대한기계학회 2000년도 추계학술대회논문집 A pp. 193~198 KSME 00F018

가스터빈 블레이드 재질 Inconel 738LC의 소형펀치시험 거동에 관한 연구

장성호, 유근봉, 최기순*

A Study on the Small Punch Test Behaviors of Gas Turbine Blades Material Inconel 738LC

S.H.Jang, K.B.Yoo, and G.S. Choi*

Key Words : Small Punch Test(소형펀치시험), Gas Turbine(가스터빈), Blade(블레이드) Remaining Life(잔존수명), Life Assessment(수명평가)

Abstract

The small punch test have been developed to evaluate the material strength of the power plant components. This small punch test specimen is very small than the conventional strength test specimens. Korea Electric Power Research Institute (KEPRI) have been applying this test to assess accurately the life of thermal power plant and enhancing the reliability. The small punch test for gas turbine blades is under development. It's possible to compare the relative strength among the same materials having different operation histories.

In this paper, the strength reductions of gas turbine materials are investigated by the small punch tests. All materials shows the almost same strength and deformation with the allowable deviation. At the same test temperature, the damaged material has the maximum load value. The strength reduction is not shown in this small punch test results.

1. 서 론

가스터빈은 비교적 다른 설비에 비하여 저가이므로 투자비 부담이 적고 다른 방식의 발전 플랜트 보다 건설기간이 짧으므로 전력수요예측의 불확실성 등을 고려하여 가스터빈 설비의 건설이 증가하였으며 지역난방과 연계한 복합화력의 경우 높은 열효율을 가지므로 1990년대에 이르러 국내에서는 가스터빈을 포함한 복합화력의 비중이 매우 급격하게 증가하였다. 1998년 8월 현재 75기의 가스터빈이 가동 중에 있어 이는 전체 발전용량의 약 25%로서 그 중요도가 매우 높아가고 있다. 특별히 정비자재의 국산화율이 저조하여 제작사측이 고가 구매를 유도함은 물론 고온부품의 제작 가공이 곤란하고 용접 및 코팅 등 정비기술이 고난도를 요구하므로 정비보수 비용이 매우 높을 수밖에 없다. 1996년의 예로 발전설비를 위한 외자 구입비의 약 50%가 복합화력을 위한 외자로서 정비비용이 과다하게 소요되고 있는 형편이다.

가스터빈의 성능은 터빈 입구온도의 상승에 따라 현저하게 향상되어 왔는데 근래에는 제작사의 주도로 정밀주조 및 코팅 분야 등 신기술 개발이 급속하게 이루어지고 있어서 국내 기술로 이를 따라 잡기도 매우 힘든 형편이다. 국내의 가스터빈 운용형태는 발전소에 따라 첨두부하용, 지역난방 겸용 등 다양한 형태로 운전됨에 따라 수명평가가 곤란하며 가스터빈 설비의 대다수가 신규설비이기는 하지만 일부 현존하는 가스터빈 중에

* 한전전력연구원

는 이미 등가운전시간 기준으로 100,000시간 가량 운전되는 등 설계수명에 육박하여 운전하는 경우가 있다.

미국, 일본 등 선진국의 예로서 수명평가와 정비가 적절히 행해지면 가스터빈의 수명도 10~20년 연장될 가능성이 크다. 따라서 수명평가법의 개발은 경제적 관점에서도 필요성이 높다. 많은 전력회사가 터빈 제작사의 추천으로 부품을 교체하고 있는데 그 추천은 종종 제작사의 지금까지 경험에 근거한 것으로 해당 플랜트의 고유한 것은 아닌 것이다. 또 제작사 추천의 근거나 기준이 전력회사로서는 알 수 없는 경우가 많다. 그래서 전력회사는 독자적으로 부품 상태를 평가할 수 있는 능력을 가지고 있어야 하고 이를 확보하고자 노력하고 있다.

