

소형 Turbo-shaft Gas Turbine 엔진 온도 및 압력 측정기술

김만호·이근선·손정락
(삼성항공 엔진연구소)

1. 서언

1.2 MW급의 소형 turbo-shaft 가스 터빈 엔진을 개발 과정의 일환으로 수행되는 성능시험에는 다양한 종류의 센서가 사용된다. 이에선 작동 유체 및 윤활유, 연료의 온도 및 압력, 금속 케이싱의 온도, 주축에 작용하는 하중, 케이싱의 진동, tip 간극의 측정, 그리고 압축기 및 터빈의 동익에서의 응력 수준의 측정 등이 있다. 이들 중에서 압력과 온도는 가장 기본적인 엔진 해석의 기초자료가 된다.

정도가 높은 자료의 획득을 위해서는 고온, 고압, 고속의 가스터빈 엔진의 내부 환경을 고려하여 각종 측정 장치의 정도와 반응시간의 지연에 대한 고찰이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 압력 및 온도 측정의 정확도를 규명하기 위하여, 온도 및 압력의 반응속도를 정성적으로 검토하였다. 또한 온도·압력 측정용 probe가 같이 장착된 혼합형 레이크를 중심으로 하여, 온도 측정의 경우, 열전대의 사용 시 열접점의 형상 및 열전대 보호용 구조물의 형상, 유동장 등이 온도 측정에 미치는 영향을 검토하였으며, 압력 측정의 경우에는 유동방향과 유속 등의 유동장의 영향이 측정에 미치는 효과를 분석하였다. 그리고 엔진에 적용하여 온도 및 압력의 측정 결과를 전술한 내용과 비교, 검토하였다.

2. 온도 및 압력의 반응성

온도 반응성

열전대에서 측정되는 온도는 열전대의 열접점의 온도로서 열접점이 작동 유체의 온도에 가까울수록 정도 높은 측정을 할 수 있다¹⁾. 작동 유체와 열접점은 작동 유체로부터의 대류 열전달과 작동 유체에서 열접점으로서의 열전달, 열접점에서 열전대 소선 및 지지용 구조물로의 열손실, 열접점과 엔진 케이스 사이에 발생하는 열복사 등의 영향으로 열평형을 이루게 되며, 열평형에 도달하는 데에는 시간이 소요된다²⁾.

그림 1은 작동유체의 온도 측정을 위해 사용되는

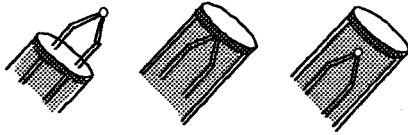
3가지 접점의 형태를 보여준다. 노출형의 경우 접점이 노출되어 있어서 열전도에 의한 오차는 얇은 열전대 선을 통해서만 발생하므로 전도에 의한 영향이 작은 장점이 있으나, 열전대 선이 노출되어 있는 관계로 고온, 고압, 고속 유동 및 화학성분에 노출되어 파손 및 부식의 가능성이 있다.

이를 보완하기 위해 유도관 내부에 접점을 두는 형식을 사용하게 되는데 이에선 접지형과 비접지형 두 가지가 있다.

접지형의 경우 작동유체에 열전대의 접점이 직접 접하므로 반응성을 향상시킬 수 있으나, 금속계의 피복에 접지 되어 있으므로 노이즈(noise) 등에 취약한 단점이 있다. 또한 노출형에 비해 지지 구조물로의 전도에 의한 영향이 증가하게 되며, 열접점 크기의 증가로 인해, 복사 열손실의 영향도 증가하게 된다. 노이즈에 취약한 접지형의 단점을 보완하기 위해 비접지형이 사용되는데, 접지형은 작동유체의 온도가 접점에 감지되는데 시간이 걸리나, 노이즈에 강하고 접점의 훼손을 가장 잘 방지할 수 있는 장점이 있다.

엔진 시험에서는 유속과 온도가 비교적 낮은 압축기 1단의 입구와 출구 지역에 노출형이 사용되었으며, 이외의 위치에는 비접지형의 열전대가 사용되었다.

