

가스 터빈 엔진의 서지마진 측정을 위한 연료 돌출 시험

이진근* · 김춘택* · 이경재* · 하만호* · 안동찬* · 양수석* · 이대성**

A Fuel Spiking Test for the Surge Margin Measurements in Gas Turbine Engines

Jinkun Lee*, Chuntaek Kim*, Kyungjae Lee*, Manho Ha*, Dongchan An*,
Sooseok Yang*, Daesung Lee**

Key Words : Fuel spiking(연료 돌출), Surge margin(서지 마진), Gas turbine(가스 터빈)

ABSTRACT

A fuel spiking test was performed to measure the surge margin of gas turbine engines. The surge margin was mainly determined by the compressors and fuel spiking was used to change the operating point in the compressor characteristic map while speed remained constant. To access the surge margin region different spiking signals were applied by modulations of time(frequency) and fuel flow rate(amplitude). The test results showed good agreements with expected fuel spiking patterns and possibility of further studies.

1. 서론

본 논문에서는 가스 터빈 엔진의 성능 측정에 사용되는 다양한 기술적 방법들 중 가스 터빈 엔진의 서지마진을 측정하기 위한 연료 돌출 방법의 연구와 시험이 이루어졌다. 일반적으로 가스 터빈 엔진은 엔진의 보호와 안정적인 작동을 위해 급가속과 같은 천이성능에 대한 제한을 두고 있으며 엔진의 최대 성능을 도출하기 위해서는 압축기 성능곡선(characteristic map)의 서지선(surge line)을 파악해야 할 필요가 있다. 그러나 엔진 제어 논리(control logic)를 변경하여 인위적인 급가속을 가능하게 하는 연료 계획(fuel scheduling)을 통해 서지선을 확인하고자 할 경우 엔진은 깊은 서지(deep surge)에 이를 가능성이 높아지며 엔진의 손상으로 이어질 수 있다.

연료 돌출이란 정상상태의 연료 공급 상태에 대하여 매우 짧은 시간동안 일정량의 연료를 돌출하는 방법으로써 압축기 성능곡선 상에서 회전수의 변화 없이

토출압을 높이고 유량은 감소시키는 시험 방법이다.

본 논문에서는 고공(altitude) 환경에서 연료 돌출 시험을 위해 사용된 연료 제어 방법과 이를 구현하기 위한 시험 장비의 구성 및 연료 돌출 시험결과에 대하여 논의할 것이다.

2. 연료 돌출 시험

2.1. 가스 터빈 엔진의 천이 성능

가스 터빈 엔진의 성능은 압축기, 연소기, 그리고 터빈으로 구성되는 요소 부품들의 매칭에 의해 결정되며 보통 압축기 성능곡선을 통해 전체적인 매칭을 검토한다. 가스 터빈 엔진의 가속 특성은 정상 작동과 천이 상태로 구별되며 정상 작동의 경우 점진적인 연료량의 증가로 인하여 Fig. 1과 같이 완만하게 회전수가 증가하고 가속률이 높을수록 서지선에 접근하는 것을 볼 수 있다. 천이 상태의 경우는 연료량이 초기에 순간적으로 증가한 후 정상 작동시의 연료량과 같이 증가하는 것으로 Fig.2에 정상 작동시와 비교되어 있으며 이러한 연료 공급 계획은 가속의 경우 압축기의 서지 문