복합화력의 가스터빈은 계속해서 증가하고 있으며, 연소효율과 환경을 고려한 설비의 개선이 계속적으로 이루어지고 있다. 또한 superalloy 주조기술과 코팅 기술의 발전으로 현재의 사용온도보다 더 높은 고온에서 사용할 수 있게 되가고 있다. 그러나, 재질과 코팅 기술이 발전해도 장시간 고온과 가혹한 환경하에서의 운전은 가스터빈 재질의 열화를 피할 수 없는 일이다. 가스 터빈은 기력과는 달리 고온에서 사용되기 때문에 고온용 재질에 고온에 대한 코팅을 해서 사용한다. 이러한 재질과 코팅에 대한 열화 특성 평가를 정확하게 하는 것이 블레이드의 잔존 수명에 대한 신뢰성을 확보하여 설비의 안전성을 유지하는 제일 중요한 일이 된다.

본 논문에서는 가스터빈 블레이드 재질에 대한 수명평가를 위한 방법으로 코팅층과 블레이드 재질에 대한 열화 특성을 파악하기 위하여 미소시험편을 이용한 소형펀치 시험법을 이용하였다. 신재와 사용재 그리고 제조 방법에 따른 특성을 평가하였으며, 추후 사용 연료별 및 운전 방법에 따른 블레이드의 코팅과 재질의 영향에 대해서도 파악하고자 한다.

2. 실 험

2.1 실험 방범 및 시험편

본 논문의 실험에서 사용한 시편은 Φ 6.5×0.5mm의 시험편을 사용하고 있다. 시험편의 표면은 가능하면 smooth하고 flat해야 하는데 기계적으로나 전기화학적으로 가공을 한다. Fig. 1은 TMF 시험편과 블레이드에서 미소시험편 채취를 위해 사용된 재질 형상과 위치를 보여주고 있다. Fig. 2는 복합화력에서 32,000시간과 40,000시간 사용된 가스터빈 블레이드로 본 실험에서는 루트부에서 미소시험편을 채취하였다. 블레이드 부분에서는 내부의 냉각홀로 인해서 시험편을 만들수가 없어 루트부에서 시험편을 제작하였으며, 블레이드 에어포일부분에서는 편평도를 고려해서 시험편을 채취해야하므로 블레이드마다 채취하기가 상당히 어렵다.

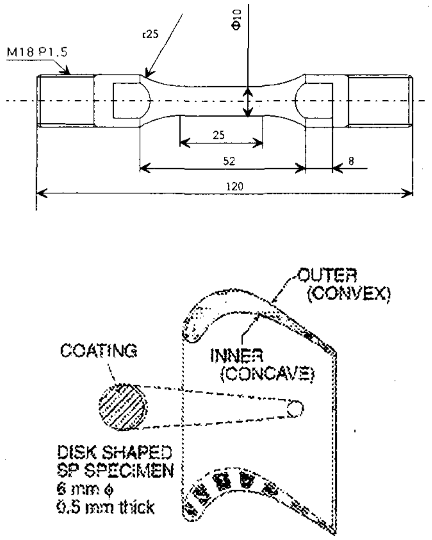

Fig. 1 Specimen sampling location.

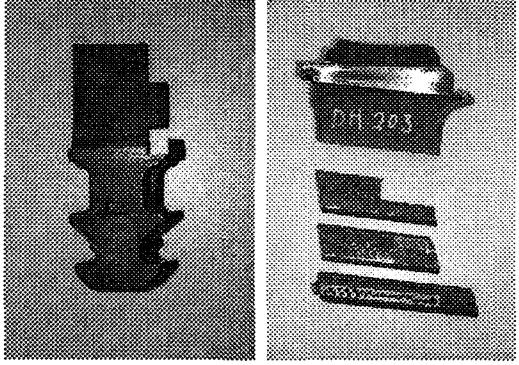

Fig. 2 Used blade

Fig. 3은 채취된 미소시험편을 실험하기 위하여 지그에 설치한 단면이다. 앞에서 설명한 바와 같이 시편은 Φ 6.5×0.5mm 두께의 시험편을 이용하였다. Fig. 4는 미소시험편을 이용한 소형펀치 실험장비를 보여주고 있다.

