

## 해석적 방법을 이용한 가스터빈 축류 압축기의 파울링 현상 해석

송태원\* · 김동섭\*\* · 김재환\*\*\* · 손정락† · 노승탁\*\*\*\*  
(2001년 1월 20일 접수, 2001년 8월 31일 심사완료)

### Predictions of Fouling Phenomena in the Axial Compressor of Gas Turbine Using an Analytic Method

Tae Won Song, Tong Seop Kim, Jae Hwan Kim, Jeong Lak Sohn and Sung Tack Ro

**Key Words :** Fouling(막오염), Collection Efficiency(점착효율), Particle Distribution(입자분포), Axial Compressor(축류압축기), Gas Turbine(가스터빈)

#### Abstract

The performance of gas turbines is decreased as their operating hours increase. Fouling in the axial compressor is one of main reasons for the performance degradation of gas turbine. Airborne particles entering with air at the inlet into compressor adhere to the blade surface and result in the change of the blade shape, which is closely and sensitively related to the compressor performance. 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 on the blade surface is very small compared with blade dimensions. In this study, an improved analytic method to predict the motion of particles in compressor cascades and their deposition onto blade is proposed. Simulations using proposed method and their comparison with field data demonstrate the feasibility of the model. It is found that some important parameters such as chord length, solidity and number of stages, which represent the characteristics of compressor geometry, are closely related to the fouling phenomena. And, the particle size and patterns of their distributions are also important factors to predict the fouling phenomena in the axial compressor of the gas turbine.

기호설명	
$a_j$ : 무차원 점착질량, 식 (25) $c$ : 현(chord), m $C_c$ : 미끄럼 보정 계수, 식 (8) $C_x$ : 익렬 유입 유체의 축방향속도, m/s $D$ : 판별 계수(determinant coefficient)	$d_p$ : 입자 직경, $\mu\text{m}$ $E$ : 점착 효율 $E_c$ : 익렬(cascade) 점착 효율 $H$ : 실린더 반경 내에 충돌하는 입자의 진입 두께 $Kn$ : Knudsen 수 $L$ : 실린더의 반경 $L_c$ : 특성길이 $N$ : 진입하는 입자의 수 $P(d_p)$ : 입자 분포 선도, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $s$ : 피치(pitch), m $Stk$ : Stokes 수 $t$ : 시간, sec $u$ : 유체의 속도벡터 $U$ : 블레이드 접선속도, m/s
† 회원, 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 E-mail : jlsohn@snu.ac.kr TEL : (02)880-7434 FAX : (02)889-6205	
* 회원, 서울대학교 대학원 기계공학부 ** 회원, 인하대학교 공과대학 기계공학과 *** 회원, 서울대학교 터보·동력기계연구센터 **** 회원, 서울대학교 공과대학 기계항공공학부	

$v$	:	입자의 속도벡터
$v_{xi}$	:	$x$ 축 방향 익렬 초기진입속도, m/s
$v_{yi}$	:	$y$ 축 방향 익렬 초기진입속도, m/s
$w$	:	익렬 유입 유체의 상대속도, m/s
$\alpha$	:	익렬 유입 유체의 절대 진입각, deg
$\beta_i$	:	입자의 익렬 진입각, deg
$\beta_b$	:	블레이드 설치각(stagger), deg
$\phi$	:	유량계수(= $C_x/U$ )
$\mu$	:	점성계수, kg/m-s
$\rho_p$	:	입자 밀도, kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	:	현질비(solidity, = $c/s$ )
$\tau$	:	완화시간(relaxation time), 식 (7)

## 1. 서론

가스터빈은 다른 기계와 마찬가지로 오랜 기간 사용하게 되면 성능이 저하되는데 이는 막오염(fouling), 침식(erosion), 부식(corrosion) 등에 의한 압축기 및 터빈 익렬 형상 변형과 직접적인 관련이 있다. 이 중에서도 공기 흡입부에 위치한 압축기에서의 막오염은 가스터빈 성능 저하의 약 70~85%를 차지하는 지배적인 요인으로 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 또한 대형 가스터빈에 주로 사용되는 축류 압축기의 경우에는 원심형의 경우보다 막오염이 성능에 미치는 영향이 더 크다.

대기에는 다양한 종류의 미세 부유 입자들이 포함되어 있으며 이러한 미세 입자들은 필터를 통해 걸러지지만 제거되지 않은 일부가 압축기로 흡입되어 습분, 윤활유 등과 함께 압축기 익렬 내의 블레이드 표면에 정착하여 막오염을 발생시킨다. 이 경우 고효율의 필터를 사용하면 막오염을 줄일 수 있지만 경제적인 부담이 크고, 추가적인 압력 손실이 발생하므로 사용에 제한이 있다. 블레이드에 막오염이 생기면 블레이드 전연(leading edge)의 형상과 표면의 조도(roughness) 등이 변하여 유체의 흐름을 변형시키게 된다. 이로 인해서 압축기의 유량, 압력비 및 효율 등이 설계 값보다 감소하게 되는데, 실제로 100 여 시간 운전 후 저압압

축기는 압축비와 효율이 각각 3~4%와 2~4%, 고압압축기는 각각 10%와 6~7%의 감소를 보였다고 보고된 바 있다.<sup>(2)</sup> 이와 같은 압축기의 성능저하로 인하여 터빈 출력이 줄어들며 서지마진 또한 감소하게 되어 가스터빈 운전의 안정성도 위협 받게 된다.

