

발전용 대형 가스터빈 축류압축기 설계 특성 분석

이성룡^{**} · 송재욱^{*} · 김수용^{*}

Analysis of Axial Compressor Design Characteristics in Large Class Gas Turbine for Power Generation

Sungryong Lee^{**}, Jaewook Song^{*}, Sooyong Kim^{*}

Key Words : Axial compressor(축류압축기), Reaction(반동도), Diffusion factor(확산계수), Gasturbine(가스터빈)

ABSTRACT

Currently axial flow compressor is used primarily in a large power generation gas turbine. In this paper, the main factors to be considered when designing a axial flow compressor were compared to those of a small power generation gas turbine(DGT-5). The main design parameters was examined in the aspect ratio, solidity, as well as reaction, diffusion factor, incidence angle, etc. The results in case of a small compressor are showed a regular pattern but there were not found any specific design patterns for a large class compressor.

1. 서 론

인간이 일상 생활을 하는 데 있어 현대 사회에서 반드시 필요한 전기는 여러 가지 방법으로 생산이 되고 있다. 이 가운데 최근 일본 후쿠시마 원전 사고로 인해 원자력 발전에 대한 기피현상이 늘어나고 있으며 천연가스를 이용한 가스터빈 발전이 대안으로 부상중이다. 이러한 가스터빈 발전은 지속적인 관련 기술의 발전으로 인해 점차 대형화 되고 있으며 최근에는 일본의 MHI에서 터빈입구온도가 1600℃인 대형 가스터빈을 개발하기에 이르렀다. 발전용 대형 가스터빈의 주요 구성품 가운데 하나인 압축기는 대용량에 요구되는 높은 유량으로 인해 주로 축류압축기가 적용되고 있다. 그러나, 그동안 국내에서 발표된 압축기 관련 여러 논문중에 발전용 가스터빈에 사용되는 대형 축류압축기의 공력설계에 대해서는 다루이지 않았다.

본 논문에서는 현재 사용되고 있는 발전용 대형 가스터빈 축류압축기중 하나의 형상을 근거로 압축기 설계시 고려하는 주요 인자들의 특성을 파악하고 발전용 소형 축류 압축기의 동일한 설계 인자들과 비교함으로써 발전용 대형 가스터빈 축류압축기의 설계 특성에 대해 파악해 보고자 한다.

2. 본 론

2.1 압축기 제원

본 논문에서 검토한 압축기는 두산중공업에서 개발한 발전용 소형 가스터빈 압축기(이하 DGT-5)와 현재 운전중에 있는 발전용 대형 가스터빈 압축기중 하나의 모델에 대해 비교하였다. DGT-5는 축류압축기와 원심압축기가 결합된 Mixed type 압축기이나 여기서는 이 중 축류압축기에 대해서만 상호 비교를 하였다. 두 압축기에 대한 기본적인 사항은 Table 1에 나타내었다.

2.2 유동해석

본 논문에서 검토한 대형 발전용 가스터빈 압축기에 대해서는 운전 결과 입수가 용이하지 않아 공력 특성을 파악하기 위해서 확보한 형상 데이터를 이용하여 유동해석을 수행함으로써 주요 공력 데이터를 확인하였다. 유동해석은 터보 기

Table 1 Design specifications of two compressor

DGT-5		Large class	
Mass flow(kg/s)	21.3	Mass flow(kg/s)	440.9
Stage number	10	Stage number	19
Pressure ratio	9.0	Pressure ratio)	14.0

* 두산중공업(주)

