

저유량 특성을 고려한 사류 송풍기의 성능 해석

오형우* · 김광용**

Performance analysis of mixed-flow fans considering the low flow characteristics

Hyoung Woo Oh*, Kwang-Yong Kim**

Key Words: Mixed-Flow Fan(사류 송풍기), Mean Streamline Analysis(평균 유선 해석), Euler Work Equation(오일러 일 방정식), Loss Correlations(손실 상관식), Internal Recirculation Loss(내부 순환 손실), Performance Prediction(성능 예측)

ABSTRACT

The mean streamline analysis using the empirical loss correlations has been developed for performance prediction of industrial mixed-flow fan impellers in the present study. New simple, but effective, models for the additional Euler input work characteristic and an internal recirculation loss due to internal flow reversal under the low flowrate conditions are proposed in this paper. Comparison of overall performance predictions with six sets of test data of mixed-flow fans is accomplished to demonstrate the accuracy of the proposed models. Predicted performance curves by the present set of loss models agree fairly well with experimental data for a variety of mixed-flow fan impellers over the entire operating conditions. The prediction method presented herein can be used efficiently in the conceptual design phase of mixed-flow fan impellers.

기호 설명

b : 임펠러 폭
 b^* : 임펠러 출구폭에 대한 케이싱 폭의 비
 C_f : 표면 마찰 계수
 D : 지름
 D_{hyd} : 임펠러 평균 수력학적 지름
 g : 중력 가속도
 L_b : 임펠러 유로 길이
 L_{case} : 송풍기 케이싱 단면에 대한 한번의 길이
 L_z : 임펠러 축방향 길이
 P : 동력 계수 = $P_{act} / (\rho D_{2m}^2 U_{2m}^3)$
 P_{act} : 축동력
 Q : 부피 유량
 r : 반지름

U : 임펠러 깃속도
 V : 절대 속도
 W : 상대 속도
 W_{ui} : 임펠러 입구 접선 방향의 상대 속도
 Z_r : 임펠러 깃수
 α : 자오면을 기준으로 한 절대 유동각
 β : 자오면을 기준으로 한 깃각도
 δ : 자오면에서 임펠러 입구 모서리의 기울기
 ΔP : 압력 변화량
 ΔP_s : 정압력 변화량
 ΔP_t : 전압력 변화량
 ϵ_{wake} : 임펠러 출구 면적에 대한 후류 영역의 비
 θ_{imp} : 반원추각
 ρ : 유체 밀도
 ϕ : 유량 계수 = $Q / (D_{2m}^2 U_{2m})$
 ψ_s : 정압력 상승 계수 = $\Delta P_s / (\rho U_{2m}^2)$

* ㈜나다에스앤브이 기술연구소

** 인하대학교 기계항공자동차공학부

하첨자

- diff* : 확산
- Euler* : 오일러 일
- ent* : 임펠러 입구 직전
- exit* : 출구
- fan* : 송풍기 시스템
- h* : 허브
- inc* : 입사각
- int* : 내부 조건
- irc* : 내부 재순환
- m* : 자오면 방향 또는 제공된 평균 위치
- mix* : 혼합
- rc* : 재순환
- sep* : 박리
- sf* : 표면 마찰
- t* : 팁
- u* : 접선 방향
- 0 : 임펠러 입구 직전
- 1 : 임펠러 입구
- 2 : 임펠러 출구

1. 서 론

최근 터보 기계의 내부 유동 해석 및 부품의 상세 설계를 위해 전산 유체 역학의 적용이 활발히 이루어지고 있다. 그러나 실제 산업 현장에서 요구되는 경제성 등을 고려할 때, 전산 유체 역학적 해석은 터보 기계 내부의 비정상 3차원 회전 유동에 대한 정보를 획득함에 있어서 계산 소요시간에 대한 부담을 여전히 크게 가지고 있기 때문에, 평균 유선 해석 방법은 아직까지 비교적 신뢰할 만한 범위 내에서 터보 기계의 전체적인 성능을 예측하기 위한 일차적인 도구로서의 역할을 담당하고 있다.

원심형 및 축류형 터보 기계에 대한 성능 예측 기법들에 대해서는 그간 활발한 연구가 수행되었다.⁽¹⁻³⁾ 반면에 사류형 터보 기계에 대한 설계 및 해석 방법에 대해서는 그 연구 사례가 많지 않을 뿐 아니라 해당 산업분야의 경쟁 관계로 인해 타 기종에 비해서 공개된 문헌 자료가 부족한 상황이다.