그림 2는 열전대를 고온의 모래에 급격히 삽입한 경우, 측정되는 온도의 변화를 표시한 것으로서 온도는 측정 최고온도를 사용하여 무차원화 하였다. 고온의 모래는 열전대를 보정 하는데 있어서, 유체 내부에 삽입하는 경우에 비해, 대류에 의한 측정오차를 줄일 수 있는 장점이 있다. 긴 응답 시간은 모래 자체에서 발생한 전도에 영향을 받은 것이다. 노출형의 경우 지지용 구조물이 있더라도 빠른 반응성을 보였으며 평형온도에 도달하는데 80초 정도가 소요 되었으며, 비접지형의 경우에는 지지용 구조물이 없는 경우에 노출형에 거의 근접하는 반응성을 보였다. 지지용 구조물이 사용된 비접지형의 경우에는 평형 온도에 도달하는데 150초 이상이 소요되었으며, 반응성이 가장 나빴다. 이는 서로 다른 3가지 열전대의 시간응답성을 정성적으로 보여주는 것으로서 노출형 열접점을 사용하고, 지지용



노출형 접지형 비접지형

그림 1 열접점의 종류

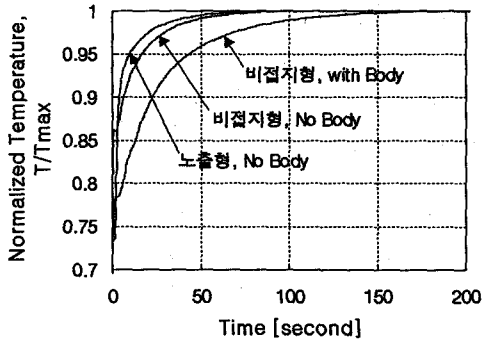


그림 2 열전대 종류에 따른 온도 반응성

구조물을 작게 제작할수록 우수한 응답성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

압력 반응성

급격한 엔진 운전 조건의 변화에 따른 압력 변화를 측정할 수 있는 고속의 압력 변화를 측정하기 위한 센서 및 측정 시스템이 필요하지만, 성능시험의 경우에는 수십 분의 엔진 운전을 통해 엔진의 유동 조건이나 열적 조건 등이 평형상태에 도달한 후에 측정하므로, 저속의 압력 변화에 대한 압력 측정만으로도 충분하다.

측정점에 센서가 위치하는 경우에는 압력 변화를 고속으로 측정할 수 있으며, 압력관을 사용하여 측정 센서가 측정점에서 멀어짐에 따라 압력관 내부의 감쇠(damping) 효과에 의해 반응 민감도가 떨어지게 된다. 즉, 거리가 먼 경우 측정점의 민감한 물리량 변화가 압력관 내에서 평균화되는 경향이 있으며, 압력관 충진에 시간이 소요되어 반응 속도가 떨어진다.

그림 3은 압력관의 길이에 따른 측정의 민감도를 파악하기 위해 사용된 설비의 개념도이다. 압력원에서는 특정 압력을 공급하게 되며, 짧은 관의 경우 길이 1m의 압력관을 통하여 압력이 압력 변환기(IMO사의 model 2000/F)에 전달되며, 긴 관의 경우 약 30m의 관을 통하여 압력 변환 시스템(PSI 8400 시스템)에 전달되도록 구성되어 있다. 이러한 시스템에 대하여 10psig, 50psig, 100psig의 세 종류

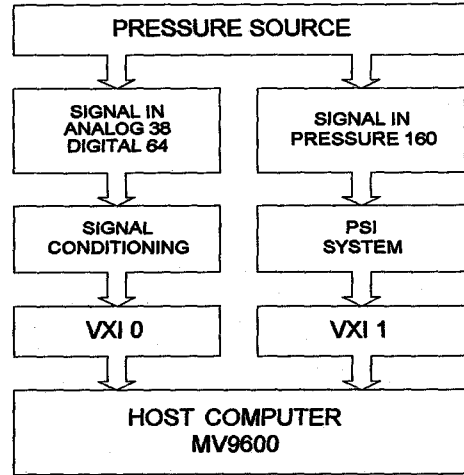


그림 3 압력측정 시스템의 개략도

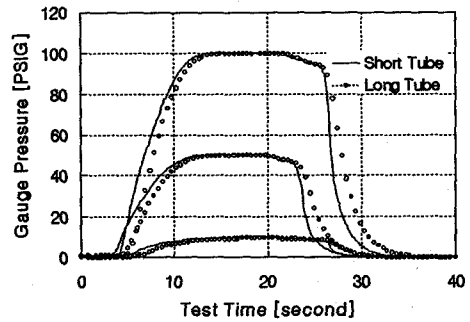


그림 4 압력관의 길이에 따른 압력 측정 민감도

의 압력에 대해 측정이 수행되었다.