† 교신저자, E-mail : sungryong.lee@doosan.com



Fig. 1 Large class 19-stage compressor

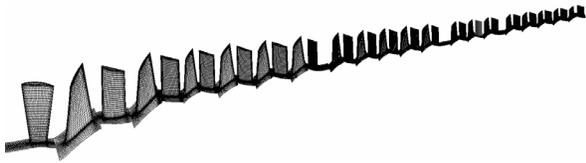


Fig. 2 CFD mesh of large class compressor

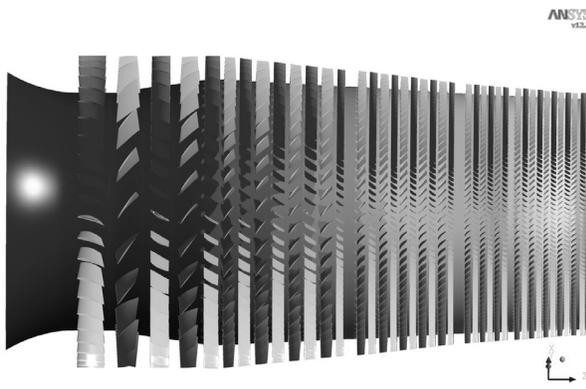


Fig. 3 Computed static pressure distribution at mid span for all stages

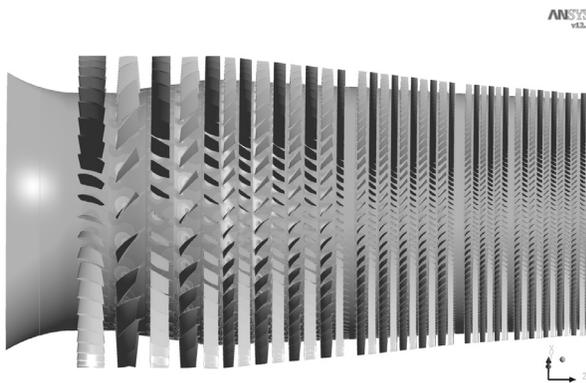


Fig. 4 Computed mach number distributions at mid span for all stages

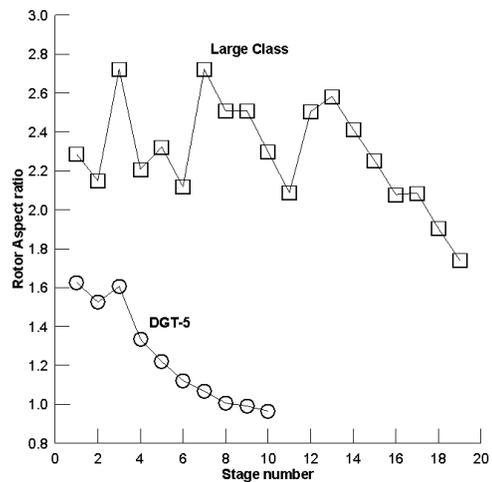
기 해석에 주로 사용되는 Ansys CFX를 이용하였다. 해석은 전체 압축기 형상중 주유로(Main stream)에 대해서만 모델링을 통해 격자를 생성하였고 모든 익렬에 대해 계산을 수행할 경우 많은 Resource와 계산 시간이 소요됨에 따라 계산 영역은 각 익렬마다 1개의 날개면만을 해석 대상으로 선정하였고 계산시 사용된 난류 모델은 기존 DGT-5 개발시 시험결과와 유동해석 결과와의 매칭을 통해 상대적으로 나은 결과를 보인 BSL 모델을 적용하였다. 또한, 설계점을 비롯한

여러 운전점에 대해서 해석을 수행하여 운전 특성을 확인하였다. Fig. 1은 해석에 사용된 대형 압축기의 자오면 형상을 보여주고 있다. 그림에서 보이듯이 대상 압축기는 1~3 단은 Tip constant, 4단 이후로는 Hub constant 형상을 하고 있다. 또한, Fig. 3과 4는 해석을 통해 나타난 여러 결과중 대표적으로 Span 방향으로 0.5 위치에서 각 단의 정압분포와 마하수 분포를 나타내고 있다.

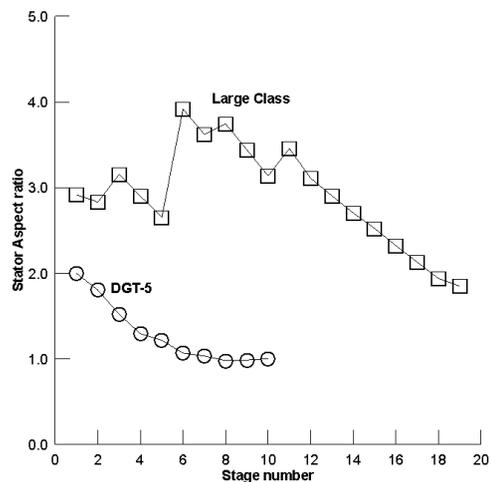
3. 결과 및 고찰

소형 축류압축기와 대형 축류압축기에 대해 형상측면에서의 주요 설계 인자와 유동해석을 통해 얻은 공력 데이터를 이용하여 도출한 설계 인자에 대해 Fig. 5에서부터 11에 나타내었다.

