한국정밀공학회지 제 20 권 제 8 호 (2003 년 8 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 20, No. 8, August 2003.

EDM 을 이용한 가스터빈 회전익의 냉각공기 유로내벽 표면균열 제거

강신호#, 김대은*

Surface Crack Removal by EDM for Inside Cooling Hole of Gas Turbine Blade

Sin Ho Kang#, Dae Eun Kim*

ABSTRACT

The first stage rotating blade of industrial gas turbine is one of the components that is normally run in exposed state at the highest temperature of the combustion gas stream. For this reason superior materials and advanced cooling technology are required to allow higher heat resisting characteristics of the component. The 1st stage blade of a selected commercial gas turbine blade made of directionally solidified Ni-based superalloy has a row of cooling holes on its trailing edge. In most cases, minor cracks have been found at some of the root cooling holes after one cycle operation (24,000 hrs) or even shorter operation time because of the high temperature gradient and the frequently alternating thermal stress. In the repair process, unfortunately, it is usually very difficult to get rid of the damage due to the fact that cracks are initiated at the root cooling hole and propagated deep into the hole. In this study, the feasibility of removing the sidewall cracks in the hole by utilizing EDM drilling has been investigated. Also the criteria of surface integrity for EDM drilling were established to achieve high quality repair as well as machining accuracy.

Key Words : Electrical Discharge Machining(방전가공), EDM Drilling(방전드릴링), Ni-based Superalloy(니켈기 초합금), Surface Integrity(표면품위)

1. 서론

가스터빈을 구성하는 고온부 부품 중에서 가장 높은 온도에 노출되는 부품은 터빈 1 단을 형성하는 고정익(stationary vane 또는 nozzle)과 회전익(rotating blade 또는 bucket)이다. 각 단에 위치한 고정익은 연소실에서 팽창하여 오는 연소가스의 방향을 바꾸어서 회전익쪽으로 분사하며, 회전익은 연소가스의 운동에너지를 로터에 전달하는 역할을 하는데, 각 단을 구성하는 고정익과 회전익 날개의 형상과 조합은 터빈의 용도와 출력에 따라 유체동역학적인 고려에 의해 결정된다.

최근 효율과 출력을 높이기 위해서 주요 제작사에 의해 잇달아 개발되어 상용화 출시되고 있는 산업용 가스터빈의 연소가스 온도는 이미 섭씨 1450 도에 이르고 있는데, 이는 고정익이나 회전익

접수일: 2003 년 3 월 19 일; 게재승인일: 2003 년 7 월 11 일
교신저자: 한전기공주식회사 G/T 정비센터
Email: shkang@kps.co.kr, Tel: (032) 580-8245
* 연세대학교 기계공학과

의 재료가 되는 초합금의 용융온도를 훨씬 상회하는 고온이다. 효율과 연소가스 온도의 상승은 지난 40 년 동안 거의 2 배에 달하는데, 이는 보다 향상된 소재개발과 효과적인 냉각기법 적용, 또한 유체동역학적으로 보다 안정적인 날개형상 개발의 결과라 할 수 있다[1].

소재의 측면에서 보면 기존에 출시된 니켈기, 코발트기나 철기의 내열합금에다 결정립과 결정경계를 개선하거나 단일화하여 만든 일방향 응고재료와 단결정 재료 등이 이미 상용화되어 산업용 가스터빈 모델 등급 중 G 급 또는 H 급에 적용 출시되고 있거나 현장적용 시험(rainbow test) 중에 있다[2].

재질성능 자체의 개발 뿐만 아니라 부품 표면에서 재료내부로 전도되는 열량을 차단하기 위한 첨단의 냉각기법들을 적용하고 있는데, 최근 들어 전면막냉각 방법과 투과냉각 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 실용적으로도 다공성 평판을 이용한 충돌제트/유출냉각방법을 복합적으로 적용하여 냉각효율을 높이고 있다[3].

본 논문에서 연구대상으로 삼고 있는 상용화된 가스터빈의 경우 연소가스의 온도가 섭씨 1260 도급으로써, 1 단 회전익은 일방향 응고성 니켈기 초내열합금 중의 하나인 DS GTD-111 소재로 제작되고 있으며, 충돌냉각과 대류냉각기법을 채택하고 있다. 즉, 몸체의 아랫부분으로부터 유입된 냉각공기가 회전익 내부의 복잡한 유로를 흐르면서 팁 부위에 있는 커버를 통해 일부 빠져나가고 몸체를 순환한 대부분의 공기는 날개부 후연의 미세한 냉각구멍을 통해 연소가스층으로 배출되도록 제작되어 있다.

