THEME 03

가스터빈 공기냉각용 고온 풍동 시험설비 및 측정기술 소개

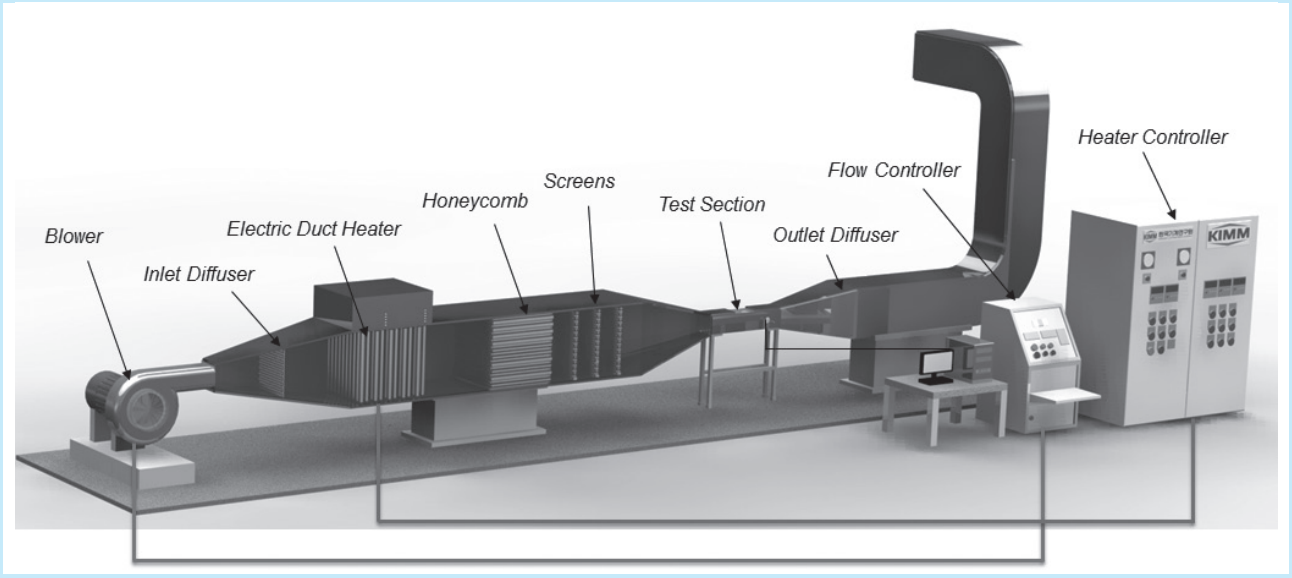
이 정 호 한국기계연구원 신기후체제R&D센터 센터장 | e-mail : jungho@kimm.re.kr

최근 정부의 친환경 에너지 정책에 따라 고효율 가스 복합 발전이 기존의 석탄 화력 복합 발전을 대체하는 추세에 있다. 발전용 가스터빈의 효율 향상에 따라 터빈 입구온도는 현재 1,600℃에 이르러 가스터빈의 냉각 부하가 크게 증가되어 고온에서의 가스터빈 냉각 기술이 더욱 중요하게 되었다. 이 글에서는 고온에서 가스터빈 공기냉각 기구를 개발하고 냉각 성능 평가에 필요한 고온 풍동 시험설비 및 측정기술을 간략하게 소개하고자 한다.

