

조 형 희 연세대학교 기계공학부 교수

| e-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

이 글에서는 가스터빈 고온부품에 대한 정확한 열전달 측정과 차세대 냉각기술 개발을 위해 연세대학교 열전달연구실이 보유하고 있는 가스터빈 열전달 실험장치를 소개하고자 한다.

소 개

가스터빈의 성능 증대를 위해 계속적으로 터빈입구온도가 증가하면서 연소기와 터빈을 구성하는 고온부품의 열적 파손 위험이 높아지고 있다. 따라서 안정적인 가스터빈 운영을 위해 고온부품을 보호할 수 있는 냉각기술의 개발 및 설계가 필요하다. 이를 위해 연세대학교 열전달연구실은 발전용 및 항공용 가스터빈을 구성하는 고온부품을 보호하고자 냉각기술에 대한 연구를 수행하고 있다. 가스터빈 고온부품의 냉각시스템 설계는 정확한 열전달 측정과 분석을 기반

으로 이루어져야 한다. 따라서 열전달연구실은 정확하고 정밀한 열전달 측정을 위해 고온부품의 외부 열전달을 측정하기 위한 터빈 환형 및 선형 익렬 장치, 내부 열전달을 측정하기 위한 수평 및 수직 내부유로 회전장치 등의 각종 실험장치와 나프탈렌 승화법, IR(Infrared) 기법, TLC(Thermochromic liquid crystals) 기법, PSP(Pressure sensitive paint) 기법 등의 다양한 실험기법을 활용하고 있으며 각각의 목적에 적합한 측정기법을 선정하여 열전달 실험 연구를 수행하였다. 또한 초임계 이산화탄소 열전달 실험장치, 미스트 냉각 실험장치 등 상변화 실험설비를 구