Aspect ratio는 식 (1)과 같이 계산이 되며 두 모델에 대한 Aspect ratio에 대해 Fig. 5에 도시하였다.



(a) Rotor



(b) Stator

Fig. 5 Comparison of large class GT and DGT-5 for aspect ratio

$$Aspectratio(AR) = \frac{blade\ height(h)}{chordlength(c)} \quad (1)$$

Aspect ratio의 경우 보통 4.0 이상은 High aspect ratio라 하며 그 값이 2.0 이하인 경우를 Low aspect ratio라 한다. Aspect ratio의 경우 값이 큰 경우에는 상대적으로 블레이드의 크기가 작아지며 무게도 감소하는 반면에 성능 측면에서는 Low aspect ratio에 비해 떨어지는 경향을 나타내었다.

Fig. 5에 나타난 결과를 보면 대형 압축기의 경우 동익과 정익 값이 대부분 2.0~4.0 범위 내에서 존재하고 있으며 DGT-5의 경우 2.0 이하의 Low aspect ratio의 값을 갖고 있음을 알 수 있으며 앞 단에서부터 후단으로 갈수록 그 값이 작아지는 경향을 나타내고 있다.

그러나 본 논문에서 검토한 대형 압축기의 경우 중간단 이후는 DGT-5와 비슷한 경향을 나타내고 있으나 앞 단에는 그림에서 알 수 있듯이 뚜렷한 경향을 나타내지 않고 있다.

Fig. 6은 Solidity에 대해 DGT-5와 대형압축기와 비교한

결과이다. 대형에 비해 소형의 경우가 동익과 정익 모두 앞 단에서의 Solidity의 값이 높은 것을 알 수 있다.

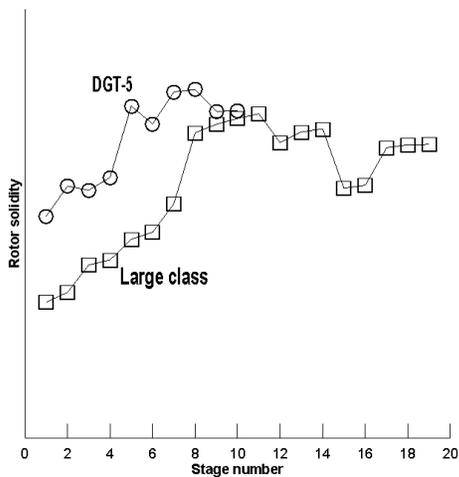
또한, 소형의 경우 값이 후단으로 갈수록 증가하다 감소하는 경향을 보였으나 대형인 경우는 후단으로 갈수록 앞단에 비해 증가를 하였으나 뚜렷한 경향을 보이지는 않았다.

Fig. 7은 확산계수(Diffusion ratio)를 비교한 것이다. 확산계수는 압축기의 설계 특성을 나타내는 주요 인자중 하나이다.

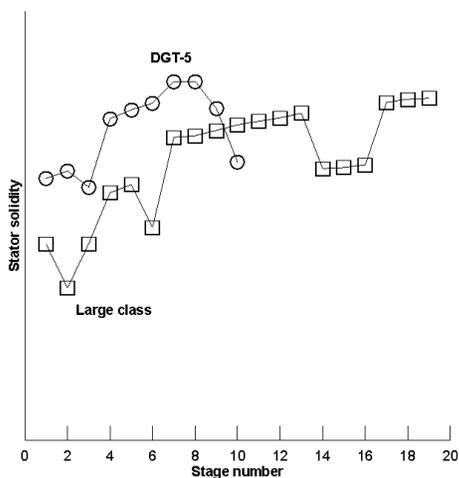
$$DF = 1 - \frac{V_2}{V_1} + \frac{\Delta W}{2\sigma V_1} \quad (2)$$

본 논문에서는 식 (2)의 Lieblein의 확산계수 정의를 이용하여 계산하였다.

