

가스터빈 고온부품 운전 중 연소코팅 기술 개발



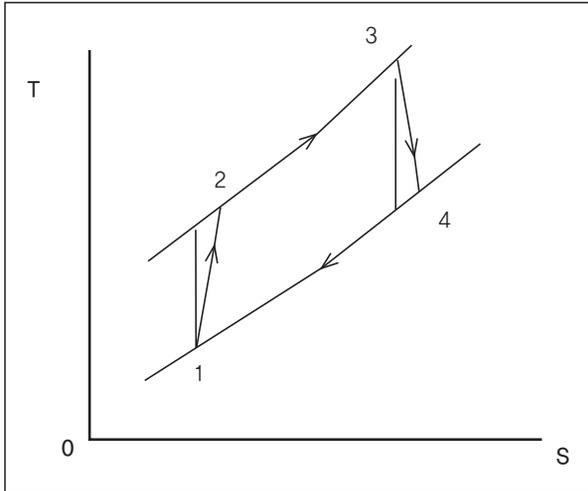
김민태
KEPCO 전력연구원 책임연구원

1. 개황

가스터빈은 내연기관의 일종으로 연료 에너지를 기계적인 에너지로 변환시키는 역할을 하며 항공기를 추진하거나 발전기를 돌려 전기를 생산하는데 사

용된다. 가스터빈의 열역학적인 과정은 그림 1과 같이 T-s 선도로 설명할 수 있다. 이상적인 사이클인 Brayton 사이클에서는 기체는 단열압축과 단열팽창을 하기 때문에 이 과정에서 엔트로피(s) 증가가 없다. 하지만 실제 시스템에서는 그림 1과 같이 압축

(1 → 2)이나 팽창(3 → 4)과정에서 엔트로피가 증가하여 에너지 손실로 이어진다. 일반적으로 터빈입구 온도 (Turbine Inlet Temperature, TIT) 또는 연소 온도(그림 1의 T3)가 높으면 전체 에너지 투입 대비 손실이 감소하기 때문에 가스터빈에서의 효율이 높아진다.



[그림 1] 가스터빈의 온도(T) 대 엔트로피(s) 선도

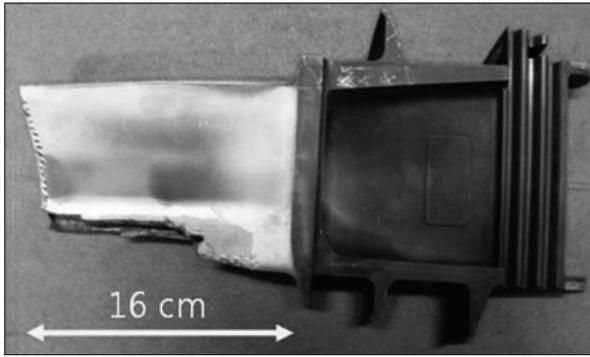
최근 국내에서 설치, 운전되고 있는 발전용 대형 가스터빈의 효율은 30%, 배기를 이용하여 증기터빈을 돌릴 경우 복합효율은 50%를 상회한다. 이러한 수치는 30년 전 가스터빈이 발전용으로 도입되기 시작했을 때의 ~10%에 비해 매우 높은 값이다¹⁾. 가스터빈의 효율 상승은 고온부품의 설계 및 소재/제작 기술의 발전이 주된 요인으로, 1000°C 이상의 TIT에서 2~3년 이상의 장기간 운전에도 심각한 손상이 없다. 일반적으로 고온부품은 내열금속인 니켈기 초합금으로 제작되지만 1000°C 이상의 고온에서 장시간 사용하기 위해서는 추가로 열차폐 코팅 (Thermal

Barrier Coating, TBC)이나 부품 내부의 냉각홀에 의한 냉각으로 초합금 모재를 보호하고 있다. 이러한 기술의 적용으로 최근에 개발된 발전용 대형가스터빈의 TIT는 1500°C에 달하며 효율도 복합발전모드에서 60%까지 얻어진다²⁾.