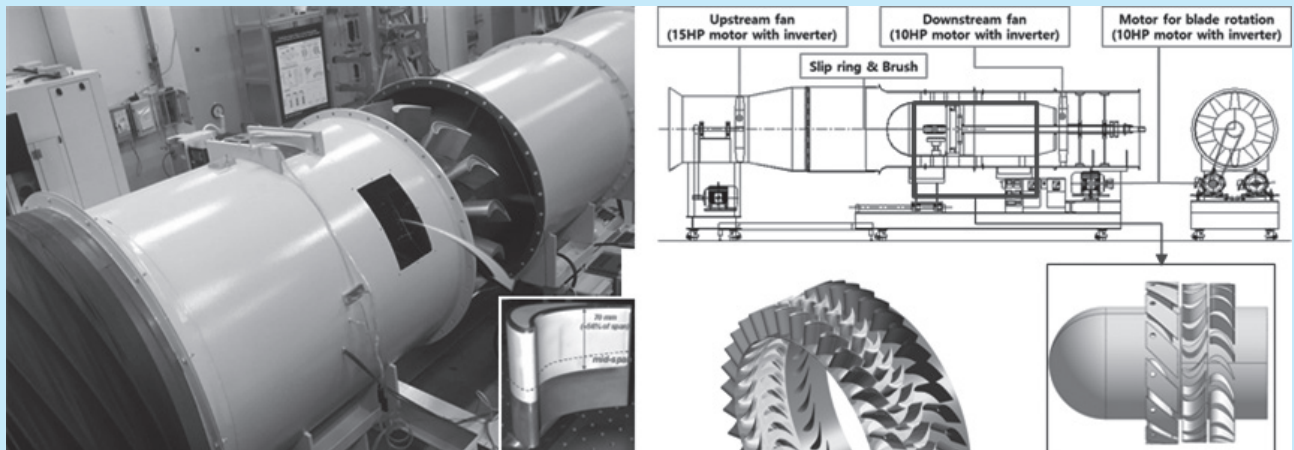
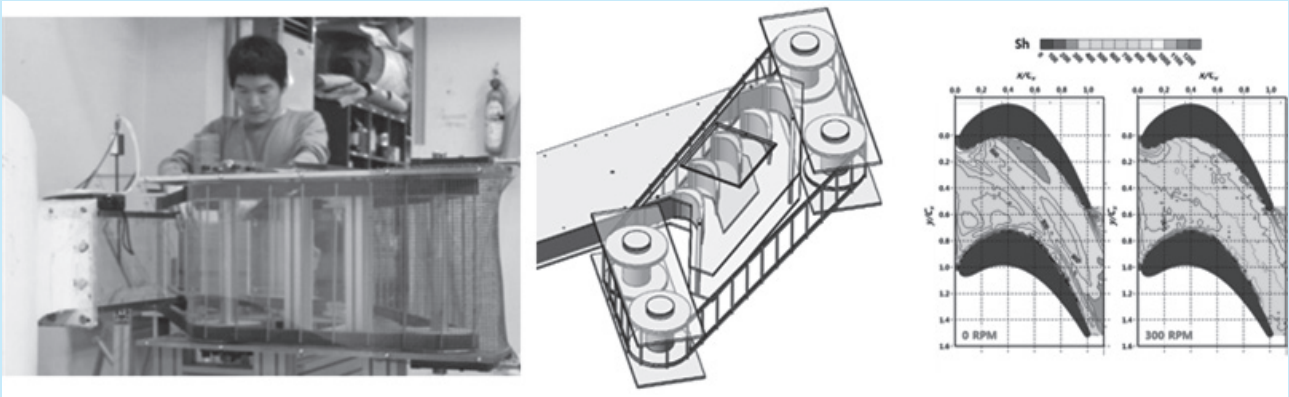
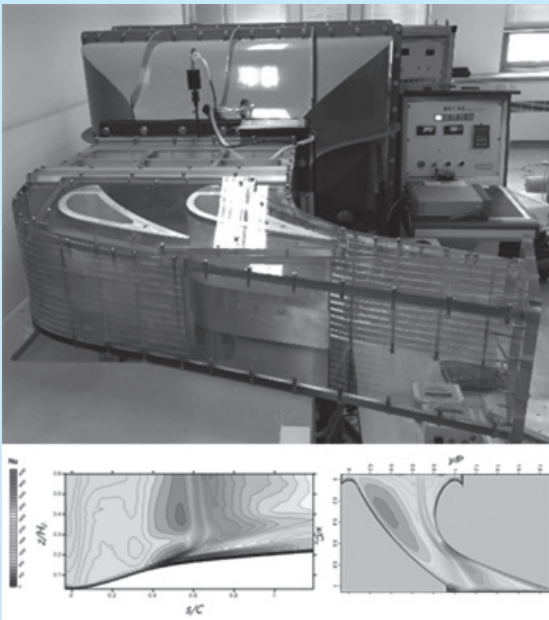