그림 4는 순간적인 압력 공급에 따른 압력 측정 값의 변화를 그린 것이다. 각 압력 공급의 시작 시점은 다소 차이가 있으나, 짧은 관과 긴 관은 동시에 측정이 이루어졌다. 순간적으로 압력이 가해진 경우, 약 10 초 후 공급 압력이 완전히 측정되었으며, 긴 관에 비해 짧은 관이 약 1초 정도 빠른 반응성을 보였다. 이는 압력 공급에 소요되는 시간과 관 내부에 차 있는 공기의 감쇠 효과에 의한 것이다. 그리고 약 25초 근방에서의 미소한 압력의 하강은, 가해진 압력의 연결관(fitting)을 제거하면서 공급압력에 대해 수%의 압력강하를 시켜 각 압력관에서의 압력변화를 관찰한 것으로서 반응시간의 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 실제 측정 시 엔진의 내부에서 발생하는 압력의 변화는 정상 운전 상태의 경우 미소하므로, 긴 압력관(30m)을 사용하여도 측정 정도에 미치는 영향이 적음을 알 수 있다.

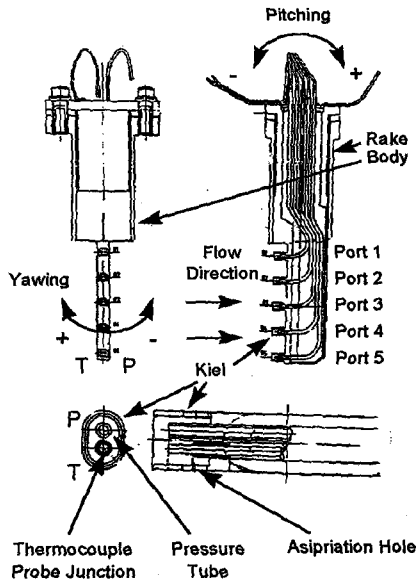


그림 5 혼합형 레이크의 형상

3. 유동 특성이 측정에 미치는 영향

본 엔진의 시험에서는 측정의 정도와 편의성을 고려하여 동일 단면 내에서 복수의 측정을 동시에 행하기 위한 형태의 레이크가 사용되었다³⁾. 레이크는 유로의 폭에 따라서 1점 및 3점, 4점, 5점의 레이크가 사용되었으며, 각 레이크의 측정점은 등간격으로 설치되었고, 온도와 압력을 동시에 측정하는 형태의 것(혼합형)도 사용되었다. 또한, 레이크의 기하학적 유동 면적 (geometrical flow area; GFA)의 감소를 최소화하여, 전체 유로에 대한 레이크에 의한 유로 감소 비율(blockage reduction ratio)을 3% 내외로 하였다.

터빈 출구에서의 온도와 압력을 측정하기 위해 사용된 온도/압력 혼합형의 레이크를 그림 5에 나타내었다. 이 레이크는 엔진의 배기부에 설치되며, 터빈의 3단 출구에서 나오는 배기 가스의 온도와 압력을 측정하기 위해 사용된다. 원주 방향으로 3개의 동일 모양의 레이크를 설치하며, 각 레이크에는 5개의 측정점(이하 포트; port)이 설치되어 있다. 포트는 반경 방향으로 먼 쪽이 1번(레이크의 허브(hub)쪽)이며 가까운 쪽이 5번(레이크의 팁(tip)쪽)이다. 온도측정용 레이크와 압력측정용 레이크를 따로 설치하는 경우에 발생하게 되는 유효단면적 감소의 영향을 줄이기 위해 혼합형의 레이크가 채택되었으며, 레이크내의 각 포트는 유로의 폭을 기준으로 등분(13.6mm)하여 설치되어 있다.

각 포트에는 압력 측정을 위한 압력관과 온도 측

정을 위한 열전대가 설치되어 있으며, 전면에서 보아 포트의 왼쪽에는 열전대가, 오른쪽에는 압력관이 설치되어 있다. 또한 차가운 엔진 케이스로의 복사 열전달에 의한 오차를 줄이기 위해 kiel(radiation shield)이 설치되어 있으며, kiel은 유동을 평활화 하여 유동의 입사각에 대한 영향을 줄일 수 있다. 특히 혼합형의 레이크는 비대칭의 형상을 갖고 있으며, 작동 유체의 입사각에 따라 가지는 비대칭적인 특성은 후술한다.

