

研究論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.4.001>

가변 입구 안내익이 있는 축류압축기의 성능예측 방법에 관한 연구

김동현* · 김상조* · 김귀순**† · 손창민*** · 김유일**** · 민성기*****

A Study on the Performance Prediction Method for an Axial Compressor with Variable Inlet Guide Vane

Donghyun Kim* · Sangjo Kim* · Kuisoon Kim**† · Changmin Son*** ·
You-il Kim**** · Seongki Min*****

ABSTRACT

In this study, numerical method, stage stacking method based on the result of numerical method and scaled stage stacking method have been applied to predict the performance of a multi-stage axial compressor with inlet guide vane. The results obtained through three different methods for off-design conditions were compared with performance test data. And the effect the angle of variable inlet guide vane was also investigated. The three-dimensional numerical simulation has been performed by using flow analysis program, FLUENT™ 6.3 and the performance prediction based on the stage stacking method has been performed with compressor analysis code from NASA.

초 록

본 연구에서는 가변 입구 안내익이 있는 다단 축류압축기의 성능예측을 위하여 3차원 전산해석, 전산해석 결과를 이용한 단 축적법, 그리고 스케일 된 단 축적법의 3가지 해석 기법을 적용하였다. 이 방법들을 적용하여 구한 압축기 탈설계점 성능특성은 성능시험 결과와 비교하여 분석하였으며, 가변 입구 안내익 적용시의 성능해석을 수행하여 가변 효과를 살펴보았다. 성능해석은 상용 전산 유동해석 프로그램인 FLUENT 6.3™ 과 NASA의 압축기 해석 코드를 이용하여 해석을 수행하였다.

Key Words: Axial Compressor(축류압축기), Off-design Performance Prediction(탈설계 성능예측), Stage-Stacking Method(단 축적법), Variable Inlet Guide Vane(가변 입구 안내익)

접수일 2012. 5. 15, 수정완료일 2012. 6. 27, 게재확정일 2012. 7. 3

* 학생회원, 부산대학교 대학원 항공우주공학과

** 종신회원, 부산대학교 기계공학부

*** 정회원, 부산대학교 항공우주공학과

**** 정회원, 국방과학연구소 1기술연구본부 5부

***** 종신회원, 국방과학연구소 1기술연구본부 5부

† 교신저자, E-mail: kuskim@pusan.ac.kr

1. 서 론

가스터빈 엔진의 성능모사는 엔진 개발시 위험요소 배제, 개발비용의 절감 그리고 운용시 상태 진단 등 다양한 목적으로 활용되고 있으므로

그 중요성은 이미 잘 알려져 있다. 이러한 성능 모사를 위해서는 먼저 구성품의 성능특성을 알고 있어야 한다. 그러나 엔진 구성품의 성능특성은 공개되지 않는 게 일반적이며, 압축기의 성능 자료 또한 구하기가 매우 어렵다. 특히 압축기에 가변 입구 안내익(Variable Inlet Guide Vane)이나 가변 정익(Variable Stator Vane)이 사용될 경우 그 성능은 매우 유동적이다. 따라서 이러한 압축기 성능 특성을 정확하게 파악하는 것이 가스터빈의 성능모사에 매우 중요한 요소라 할 수 있다.

압축기 성능예측을 위해 널리 사용되는 방법인 성능맵을 스케일하여 사용하는 방법[1]은 쉽고 편리하지만 탈설계점에서 비교적 오차가 크고, 가변 안내익이나 가변 정익이 있는 경우에는 적용하기가 어렵다. Bohne 등[2]은 입구 안내익이 있는 고속의 3단 축류 압축기를 대상으로 탈설계 조건에서 비정상 유동 흐름을 실험적으로 측정하고 서지 마진 부근과 초크 상태의 두 가지 작동점에 대한 비정상 2차 유동의 거동을 관찰하였고 Hiroshi 등[3]은 저속에서 압축기의 서지 한계를 향상시키기 위해 실험에 의한 압축기 서지 특성을 연구하였다.