* 한국항공우주연구원 항공추진그룹

** 한국항공우주연구원 항공기술실

E-mail : jinkun@kari.re.kr

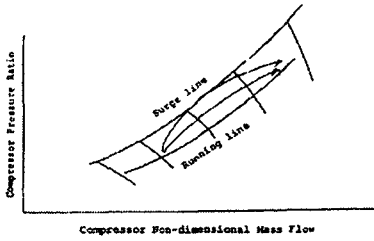


Fig. 1 Steady trajectories on compressor

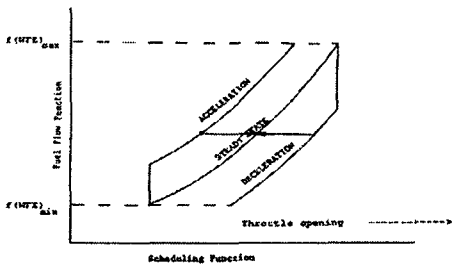


Fig. 2 Transient fuel scheduling

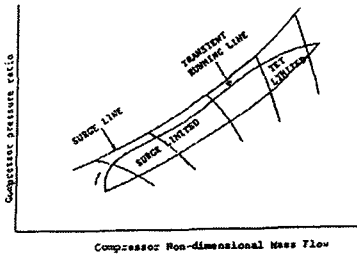


Fig. 3 Transient trajectories on compressor

제, 감속의 경우 연소기의 연소 정지 문제를 발생시킬 수 있다. Fig. 3은 천이 상태에서의 가속특성을 보여주며 정상 상태와 비교하여 초기 가속시 급격히 서지선에 접근하는 것을 알 수 있다. 서지선과 작동선의 차이는 “식 (1)”과 같이 정의된 서지 마진(surge margin)으로 나타내며 서지 마진은 입구 교란(inlet distortion), 엔진 천이 작동, 가변 형상, 레이놀즈수, 엔진의 노화 등 여러 가지 요인에 의해 영향을 받는다.⁽¹⁾

$$SM = 100 \times (PR_{surge} - PR_{working line}) / PR_{working line} \quad (1)$$

2.2 연료 돌출 시험 방법

가스 터빈 엔진에 Fig.4와 같은 짧은 연료 공급이

이루어지면 엔진 회전수는 천이 특성을 보이며 증가하게 된다. 이러한 가속을 통해 서지 현상이 발생하면 Fig. 5에 굵은 실선으로 보이는 것과 같은 회복선(recovery line)을 따라 보통 작동선으로 되돌아오나 깊은 서지(deep surge)가 발생할 경우는 점선 영역에서 거동하여 회복되지 못하고 실속(stall)이 일어나 엔진에 손상을 입힐 수 있다.⁽²⁾

연료 돌출 시험은 위와 같은 서지 특성을 이용하여 엔진의 손상 없이 압축기 서지 마진을 측정하기 위한 것으로 Fig. 6과 같이 특정 시간 동안 연료 돌출량을 조절하여 작동점이 서지선에 접근하도록 한다. 이 때, 압축기는 회전수가 증가하지 않는 상태에서 유량의 감소와 함께 압축비가 증가하여 서지선에 도달하며 서지 현상이 일어나더라도 다시 작동선으로 회복될 수 있다.

보통 서지 라인 측정에는 200 ms동안 100~400 %의 초과 연료량을 사용하는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾

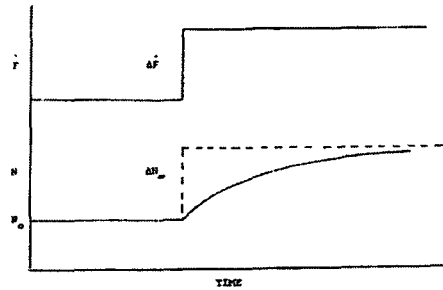


Fig 4 Speed increase by fuel schedule

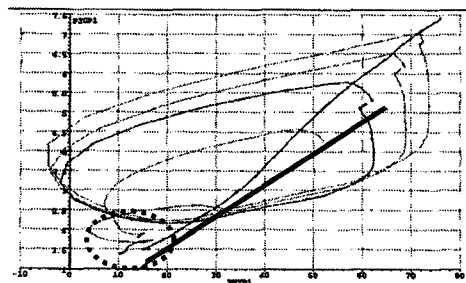


Fig. 5 Surge recovery line on compressor

3. 시험 장치 구성

3.1. 가스 터빈 엔진

본 연료 돌출 시험에는 한국항공우주연구원 항공추진 국가지정연구실의 표준 엔진이 시험용 엔진으로 사용되었으며 상기 엔진은 터보 제트 방식의 엔진으로 3열 축류 압축기와 1열 고압 터빈의 단축으로 구성되어 있다. 위 엔진의 연료공급은 엔진 제어기(ECU)의 신호로 개폐가 이루어지는 서보 밸브(servo valve)를 통해 제어된다. 엔진 제어기는 엔진 회전수, 배출가스온도(EGT) 등의 정보를 받아 적정 연료량을 결정하며 서지 방지를 위해 자체적으로 가속률을 제한하도록 프로그래밍 되어 있다. 연료 돌출 시험을 위해서는 엔진 제어기의 프로그램을 바꾸거나 서브시스템을 사용할 수 있으며 본 연구에서는 연료 제어기(Fuel controller) 서브시스템을 이용하여 가속률을 조정하도록 하였다.

