

## 케이싱 그루브가 장착된 천음속 축류압축기의 작동 안정성 향상을 위한 수치최적화

김진혁\* · 최광진\*\* · 김광용\*\*\*†

### Numerical Optimization of a Transonic Axial Compressor with Casing Grooves for Improvement of Operating Stability

Jin-Hyuk Kim\*, Kwang-Jin Choi\*\*, Kwang-Yong Kim\*\*\*†

*Key Words* : Axial compressor(축류압축기), Casing treatment(케이싱 트리트먼트), Stall margin(스톨마진), Adiabatic efficiency(단열효율), Optimization(최적화), Pareto-optimal solution(파레토 최적해).

#### ABSTRACT

Optimization using a hybrid multi-objective evolutionary algorithm coupled with response surface approximation has been performed to improve the performance of a transonic axial compressor with circumferential casing grooves. In order to optimize the operating stability and peak adiabatic efficiency of the compressor with circumferential casing grooves, tip clearance, angle distribution at blade tip and the depth of the circumferential casing grooves are selected as design variables. Three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equations with the shear stress transport turbulence model are discretized by finite volume approximations. The trade-off between two objectives with the interaction of blade and casing treatment is determined and discussed with respect to the representative clusters in the Pareto-optimal solutions compared to the axial compressor without the casing treatment.

#### 1. 서론

항공기 엔진 및 산업용 가스터빈 등의 주요 구성 부품으로서 사용되는 압축기의 설계는 고도의 기계공학적인 메커니즘을 요구하는 첨단공학 분야의 핵심기술 중 하나이다. 그간 압축기의 설계에 관해서는 대부분 운전점에서 각 단의 압력비나 효율을 극대화하기 위한 연구들이 활발히 이루어져 왔으나,<sup>(1~3)</sup> 최근 들어 응용 분야 및 시스템 요구도가 증가함에 따라 그 작동 영역이 달라지고, 경우에 따라서는 고압을 얻기 위해 서지 라인(surge line) 인근 저유량 영역에서 작동되기 때문에 예기치 못한 상황으로 인하여 압축기 내 스톨(stall)이나 서지(surge)와 같은 불안정한 복합유동구조가 발생하여 결국 전체 시스템의 성능 저하를 가져오게 된다. 따라서 최근에는 압축기 효율 등의 성능이 다소 감소되더라도

시스템의 기본적인 운전 안정성을 위한 스톨 마진(stall margin)을 확보하는데 설계의 중점이 주어지는 방향으로 설계가 많이 이루어지고 있다.

그 중 케이싱 트리트먼트(casing treatment)라 불리우는 수동제어(passive control)는 압축기의 케이싱에 그루브(groove)나 슬롯(slot) 형태의 홈을 파는 방법으로 케이싱 표면을 간단히 변형함으로써 실속 발생을 지연시킬 수 있다는 장점이 있다. 그러나 케이싱 트리트먼트를 장착 시 실속 발생 지연으로 인한 작동 안정성 향상은 도움이 되나, 설계점에서의 효율은 다소 낮아지는 특성을 가지게 되므로 이를 동시에 고려한 효과적인 설계가 많은 연구자들에 의해 수행되고 있다.

Rabe와 Hah<sup>(4)</sup>는 고하중 천음속 축류압축기의 케이싱에 환형의 홈을 내서 스톨 마진을 증가시키는 연구를 수행하였으며, 수치해석과 성능시험을 통해 주유동장과 홈을 통한 이차유동장의 상호간섭 효과로 블레이드 압력면에서의 입사각을 줄임으로써 스톨 마진을 증가시킬 수 있다고 보고하였다.

\* 인하대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 현대자동차 차량개발센터 사시설계팀  
\*\*\* 인하대학교 기계공학부  
† 교신저자, E-mail : kykim@inha.ac.kr

Houghton과 Day<sup>(5)</sup>는 수치해석과 성능시험을 통해 하나의 그루브에 대한 축방향 위치 및 그루브의 깊이에 따른 축류압축기의 스톨 마진 향상과 효율 향상을 분석하였다. 그 결과, 축방향 위치에 따른 최대 스톨 마진 향상점이 존재하는 것을 알아내었고, 또한 그루브에서의 유동과 높은 운동량을 가진 케이싱 부근의 유동이 상호작용을 하여 결국 팁 누설 유동으로 인해 블레이드 하중에 변화를 주게 되어 손실이 발생하기 때문에 효율이 다소 감소한다고 보고하였다. Muller 등<sup>(6)</sup>은 깊이가 다른 그루브의 4가지 배열에 대하여 수치해석과 시험을 통하여 스톨 마진 변화를 연구하였으며, 그루브에 의해 유로 내의 유로차폐 효과가 줄어들면서 결국 팁 누설 유동이 약해지게 되어 실속의 발생을 지연시키게 된다는 것을 보고하였다. Tuo 등<sup>(7)</sup>은 천음속 축류압축기의 스톨 마진과 효율을 향상시키기 위해 각기 다른 슬릿의 개수에 대한 실험적 연구를 수행하였으며, 그 결과 최적 개수의 슬릿 케이싱 트리트먼트가 적용된 압축기에서는 설계 회전수에서 스톨 마진 개선 효과를 얻을 수 있다고 보고하였다. Brignole 등<sup>(8)</sup>은 4가지 종류의 케이싱 트리트먼트를 설계하여 각각 천음속 축류압축기 한 단에서의 유동에 대한 영향을 연구하였다. 이 연구를 통하여 기하학적인 형상과 그로 인해 변화하게 되는 유동에 대한 영향을 규명하고자 하였으며, 케이싱 트리트먼트 형상에 따른 성능 변화를 평가하는데 기여하였다. Kim 등<sup>(9)</sup>은 천음속 축류압축기의 케이싱 그루브에 관하여 너비 및 깊이에 따른 스톨 마진과 효율의 상관관계를 규명하고자 다중목적 최적설계를 수행하였다. 그 결과, 주어진 설계 범위 내 그루브의 너비 및 깊이가 넓고 깊을수록 최대 스톨 마진 증가와 동시에 최소의 효율 감소를 얻을 수 있다고 보고하였다.

