

청정실내의 공기 필터 시스템의 보전¹⁾

- Maintenance of air filter system in clean room -

구자항²⁾

Koo ja-hang

고명훈

Ko Myung-Hoon

ABSTRACT

In this paper, we deal with the problem of maintenance policies for an air filter system in clean room. Two types of maintenance policies are considered, one based on the reliability of equipment and the other one determined by the total cost including minimal repair cost. For these models, we obtain the structure of the optimal maintenance policy which minimize the total cost. Finally we give the numerical example.

1. 서 론

최근 반도체의 제조, 우주항공, 전자, 정밀산업 등의 발전으로 인하여 제품의 정밀화, 미소화, 고 품질화 및 신뢰성이 요구되고 있다. 전자공장, 필립공장, 또는 정밀기계 공장등에서는 실내의 부유 미립자가 제조중인 제품에 부착되어 제품의 불량을 초래하고 사용목적에 적합한 제품 생산의 저해 요소가 되어 제품의 생산성과 수율에 막대한 영향을 미치고 있다. 그러므로 공장 전체 또는 중요한 작업이 이루어지는 부분에 대해서는 필요에 따른 청정한 일정상태가 유지되도록 해야 한다.

청정실은 순환 공조장치에 의하여 지하층의 공기가 풍도를 통하여 천정으로 보내지고 천정에 장착된 고 효율 입자 여과장치의 필터에 의해서 여과된 고 순도의 청정 공기가 실내로 유입된다. 그리고 실내의 공기는 순환 공조 장치의 흡입에 의해 바닥에 미세한 통풍이 형성된 타일을 경유하여 지하로 빠져나가는 일련의 순환과정에 의하여 청정도를 유지한다.

일반적으로 반도체 공장을 비롯한 자기 테이프, LCD, 초 정밀 전기 전자부품 등을 생산하는 청정실에 있어서, 입자 오염을 방지하기 위하여 천정 또는 벽면에 설치된 공기 여과용 필터에

1) 이 논문은 1996 학년도 대림 전문대학 교내 학술 연구 조성비에 의하여 연구 되었음.

2) 대림 전문대학 공업경영과

손상 또는 이에 상응하는 이상이 발생되면, 여과되지 않은 오염된 공기가 실내로 유입됨에 따라 고농도의 입자 오염물이 실내로 급속히 확산되어 청정 영역을 오염시키는 결과를 초래하게 된다. 이러한 경우 오염 물질이 확산되는 것을 막기 위하여 필터에 손상이 발생할 때마다 실리콘등으로 필터를 봉합 처리하여 응급 조치를 하고 있으나 불량의 재발과 응급 조치된 사이에서 와류에 의한 입자의 유동을 초래하기 때문에 대부분 이상이 발생되면 새로운 필터로 교체하는 것이 일반화 되었다. 그러나 가동중인 필터의 사용효과의 저하, 또는 손상의 발생 및 순환 공조장치의 고장이 발생되는 경우에는 이의 수리, 교체비용이 발생할 뿐만 아니라 가동 중단에 따른 생산 혹은 용역의 기회 손실비용이 발생하게 되므로 이러한 모든 비용을 최소화 하며 전체 시스템의 최적 운용상태를 유지하는 것은 중요한 문제이다. 이러한 보전문제에 관한 연구로 Boland[2]는 응급 수리비용이 시간에 관하여 변화하는 주기적 교체정책을 분석하였고 Yun[8]은 응급 수리비용이 증가할 때, 수명 T가 경과한 후 처음으로 고장이 발생하는 경우에 교체를 시행하는 보전정책을 분석하였다. 한편 Fenton[4]은 장치의 고장분포 함수가 지수분포를 하는 경우, 각 비용의 현재 가치를 고려하여 요구된 신뢰도를 달성하기 위한 보전 정책을 분석하였다. 이 이외에도 응급수리 정책에 관한 많은 연구가 이루어졌으나 청정실내의 오염제거를 위한 공기여과 필터의 체계는 상호 독립적으로 동일한 기능을 발휘하는 n개의 필터로 구성되어 있으므로 이에 관한 시스템 체계가 고려되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 먼저 청정실의 최적 운용을 위하여 순환 공조 장치의 기본구조에, 장치의 신뢰도를 고려한 중복 설계 개념의 보전 모형을 정식화 하였고 또한 청정실이 n개의 공기여과 필터로 구성되 있을 때, 이를 중, 손상이 발생한 필터를 응급 수리하여 청정실의 가동을 지속시킨 후, 일정시간 후에 모든 필터를 교체하는 경우의 보전정책을 분석하였다.

