

# 가스터빈 엔진의 입구 유동 왜곡 시험

이진근\* · 이경재\*

## Inlet Distortion Test of Gas Turbine Engine

Jinkun Lee\* · Kyungjae Lee\*

### ABSTRACT

Inlet distortion test was performed at Korea Aerospace Research Institute in order to evaluate the degradation of engine performance under the distorted inlet condition. In this paper, only the inlet pressure distortion was taken into consideration. During the development process of the inlet distortion test technique, variable distortion screen was designed and evaluated under various test conditions to establish the experimental database of distortion for engine test. The result of inlet distortion test for engine shows that the operating point was changed toward the worse direction and the degradation of engine performance by inlet distortion was verified.

### 초 록

입구유동 왜곡 상황에서 엔진의 성능 저하여부를 평가하기 위하여 입구유동 왜곡시험을 한국항공우주연구원에서 수행하였다. 본 논문에서는 입구압력 왜곡에 대한 시험만이 고려되었으며 입구왜곡 시험 기술의 절차를 개발하는 동안 엔진 시험용 시험 자료를 구축하기 위하여 다양한 시험 조건에서 다양한 왜곡용 스크린에 대한 설계와 평가를 거쳤다. 엔진 입구왜곡 시험 결과는 작동점이 성능저하를 일으키는 방향으로 변동하는 것을 보여주었으며 입구왜곡에 의한 엔진 성능의 저하 여부를 확인하였다.

Key Words: Inlet Distortion(입구 왜곡), Gas Turbine Engine(가스 터빈 엔진), Performance Test (성능시험), Compressor Map(압축기성능곡선)

### 1. 서 론

1960년대 후반부터 터보제트, 터보팬 엔진 개발 단계에서 엔진 제조사 기술진들은 엔진 내로 유입되는 공기 유동의 왜곡(Distortion)으로 인해

발생하는 현상으로 인해 압축기 서지 발생과 엔진전체의 작동성능 저하 요인을 발견하고 이를 개선하기 위한 노력을 기울이게 되었으며 이 과정에서 엔진 안정성과 관련하여 엔진 입구부에 인위적인 입구왜곡현상 모사 장치를 설치하여 실제 실험을 통해 엔진에서 나타나는 엔진 성능의 문제점을 파악하고 이를 피하기 위하여 입구 유동 왜곡과 관련된 기술을 개발하게 되었다[1].

\* 한국항공우주연구원  
연락처, E-mail: jinkun@kari.re.kr

본 논문에서는 입구 압력 왜곡이 엔진 성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 개발한 시험장치 및 시험방법을 소개하고 항공우주연구원에서 수행한 입구 유동 왜곡 시험 결과에 대하여 기술하고자한다.

## 2. 본 론

### 2.1 입구 유동 왜곡 정도 평가기법

입구 압력과 온도의 공간적 변화인 입구 유동 왜곡은 엔진 압축기 성능 곡선에 중대한 영향을 끼치며 서지선의 감소를 동반한다.

압력 왜곡 현상은 항공용 엔진의 경우 횡풍이나 고반음각 조건에서 입구 유동이 원주방향으로 왜곡되어 입구 압력이 상당히 낮은 구간이 나타나며 온도 왜곡은 시험설비의 부적절한 설계나 역추진 가스의 유입 또는 타 엔진 가스의 유입 등에 의해 발생하게 된다[2].

입구 압력 왜곡의 정도를 나타내는 방법은 여러 가지가 있으나 통상적으로 DC60 계수를 사용하여 나타낸다. DC60은 가장 왜곡된 60°구간과 전체 360°입구의 평균 전압력 차이를 평균동압력으로 나눈 값이다.

$$DC60 = (P_{60^\circ} - P_{360^\circ}) / (P - PS)_{360^\circ} \quad (1)$$

같은 방법으로 90°구간의 압력 왜곡을 다룰 경우에는 DC90 값을 사용하며 온도 왜곡을 다룰 경우에는 T120 계수를 사용한다[2].