3.2. 연료 제어기

연료 제어기의 역할은 엔진 제어기의 가속률 제한을 받지 않는 연료 돌출 시험을 가능하게 하는 것으로 Fig. 6에 개념도가 나타나 있다. 서보 밸브는 엔진 제어기에서 제공하는 0~200 mA의 전류값에 의해 개폐 정도가 결정되며 밸브의 작동을 원활하게 하기 위해 490 Hz, 5~6 mA의 디터링(dithering) 신호가 첨가된다. 연료 제어기는 엔진 제어기에서 나오는 신호에 연료 돌출 신호를 첨가하여 서보 밸브에 보내며 본 시험장치에서는 함수 발생기(function generator)를 사용하여 다양한 연료 돌출 신호를 사용할 수 있도록 하였다.⁽³⁾

Fig. 7-8에는 연료 제어기의 블록 다이어그램과 회로도가 나타나 있다. 연료 제어기의 입력은 엔진 제어기 신호, 연료 돌출 신호, 그리고 트리거(trigger) 신호

이며 출력은 서보 밸브 구동 전류이다. 또한 데이터 획득 시스템(DAS)으로 엔진 제어기 신호, 연료 돌출 합성 신호 등을 내보내어 제어실에서 엔진 제어기와 서보 밸브의 작동 상태를 점검할 수 있도록 하였다.

본 시험에 사용된 데이터 획득 시스템은 연료 돌출 신호 주파수가 10~20 Hz 이므로 100 Hz의 샘플링비(sampling rate)를 사용하였으며 10 Hz의 실시간 데이터를 보여주도록 하여 연료 돌출 시험 중 엔진 회전수나 배기가스 온도를 감시하였다.

3.3. 엔진 시험 조건

가스 터빈 엔진 시험은 한국항공우주연구원 고공환경 엔진 시험 설비를 통해 이루어졌으며 시험 조건은 표준엔진의 기본 시험 조건으로 사용되는 마하수 0.7, 해면 고도, 표준 대기 조건으로 설정하였다. 연료 돌출 시간은 20 Hz(50 ms), 10 Hz(100 ms)의 두 가지 경우로 설정하였다. 이보다 낮은 주파수에서는 엔진 회전수의 변화가 일어났으며 엔진 제어기가 이를 감지하고 정상 상태로 회복하기 위해 급격한 연료 제어 신호를 발생함으로써 엔진이 정지하는 경우가 발생하였다.

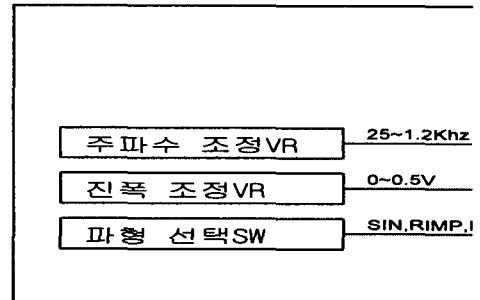


Fig. 7 Fuel controller block diagram

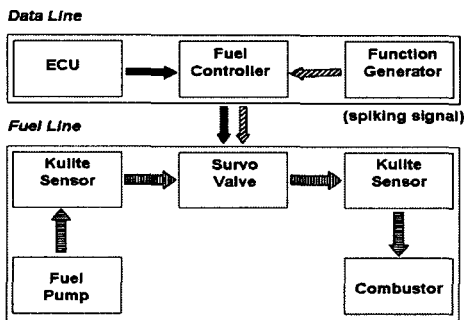


Fig. 6 Fuel control overview

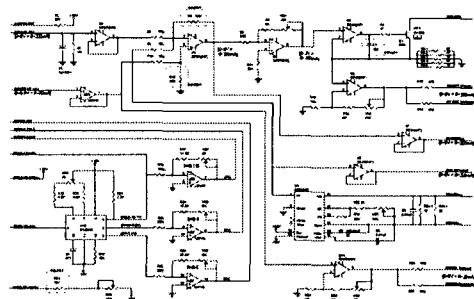


Fig. 8 Fuel controller circuit

4. 시험 결과

4.1. 연료 돌출 주기 변화

기본 시험 조건의 공회전 상태(idle state)에서 엔진 제어기가 발생하는 서보 밸브 개폐 전류는 19mA였고 연료 돌출 신호로는 주파수 20Hz(시간 간격 50ms), 크기 3.2~8.8mA(정상상태의 17~46%)의 파동(pulse) 신호와 주파수 10Hz(시간 간격 100ms), 크기 3.2~5.6mA(정상상태의 17~29%)의 파동 신호를 사용하였다.