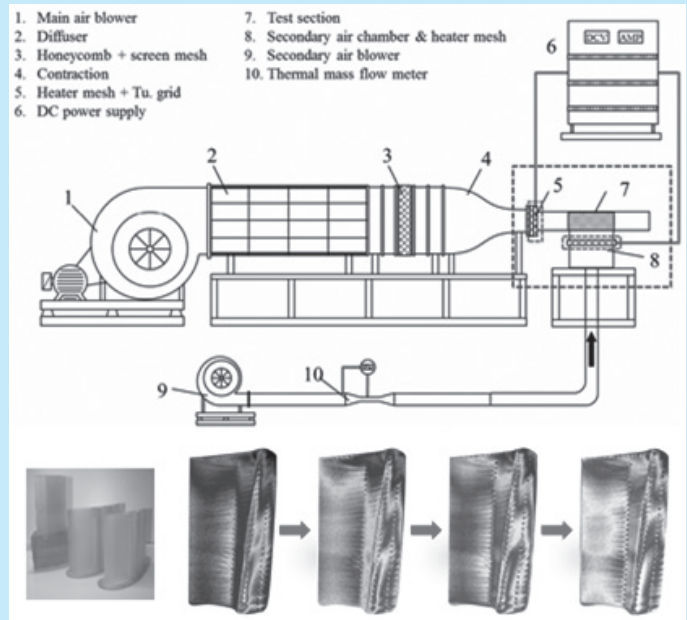
그림 1 터빈 1.5단 환형 익렬 장치



(a) 후류 발생기가 설치된 선형 익렬 장치



(b) 고속 선형 익렬 장치



(c) 냉각성능 평가를 위한 선형 익렬 장치

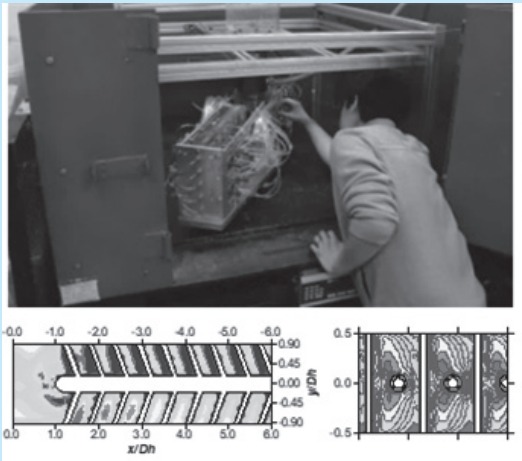
그림 2 터빈 선형 익렬 장치

축하고 연구를 수행함으로써 차세대 냉각기술을 개발하기 위한 연구기반을 쌓고 있다.

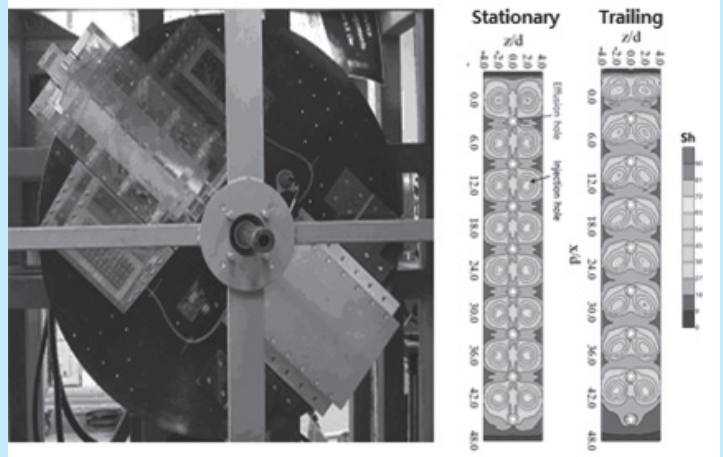
터빈 익렬 장치

연세대학교 열전달연구실은 터빈에서 나타나는 복잡한 유동 조건을 모사하기 위한 터빈 환형 및 선형 익렬 장치(Turbine annular & linear cascade)를 구

축하였다. 각 익렬 장치는 베인/블레이드의 외부 열전달을 측정할 수 있도록 설계되어 있으며 이를 통해 얻은 실험 결과를 기반으로 터빈 고온부품에 적합한 냉각설계를 수행하고 있다. 환형 익렬 장치는 터빈 블레이드의 회전과 환형 형상이 베인/블레이드 열전달에 미치는 영향을 파악하기 위해 사용되고 있으며 선형 익렬 장치는 여러 변수들을 독립적으로 분리하여 각 변수들이 베인/블레이드 열전달에 미치는 영향을



(a) 수평 내부유로 회전장치



(b) 수직 내부유로 회전장치

그림 3 수평 및 수직 내부유로 회전장치

분석하기 위해 사용되고 있다.

