

터보팬 엔진의 축류압축기 서지가 엔진성능에 미치는 영향

오창용* · 구자예**

Effects of Axial Flow Compressor Surge on the Performance in Turbofan Engine

Chang-Yong Oh* · Ja-Ye Koo**

ABSTRACT

This thesis has analyzed the effect of the surge happening in flight on the engine performance of the PW4000 turbofan engine. EPR is judged to be the most highly sensitive parameter responding when surge occurs. Both N1 rpm and N2 rpm decreases almost simultaneously just like an EPR. During the take-off rolling, the N1 vibration is more sensitive than the N2 vibration. Consequently, the surge can be detected by EGT increase, while the other parameters decrease.

초 록

본 연구에서는 PW4000 엔진의 축류압축기 서지 발생이 엔진성능에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. EPR은 서지 발생과 동시에 급격히 저하하는 것으로 나타나 민감도가 가장 큰 파라미터였다. N1 rpm과 N2 rpm도 EPR과 거의 동일한 경향으로 감소하였으며, Vibration 변화는 크지 않았으나 N1 Vibration 변화가 상대적으로 크게 나타났다. 따라서 비행중 EPR, N1 rpm, Wf 값이 급격히 저하되고 EGT가 비선형적으로 상승하는 상태로서 서지 발생을 감지할 수 있을 것으로 판단된다.

Key Words: EPR(엔진압력비), EGT(배기가스온도), N1 rpm(저압축회전수), N2 rpm(고압축회전수), Wf(연료유량)

1. 서 론

축류압축기의 서지현상은 공기흐름이 정체되거나 역류하는 현상이 나타날 수 있다[1]. 압축기 유입공기 속도가 느리거나 회전속도가 너무 빠르면 받음각이 증가하여 발생한다. 또한, 축풍

과 돌풍, 배기가스 흡입으로 발생되기도 한다[2]. 이륙상태에서 발생하는 서지는 엔진출력 감소나 상실로 인하여 비행안전의 위협요인이다. 또한 폭음과 진동, 배기가스온도 상승은 부품의 열 손상과 응력유발로 엔진 전체가 파손될 수 있다. 비행고도와 자세, 항공기 속도에 따라 변하는 대기온도와 압력 등의 변수들은 실험연구에 많은 한계를 가지고 있다. 따라서 실제 비행에서 압축기 서지가 발생된 사례에 대한 연구가 필요하다.

* (주) 대한항공 항공기술훈련원

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
연락처, E-mail: changyoh@koreanair.com

본 논문은 실제 비행 데이터를 이용하여 압축기 서지현상이 엔진성능에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

2. 연구대상 및 방법

2.1 PW4000 엔진 제원

이 엔진은 터보팬 엔진으로서 저압축과 고압축으로 작동되는 2축 구조이며 제원은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Engine Configuration [3]

Engine Type	Axial Flow, Turbofan
Bypass Ratio	5.0 : 1
Length	154.0 inch (391.16 cm)
Fan Blade Dia.	94 inch (229 cm)
Weight (wet)	11,500 lbs (5216 kg)
Compressor	Two Spool (LPC+HPC)
Combustor	Annular Type
Turbine	Split (HPT+LPT)

1.2 연구 방법

비행 중에 발생된 4건의 PW4000 엔진의 압축기 서지에 대하여 연구하였다. 대상 엔진은 서지 징후가 보고된 엔진을 선정하였고, 편의상 A, B, C, D로 구분하였다(Table 2). 데이터는 QAR (Quick Access Recorder)의 엔진 파라미터를 분석하여 서지 여부를 판별하고, 엔진성능에 미치는 영향을 고찰하였다.

Table 2 Engine Status for Study

엔진명	서지 징후	비행 상태
A	'쿵' 소리 발생	Take-off
B	'쿵' 소리 발생	Take-off
C	'북' 소리 발생	Take-off
D	엔진계기 요동	Landing

3. 엔진 성능 파라미터

3.1 엔진 압력비(Engine Pressure Ratio)

PW4000 엔진은 추력의 척도로서 EPR 방식을

사용하고 있으며, 엔진입구의 압력(P_{t2})과 배기노즐 압력($P_{t4.95}$)의 비로서 표현된다[4].

$$EPR = \frac{P_{t4.95}}{P_{t2}}$$

이륙을 위한 EPR은 1.57 (추력은 56,000 lbs)이며, 순항(35,000 ft, 마하0.8) 상태에서의 EPR은 1.30 이고, 추력은 9,000 lbs이다[3].

Table 3 Engine Specifications [4]

Parameter	Operating Condition		
	Idle	Take-off	Cruise
Thrust(lbs)	2,100	56,000	9,000
EPR*	1.007	1.57	1.30
N1 rpm	707	3,506	3,100
N2 rpm	6,000	9,800	8,700
EGT(°C)**	340	510	340

*engine pressure ratio, **exhaust gas temperature

3.2 엔진 회전수(Engine rpm)

rpm 계기에는 % rpm으로 표시되며, Table 3에는 비행 상태에 따라 구분하였다. 이륙 N1 rpm은 97.5% 이고, N2 rpm은 99% 이다. 순항 N1 rpm은 86% 이고, N2 rpm은 88% 이다[3].