날개부 후연의 냉각구멍은 각 제작사의 모델별로 다양한 형상으로 가공되는데, 본 연구에서 다루고 있는 회전익의 경우에는 지름 1.02mm 원형 구멍이 48 개의 등간격으로 날개부 후연에 일렬로 가공되어 있어, 내부 유로를 순환하고 나온 냉각공기가 회전익의 후방으로 분출되어 빠져 나오게끔 설계되어있다. 그러나 현재 날개부 후연의 냉각구멍의 존재로 인해 회전익 수명에 영향을 주는 중대한 결함이 발견되고 있는데, 그것은 1st 냉각구멍(root cooling hole) 입구벽의 표면에서 균열이 발생하여 운전시간이 경과될수록 점차 관통균열로 성장하면서 내부로 진행한다는 점이다. 이렇게 냉각구멍 주변에 균열이 생기는 것은 날개부와 몸체 부위의 온도구배에 따른 열응력이 반복적으로 작용하면서 특히 냉각구멍 주변에 집중하는 현상 때문인 것으로 보고되고 있다[4]. 이러한 결함은 최초 24,000 시간 운전 후 정비공장 내에서 수행하는 비파괴 검사 시에 이미 발견되고 있으며, 내벽에 내부식성 코팅이 되어 있는 경우 코팅층을 관통한 균열에서 구멍의 입구에만 진행된 균열에 이르기까지 손상규모가 다양하다.

특히 관통균열로는 성장하지 않았지만 냉각구멍내벽을 따라 안쪽으로 미세하게 발생한 깊이 0.1~0.3mm 정도의 표면균열을 그대로 남겨둘 경우, 관통균열로 성장하기 쉽기 때문에 1 차 재생정비단계에서 완전히 제거하는 것이 필수적이다. 그러나 지름 1.02mm 의 가는 구멍 내벽의 표면 균열을 제거하기 위해 기계적인 방식으로 접근한다는 것은 매우 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 방전가공(EDM) 방식을 적용하여 구멍을 치수허용치 내에서 미세하게 넓히면서 동시에 방전가공면이 새로운 2 차 결함으로 남지 않는 조건하에서 결함을 제거할 수 있는 기법에 대해 연구하였다

Fig. 1 과 2 에서는 1 단 회전익에서 발견되는 전형적인 냉각구멍균열을 보여준다. 특히 Fig. 1 에서는 1st 냉각구멍에서 이미 성장하기 시작한 관통균열과 2nd 및 3rd 냉각구멍의 외벽에 미세하게 발생한 균열을 보여준다.

2. 실험

가공실험을 위하여 상용중인 가스터빈 1 단 회전익 중 냉각구멍에 발생한 균열로 인하여 재생수

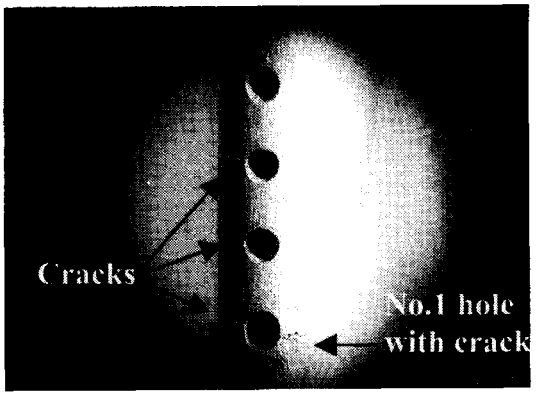

Fig. 1 Typical cooling hole cracking of the 1st stage gas turbine blade

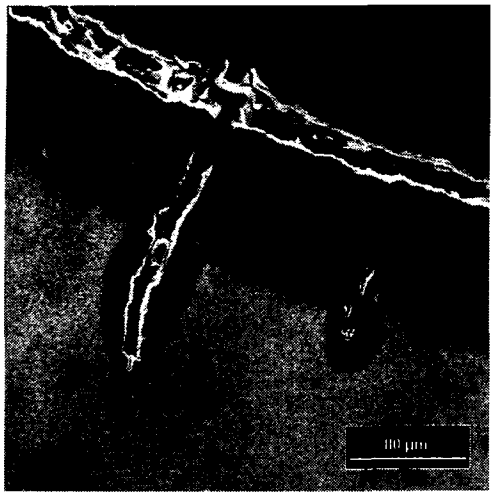

Fig. 2 Cross-sectional view of root cooling hole; cracking occurred and propagated into the base metal (Coating depth: 0.065mm, crack depth in base metal: 0.13mm)