이종준 등[4]은 가스터빈 시스템의 성능을 좀 더 정확하게 해석하기 위해서 단 축적법을 사용한 압축기 성능 해석을 수행하였고 압축기 성능 선도 및 터빈 효율식 등을 이용하여 탈설계점 해석을 수행할 수 있도록 모사하였다. 김병남 등[5]은 정확한 압축기 성능 예측을 위해 단단 축류 압축기를 대상으로 손실모델을 이용한 탈설계점 계산을 수행하였다. Yamagami 등[6]은 고부하, 고속의 다단 축류 압축기에 대한 3차원 비정상 해석을 수행하였는데, 형상과 난류모델에 따른 성능 예측의 정확도를 비교하였고 Barbosa 등[7]은 가스터빈 엔진의 탈설계 운전을 개선하기 위해 가스터빈 성능 해석을 통해 압축기 가변형상과 천이운용에 따른 압축기 성능 맵을 도출하였다. 그러나 이러한 연구들은 가변 입구 안내익을 적용하지 않은 압축기 위주로 진행되었으며, 가변 입구 안내익 적용시의 성능특성에 대한 연구가 일부 있으나 아직 예측방법의 정확도

를 향상시킬 여지가 많다.

따라서 본 논문에서는, 탈설계점 성능예측과 가변 입구 안내익 적용시의 압축기 성능예측에 사용될 수 있는 3차원 전산해석과 단 축적법(Stage-stacking method), 그리고 스케일(Scaled)된 단축적법의 3가지 해석 기법을 사용하여 다단 축류 압축기의 성능해석을 수행하고 이러한 압축기 성능예측 방법들에 대한 특성을 비교하였다. 비교를 위해 계산 조건은 고정 입구 안내익과 가변 입구 안내익에 대한 조건으로 나누어 해석을 수행하였다. 단 축적법을 이용한 성능 예측은 NASA의 다단 축류 압축기 해석 코드[8]를 활용하였으며 3차원 유동 해석은 상용 전산 해석 프로그램인 FLUENT™ 6.3을 이용하여 다단 축류압축기 해석을 수행하였다.

2. 성능해석 기법

2.1 해석 모델

전산해석에 사용된 대상 모델은 입구 안내익(IGV)이 있는 항공기용 3단 천음속 고압 축류압축기이다[9]. 이 압축기는 정익과 동익이 각각 3단으로 이루어져 있으며, 그 앞에 입구 안내익이 적용되어 있다. Fig. 1은 입구 안내익을 가진 축류 압축기의 3차원 형상을 나타낸 것이다. Table 1에는 대상 압축기의 각 단별 블레이드 수 및 익단 간극의 크기를 나타내었다.

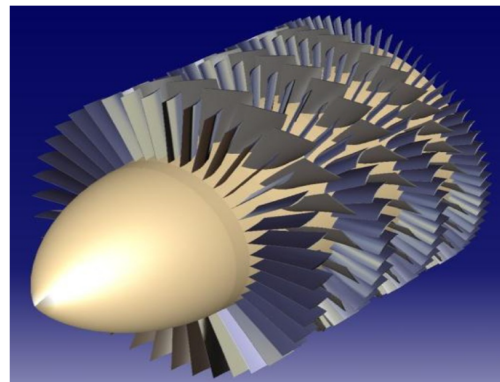


Fig. 1 A 3-Dimensional View of the Axial Compressor with Inlet Guide Vane

Table 1. Specifications of the Compressor

No. of Blades	IGV	41
	1 st Rotor	23
	1 st Stator	47
	2 nd Rotor	29
	2 nd Stator	60
	3 rd Rotor	37
Rotor Tip Clearance	3 rd Stator	74
	1 st Rotor	0.5 mm
	2 nd Rotor	0.45 mm
	3 rd Rotor	0.4 mm

Table 2. Inlet Conditions

Total Pressure	Total Temperature	Flow Direction
101325 Pa	288.15 K	Normal to Boundary

