

# 바이패스 덕트 손실 해석을 이용한 복축 혼합형 터보팬 엔진의 윈드밀 특성 연구

김민정\* · 최성욱\* · 노태성\*\* · 임진식\*\*\*

## A Study of Windmilling Characteristics of Twin-Spool Axi-Centrifugal Turbo-Fan Engine Using an Analysis of Bypass-duct Loss

Min-Jung Kim\* · Sung-Wook Choi\* · Tae-Seong Roh\*\* · Jin-Shik Lim\*\*\*

### ABSTRACT

For prediction of the windmilling performance with consideration of bypass-duct loss of the twin-spool axi-centrifugal turbo-fan engine in flight condition, this study has examined the windmilling process and the physical phenomenon of the engine parts. Also, a mixing phenomenon with air passed through the bypass-duct has been analyzed. The results of the predicted windmilling performance has been compared and analyzed using the dimensional parameters.

### 초 록

바이패스 덕트 손실을 고려한 비행 중의 복축 혼합형 터보팬 엔진의 윈드밀 성능을 예측하기 위해, 본 연구에서는 원심 및 축류 압축기, 축류 터빈의 윈드밀 작동 과정과 물리적 현상을 규명하고 바이패스 덕트를 통과한 공기와의 혼합 현상을 해석하였다. 윈드밀 성능 예측의 결과는 유차원 해석을 통해 비교 분석하였다.

### 1. 서 론

연소가 중단된 터보 엔진에 공기가 유입되면 엔진 내부의 압축기, 터빈 등의 회전 부품들은 공기에 의한 램(ram) 효과에 의해 회전한다. 이

처럼 가스터빈 엔진 내부의 회전 부품들이 램 압력에 의해 연료의 연소 없이도 풍차처럼 회전하는 것을 윈드밀 상태라고 한다. 비행 중 가스터빈 엔진의 윈드밀링은 엔진이 연소 중단된 후 발생한다. 따라서 가스터빈 엔진의 윈드밀 특성

\* 인하대학교 대학원 항공공학과, 석사과정

\*\* 인하대학교 항공우주공학과, 정회원

\*\*\* 국방과학연구소

이해는 엔진 시동 시스템의 설계를 위해 필요하다. 단축 제트 엔진의 윈드밀 시동에 대한 연구 사례로는 최민수[1] 등과 유일수[2] 등이 있으며, 복축 축류형 터보팬 엔진의 윈드밀 시동에 대한 실질적인 연구 사례로는 강인식[3] 등이 있다.

본 연구에서는 이진호[4] 등이 복축 혼합형 터보팬 엔진의 윈드밀 특성을 해석한 방법에 더하여 바이패스 덕트를 고려하게 되었다. 손실 모델이나 입구 유동 변화가 주는 바이패스비 변화와 그로 인한 윈드밀 성능 변화를 예측하는 것을 목적으로 한다. 이것은 바이패스비가 일정하여 바이패스비 설계점 이상의 공기 질유량이 모두 core쪽으로 흘러야 하는 이전 연구 사례들과는 달리, 바이패스 덕트 손실을 고려하여 바이패스비를 수렴시키기 때문에 실제와 더 가까운 윈드밀 성능 결과를 얻을 수 있다.

## 2 해석 방법

### 2.1 바이패스 덕트 해석 방법

본 연구에서 바이패스 덕트 유동의 계산 절차와 손실 모델은 직선-단면적이 일정한 덕트의 전압력 손실 계산 프로그램을 기본 로직으로 사용하였다. 또한 바이패스비는 바이패스 덕트 출구의 압력과 LPT 출구의 압력을 비교하여 구한다.

#### 2.1.1 바이패스 덕트 입구

입구 대기 상태와 입구 마하수, 공기 흡입구 전압력 회수율을 이용하여 바이패스 덕트 입구에서의 전압력과 전온도 그리고 밀도를 계산한다(축류 압축기 동역학 입구에서의 입구 상태와 동일). 구한 밀도와 바이패스비 초기치를 가정하여 바이패스 덕트 입구에서의 속도를 계산하고, 이렇게 얻은 입구 속도와 전압력, 전온도를 이용하여 바이패스 덕트 입구에서의 정압력과 정온도를 구한다.

#### 2.1.2 덕트 유동의 손실

덕트 내의 전압력 손실 계산을 위해 덕트는 직선이고 일정한 단면을 갖는다고 가정한다. 여기서 덕트는 동심관 형태의 덕트이다. 따라서 본 연구에서는 직선-일정한 단면 덕트 손실 프로그램과 달리 레이놀즈수 계산 시 덕트의 길이 대신 공력 직경을 사용한다. 가스가 직선의 일정 면적 덕트를 통해 흘러갈 때 압력 손실은 대부분 마찰효과에 기인한다. 그러므로 Fanno Line Theory와 압축성 유동 관계식을 전압력 손실 계산에 사용한다.

