

저속영역으로의 압축기 특성맵 확장기법 연구

전용민* · 임병준* · 이동호* · 최종수**

Study on the Expansion Technique of Compressor Characteristic Map to Sub-Idle range

Yongmin Jun* · ByungJun Lim* · DongHo Rhee* · JongSu Choi**

ABSTRACT

Reliable starting capability of a gas turbine engine calls the engine industry's attention recently. So far the gas turbine engine performance researches have focused on the range between idle to Max rpm, but recent attention on the starting has brought interests in the range of "Sub-idle". As component characteristic maps are essential for the starting research, various kinds of studies have been doing and proposing ways to expand the existing maps toward sub-idle range. In this paper, previous studies were discussed and a new method suggested and validated.

초 록

최근 가스터빈엔진의 신뢰성 높은 시동 능력을 확보하기 위한 시동성능 개발이 가스터빈 산업의 주요 이슈로 부각되고 있다. 통상 엔진 성능향상 연구는 아이들에서 최대 회전수 사이 영역에서 수행되어 왔으나, 이러한 개발요구에 따라 엔진 정지상태에서 아이들까지 영역에 대한 탈설계 연구가 활발히 진행 중이다. 아이들 이하영역에서의 엔진 구성품 특성 파악은 이러한 시동연구의 기초가 되나 일반적인 구성품 단위시험은 여러 이유로 이 영역에 관심을 기울이지 못하였다. 압축기의 경우 일반적인 맵을 아이들 이하영역으로 확장하는 다양한 해석적 연구가 시도되고 있다. 본 연구는 지금까지 제안된 압축기맵 확장기법을 분석하고, 새로운 확장기법을 제안하여 그 결과를 시험결과와 비교/검증하였다.

Key Words: Gas Turbine Engine(가스터빈엔진), Compressor Map(압축기 맵), Map Expansion(맵 확장), Engine Start(엔진 시동), Sub-Idle(서브 아이들)

1. 서 론

최근 대형 산업용 엔진의 안정적인 시동 능력

* 정회원, 한국항공우주연구원

** 정회원, 충남대학교 항공우주공학과
연락처, E-mail: ymjun@kari.re.kr

과 항공용 엔진의 신뢰성 높은 공중 재시동 능력이 중요시 되고 있다. 시동 또는 재시동을 연구하기 위한 엔진 성능해석 및 모델링은 일반적으로 아이들(idle)에서 최대 회전수 사이의 영역에서 수행되어 왔으나 이러한 기술요구에 따라 엔진 정지상태에서 아이들까지의 탈설계 연구도

활발히 진행 중이다.

아이들 이하영역에서의 엔진 구성품 특성 파악은 시동연구에 기초가 되나 정상상태 운전을 고려한 통상의 구성품 특성맵은 설계점 대비 50% rpm 이하 영역에 대해서는 데이터를 산출하지 않는다. 압축기의 경우, 아이들 이하영역의 특성을 확보하기 위해 별도의 리그시험을 수행할 수도 있으나 비용적인 문제로 기존 맵을 다양한 해석적인 방법으로 확장한다.

본 논문에서는 기 확보된 압축기 특성맵을 수학적 기법을 사용하여 서브 아이들 영역까지 확장하는 기존 연구결과를 분석하고 이를 바탕으로 새로운 특성맵 확장방법을 제안하고 이를 압축기 리그시험결과와 비교 평가하였다.

2. 압축기 특성맵 확장기법

2.1 압축기 확장기법의 주요인자

압축성 효과

터보기계의 유량관계를 마하수 유사성을 이용해 표현하면 Eq. 1~3과 같이 정의할 수 있다.

$$\phi = \frac{Mn_{axial}}{Mn_{tangential}} \quad (1)$$

$$Mn_{axial} = \frac{Cx}{\sqrt{\gamma RT}} \quad (2)$$

$$Mn_{tangential} = \frac{U}{\sqrt{\gamma RT}} \quad (3)$$

본 연구를 시작하게 만든 중요 인자 Cx는 축방향 속도성분으로 엔진제작사는 엔진의 압축기/터빈 리그시험을 통해 유사한 Cx 값을 알고 있거나 다양한 개발경험을 통한 경험식을 사용한다. Cx 진값(True value)를 알면 Eq. 2의 정의에 따라 압축성 효과를 포함한 유량계수를 알 수 있으나 다양한 운전조건에 대한 Cx를 모두 측정하여 Cx의 진값을 아는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 엔진제작사일지라도 마하수 정의에 따른 유량계수를 모든 운전조건에 대해 구하는 것은 불가능하다. 게다가 일반 연구자들이나 엔진개발에 보조적인 역할만 한 개발자의 경우 압축기나 터빈의 세부데이터를 알 수 없기 때문에 앞으로 전개하려는 맵 확장 기법이 필요하다.