Sarkar⁽⁴⁾는 사류형 임펠러의 공기 역학적 성능 해석을 수행함에 있어서, 축류형 터보 기계의 해석을 위해 Howell⁽⁵⁾이 개발한 2차원 익렬 손실 모델들을 적용하였다. 그 결과, 정규 작동 범위(normal operating range)에서는 사류형 임펠러에 대한 실험 결과의 경향을 제대로 예측하였으나, 정상적인 면에서는 다소 부정확한 결과를 보였다. 유량이 감소함에 따라서 예측 결과와 실험 자료 사이의 차이는 크게 나타났다. 과거에 수행된 연구⁽⁶⁾에서는 사류형 임펠러가 정규

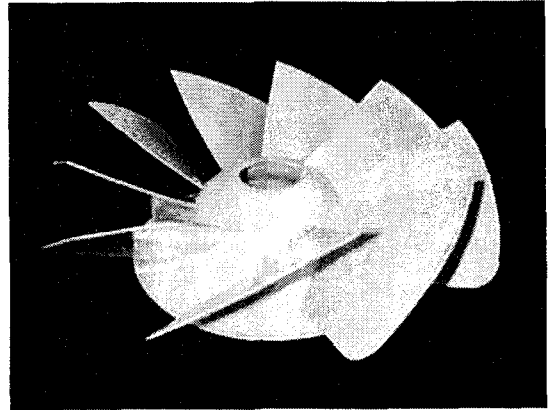


Fig. 1 Perspective view of mixed-flow fan impeller

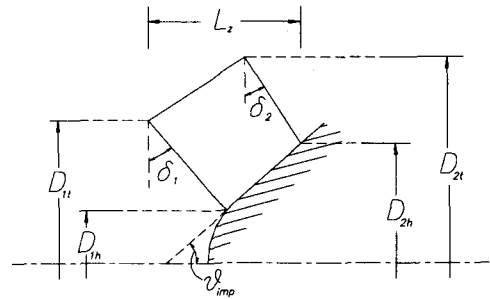


Fig. 2 Meridional cross-section of mixed-flow fan impeller with geometric parameters

유량을 벗어나 작동될 때 보이는 골(dip) 형태의 양정-유량 특성 곡선을 예측하기 위한 박리 손실 모델(internal separation loss model)을 개발함으로써, 저유량에서 나타나는 특성 곡선에 대한 예측 성능을 기존에 적용된 2차원 익렬 이론에 의한 예측 방법들에 비해 비교적 정확한 범위 내에서 수행할 수 있었다. 그러나 이러한 연구들은 대부분 정규 유량 영역에서 나타나는 사류형 임펠러의 거동을 예측하기 위한 성능 해석 방법에 국한 되었다. 즉, 현재까지 사류형 임펠러의 차단 양정(shut-off head) 부근을 포함한 저유량 영역 특성을 예측하기 위한 평균 유선 해석 방법에 대한 연구 결과가 문헌상에 아직 보고된 바 없다. 물론 전산 유체 역학을 도입한 사류형 임펠러의 성능 해석 방법에 의한 연구는 지금도 활발히 진행되고 있다.⁽⁶⁾

본 연구는 차단 영역 뿐 만 아니라, 고유량 범위까지의 전 유량 영역에 대한 사류 송풍기의 정확한 성능 해석을 하는데 필요한 부가적인 오일러 일(additional Euler work)과 내부 재순환 손실(internal recirculation loss)에 대한 새로운 실험적 상관식들을 개발하는 것을 목적으로 한다. 이 논문에서는 실제 산업 현장에서 얻어진 6가지 형태의 사류 송풍기들의

Table 1 Specifications of DH fans

Fan	Q	ΔP_s	D_{2m}/D_{1m}	β_{2m}	L_{casd}/D_{2t}
DH-1	54	19.1	1.237	44.0	1.20
DH-2	62	20.3	1.244	38.9	1.19
DH-3	66	23.3	1.300	34.2	1.17
DH-4	70	25.1	1.334	30.4	1.16
DH-5	126	35.7	1.286	38.5	1.18
DH-6	138	36.7	1.304	34.7	1.17

* Q(m³/min); ΔP_s (mmH₂O); β_{2m} (deg).