그림에서 보이듯이 앞 단에는 설계점과 Off design point 모두 거의 동일한 값을 갖고 있으나 후단으로 갈수록 그 차이가 점점 커지는 것을 알 수 있다. 또한, 확산계수 값 자체

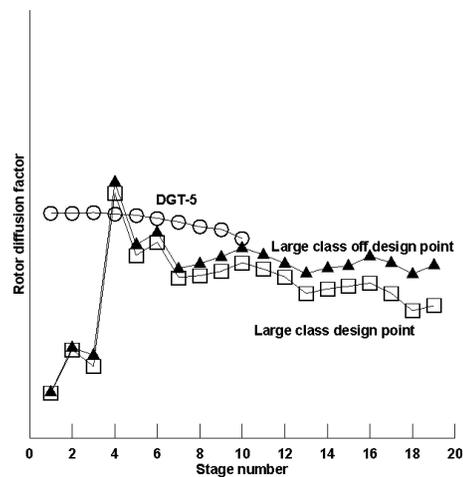


(a) Rotor

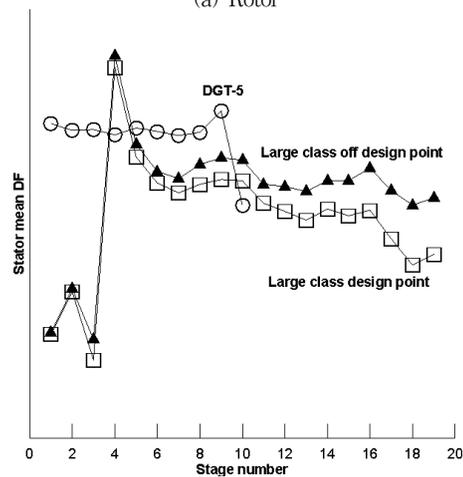


(b) Stator

Fig. 6 Comparison of large class design solidity with DGT-5



(a) Rotor



(b) Stator

Fig. 7 Comparison of large class design and off design point diffusion factors with DGT-5

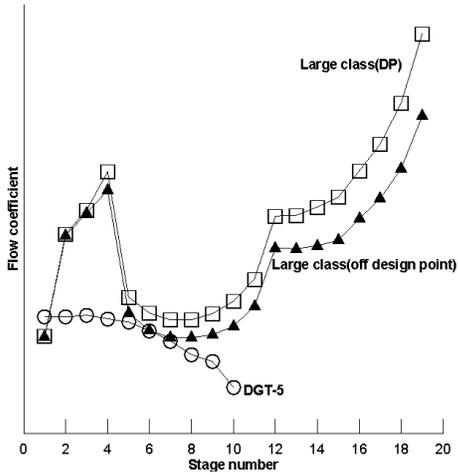


Fig. 8 Comparison of large class flow coefficient distribution with DGT-5

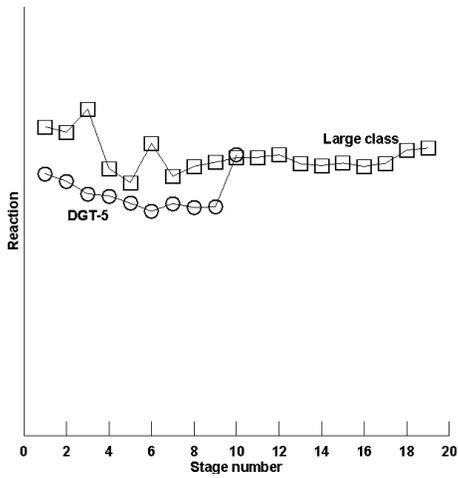


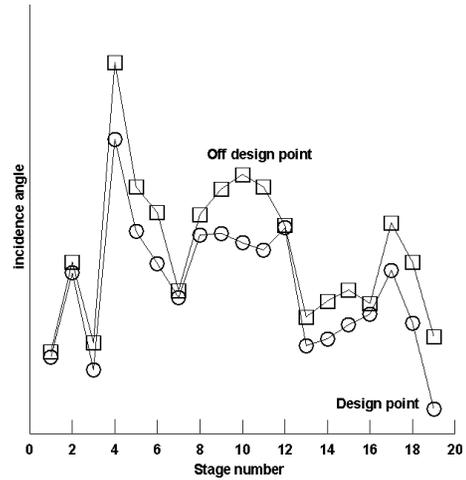
Fig. 9 Compare reaction of large class and DGT-5

