

클린룸 분야에서의 수치해석 기법 활용

김동권 | (주)신성이엔지 기술연구소
 과장
 E-Mail : kimdk@shinsung.co.kr

1. 서 론

최근 액체나 기체의 흐름, 또는 열과 물질이동문제를 다루는 수치 시뮬레이션 기술(CFD)이 여러 분야에서 이용되고 있다. 공기청정의 분야에서도 각종 기계내부의 흐름과 실내/외에 걸친 오염물질의 확산을 예측하는 등의 목적으로 기류시뮬레이션이 적용되고 있다. 특히, 기류 설계가 중요한 비중을 차지하는 클린룸 설계에는 설계 초기 단계에서부터 사전 성능예측 등을 목적으로 기류 시뮬레이션을 실시하는 예도 증가하고 있다. 그러나 클린룸의 설계에서부터 시공, 적용까지의 각 단계에 걸친 기류 시뮬레이션 결과를 유효하게 활용하기 위해서는 목적에 맞게 그 각각을 연구할 필요가 있다.

2. 계획/설계단계에서의 시뮬레이션 기술의 활용

클린룸은 기류방식에 따라서 단일방향류 방식, 비단일방향류 방식 및 혼합형 방식 등으로 나눌 수 있다. 비단일류 방식은 난류형과 치환형이 있다. 비단일류 방식은 일반적으로 난류형이라 불리는 기류 방식으로 필터를 곳곳에 설치하여 공기가 여러 곳으로부터 유입된다. 필터는 등 간격 또는 중요한 작업영역에 중점적으로 배치된다. 필터의 흡입구와 배치 방법에 따라 기류는 자연스럽게 난류가 된다.

여기서는 편의상 비단일류 방식을 난류형이라 부르고 한다. 혼합형 방식은 단일방향류와 비단일방향류가 칸막이나 벽이 없이 혼재하는 경우, 이 유동장 전체의 기류형상을 혼류라고 부른다. 단일방향류는 일반적으로 층류형으로 불리는 기류 방식이며 피스톤류와 같이 오염입자를 배출하는 방식으로 수평형과 수직형이 있으나, 주로 수직형이 많다. 기류는 상부의 HEPA 또는 ULPA 필터를 통하여 토출되어 측벽이나 하부의 A/F를 통하여 순환된다. 이러한 클린룸의 성능평가 지표로서 가장 중요한 것은 청정도 클래스이나, 청정도는 오염의 발생량과 클린룸 기류에 의한 오염 제거 효과 등의 복합적인 작용에 의하여 결정되는 수치이기 때문에 실제 평가대상인 클린룸에서 입자개수 농도를 실측하지 않으면 올바른 평가를 할 수 없다. 따라서 클린룸을 계획, 설계 하는 단계에서는 성능 평가할 대상이 존재하지 않기 때문에 일반적인 설계식 또는 경험치를 이용하여 설계하게 된다.

다음은 시뮬레이션 기술을 이용하여 설계단계에서 클린룸의 성능을 평가할 수 있는 방법 및 운영 단계에서 성능을 개선하는 방법을 소개하고자 한다.

2.1 비단일방향류에서의 성능 평가

일반적으로 클린룸이 운전되는 동안 클린룸 내에서 발생하는 오염입자는 정상상태로 발생하지

않으며, 쉽게 규명되지 않는 다양한 입자 발생원으로부터 순간적으로 또는 불연속적으로 발생된다. 클린룸 내에서 순간적으로 또는 일정 시간 동안 발생된 오염입자의 전파특성을 분석하여, 클린룸의 동적 특성을 규명하기 위해서는 비정상상태의 오염입자 농도장 해석이 필요하다. 순간적으로 또는 일정 시간 동안 입자가 발생된다는 가정은 실제 클린룸 내의 오염입자 발생구조를 비교적 근접하게 묘사하는 방법 중 하나이다. 이러한 상황에서 클린룸의 청정도 회복성은 발생된 오염입자를 청정공간 밖으로 얼마나 빨리 배출시키는 가로 평가할 수 있다.

공기령(空氣齡)은 대상공간내의 임의의 개소에 존재하는 공기가 공간에 공급된 후부터 그곳에 멈추기까지 어느 정도 시간이 경과했는지를 표시하는 것으로 시간의 단위를 특성치로 한다. 신선한 공기(클린룸의 경우 클린에어)가 공급되는 공간에는 공기령이 작을수록 작업 영역이 오염될 가능성이 작아지며, 반대로 공기령이 큰 영역일수록 배기에 의한 치환이 잘 이루어지지 않는 것으로 판단할 수 있다. 또한 배기성능 평가지표(SVE)는 실내에 걸친 오염물질의 확산을 3차원 분포 계수로 정의하는 경우로 SVE-1~6이 제안되고 있다.

SVE-1은 임의의 오염원 위치에 대한 실내 무차원 평균 농도분포를 나타낸다.

$$SVE1(X_S) = C_0(X_S)/C_S \quad (1)$$

여기서, $C_S = q/Q$,

$$C_0(X_S) = \int_{V(X)} C_X(X_S, X) dX$$

$C_X(X_S, X)$: X_S 는 오염원의 위치, 오염 발생량 q , 환기량 Q , X 는 농도 표시 위치

SVE-2는 임의의 오염원에서 발생한 오염의 평

균 확산 반경 분포를 나타낸다.

$$SVE2(X_S)^2 = \int_{V(X)} \{X - X_G(X_S)\}^2 \cdot C_X(X_S, X) dX / C_0(X_S) \quad (2)$$

여기서,

$$X_G(X_S) = \int_{V(X)} X \cdot C_X(X_S, X) dX / C_0(X_S)$$

$X_G(X_S)$: 오염 농도 분포 중심(1차 모멘트를 0차 모멘트로 표준화)

SVE-3는 취출 신선 공기의 평균 도달 시간을 의미한다.

$$SVE3(X) = C_X'(X) / C_S \quad (3)$$

여기서, $C_X'(X)$ 실내 오염 발생량 q 에 대한 X위치에서의 농도 분포

SVE-3으로 정의된 수치는 실내 공기령을 명목 환기시간(환기회수의 역수)으로 정량화 한 것, 혹은 일정량의 오염 발생을 가정하였을 때 오염물질의 농도를 매시 일정발생량으로 정규화한 것으로, 기류시뮬레이션을 이용하여 용이하게 구할 수 있다.

대상 공간에서의 SVE-3의 평균치(이하 SVE-3로 표시한다.) 값은 이상적인 혼합기류의 경우에는 1.0, 피스톤류의 경우 0.5가 된다. 오염물질이 치환되기 어려운 영역이 증가할수록 SVE-3의 값은 크게 된다. 이것은 유동영역이 갖는 오염 제거 성능을 SVE-3로 정량화하는 것이 가능하다는 것을 나타낸다.

앞서 말한 바와 같이 청정도가 오염의 발생량과 오염제거 성능 등에 의해서 종합적으로 결정되는

수치인 것에 반하여 SVE-3는 임의의 오염원에 대한 오염제거 성능만을 평가대상으로 한 수치이다. 표 1에 표시한 지표로는 오염의 발생율, 발생개소에 관계없이 대상 클린룸의 성능을 예측하고 평가하는 것이 가능하게 되어 사전 검토에 적합하다. 또 SVE-3는 대상공간의 성능이 단 하나의 수치로 표현되기 때문에 클린룸의 가로세로비(aspect ratio)나 급/배기구 위치 등의 설계조건을 변수로 한 경우 모두에 대하여, SVE-3가 어느 정도 변화하는가를 검사하는 것으로 용이하게 설계의 적정성 여부를 판단할 수 있다.

2.1.1 클린룸 실내 환기설계 검토

실내환기설계는 (1)환기량, (2)실내에 발생한 오염의 효과적 배기, (3)청정공기의 효과적 배분 등의 각 관점에 기초하여 행해진다. (2), (3)에 관해서는 실내기류나 실내의 발생한 오염물질의 분포상태가 문제가 된다. 이것에 대한 많은 실내기류분포의 해석법이나 예측법에 관한 연구 그리고 오염확산에 관한 해석과 예측법에 관한 연구가 진행되고 있다. 또 이러한 기류분포 및 오염의 농도분포 분석으로부터 실내의 환기효율을 정의하고, 그 분포를 고찰하려 하는 시도가 이루어지고 있다. 기류분포를 일종의 BLACK BOX로서 배출연령분포계수를 구하여 실내의 오염 확산을 해석하는 연구방법도 있다. 그러나 실내기류의 상세한 측정을 가능하게 하는 계측기의 개발과 실내기류 분포를 계산할 수 있는 수치해석기법의 개발로 인해 현재는 실내기류분포를 포함한 실내오염확산 해석이 가능해졌다. 오염해석에서 종종 구해지는 농도분포는 (1) 오염발생 지점 근처의 농도 고저로부터 그 지점근처의 환기상태의 불량 여부를 아는 것이 가능하다.