손실

엔진구성품의 손실은 공력손실과 기계적 손실로 나누고 공력손실은 annulus loss, profile loss, secondary loss 등 3가지로 나눌 수 있으며 기계적 손실은 마찰손실과 윤활손실로 나눌 수 있다. 압축기의 경우 기계적 손실에 비해 공력손실이 지배적이다. 시동은 과도(transient)상태로 손실인자들을 개별적으로 모델링하는 것은 거의 불가능하기 때문에 기존의 시험결과나 모델을 이용할 것을 제안한다.

2.2 다양한 특성맵 확장기법 분석

R.K.Agrawal & M.Yunis [1]

아이들 회전수 이하 영역을 모델링한 초기연구로서 특성맵 확장을 위해 다음과 같은 식을 사용하였다. 유량, 일 및 효율 등을 corrected rpm의 함수로 나타내고 경험상수를 추가하여 정확도를 향상시켰다.

$$\frac{m\sqrt{\theta}/\delta}{(m\sqrt{\theta}/\delta)_R} = \frac{\phi}{\phi_R} \left[\frac{N/\sqrt{\theta}}{(N/\sqrt{\theta})_R} \right] = K_{\phi} \left[\frac{N/\sqrt{\theta}}{(N/\sqrt{\theta})_R} \right]$$

$$\frac{\Delta h_{c/\theta}}{(\Delta h_{c/\theta})_R} = K_{\psi_c} \left[\frac{N/\sqrt{\theta}}{(N/\sqrt{\theta})_R} \right]^2 \cdot \frac{(\eta_c)}{(\eta_c)_R} = K_{\eta_c} \left[\frac{N/\sqrt{\theta}}{(N/\sqrt{\theta})_R} \right] \quad (4)$$

A.K.Owen,A.Daugherty,D.Garrard & R.D.Wright[2]

압축기 특성맵을 유량계수(flow coefficient: Φ), 일계수(work coefficient: Ψ)로 표현하고 곡선을 polynomial curve fitting하였다.

Claus Riegler, Michael Bauer, Joachim Kurzke[3]

Mach number Similarity를 이용하여 blade rotational Mach no와 flow Mach no를 축으로 압축기 맵을 표시하였다. 압축기맵을 확장하는 기계적인 기법을 적용하기 보다는 제안된 절차에 따라 경험있는 엔지니어가 수동으로 특성맵을 확장하는 기법을 제안했다.

J.H.Kim, T.W.Song, T.S.Kim, S.T.Ro[4]

다단 압축기를 전방, 중앙, 후방으로 나누고 각 위치에서 대표적인 압축기 특성맵을 stacking 하는 modified stage stacking method을 제안하

였다. 저속 영역에서의 압축기 특성맵은 거의 유사하다는 연구결과와 다단 압축기맵을 구간으로 나누어 stacking 할 수 있다는 연구결과를 종합하여 전체 압축기의 특성맵을 구하였다.

Sexton, W.R[5]

Sub-idle영역으로 압축기 특성맵을 확장하기 위해 아래와 같은 식을 제안했다. 통상 사용하던 보정회전수를 다시 무차원화한 %N이라는 변수를 사용하여 외삽하는 기법이다.

$$\frac{m\sqrt{\theta}/\delta}{(m\sqrt{\theta}/\delta)_R} = \left[\frac{\%N}{\%N_R} \right]^p, \quad \frac{Tq/\delta}{(Tq/\delta)_R} = \left[\frac{\%N}{\%N_R} \right]^q, \quad \frac{W_C}{C_p T_i} = \left(\frac{W_C}{C_p T_i} \right)_R \left(\frac{\%N}{\%N_R} \right)^r$$

$$\left(\%N = \frac{N/\sqrt{\theta}}{N_{M as}/\sqrt{\theta}} \right) \quad (5)$$

Shaun, R.Gaudet & J.E.Donald Gauthier[6]

Sexton이 제안한 방식에 지수를 아래와 같이 변수로 제안하였다.