실험 자료((주)동해 기연에서 제작·판매중인 사류 송풍기로서, 이하 DH 송풍기로 언급될 것임.)와 계산된 전체 성능 결과를 비교함으로써, 제시된 방법에 의한 예측 성능을 평가하기로 한다. 본 연구에서 비교한 DH 송풍기의 임펠러는 9개 깃의 후향각(backward-swept) 형상(Fig. 1)을 보이는 것으로, 회전수 1170 rpm에서 실험이 수행 되었다. DH 송풍기에 대한 자료는 Table 1에 실려 있다. Fig. 2는 자오면 상에서의 전체적인 형상을 보여준다.

2. 사류 송풍기 임펠러의 해석을 위한 새로운 예측 모델

사류형 임펠러의 압력 상승-유량 곡선에 대해서, 유량이 감소함에 따라 범프(bump) 현상이 나타난다는 것이 실험적으로 확인된 바 있다.⁽⁷⁾

즉, 유량이 증가함에 따라 특성 곡선이 감소하여 최소점(local minimum)을 형성하고, 다시 증가하여 최대점(local maximum)에 이르게 된다. 사류형 임펠러의 이러한 골(dip) 형태의 특성 곡선에 대한 발생 구조(mechanism)는 임펠러가 저유량 영역에서 작동될 때, 입구측 내부의 유동 박리에 기인한 유동의 역류 및 재순환 현상으로 해석될 수 있다.⁽⁷⁻⁹⁾

이러한 사류형 임펠러의 파형 성능특성(wavy performance characteristics)을 정확하게 예측하기 위해서, 유량 변화에 따른 오일러 일(Euler work)과 발생 손실들에 대한 연구가 필요하다.

먼저 본 연구에서는 저유량 영역에서의 압력 상승 곡선에 대한 예측 성능을 향상시키기 위해 부가적인 오일러 일 방정식을 제안한다. Jansen과 Sunderland⁽⁹⁾는 임펠러 내부의 2차 유동, 날개 곡률 그리고 좁은 유로 때문에 대부분의 경우 원심형 사류형 임펠러 내부에서 상대 속도 확산비(W_{1r}/W_{2m})가 1.4가 될 때 유동의 박리가 진행된다고 밝혔다. 그리고 펌프 송풍기의 차단 양정은 임펠러 출력 깃 속도(U_{2m}^2/g)에 비례한다는

사실이 알려져 있다.^(9,10) 이러한 물리적인 현상을 토대로, 사류 송풍기의 임펠러에 대한 오일러 전압력 상승식(Euler total pressure rise equation)을 다음과 같이 고안했다.

$$\Delta P_{t,Euler} = \rho(U_{2m}V_{u2m} - U_{1m}V_{u1m}) + \Delta P_{t,Euler}^* \quad (1)$$

여기서

$$\Delta P_{t,Euler}^* = f_{eu}\rho\left(\frac{W_{1r}}{W_{2m}} - 1.4\right)^2 U_{2m}^2, \frac{W_{1r}}{W_{2m}} \geq 1.4 \quad (2)$$

위의 오일러 식을 살펴보면, 상대 속도 확산비가 1.4 미만이 될 때, 식(2)의 부가적인 오일러 항에 대한 효과는 없어진다. 즉, 사류 송풍기가 정규 작동 범위 내에서 운전 될 때, 식(1)은 공칭 오일러 일 방정식(conventional Euler work equation)이 된다. 위의 식에서 f_{eu} 는 부가적인 오일러 일에 대한 계수로서, 이것은 임펠러 입력 동력 곡선(impeller input power curves)에 대한 실험 결과를 토대로 결정된다.

이러한 오일러 일에 대한 모델링 작업을 수행한 후, 저유량 영역에서의 사류 송풍기 임펠러에 대한 압력 상승 성능 곡선을 정확하게 예측하기 위한 실험적 내부 손실 상관식을 제안하고자 한다. 앞에서 언급한 바와 같이, 저유량 영역에서의 압력 상승 및 내부 재순환 손실은 임펠러 입구 팁 부근의 흡입면 상에서 발생한 유동 박리에 기인한다. 본 연구에서는 사류 송풍기에 대한 저유량 실험 자료를 바탕으로 다음과 같은 형태의 내부 재순환 손실 모델을 제안한다.

$$\Delta P_{t,irc} = (1 - f_{irc})\Delta P_{t,Euler}^* \quad (3)$$

여기에서 f_{irc} 는 내부 재순환 손실 계수를 의미한다.