#### 2.1.3 바이패스 덕트 출구

바이패스 덕트 출구에서의 마하수를 구하기 위해서는 우선 덕트 길이의 함수로 마하수 변화를 표현하는 다음과 같은 식을 이용하여  $L_{max}$ 를 구한다. 이 때  $L_{max}$ 는  $M=1$ 일 때 마찰에 의해 유동이 초크가 되는 덕트의 최대 길이이다.

$$\frac{fL}{D} = \frac{1-M^2}{\gamma M^2} + \frac{\gamma+1}{2\gamma} \ln \frac{(\gamma+1) M^2}{2+(\gamma-1) M^2} \quad (1)$$

식(1)에 유효공력직경과 실험식을 통해 구한 레이놀즈수에 따른 마찰계수, 그리고 덕트 입구 마하수를 대입하면  $L = L_{max}$ 를 얻을 수 있다. 그리고  $L_{max}$ 에서 실제 바이패스 덕트 길이를 뺀 값을 식(1)에 대입( $L = L_{max} - L_{actual}$ )하여 출구 마하수를 계산한다. 이렇게 출구에서 알아낸 마하수를 이용하여 출구에서의 전압력을 계산하기 위해 필요한 상태량은 출구에서의 정압력이다. 덕트 출구의 정압력을 계산하기 위해서는 다음과 같은 식을 두 번 풀어야 한다.

$$\frac{P_s}{P_s^*} = \frac{1}{M} \left[ \frac{\gamma+1}{2+(\gamma-1) M^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

한번은 입구 마하수를 사용하여  $\left( \frac{P_s}{P_s^*} \right)_{entrance}$ 을 얻고, 또 한번은 출구 마하

수를 사용하여  $\left(\frac{P_s}{P_s^*}\right)_{exit}$  을 얻는다. 여기에 이미 알고 있는 덕트 입구에서의 정압력으로 출구에서의 정압력을 구하고, 출구에서의 정압력과 마하수로 덕트 출구 전압력을 구할 수 있다. 이 계산식은 다음과 같다.

$$(P_s)_{exit} = (P_s)_{entrance} \times \quad (3)$$

$$\left[ \left(\frac{P_s}{P_s^*}\right)_{exit} \times \left(\frac{P_s}{P_s^*}\right)_{entrance} \right]$$

$$(P_t)_{exit} = (P_s)_{exit} \times \quad (4)$$

$$\left[ 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{exit}^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

또한 식(3)에서 구한 바이패스 덕트 출구 정압력을 LPT 출구 정압력과 비교하여 수렴 한계에 들어올 때까지 바이패스비를 바꾸어 계산 과정을 반복 수행한다.

## 2.2 그 외 각 부품별 해석 방법

다른 부품의 기본적인 성능 해석 방법으로, 위의 과정에서 바이패스비를 수렴시킨 후 압축기와 이를 돌리는 터빈의 회전수를 일치시키고 마지막으로 엔진 유입 공기와 nozzle의 질유량을 일치시킨다. 또한, 각 부품의 성능과 압축기 입력, 터빈 출력 및 가용 동력간의 상호 관계는 손실 해석 방법을 통해 해석된다.[4-6]

## 3. 해석 결과

손실 모델과 입구 유동 변화에 대한 비행 마하수 변화에 따른 정상 상태 윈드밀 성능을 비교하여, 유차원 성능 해석을 하였다.

손실 모델은 여러 손실 모델들을 서로 비교함으로써 임펠러 내의 손실을 가장 크게 예측하는 손실 세트와 가장 작게 예측하는 손실 세트, 그리고 그 사이의 값을 나타내는 중간 손실 세트로 분류하였다. 이 손실 모델에 따른 바이패스비의 변화는 Fig. 1을 통해 볼 수 있다.

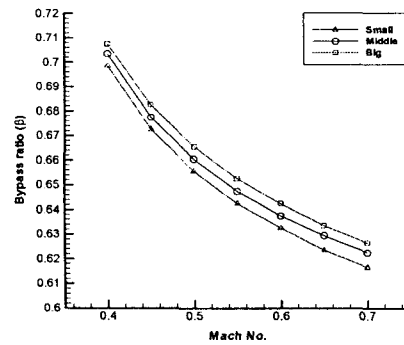


Fig. 1 손실 모델에 따른 마하수-바이패스비 비교

Fig. 1을 보면 동일한 비행 마하수에 대해 손실이 커질수록 바이패스비는 증가하는데, 이것은 임펠러 손실로 인해 core쪽 저항이 커질수록 바이패스 덕트를 지나는 질유량이 커지기 때문이다.