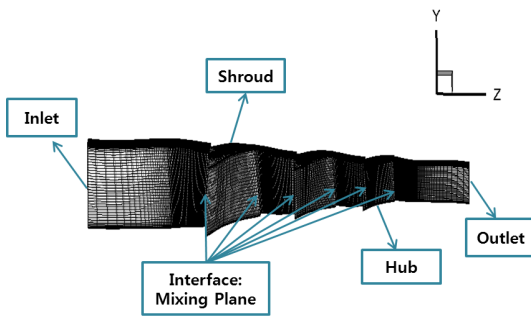


Fig. 2 Boundary Conditions for Computation

2.2 경계조건 및 전산해석기법

Figure 2는 해석 대상 압축기의 단일 유로 (Single Passage)에 대한 격자계와 경계조건을 간략하게 나타낸 것이다. 동익과 정익 사이의 경계면(Interface)은 정상상태 해석을 위해 혼합면 (Mixing-plane) 기법을 사용하였다. 전체 유로에서 각각의 도메인이 주기적으로 반복되는 영역에는 회전 주기조건(Rotational Periodic)을 적용하였으며, 벽에서는 점착 조건(Noslip Condition)을 적용하였다. 혼합면 기법은 일반적으로 널리 쓰이는 경계면 처리 방법이며 동익과 정익의 갯수가 달라도 쉽게 적용할 수 있다는 장점이 있다. 동익과 정익 간에 일어나는 정보교환은 원주 방향으로의 면적평균을 통해 이루어지며, 이 과정에서 엔트로피의 증가를 수반하나 그 크기는 무시할 만하다. 그리고 입구경계는 코드 길이의 약 3배 만큼 IGV 상류에, 출구경계는 코드 길이의 약 3.5배 만큼 정익의 하류에 위치시켰다.

Table 2에는 유동 해석에 사용된 입구 조건을 나타내었다. 입구 경계조건으로는 전압력, 전온도, 속도방향을 주었고 출구는 정압력을 주고 계산을 수행하였다.

블레이드 주위에는 O형 격자를 사용하였으며 나머지 계산 영역은 H형 격자를 사용하였다. 해석에 사용된 총 계산 격자수는 약 1.2×10^6 개이고 벽으로부터 무차원화 된 첫 번째 격자점의 거리는 $y^+ \approx 1$ 부근에 위치하도록 하였다.

전산해석은 3차원 유동해석 프로그램인 FLUENT™ 6.3 Parallel을 사용하였다. 난류 모델은 1-방정식 모델인 Spalart-Allmaras 모델[10]을 사용하였다. Spalart-Allmaras 모델은 상대적으로 계산 용량이 작은 1-방정식 모델이며, 비교적 천이 현상의 영향이 작은 유동이나 천음속, 초음속 영역을 갖는 익형, 벽면에서의 경계층이 중요한 유동에 많이 쓰이고 있다.

해석 방법은 지배 방정식에 관해 미지수를 동시에 푸는 밀도 기반(Density-based) 압축성 해석법을 적용하였다. 그리고 이상기체 법칙 (Ideal-gas Law)을 적용하였고 관련 물성치들의 값은 표준 대기 상태에 근거해 온도 구간에 따라 선형적으로 보간된 함수를 사용하였다. 시간 전진은 내재적(Implicit) 시간적분 기법으로 처리하였고 대류항의 공간 이산화에 있어서는 Roe's FDS(Flux Difference Splitting)를 이용하여 비점성 플럭스를 계산하였으며 2차 정확도의 풍상 차분법을 사용하였다. 전산 해석은 인텔 코어 i7 병렬 프로세서를 사용하여 8개의 Node로 계산하였으며, 반복 횟수 30000번을 기준으로 계산 점 하나당 약 하루에서 이틀이 소요되었다.