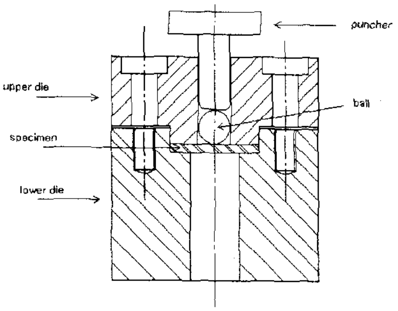

Fig. 3 Small Punch test jig

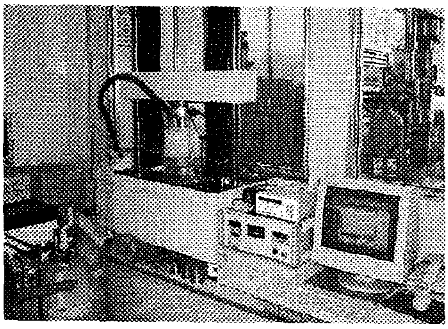

Fig. 4 Small punch test machine

2.2 시험편 재질 및 특성

본 실험에 사용된 재질은 가스터빈 블레이드 재질인 Inconle 738을 대상으로 실험하였으며, 신재와 사용재를 모두 실험하였다. 신재는 주조와 단조, 열처리 재질과 열처리 하지 않은 재질로 실험하였으며, 사용재는 32,000시간, 40,000시간 및 결함발생 블레이드를 대상으로 하여 실험하였다.

Table 1 Composition of Inconel 738LC

Cr	Ni	Co	Fe	W	Mo
16	Bal	8.3	0.2	2.6	1.75

Ti	Al	Cb	C	B	Ta
3.4	3.4	0.9	0.1	0.001	1.75

Tabla 1은 Inconle 738 재질의 화학성분을 나타내고 있으며, 특성으로는 니켈기 내열재료에 고온강도 및 고온 내부식성 향상을 위해소량의 알루미늄, 티타늄, 나이오븀, 텅스텐이 첨가된다. 또한 니켈과 크롬 성분의 조합으로 우수한 내산화특성을 나타낸다. 특히 650℃이상 온도에서 스테인레스강보다 우수하다. 니켈기 내열재료는 항공기용 가스터빈 엔진부품의 50%이상을 차지하고 650~1100℃ 온도조건에서 가장 널리 사용되는 재료이다. 발전용 가스터빈 설비 부품용 동익에 요구되는 특성은 장시간 크리프 파단특성, 내고온부식성이며, 특히, 기동, 정지가 잦은 가스터빈 설비는 장시간 크리프 파단 특성, 내고온부식성 외에 우수한 피로특성을 가져야 한다.

2.3 가스터빈 블레이드의 소형펀치 시험

각 재질별로 상온 및 400, 600, 800도의 고온에서 실험을 수행하였다. Fig. 5와 같이 냉각홀이 블레이드 내부에 구성되어 있어 일반적인 인장시험과 같은 전통적인 시험은 할수 가 없으며, Fig. 6에서와 같이 블레이드 단면을 보면 온도 분포가 상당히 다양하다는 것을 알 수 있다. 이러함 관점에서 볼 때 미소 시험편을 이용한 소형펀치 시험법은 가스 터빈 블레이드의 재질 특성을 평가할 수 있는 유용한 방법으로 적용할 수 있다.

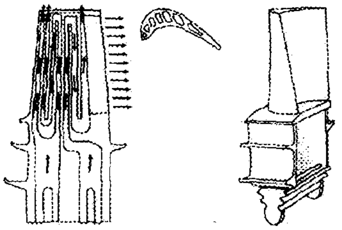

Fig. 5 First stage cooled blade

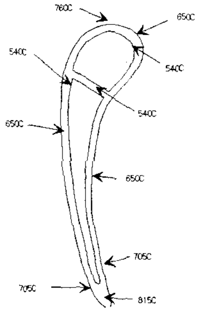

Fig. 6 Temperature distribution of blade

3. 결과 및 고찰

가스 터빈 블레이드의 재질별 구분은 국내 복합화력 발전소 두 곳에서 사용된 블레이드를 사용하였으며, 사용시간이 각각 32,000시간(시편 A), 40,000시간(시편 B) 사용한 것과 다른 발전소에서 결함이 발생한 블레이드(시편 T)를 실험하였으며, 신재는 국내에서 제작된 시편으로 주조(시편 C)와 단조된 재질(시편 F)을 사용하였다.

