◎ 특 집

터빈블레이드 냉각설계 기술 현황

홍용주* · 박병규* · 윤의수* · 오군섭*

1. 서 론

터빈입구온도의 상승은 가스터빈의 고효율화 및 비출력의 증대를 위하여 불가피하다. 그러나, 가스터빈의 소재로 내열재료를 사용하더라도 연소가스 온도의 상승에는 한계가 있으며, 연소기 라이너, 터빈 블레이드 등의 가스터빈 고온부품의 수명 및 신뢰성을 보장하기 위해, 온도를 가능한 낮고 균일하게 유지하기 위한 냉각이 필요하다. 한편 고온부품의 냉각을 위해서는 압축기로부터 추출된 고압의 냉각공기가 주로 사용되어지며, 냉각을 위한 과도한 양의 압축공기의 사용은 가스터빈의 효율 감소를 수반함으로, 손실을 최소화하면서도 최대의 냉각효율을 얻을 수 있는 효과적인 냉각기술이 필요하다.

가스터빈의 주요 핵심 고온부품인 터빈 블레이드의 냉각방식으로는 연소가스의 온도가 1,300~1,600 K 정도일 때 사용되는 내부냉각 (대류냉각, 충돌냉각)과 연소가스의 온도가 1,600 K 이상의 경우 사용되어지는 외부냉각(막냉각, 투과냉각, 열차폐코팅)으로 분류할 수 있다.

대류냉각(convection cooling)은 압축기로부터 추출된 냉각공기를 요철(rib), 못형휜(pin-fin) 배열 등이 부착된 굴곡이 있는 내부유로 통과시킨 후 후연부(trailing edge)로 배출시켜 압력면(pressure side)과 흡입면(suction side)을 냉각하고, 충돌냉각(impingement cooling)은 고속의 냉각공기를 전연부(leading edge), 후연부 등의 블레이드 면에 충돌시켜 국부적으로 발생하는 고온부를 냉각시키는 방법이다.

막냉각(film cooling)은 냉각구멍을 통해 정해진 분사각으로 냉각공기를 분사하여 고온의 연소가스와 블레이드의 표면 사이에 얇은 막을 형성함으로써 연소가스가 블레이드 표면과 직접 접촉하는 것을 방지하는 냉각방법이다.

최근에는 다공성 물질 재질의 블레이드를 사용하여 블레이드 표면에 냉각공기 막을 형성시키는 투과냉각(transpiration)이 연구되어지고 있으나, 복잡한 구조와 제작상의 어려움으로 인하여 아직 연구단계에 머물고 있어, 상용 가스터빈에서는 아직 채택되고 있지 않는 냉각방법이다.

또한 터빈입구온도 1,500 ℃급 이상의 고온 터빈의 1단 노즐의 경우에는 열부하가 매우 크기 때문에 압축공기를 이용한 냉각 뿐만 아니라, 증기냉각(steam cooling) 방법도 개발, 적용되고 있으며, 이 냉각방법은 냉각을 위해 활용된 증기가 고온의 연소가스와 혼합되는 것을 방지하여 효율의 상승을 도모하기 위하여 블레이드 내부 냉각유로로는 폐회로 방식이 사용된다.

한편 최근 국내 발전용 가스터빈은 주로 GE사, Westinghouse사 등의 선진 가스터빈 제작사의 터빈입구온도 1,300 ℃급이 도입, 운전되고 있어, 1,300 ℃급 가스터빈의 터빈 블레이드, 연소기 라이너 등 핵심 고온부품의 유지 보수 및 교체, 나아가 터빈 효율제고를 위한 설계 및 제작, 평가 등 핵심 기반 기술의 조속한 개발이 요구되어지고 있는 상황이다. 여기서는 한국기계연구원에서 수행중인 발전용 가스터빈 부품 국산화

