하우징의 개략도를 그림 10.에 나타내고



있다. 그림에서 보는 바와 같이 팬에서 형성된 기류가 중앙부분에서 측면으로 이동할 때 스크롤을 지나면서 압력을 형성시킨다. 이 기류를 양쪽 길이 방향으로 유닛 내부에 고르게 분포되도록 유도하는 장치가 스페셜 하우스징이다.

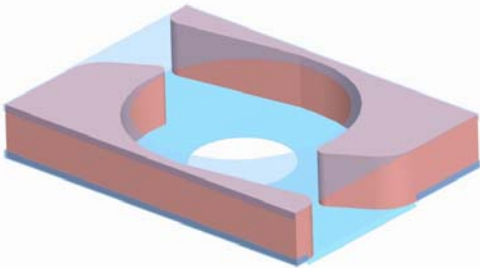


그림 10. 스페셜 하우스징 개략도

그림 11.에서 그림 13.까지는 Special Housing의 형상을 최적화하기 위해 초기 설계한 자료를 기준으로 수치해석한 결과로서 각 부분의 압력 및 속도 분포를 나타내고 있다. Special Housing의 수치해석은 스크롤 형상 표면에서의 압력 포켓이 발생하는 부분을 개선함으로써 유동저항을 줄여주는데 많은 도움을 주었다.

스페셜 하우스징의 내부 스크롤 형상을 최적화하기 위하여 스페셜 하우스징 형상을 2방향 하우스징 3종,

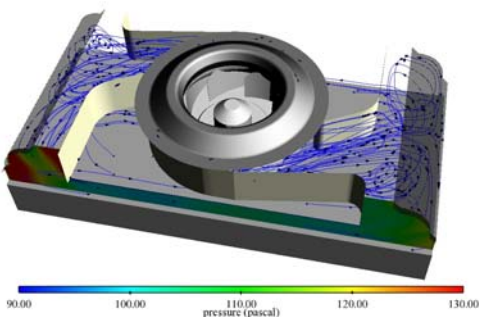


그림 11. S/H 압력/속도 분포

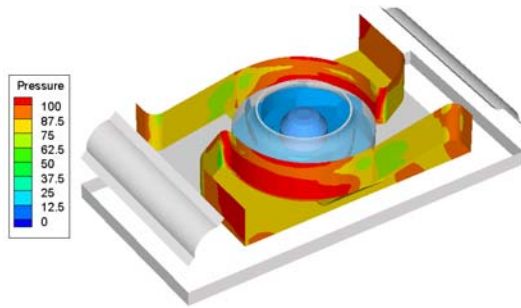


그림 12. S/H 표면에서의 압력분포

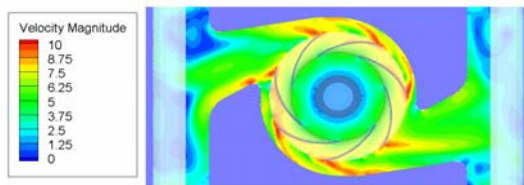


그림 13. S/H 수평단면 속도분포

큰 형상 구조물 2종을 제작하여 모두 8가지 경우에 대해 실험을 실시하였다. 성능측정은 2방향 하우스징 형상 변화에 따른 회전수별 압력, 풍량, 소비전력, 소음 값을 측정하는 것으로 진행하였고, 정밀한 성능 측정을 위하여 필터를 제외하고 유닛을 구성해 측정 하였으며, 압력 변화는 2~3mmAq 간격으로 풍량 및 소비전력을 측정하였다. 그림 14.와 15.는 실험에 사용된 스페셜 하우스징 시작품 및 이동식 콘 형상이다.

실험 내용은 먼저 2방향 스페셜 하우스징 유무에 따른 성능 특성을 알기 위해 팬과 FFU 케이싱만으로 구성된 시료를 대상으로 성능 측정을 실시하였다. 다음으로 일정한 출구각 및 출구 면적비를 갖으며 Cut-off의 위치 및 2방향 스페셜 하우스징의 입구 반경을 변화시킨 3종의 시료를 대상으로 실험을 하였다. 또한, 동일한 스페셜 하우스징 반경을 유지하면서 출구 면적 및 Cut-off의 위치를 변화시키며 3종의 시료에 대해 성능 측정을 수행하였으며, 끝으로



그림 14. 2방향 스페셜 하우스 시료형상



그림 15. 실험에 사용된 이동식 콘 형상

실험 결과를 토대로 고정압용 2방향 스페셜 하우스에 적합하다고 판단되는 구조물을 추가하여 실험을 실시함으로써 2방향 스페셜 하우스 설계 방향을 확인하였다.