Fig. 9-11은 데이터 획득 시스템에서 수집한 시험 결과이며 공회전 정상 상태의 엔진 제어기 개폐 신호 19mA에 연료 돌출 신호가 첨가된 것이다. 파동 신호 중 앞부분의 16개는 20Hz(50ms), 뒷부분의 8개는 10Hz(100ms)의 연료 돌출 신호이다. Fig. 10-11은 서보 밸브 후방과 압축기 후방에 설치한 압력 센서의 측정값으로 연료 돌출 신호에 따라 서보 밸브가 적절히 작동하였음을 보여준다.

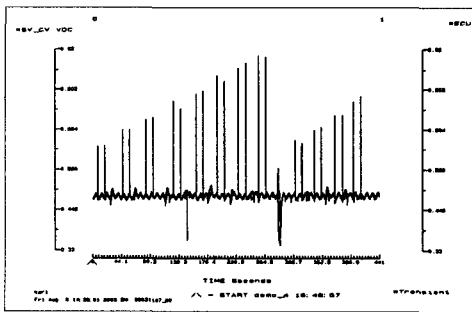


Fig. 9 Fuel controller spiking signals

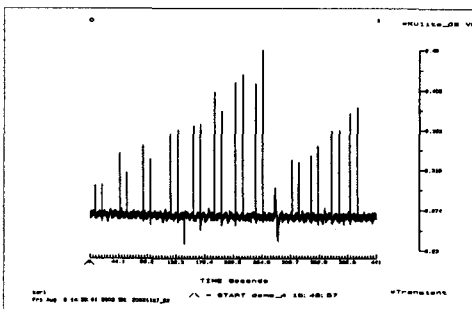


Fig. 10 Servo-valve after pressure signals

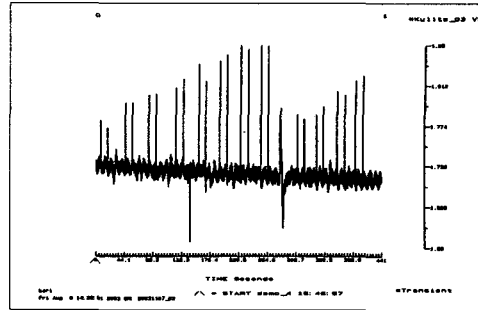


Fig. 11 Compressor discharge pressure signals

5. 결론

본 논문에서는 가스 터빈 엔진의 천이 성능을 이용하여 서지 마진을 측정하기 위한 연료 돌출 시험의 개요와 시험 장치 구성 및 예비 시험 결과에 대하여 기술하였다. 예비 시험 결과, 엔진 제어기에서 내보내는 서보 밸브 개폐 신호에 연료 돌출 신호가 중첩되어 서보 밸브의 입력으로 들어가는 것을 확인하였고 서보 밸브 전·후방과 압축기 후방에 설치된 압력센서들을 통하여 서보 밸브와 연료 유동의 돌출 신호도 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 예비 시험 결과까지만 기술하였으나 추후 상기 시험 장치를 이용하여 다양한 엔진 회전수에서 서지 마진 측정을 수행할 예정이다.

후 기

본 논문은 과학기술부에서 지원하는 국가지정연구실 사업의 연구 업무 수행 결과 중 일부입니다.

참고문헌

- (1) Philip. P. W. and Paul F., 1988, Gas Turbine Performance, Blackwell Science and ASME, USA.
- (2) 이진근, 김춘택, 양수석, 이대성, “가스 터빈 천이 성능”, KARI-AP-TM-2003-v.1-rev.1, 2003.
- (3) Bruce. E. P., 1974, “Pulse-Type Fuel Control”, Diesel and Gas Turbine Progress.