### 2.2 유동 왜곡 시험장치 및 시험조건

유동 왜곡 시험은 시험설비 입구 공기의 특성 확인, 유동 왜곡 스크린의 설계 및 제작, 예비시험을 통한 시험장치 성능 확인 및 유동 왜곡 시험의 절차에 따라 이루어졌다.

유동 왜곡 시험은 한국항공우주연구원이 보유하고 있는 고공환경 엔진 시험설비에서 이루어졌다.

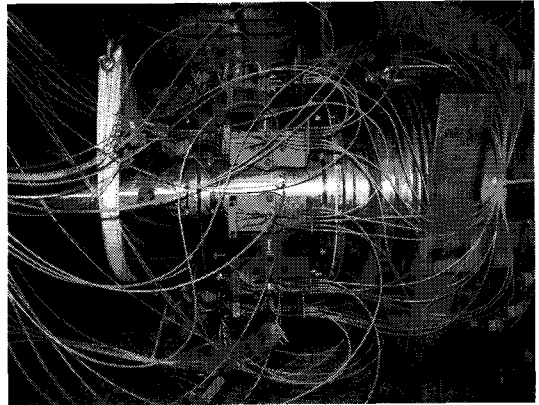


Fig. 1 Inlet duct with pressure rakes

고공환경 시험설비의 입구 공기 특성을 파악하기 위하여 시험부에 엔진 모사용 덕트를 장착하고 압력 레이크를 설치하여 유동의 전압력 분포를 파악하였다. Figure 1은 압력 레이크 12개가 방사상 대칭으로 장착된 입구 덕트가 시험부에 연결되어있는 형태를 보여주고 있다. 압력 레이크 11개에는 6개의 압력 튜브가 연결되어 있고 1개의 압력레이크는 덕트의 중심부분 압력도 측정할 수 있도록 7개의 압력 튜브가 연결되어 총 12개의 압력 레이크에 연결된 73개의 측정 위치를 이용해 중심을 포함한 방사상 대칭 유동 형상을 파악할 수 있게 되어있다.

시험부의 유동은 표준엔진의 작동 영역을 고려하여 Table 1과 같은 조건에서 측정되었다.

시험 조건은 표준엔진의 모든 작동 영역을 포함하도록 선정되었으며 이는 고공환경 시험설비에서 표준 엔진으로 사용하고 있는 터보제트 엔진의 회전수 20,000 ~ 30,000 rpm 영역, 곧 설계 회전수의 68% ~ 102%에 해당된다.

엔진 시험을 수행하기 전에 엔진 모사용 덕트를 장착한 상태에서 두 시험 조건의 매칭을 위해 마하수와 레이놀즈수를 상사변수로 선정하였다. 덕트의 단면적이 일정하므로 유량과 정압이 일정하면 비열비를 상수로 가정할 때 마하수는 온도만의 함수가 된다.

본 시험에서는 시험부의 전온도를 300 K로 고정된 상태에서 시험조건을 설정하였으므로 덕트 마하수 상사 조건을 만족하게 된다.

Table 1. Flow condition of test section

No.	P(kPa)	$\dot{m}$ (kg/s)	Re
1	110	3.90	1,106,425
2	120	5.50	1,560,343
3	130	6.77	1,920,640
4	140	7.86	2,229,872
5	150	8.83	2,505,060
6	160	9.69	2,749,040

마하수와 레이놀즈수 계산에는 다음과 같은 식을 사용하였으며 전온도를 일정하게 유지하였으므로 비열비와 점성계수를 상수로 가정하면 정압과 유량이 주요 변수가 됨을 알 수 있다.

$$M = \frac{u}{a} = \frac{\dot{m} \sqrt{RT}}{PA \sqrt{\gamma}} \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} = \frac{4\dot{m}}{\mu \pi D} \quad (3)$$

고공환경 엔진시험 설비의 엔진 입구로 공급되는 유동의 균일성을 확인한 후 시험장치의 활용 목적을 재정립하였다. 엔진 시험의 경우 우선 군용 및 민간용 엔진에 대한 입구 왜곡 허용 등급이 상이할 뿐 아니라 엔진에 따라 입구 왜곡 허용치는 다양하게 존재하게 된다. 입구 왜곡 정도를 평가하는데 많이 사용되고 있는 DC60 계수의 경우 엔진 작동 영역에서 가장 나쁜 경우의 값들은 Table 2에 주어져 있다.