이처럼 효율과 작동 안정성을 고려한 축류압축기의 케이싱 트리트먼트에 관한 연구는 많은 수단과 방법에 의해 수행되고 있으나, 대부분 케이싱 트리트먼트에 관한 연구만이 진행되고 있을 뿐 케이싱 트리트먼트의 장착과 함께 압축기 블레이드 형상에 따른 상호작용을 통해 작동 안정성 향상을 고려한 연구는 체계적으로 수행되고 있지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 상호작용에 따른 천음속 축류압축기의 성능을 규명하고자 삼차원 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 해석과 반응면 기법(response surface approximation)<sup>(10)</sup>을 바탕으로 다중목적 진화알고리즘(hybrid multi-objective evolutionary algorithm)<sup>(11)</sup>을 결합한 다중목적 수치최적설계를 수행하였다. 이를 위해 블레이드 팁 간극, 블레이드 팁에서의 각도 분포 및 케이싱 그루브의 깊이를 설계변수로 선정하였으며, 수치최적설계로부터 도출된 최적형상들을 토대로 기준형상과 비교 및 분석을 통해 케이싱 트리트먼트와 블레이드의 상호작용에 따른 효율과 스톨 마진의 상관관계를 알아보려고 하였다.

Table 1 Design specifications of NASA Rotor 37

Design mass flow rate, kg/s	20.19
Rotational speed, rpm	17188.7
Total pressure ratio	2.106
Inlet hub-tip ratio	0.7
Blade aspect ratio	1.19
Tip relative inlet Mach number	1.48
Hub relative inlet Mach number	1.13
Tip solidity	1.29
Number of rotor blades	36

## 2. 축류압축기 사양

본 연구에서는 NASA Rotor 37 익형을 갖는 천음속 축류압축기에 대하여 삼차원 수치해석을 수행하였다. Reid와 Moore<sup>(12)</sup>로부터 수행된 선행 실험으로부터 본 축류압축기의 전압력비는 설계 유량 20.19kg/s에서 2.106 및 효율은 88.9%이며, 팁 간극은 0.356mm(0.47% span)이다. 선행 실험으로부터 측정된 초킹(choking) 유량은 20.93kg/s이며, 실속 근처 유량은 0.925이다. 본 연구대상인 축류압축기의 주요 제원은 Table 1에 기술하였다.

## 3. 수치해석방법

수치해석을 수행하기 위해 축류압축기의 내부 유동장은 삼차원 압축성 정상상태로 가정하였고, ANSYS 사의 상용코드 ANSYS CFX-11.0<sup>(13)</sup>을 사용하여 해석을 수행하였다. 본 축류압축기의 형상 정의, 격자 생성, 경계조건의 정의, 유동 해석 및 결과 정리는 각각 Blade-Gen, Turbo-Grid, CFX-Pre, CFX-Solver 및 CFX-Post를 사용하였고, 그루브의 형상 정의 및 격자 생성은 각각 Design-Modeler 및 CFX-ICEM을 사용하여 해석을 수행하였다.

해석대상인 축류압축기는 블레이드가 36개로 구성이 되어 있으나, 계산시간의 단축 및 수렴성 향상을 위해 인접하는 두 블레이드 사이의 유동장이 회전방향에 대해 주기적으로 형성되어 있다고 가정하여 장착된 케이싱 그루브와 함께 하나의 유로에 대해서 Fig. 1에서 보는 바와 같이 주기조건을 적용하여 해석을 수행하였다. 여기서 케이싱에 그루브를 장착하여 해석 시 케이싱과 그루브의 경계면은 GGI(general grid interface) 조건을 부여하였다.<sup>(13)</sup>

압축기를 통과하는 작동유체는 이상상태의 공기로 가정하였다. 입구의 경계조건은 균일한 상태의 전압력 및 전온도를 주었으며, 출구조건으로는 단일유로에 대한 질량유량을 주었다.

SST(shear stress transport) 모델과 함께 벽 근처 영역

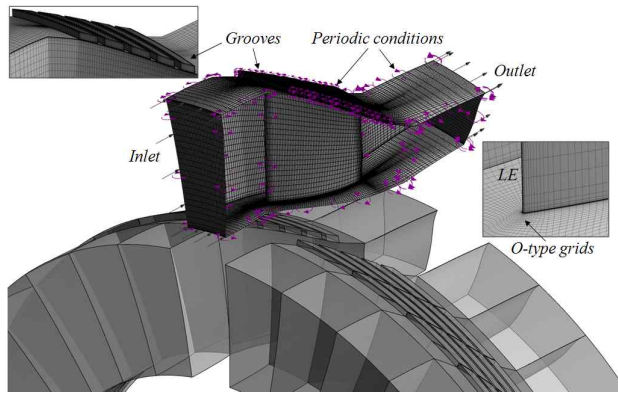


Fig. 1 Boundary conditions and hexahedral grid system in the computational domain

에서 저레이놀즈 모델을 적용하기 위해 Fig. 1에 나타난 바와 같이 블레이드 표면 인근에는 O형 격자계를 구성하여 첫 번째 격자점의  $y^+$  최대값을 1미만으로 유지되도록 하였고, 그 외의 영역에는 H/J/C/L형 격자계를 사용하였다.