레이크의 calibration에는 영국 ARA Research 사의 MST(Mach Simulation Tank)를 사용하였다. 온도 및 압력의 측정 정밀도는 $\pm 0.25\%$ 이고, 각 조건에서 최소 10분간 운전후 측정값의 변화가 없을 때 3회의 측정을 실시하여 이를 단순 평균하였다.

Mach 수 변화의 영향

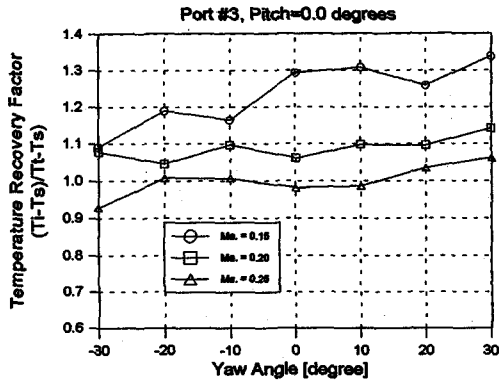
그림 6(a) 및 (b)는 레이크의 3번 포트의 kiel에서 마하수의 분포에 따른 온도복원계수 (temperature recovery factor)를 보이고 있다. 온도복원계수는 $(T_i - T_0)/(T_0 - T_w)$ 로 표시하고, T_i , T_0 , T_w 는 각각 지시온도, 정온도, 전온도를 나타낸다. T_0 를 측정하는 정도는 $\pm 0.25\%$ 이며, 288K 근처에서 측정이 수행되었다.

마하수가 0.15 정도로서 속도가 낮은 경우에는 1.3 정도의 온도복원계수가 관측되었으며, 마하수 0.2~0.25 정도에서는 비교적 정상적인 값이 측정되었다. 등엔트로피 과정에서 살펴보면, 저속의 경우에는 전압과 정압의 비가 1에 가까워져서 그 차이가 작아지게 되고 고속의 경우에는 전압과 정압의 비가 1보다 작게 되고 그 차이가 커진다. 그런데 온도복원계수는 (측정 온도-정온도)/(전온도-정온도)로서 측정 오차가 $\pm 0.25\%$ 일 때 분모가 0에 접근하면 분자의 값이 작더라도 온도복원계수는 커질 수 있다. 즉, 저속에서는 전압과 정압의 차이에 비해 측정 오차($\pm 0.25\%$)가 상대적으로 크게 반영되었다.

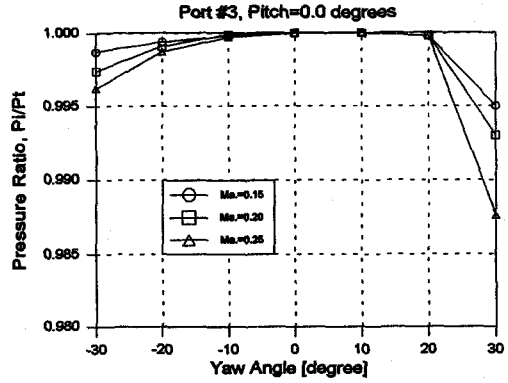
측정 결과에 의하면, 요각 및 피치각에 대해서는 $\pm 30^\circ$ 내에서 입사각의 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.

그림 7(a) 및 (b)는 3번 포트의 kiel에서 마하수의 분포에 따른 압력비의 변화를 보인 것으로서, 압력비 P/P_0 는 공급압력 P_0 에 대한 측정압력 P_i 의 비를 나타낸 것으로서 실제 압력에 가깝게 측정하는 정도를 나타낸 것이다.