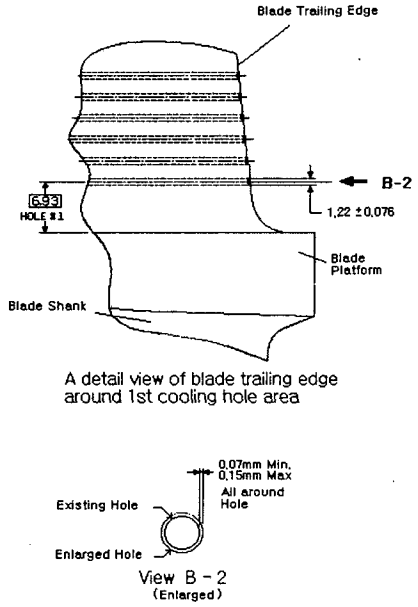

Fig. 3 Schematic of the root cooling hole area on the trailing edge to be machined by the EDM crack removal process

리 불가로 분류된 것을 선정하였고, 결함을 좀 더 정확하게 파악하기 위하여 블라스트 크리닝과 열적 세정(thermal etch) 공정을 수행하였다. Table 1 은 버켓 소재인 DS GTD-111 의 합금조성을 보여주는데 여기서 DS 는 일방향 응고제품 임을 표시한다.

구멍 입구에서부터 내벽으로 진행된 균열을 제거하기 위해서는 기존의 형상을 수정하는 것이 불가피한데, 이에 대해 제작사측에서 허용하고 있는 가공범위는 Fig. 3 과 같다.

Fig. 3 에서 보는 바와 같이 냉각구멍의 벽을 관통하여 외부로 노출된 균열에 대해서는 1mm 깊이의 범위 내에서 연삭가공으로 없앨 수가 있으나 내벽을 따라 안쪽으로 미세하게 진행되어 있는 표면균열을 제거하는 것은 우선 재래식 개념의 가공방식으로는 접근가능한 공구가 없다는 점에서 가느다란 전극을 이용한 방전가공이 무난할 것으로 판단하였다. 그러나 방전가공 후에 필연적으로 남게 되는 변질층(altered material zone: AMZ)은 부품이 다시 장기간의 피로응력이나 응력부식성의 환경에 노출되었을 때 결함재발의 원인이 될 가능성이 높으므로, 이를 사전에 방지하기 위해서 기존의 연구에 의해서 제시하고 있는 가이드라인을 주로 참조하되, 제작사에서 제시하고 있는 항목과 비교하여 Table 2 과 같이 표면품위 유지조건을 설정하였다[6,7].

가공은 다이 싱커형 방전가공기인 DY-350M 을 이용하여 수행하였으며, 시험가공이 완료된 후에 회전익의 날개부 후연으로부터 가공한 구멍의 길이방향과 단면방향으로 각각 시편을 채취하여 에폭시로 마운팅한 뒤, 정밀 연마 후 방전가공된 부위의 특성변화를 관찰하였다.

(1) Scanning electron microscopy(SEM) : 방전가공된 시편의 길이방향 및 단면방향의 AMZ 를 관찰하여 층(layer) 깊이, 미세균열의 분포, 또한 결함제거 여부를 확인하는데 적용하였다.

(2) Energy dispersive spectrometer(EDS) : AMZ 에서의 성분변화를 정량적으로 분석하여 기준치 이내에서 만족할 수 있는가를 판단하였다.

Table 1 Nominal composition of the Ni based casting superalloy DS GTD 111 (WT%)[5]

Ni	Cr	Co	Mo	W	Ti	Al	Ta	C	B
60.4	14.0	9.5	1.5	3.8	4.9	3.0	2.8	0.10	0.01

(3) Surface roughness tester: Mistoyo Surftest 301 을 이용하여 설정된 방전가공 조건 하에서 표면거칠기를 주어진 기준치 이내로 만족시킬 수 있는가를 측정하였다.

(4) Microhardness measurements (HRc): 방전가공을 이용한 드릴링 직후 시험편을 채취하여 재주조층을 포함한 가공변질층과 모재에 걸쳐 마이크로 경도를 측정하여 비교함으로써 변화 경향을 측정하였다.