2.3 단 축적법

계산에 사용된 단 축적법은 압축기 탈설계 성능예측 방법 중 하나로 각 단의 성능을 계산하

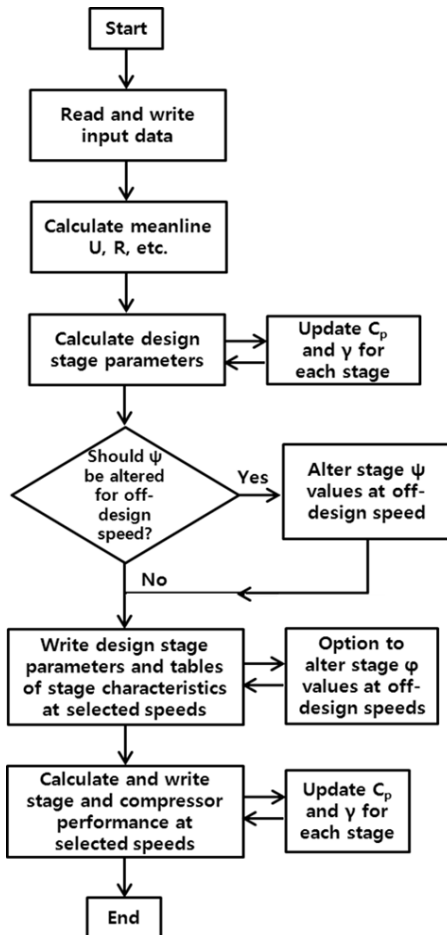


Fig. 3 Stage-Stacking Method Calculation Procedure

여 측 방향으로 축적하게 되며 이 때 해석 대상의 단 별 입·출구 압력과 유량을 순차적으로 풀기 때문에 각 단의 성능곡선을 필요로 한다. 단 성능곡선은 Muir 등[11]에 의해 실험적으로 제시되어 있다. Fig. 3은 단축적법에 의한 계산 과정을 순서도로 간략하게 나타낸 것이다.

2.3.1 전산해석 결과를 활용한 단 축적법

단 축적법을 이용한 압축기 탈설계 성능예측 시 요구되는 정보는 압축기 형상 뿐 아니라 설계점에서의 단 별 압력비와 효율 등의 성능 데이터이다. 그러나 이러한 값들은 대부분 공개되어 있지 않기 때문에 다양한 방법을 통해 추정된 값을 사용한다. 본 연구에서는 이러한 설계점

에서의 단 별 압력비와 효율 값으로 3차원 전산 해석을 통해 구한 값들을 전산해석 결과를 이용한 단 축적법(Original STGSTK Method)에 활용하였다.

2.3.2 스케일 된 단 축적법

스케일 된 단 축적법(Scaled STGSTK Method)은 설계점에서의 단 별 압력비와 효율은 모르지만 압축기 전체 단의 압력비와 효율에 대한 성능 데이터가 있는 경우 사용될 수 있는 방법이다. 기존의 단 축적법(Original STGSTK Method)과 다른 점은 설계점에서의 단 별 압력비와 효율을 도출할 때 전산해석 결과에서 얻은 값을 바로 사용하는 대신 전산해석 결과에서 얻은 압력비와 유량 조건이 이미 알고 있는 전체 단의 압력비 및 유량 조건과 같아지도록 단 별 압력비와 효율을 스케일(Scaled)한 값을 사용하는 점이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 설계점 해석

단 축적법에 필요한 성능 데이터를 구하기 위해 먼저 대상 압축기의 설계조건에서 3차원 전산해석을 수행하였다. 단 축적법에서 요구되는 조건은 Table 3에 나타나 있는 바와 같이 단 별 압력비 및 효율, 전체 입·출구 전압력, 전체 입·출구 전온도, 질량 유량 등이 있다. 기본 단 축적법에서는 Table 3에서 보는 바와 같은 설계점에서의 전산해석 결과를 사용한다. 그리고 스케일 된 단 축적법에서는 전체 성능이 최대 효율점에서의 성능시험 결과와 같도록 단 별 압력비 및 효율을 보정한 후 사용한다. 그러므로 스케일 된 단 축적법에서 사용하는 유량과 압력비는 최대 효율점에서 성능시험 데이터의 유량 및 압력비와 같은 값이 된다.

