

## 해석적 방법을 통한 압축기의 파울링 해석

송태원\* · 김동섭\*\* · 김재환\*\*\* · 노승탁\*\*\*\*

### Prediction of Compressor Fouling Using an Analytic Method

Tae Won Song\*, Tong Seop Kim\*\*, Jae Hwan Kim\*\*\*, Sung Tack Ro\*\*\*\*

Key Words: Fouling(막오염), Performance Degradation(성능 저하), Particle Motion(입자 거동), Collection Efficiency(점착 효율), Particle Distribution(입자 분포)

#### ABSTRACT

The performance of gas turbines decreases as their operating hours increase. Compressor fouling is the main reason for this time-dependent performance degradation. Airborne particles adhere to the blade surface and results in the change in the blade shape. It is difficult to exactly analyze the mechanism of the compressor fouling because the growing process of the fouling is very slow and the dimension of the fouled depth is very small compared with blade dimensions. In this study, an analytic method to predict the motion of particles and their deposition inside axial flow compressors is proposed. The analytic model takes into account the blade shape and the flow within the blade passage. Comparison of simulation result with field data shows the feasibility of the model. Influence of the particle distribution on the compressor fouling is also examined.

#### 1. 서 론

가스터빈엔진은 여타 기계와 마찬가지로 오랜 기간 사용하게 되면 초기 상태만큼 성능을 내지 못한다. 이는 막오염(fouling), 침식(erosion), 부식(corrosion) 등으로 인한 엔진의 성능 저하가 발생하기 때문이다. 이중 막오염은 엔진 성능 저하의 약 70~85%를 차지하는 지배적인 요인이다.<sup>(1)</sup> 대기에는 먼지, 검댕, 화분과 같은 미세 입자들과 엔진에서의 불완전연소 등으로 인해 발생하는 입자들이 떠다닌다. 이러한 불순물들은 필터를 통해 걸러지지만 제거되지 않은 일부가 압축기에 들어가 습분, 불완전연소 연료나 윤활유 등과 함께

블레이드 표면에 점착하여 막오염을 일으킨다. 고효율의 필터를 사용하면 막오염을 줄일 수 있지만 경제적인 부담이 크고, 추가적인 압력 손실이 발생하므로 사용에 제한이 있다.

막오염으로 인한 엔진의 성능 저하는 다음과 같다. 막오염이 생기면 블레이드 형상이 변형되어 압축기의 유량, 압력 상승 및 효율이 모두 감소한다. 실례로 100여시간 운전후 저압압축기는 압축비와 효율이 각각 3~4%와 2~4%를, 고압압축기는 각각 10%와 6~7%의 감소를 보였다고 보고된 바 있다.<sup>(2)</sup> 이와 같은 압축기의 성능저하로 터빈 출력이 줄어들며 비연료소비율(specific fuel consumption)이 증가하게 된다. 게다가 서지 마진 또한 감소하게 되어 엔진 작동의 안정성도 위협받게 된다.

막오염으로 인한 단성능선도의 변화를 이용한 압축기의 성능 저하 예측과 관련하여서는 비교적 많은 연

\* 서울대학교 대학원 기계공학부

\*\* 인하대학교 공과대학 기계공학과

\*\*\* 서울대학교 터보·동력기계연구센터

구가 이루어져 왔으나,<sup>(3)~(7)</sup> 그런 결과를 가져오는 막오염의 생성 구조 및 과정을 예측하기 위한 연구는 극히 일부를<sup>(2),(8)</sup> 제외하면 여전히 미흡한 상태이다. 이는 막오염이 장기간에 걸쳐 진행되며 오염입자의 크기가 수  $\mu\text{m}$ 이고 최종 막오염 두께가 약 1mm 정도로 블레이드 크기에 비해 매우 작아서 정확한 수치적 해석이 어렵기 때문으로 보인다.

본 연구에서는 입자 거동을 이용한 해석적인 방법으로 막오염 생성구조를 예측하였다. 기존의 Tarabrin 등<sup>(8)</sup>의 실린더 모델에 비해 블레이드의 형상과 압축기 내부 유동을 좀더 현실적으로 반영하였다. 장기간 운전된 실제 압축기의 막오염 측정값과 비교를 통해 모델링의 타당성을 보였고 입자의 분포선도가 막오염에 미치는 영향을 살폈다.