결함이 발생한 블레이드의 경우 방향성을 알아보기 위하여 블레이드의 길이방향(시편 T A6)과 이와 직각이 되는 방향(시편 T A8)으로 미소시험편을 제작하여 실험을 수행하였다.

발전설비에 주로 사용되고 있는 CrMoV강의 경우에는 일반적인 소형펀치 거동에서 나타나는 곡선을 얻을 수 있으나 Inconel738LC의 경우에

Fig. 7은 상온 25℃에서 실험한 결과로 별다른 특이한 현상은 발견할 수 없었으나, 주조된 재질의 시편의 최대하중값이 다른 시편에 비해 낮은 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 8의 CrMoV 기력 터빈 로터강의 상온(25℃)에서의 결과와 비교해보면 최대 하중값이 낮다는 것을 확인할 수 있다. 이는 초내열합금강인 니켈계강은 상온에서는 강의 특성을 제대로 이용할 수 없다는 것을 확인했으며,즉, Ni계 합금강이 내열강이어서 상온보다는 고온에서 보다 높은 파단 강도가 나타나는 것을 알 수 있다

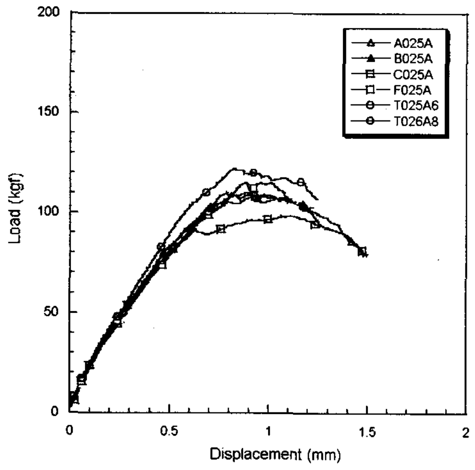

Fig. 7 The test results at 25℃

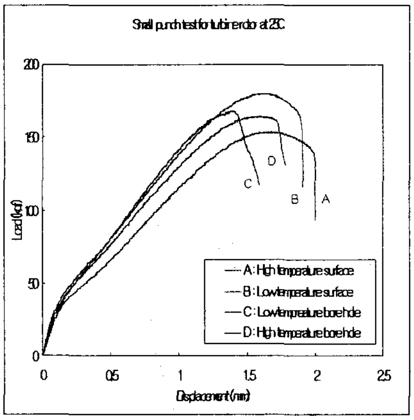

Fig. 8 The SP test results of CrMoV rotor at 25℃

Fig. 8은 CrMoV 터빈 로터강에 대한 상온(25℃)에서의 소형펀치 시험결과로 Inconle 738 LC와 비교해보면 파단 하중이 차이가 나는 것을 알 수 있다

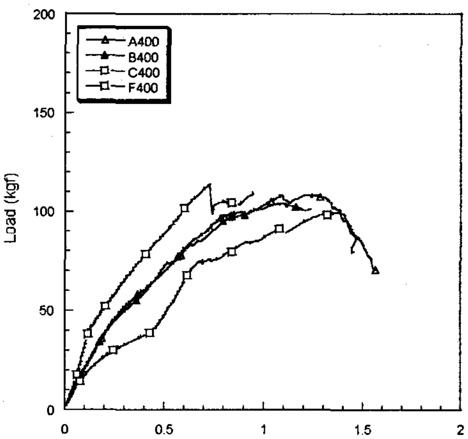

Fig. 9 The test results at 400℃

Fig. 9는 400℃에서 실험한 결과로 상온에서의 결과와 비교해볼 때 최대 하중점이 거의 비슷한 것을 알 수 있다. 400℃에서의 실험결과로 볼 때 CrMoV강과 같이 FATT나 DBTT는 얻을 수

없는 것으로 보인다. 이것은 Fig. 10에서 보는 바와 같이 800℃이상의 고온에서 초내열합금강의 연성을 알 수 있다.