(2) 실내전체에 대한 오염의 분포정보를 구체적으로 고려하여 그 분포 패턴으로부터 실내의 환기

표 1. 클린룸의 평가 지표(SVE-3)

	단일방향류	비단일방향류
Good	< 0.7	≤ 1.0
개선 필요	0.7 - 1.0	1.0 - 1.5
적용 불가	> 1.0	> 1.5

특성(오염이 정제하는 경우, 오염이 빨리 배출되는 경우, 등등의 환기효율 분포)을 추정할 수 있다.

SVE-3에 의한 기류성능 평가는 이러한 각종 설계조건이 기류성능에 미치는 영향을 하나하나 검사하는 것이 가능하기 때문에 최적의 설계조건을 결정하는 것이 가능하다.

2.2 단일방향류에서의 성능 평가

단일방향류에서 수직 층류형 클린룸인 경우 수직방향의 기류유동에 의해서 발생된 오염은 하부로 확산된다. 이때 오염입자의 확산은 다른 요인이 없으면 유동의 대류에 의해서 지배를 받게 되므로 콘모양을 형성하게 된다. 클린룸에서 이러한 상황이 발생하였을 때 비교적 좁은 영역에만 오염을 발생시키고 하부로 배출하기 위해서는 기류의 제어가 필요하게 된다. 이것이 클린룸 내부의 기류유동이 수직방향으로 평행성을 유지해야 하는 이유가 된다. 미국연방규격 209D에서는 이러한 확산각을 14° 이내로 제한하고 있다. 만약 이러한 발진이 있을 때 오염의 확산영역 내에 제품의 생산 공정이 놓이게 되면 오염을 피할 수 없게 된다. 이러한 오염 패턴에서 클린룸의 수직하향 기류유동을 교란하여 난류화 하는 요인이 존재하게 되면 쉽게 파괴되어, 국부적인 오염영역에서 입자들의 상대적인 잔류시간이 길게 되고, 확산에 의해서 그 오염영역을 확장하게 된다. 따라서 클린룸에서 필터를 통하여 유입되는 공기의 청정도가 Class 1이라 할지라도 앞서 말한

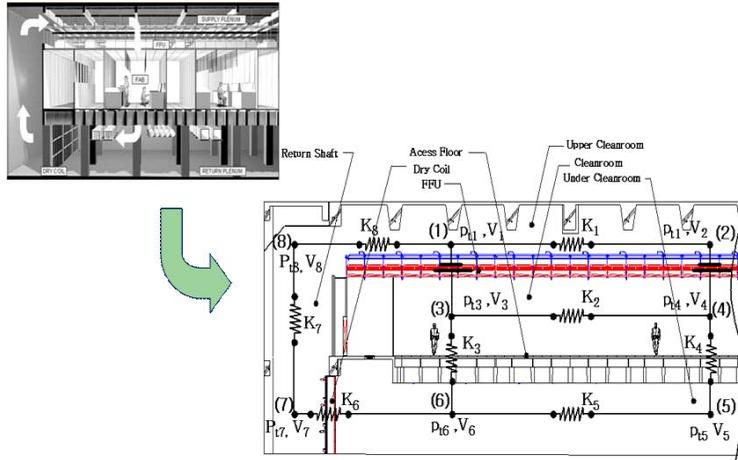


그림 1. 클린룸 기류 회로도

여러 요인들로 인하여 오염이 일어나 Class 100~1,000의 상태로 C/R을 빠져나가게 된다. 그래서 클린룸내의 기류분포를 항상 정확히 파악할 필요가 있다. 특히 입자경이 작아짐에 따라서 입자의 체적에 대한 표면적의 비율이 증가하므로 입자의 부착력이 강해지게 된다. 한편 정전기에 의한 입자 부착도 입자경이 작을수록 일어나기 쉽다. 따라서 미소 입자는 부착되기 쉽고 제거하기는 어렵다. 그래서 입자의 발생을 억제함과 동시에, 부착되지 않도록 발진원과 제품과의 상호 위치관계 및 기류제어가고 청정화를 위한 중요한 기술이 된다. 그래서 종래보다도 정밀한 클린룸 및 국소청정공간 내부의 기류제어가 요구된다.

클린룸의 면적이 넓어짐에 따라 클린룸 내부의 기류가 수직층류를 유지하기가 어려워진다. 특히 클린룸의 리턴샤프트간의 거리 및 하부 층고는 클린룸의 기류를 형성시키는데 매우 밀접한 관계가 있다. 그러나 일반적으로 이러한 것들은 기류의 측면에서 설계되기 보다는 다른 요인들에 의해서 결정되어 설계된다. 그러므로 최선의 방법은 현재 상

태의 클린룸 조건에서 최대한 수직 층류를 유지하는 방법을 찾아내서 적용하는 방법이라 생각된다. 특히 부분적인 기류의 제어도 중요하지만, 생산 장비 가동 전 초기에 전체적인 클린룸의 기류 균형을 형성하는 것이 더욱 중요하다. 그러므로 이러한 근본적인 기류 제어의 원리 및 방법을 찾아내서 적용하는 기법을 개발하는 것이 매우 중요하다.

2.2.1 클린룸 편류

클린룸에서의 기류 특성은 압력, 유속 및 유동 저항으로 나타낼 수 있다. 에너지 방정식에 대한 경험적인 손실항은 다음과 같은 식 (4)의 형태로 표현된다.

$$\Delta p_t = \left(p_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} \right) - \left(p_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} \right) = K \frac{\rho V^2}{2} \quad (4)$$

클린룸 내부의 유동은 대부분 발생하는 손실이 복잡하여 간단하게 함수화 할 수 없다. 벽에서 마찰에 의한 열로의 변환, 유동장 형상의 급격한 변화 및 급속한 가속 또는 감속에 의해서 야기되는 내부 유체 전단 응력 등은 에너지의 손실을 초래한다.

그림 1은 FFU방식 수직 층류형 클린룸에서 기류의 흐름 및 저항을 나타낸 개념도이다. 여기서 등가 회로는 기류흐름과 유동손실을 단순화하여 나타낸 것이다. 기류는 등가 회로를 따라서 순환하며 도중에 유동 저항 및 마찰로 에너지를 손실하게 된다. 이 손실은 최종적으로 FFU의 기외정압으로 나타나게 된다. 여기서 기외정압이란 FFU의 흡입구와 출구 간에 발생하는 압력 차를 나타낸다. 따라서 유동 손실이 클수록 클린룸 시스템의 기외정압은 커지게 된다.

클린룸 시스템의 순환 기류는 각기 다른 경로로 유동하므로 각기 다른 에너지 손실량을 갖게 된다. 따라서 클린룸 내부에 발생하는 압력 또한 각각 다르게 된다. 클린룸 내부에서는 이러한 지역간의 압력 차이에 의해서 편류가 발생된다. 여기서 편류란 FFU에서 클린룸으로 공급된 기류의 방향이 수직 방향으로부터 이루는 각도를 의미한다.

클린룸에서 기류 경로는 크게 3가지로 가정하였으며, 각각의 경로는 다음과 같다. (A) : 가장자리

(리턴 샤프트 부근)를 유동하는 기류, (B) : 클린룸의 중심부를 유동하는 기류 와 (C) : 중심에서 가장자리(리턴 샤프트)방향으로의 편류이다.