도 Off design point 에서 설계점보다 더 큰 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

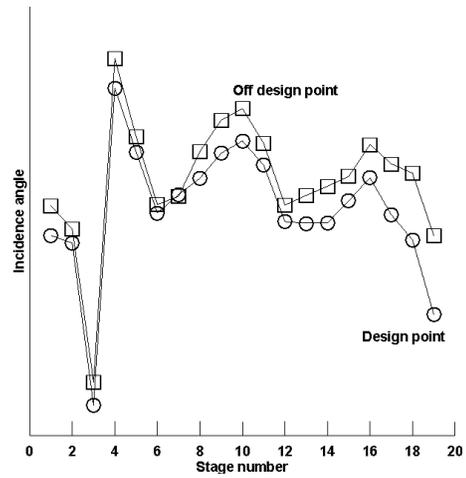
Fig. 8은 DGT-5와 대형 압축기의 각 단에서의 유량 계수의 분포를 나타낸 것이다. DGT-5의 경우 앞 단과 끝 단의 경우 상대적으로 낮은 값을 나타내는 양상을 보였다.

그러나 대형 압축기의 경우 앞단에는 유량계수가 증가하다가 중간단에서는 일정한 값을 유지하는 양상을 보여주었으며 마지막 단으로 갈수록 증가하는 양상을 나타내었다. 이러한 양상은 설계점뿐만 아니라 Off design point 에서도 같은 분포를 나타내었다. 소형의 경우와 달리 대형의 경우 유량계수에 있어서 일관성이 있는 양상을 보여주지 않았다.

Fig. 9는 반응도(Reaction)에 대해 검토한 것이다. 반응도는 식 (3)에서처럼 한 단(stage)의 엔탈피 변화량에 대한 동익에서의 엔탈피 변화량에 대한 비율로서 부하 배분의 적절성을 알 수 있다.



(a) rotor



(b) Stator

Fig. 10 Comparison for incidence angle distributions design point and off design point

$$Reaction(R) = \frac{(h_2 - h_1)}{(h_3 - h_1)} \quad (3)$$

Fig. 9에서 2가지 경우 모두 일정 수준에서의 반응도를 전체 단에 대해 유지하고 있음을 보여주었다. DGT-5의 경우 후단으로 갈수록 반응도 값이 줄어드는 경향을 보여주었고 대형의 경우 앞단을 제외한 중간단 이후로는 비슷한 값을 유지하였다.

Fig. 10은 대형 압축기의 동익과 정익에서 설계점과 Off design point 에서 각 단을 따라 진행된 Incidence angle의 분포를 나타내고 있다.

Fig. 10(a), (b) 모두 설계점에 비해 Off design point 인 경우가 상대적으로 높은 Incidence angle 값을 갖는 것을 알 수 있다.

일반적으로 설계점에서 스톨(Stall)점까지 확산계수의 조건을 만족하며 성능을 최대화하기 위해 동익의 Incidence

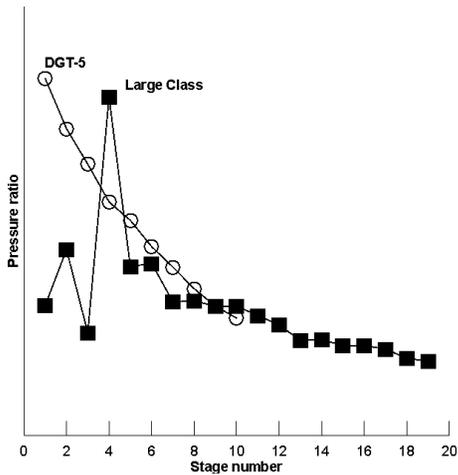


Fig. 11 Comparison of large class design stage pressure ratio distribution with DGT-5

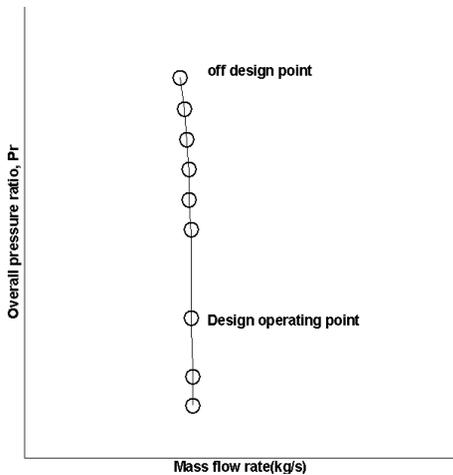


Fig. 12 Flow characteristics at 100 percent design speed pressure ratio

angle은 0도를 적용하며 정의의 Incidence angle은 후단쪽에는 (-) 값을 갖도록 한다. DGT-5의 경우에도 Incidence angle은 설계점에서 0도가 되게 설계되었다.