2. 청정실내의 공기 필터 시스템

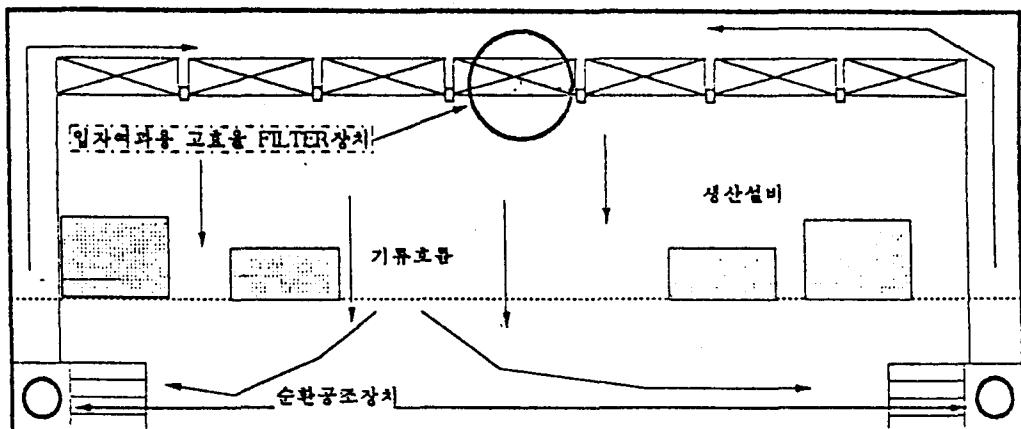
청정실은 일반적으로 생물학적 청정실(Bio-clean room)과 산업용 청정실 (Industrial clean room)로 구분한다. BCR은 세균 곰팡이 등의 미생물에 대한 오염 제거를 주 목적으로 하며 제약회사, 병원의 무균 수술실, 동물 실험실 등에 이용되고 ICR은 주로 공기중의 오염 미립자를 제어 대상으로 하며 필요에 따라 온도, 습도, 압력, 진동 등의 환경 조건도 제어되어야 한다. 이중 ICR의 운용을 위해서는 공기에 어떠한 입자가 어느정도 함유되었으며 필요로 하는 청정도는 어느 정도인가를 계통적으로 계획하여야 한다.

일반적으로 청정도란 1 입방 피트 체적내에 포함된 입자의 개수를 기준으로 하는데 1963년 12월에 제정된 미 연방 규격 (FED- STD-209)에서는 입자크기가 $0.5 \mu\text{m}$ 을 기준으로 class 100 이상만 규정하였으나 1987년 10월 FED-STD-209C로 개정되면서 class 등급 1, 10 이 추가되었다. 여기서 class 란 1 ft^3 당 대기 중의 $0.5 \mu\text{m}$ 미립자의 개수를 나타내는 단위로서 class 100 의 의미는 청정실 1 ft^3 당 100 개 이하의 미립자를 의미한다.

실제로 미연방 규격은 입자경 $0.5 \mu\text{m}$ 또는 그 이상의 분진을 규정하고 있으며 최근 반도체 산업의 급성장에 따라 $0.1 \mu\text{m}$ 또는 그 이하의 분진 제어를 요구하고 있다. 따라서 현재는 산업의 발전과 더불어 입자 크기를 $0.5 \mu\text{m}$ 만을 기준으로 하지 않고 $0.3 \mu\text{m}$ 와 $0.1 \mu\text{m}$ 을 기준 입자 관리로 하는 class 기준이 많이 통용되고 있고 1992년 9월에는 관리기준을 현실화하기 위하여 FED-STD-209E 를 개정하였다.