## 2. 막오염 생성 구조

압축기 내에서의 막오염의 생성은 유입 공기에 부유하는 미세 입자의 거동으로 인한 점착으로 해석될 수 있다. 우선, 일반적인 유체흐름 내에서의 입자 거동에 대해서 살펴보자. Figure 1에서 실린더(또는 섬유) 주위로 흐르는 유동이 있을 때 입자는 유선(streamline)을 따라 이동하다가 1) 브라운운동(brownian motion)에 의해서 확산(diffusion)되거나 2) 표면에 포착(interception)되기도 하고 3) 입자의 관성에 의해서 충돌(impaction)한다. 유체의 속도가 충분히 낮으면 입자의 세 가지 점착 과정 중 확산이 지배적이고 섬유의 크기가 입자의 크기보다 작거나 같으면 포착이 중요한 지배인자가 된다.<sup>(9)</sup> 하지만, 유체 속도가 충분히 빠르고 블레이드 크기가 입자의 크기와 비교가 되지 않을 정도로 큰 것을 감안하면 충돌이 가장 큰 영향을 미치게 됨을 알 수 있다. 따라서 압축기 블레이드에 도달

하는 입자의 거동을 살펴볼 때 앞서의 여러 현상중 일반적으로 충돌만이 고려된다.<sup>(8),(10),(11)</sup>

실제 압축기 내의 유동은 3차원적이나 해석의 편의를 위해서 반경방향의 성분을 무시한 2차원 유동으로 가정하자. 그러면, 회전에 의한 원심력과 코리올리력(Coriolis force) 등에 의한 영향은 무시할 수 있다. 그리고, 충돌하는 모든 입자가 표면에 점착된다는 가정하에 실린더의 점착효율(collection efficiency)을 다음과 같이 정의한다.

$$E = \frac{\text{실린더에 충돌하는 입자의 수}}{\text{실린더의 직경으로 오는 입자의 수}} = \frac{H}{L} \quad (1)$$

이것은 실제 표면에 부딪히는 입자를 포함한 유로 크기와 표면적에 해당하는 유로 크기의 비로서, 관성력에 의해서 입자가 유선으로부터 벗어나는 정도를 나타낸다.  $E$ 가 커질수록 관성력이 커져서 더 많은 수의 입자가 유선으로부터 벗어나 실린더에 충돌하게 됨을 뜻한다.

Figure 2와 같은 익렬(cascade) 안에 있는 블레이드에 대한 점착 효율(cascade collection efficiency)을 구해보면 다음과 같다.

$$E = \frac{H}{L} = \frac{H}{c \sin(\beta_b - \beta_1)} \quad (2)$$

$$E_c = E \frac{c}{s} \frac{\sin(\beta_b - \beta_1)}{\sin \beta_1} \quad (3)$$

여기서  $c$ ,  $s$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_b$ 는 각각 현(chord), 스페이스(space), 입자의 진입각과 엇갈림각(stagger angle)을 나타낸다.  $E_c$ 는 익렬로 들어오는 모든 입자중에 블레이드에 점착되는 입자의 비율이다. Figure 2를 보면  $E_c$ 가  $E$ 보다 항상 작거나 같음을 알 수 있다. 중요한 것은 식 (2)의  $H$ , 결국은  $E$ 를 구하는 것이다. 간단한 해석을 위해서 Tarabrin 등<sup>(8)</sup>은 블레이드를 하나의 실린더로 가정하고 실린더 주위의 2차원 포텐셜 유동(potential flow)을 이용하여 익렬 점착 효율을 다음과 같이 구하였다.

$$Stk = \frac{\text{stopping length}}{\text{characteristic length}}$$

$$E = (1 + 0.77/Stk)^{-1} \quad (5)$$

$$= \frac{\tau w}{L_c} = \frac{\left\{ \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \right\} w}{2 c \sin(\beta_b - \beta_1)} \quad (4)$$

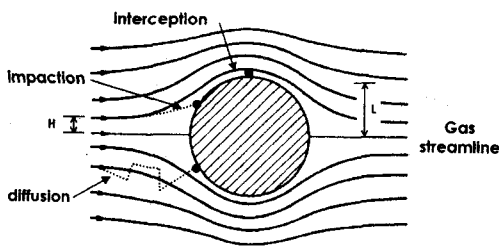


Fig. 1 Particle motion around a cylinder

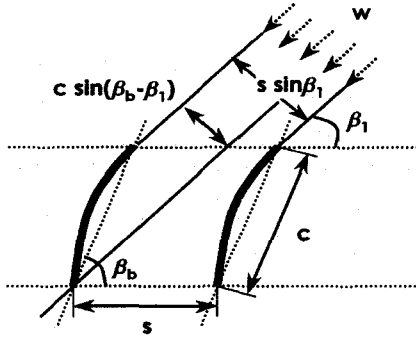


Fig. 2 Airfoil and cascade nomenclature

$$E_c = (1 + 0.77/Stk)^{-1} \frac{c}{s} \frac{\sin(\beta_b - \beta_1)}{\sin \beta_1} \quad (6)$$