이번 실험에 앞서 Table 2 의 표면품위를 만족시키기 위해서 방전조건을 어떻게 설정하는가는 가장 중요하면서도 기본적인 문제였다. 따라서 동일한 소재의 스크랩 부품을 이용하여 수차례의 모의가공을 수행한 후, 기준치 내의 표면거칠기와 재주조층의 깊이를 만족하는 조건을 실제 가공조건으로 설정하였다. Table 3 은 최종 시험가공에 적용된 방전 조건을 나타내며, Fig. 4 와 5 는 시험가공에 적용된 치공구 설치장면과 가공이 완료된 회전익으로부터 시편을 채취하는 부위를 나타낸다.

Table 3 EDM condition and type of the dielectric fluid

Pulse ON	40 μs
Pulse OFF	60 μs
Peak Current	5Amp
Voltage	50 Volts
Polarity	Cu electrode:(+) Workpiece:(-)
Dielectric Fluid	Petroleum type K501

Table 2 Surface integrity criteria for crack removal process with EDM applied for 1st stage bucket cooling holes

Property or Type of defect	Criteria	Remarks
Surface roughness	Within 3.2(μm Ra)	
Mechanical AMZ: Hardness alteration: Microcracks in:	 0.025mm[1] Resolidified layer only	[1] Depth to point where hardness becomes less than ±2 points HRC (or equivalent) to that of the bulk material (hardness converted from KHN or KHV)
Metallurgical AMZ: Recast layer thickness: Heat affected zone thickness: Internal melting: Intergranular attack: Intergranular oxidation: Selective etch, pits, protuberances:	 0.025mm max.[2] 0.025mm max. None allowed None allowed None allowed 0.01mm max.	[2] Adopted by major turbine manufacturers
Copper contamination	Not acceptable	

Fig. 4 Schematic of the EDM fixturing for trailing edge cooling hole drilling

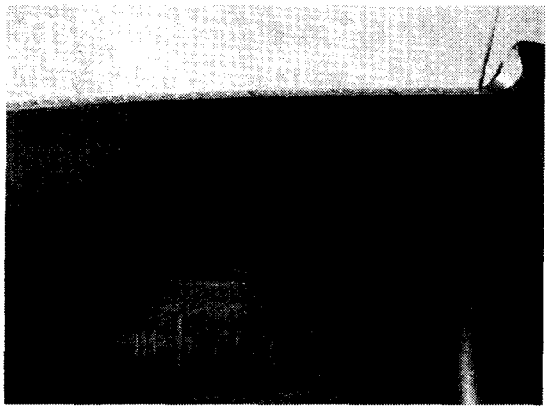

Fig. 5 Locations where specimens were taken from after EDM drilling completed

가공이 완료된 회전익은 형광침투탐상검사를 통하여 냉각구멍내부에 균열이 더 이상 존재하지 않음을 확인한 후 디버링과 같은 마무리 공정으로 보내어지며, 모든 기계적인 결함제거 공정이 완료되었을 때 비로소 재코팅하여 신품과 유사한 성능을 갖도록 복원된다. 이번 실험은 기계적인 결함제거 공정개발의 차원에서 실시되었으며, 고가의 터빈부품을 대상으로 성공여부를 가늠하는 것이었으므로 스크랩 부품을 이용한 충분한 사전연습과 연구 끝에 진행되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 냉각구멍의 표면품위

3.1.1 표면거칠기

깊고 가는 구멍 내벽의 표면거칠기를 측정하기 위한 장치가 별도로 구비되지 않았으므로, 대신 실험가공과 동일한 방전조건으로 평면 가공된 시편으로부터 측정치를 구하여 실제 가공시의 표면거칠기 값을 예측하였다. 즉, 가공면에서 10 군데의 표면거칠기를 측정하여 본 결과 평균 Ra= 2.65μm 를 구할 수 있었으며 이는 이번 실험의 목표치인 Ra=3.0μm 이내이므로 적용가능한 조건임을 확인하였다.

3.1.2 기계적 특성 변질층

변질층이 모재의 기계적 특성 변화에 영향을 줄 수 있는 항목인 경도의 변화와 미세균열의 분포 정도를 조사하였다. 가공된 구멍의 길이방향과 단면방향으로 각각 채취된 시편들을 표면에서 모재방향으로 경도를 측정한 결과, 재주조층을 제외한 표면에서 0.05mm 깊이까지의 평균경도가 HRc 39~41 정도로 측정되었고, 모재에 해당하는 그 이하의 깊이에서는 HRc 38~40 으로 측정되었으므로 기준치 이내를 만족하고 있음을 알 수 있었다 (Table 4 참조).