서 론

우리나라는 최근 정부가 펼치고 있는 에너지 및 환경 정책을 통해 석탄 화력 및 원자력 발전을 줄이고 가스 발전 및 재생에너지 발전으로 전환하는 추세에 있다. 따라서 기존의 석탄 화력 발전을 대체하는 LNG 가스 발전의 비중이 증가될 전망이다. 또한 미국, 일본, 유럽연합의 경우 가스 복합 발전 효율이 60% 이상이고 출력이 1,000MW에 이르는 H급 발전용 가스터빈이 이미 개발되어 왔다. 향후 가스 복합 발전 효율이 65% 수준의 post-H급 발전용 가스터빈이 앞으로 10년 이내에 개발될 전망이고, 발전용 가스터빈 효율 향상을 위해 터빈 입구온도는 1,600℃ 이상으로 증가하게 된다. 이는 터빈 블레이드 소재의 열 한계점인 900℃를 크게 상회하여, 터빈 블레이드의 열부하 및 열응력을 크게 증가시키고 있다. 따라서 터빈 입구온도의 증가에 대응할 수 있는 다양한 형태의 공기냉각 기술들이 연구 개발되어 왔다. 이러한 냉각기술 중 막 냉각(film cooling)은 고온가스와 접촉하는 부품 표면의 일정한 각도를 이루는 구멍 또는 슬릿을 통해 냉각공기를 유출시켜 블레이드의 외부벽에 저온의 얇은 막을 형성하여 고온 가스로부터 블레이드로의 열전달을 차단시키는 방법이다. 막 냉각 방법보다 진보된 냉각 방법으로는 마이크로 크기의 홀을 통해 블레이드 표면을 냉각할 수 있는 마이크로 냉각(micro cooling)이 연구 개발되고 있다. 최근 미국과 유럽에서 유출 냉각(effusion cooling)과 투과 냉각(transpiration cooling)으로 구성된 마이크로 냉각 기술이 개발되고 있으며, 앞으로 냉각 부하가 증가되는 post-H급 가스터빈에는 적용될 수 있다.

일반적으로 유출 냉각은 막 냉각의 냉각 홀 직경을 1mm 이하 마이크로 크기를 유지하며 터빈 베인 및 블레이드의 금속 표면에서의 냉각능을 향상시킬 수 있는 방법이다. 투과 냉각은 터빈 블레이드 표면을 금속 다공판으로 제작하여 냉각 공기를 고온 표면에 일정하게 누출시킴으로써 외벽에 지속적인 저온의 공기막을 형성하여 막 냉각에 비해 효과적인 냉각 방법이 될 수 있다. 이와 같이 가스터빈 공기냉각 기술 개발에 앞서 한국기계연구원에서는 고온 환경을 반영하여 마이크로 공기냉각 기구를 설계 개발하고 공기



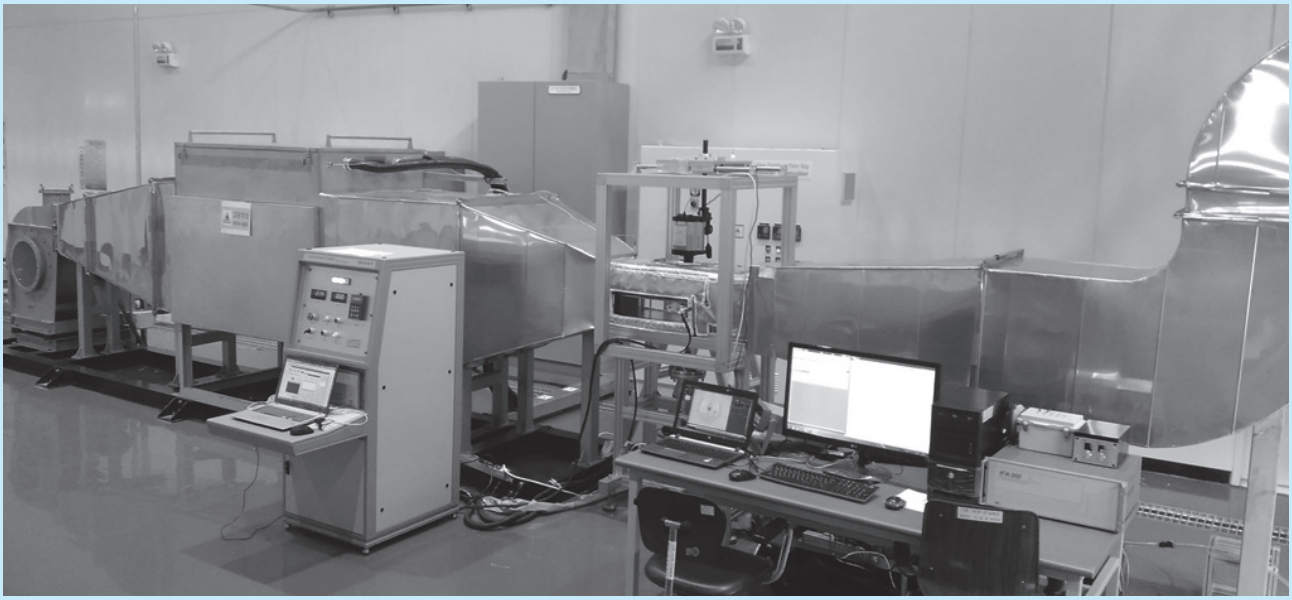


그림 1 가스터빈 공기냉각용 고온 풍동 개략도 및 사진

냉각 성능을 평가하기 위해서 고온 조건에서의 가스터빈 공기냉각을 구현할 수 있는 고온 풍동을 설계 및 제작하였다.