수치해석 시 실속 근처 저유량 영역에서 실속이 발생하는 유량(실속유량)은 유량을 감소시켜가면서 수치계산이 마지막으로 수렴하는 지점으로 결정하였고, 입구에서의 유량 변화가 300 스텝 당 0.001kg/s, 입구와 출구의 유량 차이가 0.5% 이하 및 단열효율의 변화가 100 스텝 당 0.03% 이하일 경우 수렴을 판단하였다. 이는 Chen 등<sup>(14)</sup>에 의해 제시된 바와 같다.

#### 4. 다중목적 수치최적설계

본 연구에서는 케이싱 그루브가 장착된 축류압축기의 성능을 향상시키고자 스톨 마진과 성능곡선 내 최고 효율을 목적함수로 선정하였으며, 다중목적 수치최적설계를 통해 이들을 동시에 최대화 하고자 하였다. 여기서 각 목적함수는 다음과 같이 정의된다.

$$SM = \left( \frac{m_{peak}}{m_{stall}} \times \frac{PR_{stall}}{PR_{peak}} - 1 \right) \times 100\% \quad (1)$$

$$\eta_{peak} = \frac{\left( \frac{P_{t,out}}{P_{t,in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\left( \frac{T_{t,out}}{T_{t,in}} \right) - 1} \quad (2)$$

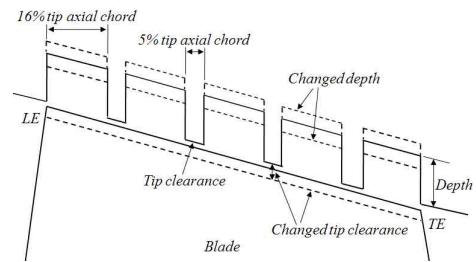
여기서  $m$ ,  $PR$ ,  $P_t$  및  $T_t$ 는 각각 유량, 전압력비, 전압력 및 전온도를 나타내며, 하첨자 *peak*, *stall*, *in* 및 *out*은 각각 최대 효율점, 스톨 발단점, 입구부 및 출구부를 나타낸다.

본 연구에서는 케이싱 트리트먼트의 장착과 함께 압축기 블레이드 형상에 따른 상호작용을 통해 천음속 축류압축기의

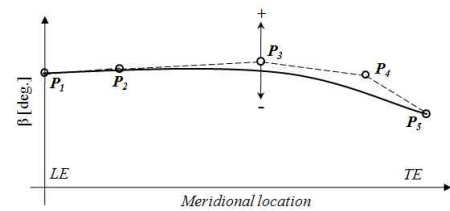
성능을 규명하고자 설계변수로서 블레이드 팁 간극( $T$ ), 블레이드 팁에서의 각도 분포( $\beta$  angle) 및 Choi 등<sup>(15)</sup>으로부터 수행된 선행 연구를 바탕으로 케이싱 그루브의 깊이( $D$ )를 설계변수로 선정하였다. Choi 등<sup>(15)</sup>은 천음속 축류압축기의 스톨 마진을 향상시키고자 케이싱 그루브의 너비 및 깊이를 설계변수로 선정하여 수치최적설계를 수행한 바 있으며, 그 결과 그들은 케이싱 그루브의 깊이가 너비에 비해 스톨 마진을 향상시키는 데 있어 더욱 민감하다는 것을 규명한 바 있다.

Fig. 2는 각 설계변수를 도식화하고 있다. Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 그루브는 원주방향으로 총 5개로 구성되어있으며, 기준 그루브의 형상은 Choi 등<sup>(15)</sup>에 의해 수행된 선행 연구의 형상으로 블레이드의 앞전과 뒷전 사이에 고르게 분포되어 있다. 각 그루브의 너비 및 간극은 선행연구로부터 각 그루브가 겹치지 않는 범위 내에서 수행된 예비계산을 통해 각각 축방향 팁 코드 길이의 16% 및 5%로 구성되어진다.

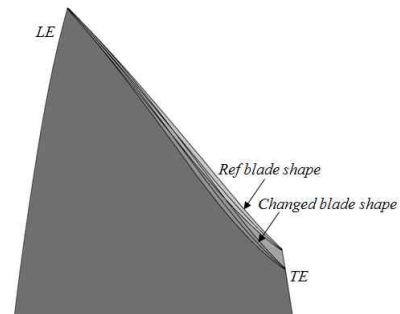
Fig. 2(b) 및 (c)는 블레이드 팁에서의 각도 분포를 보여주고 있다. 여기서 블레이드 각은 축방향과 캠버선에 접하는 각도로서 정의되며, 블레이드의 자오면을 고정시킨 상태에