Fig. 11은 설계점에서 각 단의 압력비를 나타낸 것이다. DGT-5의 경우 일정한 양상을 가지며 후단으로 갈수록 각 단의 압력비가 낮아지는 것을 보여주고 있다. 그러나, 대형 압축기의 경우 4단까지 압력비가 증가하다가 5단 이후로 DGT-5의 경우와 마찬가지로 각 단에서의 압력비가 낮아지는 경향을 나타내었다.

Fig. 12는 대상 대형 축류압축기의 100% 회전 속도에서 유량대 압력비의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보이듯이 일반적인 축류압축기의 양상인 설계점과 Off design point와의 유량 차이가 크지 않음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고유량, 고압이 요구되는 발전용 대형 가스 터빈 엔진에 널리 사용되고 있는 축류압축기 중 한 모델에 대해 두산중공업에서 개발한 소형 발전용 가스터빈 축류압축기와 형상 및 주요 공력 설계 인자에 대한 비교 분석을 하였다. 검토는 주요 공력 인자에 대해 설계점에서 뿐만 아니라 Off design point 에 대해서도 분석을 함으로써 엔진의 작동점이 설계점에서 Off design point 로 옮겨갈 경우 주요 공력 인자의 경향에 대해서도 확인을 하였다. 본 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) Aspect ratio, Solidity 등 형상에 대해서 소형과 달리 대형 압축기의 경우 상대적으로 고유량이 요구됨으로 Aspect ratio의 값이 소형보다 큰 값을 갖는 것으로 판단되며 출구쪽으로 갈수록 블레이드 높이가 감소함에 따라 값은 떨어지는 경향을 나타내었다. 그러나, Solidity의 경우 본 검토 대상 모델의 경우 소형 압축기에 비해 단 수가 상대적으로 많으나 단 당 압력비는 낮아 소형 압축기보다 작은 값을 나타내는 것으로 보인다.
- 2) 공력 측면에서는 소형 압축기와 대형 압축기는 주요 인자에 대한 경향이 일치하는 부분이 거의 없었으며 특히 각 단에서의 유량 계수에 대한 분포같은 경우는 확연한 차이를 보여주어 소형 압축기와 대형 압축기의 설계개념이 다르다는 것을 알 수 있었다. 다만, 각 단 압력비 분포에서 출구쪽으로 갈수록 단 당 압력비가 낮아지는 경향이나 중간단에서의 확산계수가 일정한 수준을 유지하고 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부에서 시행한 “전력산업융합원천기술 개발” 사업의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Cumpsty, N. A., 1989, “Compressor Aerodynamics,” Longman Scientific & Technical.
- (2) 박기철, 김승우, 김재철, 1995, “가스터빈 엔진용 고효율 축류압축기의 공력설계 및 시험평가,” 한국항공우주학회지, 제23권 제5호, pp. 161~170.
- (3) Alexander, W. and Ulrich O., Dirk F., Markus B., 2011. “Computational and Experimental Analysis of an Industrial Gas Turbine Compressor,” Proceedings of ASME Turbo Expo 2011, GT2011-46336.
- (4) Sehra A., Bettner J. and Cohn A., 1992, “Design of a High-Performance Axial Compressor for Utility Gas

- Turbine,” Journal of Turbomachinery, Vol. 114 pp. 277~286.
- (5) Koch C.C, 1981, “Stalling Pressure Rise Capability of Axial Flow Compressor Stages,” Journal of Engineering for Power, Vol. 103, pp. 645~656.
- (6) Wennerstrom A. J., 1989, “Low Aspect Ratio Axial Flow Compressors: Why and What It Means,” Journal of Turbomachinery Vol. 111 pp. 357~365.