2. 가스터빈 고온부품 열차폐 코팅

가스터빈에 적용되는 TBC는 보통 이트리아로 안정화된 지르코니아(Yttria-Stabilized-Zirconia, YSZ)가 주성분인 탑코팅(Top Coating)과 Al의 농도를 높인 니켈기 초합금(Ni(Co)CrAlY)의 본드코팅으로 구성된다. 본드코팅은 금속모재의 내산화성을 높이기 위해 두께 ~100μm로 입혀진다. YSZ는 열팽창 계수가 니켈기 초합금과 유사하며 열전도가 낮아 모재를 열적으로 보호하는 탑코팅으로 선호된다. 탑코팅 25μm 당 연소온도를 15°F 차단하는 것으로 알려져 있다³⁾. YSZ가 TBC로서는 좋은 소재이지만, YSZ 내에서의 산소의 확산계수가 타 세라믹 소재에 비해 꽤 높다는 단점이 있다⁴⁾. 이러한 특성으로 인하여 YSZ 탑코팅 층은 본드코팅과 계면에서 생성되는 열적인 산화물 (Thermally Grown Oxide, TGO)의 생성을 효과적으로 억제하지 못하고 있다. TGO는 대부분 알루미늄이 주성분인 산화물로서 가스터빈 운전 중에 본드코팅의 알루미늄의 선택적 산화로 본드코팅 표면에 10~20μm 두께로 형성된다. 알루미늄이 주성분인 TGO는 그 자체로도 본드코팅의 추가 산화를 차단할 수 있지만, 탑코팅과의 계면에 TGO가 존재하면, TGO층 부근에 형성되는 응력의 작용으로 TBC의 내구성을 저해할 수 있으며 가스터빈 운전 중

1) M.P. Boyce, "Gas Turbine Engineering Handbook" 2nd edition, Gulf Professional Publishing, 2001.
 2) U. Schulz, C. Leyens, K. Fritscher, M. Peters, B. Saruhan-Brings, O. Lavigne, J.-M. Dorvaux, M. Poulain, R. Mévrel, M. Caliez, Aerospace Sci. Technol. 7 (2003) 73-80.
 3) D. Vandergriff, "The Life Cycle Value of TBC Coatings on MS7001E/EA 1st Stage Nozzles and Buckets", Power-Gen 2000 Proceedings, Orlando, FL, Nov. 2000.
 4) R. Devanathan, W.J. Weber, S.C. Singhal, J.D. Gale, Solid State Ionics 177 (2006) 1251-1258.



[그림 2] 손상된 가스터빈 터빈블레이드

에 응력이 주기적으로 변하기 때문에 그 손상은 촉진된다⁵⁾. TBC가 손상되면 모재가 보호를 받지 못하기 때문에 그림 2와 같이 부품이 급속히 열화 되어 손상된다.

또한 TBC는 1200°C 이상에서 장기간 운전되면 탑코팅의 상변화^{6, 7)}, 또는 연소공기 중에 불순물로 유입되는 Calcium-Magnesium-lumino-Silicate (CMAS) 퇴적물로 인하여 손상을 입기도 한다^{8, 9, 10)}. 1200°C 이상에서 CMAS는 액상으로 존재하며 TBC에 스며들어 YSZ를 용해하고 이로 인해 YSZ 안정상이 변질되어 TBC의 조기 손상을 초래한다. 최근의 연구는 이러한 가스터빈의 고온 산화 및 부식 환경에서 보다 오랫동안 사용할 수 있는 TBC를 개발하는데 중점을 두고 있다.

3. 운전 중 연소코팅 기술 개발

가스터빈 운전 중 연소코팅 (In Situ Combustion

Coating, ISCC) 기술은 상기에 언급한 YSZ 탑코팅의 단점을 개선하기 위해 제안되었다¹¹⁾. 'in situ'라는 단어가 의미하듯이 이 기술은 가스터빈 운전 중에 연소기 내부로 코팅제를 공급하여 고온의 연소가스와 접하는 모든 고온부품의 표면에 산화물로 구성된 일종의 재를 퇴적하도록 하는 것을 특징으로 한다¹²⁾. 이 기술은 그 원리가 화염 내에서 생성된 산화물이 모재의 표면에 코팅되도록 하는 연소화학증착 (combustion chemical vapor deposition, CCVD) 방법과 유사하다. CCVD 방법은 Hunt 등¹³⁾이 언급한 바와 같이 대기 중에서 부품 상에서 용이하게 산화물을 입힐 수 있는 방법이며 적절한 코팅제(주로, 금속유기화합물)를 선택하면 다양한 산화물을 코팅할 수 있다. ISCC 방법은 공정 특성 상 추가적인 장점이 있다. 코팅제 공급 장치를 구비하면, 코팅공정은 가스터빈이 갖추고 있는 설비와 가스터빈 연소 에너지를 이용하기 때문에 매우 경제적이며 친환경적이다. 더욱이, 이 코팅공정은 수시로 반복할 수 있기 때문에 설비의 유지보수 측면에서 더 매력적일 수 있다.

