

항공엔진의 설계 및 운용한계 설정을 위한 MEPS 기법연구

김지현* · 오성환 · 고한영

MEPS Method to Set the Design and Operational Limits for Aircraft Engine

Ji Hyun Kim* · Seong Hwan Oh · Han Young Ko

ABSTRACT

The objective of this paper is to examine the ways in which to implement MEPS method for setting the design and operational limits in order to provide the guaranteed performance of the aircraft engine. Direct adder arithmetically added and related with the effects of ambient humidity, engine quality, throttle set tolerance and deterioration, etc is described with the random adder added in root square sum. The method was applied on the preliminary design of 4,000lb class turbofan engine and the MEPS for engine component design and operational margin was generated.

초 록

본 논문은 항공엔진이 전 운용범위 및 운용조건에서 성능요구조건을 만족할 수 있도록 설계 및 운용한계를 설정하는 MEPS 기법에 관한 내용이다. 대기습도, 엔진품질, 추력설정부정확 및 성능감쇠 등의 영향이 산술적으로 반영되는 Direct Adder와 Root Sum Square로 반영되는 Random Adder에 대해 기술하였다. 본 기법을 4,000lb급의 상용 터보팬 엔진개발에 적용하여, 각 Adder의 영향성을 분석하여 엔진설계 및 운용한계 설정을 위한 MEPS를 구축하였다.

Key Words: Most Extreme Parameter Stack(극한 파라미터 묶음), Aircraft Engine(항공엔진), Design Limits(설계한계)

1. 서 론

본 논문은 항공용 가스터빈 엔진 설계시 고려해야 하는 주요 설계인자의 최대값을 구하기 위해 사용되는 통계적 기법인 MEPS (Most

Extreme Parameter Stack)에 대한 내용이다. 엔진 성능은 운용 대기조건, 엔진 하드웨어의 제작성 및 운용환경에 영향을 많이 받기 때문에 전 운용영역에서 이들 인자의 가변성을 고려한 엔진의 설계는 엔진 규격성능의 충족 및 적절한 운용한계 설정을 위해 매우 중요하다.

통계기법을 활용하여 주요 설계인자의 최대값을 예측하는 MEPS 기법은 엔진개발 초기부터

* 국방과학연구소 3-3-3
연락처자, E-mail: ghyunkim@add.re.kr

운용 및 제품개선에 이르는 엔진 수명 전 과정에 걸쳐서 사용된다. 엔진 개발단계별 MEPS의 사용은 크게 4단계, 즉 1)개념 설계 단계, 2)기본/상세 설계 단계, 3)제품인증 단계 및 4)양산/제품개선 단계로 구분할 수 있다. 1)개념 설계 단계에서는 가스터빈 사이클 설계에 필요한 주요 인자(속도, 압력, 온도 등)의 극한 값을 예측하여 구성품 및 재료의 선정, 작동 한계(Limit)의 설정, 마진의 적절성을 평가하고, 전운용범위에서 엔진의 성능을 평가하며, 2)기본/상세 설계 단계에서는 최종 설계 한계(Limit)의 설정 지원 및 설계 마진을 평가 하며, 전운용범위의 성능을 평가하는데 활용된다. 3)제품 인증 단계와 4)양산 및 제품 개선 단계에서는 인증시험 요구도를 설정하고 시험 결과를 이용하여 운용 마진을 평가하며 사이클 모델의 개선이 있을 때 극한 값을 재평가 한다. 그리고 이렇게 구축된 MEPS 데이터베이스는 이후에 개발되는 다른 엔진 설계시 유용하게 활용될 수 있다.

본 논문에서는 4,000lb급 터보팬 엔진의 MEPS 구축을 위해 전운용 범위에서 엔진 사이클 해석을 수행하여 최대값과 해당 운용 조건을 도출하고, 최대값에 영향을 미치는 각종 Adder에 대한 분석기법을 기술하였으며, 엔진 설계에 활용할 MEPS를 구축하였다.

2. MEPS 구축기법

2.1 기본 사이클 모델 및 운용범위

MEPS를 구축하기 위해서는 대상 엔진을 가능한 정확하게 대표할 수 있는 사이클 모델을 필요로 한다. 본 논문에서는 상용 프로그램인 GasTurb 10[1]을 이용하여 사이클 설계가 수행된 4,000lb급 터보팬 엔진 모델을 이용하였다.