그림 16.과 17.은 2방향 스페셜 하우스(S/H) 유/무에 따른 FFU의 성능을 풍량 대비 압력 및 효율로 나타낸 것으로서 그림에서 알 수 있듯이 2방향 스페셜 하우스 유/무에 따라 FFU 성능이 변화되는데, 압력이 높을수록 성능 차이가 확연히 나타남을 알 수 있다. FFU가 높은 압력 조건에서 작동될 때 2방향 스페셜 하우스는 매우 중요한 요소로 작용하게 된다.

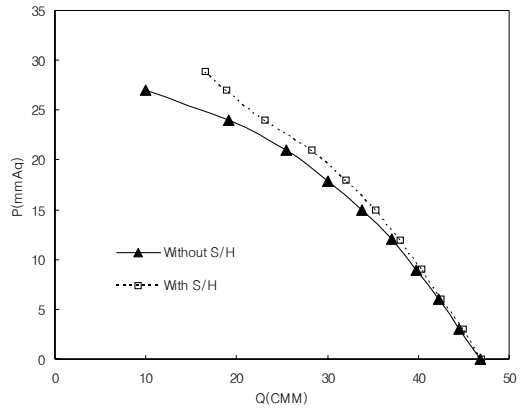


그림 16. S/H 유/무에 따른 압력-유량 곡선

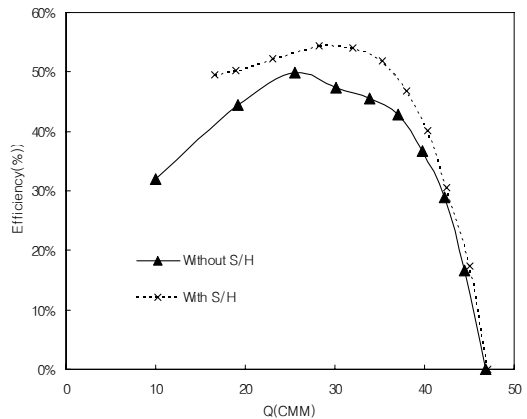


그림 17. S/H 유/무에 따른 효율-유량 곡선

여러 가지 실험조건별로 수행한 결과 Cut-off 간격이 증가함에 따라 2방향 스페셜 하우스의 반경을 일정하게 유지하면서 커지는 것은 FFU의 외형 크기가 한정되어 있으므로 적용하기가 어려우므로 스크롤의 형상을 일부 축소하여 최적화하는 방법을 선정하였다. Cut-off의 위치에 따라 토출구의 크기가 결정되므로 이 변수 또한 성능 변화에 매우 민감하게 반응하는 결과를 보였으므로 풍량 조건에 따른 최적의 크기를 선정하였다.

### 4.3 Inner rotor type 모터와

#### External rotor type 모터

유니트의 높이를 낮출 경우 Fan의 높이 또한 제한적으로 사용될 수밖에 없다. 따라서 기존의 Turbo type Fan으로는 가운데 돔(Dome)을 설계하고 하부에 모터를 설치하여야 하므로 높이를 줄이는데 한계가 있어 모터 방식을 외륜형(External type)으로 설계하였다.

그림 18.에는 Inner rotor 모터의 형상, 19.에는 External rotor 모터의 형상을 보여주고 있다. External rotor 모터는 회전력 발생 방식에서는 Inner rotor 모터와 다르게 회전체가 모터 외부로 노출되어 회전하기 때문에 설계, 제조 기술이 Inner rotor 모터에 비하여 일부 상이하다. 그러나 2가지 모터가 공통으로 농형 유도 전동기 제조 기술에 기반을 두고 있기 때문에 기존 설비를 이용할 수 있다는 장점이 있다. 그리고 External rotor 모터의 기본 개념은 Rotor가 모터외곽에 노출되기 때문에 Rotor die casting 금형은 Pin point type의 금형으로 진행하고 Die casting machine은 기존 설비를 이용할 수 있다. 그리고 Motor size가 축소되고 축량이 경량화 된다.

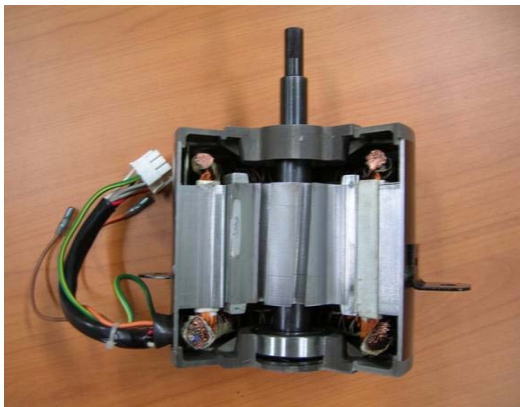


그림 18. Inner rotor 모터 구조

External rotor 모터의 효율은 코일의 적층 변경, 코어 외경 증가 및 공극 조절을 통하여 증가시키도록 실시하였다.