$$\frac{m\sqrt{\theta}/\delta}{(m\sqrt{\theta}/\delta)_R} = \left[\frac{\%N}{\%N_R} \right]^p, \quad \frac{Tq/\delta}{(Tq/\delta)_R} = \left[\frac{\%N}{\%N_R} \right]^q, \quad \frac{W_C}{C_p T_i} = \left(\frac{W_C}{C_p T_i} \right)_R \left(\frac{\%N}{\%N_R} \right)^r$$

$$\left(\%N = \frac{N/\sqrt{\theta}}{N_{M as}/\sqrt{\theta}} \right) \quad (6)$$

2.3 확장방법 비교분석

이상과 같이 압축기 특성맵을 확장하는 기법은 크게 3가지로 구별할 수 있는데, (1)유량, 압축비, 효율 등을 보정회전수(Nc)의 함수로 나타내는 방법, (2)유량계수(Φ), 일계수(Ψ)을 활용하는 방법, (3)기타 등이다.

Agrawal, Chappel과 Sexton 등은 (1)번 방식을 사용하되 보다 정확한 맵확장을 위해 경험상수나 압축기 2차원 설계기법 및 무차원화하는 기법을 추가하였다. 유량, 압축비, 효율 등을 회전수의 함수로 표시하는 것은 설계점 근처에서만 정확도가 높기 때문에 sub-idle영역으로 확장하는 것과 같은 탈설계영역에 적용하기 위해서는 이를 보완할 수 있는 기법이 필요하다.

Owen등은 (2)번 방식을 사용하여 특성맵을 확장하였으나 정지상태 근처에서 효율의 불연속성으로 인한 제한이 있다.

대표적인 (3)번 방법으로 Kurzke가 사용한 방법은 비교적 부족한 실험데이터를 엔지니어의 경험으로 상쇄할 수 있는 장점이 있는 반면 반복성이 보장되지 않는 단점이 있다.

Kim등이 제안한 stage stacking방식은 각 단별 특성(inter-stage air extraction 등)을 반영할 수 있어 모델링의 정확도를 크게 향상시킬 수 있는 장점이 있으나 반대로 단별 특성정보와 같은 많은 정보가 필요하다.

설계 초기단계에 가스터빈엔진의 시동특성을 파악하면서 sub-idle영역까지 성능해석을 하기 위해서는 압축성 효과를 반영한 회전수의 함수로 유량, 압축비, 효율 등을 구하는 것이 가장 적절하다고 판단된다.

3. 새로운 구성품 확장방법 제안

3.1 개요

본 논문에서는 비압축성 유동의 유량, 압축비, 효율의 관계를 정의한 Pump scaling law(PSL)을 바탕으로 압축성 효과와 유량계수, 일계수의 관계를 함께 고려한 Modified pump scaling(MPS) 방법을 제안하였다. 유량계수와 일계수는 설계점을 기준으로 정규화(normalization)하였다.

3.2 유량

PSL은 유량관계를 다음과 같이 정의하였다.

$$\Phi_2 = \Phi_1 \left(\Phi = \frac{Q}{ND^3} \right) \quad (7)$$

동일압축기가 다른 회전수로 운전될 경우의 유량은 Eq. 8과 같이 결정된다.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \quad (8)$$

그러나 Eq. 8은 비압축성 유체를 기준으로 개발되었기 때문에 본 논문에서는 압축성 효과를 포함할 수 있도록 Eq. 9을 제안하였다.

$$\frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \mathcal{F} = \text{fn} \left(\frac{Mn_{\text{tangential}_2}}{Mn_{\text{tangential}_1}} \right) \quad (9)$$

압축성 효과를 포함하며 보정회전수를 변수로 갖는 함수 \mathcal{F} 를 Eq. 11와 같이 제안하였다.

$$\frac{Mn_{\text{tangential}_2}}{Mn_{\text{tangential}_1}} = \frac{\left(\frac{D}{\sqrt{\gamma R}} \cdot \frac{N}{\sqrt{T}}\right)_2}{\left(\frac{D}{\sqrt{\gamma R}} \cdot \frac{N}{\sqrt{T}}\right)_1} = \sqrt{\frac{(\gamma R)_2}{(\gamma R)_1}} \cdot \frac{\left(\frac{N}{\sqrt{T}}\right)_2}{\left(\frac{N}{\sqrt{T}}\right)_1}$$

$$\approx \frac{N_{c,2}}{N_{c,1}}, \left(N_c = \frac{N}{\sqrt{T/T_{\text{ref}}}} \right) \quad (10)$$

$$F = fm \left(\frac{N_{c,2}}{N_{c,1}} \right) = m \left(\frac{N_{c,2}}{N_{c,1}} \right)^{n-1} \quad (11)$$