청정실이 정상적으로 가동중에는 순환 공조장치에 의하여 지하층의 공기가 풍도를 통하여 천정으로 보내진다. 이때 천정에서는 일정한 압력이 형성되며 고 효율입자의 여과장치는 공기 압력의 영향을 받아 여과된 고 순도의 청정공기가 실내로 유입된다. 그 후 실내의 공기는 지하로 유입되는 일련의 순환과정을 반복하면서 청정실의 청정도를 유지하게 되다. 이때 토출구로부터 나온 청정한 공기가 흐트러짐이 없이 목적하는 위치에 도달하는 경우를 충류 (Laminar flow) 상태에 있다고 하며 그렇지 않은 경우를 난류 (Turbulence flow)라 한다. 이때 청정실에서 요구되는 조건은 압력, 온도, 습도, 조도 등이 있는데 순환 공조 장치에 의해 형성되는 압력은 1.25 (mmAq) 이상, 온도 ($^{\circ}\text{C}$)의 범위는 19.4 - 25로서 실제 요구치는 22.2°C 를 기준으로 하고 있다. 여기서 온도의 허용치는 $\pm 2.8^{\circ}\text{C}$ 를 허용하고 있다. 또한 습도는 최고 45%, 최저 30%로 허용치를 $\pm 10\%$ 로 하고 있다.

이러한 조건을 갖춘 청정실의 일반적 형태는 Open Bay형, 대류형, CTM(Clean tunnel module)형, FFU형(Fan filter unit)형 등이 있는데 전형적인 Open Bay형의 청정실의 구조도는 그림(1)과 같다.



(그림 1. Open Bay 형 청정실의 구조도)

3. 수리 모형의 정식화

청정실의 보전 활동을 위하여 순환 공조 장치의 중복 설계에 의한 보전 정책과, 공기 여과 필터 시스템의 용급 수리를 고려한 보전 정책의 정식화한 모형에서 사용한 기호의 정의는 다음과 같다.

- n ; 공조장치(필터)의 대수
- $R(t)$; 공조장치의 신뢰도
- $f_s(t)$; 전체 시스템의 고장밀도함수
- $f(t)$; 공조장치의 고장밀도 함수
- t_0 ; 시스템의 총 운용시간
- T^* ; 필터의 최적 교체주기

C_I	공조장치의 개당 비용
C_F	공조장치의 고장손실비용
C_R	필터의 교체비용
C_S	공조장치의 잔존가치
t_i	필터의 i 번째 응급 수리시간
$C_0(t)$	시간에 따른 필터의 응급 수리비용
$h(t)$	필터의 순간 고장을
$H(t)$	누적 순간 고장을
$N(t)$	시간 t 까지의 응급 수리횟수
$\underline{C}(n)$	공조장치 대수에 따른 총비용
$\bar{C}(T)$	단위 시간당 평균비용

3.1 순환 공조 장치의 신뢰성을 고려한 중복 설계

청정실내의 순환 공조 시스템에서 실내의 공기는 순환 공조 장치의 흡입에 의해 바닥의 미세한 통공이 형성된 타일을 통하여 지하로 순환된다. 이러한 과정에서 필터를 통해 유입되는 공기의 압력을 일정 수준으로 유지하는 것은 청정도의 유지를 위해 중요한 문제이다. 청정실의 운용중 순환 공조 장치의 고장은 오염된 공기를 일정한 압력으로 순환 시킬 수 없어 오염을 가중시킴과 동시에 요구된 온도나 습도의 조건을 만족시키지 못함에 따라 생산 제품에 중대한 불량 손실을 초래하게 된다.

일반적으로 순환 공조 장치에 의한, 공기 순환과정에서 발생하는 풍량에 대한 압력 손실은 공기 여과 필터의 사양에 따라 차이는 있으나 시간이 경과함에 따라 필터에 누적된 오염입자에 의해 점차 선형의 관계로 증가한다. 실제로 청정실내의 공기여과 필터 성능은 사용 초기부터 약 4,000시간 까지는 정압손실이 점진적으로 증가되다가 말기 압력손실기 도달전 약 500-1,000시간 전부터는 급격한 압력 손실이 증가되어 청정실내의 일정조건이 만족되지 않음으로 인하여 예기치 못한 손실을 초래할 수 있다. 따라서 일정 운용 시간동안 이러한 손실을 방지하기 위하여 순환 공조 장치의 신뢰도를 고려한 중복설계의 개념을 도입하였고, 최소 비용으로 요구된 신뢰도하에서 청정실의 정상 가동을 위한 최적 순환 공조기의 대수를 결정하기 위한 모형을 정식화 하였다. 이를 위해 장비의 개당 초기 비용, 고장 비용 및 잔존 가치를 신뢰도의 함수로 구성하였다.