엔진 설계인자의 최대값은 전 비행 영역에서 고려되어야 하나 대부분의 최대값은 비행영역의 모서리에서 발생된다. 상용 항공용 터보팬 엔진의 경우에는 최대값이 대부분 이륙 조건에서 발생하나 팬 속도와 팬에서의 보정 유량의 최대값은 예외적으로 고고도 상승조건에서 발생하기도 한다.

2.2 MEPS에 영향을 미치는 Adder

MEPS에 영향을 미치는 Adder에는 Direct Adder와 Random Adder로 구분된다. Direct Adder에는 대기습도(Ambient Humidity) Adder, EQA(Engine Quality Adder), 초기 장착 손실 Adder, Transient Overshoot Adder 및 이륙성능감쇠(Takeoff Lapse Rate) Adder, 성능감쇠(Deterioration) Adder 및 엔진 장착에 따른 Adder 등으로 구성되며 모든 엔진에 적용되며 Adder 들이 산술적으로 합산된다. Random Adder는 대기습도, 추력설정, EQA, 연료 및 기타 엔진 특성에 따른 Adder로 구성될 수 있으며, 그 합은 Adder의 특성상 RSS(Root Sum Square)로 합산된다. Fig. 1은 Adder의 구성과 설계/운용한계와 관계를 나타낸다.

Most Extreme Parameter	Design/Operational Limit		
	Margin		
	Deterioration Adder		
	Engine Quality Adder		
	Throttle Setting Tolerance Adder	Random Adder	
	Humidity Adder		
	Transient Overshoot Adder		
	Initial Install Loss Adder		
	Engine Quality Adder		Direct Adder
	Ambient Humid Adder		

Fig 1. Adder vs Limits

2.3 각 MEPS Adder별 분석기법

2.3.1 Direct Adder

- 대기습도(Ambient Humidity) Adder

엔진 사이클 모델의 성능은 Dry 조건의 성능을 나타낸다. 그러나 습도가 높은 경우에는 동일한 팬 회전속도(N1)일 경우 Dry 조건보다 추력이 감소되므로, FAR 25 습도 요구조건에서도 엔진의 규격성능을 만족시키기 위해서 고려되는 Adder이다. FAR25 습도조건은 Fig. 2와 같다.

- EQA(Engine Quality Adder)

엔진 사이클 모델은 엔진의 평균 성능을 나타내는데 엔진은 제작에 따른 가변성이 있어서 엔진

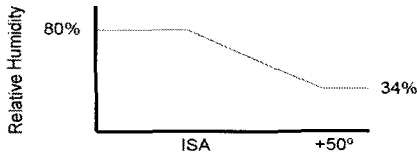


Fig. 2 FAR 25 Ambient Humidity

간 성능 차이를 보이게 된다. 이를 고려하여 최소 성능의 엔진이 규격성능을 만족할 수 있도록 고려하는 Adder이다. N1(팬 속도)을 엔진제어 인자로 할 경우 EQA의 분석방법은 Fig. 3과 같다.

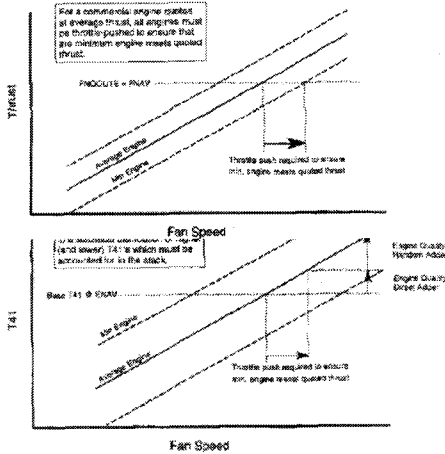


Fig. 3 EQA Analysis

일반적으로 상용 터보팬 엔진의 경우 -2σ 범위 내에서 규격성능의 추력을 보장하므로, 평균이하의 낮은 추력을 내는 엔진이 보장된 추력 (Guaranteed Thrust)을 내기 위해서는 통계적 분석법[2]을 이용한 추력증가(Throttle push)가 필요하며, 이로 인한 설계인자의 증가분이 EQA Adder가 된다. EQA Adder는 Direct Adder와 Random Adder가 같이 발생한다.