Equation 9에 Eq. 7과 Eq. 11를 대입하면

$$\frac{\phi_2}{\phi_1} = F \rightarrow \frac{Wa_{c,2} \cdot N_{c,1}}{Wa_{c,1} \cdot N_{c,2}} = m \left(\frac{N_{c,2}}{N_{c,1}} \right)^{n-1} \quad (12)$$

$$Wa_{c,2} = Wa_{c,1} \cdot m \left(\frac{N_{c,2}}{N_{c,1}} \right)^n \quad (13)$$

위 Eq. 13에서 $N_{c,2} = N_{c,1}$ 일 경우, $\phi_2 = \phi_1$ 이어야 하므로 $m=1$ 이 된다. 결과적으로 유량관계식은 Eq. 14와 Eq. 15 같이 정리할 수 있다.

$$Wa_{c,2} = Wa_{c,1} \cdot \left(\frac{N_{c,2}}{N_{c,1}} \right)^n \quad (14)$$

$$n = \frac{\text{LN} \left(\frac{Wa_{c,2}}{Wa_{c,1}} \right)}{\text{LN} \left(\frac{N_{c,2}}{N_{c,1}} \right)} \quad (15)$$

회전수 i 의 유량곡선을 구하고자 할 때, $i+1$ 과 $i+2$ 의 데이터를 이용해 n 을 먼저 구한 뒤, 그 결과를 이용해 회전수 i 의 유량을 구할 수 있다.

회전수 곡선 상의 beta index를 이용하여 n 을 구하는 방법으로 두 가지 방식을 고려하여 그 차이점을 비교하였다.

(방법 1) 압축기 맵의 beta index별 지수 n 을 구하고 각 회전수 별 평균값을 구한다.

$$\bar{n} = \frac{1}{j} \sum_{k=0}^j \frac{\text{LN} \left(\frac{Wa_{c,i,k}}{Wa_{c,i+1,k}} \right)}{\text{LN} \left(\frac{N_{c,i,k}}{N_{c,i+1,k}} \right)} \quad (16)$$

$$Wa_{c,2} = Wa_{c,1} \cdot \left(\frac{N_{c,2}}{N_{c,1}} \right)^{\bar{n}} \quad (17)$$

여기서 i 는 회전수(rpm), j 는 beta line의 총 개수, k 는 beta line의 index number이다.

(방법 2) 동일한 beta index별 데이터를 사용

하여 지수 n 을 구하되 각 beta index별 지수 n_k 을 구했다. 이 방법은 $(m, PR, \eta) = \text{function}(\beta, N)$ 을 만족시키는 방법으로 beta index를 변수로 고려하는 것이 타당함을 볼 수 있다.

$$n_k = \frac{\text{LN} \left(\frac{Wa_{c,i,k}}{Wa_{c,i+1,k}} \right)}{\text{LN} \left(\frac{N_{c,i,k}}{N_{c,i+1,k}} \right)} \quad (18)$$

$$Wa_{c,2,k} = Wa_{c,1,k} \cdot \left(\frac{N_{c,2}}{N_{c,1}} \right)^{n_k} \quad (19)$$

두 가지 방법을 비교하기 위해서 [step1] Eq. 16, 18를 이용하여 $N_i=70\%$ 와 $N_{i+1}=80\%$ 에 대한 지수 n 을 구하고 [step2] Eq.17, 19에 지수 n 과 $N_i=70\%$ 데이터를 대입하여 $N_{i+1}=60\%$ 의 Wa_c 를 구한 뒤 [step3] $N_{i+1}=60\%$ 의 시험결과와 비교하여 그 오차를 비교하였다.

Figure 1은 $N_{i+1}=60\%$ 와 70% 에서의 유량을 MPS(방법 1, 방법 2)와 PSL방법('Trad')으로 예측하고 그 결과를 리그시험결과와 비교한 오차의 분포를 나타내고 있다.

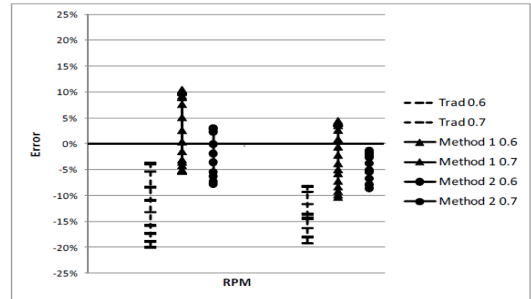


Fig. 1 Comparing Error Distributions

3가지 방법 중 (방법 2)의 오차가 가장 작은 것을 확인할 수 있어서 향후 유량 계산은 MPS의 (방법 2)를 적용하였다.