$$\begin{aligned}
 C(n) &= nC_I + C_F \int_0^{t_0} f_s(t)dt - C_S \int_{t_0}^{\infty} f_s(t)dt \\
 &= nC_I + n C_F \int_0^{t_0} [1-R(t)]^{n-1} f(t)dt - C_S \int_{t_0}^{\infty} n [1-R(t)]^{n-1} f(t)dt \quad (1) \\
 &= nC_I + (C_F + C_S) [1-R(t_0)]^n
 \end{aligned}$$

식(1)을 미분하면

$$C(n)' = C_I + (C_F + C_S) [1 - R(t_0)]^n \cdot \ln[1 - R(t_0)] \quad (2)$$

이다. 식(2)의 우변을 0으로 놓고 정리하면

$$\frac{C_I}{C_F + C_S} = -[1 - R(t_0)]^n \ln[1 - R(t_0)] \text{ 이다} \quad (3)$$

식(3)의 우변을

$$\begin{aligned} D(n) &\equiv -[1 - R(t_0)]^n \ln[1 - R(t_0)] \text{ 라면} \\ \lim_{n \rightarrow 1} D(n) &= -[1 - R(t_0)] \ln[1 - R(t_0)] > 0 \\ \lim_{n \rightarrow \infty} D(n) &= 0 \text{ 이다. 이 때} \\ D(n)' &= -[1 - R(t_0)]^n \cdot [1 - \ln[1 - R(t_0)]]^2 < 0 \text{ 이다.} \end{aligned}$$

$D(n)$ 은 n 에 관한 단조 감소 함수로서 식(3)을 만족하는 해 n 이 존재한다면 유한하고 유일한 해를 지닌다고 할 수 있다. 그러나 여기서 순환 공조 장치의 대수를 의미하는 결정 변수 n 은 이산형 변수이나 위 식의 전개처럼 연속형 함수로 간주할 때, 이에 관한 연속 함수의 형태가 해를 지닌다면 이 연속 함수를 만족하는 각 점 즉, 이산형 변수 n 의 값도 이를 만족하는 함수의 개형을 따를 것이다. 따라서 식(1) 형태의 목적 함수의 비용식은 요구된 신뢰도를 만족하는 최소의 비용을 고려한 최적의 공조 장치 대수에 관한 유한한 해를 구할 수 있다.

3.2 공기 여과용 필터의 교체

필터의 손상 또는 이에 상응하는 이상이 발생하면 오염된 공기가 실내로 유입됨에 따라 고농도의 입자 오염물이 급속히 확산된다. 따라서 이러한 손실을 방지하기 위하여 n 개로 구성된 청정실내의 모든 필터는 주기적으로 계획된 시간 kT ($k=1, 2, \dots$)에 교체를 한다. 이때 전체 공기 여과 필터를 교체하려는 주기 사이에서 손상이 발생한 해당 필터는 응급수리를 하는 보전 방식을 채택한다.

기본적인 응급수리의 모형으로는 $[0, t]$ 시간동안의 고장횟수 $N_1(t)$, 교체 횟수 $N_2(t)$ 와 응급수리 비용 및 교체 비용을 고려하여 $t \rightarrow \infty$ 에 관하여 최소 비용을 지니는 교체 시점 T 를 구하는 것이다. 그러나 본 모형에서는 청정실내에 독립적으로 동일한 기능을 발휘하는 n 개의 공기 여과 필터가 장착되어 있는 경우의 최적 교체 시점을 분석하였다.

청정실의 가동중에 공기여과 필터의 손상이 발생 되었을 경우, 만일 전체 필터의 교체 시점에 도달하지 않았을 때는 손상된 필터에 응급 조치를 행하여 청정실의 가동을 지속시킨 후, 일정 교체 시점에 도달한 후에 n개의 필터 모두를 교체한다. 이때 각 필터는 시간이 경과함에 따라 오염물질을 많이 포함하게 되고 이 상태에서 응급 수리를 시행할 경우는 그만큼 응급 수리 작업 중에 누적된 오염입자가 유입되어 청정실의 오염을 가중 시킬 위험도가 높다. 따라서 이러한 손실을 고려하여 응급 수리비용은 시간에 따라 증가하는 것으로 간주하였다.