(a) Definition of tip clearance and depth of the grooves



(b)  $\beta$  distribution by the fourth-order Bezier-curve



(c) Example of a changed blade shape with the variation of  $\beta$  distribution at blade tip

Fig. 2 Definition of the design variables

Table 2 Ranges of the design variables

Variables	$D$ , mm	$\beta$ , deg	$T$ , mm
Lower	0.214	60.04	0.178
Upper	0.641	69.62	0.534

서 각도를 변화시켰다. 각도 분포는 최적설계 시 자유로이 변경하기 위해 4차 베지어 곡선으로부터 대표되는 5개의 제어점으로 구성하였다. Fig. 2(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 블레이드 팁에서의 각도 분포를 구성하는 5개의 제어점 중 4개의 제어점은 고정시킨 상태에서 중간 위치에서의 제어점 즉,  $P_3$ 를 상하로 이동시키면서 각도 분포를 변화시켰다. Fig. 2(c)는 블레이드 팁에서의 각도 분포 변화에 따른 예를 보여주고 있다. 최적설계 과정에서 변경될 각 설계변수들의 상한과 하한은 앞에서 제시한 수렴성 판단을 기준으로 목적함수에 대한 예비계산결과를 반영하여 결정하였으며, Table 2에 그 범위를 나타내었다.

최적점을 산출할 실험점을 구성하고자 실험계획법 중 라틴하이퍼큐브 샘플링(Latin-hypercube sampling) (16)을 사용하여 설계범위 내에서 25개의 실험점을 추출하였고, 삼차원 RANS 해석을 수행하여 각 실험점에서의 목적함수 값을 평가하였다.

본 연구에서는 대리모델로서 반응면 기법을 사용하여 최적점을 산출할 반응면을 구성하고자 하였다. 반응면 기법은 실제 반응함수를 근사적인 다항 함수로 모델링하기 위해 물리적인 실험 또는 수치적인 계산으로부터 얻어진 결과들을 이용하는 일련의 수리통계적인 기법으로서 한정된 수의 실험만으로도 임의의 공간 내 반응을 모델링함으로써 실험의 시행횟수를 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서 사용된 2차 다항식으로 구성된 반응면은 다음과 같이 표현된다.

$$f(x) = C_0 + \sum_{j=1}^N C_j x_j + \sum_{j=1}^N C_{jj} x_j^2 + \sum_{i \neq j}^N C_{ij} x_i x_j \quad (3)$$

여기서  $C$ ,  $N$  및  $x$ 는 각각 다항식의 계수, 설계변수의 개수 및 설계변수를 나타낸다.

본 연구에서는 반응면 기법을 통해 얻어진 각 목적함수들의 반응면들을 토대로 각 목적함수들을 최대화시킬 수 있는 다중목적 진화알고리즘을 사용하여 다수의 최적점들을 얻고자 하였다. 여기서 다수의 최적점들은 비지배해들(non-dominated solutions)의 집합체인 파레토 최적해(Pareto-optimal solutions)라 불리 우며, 설계자는 이 파레토 최적해를 통해 사용하고자 하는 목적의 의도에 따라 원하는 최적점을 선택할 수 있는 장점을 가지고 있다. 다중목적 진화알고리즘은 이와 같은 파레토 최적해를 얻기 위해 Deb(17)에 의해 개발된 real coded NSGA-II(non-dominated sorting genetic algorithm) 코드가 사용되었다. 여기서 'real coded'

는 NSGA-II의 반응을 구성하기 위해 실제 설계 공간 내 교차(crossover) 및 변이(mutation)가 수행되어 지는 것을 의미한다. 각 목적함수의 최적해들은 구배기반의 탐색 알고리즘인 SQP(sequential quadratic programming)(18)를 사용하여 초기 NSGA-II에 의해 예측된 해들로부터 각 목적함수들의 극부적인 검색을 통해 좀 더 개선된 각각의 최적해들을 얻게 된다. 이렇게 개선된 최적해들로부터 지배되는 해들(dominated solutions)은 버리게 되고, 중복되는 해들(duplicate solutions)의 제거를 통해 결과적으로 비지배해들의 집합체인 파레토 최적해를 얻을 수 있다.

### 5. 결과 및 검토

앞에서 기술된 본 연구대상인 천음속 축류압축기의 최적설계를 수행하기 전 단계로서 격자의존성을 제거하기 위한 격자의존성 시험 및 성능시험결과와 비교를 통한 수치해석 결과의 검증은 선행 연구(15)에 의해 타당성이 입증된 바 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 결과들을 토대로 다중목적 수치최적설계로부터 도출된 최적형상에 대하여 기준형상과 비교 및 분석을 통해 케이싱 트리트먼트와 블레이드의 상호작용에 따른 효율과 스톨 마진의 상관관계를 알아보하고자 하였다.

Table 3은 반응면 기법으로부터 구성된 각 목적함수들의 반응면에 대한 ANOVA(analysis of variance)와 회귀분석(regression analysis)의 결과를 보여주고 있다. Ginuta(19)는 반응면 기법에 의한 반응모델이 정확히 예측된 경우  $R^2_{adj}$  값은 0.9~1의 값을 가진다고 보고한 바 있다. 본 연구에서는 각 목적함수인 스톨 마진과 최대 효율의  $R^2_{adj}$  값이 각각 0.949 및 0.945이므로 반응면은 신뢰할 만하다고 할 수 있다.