3.2 고정 입구 안내익을 가진 압축기의 성능예측

먼저 입구 안내익이 고정된 형상에 대해 3차원 전산해석과 단 축적법(Original STGSTK Method)

Table 3. Comparison of Input Data

Original STGSTK			Scaled STGSTK		
Stage	1 st	1.367	Stage	1 st	1.395
Pressure	2 nd	1.374	Pressure	2 nd	1.402
Ratio	3 rd	1.350	Ratio	3 rd	1.377
Stage	1 st	83.45	Stage	1 st	84.20
Efficiency (%)	2 nd	85.16	Efficiency (%)	2 nd	86.29
	3 rd	85.68		3 rd	87.60
Inlet Total Temperature (K)	288.15		Inlet Total Temperature (K)	288.15	
Outlet Total Temperature (K)	393.56		Outlet Total Temperature (K)	399.62	
Inlet Total Pressure (Pa)	101325		Inlet Total Pressure (Pa)	101325	
Outlet Total Pressure (Pa)	253397.28		Outlet Total Pressure (Pa)	273070.87	
Mass Flow Rate (kg/s)	9.83		Mass Flow Rate (kg/s)	9.99	
Performance Test Data					
Total Pressure Ratio			2.695		
Total Isentropic Efficiency (%)			84.6		
Mass Flow Rate (kg/s)			9.99		

을 사용하여 성능 예측을 수행하였다. 압축기의 회전속도는 설계 회전수인 20,000 RPM의 70%~100% 속도에 대해 해석을 수행하였다. 기본 형상에서 입구 안내익의 출구 각도는 설계 조건에서 약 17°이다. Fig. 4는 유량 대 압력비 곡선을 나타낸 것이다. 이 그림에서 보면 전산해석 결과는 전반적으로 성능시험 결과와 유사한 경향을 보이지만 유량은 전산해석 결과가 성능시험 결과보다 약간 낮게 예측하고 있다. 그리고 단축적법 결과는 설계 조건인 100% RPM의 압력비 2.5 부근에서 전산해석 결과와 유사한 결과를 나타낸다. 그러나 단축적법은 설계 조건보다 높은 압력비에서는 유량이 더 작은 값을 보이는 반면 낮은 압력비에서는 더 큰 값을 보인다. 다시 말하면 대체로 낮은 압력비에서는 단축적법이, 높은 압력비에서는 전산해석 기법이 성능시험 데이터에 더 가까운 결과를 보이고 있으며 전반적으로 두 방법은 유사한 정확도를 가진다고 볼 수 있다.

Figure 5는 입구 안내익이 고정된 형상에 대한 유량 대 효율 곡선을 나타낸 것인데, 전반적으로

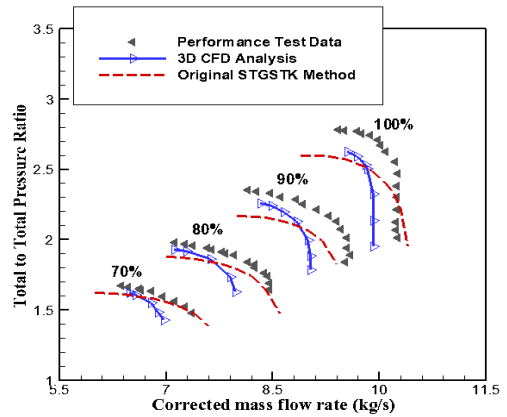


Fig. 4 Pressure Ratio vs Mass Flow Rate Characteristics of a Compressor with Fixed IGW

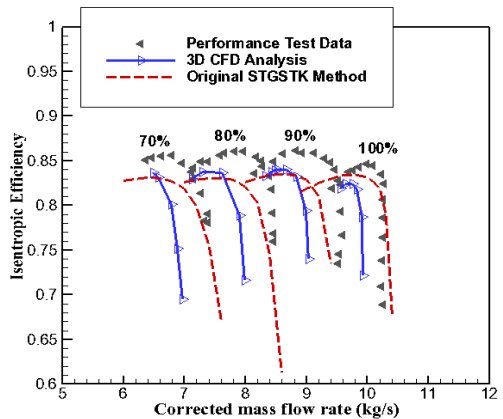


Fig. 5 Efficiency vs Mass Flow Rate Characteristics of a Compressor with Fixed IGW

전산해석 기법과 단 축적법 모두 성능시험 결과보다 효율을 약간 낮게 예측하지만 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 최고 효율점의 위치를 보면 단 축적법이 성능시험 데이터에 보다 근사한 값을 제시하고 있다. 회전수에 따른 유량의 감소폭은 비슷한 경향을 나타내었는데 회전 속도가 Full Speed인 100%에서 순차적으로 낮아지면서 두 방법 모두 유량의 감소량이 유사한 것으로 나타났고 최대 효율점의 절대값은 대체로 비슷한 결과를 보이고 있다.