막오염으로 인한 단성능선도의 변화를 이용한 압축기의 성능 저하 예측과 관련하여서는 비교적 많은 연구가 이루어져 왔으나,<sup>(3-7)</sup> 그런 결과를 가져오는 막오염의 과정을 입자의 거동과 연계 시켜 고찰하는 연구는 극히 일부<sup>(2,8)</sup> 제외하면 여전히 미흡한 상태이다. 이는 막오염이 장기간에 걸쳐 진행되며 오염입자의 크기가 수  $\mu\text{m}$ 이고 최종 막오염 두께가 약 1 mm 정도로 블레이드 크기에 비해 매우 작아서 정확한 해석이 어렵기 때문이다. 그 중에서도 Tarabrin 등<sup>(8)</sup>이 입자의 거동으로 압축기의 막오염의 상태를 예측하는 해석적 모델을 개발하였으나 익렬 블레이드의 형상 및 익렬 내부 유동을 너무 단순화시킴으로써 실제적인 유동 조건을 충분히 반영하지 못하였다. 따라서, 본 연구에서는 기존의 Tarabrin 등<sup>(8)</sup>의 모델에 비하여 좀더 실제적인 막오염 예측 모델을 개발하였으며, 이를 이용하여 축류 압축기의 형상, 유동 특성 및 유입 입자의 특성 등이 막오염에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 익렬 정착 효율

막오염은 유동내 부유 미세 입자가 유동장 내부 물체에 정착되는 현상으로 정의될 수 있다. Figure 1은 실린더 주위를 흐르는 유동장에서의 입자의 거동 형태를 보여주고 있는데, 입자는 유동의 유선을 따라 이동하다가 브라운 운동에 의해서 확산(diffusion)되거나, 실린더 표면에 포착(interception)되기도 하고, 입자의 관성에 의해서 실린더와 충돌(impaction)하기도 한다. 그 중에서 특히 유체의 속도가 충분히 낮으면 입자의 운동 중 확산현상이 지배적이고, 실린더의 크기가 입자의 크기보다 작거나 같으면 포착이 중요한 지배인자가 된다.<sup>(9)</sup> 그러나, 압축기 내부 유동장에 포함된 부유 미세 입자가 압축기 블레이드에 정착되는 현상과 같이 유동의 속도가 충분히 빠르고 블레이드 크기가 입자의 크기와 비교가 되지 않을 정도로 클 경우 충돌이 가장 큰 영향을 미치게 된다. 따라서, 본 연구에서와 같이 압축기 내부 유동장에서의 입자의 거동과 관련된 막오염 생성구조를 고찰하고자 할 경우 막오염은 입자가 압축기 블레이드 표면에 충돌하여 정착하는 현상으로 가정하

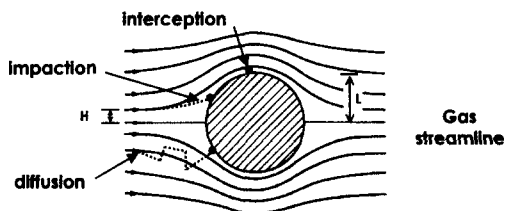


Fig. 1 Particle motion around a cylinder

기로 한다.<sup>(8,10-11)</sup>

따라서, 충돌에 의하여 점착되는 막오염 현상을 해석적으로 고찰하기 위하여 Fig. 1의 실린더 주위 유동과 같은 단순한 유동장내의 부유 입자 중 실린더 표면에 충돌하여 점착되는 입자의 비로 정의되는 점착 효율(collection efficiency)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{\text{실린더에 충돌하는 입자의 수}}{\text{실린더의 수직 방향으로 유입되는 입자의 수}} = \frac{H}{L} \quad (1)$$

여기서 실린더에 충돌하는 입자란 유동장을 따라서 실린더의 수직방향으로 진입하는 입자 중에서 입자 자체의 관성력에 의하여 유동장을 벗어나서 실린더에 충돌하는 입자이다. 따라서, 점착효율이 크다는 것은 많은 수의 입자가 입자 자체의 관성력에 의하여 실린더 주위 유동장의 유선으로부터 벗어나 실린더에 충돌한다는 것을 의미한다. 위의 식에서 유동장내 부유 입자들은 균일하게 분포되어 있다고 가정하였다.

식 (1)에서 정의된 점착효율을 Fig. 2와 같이 축류 압축기의 단순화된 익렬 유동장에 적용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

위의 식에서는 단일 블레이드를 기준으로 점착효율이 정의되었으나, 익렬 유동장의 특성을 고려하여 편의상 아래와 같이 익렬로 들어오는 모든 입자를 기준으로 익렬 점착효율을 정의할 수 있다.