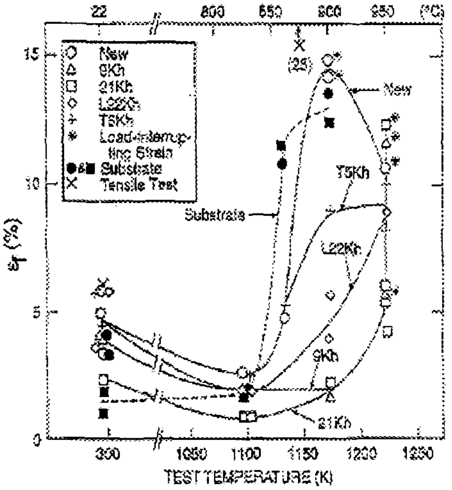

Fig. 10 Temperature dependence of ductility

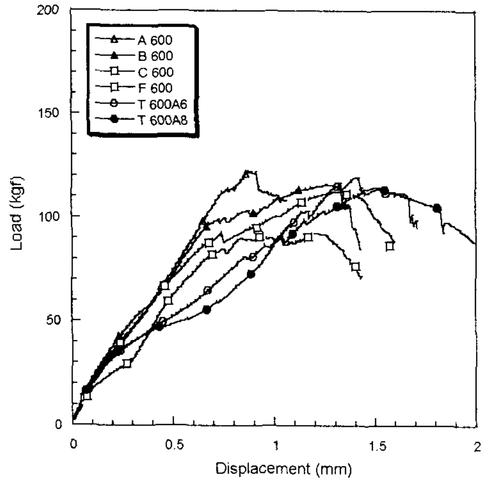

Fig. 11 The test results at 600℃

Fig. 11은 600℃에서 Inconel 738LC의 시험결과를 나타낸 것으로 앞에서 설명한바와 같이 최대하중점은 상온, 400℃에서와 크게 다른 것이 없었다. 초내열합금강인 Inconle 738LC의 재질열화에 대한 평가는 Fig. 12의 결과에서 볼수 있듯이 800℃이상의 고온하에서 실험을 해야만이 재질열화에 대한 비교 평가를 할 수 있는 결과를 얻을 수 있다.

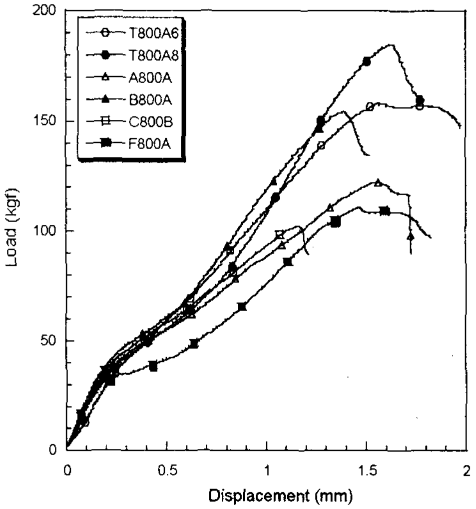

Fig. 12 The test results at 800℃

Fig. 12에서는 전형적인 소형펀치 시험거동을 나타내는 결과를 얻을 수 있었으며, 최대하중점 역시 CrMoV강의 최대 하중점과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

한가지 특이한 점은 국내에서 제작된 재질의 경우 외국 제작사의 재질보다 강도가 떨어지는 것으로 나타났다. 그러나, 이것은 절대적인 결과가 아니며, 실험오차에 의한 것일 수 도 있으며, 정확한 원인은 아직 알 수 없다.