3.3 배기가스온도(Exhaust Gas Temperature)

EGT는 엔진 작동상태를 가늠하는 매우 중요한 요소로서 Table 3의 한계를 넘을 경우에는 과열상태로 간주되며, 온도수준, 경과시간과 작동상태에 따라 적절한 조치해야 한다[5].

Table 4 PW4000 Engine EGT Limits [4]

Condition	Time Limit	Max. EGT
Take-off	5 Minutes	654 °C
Max. Continuous	Continuous	629 °C
Starting(on Ground)	-	535 °C

3.4 연료유량(Wf)

엔진 전자제어장치(EEC)는 연료계량장치(Fuel Metering Unit)로 신호를 보내어 연소실에 공급되는 연료량을 제어하여 rpm을 결정해 준다. 이륙출력에서는 19,500 pph이고, 순항(35,000 ft, 마하0.8)할 때는 5,300 pph의 연료가 소모된다[6].

3.5 엔진 축 진동(Vibration)

엔진 축의 진동은 가속도계에 의해서 감지된다. N1 rpm처럼 낮은 주파수에는 MILS 단위를 사용하고, N2 rpm과 같은 고주파수는 진동속도를 측정하여 나타낸다. N1 진동은 4.0 Unit 까지, N2 진동은 2.5 Unit 까지 허용된다[4].

4. 결과 및 고찰

4.1 엔진 압력비(EPR)

Figure 1의 X축은 시간(초) 변화로서 서지발생 시점을 0으로 표시했고, Y축은 EPR을 나타낸다. 'A'엔진은 EPR 1.549에서 1.178로 감소하였다. 'B'엔진은 -135초에서 EPR 1.267로 감소했고, 2차로 1.043~1.026으로 감소하였다. 'C'엔진은 EPR 1.348에서 1.301로 감소하였고, 'D'엔진은 1.519에서 1.014로 감소한 시점에 서지가 발생한 것으로 판단된다. 이처럼 서지가 발생하면, EPR은 짧은 시간에 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

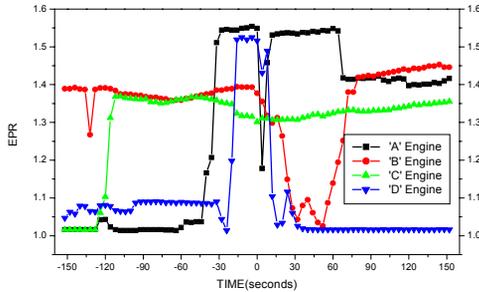


Fig. 1 Variation of Engine Pressure Ratio with Surge

4.2 엔진 회전수(rpm)

EPR이 급격하고 순간적으로 감소된 시점에서의 N1 rpm 변화를 Fig. 2에서 살펴보면, EPR이 급격하고 순간적으로 감소된 시점에서의 rpm 변화량도 거의 동일하게 변화되었다.

N2 rpm은 Fig. 3에 나타난 것처럼 N1 rpm의 변화량에 비하면 민감도가 매우 낮게 나타났다. 서지 순간에는 N1 rpm 감소와 함께 N2rpm도 거의 같은 시간 동안에 감소하고 있으나, 변화량은 비선형적으로 나타나고 있다.

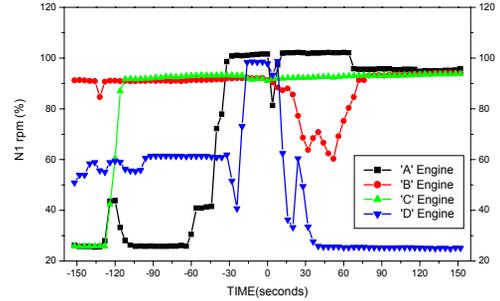


Fig. 2 Variation of N1 rpm with Surge

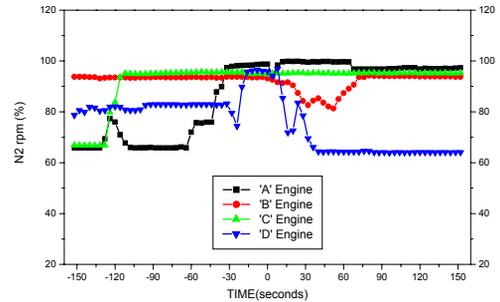


Fig. 3 Variation of N2 rpm with Surge

4.3 배기가스온도(EGT)

Figure 4에 의하면, 'A'엔진은 X축 0에서 28°C가 상승되었다. 'B'엔진의 -135초에서 509°C에서 516°C로 상승했으나, X축 0에서는 감소하였는데, 출력을 감소시킨 결과로 볼 수 있다. 'C'엔진은 8°C가 상승하였고, 'D'엔진도 25°C 상승했다.