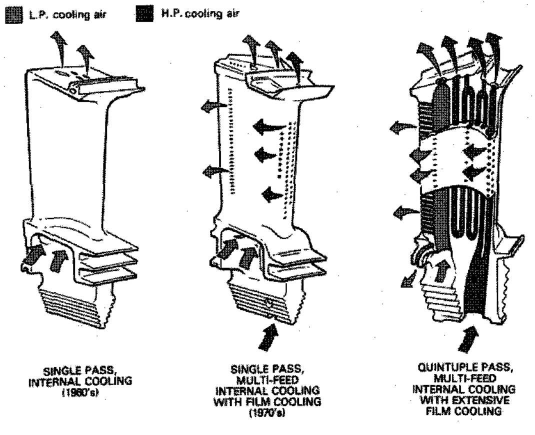


그림 1 터빈 블레이드 냉각기술 개발 경향

* 한국기계연구원, 열유체환경연구부
E-mail : yjhong@kimm.re.kr, bkpark@kimm.re.kr
esyoon@kimm.re.kr, ksoh@kimm.re.kr

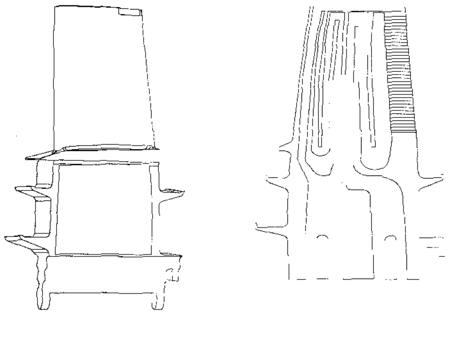
사업의 일환으로 진행중인 1,300 ℃급 가스터빈의 1단 동익의 설계와 관련된 주요 기술 및 적용현황을 간략히 소개하고자 한다.

2. 본 론

가스터빈의 1단 동익은 고온의 작동환경 뿐만 아니라 회전으로 인해 높은 응력상태에서 운전된다. 1,300 ℃급 가스터빈의 1단 동익은 고압단의 압축기에서 추출한 냉각공기를 가스터빈 내부 또는 외부의 유로를 통해 동익으로 공급하여, 대류냉각 및 막냉각 방법에 의해 냉각이 수행된다.

그림 2는 1,300 ℃급 가스터빈의 1단 동익으로, 동익 내부에 냉각을 위한 유로(serpentine passage)가 설치되어, 압축기로부터 추출되어 블레이드로 공급되는 냉각공기의 유량을 제어하며, 유로의 압력면과 흡입면에는 열전달 증가를 목적으로 하는 요철이 설치되어 있으며 블레이드의 상부(tip)와 후연에 냉각공기의 배출을 위한 유로가 설치되어 있다. 한편 1,300 ℃급 1단 동익의 경우에도 GE사의 7FA+, Westinghouse사의 W501F 모델 가스터빈의 경우 전연부 막냉각을 사용하고 있으며, 이 경우 내부 냉각유로의 형태는 그림 2와 다소 상이한 형태를 띠고 있다.

동익 내부의 냉각유로 설계의 적합성을 판단하기 위해서는 냉각효율의 파악이 필수적이며, 이를 위해서는 내부 냉각유로의 열전달 특성 뿐만 아니라 블레이드 압력면과 흡입면, 끝벽(endwall), 간극(tip clearance)의 열전달 특성 등의 내부유로의 유동저항, 열전달 특성 및 블레이드 표면의 열전달 특성을 고려하여야 한다.



a) 외부 형상 b) 내부 형상

그림 2 1,300 ℃급 1단 터빈 동익

블레이드 내부 냉각유로의 유동 및 열전달 특성은 냉각공기의 공급 압력 및 온도, 다양한 충돌각(angle of attack)의 요철로 인한 압력손실 및 열전달 특성변화 및 회전으로 인해 발생하는 코리올리(Coriolis) 효과와 회전원심부력 효과 등에 의한 내부 유로의 열전달 특성 변화 등의 인자를 복합적으로 고려하여야 하며, 냉각유로 설계단계에서는 주로 유로망 해석 기술이 많이 사용되어 지고 있다.