각각의 경로에서 발생하는 손실을 나타내면 다음과 같다.

$$A: p_{A1} = p_B - K_3 \frac{\rho(V_3 + V_2)^2}{2} - (K_6 + K_7 + K_8) \frac{\rho V_8^2}{2} \quad (5)$$

$$B: p_{B2} = p_{A1} - (K_4 + K_5) \frac{\rho(V_4 - V_2)^2}{2} - (K_6 + K_7 + K_8) \frac{\rho V_8^2}{2} - K_1 \frac{\rho V_4^2}{2} \quad (6)$$

$$C: p_{C2} = p_{A1} - K_2 \frac{\rho V_1^2}{2} - K_3 \frac{\rho V_6^2}{2} - (K_6 + K_7 + K_8) \frac{\rho V_8^2}{2} - K_1 \frac{\rho V_4^2}{2} \quad (7)$$

단, V_2 의 기류 방향은 리턴 샤프트쪽임

만일 FFU를 동일한 풍속으로 그룹 제어하면 지역간의 풍속 차이를 무시할 수 있으므로 식(7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

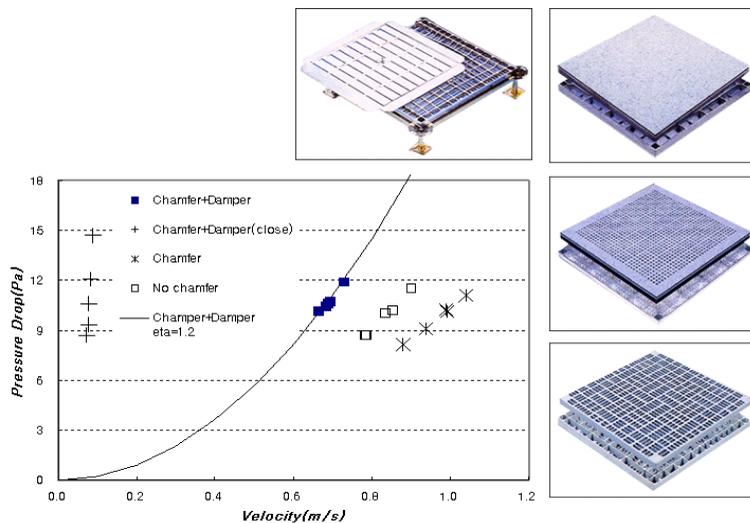


그림 2. 약세스 플로워의 차압곡선

$$K_3 = K_4 + K_5 \quad (8)$$

식(8)에서 K_3 , K_4 는 악세스 플로워의 손실 계수로 식(9)에서 계산되며, K_5 는 하부 클린룸의 손실계수로 수치해석을 이용하여 구할 수 있다. 그러므로 하부 클린룸의 손실계수만 계산하면 악세스 플로워의 개구율 분포를 구할 수 있게 된다.

그림 2는 실험으로 구한 18%인 개구율을 갖는 다공판의 통과풍속에 따른 압력 손실(P-Q Curve)을 나타낸다. 여기서 악세스 플로워에 걸리는 차압은 식(9)와 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta p_t = \xi \frac{\rho V_{af}^2}{2} = \xi \frac{\rho}{2} \left(\frac{100 V_{aw}}{PP} \right)^2 \quad (9)$$

하부 클린룸에서 발생하는 손실은 유동 단면적 확대에 의한 손실, 벽면 마찰에 의한 손실 및 기타 내부 구조물의 유동저항에 의한 손실로 볼 수 있다. 이러한 손실들은 복잡하여 정확히 예측하기 어려우므로 어느 정도 오류를 감수하더라도 경험적인 수치를 사용하게 된다. 그러나 최근에는 수치 해석 기술의 발달로 설계 단계에서 편류를 예측하여 설계를 개선 할 수 있다.

2.2.2 해석 사례

클린룸의 편류를 발생시키지 않기 위해서는 식(8)을 만족시키면 된다. 식(8)을 만족시키는 조건을 찾기 위해서 먼저 이상적인 상태에 대한 해석을 수행하게 된다. 즉 편류가 없는 상태로 가정하여 하부 클린룸에 걸리는 압력을 계산한다. 이때 계산에 사용되는 입구는 악세스 플로워가 되며 입구 속도조건으로 FFU의 토출 풍속값을 사용한다. 클린룸이 일정한 양압을 유지한다고 가정하여 클린룸과 하부 클린룸간의 압력차를 계산한다. 앞에서 계산한 클

린룸과 하부 클린룸과의 압력차를 식(9)에 대입하면 클린룸의 개구율 분포를 구할 수 있다. 구해진 개구율 분포를 전체 시스템 해석에 적용하면 기류의 편류도 및 클린룸에 설치된 장비가 클린룸의 편류에 미치는 영향을 알아 볼 수 있다.

FFU방식 수직 층류형 클린룸은 일반적으로 좌우 대칭 형태로 설계된다. 그림 3은 수치계산에 사용된 3차원 모델 클린룸 시스템으로 대칭조건을 적용하였다. 모델 클린룸의 길이는 대칭면까지의 거리가 45m, 폭은 24m, 하부 클린룸의 층고는 3m, 클린룸의 층고는 4m, 상부 클린룸의 층고는 3m이다.

클린룸 내부의 장비배치는 임의로 배치하였으며, 장비의 높이는 임의로 2m 또는 3m로 하였다. 폭 방향의 중심부에 양쪽 리턴 샤프트를 향하여 길이 방향으로 AGV가 다니는 통로(폭 2.4m)가 있으며, 몇 부분에 이동 통로들을 설치하였다. 전체 클린룸 면적에 대한 장비의 설치 면적비는 약 42%이다. 클린룸 상부에 설치된 FFU 및 클린룸 하부의 악세스 플로워의 단위 크기는 2.4m x 2.4m로 모델링하였다. 여기서 해석모델링상의 2.4m x 2.4m의 악세스 플로워면은 0.6m x 0.6m 악세스 플로워 판별 16매의 평균 특성을 나타낸다.

클린룸의 유동은 난류유동이며 등온장으로 가정하였다. 난류모델로는 표준 k-e 난류 모델을 사용하였으며 벽조건은 벽함수(wall function)를 적용하였다. 3차원 격자계에서 해석 시간의 단축 및 해석 결과의 정확성을 높이기 위하여 해석 영역을 6면체 격자를 이용하여 분할하였다.

해석에 사용된 가정조건들은 다음과 같다.

- a. 폐회로 시스템으로 외기의 도입은 무시하였으며, 외부로의 누설 및 배기를 무시하였다.
- b. 클린룸 천정에 설치된 FFU는 가장 일반적으로 사용되는 제품의 성능곡선(P-Q 곡선)을 적용하였다. 즉 기의 정압 조건에 따라 FFU

의 토출 풍량이 결정되도록 하였다.

- c. 약세스 플로워는 다공성 매질로 가정하여 발생하는 차압을 개구율과 풍속의 함수로 모델링하여 해석에 적용하였다. 약세스 플로워의 차압 관계는 식(9)에 나타났다.
- d. 드라이 코일은 약세스 플로워처럼 다공성 매질로 가정하여 발생하는 차압을 풍속의 함수로 모델링하여 해석에 적용하였다.

본 고에서는 앞에서 설명한 편류의 제어모델(식(8)참조)을 이용하여 3차원 클린룸의 기류 제어에 응용하였다. 클린룸에서 발생하는 편류 정도를 파악하기 위하여 약세스 플로워의 개구율이 동일한 경우에 대하여 해석하였으며, 또한 편류 제어 방법의 일환으로 약세스 플로워의 개구율을 조정하여 편류를 개선한 해석을 수행하였다.

약세스 플로워의 개구율이 동일한 경우 클린룸의 기류는 압력이 높은 부분에서 낮은 부분으로 이동하며 통로가 길수록 가속된다. 그러므로 클린룸의 중심에 편류 방향으로 긴 통로가 놓일 경우 이 부분에서 편류가 가장 심하게 나타난다. 이동 통로는 편류 방향으로 저항이 거의 없기 때문에 편류가 가속된다. 또한 클린룸의 중심부에서는 대칭 조건이기 때문에 상대적으로 편류의 발생 정도가 매우

적으며 리턴 샤프트 부근에서도 상대적으로 벽면의 저항에 의해서 편류의 발생 정도가 적게 나타난다. 그러나 그 외의 부분들에서는 편류가 매우 심하게 나타나며 통로가 아닌 부분들에서 일부 장비를 타고 넘어서 클린룸 상부방향으로 역류하는 기류도 나타난다. 이러한 편류는 클린룸의 리턴 샤프트 간의 거리가 멀수록, 하부 클린룸의 층고가 낮을수록 발생되기 쉽다. 클린룸을 파티션 등으로 몇 부분으로 분리시키거나, 하부 클린룸의 층고를 높게 하면 편류는 어느 정도 개선될 수 있다. 그러나 이러한 방법은 현실적으로 적용하기 어렵다.

편류가 없는 이상적인 상태, 즉 클린룸의 압력이 일정하고 기류가 약세스 플로워에 수직으로 유동하는 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. 이때 FFU의 평균 풍속은 0.4 m/s이며, 약세스 플로워의 통과 면 풍속은 0.69 m/s이다. FFU의 토출 풍속에 비하여 약세스 플로워의 통과 풍속이 더 큰 이유는 클린룸에 설치된 장비의 설치면적만큼 약세스 플로워의 면적이 좁아지게 되기 때문이다. 이 때 장비가 설치된 부분은 블라인드 판넬로 가정하여 통과하는 기류는 없는 것으로 가정하였다.