800℃에서 실험을 여러번 할 경우 지그에 문제가 발생하여 상당히 실험을 하는데 애로사항이 많았으며, 지그와 지그 재질에 대한 변경을 해야만 실험이 가능했다. 현재 800℃이상의 고온에서 초내열합금강에 대한 실험을 하기 위해서는 가열장치와 지그 및 주변 장치에 대한 재설계가 필요하며, 실험결과값의 편차를 줄이는 것 문제를 해결하는 것이 앞으로의 초내열합금강에 대한 정확한 실험이 이루어 질 것이다.

4. 결론

(1) 초내열합금강에 대한 미소시험편을 이용한 소형펀치 시험을 통해 Inconel 738LC의 강도 평가 및 재질열화 평가의 가능성을 확인하였다.

(2) 초내열합금강인 Inconel 738LC은 내열강이어서 상온보다는 고온에서 보다 높은 파단 강도가 나타나는 것을 알 수 있다.

(3) Inconel 738LC의 재질열화평가는 800℃이상의 고온에서 이루어져야 하며, 고온에서의 미소시험편을 이용한 시험절차가 필요하다.

(4) 가스터빈 블레이드의 사용이력에 따른 영향은 800℃이하에서는 정확히 파악하기 어려우며, 800℃이상에서는 지그와 여러 가지 실험조건이 어려워 정확한 판단이 어려웠으나, 블레이드 제작기술에 따라 강도가 저하되는 것을 확인할 수 있었다.

추후 미소시험편을 이용한 고온실험에 대한 지그 재질의 선정과 설계가 필요하며, 가스 터빈 블레이드의 수명평가 및 재질열화 평가를 위해서는 계속적으로 사용이력 및 블레이드의 부위별 위치에 따른 실험이 이루어져야 할 것이다.

후기

고온 소형펀치 시험장치를 사용하도록 해주신 전북대학교 기계공학부 유효선 교수님과 재료강도-미소역학물성실험실 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) 유효선, 이송인, 임재규, 정세희, 1993, "소형펀치시험법에 의한 응력부식균열 감수성평가에 관한 연구," 대한기계학회논문집 제 17권 제 8호, pp.2033~2042.
(2) 김종영, 김재철, 김승태, 김의현, 배병홍, "고온사용설비의 비파괴진단 기술개발", 전력연구원, KRC-89G-J05, 1993
(3) Lucas,G.E., 1990, "Review of Small Specimen Test Techniques for Irradiation Testing," Metallurgical Transactions A, Vol.21A,pp. 1105~1119.
(4) Manahan,M.P., Argon,A.S. and Harling,O.K., 1981, "The Development of a Miniaturized Disk Bend Test for the determination of Postiradiation Mechanical Properties," J. Nucl. Material, Vol.103~104, pp.1545~1550.
(5) Huang,F.H., Hamilton,M.L.and Wire,G.L., 1982, "Bend Testing for Miniature Disks," Nuclear Technol., Vol. 57, pp.234~242.
(6) Baik,J.M.,Kameda,J. and Buck,O., 1986, "Development of Small Punch Tests for Ductile-Brittle Transition Temperature Measurement of Temper Embrittled Ni-Cr Steels," ASTM STP 888, pp.92~111.
(7) Foulds,J. and Viswanathan,R., 1994, "Small Punch Testing for Determining the Material Toughness of Low Alloy Steel Components in Service," Journal of Engineering Materials ans Technology, Vol.116, pp.457~464.
(8) Mao,X., Takahashi,H. and Kodaira,T., 1992, "Use of Subsized Specimen for Evaluating the Strength and Fracture Toughness of Irradiated 2¼ Cr-1 Mo Steel," Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 114, pp. 168~171
(9) Etto,M., et al., 1993, "Development of a Miniaturized Bulge Test (Small punch Test) for Post-Irradiation Mechanical Property Evaluation," ASTM STP 1204, pp. 241~255.
(10) Sinclair,A.N., et al.,1993, "Assessment of Fracture Toughness by a Punch Test with Miniature Specimens," ASTM STP 1204, pp. 162~181.
(11) Mills,W.J., 1984, "fracture Toughness Behavior of Unirradiated and Irradiated 2¼ Cr-1Mo Steel Plate and Weldment," Nuclear Technology vol. 64, pp.175~185.