그리고 Fig. 6과 Fig. 7은 스케일 된 단 축적법

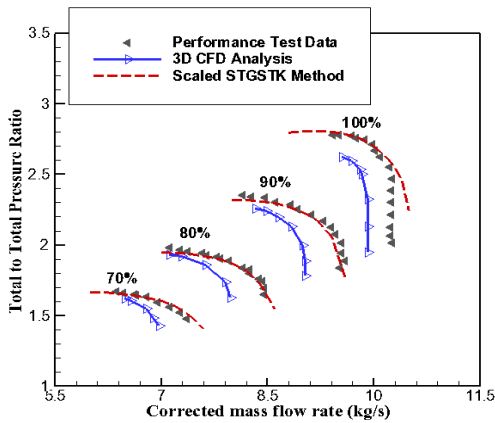


Fig. 6 Pressure Ratio vs Mass Flow Rate Characteristics of a Compressor with Fixed IGV

(Scaled STGSTK Method)을 적용하여 생성된 압축기 성능 특성을 나타낸 것이다. Fig. 6은 유량 대 압력비 곡선을 나타낸 것인데, 이 그림에서 보면 전체 구간에서 스케일 된 단 축적법을 이용한 결과가 성능시험 결과와 보다 더 잘 일치하는 것을 확인할 수가 있다. Fig. 4와 비교했을 때 70%~90% 속도에서 상당히 개선된 결과를 보여주고 있고 100% 속도에서는 낮은 압력비 영역에서 유량을 약간 크게 예측하지만 서지 영역을 포함한 높은 압력비에서 성능시험 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

Figure 7은 유량 대 효율 곡선을 나타낸 것인데, 100% 속도를 살펴보면 전체적인 경향은 성능시험 데이터보다 약간 더 바깥쪽으로 퍼진 U자 형태를 띄고 있다. 그러나 설계점 부근에서 효율의 절대값을 확인해 보면 스케일 된 단 축적법의 결과가 성능시험 데이터의 결과와 잘 일치하고 있다. 그리고 70%~90% 속도에서는 스케일 된 단 축적법의 효율이 성능시험 결과보다 약간 낮게 예측되지만 최고 효율 지점의 위치와 전반적인 효율 값의 경향을 볼 때, 스케일 되지 않은 경우의 결과보다 좀 더 향상된 결과를 보이고 있다.

3.3 가변 입구 안내익 적용시 압축기의 성능예측

본 절에서는 압축기의 가변 특성을 확인하기

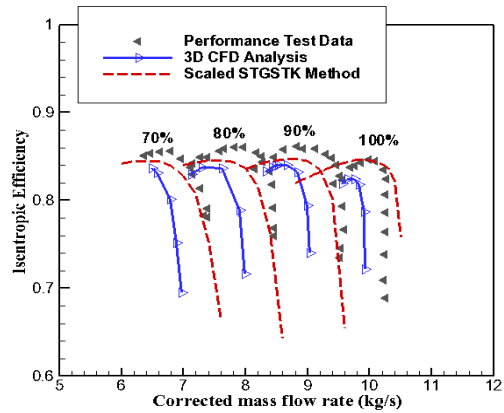


Fig. 7 Efficiency vs Mass Flow Rate Characteristics of a Compressor with Fixed IGV

위해 입구 안내익의 각도가 기본 형상에서 $+5^\circ$ 가변된 조건에 대해 성능 예측을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 8과 9에 가변하지 않았을 때의 결과와 비교하여 나타내었다. 그 중 Fig. 8은 유량 대 압력비 곡선을 나타내고 있는데, 축 방향에서 (+) 방향으로 입구 안내익의 각도가 증가하게 되면 유입되는 유량이 감소하면서 입사각이 작아지게 된다. 그러므로 작동선은 가변하지 않았을 때에 비해 왼쪽으로 이동하는 경향을 보인다. 70%~100% 속도에서 최대 압력비 또한 약간 아래쪽으로 이동하면서 작동 영역의 범위가 변하는 것을 확인할 수 있다.