Fig. 3은 반응면 기법으로부터 도출된 최적점 근처에서 세 가지 설계변수군에 대한 목적함수 스톨마진의 민감도 분석을

Table 3 Results of ANOVA and regression analysis

Objective functions	$R^2$	$R^2_{adj}$	RMSE
$SM$	0.958	0.949	$3.90 \times 10^{-2}$
$n_{peaks}$	0.983	0.945	$4.28 \times 10^{-2}$

Table 4 Results of the objective function values for the optimal clusters in the Pareto-optimal solutions

Designs	MOEA		RANS	
	$SM$ , (%)	$n_{peaks}$ , (%)	$SM$ , (%)	$n_{peaks}$ , (%)
Reference	-	-	11.633	85.122
Opt. A	14.815	85.206	14.052	85.094
Opt. B	15.402	85.141	15.192	85.086
Opt. C	16.036	85.058	15.839	85.049
Opt. D	16.367	84.972	16.949	84.976

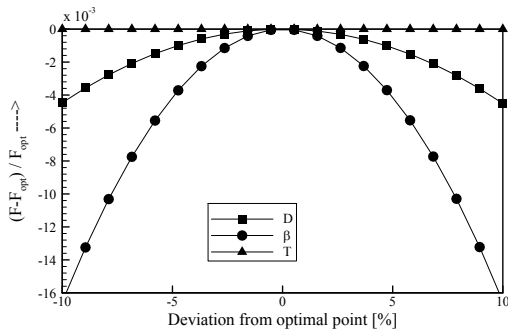


Fig. 3 Sensitivity analysis results

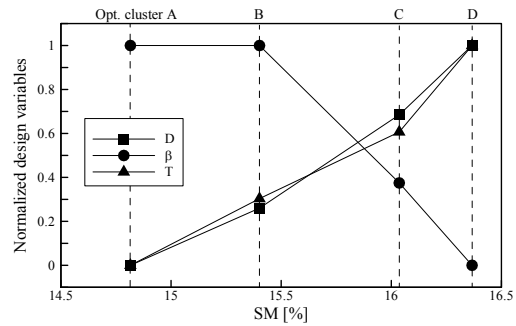


Fig. 5 Distributions of normalized design variables over the optimal clusters with the stall margin

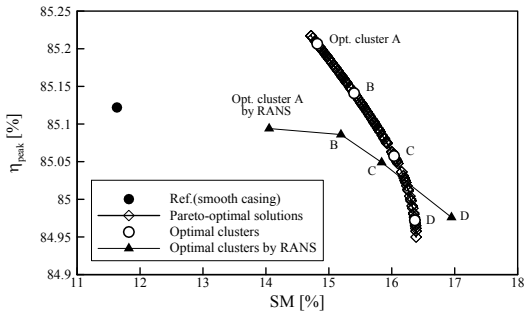


Fig. 4 Results of RANS and the Pareto-optimal solutions by hybrid MOEA

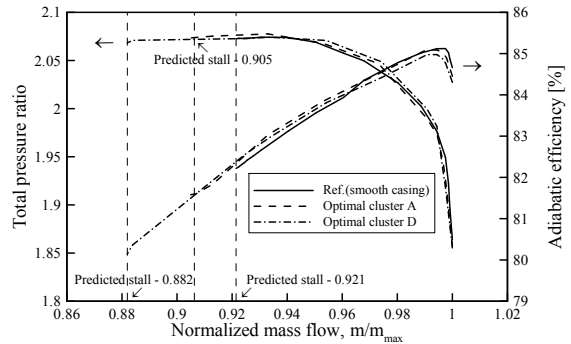


Fig. 6 Performance characteristics

보여주고 있다. 여기서 설계변수의 변화를 나타내는 수평축은 최적점으로부터  $\pm 10\%$  범위 내의 값을 나타내며, 수직축의 하첨자 opt는 최적형상을 나타낸다. 이 결과로부터 설계변수인 블레이드 팁에서의 각도 분포는 최적점의  $\pm 10\%$  범위 내에서 민감한 영향을 줄을 알 수 있고, 블레이드 팁 간극은 세 가지 설계변수군 중에서 가장 영향이 적음을 알 수 있다.

Fig. 4는 케이싱 그루브가 장착되지 않은 기준형상, 다중목적 수치최적설계로부터 도출된 파레토 최적해 및 파레토 최적해 내 클러스터링(clustering)을 통한 4개의 최적점에 따른 RANS 해석결과를 도식화하고 있으며, Table 5는 그들의 각 목적함수에 대한 예측값 및 해석결과를 비교하고 있다. Fig. 4 및 Table 5에서 볼 수 있는 바와 같이 4개의 클러스터링된 최적점들을 살펴보면, 최적점 A의 경우에는 다중목적 최적설계에 의해 스톨 마진 및 최고 효율점이 모두 기준형상에 비해 향상된 성능을 예측한데 반해 RANS 해석 결과는 스톨 마진 향상과 동시에 최고 효율은 다소 감소한 결과를 볼 수 있다. 또한 다중목적 최적설계에 의해 예측된 최적점에 따른 RANS 해석 결과들은 모두 기준형상에 비해 스톨 마진이 크게 향상된 결과를 얻었으나, 최고 효율점은 전반적으로 다소 감소된 결과를 볼 수 있다. 이는 케이싱 트리트먼트를 장착 시 실속 발생 지연으로 인한 작동 안정성 향상에는 도움이 되나, 항상 설치되어 있는 그루브로 인한 유동 간섭으로 인해 최고 효율점은 다소 낮아지는 특성을 보여준다.