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

따라서, 익렬 점착효율이란 익렬로 들어오는 모든 입자 중에 블레이드에 점착되는 입자의 비율을 의미한다. Figure 2에서 익렬 점착효율( $E_c$ )이 점착효율( $E$ )보다 항상 작거나 같음을 알 수 있다. 또한 위의 두 식에서 익렬 점착효율은 익렬의 형상과  $H$ 의 값에 의해서 결정됨을 알 수 있다. Tarabrin 등<sup>(8)</sup>은 블레이드를 하나의 실린더로 가정하고 실린더 주위의 2차원 포텐셜 유동(potential flow)을 이용하여  $H$ 를 구하였으며, 그에 따른 익렬 점착효율을 다음과 같이 정리하였다.

$$E_c = (1 + 0.77/\sigma)$$

여기서  $Stk$ 는 Stokes 수로써  
다.

$$Stk = \frac{\text{stopping length}}{\text{characteristic length}} = \frac{\tau w}{L_c} = \frac{\left\{ \rho_p d_p^2 / (18\mu) \right\} w}{2c \sin(\beta_b - \beta_1)}$$

Stokes 수는 입자의 정지 거리와 실린더의 대표 길이의 비로서 입자의 지속성과 실린더 형상의 비라고도 볼 수 있다. Stokes 수가 0인 경우에 입자는 완전히 유선을 따라서 이동함으로써 입자가 실린더에 충돌하지 않게 되고, Stokes 수가 증가하면 입자는 유선을 벗어나 실린더에 충돌할 확률이 높아진다.<sup>(12)</sup> 식 (4)로부터 진입하는 상대속도( $w$ )가 커지거나 영각(angle of attack)이 커지면 익렬 점착효율이 커짐을 알 수 있다. 그러나, 보다 정확한 해석을 위해서는 대기의 상대 습도, 윤활유의 기화, 입자의 되튐 정도(degree of rebound) 및 3차원 회전 유동효과에 의한 원심력과 코리올리힘 등 여러 요인들을 고려하여야 하지만 본 연구에서는 이러한 영향들을 무시하였다.

### 3. 익렬 점착 효율 예측을 위한 해석적 모델

앞 절에 설명된 Tarabrin 등<sup>(8)</sup>의 실린더 모델을 통해서 압축기 내에서의 일반적인 입자 거동을 살펴볼 수 있다. 그러나 실린더 모델은 실제 블레이드의 형상과 많은 차이가 있으므로 본 연구에서는

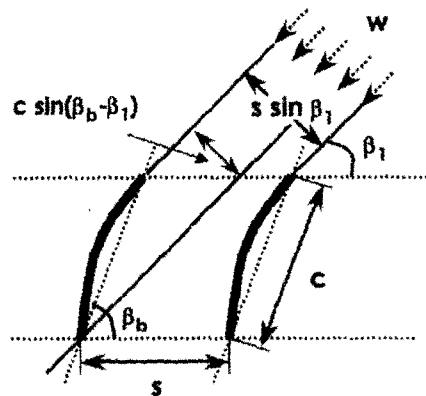


Fig. 2 Cascade in the axial cor

좀 더 현실적으로 블레이드 형상을 반영하되 유동장내의 입자 거동을 기반으로 한 막오염 생성 구조와 관련된 모델을 개발하였다. 유동장내에서의 입자의 거동과 관련된 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\tau \frac{dv}{dt} + v = u \tag{6}$$

여기서  $\tau$ 는 완화시간(relaxation time)으로써 다음과 같이 정의된다.<sup>(9)</sup>

$$\tau = \frac{1}{18} \frac{d_p^2 \rho_p C_c}{\mu} \tag{7}$$

위의 식에서  $C_c$ 는 입자의 크기가 작아질수록 입자가 유동장 내부에서 미끄러지는 현상을 보정하기 위한 미끄럼 보정계수(slip correction factor)로써 아래와 같이 표현된다.<sup>(13)</sup> 미끄럼 보정계수는 특히 미세 입자에 관한 해석시 중요하며 입자의 속도에 무관하고 입자의 크기와 유체의 물성치와 관련된 Knudsen 수에만 의존한다.

$$C_c = 1 + Kn \left\{ 2.514 + 0.8 \exp\left(\frac{-0.55}{Kn}\right) \right\} \tag{8}$$

식 (6)으로부터 입자의 거동을 파악하기 위해서는 유동장 해석이 선행되어야 한다. 그러나, 구 또는 실린더 주위의 흐름과 같이 단순한 경우가 아닌 압축기 익렬과 같이 복잡한 유동장의 경우에는 전산유동해석을 이용한 수치해석을 통하여 유동장을 구하여야 한다.<sup>(12)</sup> 그러나 전산유동해석을 이용하더라도 중요한 현상들을 대부분 완벽하게 반영할 수가 없다. 본 연구에서는 압축기 각 단내에 무한히 많은 블레이드가 있고 Fig. 3에서와 같이 블레이드의 형상이 평판이며 익렬 유동장의 유선을 블레이드와 평행한 직선으로 가정하였다. 이 경우 익렬 내부 유동의 상대속도의 특성에 따라 다음과 같이 두 가지 경우로 나누어 고찰할 수 있다.