표준엔진의 경우 연속적인 입구 왜곡 요구 조건은  $DC90 \geq -0.5$ 로 정의되어 있으며, 이와 같은 범위에서 다양한 시험 data를 구축하기 위하여 Fig. 2와 같은 가변 스크린을 제작하였다. 가변 스크린의 설계는 스크린에 의한 면적 blockage ratio를 계산하여 선정하였으며 유동에 대하여 2개의 스크린을 적용함으로써 발생하는 상호 간섭 효과는 초기 설계안 선정에서 배제하였다.

상기 가변 스크린은 두 스크린 면의 교차각 설정에 따라  $90^\circ \sim 180^\circ$ 에 이르는 왜곡 영역을 형성할 수 있으며 이러한 방법을 통해 스크린 변화에 따른 효과를 분석하여 data base를 구축하고자 하였다.

Table 2. Test condition (DC60)

Category	DC60(worst)
Civil subsonic transport	-0.2
Military fighter aircraft	-0.9
Industrial, marine engines	less than -0.1

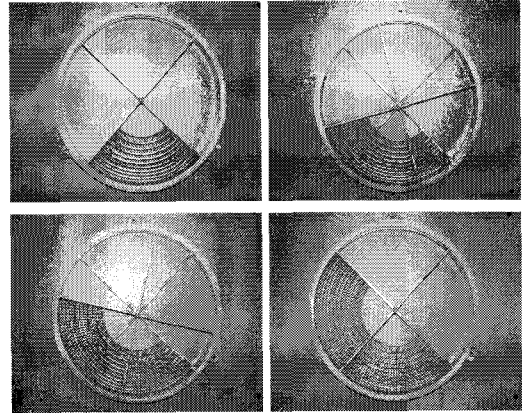


Fig. 2 Inlet distortion screen

### 2.3 시험설비 예비 성능 측정

설정된 시험조건에 따라 입구 왜곡 스크린이 없는 상태의 유동 압력 분포를 측정하였다.

Figure 3은 전압력 110 ~ 160 kPa 조건에서 덕트 내 압력분포를 보여주고 있다. 측정결과 유동의 균일도는 상기 조건에서 2.1 ~ 1.4%에 해당하는 것으로 나타났다.

공간상의 균일성뿐 아니라 측정 시간에 따른 분포를 파악하기 위하여 측정시간에 따른 압력 분포를 조사하였다. 주어진 조건에서 데이터 수집 장치의 sampling rate은 10 Hz이고 측정은 30 s 동안 4 set 씩 측정하도록 설정되어 있어 총 1,200 개의 sampling을 수행하도록 하였다.

Figure 4는 전압력 120 kPa 조건에서 전압, 정압 및 유량 측정 평균값의 분포 상태를 보여주고 있다. 시험값 측정시 고공시험설비의 유량 제어와 관련된 밸브들은 모두 수동 고정값 모드로 설정되었으며 이때의 전압, 정압 및 유량 측정값들은 정규 분포에 가까운 특성을 보여주는 것을 알 수 있다.

## 2.4 유동 왜곡 시험장치 성능 측정

예비시험 결과 덕트 유동은 공간적으로 균일하며 시간적으로도 정규분포의 양호한 특성을 보여주는 것을 확인하였다. 예비시험에 따른 압력 센서 측정 장치의 보정 값을 유지한 상태에서 유동 왜곡시험이 연속적으로 이루어졌다.