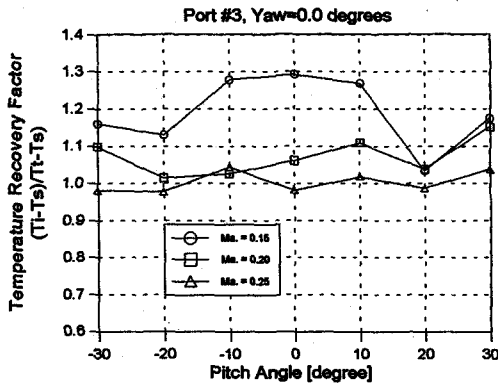
그림 7(a)에 의하면, $\pm 10^\circ$ 이내의 요각 범위에서는 유속의 변화에 대하여는 큰 차이가 없다. 그러나 요각의 변화에 대해서는 $\pm 10^\circ$ 범위를 넘어서면 압력비가 크게 감소하고, 유속이 증가하면 그 비는 더욱 감소한다. 따라서 요각에 대하여는 $\pm 10^\circ$ 범



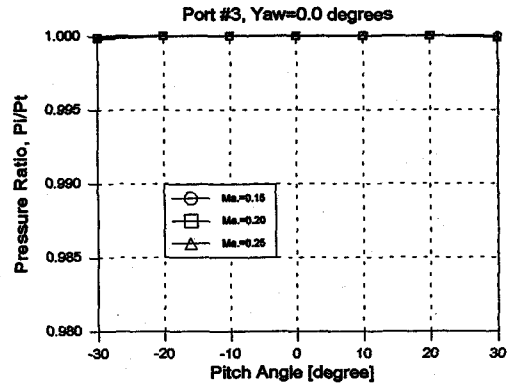
(a) 마하수 및 요각의 변화에 따른 온도복원계수의 분포



(a) 마하수 및 요각의 변화에 따른 압력비의 분포



(b) 마하수 및 피치각의 변화에 따른 온도복원계수의 분포



(b) 마하수 및 피치각의 변화에 따른 압력비의 분포

그림 6 마하수 및 입사각의 변화에 따른 온도복원계수의 분포

그림 7 마하수 및 입사각의 변화에 따른 압력비의 분포

위 이내에서 레이크를 사용하는 것이 바람직하다.

또한 그림 7(b)로부터 온도복원계수가 유속 및 피치각의 변화에 크게 영향받지 않음을 알 수 있다.

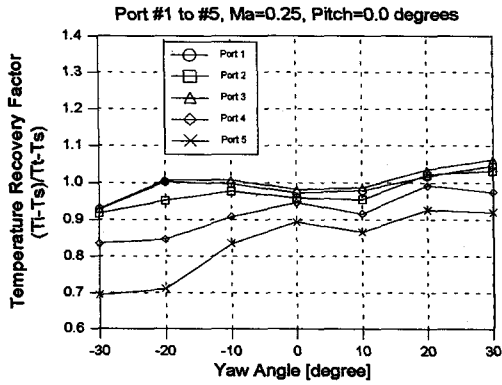
유동 입사각이 온도 측정에 미치는 영향

그림 8(a)는 레이크에 설치된 각 포트에 대해 요(yaw)각의 변화에 따른 온도복원계수를 보이고 있다. Kiel 형상의 비대칭성으로 인해 비대칭적인 분포를 보이고 있으며, + 요각 부분이 상대적으로 안정적인 결과를 보이고 있다. 전술한 바와 같이, 유속이 낮은 영역에서의 결과이기 때문에 측정 오차 ($\pm 0.25\%$)가 상대적으로 크게 반영되어 복원계수가 1보다 큰 경우도 발생하였으며, 입사각이 0° 일 때,

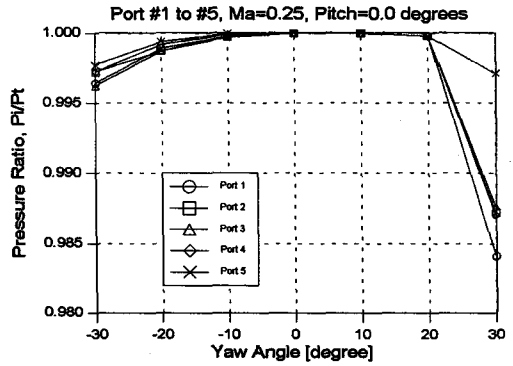
복원계수는 0.9에 근접해 있음을 알 수 있다.

그림 8(b)는 피치각의 변화에 따른 온도복원계수의 변화를 보이고 있다. 요각의 변화에 비해 상대적으로 낮은 변화율을 보이고 있으며, 대칭적인 분포를 보이고 있다. 그림 8(c)는 요각 및 피치각의 변화에 따른 온도복원계수의 분포를 3차원적으로 도시한 것이다.

