

하이브리드 기법을 이용한 가스터빈 엔진의 압축기 성능선도 생성에 관한 연구

공창덕* · 고성희** · 기자영**

A Study on Compressor Map Generation of a Gas Turbine Engine Using Hybrid Intelligent Method

Changduk Kong* · Seonghee Kho** · Jayoung Ki**

ABSTRACT

A method for generating the compressor map from some performance measuring data using the hybrid intelligent technique was newly proposed. In order to improve accuracy of the traditional scaling method, a method to generate the compressor map using the GAs(Genetic Algorithms) was previously proposed, but the method has a drawback that it can not find correctly surge and choke points of the compressor map. However, the proposed hybrid intelligent method can determine obviously those points as well as improve the accuracy of the compressor map through complementarily using the GAs and the scaling method.

초 록

본 연구에서는 실험을 통하여 획득한 데이터로부터 유전 알고리즘(Genetic Algorithms)과 스케일링 기법(Scaling Method)을 이용한 하이브리드 기법(Hybrid Method)으로 압축기 성능선도를 생성하는 방법을 제안하였다. 기 수행한 연구에서 유전 알고리즘만 이용할 경우 압축기 성능선도 생성 시 서지점들과 초크점들을 예측하는데 불분명한 단점이 있어 기존의 구성품 성능선도 생성에 널리 사용하는 스케일링 기법을 보완적으로 이용하여 보다 정확한 압축기 성능선도를 생성하였다.

Key Words: Genetic Algorithms(유전 알고리즘), Hybrid Intelligent Method(하이브리드 기법), Scaling Method(스케일링 기법), Compressor Map Generation(압축기 성능선도 생성), Gas Turbine Engine(가스터빈 엔진)

1. 서 론

가스터빈 엔진의 성능모사를 위해서는 각 구성품의 성능은 구성품 성능선도를 따라야 하는

† 2006년 11월 6일 접수 ~ 2006년 12월 13일 심사완료

* 종신회원, 조선대학교 항공우주공학과

** 정회원, 이지가스터빈 R&D(주)

연락처, E-mail: habari@ezgtc.com

조건 때문에 구성품의 특성을 나타내는 성능선도가 매우 중요하다. 구성품 성능선도는 다양한 조건에서의 성능시험을 통해 얻는 것이 당연하나 실제 엔진의 구성품 성능선도는 엔진 제작사를 제외하고는 획득하기가 매우 어렵기 때문에 일반 구매자나 가스터빈 엔진의 성능을 연구하는 사람들은 일부 공개된 성능선도를 스케일링하여 이용하고 있다[1].

구성품의 성능을 효과적으로 표현하기 위한 많은 연구 결과가 제시되었는데 Kurzke 등은 많은 압축기 성능선도를 통계적으로 해석하고 각 성능선도에서 효율이 최고인 영역, 유량-속도의 관계, 속도 선도의 형상 등을 정의하여 새로운 성능선도를 구성하는 방법을 제시하였다[2]. 그러나 이 방법은 성능선도에 대한 방대한 자료가 요구됨으로 보유하고 있는 성능 데이터 자료가 적은 경우에는 이용하기 어려운 단점이 있다. 공창덕 등은 제작사에서 주어진 몇 가지 운용조건에서의 성능 데이터나 실험데이터를 이용하여 각 조건에서 주어진 성능을 만족하도록 스케일링 값을 구하고 그 값으로 다항식을 구성하여 새롭게 성능선도를 구성하는 방법을 제안하였고[3], 최근에는 유전 알고리즘을 이용하여 압축기 성능선도를 생성하는 방법을 새로이 제시한바 있으나 서지점들과 초크점들을 예측하지 못하는 단점이 있었다[4].

따라서 본 논문에서는 스케일링 기법을 보완적으로 이용하여 보다 정확한 압축기 성능선도를 구하고, 상용프로그램인 GASTURB로 성능해석을 수행하여 제안한 하이브리드 기법의 유용성을 검증하였다[5].

2. 연구대상 엔진

2.1 엔진 구성품

본 연구에 사용된 가스터빈 시험장치는 최대 출력 4kW 급의 소형 분리축 방식 터보축 엔진으로 가스 발생기(압축기, 연소기, 압축기 터빈), 동력 터빈, 부하장치, 시동계통, 점화계통, 윤활

계통, 계측장치, 안전장치 등으로 구성되어 있다 [6].