유동 왜곡 시험의 시험 조건은 앞서 예비시험에 적용된 것과 동일한 전압력 값을 기준으로 하였으며 이에 따른 유량 및 레이놀즈수의 편차는 예비시험에서의 값과 비교하여 약 2% 범위 내에 들도록 조정하였다.

Table 3~7에는 다양한 유동 왜곡 조건에서의 시험결과인 DC90 값이 나타나 있다.

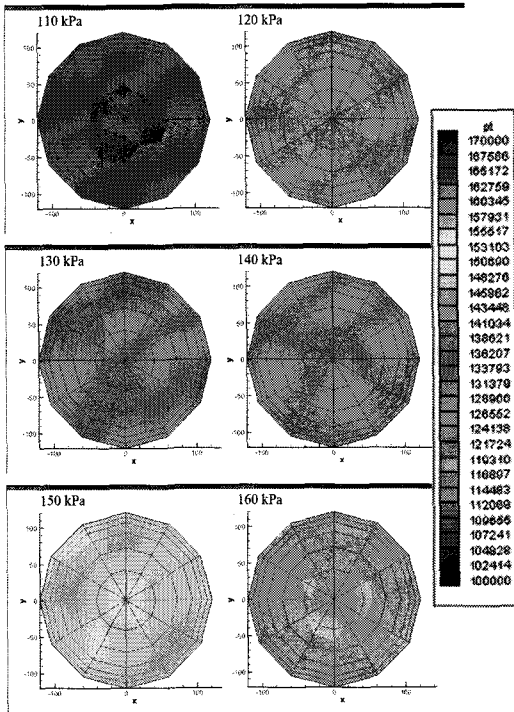


Fig. 3 Uniformity of duct flow (110 - 160 kPa)

Table 3. 90° Screen (Overlap 90°)

Pt	$\dot{m}$ (kg/s)	Re_cal	DC90
110000	3.99	1,131,958	-0.3880
120000	5.48	1,554,669	-0.3829
130000	6.75	1,914,966	-0.3868
140000	7.78	2,207,176	-0.3895
150000	8.62	2,445,483	-0.3921
160000	9.50	2,695,138	-0.3962

Table 4. 120° Screen (Overlap 60°)

Pt	$\dot{m}$ (kg/s)	Re_cal	DC90
110000	3.95	1,120,610	-0.4016
120000	5.50	1,560,343	-0.4086
130000	6.65	1,886,596	-0.4064
140000	7.69	2,181,643	-0.4085
150000	8.54	2,422,787	-0.4114
160000	9.46	2,683,790	-0.4215

Table 5. 150° Screen (Overlap 30°)

Pt	$\dot{m}$ (kg/s)	Re_cal	DC90
110000	3.91	1,109,262	-0.3618
120000	5.37	1,523,462	-0.3511
130000	6.63	1,880,922	-0.3528
140000	7.64	2,167,458	-0.3555
150000	8.53	2,419,950	-0.3620
160000	9.34	2,649,746	-0.3658

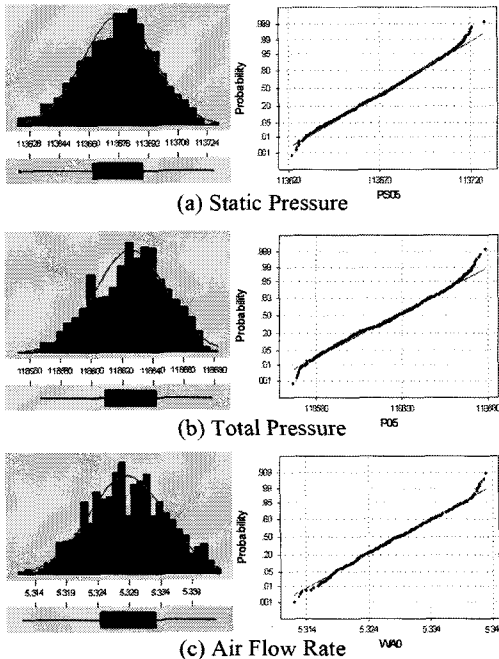


Fig. 4 Normal Probability Plot at Pt 120 kPa

Table 6. 180° Screen (Overlap 0°)