### 4.4 고효율 Fan

유니트의 높이가 낮아짐에 따라 내부에 적용되는 부품들도 슬림화, 고효율화가 되어야 한다. Fan의 특성상 높이 대 직경의 비율이 작아질수록 성능은 점점 저하되는 특성을 가지고 있다. 그러므로 Fan의 슬림화, 고효율화를 위하여 새로운 모델의 팬 설계를 진행하였으며 날개는 기존의 2차원 Sheet metal 방식으로는 성능을 얻기 어려우므로 2.5차원 형상의 블레이드를 적용하였다. Fan의 설계 조건은 전압 19.5mmAq, 회전수 1050RPM일 때 처리풍량 17.5CMM이 되도록 설정하였다.

본 해석에서는 PRO/Engineer Wildfire V2.0을 이용하여 2.5차원 터보팬 내부의 유동영역을 모델링 하였으며, ANSYS CFX-Mesh Tool을 사용하여 격자생성을 수행하였다. 입구부는 벨마우스가 설치된 Round 형상으로 모델링 되었으며, 특히 벨마우스와 팬 입구의 간격(Tip clearance)을 3 mm 선택하여 실제 운전 시 나타날 수 있는 입구부에서



그림 19. External rotor 모터 형상

의 유동현상을 정밀하게 고려하였다. 유동영역 내 격자생성은 복잡한 형상에 적합한 비정렬격자(Unstructure grid)로 선택하였으며 Fan 벽면에서의 경계층 형성을 고려하여 Prism Mesh를 일부 도입하였다. 특히 큰 압력변화가 예상되는 영역에서는 그림 20.에서 보는 바와 같이 좀 더 조밀한 격자를 형성시켜 설계된 Fan 내부의 유동특성을 정밀하게 해석할 수 있도록 하였다.

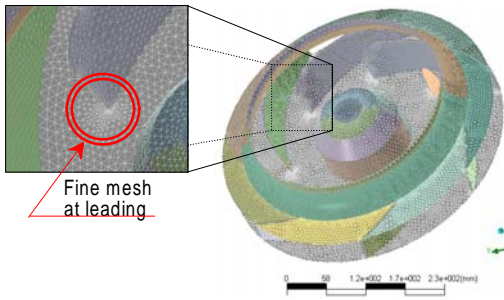


그림 20. Surface mesh generation

그림 21.에서는 유량(17.5CMM), 회전수(1050RPM)인 설계점에서 계산된 전체 유동흐름을 Streamline을 통해 개략적으로 나타내고 있으며 내부유동에서 형성되는 2차 유동에 대한 특성을 정밀하게 보여주고 있다. 유동해석을 통하여 흡입부분의 곡률반경 개선 및 날개

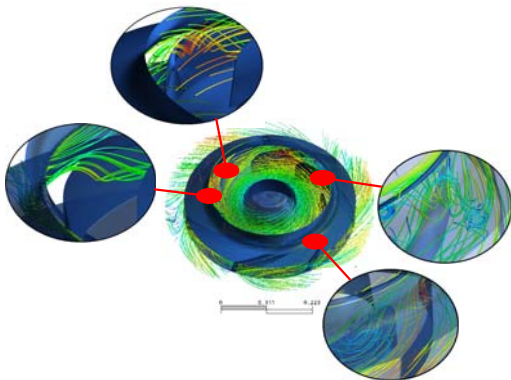


그림 21. 팬 내부 통과하는 streamline과 2차 유동특성

의 경사각도 등을 개선하여 고효율화 하였다.

그림 22.는 최종 설계하여 개발된 2.5차원 형상의 블레이드를 갖는 Fan의 형상으로 (a)는 상부에서 본 모양이며, (b)는 측면에서 본 모양을 나타내고 있다. 이 형상은 기존의 모터를 사용할 수 있도록 돔의 형상을 살려 설계된 형상이며, External rotor 모터를 사용할 경우는 사진에 나타나는 바와 같이 가운데 돔 부분이 제거된 주판을 적용하도록 설계하였다.