본 연구에서 사류 송풍기의 성능 곡선을 예측하기 위해 제안하는 손실 상관식들은 Table 2에 실려있다. 그러므로, 사류 송풍기의 압력상승 성능은 다음과 같은 식에 의해 계산되어진다.

$$\Delta P_{fan} = \Delta P_{t,Euler} - \sum \Delta P_{t,im} - \rho \frac{K\bar{V}^2}{2} \quad (4)$$

여기에서 $\sum \Delta P_{t,im}$ 은 송풍기 임펠러 내부에서 발생하는 손실들의 총합을 나타낸다. 식(4)의 계수 K는 송풍기 시스템의 전압 상승(K=0, total pressure rise) 및 정압 상승(K=1, static pressure rise)의 2가지 정의를 다 포함하기 위해 도입되었다. 그리고 동압 속도 \bar{V} 는 송풍기의 케이싱 면적을 기준으로 한 평균 속도를 의미한다.

Table 2 A recommended set of loss models for mixed-flow fan impellers

Loss mechanism	Loss model	References
Internal loss		
Entrance loss	$\Delta P_{t,ent} = f_{ent} \rho \frac{V_0^2}{2}$ <p>where $f_{ent} = 0.13$</p>	Rathod and Donovan ⁽¹¹⁾
Incidence loss	$\Delta P_{t,inc} = f_{inc} \rho \frac{W_{in}^2}{2}$ <p>where $f_{inc} = 0.5 - 0.7$</p>	Conrad <i>et al.</i> ⁽¹²⁾
Diffusion loss	$\Delta P_{t,diff} = 0.05 \rho D_f^2 U_{2m}^2$ <p>where $D_f = 1 - \frac{W_{2m}}{W_{1t}} + \frac{0.75 \Delta P_{t,Euler} / U_{2m}^2}{\rho (W_{1t} / W_{2m}) [(Z_r / \pi) (1 - D_{1t} / D_{2m}) + 2 D_{1t} / D_{2m}]}$</p>	Coppage <i>et al.</i> ⁽¹³⁾
Skin friction loss	$\Delta P_{t,sf} = 2 \rho C_f \frac{L_b}{D_{hyd}} \bar{W}^2$ <p>where $\bar{W} = \frac{V_{1t} + V_{2m} + W_{1t} + 2W_{1h} + 3W_{2m}}{8}$</p>	Jansen ⁽¹⁴⁾
Mixing loss	$\Delta P_{t,mix} = \frac{\rho}{1 + \tan^2 \alpha_{2m}} \left(\frac{1 - \varepsilon_{wake} - b^*}{1 - \varepsilon_{wake}} \right)^2 \frac{V_{2m}^2}{2}$	Johnston and Dean ⁽¹⁵⁾
Separation loss	$\Delta P_{t,sep} = 0.61 \rho \left(\frac{W_{1t}}{W_{2m}} - 1.4 \right)^2 W_{2m}^2$	오형우 등 ⁽⁵⁾
Exit loss	$\Delta P_{t,exit} = f_{exit} \rho \frac{V_{2m}^2}{2}$ <p>where $f_{exit} = 0.25$</p>	Eck ⁽⁸⁾
Internal recirculation loss	$\Delta P_{t,irc} = (1 - f_{irc}) \Delta P_{t,Euler}^*$ <p>where $f_{irc} = 0.11$</p>	Present
External loss		
Recirculation loss	$\Delta P_{t,rc} = 2.46 \times 10^{-5} \rho \sinh(3.5 \alpha_{2m}^3) D_f^2 U_{2m}^2$	오형우 등 ⁽⁵⁾

3. 결과 및 검토

본 연구에서 제안한 실험적 상관식들에 의한 성능 해석 방법의 타당성을 검토하기 위해 6가지 사류 송풍기의 실험 결과와 비교했다.