Pt	$\dot{m}$ (kg/s)	Re_cal	DC90
110000	3.84	1,089,403	-0.3215
120000	5.35	1,517,788	-0.3315
130000	6.56	1,861,064	-0.3295
140000	7.61	2,158,947	-0.3266
150000	8.43	2,391,580	-0.3300
160000	9.25	2,624,213	-0.3390

Table 7 Test range from the variable screen

Pt	DC90 (min)	DC90 (max)
110000	-0.3215	-0.4016
120000	-0.3315	-0.4086
130000	-0.3295	-0.4064
140000	-0.3266	-0.4085
150000	-0.3300	-0.4114
160000	-0.3390	-0.4215

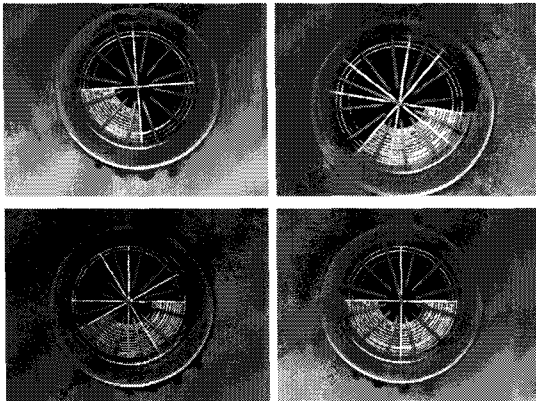


Fig. 5 Photographs of distortion screen

가변 스크린을 적용하여 시험한 결과를 보면 90°Screen 조건을 제외하고는 두 Screen의 Overlap angle이 커질수록 DC90 값이 나빠지는 경향을 나타내었다. 이는 두 Screen이 겹치는 영역에서의 유동의 압력 왜곡이 단일 Screen을 적용했을 때보다 크며 이 영역의 면적에 입구 유동 왜곡 정도가 비례하기 때문이다. 두 Screen을 완전히 일치하게 겹친 90° Screen 조건에서는 예상과 달리 가장 낮은 DC90 값이 아닌 120° 조건과 150°조건 사이의 값이 도출되었다. 본 시험의 목적은 유동 왜곡 database 구축이므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

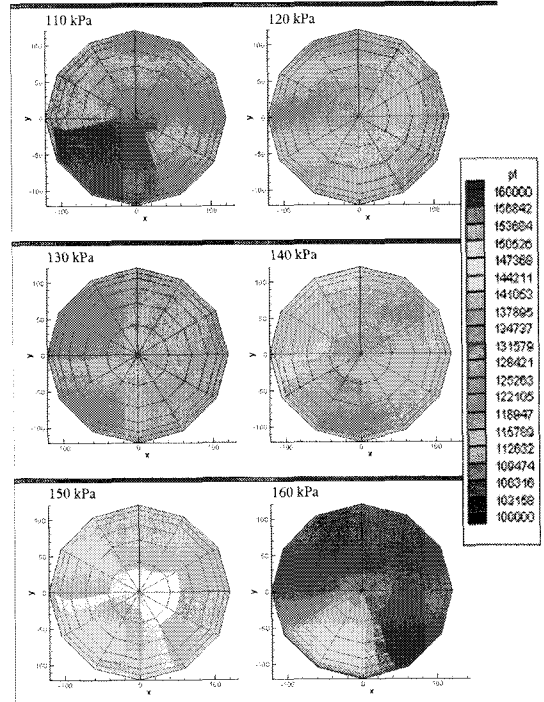


Fig. 6 Distortion Pattern of 90° Screen(110-160 kPa)