3.1 모델 1: 익렬 내부 유동 속도가 동일한 경우  
 익렬 내부에서 유동의 속도가 변하지 않는다고 가정하면 식 (6)의 우변이 상수가 된다. 그리고 Fig. 3에서와 같이 X좌표축을 블레이드와 평행하게 놓고 Y축은 X축과 수직인 방향으로 잡는다. 식 (6)을 x 성분과 y 성분으로 분리하면 다음과 같다.

$$\tau \frac{dv_x}{dt} + v_x = w \tag{9}$$

$$\tau \frac{dv_y}{dt} + v_y = 0 \tag{10}$$

$$v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \frac{dy}{dt} \tag{11}$$

입자궤적의 위치를 좌표상의 점(x, y)라 하면 식 (9)~(11)로부터 다음의 해를 얻을 수 있다.

$$x = wt + \tau(v_{xi} - w)(1 - e^{-t/\tau}) \tag{12}$$

$$y = v_{yi}\tau(1 - e^{-t/\tau}) \tag{13}$$

여기서  $v_{xi}$ 와  $v_{yi}$ 는 입자의 각 방향 익렬 초기 진입 속도이다. 식 (13)을 식 (12)에 대입하면 입자의 블레이드 방향 이동 거리인 x는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x = -w\tau \ln\left(1 - \frac{y}{v_{yi}\tau}\right) + (v_{xi} - w)\frac{y}{v_{yi}} \tag{14}$$

한편 블레이드의 후연(trailing edge)에 충돌하는 입자의 이동거리는

$$x = c + \frac{y}{\tan \beta_b} \tag{15}$$

와 같다. 식 (14)와 식 (15)가 일치하는 y의 값을 반복계산(iteration)을 하여 찾고, 이를 이용하여 변환된 좌표계에서의 E와 E<sub>c</sub>는 다음과 같이 구할

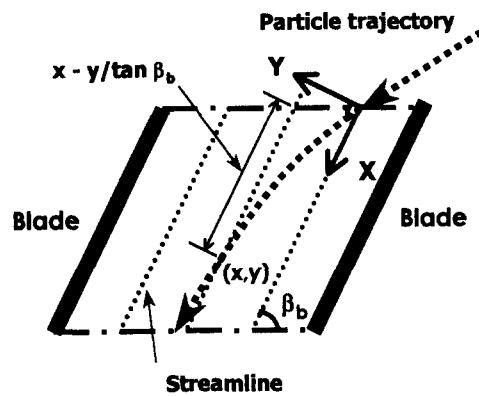


Fig. 3 Simplified cascade model to develop an analytic method

수 있다.

$$E = \frac{H}{L} = \frac{y/\sin\beta_b}{c \cdot \sin(\beta_b - \beta_1)/\sin\beta_1} \quad (16)$$

$$E_c = E \frac{c}{s} \frac{\sin(\beta_b - \beta_1)}{\sin\beta_1} = \frac{y}{s \cdot \sin\beta_b} \quad (17)$$

3.2 모델 2: 익렬 내부 유동 속도가 변하는 경우  
 압축기는 익렬 내부에서 유동의 상대속도를 감소시켜 압력을 상승시킨다. 이러한 실제 현상을 반영하기 위하여 블레이드 입·출구에서 유체의 상대속도는 de Haller 조건 ( $w_2/w_1 \leq 0.72$ )을 만족하고 내부에서는 상대속도가 선형적으로 감소한다고 가정한다. 위의 경우와 같이 X좌표축을 블레이드와 평행한 방향으로 설정할 경우 Y축 방향으로의 지배방정식과 해는 위와 동일하다.

$$\begin{aligned} \tau \frac{dv_x}{dt} + v_x &= w \left\{ 1 - 0.28 \frac{x - (y/\tan\beta_b)}{c} \right\} \\ &= w \left\{ 1 - 0.28 \frac{x - v_{yi}\tau(1 - e^{-t/\tau})/\tan\beta_b}{c} \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

위 식의 해는 특성방정식(characteristic equation)의 해에 따라 세 가지 경우로 나뉘어진다. 여기서, D는 판별계수(determinant coefficient)이다.