그림 3은 클린룸 내부에 장비의 배치 및 약세스 플로워의 배치를 나타낸다. 장비 설치 면적을 포함

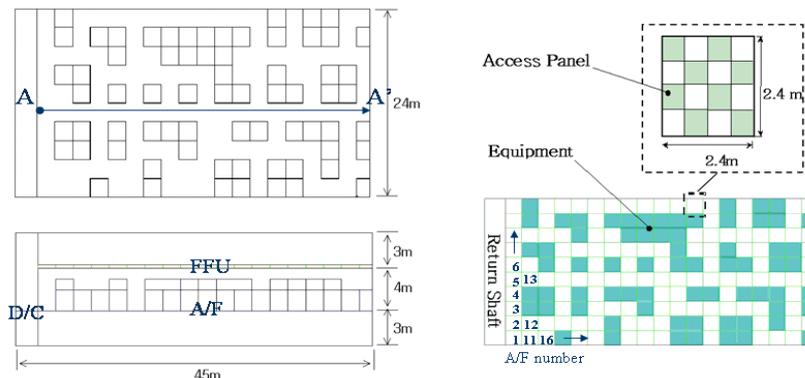


그림 3. Model cleanroom (a)plan view, (b)Section view

한 악세스 플로워의 전체 바닥 면적, $A = 45 \times 24 = 1080\text{m}^2$ 을 모델링한 악세스 플로워 판넬 면적, $A_f = 2.4 \times 2.4 = 5.76\text{m}^2$ 으로 분할하여 총 분할 면수를 190개 하였을 때, 장비 설치에 의해 블라인드 처리된 면을 제외한 121개 면을 나타낸다. 각각의 악세스 판넬에 각각 번호를 부여하였으며 인덱스는 클린룸의 가장자리(리턴샤프트)로부터 중심부(대칭면)방향으로 생성하였다.

그림 4는 하부 클린룸을 해석한 결과 각각의 악세스 플로워(그룹)하부의 압력 분포 및 악세스 플로워의 개구율 분포를 나타낸다.

그림 4에서 x축은 각 그룹 등의 인덱스를 나타내며 좌측의 y축은 정압 손실(Pa), 우측의 y축은 개구율(%)을 나타낸다. 그래프에서 왼쪽으로 갈수록 값이 커지는 곡선은 악세스 플로워 하부의 압력을 나타낸다. 이와는 반대로 오른쪽으로 갈수록 값이 커지는 곡선은 악세스 플로워의 개구율을 나타내며 식(9)을 이용해서 구하였다. 또한 악세스 플로워의 개구율을 따라가는 계단 형태의 선은 악세스 플로워의 개구율을 11개의 그룹으로 나눈 것으로 그 값은 47%를 나타낸다. 이 값은 이상적인 상태 즉, 악

세스 플로워의 통과 면 풍속(0.69 m/s)이 일정하고 및 클린룸의 압력이 일정하다고 가정한 결과이다. 그러나 실제 클린룸 시스템에서는 상부 클린룸의 조건(유로 형상, 구조물 등)에 따라서 압력손실이 달라지기 때문에 각각의 FFU에 걸리는 기외 정압이 달라지게 된다. 따라서 클린룸의 풍속분포가 일정하지 않게 된다. 또한 FFU에서 토출된 수직 기류는 클린룸 장비의 면적 및 높이 등의 영향을 받아 부분적으로 기류가 집중되게 된다. 이러한 이유 때문에 악세스 플로워 통과 면 풍속은 부분적으로 달라지게 된다. 이러한 세부적인 기류 제어는 실제 클린룸 가동 중(At-Rest or Operational Cleanroom)에, 각기 장비의 작동조건이나 주위 환경에 따라 주위 악세스 플로워의 개구율을 적절히 조절함으로써 어느 정도 해결이 가능하다.

그림 4에서 압력 분포를 살펴보면 대칭면에서 가장자리 쪽으로 갈수록 하부클린룸의 정압 분포 곡선이 매끄럽지 못한 것을 볼 수 있는데 이것은 클린룸에 설치된 장비에 의한 영향이라고 볼 수 있다. 즉 가장자리(리턴 샤프트)로 갈수록 개구율 변화에 대한 영향도가 커짐을 예측할 수 있다.

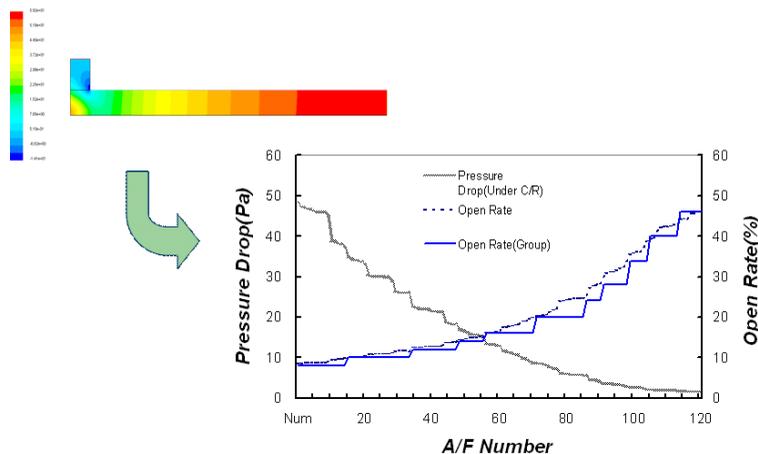


그림 4. 하부클린룸 압력 분포에 따른 악세스 플로워 개구율 분포

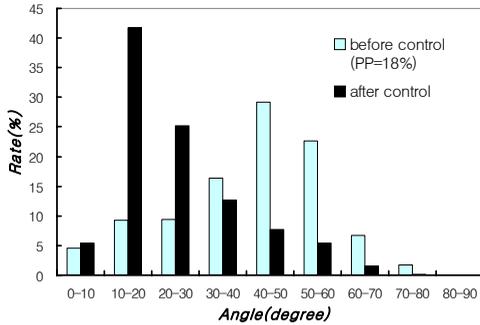
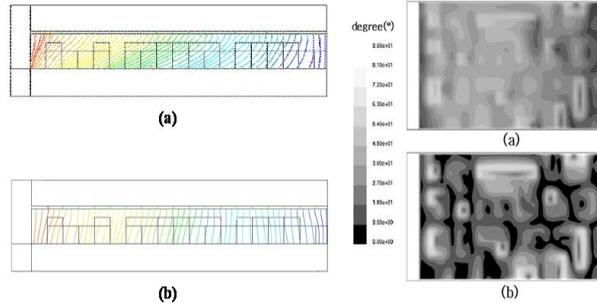


그림 5. 편류도 구간별 구성비율

그림 5는 ULPA 필터 하부 0.8 m면에서의 편류도를 히스토그램으로 나타낸 것이다. 개선 전에 40°~50°인 구간이 전체 면적 대비 30%, 50°~60°인 구간이 약22%로 대부분을 차지하였으나, 개선 후에는 10°~20°인 구간이 42%, 20°~30°인 구간이 25%로 대부분을 차지하고 있다. 전체 장비의 설치면적비가 약 42%임을 감안해 보면 장비 주위는 대부분 편류각도는 20°이내임을 예측할 수 있다.

그림 6에서 압력 분포를 살펴보면 대칭면에서 가장자리 쪽으로 갈수록 하부클린룸의 정압 분포 곡선이 매끄럽지 못한 것을 볼 수 있는데 이것은 클린룸에 설치된 장비에 의한 영향이라고 볼 수 있다. 즉 가장자리(리턴 샤프트)로 갈수록 개구율 변화에 대한 영향도가 커짐을 예측할 수 있다.

그림 6은 ULPA 필터로부터 0.8 m인 면에서의 편류도 분포를 나타낸다. 악세스 플로워를 제어하기 전(PP=18%)인 경우 평균 편류도는 평균값으로 약 45°이며 악세스 플로워의 개구율을 조정한 후의 편류도는 평균값으로 약 21°이다. 그림 6-(a)의 편류를 개선하기 전 결과에서 보면 클린룸의 대칭 중심과 리턴 샤프트 부근에서는 편류도가 $\theta < 20^\circ$ 정도를 나타낸다. 그러나 그 외의 지역에서는 편류도



(a) 개선 전, (b)개선 후

그림 6. 개선 전, 후 편류 분포

가 $20^\circ < \theta < 80^\circ$ 으로 매우 편류가 심하게 나타난다. 그림 6-(b)에서는 개선 후의 편류도를 나타낸다. 전체적인 편류도는 $\theta < 21^\circ$ 을 나타낸다. 그러나 장비의 영향을 제외한 부분에서는 $\theta < 20^\circ$ 인 편류도를 나타낸다. 특히 장비의 상부 면은 FFU에서 토출된 기류가 부딪쳐 주위로 확산되기 때문에 주위 편류도를 크게 한다. 그러므로 장비 상부에 설치된 FFU의 풍량을 감소시키면 이러한 효과를 일부 감소시킬 수 있을 것이다.