최근에는 급속한 컴퓨터의 발전에 힘입어 3차원 전산유동 해석(CFD) 기술을 사용한 연구의 결과가 발표되고 있으나, 설계단계에서 활용되기에는 아직도 많은 문제점을 지니고 있다.

유로망 해석을 위한 유로망 해석 방법의 적용 예로 Rolls-Royce사의 TACITUS, GE의 ENGINEOUS, NASA의 구심터빈 냉각유로 설계프로그램, Seimens사의 Flowmaster2 (영국 FMI사, 상용 유로망 해석 프로그램)를 이용한 해석 등이 있으나, 냉각유로 요소의 유로저항 및 열전달 특성은 자체의 시험설비를 사용하여 구축된 데이터베이스를 활용하고 있으며, 해석방법 및 해석결과는 각각의 터빈제조사들의 노하우로, 공개되어 있지 않는 상황이다.

국내에서는 나프탈렌 승화법 및 액정 화상법을 이용한 요철에 의한 열전달 향상 및 회전으로 인한 내부 유로의 열전달 특성과 관련된 연구가 일부 수행된 바 있으나, 내부 유로망 설계 및 해석과 관련된 체계적인 경험의 축적은 발전용 가스터빈 제조 경험이 없기 때문에 이루어지지 못한 상황으로, 주로 동구권 기술진의 설계 경험을 활용하고 있는 상황이다. 그림 3은 1,300 ℃급 가스터빈 1단 동익의 내부 냉각유로에 대한 유로망 모델링으로, 유로망은 유로 각 부분에서의 유로의 단면 크기 및 요철의 형태 및 블레이드 외부의 열전달 특성을 고려하여 다수의 유로 요소를 사용하여 구성한다.

블레이드 압력면과 흡입면의 열전달 특성은 블레이드 표면에서 발달하는 경계층 및 난류강도 등의 영향을 받으며 층류에서 난류 경계층으로의 천이과정 및 선단부 및 표면 열전달계수와 관련된 많은 실험적, 해석적 연구가 수행되어지고 있으며, 고차의 난류모형 및 벽면 처리 기법이 개발되어짐에 따라 전산 유체 역학 기술을 이용한 해석 역시 국내외에서 진행되고 있다. 그림 4는 러시아 연구진에 의해 개발되어진 표면 열전달계수 예측 프로그램을 통해 구하여진 1,300 ℃급 가스터빈의 1단 동익 표면 열전달계수로 블레이드의 전연부의 정체점(stagnation point)과 경계층의 천이