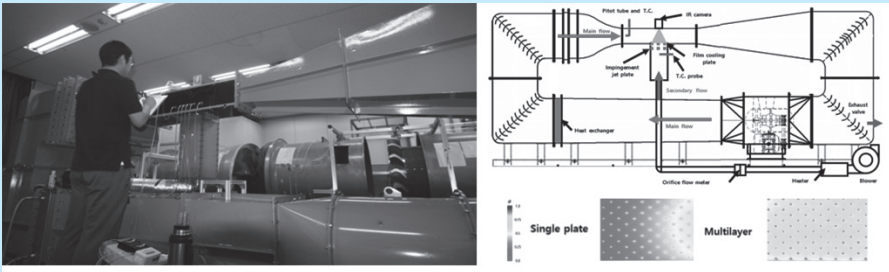
열전달연구실이 보유한 1.5단 환형 익렬 장치는 베인-블레이드-베인으로 구성되어 있으며 최대 700 rpm까지 블레이드 회전이 가능하다. 환형 익렬 장치의 외경은 0.9m, 내경은 0.62m이며 나프탈렌 승화법을 이용하여 선단부(Leading edge), 흡입면(Suction side), 압력면(Pressure side), 팁(Tip)을 포함한 블레이드 표면과 슈라우드(Shroud)와 엔드월(Endwall) 등 전체 표면에 대한 열전달 측정이 가능하다. 환형 익렬 장치를 이용한 베인/블레이드 열전달 측정을 통해 베인과 블레이드 간의 유동 간섭이 블레이드 열전달에 미치는 영향을 파악할 수 있다.

현재 열전달연구실은 다양한 유동 조건에 따른 베인/블레이드의 외부 열전달 변화를 실험을 통해 측정할 수 있도록 3대의 송풍형(Blowing type) 선형 익렬 장치를 보유하고 있다. 첫 번째 선형 익렬 장치는 300mm x 200mm (W x H)의 유로 입구 크기와 약 10 ~ 15m/s의 작동 입구 유속을 갖는다. 이 선형 익렬 장치에는 후류 발생기(Wake generator)가 설치되어 있으며 베인 후류에 의한 블레이드 표면과 팁, 엔드월의 열전달 변화를 측정할 수 있다. 후류 발생기는 다수의 봉이 회전하도록 설계되어 블레이드의 회전

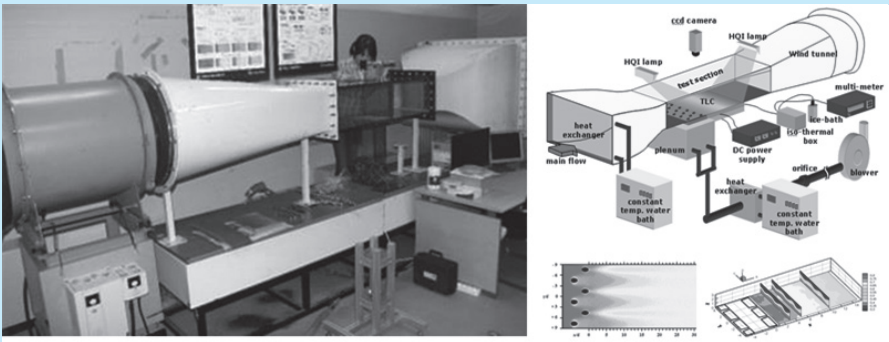
에 의한 베인 후연부의 상대 위치 변화와 그에 따른 후류 발생을 모사하였다. 후류 발생기의 봉은 최대 1,000rpm까지 회전이 가능하다. 두 번째 선형 익렬 장치는 30kW의 팬 블로워가 장착되어 있으며 약 45 m/s까지의 입구 유속으로 작동이 가능하다. 또한 250mm x 520mm (W x H)의 유로 입구 크기와 1% 이상의 유동 난류 강도를 갖는다. 세 번째 선형 익렬 장치는 30kW의 터보팬 블로워가 장착되어 있으며 약 30m/s까지의 입구 유속으로 작동이 가능하다. 유로 입구 크기는 320mm x 100mm (W x H)이며 0.8% 이상의 유동 난류 강도를 갖는다. 각 선형 익렬 장치에서는 나프탈렌 승화법, IR 기법, 천이 IR 기법, PSP 기법 등의 다양한 실험기법을 이용하여 실험이 가능하도록 설계되어 있으며 고온부품 냉각시스템에 대한 냉각성능 평가에도 사용된다.