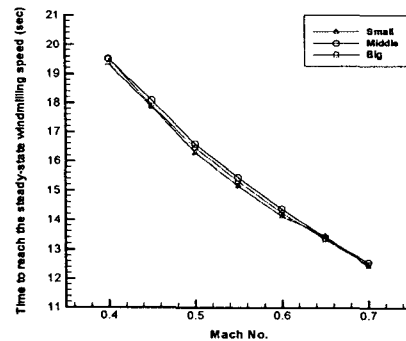


Fig. 2 손실 모델에 따른 마하수-정상 상태 윈드밀 도달 시간 비교

Fig. 2는 손실 모델에 따른 정상 상태 윈드밀 도달 시간을 나타낸 것이다. 손실 모델에 따른 영향은 거의 없지만, 비행 마하수가 증가함에 따라 정상 상태 윈드밀 도달 시간이 비선형적으로 감소함을 볼 수 있다.

Fig. 3과 Fig. 4는 고도 변화에 따른 입구 대기 상태가 윈드밀 성능에 어떠한 영향을 주는지 나타내었다.

#### 4. 결 론

바이패스 덕트의 손실 해석을 통한 복축 혼합형 터보팬 엔진의 윈드밀 특성을 해석하였다. 바이패스 덕트 유동의 계산 절차와 손실 모델은 직선-단면적이 일정한 덕트의 전압력 손실 계산 프로그램을 기본으로 사용하였다. 유차원 성능 해석 결과, 바이패스비는 임펠러 손실 모델 세트나 미끄럼 계수 등의 손실 모델에 대해서는 영향을 받지만 고도나 비정상적 대기 온도 변화 등의 입구 유동 변화에 대해서는 거의 영향을 받지 않았다. 또한, 바이패스비는 마하수가 증가함에 따라 감소하며 전반적으로 윈드밀에 도달하는 시간은 10초 이상으로 지연되는 경향을 보였다.

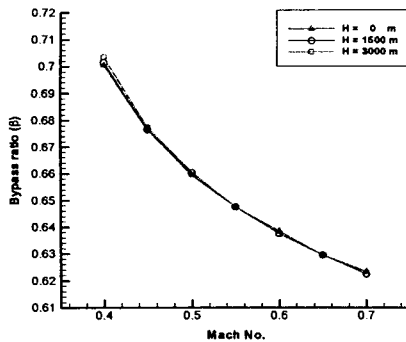


Fig. 3 고도 변화에 따른 마하수-바이패스비 비교

Fig. 3을 보면 전체적으로 바이패스비의 차이가 매우 작기 때문에, 고도 변화가 바이패스비에는 거의 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다.

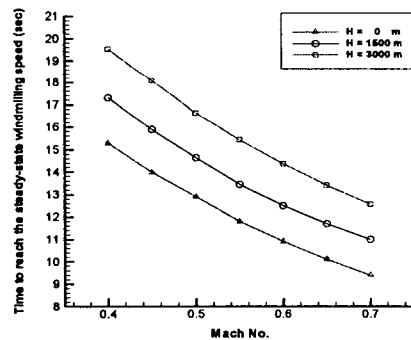


Fig. 4 고도 변화에 따른 마하수-정상 상태 윈드밀 도달 시간 비교

Fig. 4는 고도 변화에 따른 정상 상태 윈드밀 도달 시간을 비교한 것이다. 고도 변화에 따른 영향이 크게 나타남을 볼 수 있다. 고도가 높아질수록 입구 대기 상태가 낮아지기 때문에 특성 시간이 길어지고, 질유량도 감소하기 때문에 잉여 토크량이 현저하게 감소한다. 따라서 고도가 높아질수록 정상 상태 윈드밀 도달 시간이 길어진다.

#### 참 고 문 헌

1. 최민수, 임진식, 홍용식, "A practical method for predicting the windmilling characteristics of simple turbo jet engines," ASME Turbo Asia Conference, November 5-7, 1996, Jakarta, Indonesia.
2. 유일수, "원심형 제트엔진의 윈드밀 특성", 인하대학교 항공공학과 석사학위논문, 2000
3. 강인식, 최민수, 임진식, 홍용식, "Analysis of windmilling characteristics for a twin-spool turbofan engine," ASME Asia '97 Congress & Exhibition, September 30-October 2, 1997, Singapore.
4. 이진호, 최민수, 노태성, 임진식, 홍용식, "복축 혼합형 터보팬 엔진의 윈드밀 특성 연구 II"
5. 안종철, 홍용식, "축류압축기의 탈설계 성능 예측", 한국항공우주학회, Vol. 12, No3, 1994
6. Cohen, Henry "Gas Turbine Theory", Longman Scientific & Technical. pp. 111-112