(a) Plan view



(b) Side view

그림 22. 2.5차원 Fan 시작품



#### 4.5 고효율 초박형 FFU

FFU의 고효율화는 각 부품의 성능 최적화를 통하여 1차 개선한 다음 유니트에 설치하여 시스템 최적화를 실시하였다. 전술한 각 부품의 최적화 과정을 통하여 제작된 제품을 유니트에 적용할 경우 나타나는 성능 변화를 확인하기 위하여 조립된 상태에서 유동해석(streamline)을 실시하였다. 그림 23.은 수치해석한 결과 유선(streamline)의 평면을, 그림 24.는 유선의 단면을 나타낸 것이다. 이 과정에서 나타난 수치해석 결과를 이용하여 각 조건에 따른 유속분포 및 하부에서의 기류분포 등을 개선하였으며, 시작품을 제작하여 성능실험을 수행한 다음 수치해석결과와 실험결과를 비교검토 하였다. 최적설계를 통하여 보완된 최종 유니트는 그림 25.에 나타내고 있다.

2004년 미국의 SEMICON West에서 LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory)의 Tengfang Xu 박사가 FFU의 EPI(Energy Performance Index)를 측정하여 발표한 자료를 참조해 보면, 1200× 600(mm) 유니트인 경우 기외정압 125Pa인 조건에서 평균 약 11.3W/CMM, 1200× 1200(mm) 유니트인 경우 기외정압 125Pa인 조건에서 평균 약 8.0W/CMM이라고 발표하였다.

고효율 초박형 FFU 시스템의 사양은 유니트 높이 200 mm, 기외정압 9mmAq인 조건에서 처리풍속 0.4m/s, 소비전력은 7.6W/CMM, 소음 53dB(A)를 실현하였다.

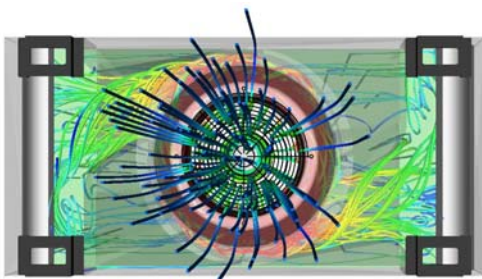


그림 23. Streamline of FFU (평면)

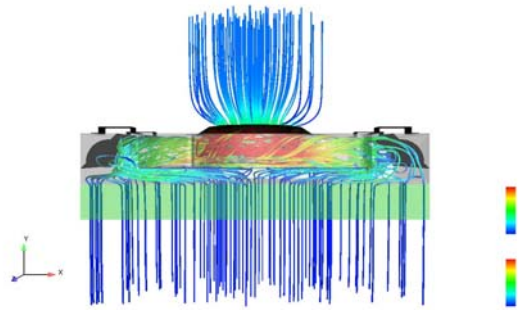


그림 24. Streamline of FFU (단면)



그림 25. 고효율 초박형 FFU 최종 시작품

향후 고효율 FFU 시스템에서 추가로 개선되어야 할 사항은 제어기의 수동형 용량가변 방식을 원격제어가 가능한 방식으로 보완하여 통합 제어 및 감시가 가능할 수 있도록 하는 것이다.

#### 5. 맺음말

최근 지속되는 고유가시대를 맞이하여 에너지 문제가 산업발전의 장애요인이 되고 있다. 우리나라에서 그 동안 반도체나 FPDs 제조분야의 클린룸 사업은 우리 경제의 양적 성장세에 눌러 에너지절약적인 측면 보다 초기 투자비 절약 측면을 강조하면서 빠른 팽창을 거듭해 왔다고 볼 수 있다. 이제는 국제적 환경의 변화와 고가 에너지 시대의 요구에 따라 초기 투자비뿐만 아니라 적용되는 시스템 및 부품들을 고효율화하여 운전에너지 절약측면도

함께 고려되어야 할 때이다. 그렇게 함으로서 클린룸 사업은 이제 더 이상 에너지 다소비산업이라는 불명예를 벗어나야 할 때라고 생각된다.

본 고에서는 지금까지 변화되어 온 클린룸 시스템의 특징을 종류별로 검토하였고, 클린룸 시스템에 적용되는 FFU의 높이에 따른 성능변화를 예측한 다음 이를 극복할 수 있는 고효율 초박형 FFU에 대하여 검토하여 보았다.

향후 클린룸 분야는 기본 설계단계에서부터 초기투자비 뿐만 아니라 고효율 제품의 선정을 고려함으로써 운전에너지를 절약할 수 있는 방안으로 적극 추진할 수 있어야 할 것으로 판단된다.

\* 본 과제는 산자부가 주관하고 에너지관리공단이 지원한 에너지자원기술개발사업으로 수행한 결과입니다. 지원에 감사드립니다.