3.3 압력비

PSL에서 압력비를 구하기 위해 사용하는 일계수도 비압축성 유체에서 개발되어 압축성 효과를 포함하지 않기 때문에 압축성 효과를 포함할 수 있도록 관계식을 다음과 같이 제안하였다.

PI이론 해석에 따르면 압축비를 유도할 수 있

는 일계수는 유량의 함수로 압축성 특성이 포함된 MPS 유량계수를 사용하여 Eq. 20와 같이 나타낼 수 있다.

$$\psi = \sum_{i=0}^j a_i \phi^i \quad (20)$$

$$\psi/\psi_{\text{ref}} = \sum_{i=0}^j a_i (\phi/\phi_{\text{ref}})^i \quad (21)$$

j는 다항식의 차수(degree of polynomial)로 압축기의 형태에 따라 달라질 수 있으며 본 논문의 대상인 K-APU용 압축기(최대 유량 2kg/s, 최대 압축비 4)에 대해서는 j=2를 제안하였다.

$$\psi/\psi_{\text{ref}} = a_0 + a_1(\phi/\phi_{\text{ref}}) + a_2(\phi/\phi_{\text{ref}})^2 \quad (22)$$

Equation 21을 전개한 Eq. 22에서 유동이 흐르지 않으면 일도 없으므로 $\phi/\phi_{\text{ref}} = 0$ 이면 $\psi/\psi_{\text{ref}} = 0$ 이어서 $a_0=0$ 이 된다.

일계수와 유량계수 관계식과 엔탈피 정리를 이용하여 정리하면 Eq. 23을 구할 수 있다. 계수 a_1 과 a_2 는 리그시힘데이터가 있는 회전수 2개로부터 각각 구할 수 있다.

$$\frac{C_p(PR^{k-1/k-1})}{C_{p\text{ref}}(PR_{\text{ref}}^{k-1/k-1})} = a_1 \cdot \left(\frac{W_a}{W_{a\text{ref}}} \cdot \frac{N}{N_{\text{ref}}} \right) + a_2 \cdot \left(\frac{W_a}{W_{a\text{ref}}} \right)^2 \quad (23)$$

Figure 2는 PSL와 MPS방법에 따른 압력비 예측에 대한 오차 분포도이다.

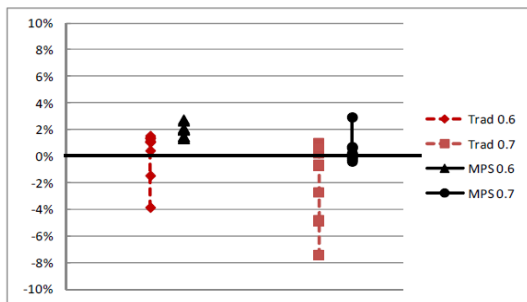


Fig. 2 Comparing Error Distributions

3.4 효율

압축기의 효율은 간단히 구성품 작동에 필요한 이상적인(ideal) 동력 대비 실제(actual) 투입된 동력으로 정의될 수 있다. PI이론 해석에 따라 효율도 유량의 함수이므로 유량계수와 효율의 관계식도 정규화된 다항식을 사용하였다.

$$\eta/\eta_{\text{ref}} = \sum_{i=0}^j b_i (\phi/\phi_{\text{ref}})^i \quad (24)$$

$$\eta/\eta_{\text{ref}} = b_0 + b_1(\phi/\phi_{\text{ref}}) + b_2(\phi/\phi_{\text{ref}})^2 \quad (25)$$

효율도 압축비와 동일하게 다항식 차수(j)는 2를 사용하였다. 단, 효율의 경우 유동이 0인 경우 정의할 수 없기 때문에 $b_0 \neq 0$ 이다. Eq. 25에 유량계수 정의를 대입하면 Eq. 26을 얻을 수 있으며 미지의 계수 b_0, b_1, b_2 는 리그시힘데이터가 있는 회전수 3개로부터 각각 구할 수 있다.

$$\eta/\eta_{\text{ref}} = b_0 + b_1 \cdot \left(\frac{W_a}{W_{a\text{ref}}} \right) \left(\frac{N_{\text{ref}}}{N} \right) + b_2 \cdot \left(\left(\frac{W_a}{W_{a\text{ref}}} \right) \left(\frac{N_{\text{ref}}}{N} \right) \right)^2 \quad (26)$$

Figure 3은 PSL와 MPS방법으로 예측한 효율의 오차 분포도이다.