3. 운용단계에 있어서 시뮬레이션 기술의 활용

입자 및 케미컬 오염물질의 발생원은 외기에서 침입하는 것과 내부에서 발생하는 것으로 크게 나눌 수 있다. 내부 발생원으로는 클린룸을 구성하는 재료, 제조 프로세스, 작업자 등이 고려되고 있지만, 각 발생원의 공기 오염기여율에 관해서는 명확하게 밝혀지고 있지 않다. 대부분의 오염이 클린룸 내부에서 발생하므로 제품의 제조 과정에 영향을 미치기 전에 이러한 오염을 가능한 빨리 제거해야 한다. 그러기 위해서는 오염원을 파악하는 것이

중요하다. 그러나 클린룸 내에 설비와 장비 등이 설치된 후에는 클린룸의 내부구조가 복잡해져서 단순히 클린룸 내부의 공기 유동만으로는 오염원을 파악하기 어렵다. 특히 난류형 클린룸과 같이 클린룸 내의 기류상태가 복잡한 경우에는 오염원으로부터 발생한 오염물질이 실내에 넓은 범위로 확산, 혼합하기 때문에 오염원이 어디에 있는지를 판정하는 것이 대단히 어렵다. 또한 일반적으로 클린룸 내에는 복수의 오염원이 존재하기 때문에 상황은 더욱 더 어렵게 된다.

3.1 클린룸에서 오염 확산

클린룸 내 부유입자의 이동 형태는 입자의 확산 현상으로 인하여, 공기 유동의 형태와는 다르기 때문에 공기 유동만의 해석으로는 오염입자 제어에 대한 상세한 정보를 얻을 수 없다. 클린룸 내부에서 발생한 오염은 복잡한 공정과 여러 가지 장비에 의해서 더욱 더 복잡한 형태를 나타내며, 다양한 오염 형태로 나타나게 된다. 이러한 경향으로 인해서 클린룸 내부에서 발생한 오염입자를 생산공정에 영향을 주지 않으면서 경제적이고 효율적으로 제어하기 위해서, 오염입자 분포에 대한 상세한 해석이 요구된다.

첫 번째 접근방식으로서 정상상태의 입자발생을 그 입자의 크기가 미소하므로 가스상 농도확산으로 가정하여 일정 유속(flux)를 갖는 점이나, 면 형태의 오염원으로 처리한다. 이때 농도장의 지배 방정식은 유동장의 지배 방정식과 독립적이기 때문에 정상 상태의 공기 유동을 계산한 후, 그 정보를 갖고 오염 입자의 확산 특성을 계산한다. 클린룸에서 대부분의 오염입자는 생산 장비와 작업자로부터 발생되므로 작업대 상부에 존재하는 오염원의 위치를 변화시켜 오염입자의 전파 특성을 알아본다.

실제 클린룸이 운전되는 동안 클린룸 내부에서

발생되는 오염입자는 정상상태로 발생하지 않으며, 쉽게 규명되지 않는 다양한 입자 발생원으로부터 순간적으로 또는 불연속적으로 발생된다. 클린룸 내에서 순간적으로 또는 일정 시간 동안 발생한 오염입자의 전파특성을 분석하여, 클린룸의 동적 특성을 규명하기 위해서는 비정상상태의 오염입자 농도장 해석이 필요하다. 순간적으로 또는 일정 시간 동안 입자가 발생된다는 가정은 실제 클린룸 내의 오염입자 발생구조를 비교적 근접하게 묘사하는 방법 중 하나이다. 이러한 상황에서 클린룸의 청정도 회복성은 발생한 오염입자를 청정공간 밖으로 얼마나 빨리 배출시키는가로 평가된다.

오염원에 따른 클린룸의 동적 특성에 대한 연구는 클린룸 내에서 시간에 따라 오염입자가 전파되는 양상, 특정위치에서 시간에 따른 오염입자의 농도 변화, 클린룸의 청정도 회복시간 등의 분석에 대해 주로 수행되어 왔다.

클린룸의 운용단계에서는 오염원의 확산 대책으로서 요구되는 청정도 레벨을 연속적으로 유지, 관리하는 것이 중요하다. 일반적으로 장비 등으로부터 발생한 오염은 클린룸 내에 복잡하게 확산하기 때문에 각 부분에서 측정된 오염물질의 농도 데이터로부터 오염원 발생장소를 추정하는 것은 어렵다. 이러한 경우에도 기류시뮬레이션을 이용하여 오염원의 발생부를 추정하여 청정도를 개선하는 것이 가능하다.

3.1.1 오염원 추정 방법

오염원 추정의 한 방법인 기여율 추정법은 청정도 시험에 의하여 얻을 수 있는 각 점의 오염물질 농도 분포와 예상오염원이 측정점의 오염농도에 미치는 영향도를 선형적인 가중치 평균식으로 구한 다음, 각 오염원의 기여도(전체 클린룸 오염에 미치는 영향도)를 선형적인 문제로서 추정한다.

실제 생산 활동이 이루어지는 난류형 클린룸을 살펴보면, 난류방식 클린룸은 오염기류에 청정기류를 확산 희석(dilution method)시켜 청정도를 유지하기 때문에 피스톤류형인 층류 클린룸에 비하여 오염을 배기하기 어렵다. 따라서 오염원에서 발생한 오염은 복잡한 내부 기류를 따라 주위로 확산되기 때문에 몇 개의 주 오염원에 의해서 전체 클린룸의 청정도가 영향을 받을 수 있다.

측정점(m)에서 오염 농도를 $M_1, M_2, \dots, M_i, \dots, M_n$, 오염원을 $S_1, S_2, \dots, S_j, \dots, S_m$ 이면 수치해석으로 각각의 오염원이 측정점에 미치는 영향도 $CS_{1,1}, CS_{1,2}, \dots, CS_{i,j}, \dots, CS_{m,n}$ 을 계산할 수 있다. M_j 를 $CS_{i,j}$ 의 선형 가중치 평균으로 표시하면 아래의 관계식이 성립한다.

$$M_j(1, 2, \dots, n) = \sum_i \{ W_{Ci} C_{S_i,j}(1, 2, \dots, n) \} \quad (10)$$

식(10)에서 W_{Ci} 는 각각의 오염원의 오염발생량을 클린룸 전체 발생량으로 나눈 값을 나타낸다. 여기서 $\sum W_{Ci} = 1.0$ 이며 오염기여율로 정의한다. 식(10)에서 오염원의 기여율이 구해지면, 그 값을 수치해석 모델에 적용하여 전체 오염농도 분포를 확인할 수 있다. 추정된 주 오염원과 오염 해석으로 구해진 오염 농도분포로부터 오염대책을 실시하여 효과적으로 클린룸의 청정도 수준을 향상시킬 수 있다.

그림 7은 각각의 추정된 오염원이 측정점의 오염 농도에 미치는 영향을 나타낸 것으로 측정점의 오염 농도는 각 오염원 농도값을 중첩한 값으로 나타낼 수 있다.

• 매트릭스 해법

오염원 추정 관계식을 나타내면 식(10)과 같이 표현할 수 있다. 오염원의 기여도를 추정하는 것은

선형 연립 방정식의 해를 구하는 것과 같다. 식(10)을 매트릭스로 표시하면 아래 식(11)과 같다.

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \dots \\ M_n \end{bmatrix} = W_{C1} \begin{bmatrix} CS_{1,1} \\ CS_{1,2} \\ \dots \\ CS_{1,n} \end{bmatrix} + W_{C2} \begin{bmatrix} CS_{2,1} \\ CS_{2,2} \\ \dots \\ CS_{2,n} \end{bmatrix} + \dots + W_{Ci\max} \begin{bmatrix} CS_{i\max,1} \\ CS_{i\max,2} \\ \dots \\ CS_{i\max,n} \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} CS_{1,1} & CS_{2,1} & \dots & CS_{i\max,1} \\ CS_{1,2} & CS_{2,2} & \dots & CS_{i\max,2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ CS_{1,n} & CS_{2,n} & \dots & CS_{i\max,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{C1} \\ W_{C2} \\ \dots \\ W_{Ci\max} \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서 $n = i\max$ 가 되면 식(11)의 매트릭스는 정방형이 되기 때문에 간단히 역행렬 $CS_{i,j}^{-1}$ 이 구해진다. 이 역행렬을 식(11)의 양단에 연산하면 오염 기여율이 구해진다. 그러나 본래 오염물질의 확산은 비선형적인 유체현상에 의하여 발생하는 것으로 매트릭스 해법에 의한 계산은 이것을 선형문제로 취급하기 때문에 역행렬에 의한 해를 구하더라도 물리적으로 오류가 있는 값이 계산된다. 즉 오염원의 기여율이 음의 값을 갖는 경우가 발생된다. 따라서 $W_{Ci} \geq 0$ 는 조건을 만족하는 가정하에 반복적인 방법으로 근사해를 구하는 방법이 사용된다.