이 때  $Stk$ ,  $\tau$ ,  $L_c$ ,  $\rho_p$ ,  $d_p$ ,  $w$ ,  $\mu$ 는 각각 Stokes수, 완화시간(relaxation time), 특성길이(characteristic length), 입자의 밀도, 입자의 직경, 상대속도와 점성계수를 의미한다. 식 (6)으로부터 진입하는 상대속도( $w$ )가 커지거나 영각(angle of attack)이 커지면 익형 점착 효율이 커진다는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 그러나, 정확한 해석을 위해서는 대기의 상대습도, 윤활유의 기화, 입자의 되튐정도(degree of rebound)와 3차원 유동 효과인 회전에 의한 원심력과 코리올리력 등 여러 요인들을 고려해 주어야 한다.<sup>(8)</sup>

### 3. 막오염 생성 구조의 개선된 접근방식

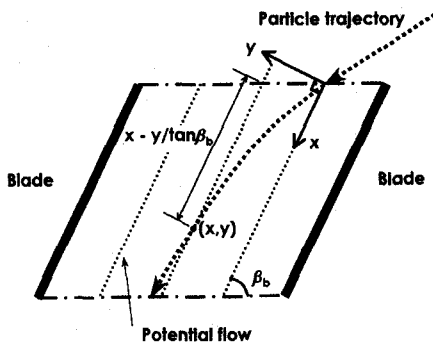


Fig. 3 Particle motion between blades

### 3.1 개요

앞절에 설명된 Tarabrin 등<sup>(8)</sup>의 실린더 모델을 통해서 압축기 내에서의 일반적인 입자 거동을 살펴볼 수 있다. 하지만, 실린더 모델은 실제 블레이드의 형상과 많은 차이가 있으므로 좀 더 현실적으로 형상을 반영 하되 쉽고 간편한 접근을 통하여 입자 거동을 이용한 모델들의 막오염 생성 해석에 대한 적용 가능성을 살펴보고자 한다.

### 3.2 모델링

유체 흐름내의 입자의 거동식은 다음과 같다.

$$\tau \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \mathbf{v} = \mathbf{u} \quad (7)$$

여기서  $\mathbf{u}$ ,  $\mathbf{v}$ 는 각각 유체와 입자의 속도 벡터이다. 입자의 거동을 구하기 위해서 유체의 유동장 해석이 선행되어야 한다. 하지만, 구 또는 실린더 주위의 흐름을 단순한 기하학적인 유동장으로 한정하여 해석할 수 있으나 장애물의 형상이 보다 복잡한 경우(예를 들면 블레이드)에는 유동장을 미소부분으로 나누고 미소시간에 대한 수치해석을 해야 한다.<sup>(12)</sup> 그러나 대체로 이와 같은 복잡한 접근도 앞서와 같은 여러 현상들 대부분을 반영하지 못하여 실제 입자의 거동과 완전히 일치하지는 않는다. 따라서 유선의 패턴을 다음과 같이 단순화시켜 해석을 용이하게 하였다.

한 단내에 무한히 많은 블레이드가 있고 그 형상이 평판이라 가정하면 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 유체의 유선이 블레이드와 평행한 직선이 된다. 또한, 반경방향의 성분은 무시하고 충돌한 입자는 모두 점착된다고 가정한다. 블레이드 내부 유체의 상대속도의 변화 유무에 따라서 해석을 두 가지 경우로 나눠서 생각한다.