1)  $D = c - 1.12\tau w > 0$  일 경우

$$\begin{aligned} x &= \frac{0.28\tau v_{yi} \{1 - \exp(-t/\tau)\} + c \tan\beta_b}{0.28 \tan\beta_b} \\ &+ \tau \sqrt{\frac{c}{D}} \left\{ \frac{c}{0.28} (\lambda_2 \exp(\lambda_1 t) - \lambda_1 \exp(\lambda_2 t)) \right. \\ &\left. + \left( v_{xi} - \frac{v_{yi}}{\tan\beta_b} \right) (\exp(\lambda_1 t) - \exp(\lambda_2 t)) \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

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

$$\lambda_1 = -\frac{1}{2\tau} + \frac{1}{2\tau} \sqrt{\frac{D}{c}} \quad (20)$$

$$\lambda_2 = -\frac{1}{2\tau} - \frac{1}{2\tau} \sqrt{\frac{D}{c}} \quad (21)$$

2)  $D = c - 1.12\tau w = 0$  일 경우

$$\begin{aligned} x &= \frac{0.28\tau v_{yi} \{1 - \exp(-t/\tau)\} + c \tan\beta_b}{0.28 \tan\beta_b} \\ &+ \exp\left(-\frac{t}{2\tau}\right) \left\{ -\frac{c}{0.28} \right. \\ &\left. + \left( v_{xi} - \frac{v_{yi}}{\tan\beta_b} - \frac{c}{0.56\tau} \right) t \right\} \end{aligned} \quad (22)$$

3)  $D = c - 1.12\tau w < 0$  일 경우

$$\begin{aligned} x &= \frac{0.28\tau v_{yi} \{1 - \exp(-t/\tau)\} + c \tan\beta_b}{0.28 \tan\beta_b} \\ &- \exp\left(-\frac{t}{2\tau}\right) \left\{ \frac{c}{0.28} \cos(Dt) \right. \\ &\left. - \frac{1}{D} \left( v_{xi} - \frac{v_{yi}}{\tan\beta_b} - \frac{c}{0.56\tau} \right) \sin(Dt) \right\} \end{aligned} \quad (23)$$

이를 이용하여 식 (15)~(17)과 동일한 방법으로  $y$ ,  $E$ ,  $E_c$ 를 구한다.

#### 4. 결과 및 토의

본 연구에서는 Iwamoto 등<sup>(14)</sup>에서 제시된 자료를 기본으로 송태원 등<sup>(15)</sup>이 사용한 12 단 축류 압축기를 사용하여 위에서 제시된 모델의 타당성을 검증하고 압축기의 주요 설계 변수와 입자 분포의 특성이 막오염 현상에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 본 연구에 사용된 압축기의 익형의 기하형상과 설계점에서의 속도들은 Table 1과 같다.

##### 4.1 막오염 모델의 비교

Figure 4는 입자 직경의 크기에 따른 점착효율의 변화를 개선 모델을 사용하여 계산한 결과를 Tarabrin의 실린더 모델<sup>(8)</sup>의 결과와 비교한 것이다. 개선된 모델의 결과는 작은 입자 영역에서는 실린더 모델과 차이를 보이고 있지만 입자 직경의 크기에 따라 증가하는 경향성은 실린더 모델과 유사

Table 1 Specification of blade and velocities<sup>(14-15)</sup>

Chord, c	7 cm
Mean radius, $r_m$	18.7 cm
Solidity, c/s	1.5
Flow coefficient at design point, $\phi_d$	0.547
Degree of reaction	0.5
Relative outlet angle from previous blade, $\alpha$	15°
Stagger angle, $\beta_b$	40.6°
Axial velocity	150 m/s
Blade tip speed (1st stage)	350 m/s

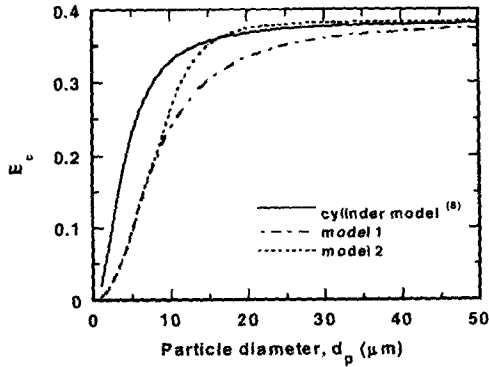


Fig. 4 Distributions of cascade collection efficiency with various particle sizes

함을 확인할 수 있었다. 실린더 모델이 작은 입자 영역에서 상대적으로 큰 점착효율을 갖는 이유는 익렬 내부 유동을 곡률이 큰 실린더 주위의 비점성 유동으로 가정함에 따라 입자의 관성에 의한 충돌이 상대적으로 커졌기 때문이다. 개선 모델 중 모델 2가 모델 1에 비해서 대부분 영역에서 점착효율이 큰 값을 갖는 이유는 익렬 내부에서 유체의 상대속도가 감소함에 따라 입자의 관성력이 유체의 유동에 대해서 상대적으로 더욱 크게 작용하기 때문이다.

4.2 현(chord)과 현절비(solidity)의 영향

Figure 5는 현절비가 일정한 상태에서 블레이드 현의 길이가 익렬 점착효율에 미치는 영향을 나타낸 결과이다. 일반적으로 현이 길어질수록 익렬 점착효율은 감소함을 알 수 있는데, 이는 익렬 내부에서 유체의 흐름이 입자의 거동을 지배하는 시간이 길어져서 적은 수의 입자가 점착되기 때문이다.