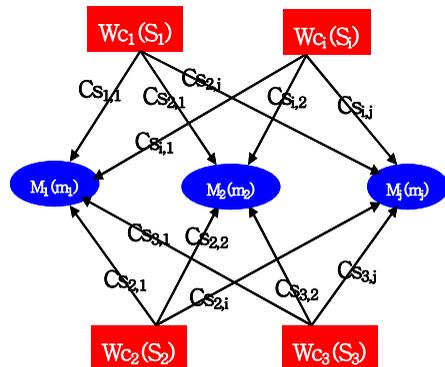


그림 7. 오염원(S_j)의 발생농도(W_{Ci})와 측정점(m_i)의 측정농도(M_i)간의 상관관계 계수($CS_{i,j}$)

• 영역 분할법

반복적인 방법을 사용할 경우 식(11)의 좌측에 M_n 과 우측의 $C_{S_{i_{max},n}}$ (W_{C_i} 가 가장 근사한 해가 되는 W_{C_i} 의 조합을 구하게 되는데, 가장 단순한 방법은 각 오염원의 기여율 W_{C_i} ($W_{C_1} = 1.0, 0 = W_{C_2} = 1.0$)를 미지수로 하여 ($W_{C_1} = 0.001, W_{C_1} = 0.002, , W_{C_1} = 1.0$), ($W_{C_2} = 0.001, W_{C_2} = 0.002, , W_{C_2} = 1.0$), ($W_{C_{i_{max}}} = 0.001, W_{C_{i_{max}}} = 0.002, , W_{C_{i_{max}}} = 1.0$)과 같이 W_{C_i} 의 조합을 구성하여 식(11)에 대입하여 좌측과 우측의 차가 가장 작게 되는 조합을 찾아가는 방식이다. 기여도 추정에서 측정점 수 m , 오염원 수 n 에 대하여 분해능 r 로 기여율을 구할 때 계산횟수를 Mc 이라 하면 Mc 는 식(12)와 같이 구할 수 있다.

$$Mc = m \cdot (r \cdot C_1)^n = m \cdot r^n \quad (12)$$

식(12)에 의하면 단순조합법으로 고해상도 기여율을 추정하기 위해서는 기하 급수적으로 많은 계산량이 필요해진다. 예를 들어 오염원 수와 측정점 수가 10으로 같은 경우 기여율의 분해능을 10으로 하게 되면 계산횟수는 10^{11} , 분해능을 100으로 하면 계산 횟수는 10^{21} 이 된다. 즉 계산시간을 단축하기 위해서는 분해능(r)과 오염원수(n)를 제어해야함을 알 수 있다. 분해능 증가에 대한 계산횟수 증가는 분해능 증가율을 라고 하면 계산 횟수 증가율은 n 배 증가하고 오염원 수 증가율을 β 라고 하면 계산 횟수는 r^β 배 증가하게 된다. 따라서 본고에서는 오염원을 분할하는 방법을 제안 하였다.

$$Mc = m \cdot (r \cdot C_1)^{n_1} + m \cdot (r \cdot C_1)^{n_2} + \dots + m \cdot (r \cdot C_1)^{n_{max}}, \quad (n = n_1 + \dots + n_i + \dots + n_{max}) \quad (13)$$

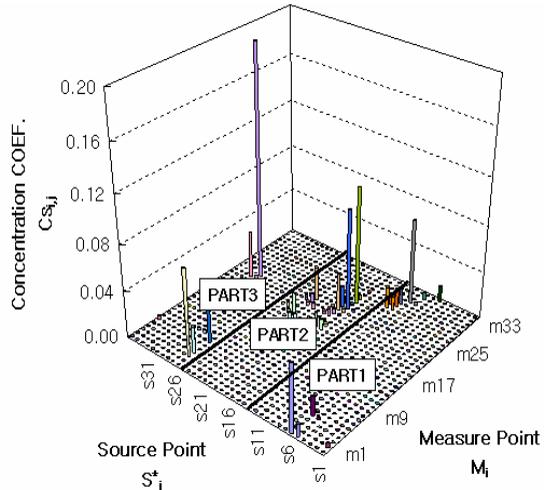


그림 8. 오염원(S_j)이 측정점 농도(M_i)에 미치는 상관계수($C_{S_{i,j}}$)에 따른 영역 분할

여기서, n 은 총 오염원 수, n_i 는 i 영역의 오염원 수를 나타낸다.

식(13)에서 보면 오염원 추정 영역(오염원)을 균등하게 3등분 하게 되면 총 계산 회수는 $r^3/3$ 배 감소하게 된다.

그림 8은 수치해석을 통해서 구한 값으로 각각의 오염원이 측정점에 미치는 상관계수($C_{S_{i,j}}$)를 그래프로 나타낸 것이다. 상관계수($C_{S_{i,j}}$)는 오염원(S_j)이 계산 농도(M_i)에 미치는 오염의 상관관계를 나타낸다. 즉 오염원(S_j)이 측정점(m_i)에 영향을 미치는 영향이 클수록 상관계수($C_{S_{i,j}}$)는 비례해서 증가하게 된다. 따라서 상관 계수 값이 0에 가까운 영역을 기준으로 영역을 분할할 수 있다.

그림 8에서 Part1, Part2, Part3는 상관 계수, $C_{S_{i,j}} \approx 0$ 인 영역을 참조 하여 영역을 분할한 것이다. 측정영역 또한 같은 방법으로 분할 할 수 있다. 그러나 측정점 수가 계산횟수에 미치는 영향은 크지 않으므로 필요에 따라 분할하도록 한다.

• 부분 집중법

오염원 추정법에서 계산량 증가의 주 요인은 오염원의 수 증가와 기여도에 대한 분해능의 증가이다. 산정 오염원의 증가는 영역 분할법 적용으로 개선이 되었지만, 분해능 증가에 대한 부분을 개선하기 위해서는 새로운 알고리즘이 필요하다. 기존의 단순 조합법의 경우 식(10)에서 구할 수 있는 기여도 조합(총 계산횟수)들 중에 한 가지 조합을 선정하기 때문에 매우 비효율적이다. 따라서 초기에는 저해상도(기여도 조합을 최소로 함)로 기여도 조합을 찾은 후 점차 해상도를 높여가는 방법이 사용된다. 식(14)은 부분 집중법을 적용할 경우 계산 횟수를 나타낸다.

$$Mc = m \cdot (r_0 C_1)^n + m \cdot (r C_1)^n (N-1) \quad (14)$$

여기서, r_0 는 초기 해상도, r 는 해상도 증가, N 은 총 계산 스텝 수를 나타낸다.

예를 들어 측정점의 수 및 오염원 수가 10, 초기 해상도가 5, 해상도 증가 2, 총 계산 스텝을 9로 하면 총 해상도는 1,280이 되고 단순 조합법인 경우

계산횟수는 약 1.18×10^{32} 이다. 부분 집중법을 적용하면 계산횟수는 9.77×10^7 으로 단순 조합법에 비하여 약 1.21×10^{21} 배 감소하게 된다.

실제 문제에서 타당한 오염원의 기여도를 얻기 위해서는 많은 수의 오염원 및 높은 해상도가 필요하므로, 오염원 추정에서 영역 분할법 및 부분 집중법을 동시에 적용해야 한다. 그림 9는 영역 분할법 및 부분 집중법을 동시에 적용할 경우, 그 개념도를 나타낸다.