#### 3.2 Model 1 : constant-velocity of fluid

블레이드 내부에서 유체의 속도가 변하지 않는다고 가정하면 식 (7)의 우변이 상수가 된다. 그리고  $x$ 좌표축을 블레이드와 평행하게 놓고 식 (7)을  $x$ 성분과  $y$ 성분으로 분리해서 계산하면 다음과 같다.

$$\tau \frac{dv_x}{dt} + v_x = w \quad (8)$$

$$\tau \frac{dv_y}{dt} + v_y = 0 \quad (9)$$

입자궤적 위치를 좌표상의 점(x, y)라 하면 식 (8), (9)로부터 다음의 해를 얻을 수 있다.

$$x = wt + \tau(v_{xi} - w)(1 - \exp(-t/\tau)) \quad (10)$$

$$y = \tau v_{yi} (1 - \exp(-t/\tau)) \quad (11)$$

여기서  $v_{xi}$ 와  $v_{yi}$ 는 각 방향의 초기 진입 속도이다. 식 (11)를 식 (10)에 대입하면 x는 다음과 같다.

$$x = w\tau \ln\left(1 - \frac{y}{v_{yi}\tau}\right) + (v_{xi} - w)\frac{y}{v_{yi}} \quad (12)$$

한편 블레이드의 후연(trailing edge)에 충돌하는 입자의 이동거리 x는

$$x = c + \frac{y}{\tan\beta_b} \quad (13)$$

위와 같다. 식 (12)와 식 (13)이 일치하는 t의 값을 반복계산(iteration)을 하여 찾는다. 변환된 좌표계에서의 E와  $E_c$ 는 다음과 같다.

$$E = \frac{H}{L} = \frac{y/\sin(\beta_b)}{c \sin(\beta_b - \beta_1)} \quad (14)$$

$$E_c = E \frac{c}{s} \frac{\sin(\beta_b - \beta_1)}{\sin\beta_1} = \frac{y}{s \sin(\beta_b)} \quad (15)$$

### 3.3 Model 2 : variable-velocity of fluid

압축기는 블레이드 내부에서 유체의 상대속도를 감소시켜 압력을 상승시킨다. 이러한 실제 현상을 반영하기 위하여 블레이드 입·출구에서 유체의 상대속도는 de Haller 척도( $w_2/w_1 < 0.72$ )를 만족하고 내부에서는 상대속도가 선형적으로 감소한다고 가정한다. 앞서와 같이 x 좌표축을 블레이드와 평행하게 잡으면 y축 방향으로의 지배방정식과 해는 위와 동일하다.

$$\tau \frac{dv_x}{dt} + v_x = w \left\{ 1 - 0.28 \frac{x - (y/\tan\beta_b)}{c} \right\} \quad (15)$$

$$= w \left\{ 1 - 0.28 \frac{x - \tau v_{yi}(1 - e^{-t/\tau})/\tan\beta_b}{c} \right\} \quad (16)$$

식 (16)의 해는

1)  $D = c - 1.12\tau w > 0$  일 때

$$x = \frac{0.28\tau v_{yi} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right\} + c \tan\beta_b}{0.28 \tan\beta_b} + \tau \sqrt{\frac{c}{D}} \left\{ 0.28 (\lambda_2 \exp(\lambda_1 t) - \lambda_1 \exp(\lambda_2 t)) + \left( v_{xi} - \frac{v_{yi}}{\tan\beta_b} \right) (\exp(\lambda_1 t) - \exp(\lambda_2 t)) \right\} \quad (17)$$

이 때  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 는 다음과 같다.

$$\lambda_1 = -\frac{1}{2\tau} + \frac{1}{2\tau} \sqrt{\frac{D}{c}} \quad (18)$$

$$\lambda_2 = -\frac{1}{2\tau} - \frac{1}{2\tau} \sqrt{\frac{D}{c}} \quad (19)$$

2)  $D = c - 1.12\tau w = 0$  일 때

$$x = \frac{0.28\tau v_{yi} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right\} + c \tan\beta_b}{0.28 \tan\beta_b} + \exp\left(-\frac{t}{2\tau}\right) \left\{ -\frac{c}{0.28} + \left( v_{xi} - \frac{v_{yi}}{\tan\beta_b} - \frac{c}{0.56\tau} \right) t \right\} \quad (20)$$

3)  $D = c - 1.12\tau w < 0$  일 때

$$x = \frac{0.28\tau v_{yi} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right\} + c \tan\beta_b}{0.28 \tan\beta_b}$$