2.2 데이터 획득 장치

본 연구에 사용된 가스터빈 시험장치는 제어판(Control Panel)에서 직접 아날로그 데이터를 육안으로 관독하여 기록할 수도 있지만 정확한 데이터 획득을 위해 P9008 데이터 기록(Data Logging) 장치를 이용하여 센서로부터 아날로그 신호를 받아 컴퓨터에 장착된 PC26AT 아날로그/디지털 변환기(A/D Converter)를 거쳐 데이터를 저장하였다.

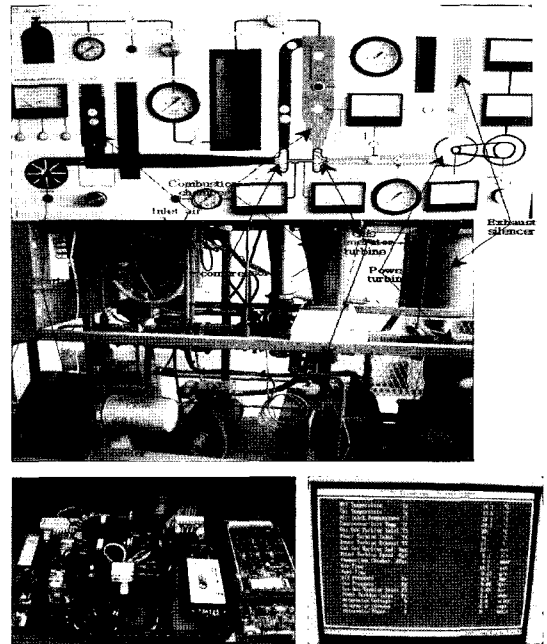


Fig. 1 Cusson Limited's Gas Turbine Test Unit and Measurement System

2.3 압축기, 압축기 터빈 및 동력 터빈 성능선도

본 연구의 정상상태 성능해석에 이용한 GASTURB에서는 설계점 성능해석 후 스케일링할 각 구성품의 성능선도를 지정하여 주면 프로그램 내부적으로 계산된 설계점에 따라 성능선도를 스케일링한다. 본 논문에서는 압축기의 경우 제작사에서 제공된 압축기 성능선도를 스캐

너를 사용하여 그림파일로 저장한 후 GASTURB의 Smooth-C를 이용하여 각 가스발생기 회전수의 데이터를 읽어 GASTURB에서 인식가능하도록 변환하였고, 이렇게 재구성한 압축기 성능선도를 Fig. 2에 나타내었다.

압축기 터빈 및 동력 터빈의 경우에는 제작사에서 제공된 성능선도가 없는 관계로 Fig. 3, 4와 같은 GASTURB에 내장된 radtur.map을 사용하였다.