가스터빈 공기냉각용 고온 풍동 설계 및 제작

한국기계연구원은 2015년 그림 1과 같이 가스터빈 공기냉각용 고온 풍동을 설계 및 제작하였다. 공기냉각용 고온 풍동은 크게 송풍기(blower), 입구 확산기(inlet diffuser), 전기 덕트 히터(electric duct heater), settling chamber, 시험부(test section), 출구 확산기(outlet diffuser), 그리고 출구 덕트(outlet duct)로 구성되어 있다. 가스터빈 공기냉각용 고온 풍동의 주요 제원은 표 1에 나타나 있는 바와 같이

표 1 고온 풍동의 주요 사양

Main Specification	
Freestream Velocity	30m/sec (max)
Working Temperature	400℃ (max)
Size	10 ×3 ×2 (m^3)
Size of Test Section	250 ×250 ×1,200 (m^3)
Contraction Ratio	9 : 1
Electric Duct Heater	300kW
Turbulent Intensity	0.36% (at 25℃) / 0.94% (at 200℃)

표 2 고온 풍동의 주요 측정 및 성능 시험 대상

Major Experiments and Performance Testing	
Flow Visualization	Smoke Tube / Smoke Wire
Velocity Measurement	Pitot Tube / Hot-wire / Hot-film
Pressure Measurement	Pressure Transducer / Transmitter / ScaniValve
Temperature Measurement	Thermocouple, IR Thermography
Heat Flux Measurement	Heat Flux Sensor / Gauge

300kW급 전기 덕트 히터를 통해 공기 온도를 최대 400℃까지 사용할 수 있고, 풍동의 최대 속도는 30m/sec 정도의 아음속 풍동(subsonic wind tunnel)이다. 고온 풍동의 크기는 길이 10m, 높이 3m, 폭 2m 이고, 주요 측정이 이루어지는 시험부의 크기는 높이 250mm, 폭 250mm, 길이 1,200mm이다. 송풍기에서 공급된 공기는 300kW급 전기 덕트 히터를 거치면서 최대 400℃까지 전기적으로 가열할 수 있다. 본 고온 풍동의 유동 균일도를 판단하는 난류강도(turbulent intensity)는 상온 25℃에서 0.36% 수준으로 매우 우수한 유동 균일도를 갖는다. 200℃ 고온 조건에서의 난류강도는 0.94% 수준으로 고온에서도 유동 균일도가 우수한 성능을 보여준다.

가스터빈 공기냉각용 고온 풍동을 이용한 주요 측정 및 성능 시험 대상은 표 2에 나타낸 바와 같다. 가스터빈 베인 및 블레이드의 공기냉각 유동을 이해하기 위해 주로 smoke-tube 방법과 smoke-wire 방법을 이용하여 유동가시화한다. 시험부에서의 가스터빈 공기냉각 유동의 속도 측정은 주로 피토관(pitot-tube)과 열선유속계(hot-wire anemometry)를 이용하여 이루어진다. 시험부 내에서의 압력 측정은 주로 차압계를 이용하고 터빈 블레이드 표면에서의 공기냉각에 의한 압력 분포는 16 채널 ScaniValve를 이용하여 동시 측정한다. 온도측정은 열전대(thermocouple)과 적외선온도계(infrared thermography)를 사용한다. 적외선온도계를 이용하면 고온에서의 터빈 블레이드 표면 온도를 측정한다. 적외선은 공기를 거의 투과하기 때문에 막냉각 방식에서 측정하는 공기 막 온도를 직접 측정할 수 없기 때문이다. 가스터빈 공기냉각의 열유속 정보는 열유속센서(heat flux sensor) 또는 열유속게이지(heat flux gauge)를 통해 측정할 수 있다.