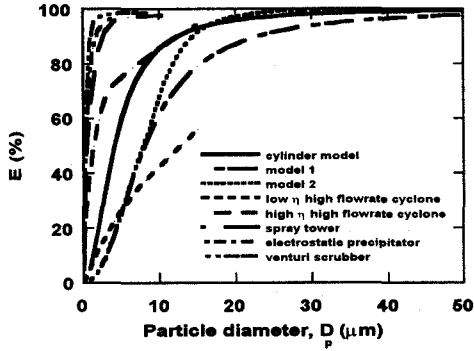


Fig. 4 Collection efficiency in comparison with Tarabrin's cylinder model<sup>(8)</sup> and examples of general collection efficiencies<sup>(9)</sup>

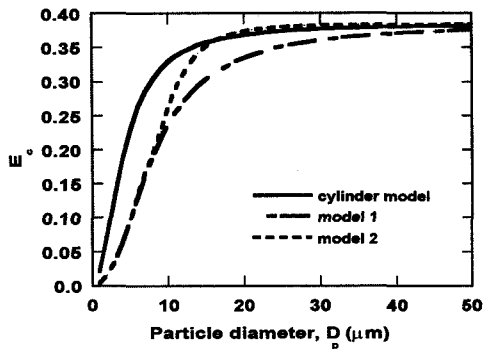


Fig. 5 Cascade collection efficiency in comparison with Tarabrin's cylinder model<sup>(8)</sup>

$$\begin{aligned}
 & - \exp\left(-\frac{1}{2\tau}\right) \left\{ \frac{c}{0.28} \cos(Dt) \right. \\
 & \left. - \frac{1}{D} \left( v_{xi} - \frac{v_{yi}}{\tan\beta_b} - \frac{c}{0.56\tau} \right) \sin(Dt) \right\} \quad (21)
 \end{aligned}$$

앞서와 동일한 방법으로  $t$ ,  $E$ ,  $E_c$ 를 구한다.

보다 현실적인 유체의 유동장을 식 (7)에 적용하면 정확하지만 더욱 복잡한 해를 얻게 될 것이다.

## 4. 결과 및 토의

### 4.1 실린더 모델과의 비교·분석

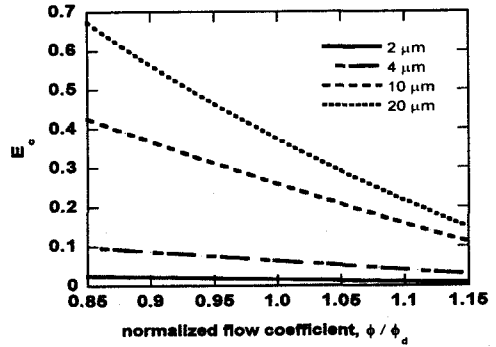


Fig. 6 Variation in collection efficiency with flow coefficient

해석에 사용되어진 익형의 기하형상과 설계점에서의 속도 자료를 Table 1에 정리하였다.

Figure 4는 입자 직경에 따른 점착 효율을 나타낸 것으로 저  $\mu\text{m}$  영역에서 차이를 보이나 증가하는 경향성이나 수렴하기 시작하는 입자 직경이 실린더 모델과 유사함을 확인할 수 있었다. 이처럼 실린더 모델이 저  $\mu\text{m}$  영역에서 큰 점착 효율을 갖는 이유는 유체의 포텐셜 유동을 곡률이 큰 실린더 주위의 것으로 반영함으로써 입자의 관성에 의한 충돌이 많이 반영되기 때문이다. Model 2가 Model 1에 비해서 큰 값을 갖는 이유는 블레이드 내부에서 유체의 상대속도가 감소함에 따라 입자의 관성력이 유체의 유동에 대해서 상대적으로 더욱 크게 작용하기 때문이다. 또한, 이해를 돕기 위해 실제 사용되는 대기중의 분진 측정 장치들의 점착 효율도 같이 도시하였다. 이처럼 압축기에서 비교적 높은 점착 효율이 나오는 것은 압축기 내부 유체의 고속유동으로 인한 관성력이 크기 때문이다.

Figure 5는 Fig. 4의 결과를 바탕으로 익렬에 들어오는 총 입자중에 실제 점착되는 비율인 익렬 점착 효율을 계산한 것으로서 최대 약 0.38 정도의 값을 보인다. Figure 4와 Fig. 5는 서로 다른 모델링을 통하여 얻은 결과가 유사한 경향을 보여줌으로써 이러한 모델

Table 1 Specification of blade and velocities

Chord, $c$	7 cm
Solidity, $c/s$	1.5
Stagger angle, $\beta_b$	$40.6^\circ$
Axial velocity	150 m/s
Blade tip speed	350 m/s

들이 실제 현상과 크게 다르지 않는다는 것을 확인시켜주고 있다. 이와 같이 복잡한 3차원 계산 없이도 간단한 해석적 방법으로 비교적 효과적으로 점착효율의 계산이 가능하다.