Figure 6은 현의 길이가 동일한 상태에서 현절비가 익렬 점착효율에 미치는 영향을 나타내었다. 익렬 점착효율은 현절비의 증가에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있는데, 이는 점착되는 입자의 수는 동일한데 비하여 유입입자의 수가 감소하였기 때문이다. 이와 같은 결과는 실린더 모델식(8)과도 일치한다.

4.3 유량 및 입자 크기의 영향

식 (4)에서와 같이 익렬 유동장 내부에서의 유체의 상대속도( $w$ )가 증가하거나 입자의 진입각( $\beta_i$ )이 줄어들면 점착효율은 증가한다. Tarabim 등(8)은 유체의 상대속도와 입자의 진입각에 의한 영향을

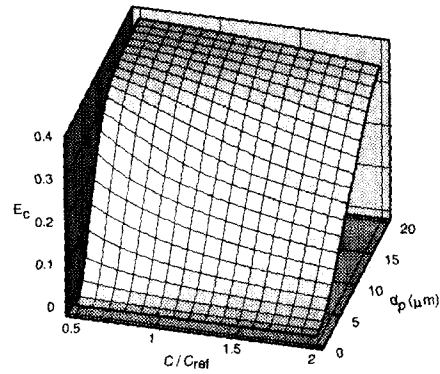


Fig. 5 Distributions of cascade collection efficiency with various chord lengths and particle sizes ( $\sigma = 1.5$ )

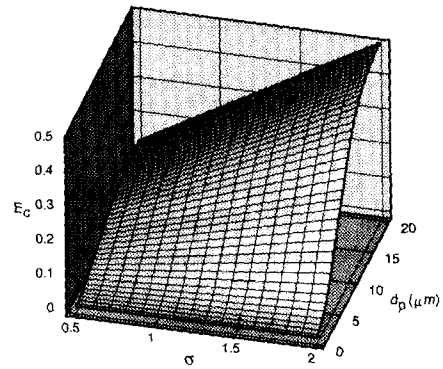


Fig. 6 Distributions of cascade collection efficiency with various solidities and particle sizes ( $c = 7\text{cm}$ )

파로 고려했으나 속도삼각형 해석으로부터 압축기로 유입되는 유체의 유량의 증감에 따라  $w$ 와  $\beta_i$ 이 동시에 변화함을 알 수 있다. 유량이 감소하면  $\beta_i$ 은 항상 감소하나  $w$ 는 설계 변수에 의해서 결정된다. Table 1에 의한 속도삼각형 해석에서 유량 감소에 따라 상대속도가 줄어들음을 확인할 수 있다. Figure 7은 유량변화에 따른 점착효율의 변화를 나타낸 것인데 유량이 감소함에 따라 점착효율이 증가함을 볼 수 있다. 이것은 상대속도의 감소에 의한 영향보다 입자의 진입각의 감소에 의한 영향이 더욱 크게 작용함을 의미한다. 또한, 입자의 크기가 커질수록 저유량계수 영역에서 점착효율의 증대폭이 커지게 되어 막오염이 촉진됨을 알 수 있다.

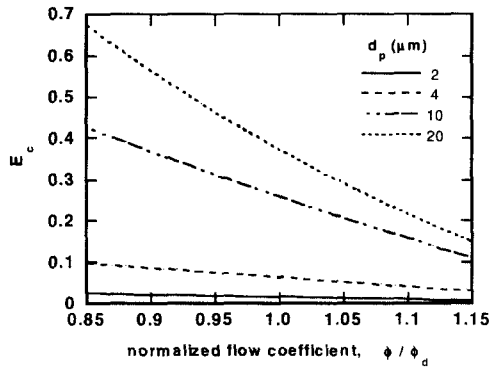


Fig. 7 Distributions of cascade collection efficiency with various flow coefficients and particle sizes

4.4 압축기 단수의 영향

익렬로 유입되는 모든 입자들이 동일한 크기별로 균일하게 분포되어 있고 각 단의 형상과 유동조건이 Table 1 과 동일하다고 가정한다면, 익렬의 두 블레이드 사이로  $s \sin \beta_1$  에 비례하는 수의 입자가 들어오고  $E_c \sin(\beta_6 - \beta_1)$  에 비례하는 입자수가 블레이드에 점착된다. 따라서, 점착되지 않고 다음 단의 익렬로 유입되는 입자의 수는 다음과 같다.

$$s \sin \beta_1 - E_c \sin(\beta_6 - \beta_1) \tag{24}$$

축류 압축기의 경우 한 단은 동익과 정익으로 구성되어 있으므로 각 단에서 점착되는 입자의 수는 위와 같은 과정을 두 번 반복함으로써 구할 수 있다.