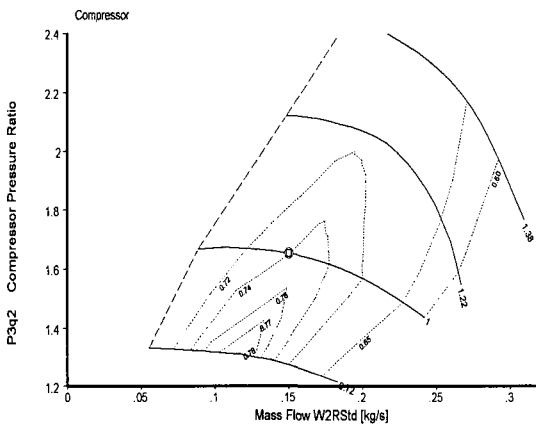


Fig. 2 Reproduced Compressor Map from the Manufacturer's Data Using the Smooth-C

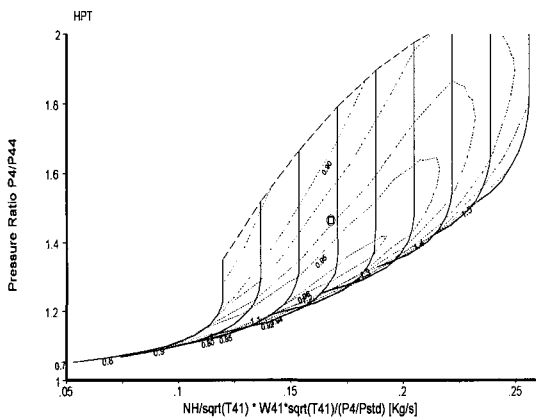


Fig. 3 Compressor Turbine Map - radtur.map of the GASTURB

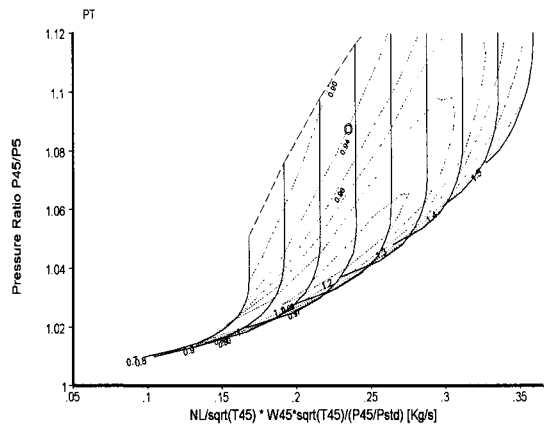


Fig. 4 Power Turbine Map - radtur.map of the GASTURB

3. 유전 알고리즘을 이용한 압축기 성능선도 생성

3.1 유전 알고리즘의 적용

압축기 성능선도는 성능 파라미터인 유량함수, 압력비, 효율로 구성되어 있으며 표준대기조건으로 보정된 실제 데이터로부터 계산할 수 있다. 압축기 성능선도의 가스발생기 회전속도(N), 압력비(PR), 유량함수(MFP), 효율(EFF)의 함수관계는 다음과 같이 정의할 수 있다.

먼저 유량함수는 압력비와 가스발생기 회전속도의 함수이며 Eq. 1과 같이 표현할 수 있다.

$$MFP_N = a \cdot PR^3 + b \cdot PR^2 + c \cdot PR + d \quad (1)$$

또한 효율은 유량함수와 가스발생기 회전속도의 함수로 Eq. 2와 같이 표현할 수 있다.

$$EFF_N = a' \cdot MFP^3 + b' \cdot MFP^2 + c' \cdot MFP + d' \quad (2)$$

여기에서, 가스발생기 회전속도는 65000, 70000, 75000, 80000, 85000, 90000 RPM의 6개가 선택되었다.

Equation 1과 2에서 미계수 a, b, c, d(또는 a', b', c', d') 값을 알면 가스발생기 회전속도에 따른 각각의 값을 구할 수 있고 구성품 성능선도를 생성할 수 있게 된다. 따라서 본 연구에서는

미계수 a, b, c, d (또는 a', b', c', d') 값을 구하기 위해 획득한 시험 데이터에 단순 유전 알고리즘을 적용하여 가스터빈의 구성품 중 성능해석 시 가장 큰 영향을 주는 압축기 성능선도를 생성하였다.

Figure 5는 본 연구에 사용된 단순 유전 알고리즘의 순서도를 보여주고 있다[7].