$$\begin{aligned}
 \bar{C}(T) &= \frac{n E[C_0(t_1) + \dots + C_0(t_{NT})] + C_R}{T} \\
 &= \frac{n \sum_{k=0}^{\infty} k E[C_0(H^{-1}(\tau)) P_N(N(T)=k)] + C_R}{T} \\
 &= \frac{n [\frac{1}{H(T)} \cdot \int_0^{H(T)} C_0(H^{-1}(t)) dt \cdot H(T)] + C_R}{T} \\
 &= \frac{[n \int_0^T C_0(t) h(t) dt + C_R]}{T} \quad (4)
 \end{aligned}$$

단위 시간당 평균비용 $\bar{C}(T)$ 최소화하는 최적 T 의 필요조건은

$$\frac{d\bar{C}(T)}{dT} = 0 \text{ 로서}$$

$$C_0(T)h(T) \cdot T - \int_0^T C_0(t)h(t)dt = \frac{C_R}{n} \text{ 이다.} \quad (5)$$

위 식 (5)에서 $C_0(t)h(t)$ 는 증가 함수이므로

$C_0(T)h(T) \cdot T - \int_0^T C_0(t)h(t)dt$ 는 역시 증가 함수이다. 그러면

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T [C_0(T)h(T) - C_0(t)h(t)]dt > \frac{C_R}{n}$$

가 만족된다면 $\bar{C}(T)=0$ 이 성립하는 최적 교체시점 T^* 가 유한하게 존재한다.

4. 수치 예제

Ulpa (Ultra Low Penetration Air)필터는 여과 면적 및 오염 입자의 포집 용량이 크고 청정 실내의 최종 필터로 이용된다. 이 때 공기 여과필터의 응급 수리비용 및 고장밀도 함수는 다음과 같은 형태를 지닌다.

$$C_0(t) = \frac{k}{n} t^\alpha \quad (\alpha \geq 0) \quad F(t) = 1 - e^{-\frac{\lambda}{n} t^\beta}$$

$$H(t) = \frac{\lambda}{n} t^\beta$$

$\alpha = 1$ 인 경우, 기대할 수 있는 단위 시간당 평균비용은

$$\begin{aligned} \bar{C}(T) &= \frac{1}{T} [n \int_0^T C_0(t) h(t) dt + C_R] \\ &= \frac{1}{T} [k H(T) \cdot T - \int_0^T H(t) dt] + C_R \\ &= \frac{1}{T} \left[\left(\frac{k \lambda \beta}{n} \right) \left(\frac{T^{\beta+1}}{\beta+1} \right) + C_R \right] \quad \text{이다.} \end{aligned}$$

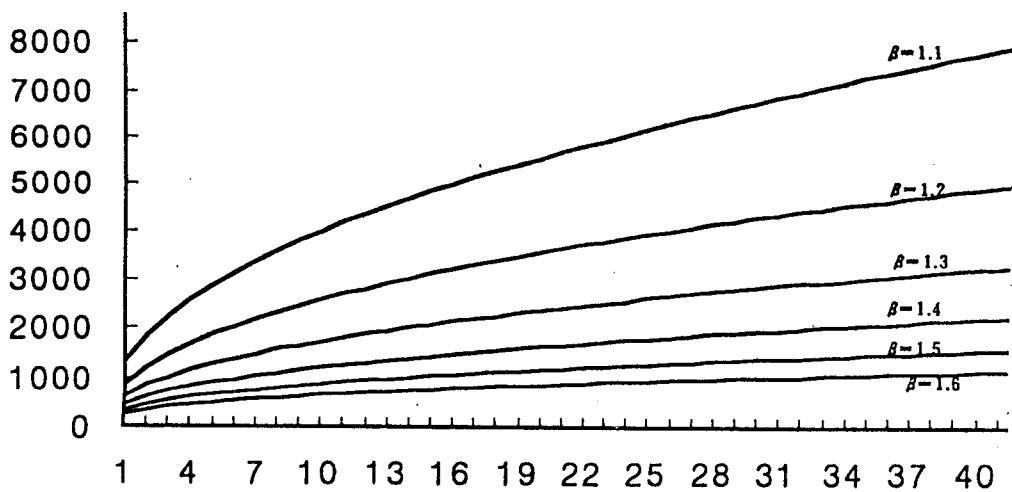
이로부터 최적의 T^* 는 다음 식을 만족한다

$$C_0(T) h(T) \cdot T - \int_0^T C_0(t) h(t) dt = \frac{C_R}{n}$$

$$k \lambda \beta T^{\beta+1} - \int_0^T k \lambda \beta t^\beta dt = \frac{C_R}{n} \text{로 부터}$$