먼저 부가적인 오일러 일($\Delta P_{t,Euler}^*$)이 임펠러 입력 동력 성능에 미치는 영향을 고찰하기로 한다. Fig. 3은 DH 송풍기의 동력 곡선에 대한 예측 결과를 보여주고 있다. $f_{eu}=0$ 을 갖는 성능 예측 곡선은 저유량 영역에서 임펠러 내부 재순환 유동 때문에 발생하는 부가된 임펠러 일을 고려하지 않고, 기존에 수행된 이론적 공칭 오일러 일만으로 입력 동력 계산을 수행한

것이다. 비록 공칭 오일러 일($f_{eu}=0$)에 의한 계산 결과가 정규 작동 영역에서 실험 자료를 정확하게 예측하고 있으나, 유량이 감소함에 따라 임펠러 입력 동력에 대한 결과는 전체적으로 과소하게 예측하고 있다. 그러나 본 연구에서 오일러 계수로 제안하는 $f_{eu}=0.27$ (recommended value)으로 수행한 성능 곡선은 차단 양정 부근은 물론, 체적점 성능 특성에 대한 실험 결과를 전 유량 범위 내에서 정확하게 예측함으로써, 과거에 수행되었던 성능 해석 방법에 의한 예측 결과를 현저히 향상시켰다.

다음은 사류 송풍기의 압력 상승을 예측하는데 필요한 내부 재순환 손실의 효과를 고찰하기로 한다. 비록 본 연구에서 제안하는 내부 재순환 손실

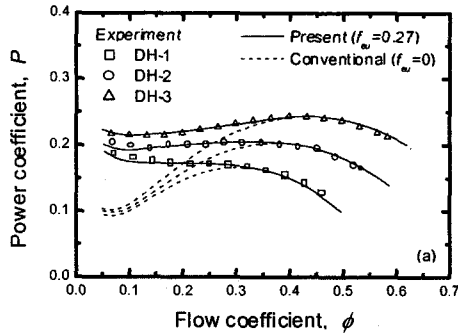


Fig. 3(a) Comparison of experimental and calculated impeller input power for DH-1 to DH-3 fans

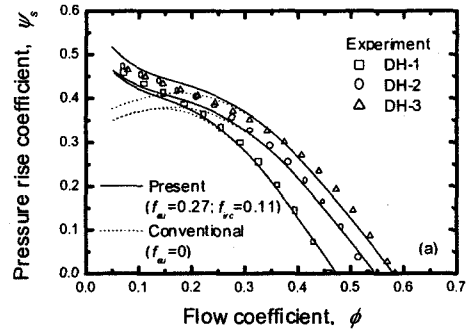


Fig. 4(a) Comparison of experimental and calculated static pressure rise for DH-1 to DH-3 fans

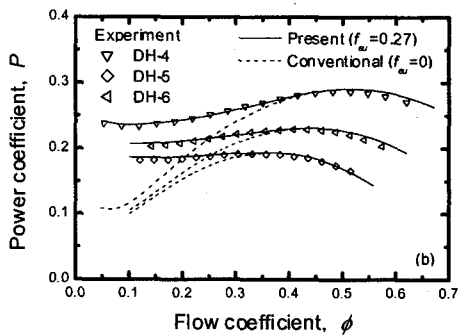


Fig. 3(b) Comparison of experimental and calculated impeller input power for DH-4 to DH-6 fans

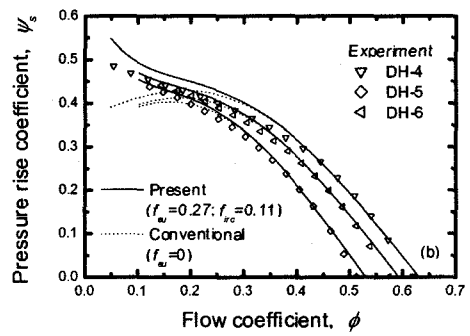


Fig. 4(b) Comparison of experimental and calculated static pressure rise for DH-4 to DH-6 fans

Fig. 3 Impeller input power characteristics

Fig. 4 Static pressure rise characteristics

모델($f_{vc}=0.11$, recommended value)이 식(2)의 부가적인 오일러 일에 대한 감소분으로서 다소 단순하게 고안되었음에도 불구하고, 정압력 특성 곡선(static pressure rise characteristic curves)에 대한 실험 결과를 전 유량 범위 내에서 비교적 타당하게 예측하고 있음을 알 수 있다(Fig. 4). $f_{w}=0$ 을 갖는 공칭 평균 유선 해석 방법(conventional meanline analysis method)에 의한 계산 결과는 정규 유량 범위에서 실험 결과를 정확하게 예측하고 있는 반면, 저유량 영역에서는 정압력 상승 결과를 과소하게 예측하고 있다.