- 초기 장착 손실 Adder

대부분의 엔진 규격서에 나와 있는 엔진 성능은 항공기 장착후 50시간 이후의 성능이다. 사이클 모델에 이러한 초기 장착 손실 효과가 고려되지 않았다면, Adder로 반영하여야 하며, 예로서 팬, HPC 및 HPT의 효율을 0.25% 감소시키는 것이 일반적이다.

- Transient Overshoot Adder

주요 설계 파라미터(로터속도, 터빈온도, 연료량)가 천이 작동 동안에 정상 수치 이상으로 overshoot 되는 효과를 고려하는 Adder로서 시험 결과로 결정되나 초기에는 기 수행 유사 엔진 프로그램의 대표적인 값을 사용한다.

- Takeoff Lapse Rate Adder

최근 사용하는 디지털 엔진 제어계통(FADEC)에서는 일반적으로 문제가 없으나 유압-기계제어 (Hydro-Mechanic) 제어계통을 사용하는 경우에 특정 비행속도에서 요구 추력을 만족하기 위해 낮은 속도에서 추력의 over boost가 발생하는 경우가 있으며, 이를 고려한 Adder이며, Fig. 4와 같다.

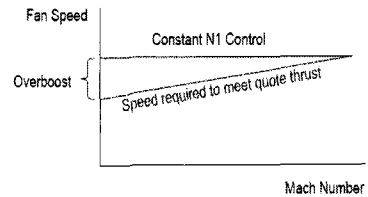


Fig. 4 Takeoff Lapse Rate Adder

- 성능감쇠(Deterioration) Adder

운용 중 엔진 노후에 따른 엔진성능감소 (추력 손실)를 보상하기 위해 고려하는 Adder이다. 주로 경험에 의한 데이터를 사용하여 계산하며 흐름 손실과 효율 감소가 고려된다.

2.3.2 Random Adder

Random Adder에는 습도변화(100%) 효과, Throttle Set Tolerance(엔진 추력 조절의 부정확성 고려, 보통 0.25%), EQA(Production Engine to Engine Variation), 연료 변화, 가변 정의 hysteresis 등 이 Adder로 고려될 수 있다.

3. 터보팬 엔진(4,000lb급)의 MEPS 적용 결과

본 연구에서 MEPS 적용을 위해 선정된 엔진은 4,000lb급 상용 터보팬 엔진으로 주요 사이클 설계인자는 Table 1과 같다.

Table 1. Cycle Parameters of Engine

성능인자	값
팬 압축비	1.7
압축기 압축비	10
바이패스비	2.77
연소기 출구온도	2301 °R
흡입구 유량	110 pps
지상정지 추력	3,425 lb
순항추력(@35,000ft,0.8M)	832 lb

사이클 설계는 터빈 입구온도의 설계 한계를 설정하고, 팬의 회전 속도를 제어하는 동력제어 로직을 적용하였다.

이렇게 만들어진 엔진 모델을 이용하여 엔진 전 운용 범위에서 엔진 설계인자의 최대값과 운용조건을 찾아내었다. 성능인자에 영향을 미치는 각 Adder들을 분석하여 Director Adder는 산술적으로 합산하고, Random Adder는 Root square 합산하여 MEPS를 구축하였으며 결과는 Table 2와 같다. MEPS 분석결과, 대기습도는 압축기출구온도(T3)에, EQA는 연소기 출구온도(T41) 및 HP 회전수에 영향을 많이 주는 것으로 나타났다. T3는 Direct 및 Random Adder가 각각 12.06°R 및 22.25 °R이고, Deterioration

Adder가 5.9°R로서 총 39°R이 증가되는 것을 알 수 있으며, T41은 140°R, W2Rstd는 9 pps 그리고 HP RPM은 861 RPM이 증가되는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

설계된 4,000lb급 터보팬 엔진 사이클 모델을 이용하여 모든 비행조건에서 설계 파라미터의 극한값을 구하고 예상되는 성능 저하 상황을 고려하여 생산되는 모든 엔진이 요구되는 추력을 만족시키기 위해 Direct Adder와 Random Adder를 포함하여 MEPS를 구축하였다. 이와 같은 MEPS 기법은 구성품 설계시 설계 마진을 설정하거나 엔진 운용한계를 설정하는 등의 항공용 엔진 개발에 유용하게 사용되어질 수 있다.