동일한 n 개로 구성된 청정실 전체 필터에 관한 최적 교체 시점은

$$T^* = \left(\frac{C_R n (\beta+1)}{k \lambda \beta^2} \right)^{\frac{1}{(\beta+1)}} \text{이다.}$$

(그림 2. n , β 의 변화에 따른 교체시점)

Ulpa필터의 고장분포에 관한 모수가 $\lambda = 0.6 \times 10^{-4}$, $k = 8 \times 10^5$, $C_R = 0.1 \times 10^9$, $\beta = 1.2$, $n = 30$ 인 경우, 전체 필터의 최적 교체시점은 약 4,240 시간이 된다.

그림(2)는 가로축에 장착된 필터의 개수, 세로축에 교체 시점을 좌표로 하여 모수 β 의 변화와 필터의 개수 n 에 따른 교체 시점의 변화를 나타낸다.

이로부터 웅급수리가 가능할 때 청정실내의 전체 공기 여과 필터의 교체 시점은 모수 β 의 변화에 민감하게 변화함을 알 수 있다. 또한 장착된 필터의 개수 n 의 증가에 따라 이의 교체 수명이 증가됨을 알 수 있는데 이는 실제로 공기흐름의 패턴을 일정한 층류의 상태로 유지할 수 있는한, 최소 단위 면적의 필터 장착에 의한 청정실의 운영이 경제적임을 알 수 있다.

5. 결 론

청정실의 정상적인 가동을 위해서는 공기 흐름의 패턴을 일정한 층류 (Laminar)상태로 유지하기 위해 순환 공조 장치 및 공기 여과 필터에 관한 합리적 보전 정책이 시행이 중요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 청정실의 일정 가동시간 중, 목표로 하는 신뢰도를 달성하기 위해 순환 공조 장치의 신뢰도 개념에 의거한 중복 설계시, 최소 비용을 고려한 최적 공조 장치 대수의 결정에 관한 수리적 모형을 정식화 하였다. 또한 n 개의 공기 여과 필터를 청정실 가동중에 웅급 수리를 하며 사용하는 경우, 최적 교체 시점에 관한 모델을 분석 하였다. 그러나 이러한 보전 정책에 관한 모델에서 실제 가동의 중지없이 오염 입자의 혼입이 없는 웅급 수리 방법 또는 교체방법이 가정이 아닌 실제 물리적으로 가능한가, 즉, 이러한 보전에 관한 기술적 문제가 개발될 수 있는가는 앞으로의 연구 과제로 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Barlow, R.E. and Proschan, F., Mathematical Theory of Reliability. John Wiley & Sons, New York, 1965
2. Philip J. Boland., " Periodic Replacement when Minimal Repair Costs vary with Time, Naval Research Logistics Quarterly, Vol.29, No. 4, 1982
3. Philip J. Boland., Frank Proschan., " Periodic Replacement with Increasing Minimal Repair Costs at Failure , " Operation Research, Vol. 30, No.6 .1982
4. R. G. Fenton, " Optimum Reliability at Minimum Cost," Journal of Engineering for Industry, August. 1976.
5. Scheaffer, R.L, " Optimal Age Replacement Policies with an Increasing Cost Factor." Technometrics, Vol.13, No.1 1971.
6. T. Nakagawa, " A summary of Periodic Replacement with Minimal Repair at Failure. " Journal of the Research Society of Japan, Vol. 24, No.3, 1981
7. T. Nakagawa, and M. Kowada, " Analysis of a system with Minimal Repair Cost and

- Its Application to Replacement Policy ", European Journal of Operation Research, 12, 1983
8. Won Young yun, " An Age Replacement Policy with Increasing Minimal Repair Cost, " Microelectron Reliability, Vol.29, No.2, 1989.
9. 김 재귀, 공기 필터 시스템, 대일 필터 (주), 1996