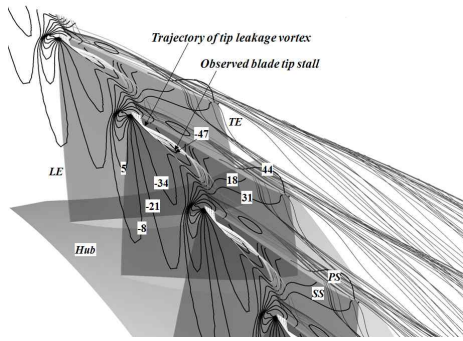
Fig. 5는 클러스터링된 최적점 4개의 각 설계변수에 따른

스톨 마진 분포를 보여주고 있다. 여기서 각 설계변수 값은 0~1로 무차원화 되었다. 케이싱 그루브의 깊이 및 블레이드 팁 간극은 스톨 마진이 향상될수록 증가되는 경향을 보인데 반해 블레이드 팁에서의 각도는 감소되는 경향을 보인다.

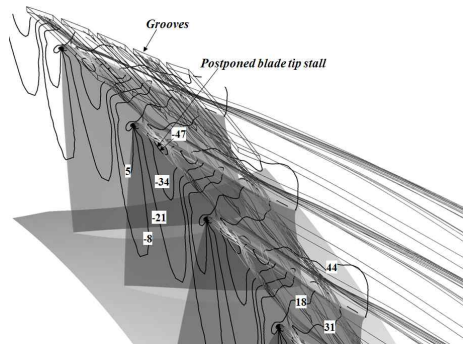
앞서 살펴본 바와 같이 다중목적 수치최적설계로부터 도출된 결과들을 바탕으로 케이싱 트리트먼트와 블레이드의 상호작용에 따른 최고 효율과 스톨 마진의 상관관계를 더욱 자세히 알아보고자 기준형상 및 최적점 A와 D에 대하여 내부유동장 분석을 수행하였다.

Fig. 6은 기준형상 및 최적점 A와 D에 대하여 전압비와 효율을 보여준다. 여기서 유량은 각 형상에서의 최대 유량으로 무차원화 되었다. 성능곡선 상에서 볼 때 기준형상에서의 실속유량은 0.921이고, 최적점 A와 D의 실속유량은 각각 0.905 및 0.882로 예측되었다.

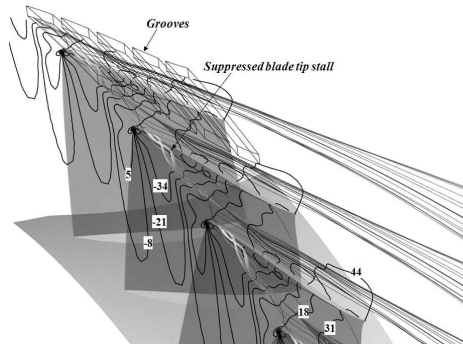
Fig. 7은 기준형상의 실속유량( $m/m_{max}=0.921$ )에서 기준형상 및 최적점 A와 D에 대한 98% 스팬에서의 정압 분포 및 팁 누설 와류의 유선 궤적 분포를 보여주고 있다. 팁 누설 와류는 주유동과 팁 누설 유동의 상호작용에 의해 블레이드 앞 전 팁 부근에서 발생하기 시작하여 후연부로 갈수록 점차 회전하는 경향을 보이는데, 이러한 팁 누설 와류의 궤적은 Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 기준형상에서는 통로의 가장자리 부근 즉, 블레이드의 압력면 부근으로 치우쳐 이동하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 블레이드 압력면과 흡입면의 강



(a) Reference (smooth casing)



(b) Optimal cluster A



(c) Optimal cluster D



Fig. 7 Static pressure distributions(unit: kPa) on 98% span and trajectory of the tip leakage vortex at near stall point of the reference,  $m/m_{max} = 0.921$

한 압력구배에 의해 생성된 팁 누설 와류가 빠른 속도로 주 유동의 영향을 거의 받지 않고 있음을 알 수 있다. 또한 이로 인해 블레이드 앞전 흡입면 부근에서 블레이드 팁 스톨이 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과들은 Wilke 등<sup>(20)</sup>에 의해 입증된 바 있다. 그들은 블레이드 앞전 팁 부근의 흡입면에서는 블레이드각과 유동각의 차이인 입사각에 의해서 주 유동이 블레이드 프로파일을 따라가지 못하고, 결국 블레이드 앞전 흡입면 부근에서 박리공간이 발생한다고 언급한 바 있으며, 이를 블레이드 팁 스톨이라고 보고하였다. 이에 반

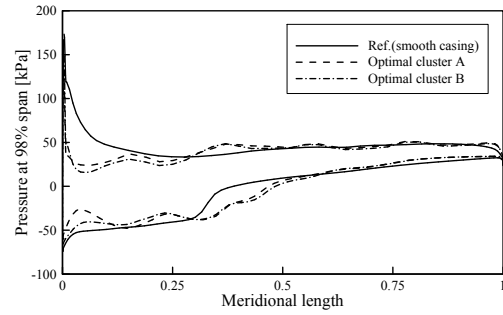


Fig. 8 Static pressure distribution at near stall point of the reference,  $m/m_{max} = 0.921$ (98% span)