참 고 문 헌

1. Joachim, Kurzke, GasTurb 10, 2004
2. A Probabilistic Design Methodology for Commercial Aircraft Engine Cycle Selection, AIAA 98-5510, 1998

Table 2. MEPS of 4,000lb Class Turbofan Engine

성능변수	최대값	고도	Del. Temp	Mn	FAR25 Param.	FAR25 Adder	EQA	Trans. Overs	Sum of D.A	New Average Engine	Hum. Adder	Throttle Set Adder	EQA 2σ	RSS R.A.	New Min Engine	Deter. Adder	Final MEPS
LP Rpm	15762.9	14000	-100	0.2	15762.9	0	192.90	0	192.90	15955.78	0	39.89	0.00	39.89	15995.7	0	15995.7
HP Rpm	24027.0	14000	-100	0.35	24027.0	0	274.11	240	514.11	24541.15	0	53.46	342.83	346.98	24888.1	0	24888.1
W2Rstd	133.4	14000	-100	0	133.4	0	3.41	0	3.41	136.85	0	0.73	3.01	3.10	139.9	2.431	142.4
Fn	3426.6	4000	-70	0.25	3426.3	0	67.84	0	67.84	3494.15	0	13.62	68.50	69.84	3564.0	63.5	3627.5
T3	1367.3	-2000	80	0.45	1348.4	8.17	3.89	0	12.06	1360.45	19.2	2.17	11.04	22.25	1382.7	5.9	1388.6
T41	2600.0	6000	-10	0	2596.0	2.22	30.52	18	50.74	2646.71	3.98	6.12	41.08	41.72	2688.4	47.51	2735.9
P13	31.2	-2000	-100	0.45	31.2	0	0.24	0	0.24	31.39	0	0.06	0.26	0.26	31.7	0.226	31.9
T13	708.9	-2000	80	0.45	705.8	2.01	0.95	0	2.96	708.78	3.15	0.53	1.28	3.44	712.2	1.27	713.5
P21	30.2	-2000	-100	0.45	30.2	0	0.22	0	0.22	30.43	0	0.06	0.24	0.25	30.7	0.211	30.9
T21	703.1	-2000	80	0.45	700.2	1.87	0.88	0	2.75	702.95	2.94	0.50	1.13	3.19	706.1	1.18	707.3
P3	303.1	-2000	-100	0.45	303.1	0	4.83	0	4.83	307.89	0	1.24	4.95	5.11	313.0	2.208	315.2
P4	285.2	-2000	-100	0.45	285.2	0	4.61	0	4.61	289.77	0	1.19	4.72	4.87	294.6	2.309	296.9
FF	0.7	-2000	-21	0.45	0.7	0.002	0.02	0	0.02	0.71	0.001	0.01	0.02	0.03	0.7	0.026	0.8
W2	148.2	-2000	-100	0.45	148.2	0	0.59	0	0.59	148.79	0	0.15	0.70	0.71	149.5	0.071	149.6
W3	39.9	-2000	-100	0.45	39.9	0	0.38	0	0.38	40.24	0	0.10	0.47	0.48	40.7	0	40.7
W4	32.4	-2000	-100	0.45	32.4	0	0.33	0	0.33	32.70	0	0.08	0.39	0.40	33.1	0	33.1
W5	40.3	-2000	-100	0.45	40.3	0	0.40	0	0.40	40.70	0	0.10	0.48	0.50	41.2	0	41.2
HP Torque	2027.1	-2000	-100	0.45	2027.1	0	31.47	0	31.47	2058.55	0	8.12	42.12	42.89	2101.4	20.62	2122.1
LP Torque	1710.2	-2000	-100	0.45	1710.2	0	30.41	0	30.41	1740.60	0	7.83	39.32	40.09	1780.7	31.88	1812.6
T4	2788.7	14000	0	0.35	2785.8	1.73	36.94	0	38.67	2824.46	2.73		48.64	48.72	2873.2	54.38	2927.6