고온 풍동을 이용한 마이크로 공기냉각 성능 측정

가스터빈 공기냉각용 고온 풍동을 이용하여 유출냉각 및 투과 냉각과 같은 마이크로 냉각의 공기냉각 성능 측정을 위한 개략도는 그림 2에 나타낸 바와 같다. 고온 풍동의 시험부에 투과 냉각을 적용할 수 있도록 상온의 공기를 분출할 수 있는 노즐을 시험부 하단에 설치한다. 뾰족한 leading edge를 갖는 평판을 이용하여 경계층을 발달시키고 평판의 하류 부분에 평균 다공도가 200μm인 직사각형 다공성 평판을 설치하고, 다공성 평판을 통해 다양한 분사비(BR : Blowing Ratio) 조건에서 시험이 가능하도록 투과냉각의 냉각 공기량을 조절한다. 이때의 분사비는 투

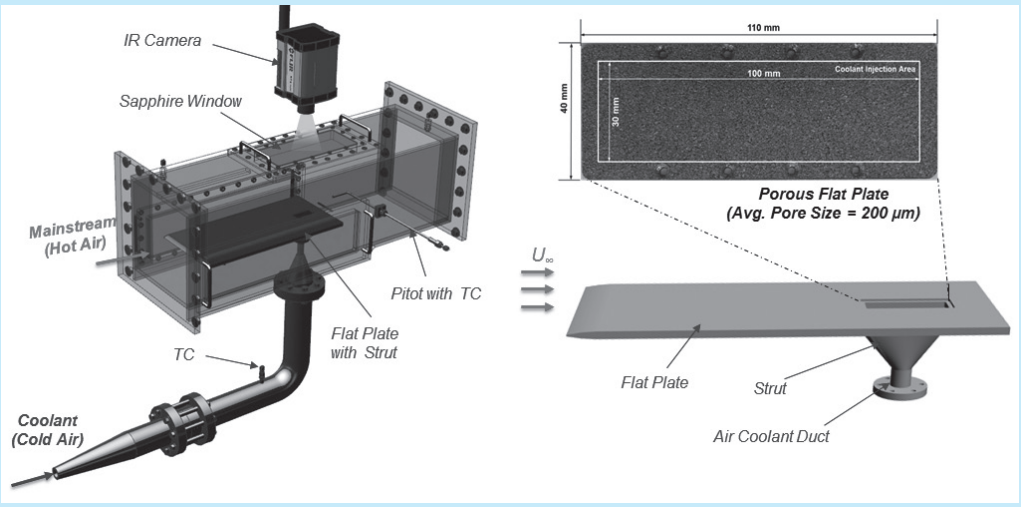


그림 2 투과 냉각을 이용한 공기냉각의 냉각성능 측정 개략도

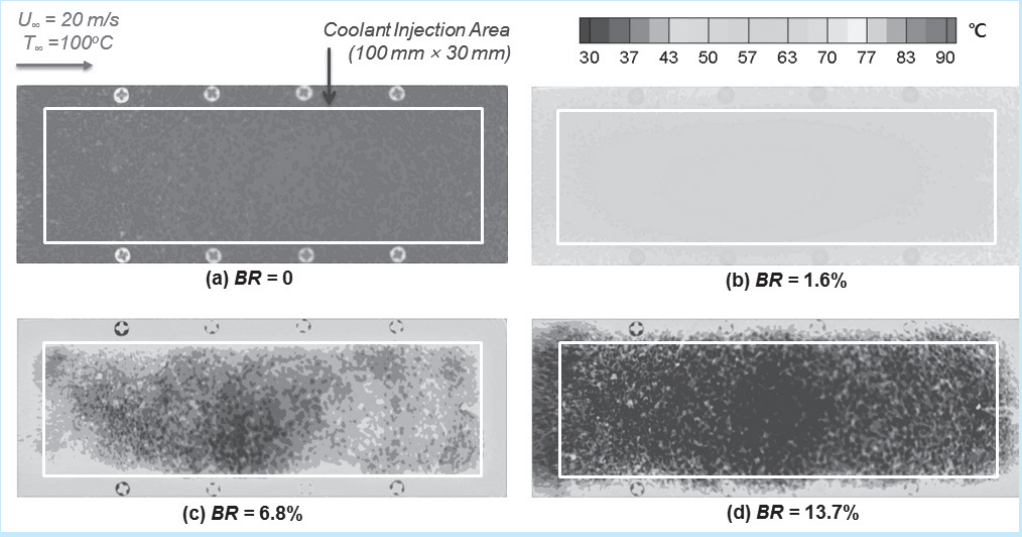


그림 3 투과 냉각을 적용한 다공성 금속 표면온도 측정 결과(주유동 속도 20m/sec, 주유동 공기 온도 100℃ 기준)