Figure 9는 같은 조건에서 유량 대 효율 곡선을 나타낸다. 가변하지 않았을 때와 마찬가지로 가변을 하였을 때에도 전체 속도에서 성능 곡선의 경향성은 비슷한 것을 볼 수 있다. 가변되었을 때의 유량의 감소폭은 같은 속도 곡선에서 비교했을 때 전산해석 결과와 유사한 것을 알 수 있다. 그리고 가변을 한 경우 전체적인 성능은 큰 변화가 없고 최고 효율점의 위치만 오른쪽에서 왼쪽으로 이동한다. 즉 $+5^\circ$ 가변된 조건에서는 유량이 작은 경우에 효율을 증가시킬 수 있다는 것을 말하고 있다.

Figure 10과 11은 입구 안내익을 $+5^\circ$ 가변하였을 때의 결과를 각 해석 방법 간에 비교한 것이다. Fig. 10은 유량에 따른 압력의 특성을 나타

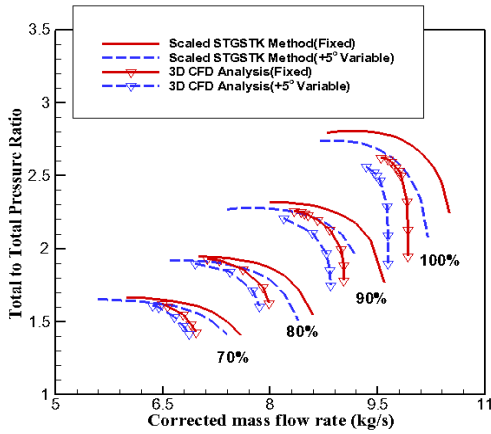


Fig. 8 Pressure Ratio vs Mass Flow Rate Characteristics of a Compressor with Variable IGV

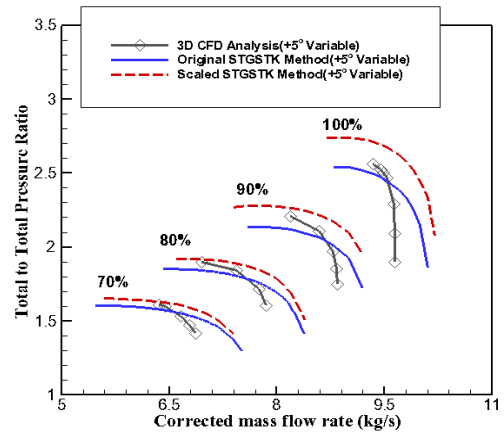


Fig. 10 Pressure Ratio vs Mass Flow Rate Characteristics of a Compressor with Variable IGV

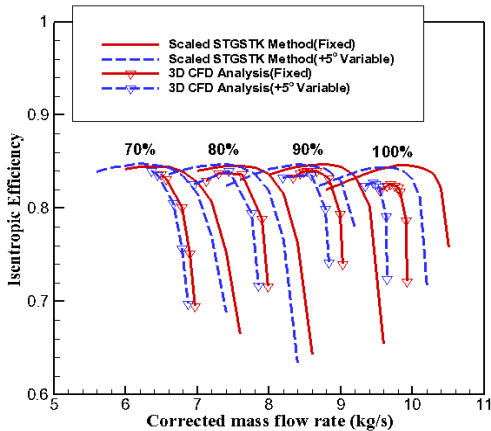


Fig. 9 Efficiency vs Mass Flow Rate Characteristics of a Compressor with Variable IGV

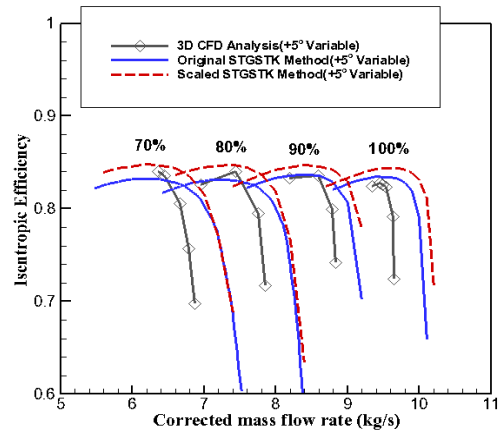


Fig. 11 Efficiency vs Mass Flow Rate Characteristics of a Compressor with Variable IGV