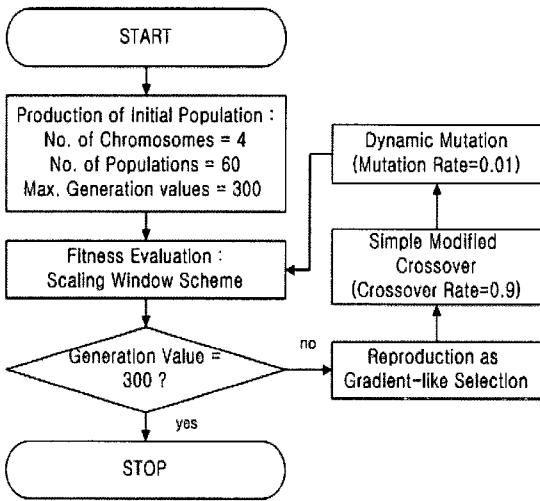


Fig. 5 Flowchart of Simple Genetic Algorithms

3.2 압축기 성능선도

유전 알고리즘으로 구한 각 가스발생기 회전속도의 미계수 a, b, c, d (또는 a', b', c', d')를 최소자승법에 의하여 n 차 다항식을 구하고 각 가스발생기 회전속도의 유량함수-압력비, 유량함수-효율 곡선으로 나타낸 후 상용 성능해석 프로그램인 GASTURB의 Smooth-C로 Fig. 6과 같은 압축기 성능선도를 생성하였다. 그러나 Fig. 6의 압축기 성능선도를 살펴보면 서지라인이 불분명하고 75000 RPM의 성능선도가 없는데 이는 75000 RPM의 미계수를 구할 때 사용한 실험데이터의 부족 때문인 것으로 사료된다. 따라서 실험데이터를 추가하고 제작사에서 제공된 Fig. 2의 서지점 값들을 스케일링하여 서지라인이 포함된 Fig. 7과 같은 압축기 성능선도를 새로이 생성하였다.

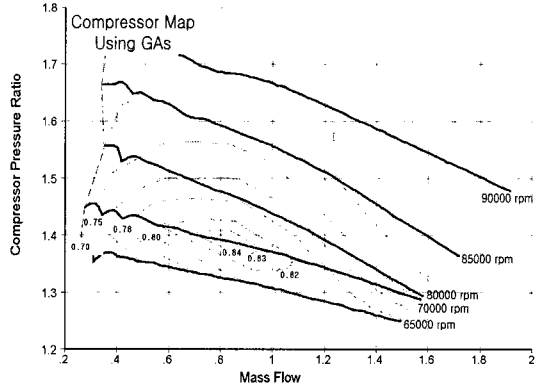


Fig. 6 Compressor Map Generated by GAs

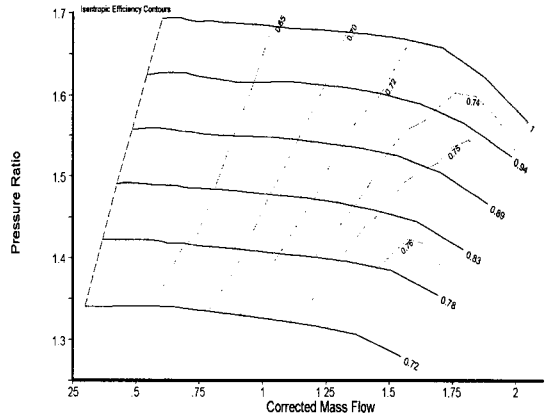


Fig. 7 Compressor Map Modified by Adding Surge Points from the Fig. 3

4. 하이브리드 기법의 유용성 검증

4.1 검증 실험데이터

본 연구의 검증을 위해 여러 번 실시한 실험데이터 중 하나의 경우를 검증데이터로 선정하였다. 선정된 실험데이터의 대기온도를 입력조건으로 하여 기존의 스케일링 기법과 유전 알고리즘으로 구한 압축기 성능선도를 사용하여 GASTURB로 성능해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다.

4.2 설계점 데이터로 스케일링한 구성품 성능선도를 이용한 정상상태 성능해석

기존의 스케일링 기법으로 스케일링한 압축기 성능선도 및 압축기터빈, 동력터빈 성능선도를 이용하여 상용 성능해석 프로그램인 GASTURB로 정상상태 성능해석을 하였다. 연구대상 엔진인 소형 터보축 가스터빈 엔진이 지상에서 운용되기 때문에 기본 대기 조건은 검증 실험데이터를 얻은 대기 온도인 23℃로 하였고, 압축기 회전수는 65000~90000 RPM 사이를 5000 RPM 간격으로 하였다. 해석 결과 Fig. 8~10의 scaled map과 같았다.