해 Fig. 7(b) 및 (c)에서 보는 바와 같이 그루브가 장착된 최적점 A 및 D의 경우에는 블레이드 앞전에서 발생하는 팁 누설 와류의 속도가 기준형상에 비해 확연히 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이는 그루브의 장착으로 인해 블레이드의 압력면과 흡입면에서 발생하는 압력구배가 줄어들었음을 의미한다. 또한 최적점 A의 경우에는 블레이드 앞전 흡입면 부근에서 발생하는 블레이드 팁 스톨이 기준형상에 비해 블레이드 프로파일을 따라 뒤쪽으로 작아지면서 지연된 반면, 최적점 D는 블레이드 팁 스톨이 확연히 사라진 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 4 및 5에서 볼 수 있는 바와 같이 최적점 D는 최적점 A에 비해 그루브의 깊이가 깊고, 블레이드 팁 간극이 더 큰 형상을 가지기 때문에 블레이드의 압력면과 흡입면에서 발생하는 압력구배가 더 많이 줄어들어 결국 주유동의 영향을 많이 받아 블레이드 팁 스톨이 사라진 것으로 볼 수 있다. 또한 블레이드 팁에서의 각도가 줄어들어 따라 입사각이 줄어들면서 결국 줄어든 압력구배와의 상호작용에 의해 팁 누설 와류의 주경로가 블레이드 프로파일을 따라 블레이드 사이 통로의 중앙 부근으로 이동하게 되면서 블레이드 팁 스톨이 사라지게 되고, 그로 인해 스톨 마진이 더욱 증가하게 된 것으로 사료된다.

Fig. 8은 기준형상의 실속유량( $m/m_{max}=0.921$ )에서 블레이드 압력면과 흡입면에 대한 98% 스펠에서의 정압 분포를 보여주고 있다. 최적점 A와 D에서는 그루브의 장착으로 인해 각 그루브의 위치에서 압력면과 흡입면에서의 압력이 다소 증감하는 것을 볼 수 있다. 또한 블레이드 앞전에서 정압 분포가 기준형상에 비해 확연히 줄어든 것을 볼 수 있는데 이는 그루브의 설치와 함께 입사각의 변화에 의해 기인되는 결과로 볼 수 있다.

Fig. 9는 각 최고 효율점에서 자오면 형상에 따른 엔트로피 분포를 보여주고 있다. 기준형상과 그루브가 장착된 형상들을 비교하여 보면, 그루브가 장착된 형상에서는 케이싱 부근에 엔트로피 분포가 높은 것을 볼 수 있는데 이는 결국 압축기 효율 감소의 원인이 된다. 최적점 A와 D를 살펴보면 Fig. 9(b) 및 (c)에서 보듯이 최적점 A의 경우 케이싱 부근에



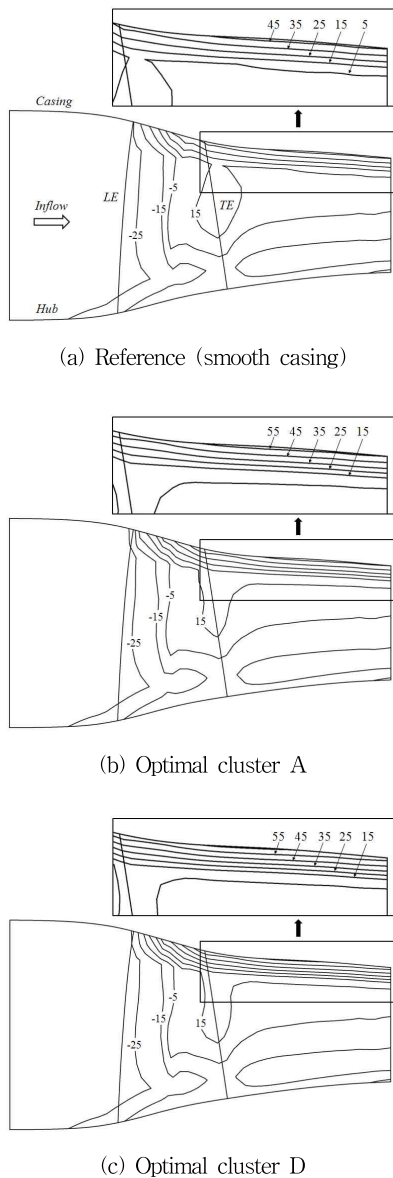


Fig. 9 Entropy contours on the meridional plane at each peak efficiency point (unit: J/kg · K)

엔트로피 분포가 최적점 D보다 약간 낮은 분포를 보이는 것을 볼 수 있다. 이는 결과적으로 케이싱 부근에서의 낮은 엔트로피 분포는 압축기 효율의 회복을 가져온다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 천음속 축류압축기의 케이싱 트리트먼트의 장착과 함께 작동 안정성 향상을 규명하고자 삼차원 RANS 해석과 반응면 기법을 바탕으로 다중목적 진화알고리즘을 결합한 다중목적 수치최적설계를 수행하였다. 케이싱 트리트먼트와 압축기 블레이드의 상호작용에 따른 효율과 스톨 마진의 상관관계를 알아보고자 블레이드 팁 간극, 블레이드 팁에서의 각도 분포 및 케이싱 그루브의 깊이를 설계변수로