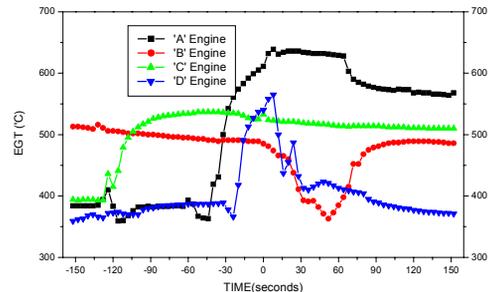


Fig. 4 Variation of EGT with Surge

서지 순간에는 모든 엔진에서 EGT가 상승하고 있다. EGT를 상승키는 요인은 서지 순간에 회전수가 감소하여 압축기 방출 압력이 감소로

연소실 압력이 감소하기 때문에 냉각공기 부족하기 때문으로 판단된다. 또한 rpm 감소가 터빈 팽창력을 감소시켜 온도강하가 작아지기 때문이다. 따라서 EGT 상승은 서지 발생을 판단하는 중요한 파라미터라고 할 수 있을 것이다.

4.4 연료유량(Wf)

연료유량 변화는 EPR과 동일한 양상을 보이고 있다. 즉 서지 순간에는 연료유량이 감소하나, 서지가 회복되면서 증가하는 것으로 나타났다.

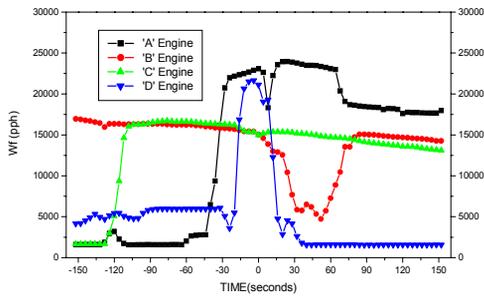


Fig. 5 Variation of Fuel Flow with Surge

4.5 엔진 축 진동(Vibration)

서지가 발생한 시점에서의 회전수와 진동은 밀접한 관계를 가지고 있지만 비선형관계임을 알 수 있다. 서지 시점에서의 회전수 변화와 엔진축 진동은 밀접한 관계를 가지고 있지만 비선형관계임을 알 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7을 살펴보면, N1 진동이 더 큰 변화량을 나타내고 있다. 서지 순간의 'A'엔진의 진동은 증가하고 있으나, 추력증가에 따른 결과이며, 다른 엔진에서는 진동과의 상관관계가 크지 않음을 볼 수 있다.

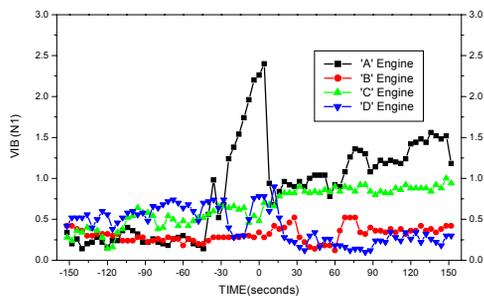


Fig. 6 Variation of N1 Vibration with Surge

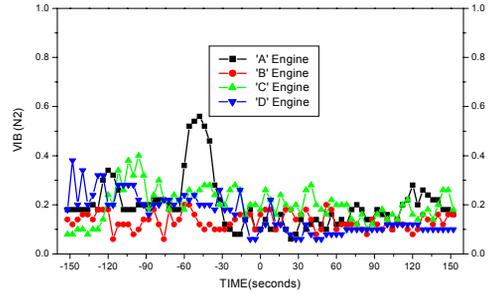


Fig. 7 Variation of N2 Vibration with Surge

4. 결 론

첫째, EPR, N1 rpm, Wf은 서지 발생과 동시에 저하하는 것으로 나타났으며, EPR이 상대적으로 민감도가 컸다. 엔진 축의 진동 변화는 속도의 증감에 관계되며, 서지 순간에는 N1 축 진동 변화량이 상대적으로 크게 나타났다.

둘째, 비행 중 압축기 서지가 발생하면, EPR, N1 rpm, N2 rpm, Wf은 감소하나, EGT, N1 Vibration, N2 Vibration은 비선형적으로 증가하는 것으로 나타나고 있는바, 이는 서지를 감지할 수 있는 파라미터로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Manuj Dhingra, "Compressor Stability Management," Ph.D. Thesis. Georgia Institute of Technology, 2006
2. "The Aircraft Gas Turbine Engine and Its Operation," Pratt & Whitney, 1988
3. "PW4000-94(B747) Line/Base Maintenance Level-III," Pratt & Whitney, 2001
4. "PW4000 Series Engine Manual," Pratt & Whitney, 2007
5. "B747-400 Aircraft Maintenance Manual," Pratt & Whitney, 2007
6. "B747-400 Maintenance Training Manual," The Boeing Company, 2001