고온부품 냉각기술 냉각성능 측정 실험장치

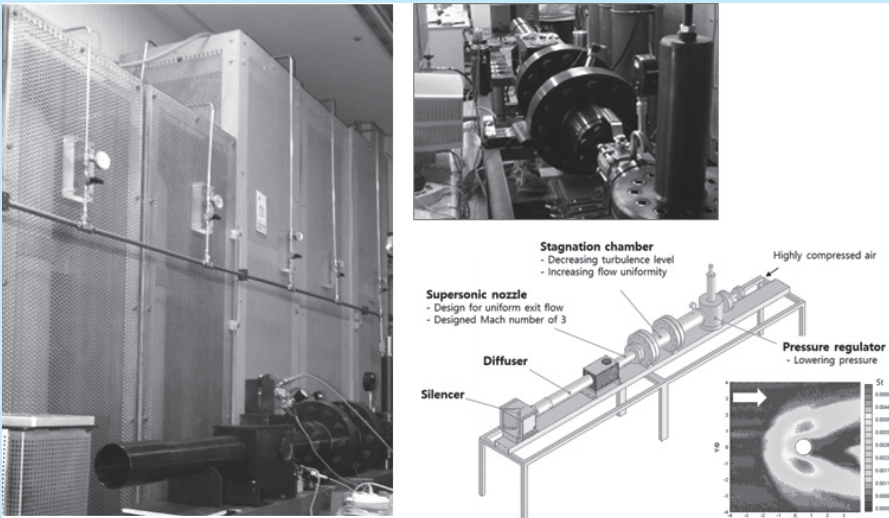
연세대학교 열전달연구실은 냉각시스템을 설계하고 냉각성능을 향상시키기 위해 고온부품의 외부 열전달 측정뿐만 아니라 여러 냉각기술에 대한 내/외부 열전달 실험을 수행함으로써 냉각성능을 평가하고



(a) 폐루프 풍동



(b) 흡입형 풍동



(c) 초음속 풍동

그림 4 외부냉각 실험을 위한 풍동 및 초음속 풍동

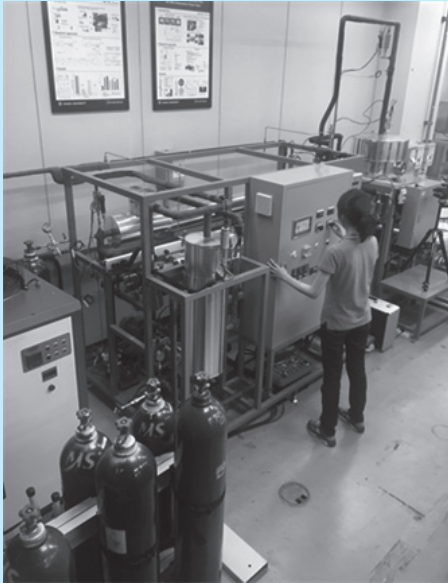
있다. 열전달연구실은 내부냉각기술인 내부유로 요철냉각, 덤플냉각, 핀-휀 냉각, 충돌제트 냉각 등과 외부냉각기술인 막냉각을 포함하는 다양한 종류의 가스터빈 냉각기술에 대한 열전달 실험을 수행할 수

있는 실험장치를 보유하고 있다.

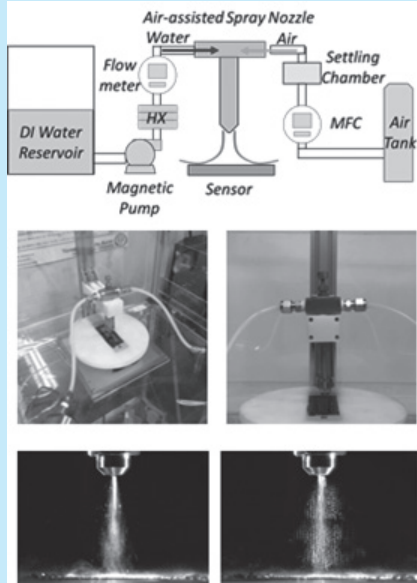
열전달연구실은 회전하는 터빈 블레이드의 내부 냉각성능 평가를 위해 수평 방향과 수직 방향으로 회전이 가능한 내부유로 실험장치를 보유하고 있다. 수평 및 수직 내부유로 회전장치의 회전판 직경은 1m이고 각각 약 1,000rpm과 2,000rpm까지 회전이 가능하다. 회전장치에는 회전 속도를 측정할 수 있는 회전속도계와 회전 실험 중에도 데이터를 받을 수 있는 블루투스 장치가 설치되어 있다. 각 실험장치에서는 내부유로의 열전달을 상세히 측정할 수 있도록 나프탈렌 승화법을 사용하여 내부유로 요철냉각, 충돌제트 냉각, 핀-휀 냉각 등 내부냉각에 대한 냉각성능 평가가 이루어졌다.