#### 4.2 입자의 크기가 동일할 때

Tarabim 등<sup>(8)</sup>은 상대속도( $w$ )와  $\beta_1$ 에 의한 영향을 따로 고려했으나 속도삼각형에서 두 값은 연관(couple)되어 있음을 쉽게 확인할 수 있다. 즉, 유량(또는 유량계수)이 감소하게 되면  $w$ 는 증가하고  $\beta_1$ 은 감소하게 되어 점착효율에 미치는 효과는 더욱 커지게 된다. Figure 6의 계산 결과가 이러한 경향을 보여 준다. 유량이 증가하면 반대의 효과가 발생하게 된다. 또한, Fig. 6을 통해서 입자의 크기가 커질수록 유량계수가 줄어들면서 점착효율의 증대폭이 커지게 되어 막오염을 촉진시킴을 알 수 있다.

#### 4.3 유량이 동일할 때

유입되는 모든 입자들이 크기별로 균일하게 분포하고 각 단마다 블레이드의 형상이 동일하다고 가정하면, 익렬의 두 블레이드 사이로  $s \sin(\beta_b - \beta_1)$ 에 비례하는 입자가 들어온다면 블레이드에  $E c \sin(\beta_b - \beta_1)$ 에 비례하는 양이 점착된다. 점착되지 않고 다음 익렬의 두 블레이드로 들어가는 입자의 수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Number of undeposited particles} \\ = s \sin(\beta_b - \beta_1) \sim E c \sin(\beta_b - \beta_1) \quad (22) \end{aligned}$$

한 단은 동익과 정익으로 이루어져 있으므로 한 단에서 위와 같은 과정을 두 번씩 거치게 된다. 특히, 압축기에 입구안내깃(inlet guide vane)이 설치된다면 첫 단은 세 번 고려해주어야 한다. 유량이 줄어들거나 입자의 크기가 커지면 점착 효율이 커지므로 점착되지 않고 다음 단으로 유입되는 입자의 수는 줄어든다. 첫 단에서 큰 입자들은 다수가 점착되나 작은 입자들은 소수만 점착되고 나머지는 통과하게 된다. 두 번째 단에서 큰 입자들은 유입되는 절대 입자수가 작아져서 영향이 줄어들지만 작은 입자들은 유입되는 절대 입자수가 첫 단과 비교하여 거의 변화가 없으므로 첫 단과

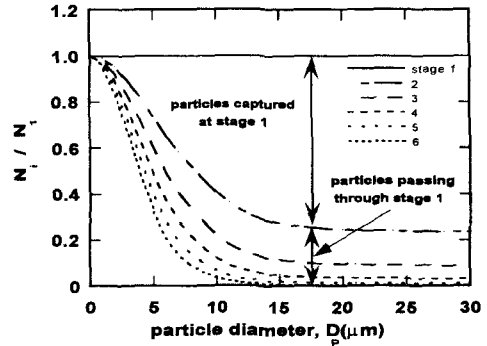


Fig. 7 Variation in number of captured particles at each stage with particle diameter

동일한 영향을 준다. 이러한 경향은 뒷 단으로 갈수록 심화된다(Figure 7). 여기서  $N_i$ 는  $i$ 번째 단으로 들어오는 입자의 개수를 의미한다.

#### 4.4 입자 분포에 따른 무차원 점착질량

지금까지는 각각의 입자 크기에 따른 영향을 살펴보았지만 실제 대기에는 다양한 크기의 입자들이 부유하고 있으므로 압축기 각 단에서의 오염정도를 모사(simulation)하기 위해서는 입자의 분포 선도가 필요하다. 하지만, 입자의 분포 선도는 엔진이 설치된 위치와 시간에 따라 계속 변하기 때문에 정확한 값을 정하기 어렵다. 또한, 막오염 현상은 단기간에 발생하는 것이 아니라 오랜 시간에 걸쳐서 생기는 것이므로 본 연구에서는 입자의 평균적인 입자 분포 선도에 따른 영향을 살펴보고자 한다.