이와 같은 ISCC 기술은 모형항공기에 탑재되는 초소형 가스터빈을 이용한 실험실 연구에서 처음으로 시도되었다[그림 3 참조].

최초의 연구에서 터빈휠을 탄소강의 일종인 SM45C로 가공하여 ISCC의 효과를 시험하였다. 이 연구에서는 가스터빈 출구온도 750°C에서 실리콘 유기화합물이 포함된 제트유를 연료로 사용하여 ISCC을 수행하였다¹¹⁾. 실리카가 포함된 산화물이 터빈블레이드 표면에서 관찰되었고 이로 인하여 SM45C 터

5) W.R. Chen, X. Wu, B.R. Marple, P.C. Patnaik, Surf. Coat. Technol. 197 (2005) 109-115.

6) H.F. Chen, Y.F. Gao, Y. Liu, H.J. Luo, J. Alloys Compd. 480 (2009) 843-848.

7) Z.-G. Liu, J.H. Ouyang, Y. Zhou, J. Li, X.L. Xia, J. Eur. Ceram. Soc. 29 (2009) 647-652.

8) Xi Chen, Surf. Coat. Technol. 200 (2006) 3418-3427.

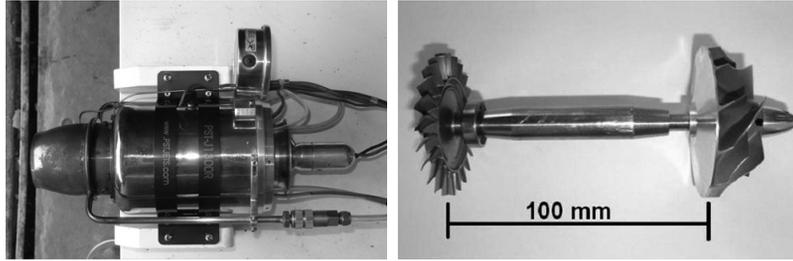
9) R. Wellman, G. Whitman, J.R. Nicholls, Int. J. Refractory Metals & Hard Materials 28 (2010) 124-132.

10) J. Wu, H. Guo, Y. Gao, S. Gong, J. European Ceramic Soc. 31 (2011) 1881-1888.

11) M.T. Kim, D.S. Kim, O.Y. Oh, Progr. Org. Coatings, 64 (2009) 281-286.

12) M.T. Kim, D.S. Kim, W.Y. Oh, Met. Mater. Int. 16 (2010) 129-136.

13) A.T. Hunt, W.B. Carter, J.K. Cochran Jr., Appl. Phys. Letts. 63 (2) (1993) 266.

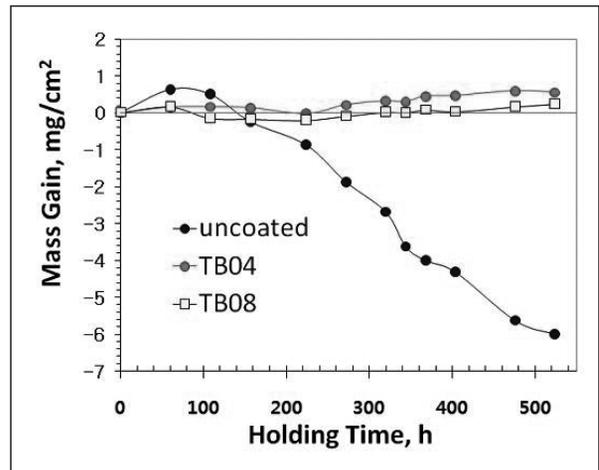


[그림 3] 모형항공기용 가스터빈과 내부의 터빈휠 및 압축기

빈휠의 내구성이 예상치를 훨씬 상회하였다. 니켈기 초합금의 일종인 IN718 터빈휠로 대체한 경우 실리카 층이 블레이드 앞뒷면에 미려하게 코팅되었음을 확인하였다¹²⁾.