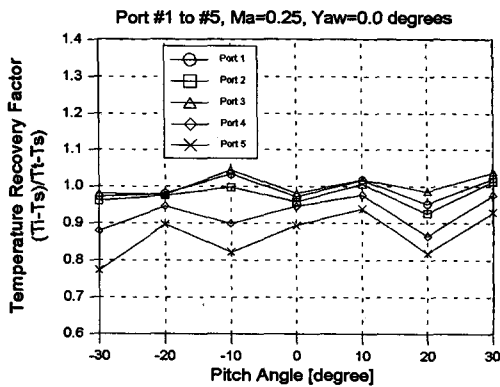
온도복원계수는 열전대의 종류와 설치 방향에 따라 그 값이 변화하지만, 그림에서 나타나듯이 0.9 내외로 적용하면, 마하 0.2의 유속에서 등엔트로피식을 이용하여 계산하면 T/T_0 는 0.9921로서 전온도의 0.79%가 유속에 의한 영향이고 이것의 90%가 온도로 반영되므로 유속의 영향에 의한 온도 오차는, 그 크기에 따라 차이가 나지만, 본 엔진시험의



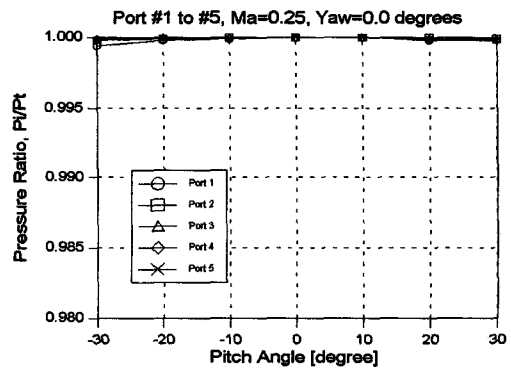
(a) 요각의 변화에 따른 온도복원계수의 분포



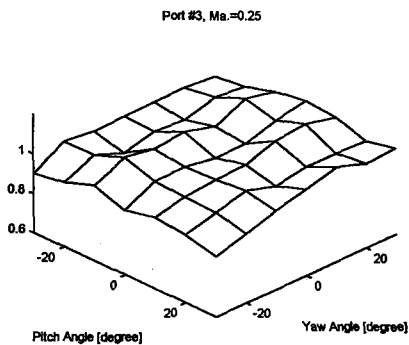
(a) 요각의 변화에 따른 압력비의 분포



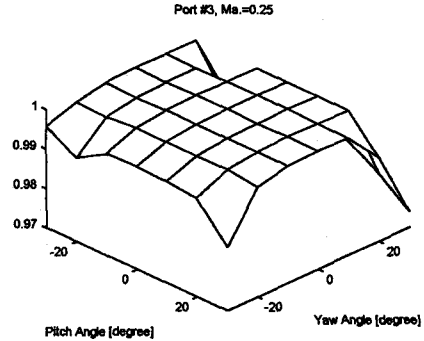
(b) 피치각의 변화에 따른 온도복원계수의 분포



(b) 피치의 변화에 따른 압력비의 분포



(c) 영각의 변화에 따른 온도복원계수의 분포



(c) 영각의 변화에 따른 압력비의 분포

그림 8 입사각의 변화에 따른 온도복원계수의 분포

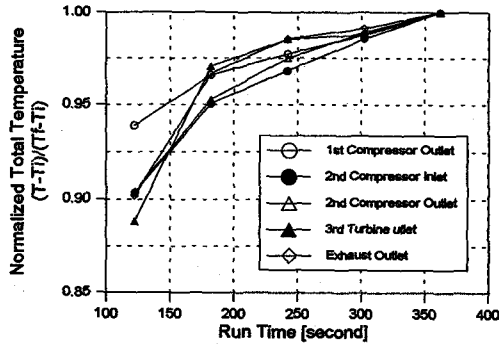
온도 범위에서는 2K 내외로 판단된다.