Figure 7 에서와 같이 유량이 줄어들거나 입자의 크기가 커지면 점착효율이 커지므로 점착되지 않고 다음 단으로 유입되는 입자의 수는 줄어든다. 첫 단에서 큰 입자들은 다수가 점착되나 작은 입자들은 소수만 점착되고 나머지는 통과하게 된다. 두 번째 단에서는 첫 단에서 큰 입자들이 점착되므로 유입되는 입자의 절대수가 작아져서 큰 입자에 의한 영향이 줄어들지만 작은 입자들은 유입되는 입자의 절대수가 첫 단과 비교하여 거의 변화가 없으므로 첫 단과 동일한 영향을 준다. 이러한 경향은 Fig. 8 에서와 같이 뒷 단으로 갈수록 심화됨을 알 수 있다.

4.5 입자분포 특성의 영향

지금까지는 동일한 크기의 입자가 균일하게 분

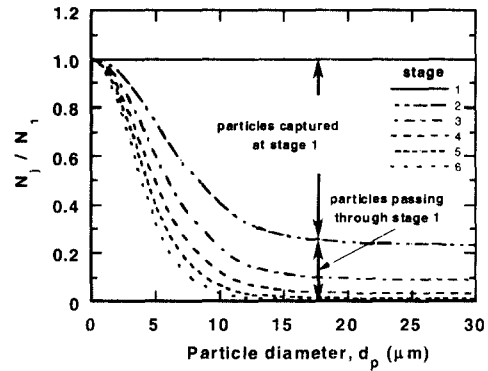


Fig. 8 Number of incoming particles in each compressor stage

포되어 유입되는 경우에 대해서 고찰하였지만 실제 대기에는 다양한 크기의 입자들이 부유하고 있으므로 입자 크기의 분포 특성이 미치는 영향에 대한 분석이 필요하다. 하지만, 입자의 분포는 압축기가 설치된 위치와 시간에 따라 계속 변하기 때문에 정확한 특성을 정의하기가 어려우므로 본 연구에서는 임의의 평균적인 입자 분포 선도에 따른 영향만을 고찰하고자 한다.

일반적으로 입자에 의한 침식과 막오염을 방지하기 위해서 압축기 입구에 필터를 설치하는데, 유입 입자의 최대 직경은 필터의 특성에 따라 결정된다. 필터에는 일반적으로 관성 필터(inertial filter), 자기청정 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  $\mu m$  이상의 입자를 제거시킬 수 있으므로<sup>(1)</sup> 본 연구에서는 입자의 최대 허용 직경을 20  $\mu m$  로 설정하였다. 일반적으로 막오염의 두께는 막오염 초기에는 증가율이 매우 크지만 점진적으로 증가율이 줄어들다가 결국은 두께가 일정하게 되는데, 이때까지 걸린 시간을 점착층 안정화 시간(deposition layer stability time)이라 한다. 본 연구에서는 모든 단에 걸쳐 점착층 안정화 시간이 동일하며, 매 순간마다 각 단에서의 입자의 분포는 Fig. 8 의 관계가 만족된다고 가정한다. 각 단의 점착 질량은 0.1  $\mu m$  부터 1  $\mu m$  간격으로 해당 크기에서의 점착 질량을 합하였다. 입자 분포 선도에 따라 점착 질량의 절대값의 차이가 있으므로 매 경우마다 첫 단의 점착 질량으로 무차원화시켜 비교하였다. 따라서, 무차원 점착질량은 다음과 같이 정의된다.

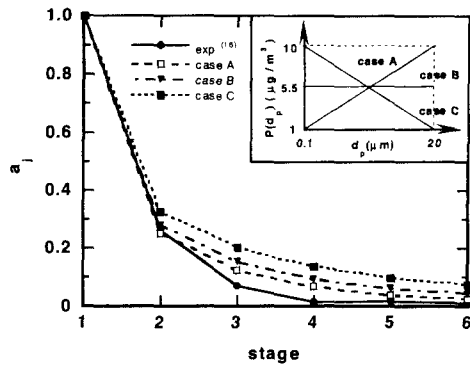


Fig. 9 Effect of the pattern of particle distributions on the non-dimensional collection mass of particles in each compressor stage (max. particle diameter = 20 μm)

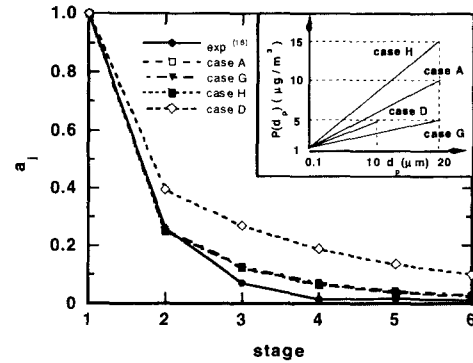


Fig. 11 Effect of the slope of the pattern of particle distributions on the non-dimensional collection mass of particles in each compressor stage