4. 결 론

사류 송풍기가 저유량 영역에서 작동될 때

나타나는 임펠러 내부유동의 재순환에 기인한 성능 특성에 대해 실험적 상관식들을 도입함으로써, 기존의 평균 유선 해석 방법의 예측 성능을 향상시켰다.

본 연구에서 제안한 모델들을 사용한 성능 예측 결과를 6가지 사류 송풍기들의 실험 자료와 비교해 본 결과, 새로운 모델은 예측된 성능 곡선을 전 유량 범위에서 비교적 정확히 예측했다. 임펠러 입력 동력 및 압력 상승 곡선에 대한 계산 결과는 저유량 영역에서 발생하는 사류 송풍기의 특성 곡선(characteristic droop)을 보여준다.

본 연구를 통해 개발된 예측 기법은 사류 송풍기의 임펠러에 대한 개념적인 설계 수단으로 사용되어질 수 있고, 전체적인 작동 특성을 이해하는데 도움을 줄 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 산업기반기술개발사업 과제의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다. 그리고 본 연구를 수행하는데 필요한 서류 송풍기 형상 및 실험 자료를 제공해 주신 ㈜동해 기연 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) Peck, J. F., 1951, "Investigations Concerning Flow Conditions in a Centrifugal Pump, and the Effect of Blade Loading on Head Slip," IMechE, Vol. 164.
- (2) Varley, F. A., 1961, "Effects of Impeller Design and Surface Roughness on the Performance of Centrifugal Pumps," IMechE, Vol. 175.
- (3) Howell, A. R., 1942, "The Present Basis of Axial Flow Compressor Design: Part I-Cascade Theory and Performance," ARC R and M 2095.
- (4) Sarkar, S., 1992, "Performance Prediction of a Mixed Flow Impeller," IMechE Journal of Power and Energy, Vol. 206, pp. 189~196.
- (5) 오형우, 윤의수, 하진수, 정명균, 1998, "혼류 펌프의 성능 해석," 대한기계학회논문집(B), 제22권 제1호, pp. 70~78.
- (6) 전재욱, 최재호, 김광용, 2000, "사류 송풍기 삼차원 점성 유동 해석," 제1회 한국유체공공학술대회 논문집, pp. 639~642.
- (7) Sarkar, S., 1992, "Performance Study of a Mixed Flow Impeller Covering an Unsteady Flow Field," IMechE Journal of Power and Energy, Vol. 206, pp. 83~93.
- (8) Eck, B., 1973, Fans, Design and Operation of Centrifugal, Axial-Flow and Cross-Flow Fans, Pergamon Press (Oxford).
- (9) Jansen, W. and Sunderland, P. B., 1990, "Off-Design Performance Prediction of Centrifugal Pumps," ASME FED-Vol. 101, pp. 1~9.
- (10) Stepanoff, A. J., 1993, Centrifugal and Axial Flow Pumps, 2nd (Reprint) ed., Krieger Publishing Company (Florida).
- (11) Rathod, M. S. and Donovan Jr, F. M., 1980, "Performance Evaluation of a Centrifugal Cardiac Pump," In ASME Twenty-fifth Annual International Gas Turbine Conference and Twenty-second Annual Fluids Engineering Conference on Performance Prediction of Centrifugal Pumps and Compressors, pp. 235~243.
- (12) Conrad, O., Raif, K. and Wessels, M., 1980, "The Calculation of Performance Maps for Centrifugal Compressors with Vane-Island Diffusers," In ASME Twenty-fifth Annual International Gas Turbine Conference and Twenty-second Annual Fluids Engineering Conference on Performance Prediction of Centrifugal Pumps and Compressors, pp. 135~147.
- (13) Coppage, J. E., Dallenbach, F., Eichenberger, H. P., Hlavaka, G. E., Knoernschild, E. M. and Van Lee, N., 1956, "Study of Supersonic Radial Compressors for Refrigeration and Pressurization Systems," WADC Report 55-257.
- (14) Jansen, W., 1967, "A method for Calculating the Flow in a Centrifugal Impeller when Entropy Gradients are Present," Royal Society Conference on Internal Aerodynamics (Turbo-machinery).
- (15) Johnston, J. P. and Dean Jr, R. C., 1966, "Losses in Vaneless Diffusers of Centrifugal Compressors and Pumps. Analysis, Experiment, and Design," ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 88, pp. 49~62.