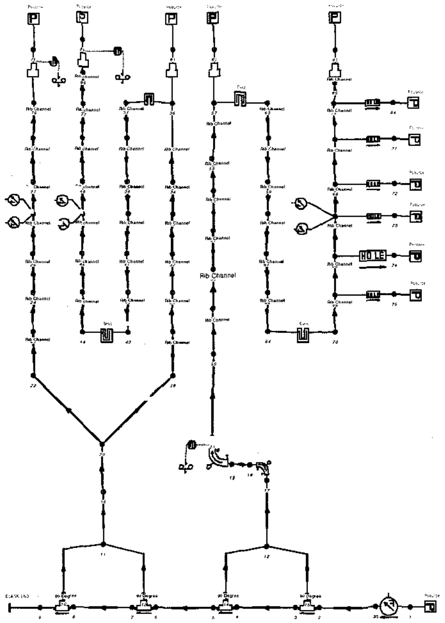


그림 3 터빈 동익 냉각유로 유로망

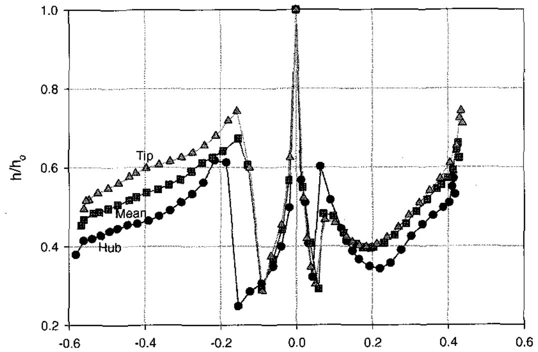


그림 4 블레이드 표면 열전달 계수 분포

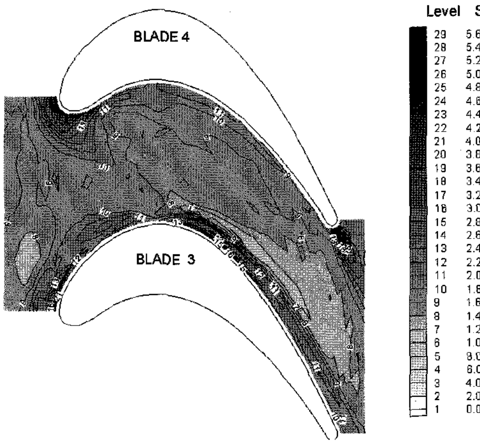


그림 5 끝벽의 St수 분포

발생부에서 큰 열전달계수의 변화를 나타내고 있다.

끝벽에서의 열전달 특성은 나프탈렌 승화법을 이용한 물질전달 실험을 통해 구하였으며, 터빈 익열 통로에서 생성되는 7개의 와류의 유동특성과 밀접한 관련이 있고, 그림 5는 끝벽의 물질 전달 특성을 나타낸다.

냉각 효율의 평가는 설계된 내부유로 및 익형을 3차원 솔리드 모델링을 통해 생성한 모델에 대한 블레이드의 온도장 해석을 통해 구할 수 있으며 온도해석의 수행결과 구한 블레이드 경계면 및 내부유로의 경계면에서의 온도를 다시 유로망 해석에 반영하여 새로운 내부유로의 열전달계수의 계산이 수행되어야 하며, 이 과정의 반복을 통해 최종적인 블레이드내의 온도장을 구하여 냉각유로 설계의 적합성을 판정할 수 있다. 최근 외국에서는 상용 열유동 해석 프로그램을 이용한 공력, 내부유로와 블레이드 온도장 해석을 결합한 복합 열전달 (conjugate heat transfer) 해석도 시도되고 있으며, 컴퓨터의 발전에 따라 점차 활발한 적용이 예측된다.

한편 이와 같은 설계 과정을 통해 설계된 터빈블레이드의 냉각유로는 실제 작동환경과 동등 온도의 고온익렬시험 (hot cascade test) 및 실제 터빈의 환경을 모사하는 고온터빈시험 (hot temperature turbine test) 등의 시험절차를 통해, 내구성 및 신뢰성을 검증 받아야 한다.

5. 결 론

가스터빈의 고효율화 및 비출력의 증대를 위하여 불가피하게 핵심 고온부품의 냉각기술이 필요하다. GE, Westinghouse, ABB 등 선진 제조사에서는 향후 증가할 것으로 예상되는 가스터빈 시장 및 고효율화의 추세에 발맞춰 연구투자의 범위를 확대하고 있으며, 그 결과 매년 10 ℃정도의 터빈입구온도의 상승을 나타내고 있다. 가스터빈의 냉각시스템은 각 제조사마다 고유의 설계방법과 제작기술에 따라 다소 차이가 있고, 기술의 이전을 기피하고 있으나, 국내에 도입되고 있는 가스터빈의 고온부품의 유지 보수 및 교체, 나아가 터빈 효율제고를 위한 설계 및 제작, 평가 등의 기술개발이 시급한 상황이다.

1,300 ℃급 발전용 가스터빈의 터빈 블레이드의 냉각설계 기술은 대류냉각, 막냉각 등의 기술이 복합적으로 사용되어지며, 국내의 기술수요에 따라 관련 연구가 활발히 추진되고 있으며 신뢰성 있는 설계도구 및 시험설비의 확보를 추진하고 있는 상황이다.