유동 입사각이 압력 측정에 미치는 영향

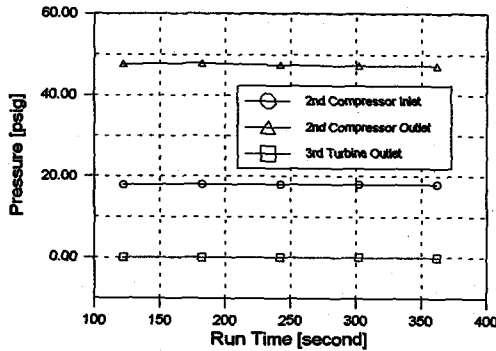
그림 9(a)는 레이크에 설치된 반경방향의 각 포

그림 9 입사각의 변화에 따른 압력비의 분포

트의 대해 요각의 변화에 따른 압력비를 보이고 있다. 요각이 $\pm 10^\circ$ 범위 내에서는 각 포트의 위치에 크게 관계없이 균일한 결과를 나타내었고 이는 요각의 영향이 $-10^\circ \sim +20^\circ$ 범위 이내에서는 포트



(a) 72% RPM 에서의 온도변화 추이



(b) 72% RPM 에서의 온도변화 추이

그림 10 72% 엔진 RPM에서의 온도 및 압력변화 추이

의 위치에 관계없이 측정의 정확도가 높다는 것을 보여준다. 그리고 - 요각이 증가함에 따라 정확도는 점점 감소하고, + 요각에 대해서는 + 20° 이후에는 정확도가 급격히 감소함을 보여준다.

이는 동일한 포트 내에 열전대와 압력관을 동시에 설치한 혼합형 레이크의 형상에 기인한 것으로서 이는 + 요각 지역에는 열전대가 설치되어 있는 관계로 해당 포트의 kiel에 압력관이 비대칭적으로 - 방향으로 치우쳐서 위치하여 kiel의 유동 평활화 효과를 적게 받기 때문이다.

그림 9(b)는 동일한 배열에서 피치각의 변화에 따른 압력비 분포를 보이고 있다. 온도복원계수의 결과와 마찬가지로 $\pm 30^\circ$ 범위 내에서 실제 값과의 차이가 매우 미미함을 알 수 있다. 또, 요각의 변화에 비해서도 대단히 미소한 변화를 보이며, 대칭적인 분포를 보이고 있다.

그림 9(c)는 레이크의 중앙에 위치한 3번 포트에서의 요각 및 피치각의 변화에 따른 압력비의 분포를 함께 나타낸 것이다. 가장 압력비가 낮은 경우에도 3% 정도의 오차를 보이고 있다. 이러한 압력

비의 오차는 작동유체의 압력이 높은 경우에는 큰 문제가 되지 않으나, 작동유체의 압력이 대기압에 가까운 터빈 출구지역의 경우에는 대기압보다 동압을 반영하지 못하고 정압에 가까운 압력을 측정하는 결과를 초래하여 실제 출구 압력 보다 낮은 압력을 측정할 수 있다. 또한, 이 결과에서 알 수 있듯이 유동의 입사각에 대한 영향이 나타날 수 있으므로, 엔진과 레이크의 상대적인 입사각을 0°로 설치하여 측정하더라도 유동 자체가 입사각을 가지고 흐를 때는 오차 발생에 유의하여야 한다.

4. 엔진에서의 온도 및 압력 측정

그림 10(a)는 72% 엔진 RPM에서 운전되고 있는 산업용엔진의 각 레이크에서 측정된 온도의 시간적인 변화 분포를 나타낸 것이다. 각 측정점은 $72 \pm 0.3\%$ 이내의 정속 운전조건과 0kW의 부하 조건하에서 측정된 것이다. 40초 이내의 초기 구간은 엔진의 가속을 위해 사용되었으며, 이후 72% RPM에서 약 6분간 운전되었다. 또한 외기 온도는 23°C, 외기 압력은 14.65psia이다.

시간이 지남에 따라 점차 측정 온도가 상승하며, 이는 엔진이 열평형에 도달하기 전까지는 엔진의 각 파트가 열적 평형에 도달하기 전까지는 열전대의 금속 피복 및 레이크의 몸체로의 열손실 우세하여 실제 측정 가능 온도보다 낮은 온도를 측정하게 되기 때문이다.