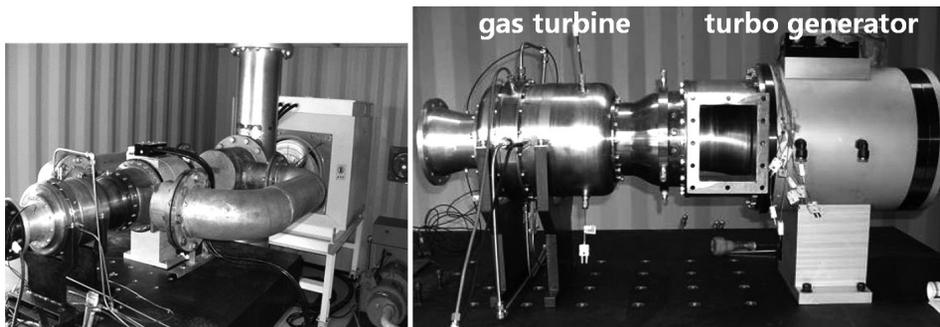
코팅된 터빈블레이드는 고온에서 내산화시험을 수행한 결과 그림 4와 같이 매우 우수하였다(그림 4에서 코팅된 블레이드는 1050°C의 고온에서 코팅되지 않은 블레이드에 비해 무게 변화가 거의 없음을 알 수 있다¹⁴⁾).

또한 초소형 가스터빈을 장기시험을 통하여 ISCC 공정으로 TIT를 100°C 상승해도 모재를 충분히 보호할 수 있음을 확인하였다¹⁵⁾. 한편, 전력연구원에서는 TIT가 850°C인 100kW급의 축류형 가스터빈을 제작하여[그림 5 참조] ISCC시험을 수행하였고 그림 6과 같이 연소실, 터빈노즐, 블레이드 등에 코팅 층이 형성되었음을 확인하였다. TIT를 100°C 상승하여 950°



[그림 4] ISCC 공정으로 코팅된 블레이드에 대한 내산화시험 결과 (TB04: 4시간 코팅, TB08: 8시간 코팅된 터빈 블레이드)

C에서 운전한 후 그 효율과 출력변화를 관찰하였다. 그 결과 효율은 12~14%로 상승하였고 출력은 42% 증가하였다¹⁶⁾.

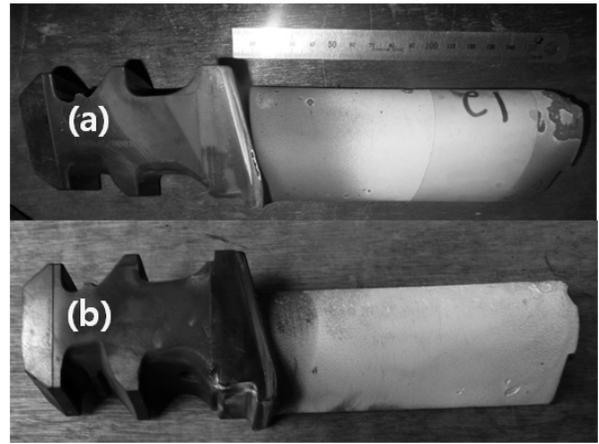


[그림 5] 전력연구원이 보유한 100kW급 축류형 가스터빈

14) M.T. Kim, D.S. Kim, Met. Mater. Int, 17 (2011) 479-484.
 15) M.T. Kim, D.S. Kim, Surf. Coat. Technol. 206 (2011) 117-123.
 16) M.T. Kim, S.W. Lee, Appl. Therm. Eng. 40, (2012) 304-310.



[그림 6] ISCC 공정으로 내열, 내산화 코팅층이 입혀진 100k급 가스터빈 부품



[그림 7] 100MW급 발전용 대형가스터빈의 1단 블레이드 상에 형성된 내열, 내산화 코팅: (a) ISCC 전, (b) ISCC 후.

4. 운전 중 연소코팅 기술의 대형가스터빈에의 적용

최근 전력연구원은 남동 및 중부발전과 공동으로 ISCC 기술을 세계 최초로 복합발전용 대형가스터빈에 성공적으로 적용하였다. 1~2 시간에 걸친 코팅시험 후 가스터빈 정비를 위하여 개봉, 고온부품을 관찰한 결과 대부분의 가스터빈 고온부품 상에 코팅 층이 형성되었음을 확인하였다. 특히, 그림 7과 같이 코팅되지 않은 부품과 코팅된 부품을 비교

해보면 그 코팅상태를 확인할 수 있는데, 장기 운전으로 탑코팅이 탈락된 부분에도 코팅 층이 형성되어 부품의 수명 상승을 기대할 수 있게 하였다. ISCC 공정 중에 운전 상태는 특별한 징후 없이 전반적으로 양호하였으며, 공정 전후의 운전 데이터를 분석한 결과 가스터빈 효율이 소폭 상승하는 결과가 나타났는데 이는 블레이드 끝단(Tip)과 케이싱 사이의 표면에도 코팅 층이 형성되어 연소가스 밀봉효과가 개선되었고 연소 코팅 층의 단열특성에 인한 것으로 잠정 결론지었다. 