• 적용 방법 및 프로세스

오염원 추정법을 적용하기 위해서는 실측과 수치해석을 동시에 진행해야 한다. 개선하고자 하는 클린룸의 오염 농도를 실측해야 한다. 이때 측정하고자 하는 영역에 대하여 실측 지점의 위치, 지점 수, 측정 횟수, 측정시간 등을 사전에 충분히 검토한 후 실측한다. 이렇게 실측된 값(M_i)은 전체 클린룸의 청정도 분포를 나타내며 이 값을 토대로 오염원을 추정하게 된다. 한편 수치해석에서는 오염원 (S_j , 발진 가능성이 있는 장비 또는 설비)을 선정하

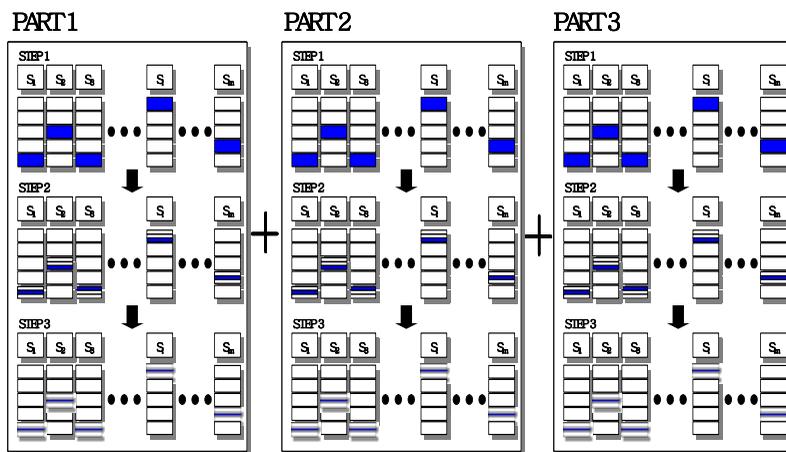


그림 9. 부분 집중법 및 영역 분할법을 이용한 기여도 계산 방법

고 기류 및 오염 확산 해석을 수행한다. 수치해석 시 각각의 오염원은 동일한 양의 오염을 발생시킨다고 가정하였기 때문에 해석 결과로부터 각각의 오염원이 측정점(실험에서 실측한 지점의 위치)에 미치는 상관계수(C_{Sij})를 구할 수 있다. 이렇게 실측과 수치해석으로 구해진 값들(M_i, C_{Sij})을 이용하여 각 오염원의 기여도(W_{Cj})를 구할 수 있다. 이때 기여도를 구하기 위해서 영역 분할법, 부분 집중법을 이용한다. 이렇게 계산된 기여도를 수치해석 모델에 적용하여 클린룸의 실제 농도 분포를 구한 후, 이 구해진 농도와 실측값을 비교하여 해석의 타당성을 검증한다. 수치해석으로 구해진 주 오염원 및 오염확산 분포를 분석하여 오염확산을 개선할 수 있는 방안을 수립하고, 수치해석 모델에 적용하여 개선 여부를 검토한다. 검토 결과 그 효과가 확인되면 실제 현장에 적용한다.

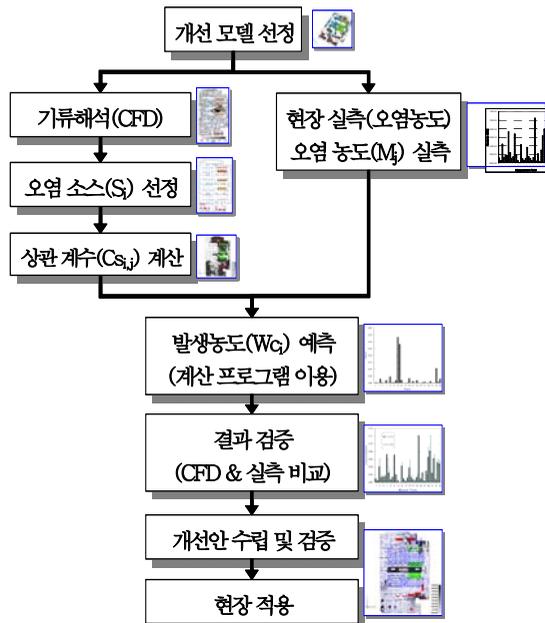


그림 10. 오염원 추정 및 적용 프로세스

그림 10은 오염원 추정법을 적용하는 프로세스를 나타낸다.

3.1.2 오염원 추정법 적용 사례

오염원 추정법을 적용하고자 하는 모델 클린룸은 크기가 33m(D) x 45m(L) x 3.8m(H)인 난류형 클린룸이다.

클린룸은 천정에는 HEPA BOX(HEPA BOX에는 확산판이 부착되어 있음)가 설치되고 가장자리 벽면 및 중심의 기둥부분에 리턴 그릴이 설치되어 있다. 벽면 리턴 그릴은 전체 벽면에 걸쳐 설치되며, 일부 벽면에는 설치 수량이 편중되어 있다. 천정면에 설치된 HEPA BOX는 전 면적에 걸쳐 비교적 균일한 분포로 설치되어 있다. 또한 주요 장비의 상부에는 장비용 FFU가 설치되어 있다.

모델 클린룸의 청정도는 영역에 따라 Class 2,000 ~ Class 500으로 관리되며, 환기 횟수는 약 68회/hr로 운전된다.

• 3D 모델링 및 해석 조건

수치해석을 수행하기 위해서 클린룸을 3차원으로 모델링 하였다. 해석 경계 조건으로 HEPA BOX는 입구 속도 조건을, 리턴 그릴은 출구 압력 조건을 적용하였다. 각 오염원의 오염물질은 같은 종류이나 서로 다른 이름을 부여하여, 각각의 오염원에서 확산되는 오염물질이 서로 구별되도록 하였으며, 오염원에서의 발생량(flux)은 모두 동일하게 하였다. 해석 격자는 사면체로 총 230만개이다. 오염원으로 가정한 영역은 해석 격자를 집중해서 기류 및 오염 확산의 정확도를 높였다. 클린룸 내부의 작업자 이동, 물류의 흐름에 의한 영향 및 장비의 배기는 무시하였으며 등온장, 정상상태로 가정하였다. 난류모델은 표준 k-ε방정식을 사용하였으며 벽

면 조건은 벽 법칙(wall function)을 사용하였다.

모델 클린룸에서 가상 오염원은 35곳이며, 오염 측정 위치 또한 35곳으로 설정하였다. 오염 측정 위치는 바닥 면에서부터 1.2m 높이 영역으로 클린룸 전체 면적에 대하여 일정 간격으로 배치한 후, 주요 장비 주위에 추가로 측정 위치를 설정하였다. 오염원은 고정된 주요 장비 중 일부를 대상으로 하였다. 오염원에서 오염 발생 위치는 주요 공정이 진행되는 영역 및 장비의 상부 면을 기준으로 하였다.

• 수치해석 결과

그림 11은 바닥 면에서 1.5m인 평면 및 수직 단면(A~C)의 기류 분포 및 특정 오염원(S₁₂)에서 발생된 오염이 확산되는 형상을 나타낸다. 오염확산 분포에서 농도는 0~0.01까지를 나타내며 어두운 색일 수록 오염 농도가 높음을 나타낸다. 오염 농도 분포를 보면 S₁₂에서 발생된 오염이 기류를 타고 주위로 확산됨을 알 수 있다.

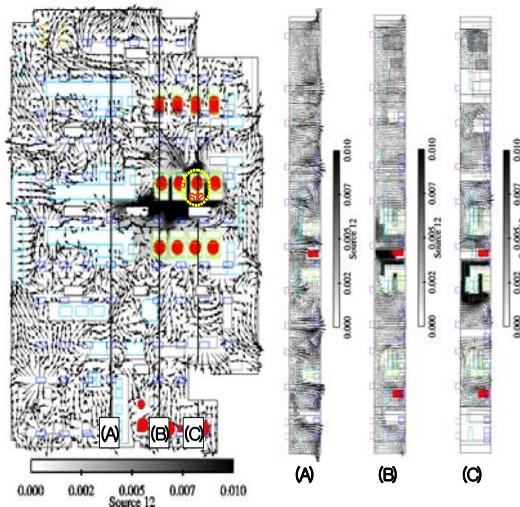


그림 11. 평면의 속도벡터 및 특정 오염원(S₁₂)에서의 오염 확산

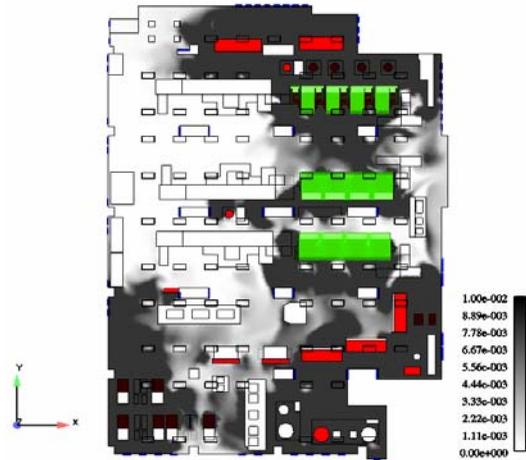


그림 12. 각 오염원(S₁~S₃₅)이 동일 발생량인 경우 오염 농도 분포

S₁₂에서 발생된 오염은 클린룸 하단부 및 상단부를 통하여서 확산되며, 일부 오염은 주위의 리턴 그릴로 제거되지 못하고 주위로 확산된다.