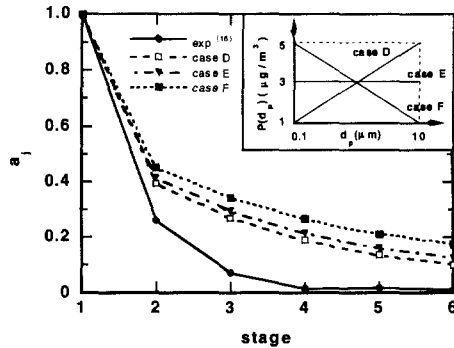


Fig. 10 Effect of the pattern of particle distributions on the non-dimensional collection mass of particles in each compressor stage (max. particle diameter = 10 μm)

$$a_j = \frac{\sum (N_j - N_{j+1}) \cdot P(d_p)}{\sum (N_1 - N_2) \cdot P(d_p)} \quad (25)$$

여기서  $j$  와  $P(d_p)$  는 각각  $j$  번째 단과 입자 크기의 분포를 나타내는 입자 분포 선도이다. 입자 분포 선도는 단위 체적당 해당 크기의 입자들의 총질량(또는 총개수)으로 나타낸다. Figure 9 는 입자의 최대직경이 20 μm 인 경우에 있어서 세가지 종류의 입자 분포에 따른 각 단에서의 점착되는 질량을 나타낸 것으로 실제로 장기간 운전된 16 단 압축기로부터 얻은 막오염 측정값과 비교하였다.<sup>(16)</sup> 여기서 case A 는 입자가 클수록 많이 존재하는 선형 분포이고, case C 는 반대의 선형 분포이며, case B 는 분포가 균일한 경우이다. 큰 입자의 분포가 지배적인 경우(case A) 앞 단에서 다수

가 점착되어 뒷 단에 비해 무차원 점착 질량이 커진다. 이와는 달리 작은 입자의 분포가 지배적인 경우(case C)는 큰 입자가 앞 단에서 다수가 점착되더라도 점착된 입자의 질량이 작고 뒷 단의 무차원 질량의 증가를 가져온다. 참고로 뒷 단으로 갈수록 실제 측정값이 작아지는 이유는 고온·고압 상태에서 습분이 증발하여 입자의 점착력이 저하되었기 때문으로 판단된다.

Figure 10 은 입자의 최대 직경이 10 μm 일 때 Fig. 9 와 동일한 입자분포에 따른 각 단에서 점착되는 질량을 나타낸 것이다. Figure 9 의 결과와 비교하여 뒷 단에서의 무차원 점착 질량이 증가하였는데 이것은 작은 입자의 영향이 상대적으로 커졌기 때문으로 생각된다.

Figure 11 은 입자의 최대 직경이 20 μm 로 동일한 상태에서 입자 분포 선도의 기울기가 다른 경우(case A, G, H)를 고찰한 결과인데 각 단의 무차원 점착 질량은 입자 분포 선도의 기울기 변화에 따라 거의 변화가 없음을 보여준다. 또한 최대 직경 10 μm 일 경우(case D)와의 비교를 통해서 각 단의 무차원 점착 질량의 선도가 입자분포선도의 기울기보다는 압축기 입구에 설치된 필터의 특성에 의해서 결정되는 최대 직경에 더욱 민감하다는 사실을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 축류 압축기 내부 익렬에서의 막오염 정도를 분석하기 위하여 기존의 모델과는 달리 블레이드의 형상을 실린더가 아닌 평판 형상으로 가정하고 익렬 내부 유동장의 변화가 고려된 새로운 해석적인 모델을 개발하였다. 압축기의 형상 및 유동 특성, 그리고 압축기로 유입되는 입자



의 크기 및 분포특성에 따른 거동을 분석하여 압축기 익렬에서의 막오염 현상을 예측하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론들을 얻게 되었다.

(1) 본 연구에서 사용한 축류 압축기의 형상 및 유동 특성 조건에서는 설계값에 비해 유량이 줄어들면 막오염이 촉진되며 입자의 크기가 커질수록 이러한 경향은 뚜렷해진다

(2) 현절비가 일정할 경우 현이 길어질수록 점착효율은 줄어들며, 현의 길이가 일정할 경우 현절비가 커질수록 점착효율은 선형적으로 증가하게 된다.

(3) 큰 입자들의 다수가 앞 단에서 점착되며 작은 입자들은 모든 단에서 비슷하게 점착된다.

(4) 각 단의 무차원 점착질량 분포는 평균적인 입자 분포 선도보다는 필터에 의해 결정되는 입자의 최대 허용 직경에 영향을 크게 받는다.

## 후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

## 참고문헌

- (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., 1998, "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) Jennings, S. G., 1988, "The Mean Free Path," *Journal of Aerosol Science*, Vol. 19, No. 2, pp.159~166.
- (14) Iwamoto, T., Ikesawa, K., Kanayama, T., Nagai, K., Yukinari, A. and Nakagawa, T., 1991, "Development of a High-Pressure Ratio Axial Flow Compressor," *Proceedings of the 1991 Yokohama International Gas Turbine Congress*, Vol. II, pp.79~86.
- (15) 송태권, 김재환, 김동섭, 노승탁, 2000, "단축적법의 개선에 의한 축류압축기의 효과적인 성능예측," 대한기계학회논문집 (B), 제 24 권, 제 8 호, pp. 1077~1084.
- (16) 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.