입자에 의한 침식과 막오염을 방지하기 위해서 엔진 입구에 필터가 설치되는데 이것에 의해서 입자의 최대 직경이 결정된다. 필터에는 일반적으로 관성 필터(inertial filter), 자기-청정 펄스 필터(self-cleaning pulse filter), 고효율 필터(high efficiency filter) 등이 있다. 이 중에서 가장 구조가 간단하고 저렴한 관성 필터는 침식을 일으키는 약  $20\mu\text{m}$  이상의 입자를 제거시킬 수 있으므로 본 연구에서는 입자의 허용최대직경을  $20\mu\text{m}$ 로 계산하였다.<sup>(1)</sup>

Figure 8은 첨부된 입자 분포 선도에 따른 각 단에서의 점착되는 질량을 나타낸 것으로 실제로 장기간 운전된 16년 압축기로부터 얻은 막오염 측정값과 비교하였다.<sup>(13)</sup> Case A는 입자가 클수록 많이 존재하는 선

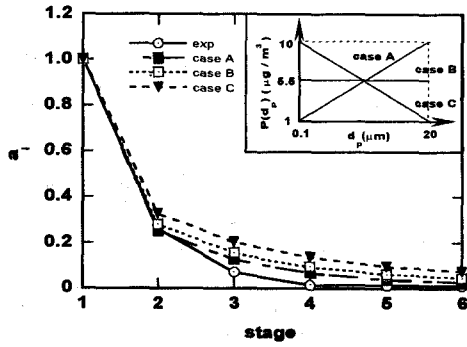


Fig. 8 Variation in amount of collected particles with stage : the effect of particle distribution (max. particle diameter  $\sim 20 \mu\text{m}$ )

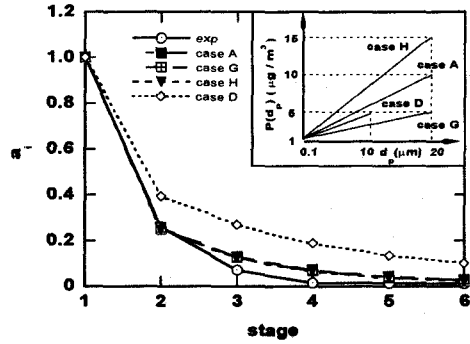


Fig. 10 Variation in amount of collected particles with stage : the effect of maximum particle size

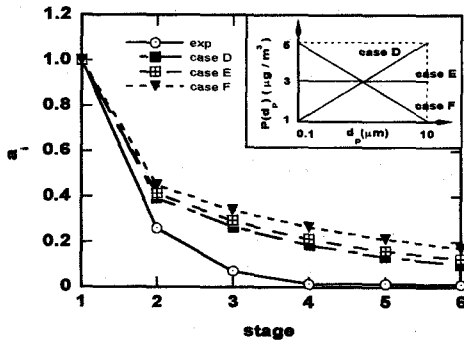


Fig. 9 Variation in amount of collected particles with stage : the effect of particle distribution (max. particle diameter  $\sim 10 \mu\text{m}$ )

형분포이고, Case B는 반대의 선형분포이며, Case C는 분포가 균일한 경우이다. 모든 단계 걸쳐 점착층 안정화(deposition layer stability)에 걸리는 시간이 동일하게 매 순간마다 Fig. 7의 관계가 만족된다고 가정한다. 각 단계의 점착 질량은  $0.1\mu\text{m}$ 부터  $1\mu\text{m}$ 간격으로 해당 크기에서의 점착 질량을 합하였다. 입자 분포 선도에 따라 점착 질량의 절대값의 차이가 있으므로 매 경우마다 첫 단계의 점착 질량으로 무차원화하여 비교하였다. 위의 과정을 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$a_i = \frac{\sum (N_i - N_{i+1}) \cdot P(d_p)}{\sum (N_1 - N_2) \cdot P(d_p)} \quad (23)$$

여기서  $a_i$  와  $P(d_p)$ 는 각각  $i$  번째 단계의 무차원 점

착 질량과 입자의 분포 선도를 나타낸다. 큰 입자의 분포가 지배적인 경우(case A) 앞단계에서 다수가 점착되어 뒷 단계 비해 무차원 점착 질량이 커진다. 이와는 달리 작은 입자의 분포가 지배적일 때(case C)는 큰 입자가 앞단계에서 다수가 점착되더라도 그 질량이 작고 Fig. 7에서 알 수 있었듯이 작은 입자가 모든 단계에서 비슷한 영향을 미치므로 뒷 단계의 무차원 질량의 증가를 가져온다. 뒷 단계로 갈수록 실제 측정값이 작아지는 이유는 고온·고압 상태에서 습분이 증발하여 입자의 점착력이 저하되었기 때문으로 풀이된다.