과 냉각 유동과 고온 주 유동의 질량유속의 비로 정의한다. 시험부 상부에 투과 냉각이 진행되는 다공성 금속의 표면온도를 측정하기 위해 적외선온도계를 설치하였다. 적외선온도계를 이용하여 고온 풍동 시험부 내부 온도를 측정할 때에는, 시험 대상 금속 표면뿐만 아니라 시험부 주위 고온의 영향으로 부가적인 복사열이 발생하기 때문에 매우 엄밀한 적외선 온도 보정이 요구된다. 적외선온도계와 측정하고자 하는 고온 표면 사이에 위치하는 투명 창은 적외선온도계의 측정 주파수 대역에 따라 적외선 흡수율에 큰 차이가 날 수 있기 때문이다. 본 측정에서 사용되는 3~5 μm 범위의 중파장대 적외선온도계를 사용할 때는 적외선 투과율이 높은 사파이어 평판을 사용하였으나, 가격이 비싸고 쉽게 다루기 어려운 점도 고려해야 한다. 더욱이 적외선온도계를 고온에서 사용하는 경우에는 대상 표면의 온도 변화에 따른 방사율(emissivity)을 사전에 측정해야 하고, 시험부와 동일한 기하학적 조건에서 흑체 보정기(blackbody calibrator)를 통해 상온에서 고온으로 흑체 보정기의 온도를 균일하게 유지하면서 적외선온도계를 정확하게 보정해야 한다. 특히 주위의 고온 환경을 포함하는 경우에서는 적외선온도계를 보정 이후에도 주위의 복사 열전달을 최소화할 수 있는 시험 환경을 만든 이후에 실제 표면온도를 추가로 보정해야만 올바른 표면온도 정보를 측정할 수 있다.

그림 3은 고온 풍동을 이용하여 투과 냉각이 주어

진 경우에서의 다공성 금속 표면에서의 온도 측정 결과를 보여주고 있다. 다공성 금속 평판을 통해 냉각 공기가 분출되는 투과 냉각의 경우 분사비의 변화에 따라 크게 다른 공기냉각 특성을 나타낸다. 투과 냉각의 분사비 정도에 따라 표면온도는 급격하게 변하게 된다. 이 때의 표면온도를 냉각유효도로 환산하면, 분사비 10% 수준의 상대적으로 낮은 분사비에서도 최대 70% 이상 수준으로 공기냉각 성능을 평가할 수 있다. 따라서 투과 냉각과 같은 마이크로 냉각은 현재까지 가스터빈 냉각의 주 냉각 기구로 사용된 막 냉각 대비 최대 50% 정도 냉각성능을 향상시킬 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 고온 풍동을 이용하여 측정한 냉각성능뿐만 아니라 유동가시화를 통해서도 마이크로 냉각이 주유동 대비 분출된 유동이 고온 금속 표면에 고르게 분포되고 있음을 확인 할 수 있다.

맺음말

에너지 분야의 글로벌 트렌드로 에너지 효율 향상을 통한 온실가스를 저감하는 기술이 많은 주목을 받고 있는 가운데, 고효율 가스터빈을 이용한 가스 복합발전은 친환경적인 발전 방안으로 자리 잡고 있다. 가스터빈 효율 향상에 따른 연소기 및 터빈의 열 부하 증가에 대응할 수 있는 마이크로 냉각기술은 고온 풍동과 같은 시험설비를 이용하여 효과적으로 개발될 수 있다. 나아가 더욱 신뢰성 있는 적외선 온도측정 기술 개발도 함께 이루어지면 국내 가스터빈 관련 측정기술 수준을 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.