열전달연구실은 내부냉각뿐만 아니라 외부냉각인 막냉각에 대한 냉각성능 평가를 위한 풍동을 보유하고 있다. 연구실이 보유하고

있는 폐루프 풍동(Closed type wind tunnel)에서는 IR 기법을 이용하여 막냉각 및 충돌/유출 냉각의 열전달과 단열 막냉각 효율(Adiabatic film cooling effectiveness) 및 총 막냉각 효율(Total



(a) 초임계 이산화탄소 열전달 실험장치



(b) 미스트 냉각 실험장치

그림 5 차세대 냉각기술 실험장치

film cooling effectiveness)의 측정이 가능하다. 측정부는 300mm x 200mm x 1,000mm (W x H x L) 크기를 갖는다. 180m³/min의 용량을 갖는 터보 블로워가 장착되어 있으며 주유동의 작동 유속은 약 50m/s까지 가능하다. 또한 나프탈렌 승화법, IR 기법, TLC 기법, PSP 기법 등으로 막냉각 효율에 대한 측정이 가능한 흡입형 풍동(Suction type wind tunnel)을 갖추고 있다. 흡입형 풍동의 유로 입구부는 400mm x 300mm (W x H)의 크기를 갖고 있으며 약 10~20m/s의 작동 유속에서 실험이 이루어지고 0.4% 이상의 난류 강도를 갖는 유동 조건의 모사가 가능하다.

열전달 연구실은 아음속에서 천음속 영역에 이르는 다양한 유동 조건에서 작동되는 터빈 고온부품의 열전달을 분석하기 위해 초음속 풍동(Supersonic wind tunnel)을 보유하고 있다. 초음속 풍동의 고압탱크는 150MPa에 이르며 1.8m³의 용량을 갖는다. 초음속 노즐부에서 마하 3에 이르는 유속이 나타나며 약 10초 동안 작동이 가능하다. 해당 초음속 풍동에

서는 IR 기법과 PSP 기법을 이용하여 열전달 및 압력 분포를 측정할 수 있다.

차세대 냉각기술 실험장치

연세대학교 열전달연구실은 가스터빈 고온부품에서 사용되고 있는 기존 냉각기술의 냉각성능 증대를 위한 실험장치를 구축했을 뿐만 아니라 차세대 냉각기술 개발을 선도하기 위한 상변화 실험장치도 구축하여 이를 이용한 실험을 수행 중이다.

열전달연구실은 차세대 가스터빈으로 주목받고 있는 초임계 가스터빈에 접목 가능한 초임계 냉각시스템에 대한 연구를 선도하고자 초임계 이산화탄소 열전달 실험장치(Supercritical carbon dioxide heat transfer experimental loop)를 구축하였다. 초임계 실험장치에서는 이산화탄소를 작동유체로 하며 아임계(Subcritical)부터 초임계 상태까지 실험이 가능하다. 작동 압력 범위는 70~120bar이며 작동 온도 범위는 25~62°C이고 작동 유량 범위는 0.1~1.8kg/min이다. 초임계 실험장치에서는 마이크로 RTD 센서(Micro RTD sensor)를 사용하여 열전달 측정을 한다.

또한 냉각성능을 향상시키기 위해 유체-기체 간의 상변화를 이용한 미스트 냉각 실험장치를 구축하였고 이에 대한 연구를 수행 중이다. RTD 센서를 이용하여 미스트 냉각기술의 열전달을 측정하고 있으며 PIV(Particle image velocimetry) 가시화 기법을 이용하여 미스트의 유동 특성을 분석하고 있다.