그림 12는 오염원(S₁~S₃₅)에서 확산된 오염 농도 분포를 나타낸다. 전체적으로는 오염원 주위가 오염 농도가 높고 오염원에서 떨어진 부분까지 오염이 확산된다. 리턴 그릴이 측면 벽에 대부분 설치되어있기 때문에 오염 확산은 오염원 주위의 기류를 타고 리턴 그릴 쪽으로 이동한다. 따라서 오염의 전파 및 확산을 제어하는 수단으로 리턴 그릴의 수량 및 위치 변경을 고려할 수 있다.

• 현장 실측

그림 13은 가동 중인 클린룸의 분진 오염을 실측한 결과이다. 측정된 분진 크기는 각각 0.07 μ m ~ 1.0 μ m 까지이며 측정점 m₂₄에서는 약 10만개이상 측정되었다. 측정된 분진 수는 위치에 따라서 변동 폭이 적게 측정이 되는 경우도 있었지만 많은 영역, 특히 특정 영역(분진 농도가 높은 영역)은 시간에

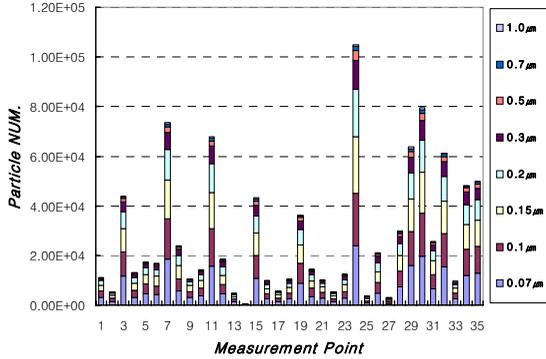


그림 13. 위치 별 Particle 측정 결과

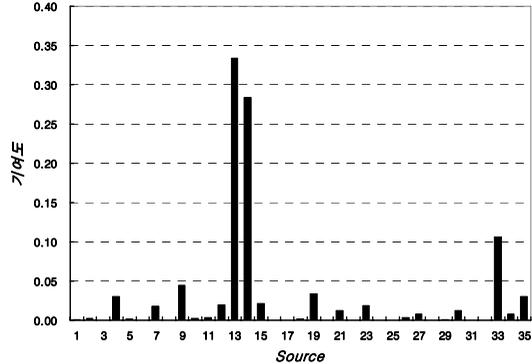


그림 14. 각 소스(S₁~S₃₅)의 오염 확산기여도

따른 변동이 크게 나타났다.

오염원 추정에 사용된 값은 각 측정점에서 측정된 분진의 크기가 0.3μm인 측정값을 사용하였다.

• 기여도 추정 및 적용 해석

그림 14는 영역 분할 및 부분 집중법으로 계산한 각 오염원의 기여도를 나타낸다. 여기서 기여도는 전체 클린룸의 오염농도에 미치는 영향도를 나타낸다. 기여도가 높을수록 오염원의 오염발생량이 많음을 나타내며, 기류해석을 통해서 구해진 $C_{S_{ij}}$ 는 주위 측정점의 오염농도에서 각 오염원의 농도 구성을 의미한다. 따라서 기여도가 큰 오염원을 대상으로 청정도 개선 안을 수립해야 할 것이다. 본 해석에서 영향도가 0.1이상인 오염원은 S₁₃, S₁₄, S₃₃로, 이 세 곳의 기여도를 합하면 약 0.7을 나타낸다.

그림 15는 분진 농도를 표준화(Normalize)한 값으로 측정 위치에서의 실측값과 수치해석을 통하여 구해진 값을 비교한 그래프이다. 그림 15에서 발생하는 오차의 원인을 살펴보면, 실제 클린룸 형상 및 작동 조건(배기량, 급기량, 열대류 등)이 수치해석 모델이 정확히 일치 할 수는 없고, 실측값에도 측정 시간에 따른 편차, 측정위치의 편차가 존재하기 때

문에 발생하는 오차라고 판단된다. 또한 수치해석 모델의 경우 부분적으로 단순화 되었고, HEPA BOX 및 기타 장비의 경계 조건 또한, 실제와 정확히 일치하지 않기 때문에 이러한 조건에서 구한 상관 계수가 실제 확산 현상을 완벽히 나타내지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 오염원을 임의로 35 지점 선정하였지만 실제로는 모든 장비 및 설비가 오염원이 될 수 있으며, 클린룸에서 이동하는 대차 및 작업자도 오염원이 될 수가 있다. 따라서 오염원 추정

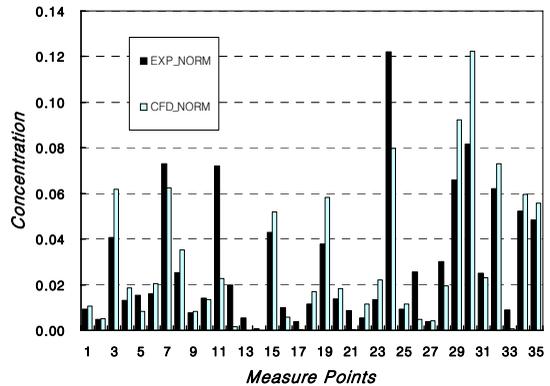


그림 15. 실측(EXP)농도와 해석(CFD)농도 비교

법은 정확한 값을 예측하는데 의미를 주기 보다는, 기존의 정성적인 결과에서 벗어나 좀더 정량적인 값으로 오염원을 추정할 수 있는데 의의가 있다.

그림 15는 수치해석에서 구해진 기여도를 해석 모델에 적용하여 해석한 결과로 오염농도 분포를 나타낸다. 기여도가 높게 나타난 S₁₃, S₁₄, S₃₃에서 오염 농도가 높게 나타나며, 주위의 오염농도 또한 높게 나타났다.

• 확산 방지 대책 수립 및 적용

클린룸에서 주요오염원의 오염발생량을 자체적으로 저감시키기 어려운 경우에는 오염이 주위로 확산되는 것을 방지하기 위해서 오염원 주위에 배기를 추가하거나 또는 파티션을 설치할 수 있다.

본 모델 클린룸에서는 오염의 확산 경로를 제어하여 주위로 오염이 확산되는 것을 방지하였다.

그림 16은 개선 전, 후의 오염농도를 나타내며, 개선방안으로 주 오염원에서 오염 확산 경로를 제어한 결과, 측정점의 오염농도가 현저히 감소함을 알 수 있다.

그러나 일부 측정점의 농도는 개선전보다 증가하는 결과를 나타낸다. 이런 이유로는 첫 번째로 클린룸 내부의 확산 경로의 변화를 들 수 있다. 각 오염원(예상치 못한 오염원 포함)에서 확산된 오염의 전파 경로가 달라졌기 때문이다. 둘째로는 측정 시간에 다른 내부 환경 변화이다. 측정 점 주위의 환

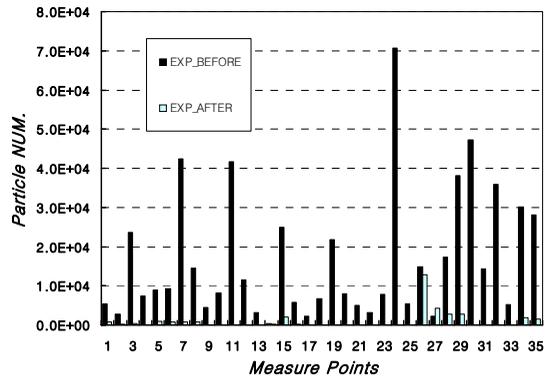


그림 16. 개선 전, 후 청정도 측정결과 (개/cfm)

경 변화(재료, 대차, 작업자들에 의한 영향)의 영향 일 가능성이 있다.

4. 맺음말

지금까지 클린룸의 설계로부터 운용까지의 각 단계에 걸쳐 기류시뮬레이션 활용기법 및 사례를 나타내었다. 현재는 기류분석을 위한 여러 범용 소프트웨어가 판매되고 있어 이 틀을 설계나 유지관리를 위하여 이용 가능하다.

수치 시뮬레이션의 본래 목적은 최적설계나 개선안 수립에 필요한 정보를 구하여 좀더 적절한 설계가 되도록 하는 것임을 항상 명심해야 한다.