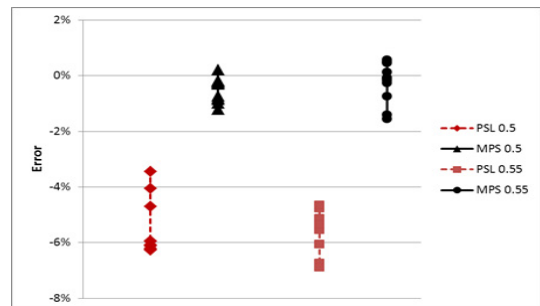


Fig. 3 Comparing Error Distribution

4. 결론

4.1 MPS 방법 비교

본 논문에서 새로 제안한 압축기맵 확장방법인 MPS방법과 기존의 PSL방법을 리그시힘결과가 있는 회전수 데이터와 비교한 결과, Fig. 1~3에서와 같이 유량 오차는 PSL 최대 20% 대비 MPS 10% 이내이고 압력비 오차는 PSL 최대 8% 대비 MPS 3% 이내이며 효율 오차는 PSL 최대 7% 대비 MPS 2% 이내로 MPS방법이 더 정확하게 예측할 수 있음을 확인하였다.

4.2 확장된 압축기 맵

MPS방법을 이용하여 아이들 이상영역의 압축

기맵을 아이들 이하영역으로 확장하여 Fig. 4를 얻었다. 이렇게 확보한 확장 압축기맵은 향후 수행될 가스터빈엔진의 시동모델링에 사용될 것이며 이 연구를 통해 아이들 이하영역으로 확장된 압축기맵에 대한 검증이 완료될 수 있다.

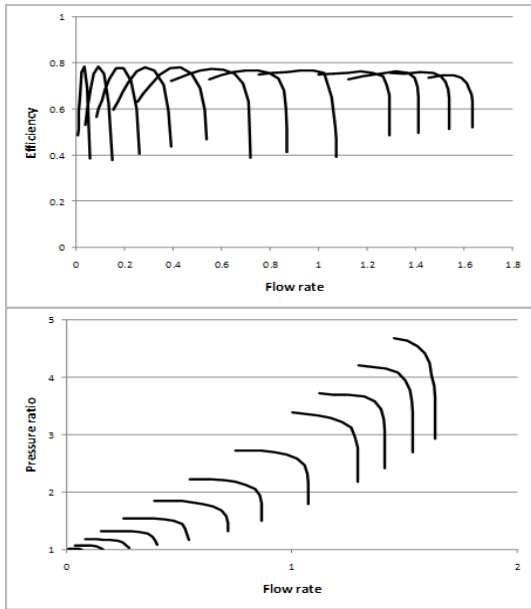


Fig. 4 Expanded Compressor Map

후 기

본 연구는 2010년도 한국항공우주연구원 항공우주기술시드사업의 일환으로 수행되었습니다

참 고 문 헌

1. Agrawal,R.K. and Yunis, M., "A Generalized Mathematical Model to Estimate Gas Turbine Starting Characteristics", Journal of Engineering for Power,v.104,1982,pp194-201
2. Owen,A.K, Daugherty,A, Garrard,D, Reynolds, H.C and Wright,R.D., "A Parametric Starting Study of an Axial Centrifugal Gas Turbine Engine Using a One - Dimensional Dynamic Engine Model and Comparisons to Experimental Results: Part I", J. of Engineering for Gas Turbine and Power, v.121, 1999, pp377-393
3. Claus Riegler, Michael Bauer, Joachim Kurzke, "Some Aspects of Modelling Compressor Behavior in Gas Turbine Performance Calculations", Proceedings of ASME Turbo EXPO 2000, 2000-GT-574
4. J.H.Kim, T.W.Song, T.S.Kim, S.T.Ro, "Dynamic Simulation of Full Startup Procedure of Heavy-Duty Gas Turbines", J. of Engineering for Gas Turbine and Power, v.124, 2002, pp510-516
5. Sexton,W.R, "A Method to Control Turbofan Engine Starting by Varying Compressor Surge Valve Bleed", Virginia Polytech, Master of Science Thesis, 2001
6. Shaun R. Gaudet, J.E. Donald Gauthier, "A Simple Sub-idle Component Map Extrapolation Method", Proceedings of ASME Turbo EXPO 2007, GT2007-27193