낸 것인데, 70%~100% 속도에서 모두 스케일 된 단 축적법이 전체 구간에서 가장 큰 압력비를 보이고 있다. 그리고 Fig. 11은 유량에 따른 효율 특성을 나타내고 있는데, 그림에서 볼 수 있듯이 가변되었을 때 최고 효율점의 위치는 기존의 전산해석을 연계한 단축적법과 스케일 된 단축적법 모두 비슷하게 예측하고 있다. 그러나 고정 입구 안내익의 경우와 마찬가지로 스케일 된 방식이 효율을 가장 높게 예측함을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 가변 입구 안내익이 있는 다단 축류압축기의 탈설계 성능예측을 위해 3차원 전산해석과 그 결과를 이용한 단 축적법, 그리고 스케일 된 단 축적법의 세 가지 해석 기법을 적용하여 그 특성을 비교하였다. 탈설계점 해석은 고정된 입구 안내익과 가변 입구 안내익 적용시 로 나누어 두 가지 조건에서 성능 예측을 하였

다. 세 가지 방법 모두 탈설계점과 가변 입구 안 내의 적용시의 성능 예측에 적합하다는 것을 알 수 있었다. 그리고 설계점에서의 전산해석 결과와 성능시험 데이터를 활용한 스케일 된 단 축적법이 편리하면서도 비교적 성능을 잘 예측하는 것으로 나타났다.

후 기

본 논문은 국방과학연구소의 지원으로 수행된 연구결과의 일부임(ADD-11-01-05-13)

참 고 문 헌

1. Kong C. D., Ki J. Y., and Kang M. C., "A New Scaling Method for Component Maps of Gas Turbine using System Identification," ASME J. of Eng. for Gas turbines and Power, Vol. 125, No. 4, 2003, pp.979-985
2. Bohne A., Niehuis R., "Experimental off-design investigation of unsteady secondary flow phenomena in a three-stage axial compressor at 68% nominal speed", ASME GT2004-53100, 2004
3. Uchida H., Kashimoto A., Iwakiri Y., "Development of wide flow range compressor with variable inlet guide vane," R&D Review of Toyota CRDL, Vol. 41, No. 3, 2006, pp.9-14
4. 이종준, 김동섭, "가스터빈 성능해석 프로그램의 개발 및 적용," 유체기계 연구개발 발표회 논문집, 2009, pp.190-191
5. 김병남, 정명균, "간단한 손실모델을 이용한 단단 축류압축기 탈설계점 성능예측", 대한기계학회 논문집, 제18권, 제12호, 1994, pp.3357-3368
6. Yamagami M., Kodama H., Kato D., Tsuchiya N., Horiguchi Y., Kazawa J., "CFD Modeling effects on unsteady multistage simulation for a transonic axial compressor," ASME GT2011-46198, 2011
7. Barbosa J. R., Santos Silva F. J., Tomita J. T., Brighenti C., "Influence of variable geometry transients on gas turbine performance," ASME GT2011-46565, 2011
8. Steinke R. J., "A computer code for predicting multistage axial flow compressor performance by a meanline stage stacking method," NASA-TP-2020, 1982
9. 한국항공우주연구원, "차세대 소형/고부하 압축기 다분야 통합 기술 개발(Highly loaded axial compressor MDO development program)," KATRA08_A00133_기4, 2010
10. Spalart, P. R., Allmaras, S. R., "A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamics Flows," AIAA Paper 92-0439, 1992
11. Muir D. E., Saravanamuttoo H. I. H., Marshall D. J., "Health Monitoring of Variable Geometry Gas Turbines for the Canadian Navy," ASME J. of Eng. for Gas turbines and Power, Vol. 111, No. 2, 1989, pp.244-250