압축기 부분의 경우에는 단일 압축에 의한 온도 상승만이 열 공급원이 되기 때문에 엔진 운전 RPM의 변화 이외에는 급격한 온도 변화를 겪지 않는다. 따라서 시간이 흐름에 따른 측정온도의 일관성 있는 증가 경향이 관찰되며 점차 정상상태로 도달하고 있다. 또한 약 6분이 지난 경우에도 완전한 온도증가 성향을 가짐을 알 수 있으며 이는 아직 정상상태에 도달하지 못했음을 의미한다. 그림 4에서 열전대의 온도가 정상상태에 도달하는데 약 160초에 달했으나 실제 엔진에서는 레이크의 몸체로의 열손실에 추가하여 엔진으로의 열손실도 발생하므로 정상상태에 이르는데 더욱 오랜 시간이 소요됨을 알 수 있다. 특히, 가장 높은 온도 조건하에서 측정이 이루어지는 압축기 2단 출구에서의 온도는 가장 일찍 측정된 경우에 비해 최고 50°C 이상의 온도 상승을 보인다.

연소기의 후류 지역에 위치하는 레이크는, 작동유체가 매우 복잡한 난류장을 형성하여 고온가스 혹은 상대적으로 저온가스가 열점점에 매우 자주 영향을 주며, 고온부위이기 때문에 열점점에서 복사에 의한 손실 영향이 매우 큰 것으로 판단된다. 또한 시간 경과에 따른 터빈 블레이드(blade)의 틈

간극이 변화하여 터빈의 효율이 변화함으로써 출구의 평균온도가 변화할 수 있으며, 연소가스의 그을음 등에 의한 복사 열손실도 2~3배 증가할 수 있다.

그림 10(b)는 그림 10(a)와 동일한 조건에서 측정된 압력측정 추이를 표시한 것이다. 압력의 경우 주위 환경에 민감하지 반복성 있는 측정이 이루어진 것으로 생각된다. 엔진의 운전 조건이 상이함으로 인한 압축기의 압축효율의 차이로 인해 측정압력의 변화가 생긴 것으로 판단된다. 이번에 사용된 측정 자료의 경우 서로 상이한 조건의 자료를 취합한 것으로서 미소한 압력비의 변화를 예측하지 못한 것으로 보인다.

5. 결론

소형 turbo-shaft 가스 터빈 엔진 내부의 온도와 압력을 측정함에 있어서 온도와 압력의 반응속도에 대한 정성적인 검토가 이루어 졌다. 온도의 경우 노출형의 열전대는 반응 특성이 가장 좋으며, 열접점의 보호를 위한 구조물의 사용이 증가함에 따라 반응성은 악화된다. 압력의 경우, 30m압력관의 설치로 인해, 측정점에 설치한 압력변환기에 비해서는 응답속도가 저하된다.

온도측정에 있어서 열접점의 형상과 보호용 관 구조물의 형상 및 유동장의 영향이 검토되었으며, 입사각이 0° 인 경우 측정의 신뢰도가 높으며 입사각의 증가에 따라 신뢰도가 낮아진다. 이때 유효단면적이 감소되는 효과가 있는 요각 변화에 의한 온도 측정 오차가 유효단면적 변화를 초래하지 않는 피치각 변화에 비해 더욱 큰 오차를 초래한다. 또한 비대칭 형상을 갖는 혼합형 레이크를 사용함으로써 인한 비대칭적인 온도 측정 특성도 보이고 있다.

압력 측정에 있어서는 유동 방향과 유속 등의 영향이 분석되었으며, 온도 측정의 경우와 유사하게 영각의 변화에 대해 반응한다. 압력의 경우에는 온도 측정에 비해 넓은 범위의 입사각 및 유속에 대해 높은 신뢰도를 보였다.

산업용엔진의 실제 운전조건하에서의 온도 및 압력 측정이 이루어 졌으며, 온도의 경우 엔진이 열적 평형상태에 이르기까지는 꾸준한 증가의 경향을 보이며, 평형에 이르는 데는 10분 이상의 시간이 필요함을 알 수 있다. 압력의 경우 작동 유체의 압력을 민감하게 반영하며, 엔진 운전상태에 따라 측정값이 변화함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. D. Bradley, K. J. Matthews, "Measurement of High Gas Temperature with Fine Wire Thermocouples", Journal Mechanical Science Engineering, Vol. 10, No. 4, 1968.
2. 徳丸, 日本 航空宇宙技術研究所資料 676号, 1995.
3. Peter D. Smout, Steven C. Cook, "Simple Instrumentation Rake Designs for Gas Turbine Engine Testing", ASME, 96-GT-32.