선정하였다. 수치최적설계로부터 도출된 파레토 최적해 내 클러스터링된 최적형상들을 토대로 기준형상과 비교 및 분석을 수행한 결과, 블레이드 팁 간극이 크고, 케이싱 그루브의 깊이가 깊을수록 블레이드의 압력면과 흡입면에서 발생하는 압력구배가 더욱 줄어들면서 그에 따른 팁 누설 와류의 속도가 줄어들어 결국 주유동의 영향을 받게 된다는 것을 알아내었다. 또한 그에 따른 영향과 함께 블레이드 팁에서의 각도가 줄어들어 따라 입사각이 줄어들게 되어 결국 팁 누설 와류가 블레이드 사이 통로의 중앙 부근으로 이동하게 되면서 블레이드 팁 스톨이 사라지게 되고, 그로 인해 약간의 효율 감소와 함께 스톨 마진이 더욱 증가하게 되는 메커니즘을 파악하였다.

## 후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0015903).

## 참고문헌

- (1) Kim, J. H., Choi, J. H., and Kim, K. Y., 2009, "Design Optimization of a Centrifugal Compressor Impeller Using Radial Basis Neural Network Method," ASME Turbo Expo 2009, Florida, USA, GT2009-59666.
- (2) Benini, E., 2004, "Three-Dimensional Multi-Objective Optimization of a Transonic Compressor Rotor," AIAA Journal of Propulsion and Power, Vol. 20, No. 3, pp. 559~565.
- (3) Samad, A., and Kim, K. Y., 2009, "Application of Surrogate Modeling to Design of a Compressor Blade to Optimize Stacking and Thickness," International Journal of Fluid Machinery and Systems, Vol. 2, No. 1, pp. 1~12.
- (4) Rabe, D. C., and Hah, C., 2002, "Application of Casing Circumferential Grooves for Improved Stall Margin in a Transonic Axial Compressor," ASME Turbo Expo 2002, Amsterdam, Netherlands, GT2002-30641.
- (5) Houghton, T., and Day, I., 2009, "Enhancing the Stability of Subsonic Compressor Using Casing Grooves," ASME Turbo Expo 2009, Florida, USA, GT2009-59210.
- (6) Muller, M. W., Schiffer, H. P., and Hah, C., 2007, "Effect of Circumferential Grooves on the Aerodynamic Performance of an Axial Single-Stage Transonic Compressor," ASME Turbo Expo 2007, Montreal, Canada, GT2007-27365.
- (7) Tuo, W., Lu, Y., Yuan, W., Zhou, S., and Li, Q., 2009, "Experimental Investigation on the Effects of Unsteady Excitation Frequency of Casing Treatment on Transonic

- Compressor Performance,” ASME Turbo Expo 2009, Florida, USA, GT2009-59281.
- (8) Brignole, G. A., Danner, F. C. T., and Kau, H. P., 2008, “Time Resolved Simulation and Experimental Validation of the Flow in Axial Slot Casing Treatments for Transonic Axial Compressors,” ASME Turbo Expo 2008, Berlin, Germany, GT2008-50593.
- (9) Kim, J. H., Choi, K. J., Husain, A., and Kim, K. Y., 2011, “Multiobjective Optimization of Circumferential Casing Grooves for a Transonic Axial Compressor,” AIAA Journal of Propulsion and Power, Vol. 27, No. 3, pp. 730~733.
- (10) Myers, R. H., and Montgomery, D. C., 1995, Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley & Sons, New York, USA.
- (11) Deb, K., and Goel, T., 2001, “A Hybrid Multi-Objective Evolutionary Approach to Engineering Shape Design,” Proceeding of Evolutionary Multi-Criterion Optimization Conference, Zurich, Switzerland, pp. 385~399.
- (12) Reid, L., and Moore, R. D., 1978, “Design and Overall Performance for Four Highly-Loaded, High-Speed Inlet Stage for an Advanced, High-Pressure-Ratio Core Compressor,” NASA TP-1337.
- (13) ANSYS CFX-11.0, 2006, ANSYS CFX-Solver Theory Guide, ANSYS Inc.
- (14) Chen, H., Huang, X., and Fu, S., 2006, “CFD Investigation on Stall Mechanisms and Casing Treatment of a Transonic Compressor,” 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Sacramento, CA, AIAA Paper 2006-4799.
- (15) Choi, K. J., and Kim, J. H., and Kim, K. Y., 2010, “Design Optimization of Circumferential Casing Grooves for a Transonic Axial Compressor to Enhance Stall Margin,” ASME Turbo Expo 2010, Glasgow, UK, GT2010-22396.
- (16) JMP® 6.0.0, 2005, The Statistical Discovery Software, Version 6.0.0, SAS Institute, INC., Cary, North Carolina, USA.
- (17) Deb, K., 2001, Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms, 1st ed., John Wiley & Sons Inc., Chichester, England.
- (18) MATLAB® 7.0, 2004, The Language of Technical Computing, Release 14, The Mathworks Inc., Natick, MA, USA.
- (19) Guinta, A. A., 1997, “Aircraft Multidisciplinary Design Optimization Using Design of Experimental Theory and Response Surface Modeling Methods,” Ph. D. Dissertant, Department of Aerospace Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
- (20) Wilke, I., Kau, H. P., and Brignole, G., 2005, “Numerically Aided Design of a High-Efficient Casing Treatment of a Transonic Compressor,” ASME Turbo Expo 2005, Nevada, USA, GT2005-68993.