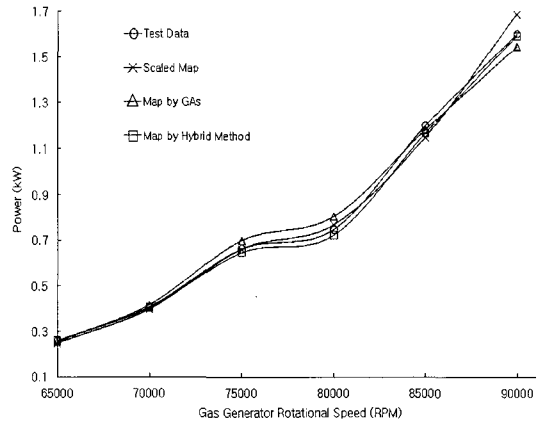


Fig. 8 Comparison of Power as to RPM

4.3 유전 알고리즘으로 생성한 구성품 성능선도를 이용한 정상상태 성능해석

유전 알고리즘으로 생성한 압축기 성능선도를 이용한 경우와 실험데이터를 추가하고 서지라인 예측에 기존의 스케일링 기법을 보완적으로 이용한 하이브리드 기법의 경우를 가지고 같은 조건에서 정상상태 성능해석을 하였다. 해석 결과 Fig. 8~10의 map by GAs와 map by hybrid method와 같았다.

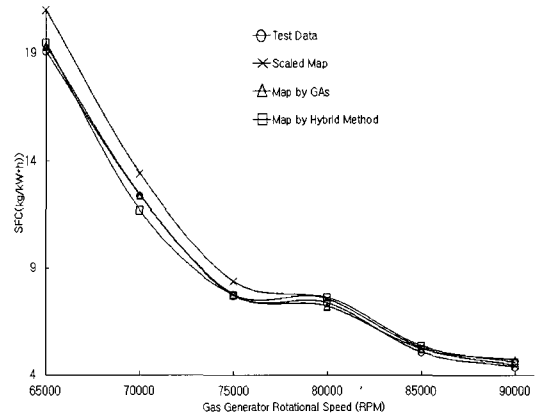


Fig. 9 Comparison of SFC as to RPM

4.4 비교 및 분석

선정된 검증 실험데이터와 세 가지 방법으로 얻은 압축기 성능선도를 이용한 성능해석 결과가 Fig. 8~10과 같았다. 그림에서 보듯이 하이브리드 기법의 해석 결과가 검증데이터와 거의 유사한 경향을 보였다.

제안한 기법의 유용성 검증을 위해 실험데이터와의 오차율을 Table 1에 나타내었다. 여기에서, S.M.은 Scaled map을 G.M.은 GAs map을 H.M.은 실험데이터를 추가하여 하이브리드 기법으로 생성한 map을 의미한다.

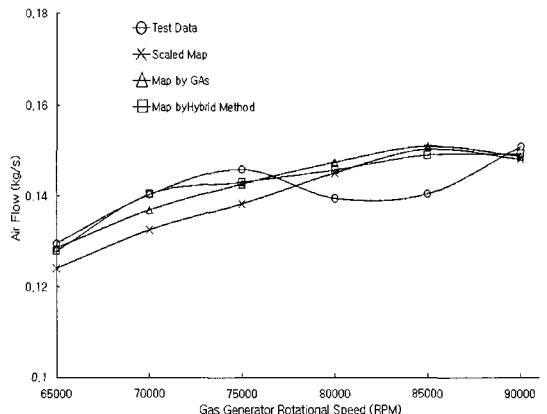


Fig. 10 Comparison of Air Flow as to RPM

Table 1. Relative Error for Scaled Method, GAS Method, and Hybrid Method to Experimental Data

RPM	Power (kW)			SFC ((kg/(kW*h)))			MA (kg/s)		
	S.M (%)	G.M (%)	H.M. (%)	S.M (%)	G.M (%)	H.M. (%)	S.M (%)	G.M (%)	H.M. (%)
65000	4.22	1.11	1.02	9.98	1.34	2.11	4.30	0.85	1.28
70000	2.47	2.51	0.29	8.33	0.28	5.50	5.55	2.45	0.09
75000	0.16	5.71	2.18	8.81	0.77	0.24	5.18	2.22	1.92
80000	2.68	7.61	3.19	2.70	2.00	3.51	3.96	5.63	4.42
85000	4.21	1.46	2.73	4.41	3.29	5.86	6.98	7.41	6.04
90000	5.44	3.45	0.51	1.98	7.65	4.99	1.79	1.37	1.06