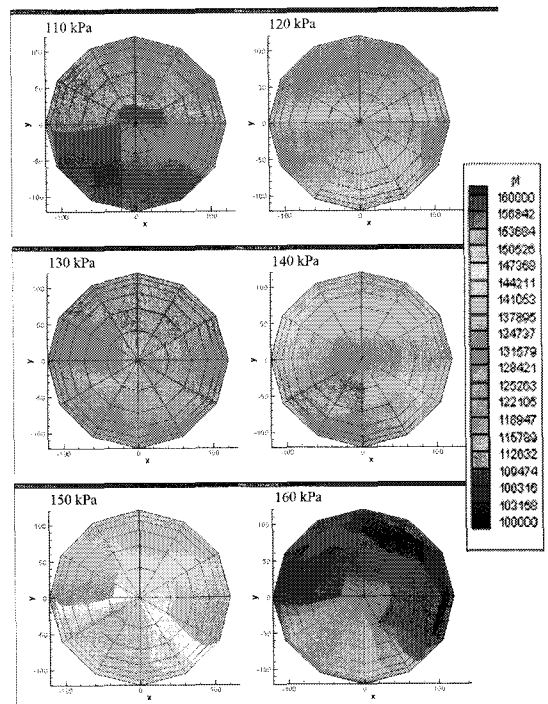


Fig. 7 Distortion Pattern of 120° Screen(110-160 kPa)

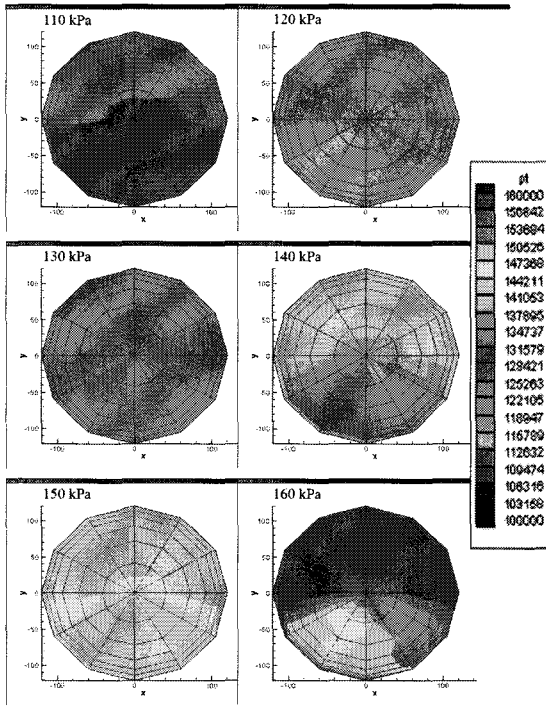


Fig. 8 Distortion Pattern of 150° Screen(110-160 kPa)

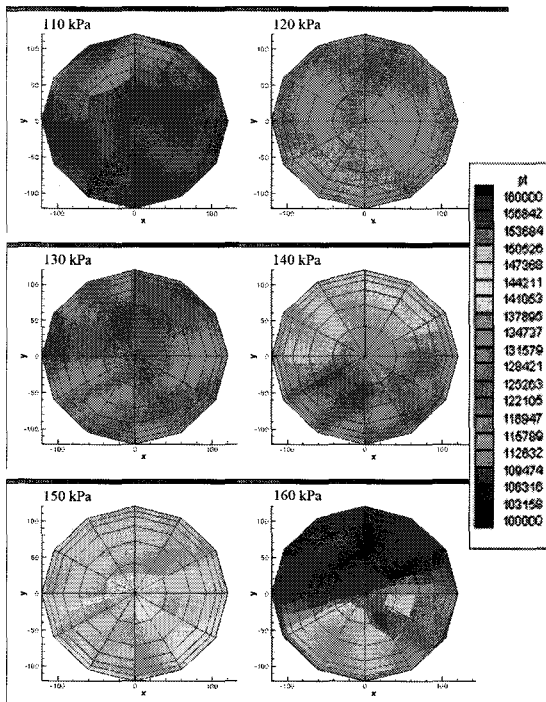


Fig. 9 Distortion Pattern of 150° Screen(110-160 kPa)