Figure 9는 입자의 최대 직경이  $10\mu\text{m}$ 일 때 각 단계에서 점착되는 질량을 나타낸 것이다. Figure 8과 비교해 보았을 때 뒷 단계에서의 무차원 점착 질량이 증가하였는데 이것은 앞에서 언급했듯이 작은 입자의 영향이 커졌기 때문이다.

Figure 10은 동일한 최대 직경( $20\mu\text{m}$ )에 기울기가 다른 입자 분포 선도(case A, G, H)에 따른 각 단계의 무차원 점착 질량은 거의 변화가 없음을 보여준다. 최대 직경  $10\mu\text{m}$ 일 때와의 비교를 통해서 각 단계의 무차원 점착 질량의 분포가 입자분포선도의 기울기보다는 필터에 의해서 결정되는 최대 직경에 더욱 민감하다는 결과를 얻었다. 또한, 사용되어지는 필터의 종류, 입자 분포 선도의 경향과 첫 단계의 오염정도를 측정한다면 압축기 전체 단계의 오염정도를 예측할 수 있음을 알 수 있다.

## 5. 결과 및 토의

본 연구에서는 해석적인 방법을 이용해서 압축기의 막오염 생성구조를 예측하였으며 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

- (1) 설계값에 비해 유량이 줄어들면 막오염이 촉진되며 입자의 크기가 커질수록 이러한 경향은 뚜렷해진다.
- (2) 큰 입자들의 다수가 앞단에서 점착되며 작은 입자들은 모든 단에서 비슷하게 점착된다.
- (3) 각 단의 무차원 점착질량 분포는 평균적인 입자 분포 선도보다는 필터에 의해 결정되는 입자의 최대 허용 직경에 영향을 더 크게 받는다.

## 후 기

이 논문은 2000년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

## 참고 문헌

- (1) Diakunchak, I. S., 1992, "Performance Deterioration in Industrial Gas Turbines," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 114, pp. 161~168.
- (2) Mezheritsky, A. D. and Sudarev, A. V., 1990, "The Mechanism of Fouling and the Cleaning Technique in Application to Flow Parts of the Power Generation Plant Compressors," ASME Paper 90-GT-103.
- (3) Saravanamuttoo, H. I. H. and Lakshminarasimha, A. N., 1985, "A Preliminary Assessment of Compressor Fouling," ASME Paper 85-GT-153.
- (4) Aker, G. F. and Saravanamuttoo, H. I. H., 1989, "Predicting Gas Turbine Performance Degradation Due to Compressor Fouling Using Computer Simulation Techniques," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 111, pp. 343~350.
- (5) Seddigh, F. and Saravanamuttoo, H. I. H., 1991, "A Proposed Method for Assessing the Susceptibility of Axial Compressors to Fouling," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 113, pp. 595~601.
- (6) Haq, I. and Saravanamuttoo, H. I. H., 1993, "Axial Compressor Fouling Evaluation at High Speed Settings Using an Aerothermodynamic Model," ASME Paper 93-GT-407.
- (7) Massardo, A. F., 1991, "Simulation of Fouled Axial Multistage Compressors," *IMEchE conference on Turbomachinery*, paper C423/048, pp. 243~252.
- (8) Tarabrin, A. P., Schurovsky, V. A., Bodrov, A. I. and Stalder, J. P., 1998, "An Analysis of Axial Compressor Fouling and a Blade Cleaning Method," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 120, pp. 256~261.
- (9) Heinsohn, R. J. and Kabel, R. L., 1999, *Sources and Control of Air Pollution*, Prentice Hall.
- (10) Tabakoff, W., 1984, "Review - Turbomachinery Performance Deterioration Exposed to Solid Particulates Environment," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 106, pp. 125~134.
- (11) Humphrey, J. A. C., 1990, "Fundamentals of Fluid Motion in Erosion by Solid Particle Impact," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 11, pp. 170~195.
- (12) Hinds, W. C., 1982, *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, John Wiley & Sons, Inc.
- (13) Tarabrin, A. P., Schurovsky, V. A., Bodrov, A. I. and Stalder, J.P., 1998, "Influence of Axial Compressor Fouling on Gas Turbine Unit Performance Based on Different Schemes and with Different Initial Parameters," ASME Paper 98-GT-416.