성능해석 후 축마력, 비연료소모율, 공기유량을 각각 비교한 결과 기존의 스케일링 기법만을 이용하여 성능해석한 결과의 전체 평균오차가 3.2%, 6%, 4.2% 이고, 유전 알고리즘을 이용하여 성능해석한 결과의 전체 평균오차가 3.6%, 2.5%, 3.3% 이며, 실험데이터를 추가하고 하이브리드 기법을 이용하여 성능해석한 결과의 전체 평균오차가 1.6%, 3.7%, 2.4% 이다. 따라서 Fig. 8~10과 Table 1에서와 같이 대체적으로 유전 알고리즘을 이용한 방법이 기존의 스케일링 기법만을 이용한 방법에 비해 오차가 적음을 알 수 있고, 실험데이터를 추가하여 하이브리드 기법으로 생성한 압축기 성능선도를 이용한 성능해석 결과의 오차가 훨씬 적음을 알 수 있다. 특히 설계점에서 멀어지는 저 RPM에서의 오차율이 유전 알고리즘을 이용한 경우 훨씬 적게 나타나고 있으며, 비선형적인 엔진 성능 특성을 더 잘 추적하고 있다. 그러나 비연료소모율 비교 결과에서와 같이 실험데이터를 추가한 경우의 오차율이 다소 큰 경우도 있기 때문에 하이브리드 기법으로 생성된 압축기 성능선도와 실험데이터를 추가하기 전의 압축기 성능선도들 사이의 상호 보완적 이용으로 오차율을 줄여나가는 방안을 좀더 연구해야 할 것으로 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 실험을 통하여 획득한 데이터로부터 유전 알고리즘과 스케일링 기법을 이용한 하이브리드 기법으로 압축기 성능선도를 생성하는 방법을 제안하였다.

유전 알고리즘만 이용할 경우 압축기 성능선도 생성 시 서지점들과 초크점들을 예측하는데 불분명한 단점이 있어 기존의 구성품 성능선도 생성에 널리 사용하는 스케일링 기법을 보완적으로 이용하여 보다 정확한 압축기 성능선도를 생성하는 방법을 3장에 나타내었고, 4장에서는 상용프로그램인 GASTURB로 정상상태 성능해석을 수행한 후 검증데이터와 비교 검토하여 제안한 하이브리드 기법의 유용성을 검증하였다.

비교결과 실험데이터를 추가하여 하이브리드 기법으로 새로이 생성한 압축기 성능선도의 오차율이 다른 기법들에 비해 훨씬 적음을 Table 1에서 확인할 수 있었다. 이는 스케일링할 기존의 성능선도 없이 대략적인 실험데이터만으로도 간단하게 구성품 성능선도를 생성할 수 있음을 보여주었다. 또한 하이브리드 기법으로 생성된 압축기 성능선도와 실험데이터를 추가하기 전의 압축기 성능선도들 사이의 상호 보완적 이용으로 오차율을 줄여나가는 방안을 좀더 연구해야 할 것으로 보인다.

참고문헌

1. Sellers, J. F. and Daniele, C. J.. "DYNGEN - A Program for Calculating Steady-state and Transient Performance of Turbojet and Turbofan Engines", Technical Report TN-D-7901, NASA Lewis Research Center, 1975
2. Kurzke, J. and Riegler, C.. "A New Compressor Map Scaling Procedure for Preliminary Conceptual Design of Gas Turbines," ASME Paper 2000-GT-0006, 2000

3. Kong, C. D., Ki, J. Y. and Kang, M. C.. "A New Scaling Method for Component Maps Gas Turbine using System Identification," ASME Turbo Expo, GT-2002-30150, 2002
4. Kong, C. D., Kho, S. H. and Ki, J. Y., "Component Map Generation of a Gas Turbine Using Genetic Algorithms," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 128, January 2006, pp.92-96
5. Kurzke, J.. "Manual GASTURB 9.0 for Windows - A Program to Calculate Design and Off-design Performance of Gas Turbines," Technical Report, 2001
6. Andrew Wynne, "The Commissioning & Development of a Gas Turbine Power Plant," The Bachelor of Mechanical Engineering Honours Degree Thesis, Liverpool John Moores University, 1994
7. 진강규, "유전알고리즘과 그 응용," 교우사, 2002