유동 왜곡 시험 결과를 통하여 다음과 같은 범위의 DC90 값을 스크린의 조합을 통하여 재현할 수 있음을 확인하였다. Figure 5에 스크린 장착 사진이 나와 있으며 Fig. 6~9는 압력 레이프로 측정된 유동 왜곡 분포 결과를 보여준다.

### 2.5 유동 왜곡 시험

위와 같이 구축된 입구 유동 database를 바탕으로 항공우주연구원 표준엔진에 대한 입구 유동 왜곡 시험을 수행하였다.

시험조건은 마하수 0.7 표준대기 해면고도 조건으로 설정되었으며 엔진 출력을 조정하는 PLA 6V(25,900 rpm)와 8V(27,700 rpm) 조건에서 정상상태 성능을 측정하였다.

유동 왜곡은 90° Screen 형상을 이용하였으며 Figure 10은 표준엔진의 압축기 특성곡선으로 입구 유동 왜곡 결과 엔진의 작동점이 유량과 압력이 줄어드는 방향으로 이동하고 있는 것을 보여주고 있다. 이는 엔진의 성능이 입구 압력 유동 왜곡에 의하여 저하되었음을 의미한다.

이러한 성능 변화는 method of parallel compressors 등으로 이미 예측된 것이며 압력 왜곡 부분의 낮은 전압과 유량이 전체 압축기 성능에 일정 부분 기여함으로써 이와 같은 성능 변화가 일어나게 된 것으로 분석할 수 있다[2].

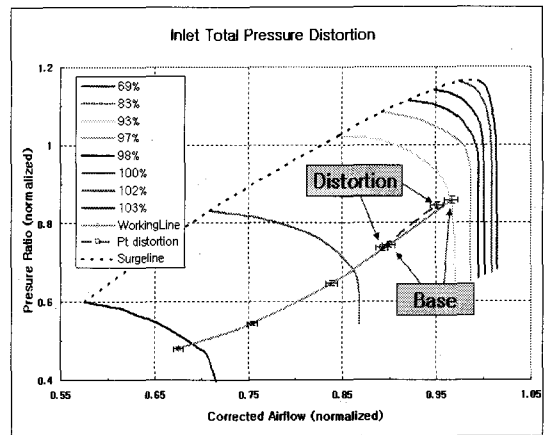


Fig. 10 Compressor Map of AETF Standard Engine

### 3. 결 론

항공우주연구원에서는 비정상상태 엔진성능 시험기술 개발의 일환으로 입구 유동 왜곡 시험 장치의 설계, 제작, 시험평가를 포함한 본 연구를 수행하였다. 유동 왜곡 시험에 있어 가장 중요한 요소는 유동 왜곡 장치가 원하는 수준의 DC60 또는 DC90 값을 만들 수 있는지 여부이며 이를 위하여 시험설비의 유동 균질성 시험, 유동 왜곡 시험장치의 성능시험을 수행하였다. 상기 시험들을 통해 구축된 database를 이용하여 고공환경 시험설비의 표준엔진에 대한 유동 왜곡 시험을 수행하였고, 그 결과 유동 왜곡에 의한 엔진 성능 저감을 압축기 성능곡선을 통하여 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부에서 지원한 국가지정연구실 과제의 일환으로 수행된 연구 결과의 일부임을 밝힙니다.

### 참 고 문 헌

1. Technical Report, 2005, Research on the improvement of reliability and the transient test technique for the altitude performance test of the propulsion system for flight vehicle , Korea Aerospace Research Institute.
2. P. P. Walsh and P. Fletcher, 2004, Gas Turbine Performance, 2nd edition, Blackwell Science and ASME Press.