또한 미세균열의 분포를 전자현미경으로 분석해본 결과, 가공된 구멍의 길이방향이나 단면방향의 시편 어느 것에서도 모재로까지의 진전된 것은 발견되지 않았고 최대두께 0.022mm 이내의 재주조층 이내에만 분포하고 있었으므로, 기준치를 만족하는 결과였다. Fig. 6 은 경도측정 부위를, Fig. 7 과 8 은 각 단면별 현미경 사진을 보여준다.

Table 4 Micro hardness test results

	Base Metal		Below Surface (<.002mm)	
	HV25	HRC	HV25	HRC
1	372.9	38.1	379.7	38.8
2	383.1	39.1	386.6	39.5
3	390.2	39.8	404.9	41.3
4	372.9	38.1	376.3	38.4
5	369.6	37.7	390.2	39.8
Mean	377.7	38.6	387.5	39.6

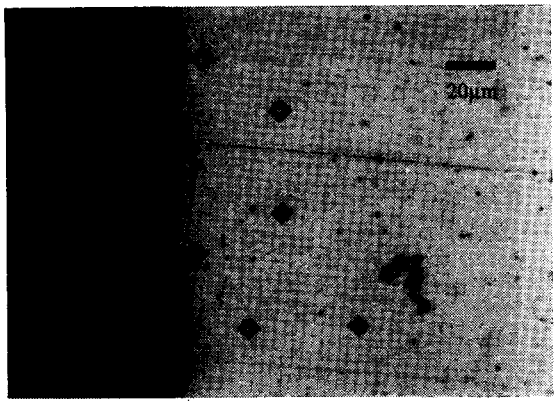

Fig. 6 Microhardness indentation profile in the longitudinally cross-sectioned specimen

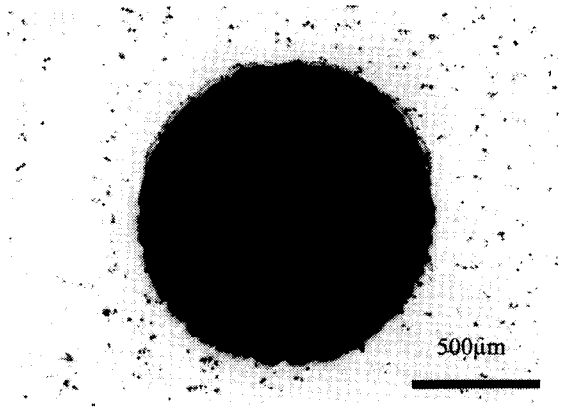

Fig. 7 Cross-sectional optical micrograph of the enlarged cooling hole

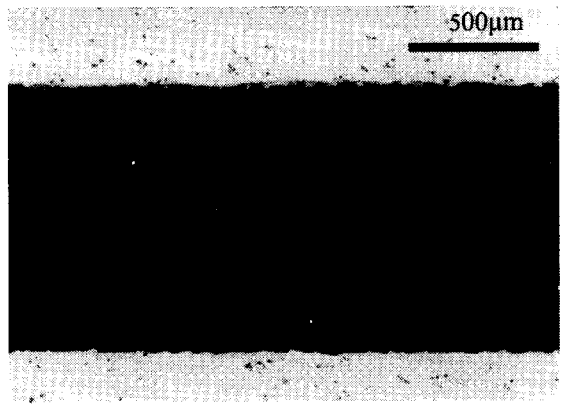

Fig. 8 Longitude sectional micrograph of the enlarged cooling hole

3.1.3 금속적 특성 변질층

재주조층과 열영향부의 두께는 적용된 방전가공 조건에 따라 크게 좌우된다. 즉 황삭조건 혹은 정삭조건 인가에 따라 가공된 면의 표면거칠기와 재주조층의 두께가 달라지며, 이 때 재주조층의 최대두께와 열영향부의 두께는 대략 같게 형성되는 것으로 보고되어 있다[8].

이번 실험에서 확대가공된 냉각홀부위 단면 시편을 현미경으로 관찰하면서 측정해 본 결과, 재주조층의 최대두께는 0.022mm 이었으며(Fig. 9 참조), 열영향부의 규모를 확인하고자 에칭한 시편을 광학현미경으로 관찰하였으나, 모재의 결정구조가 일방향으로 배열이 되어있어서 다방향성을 갖는 다른 금속합금의 경우와는 다르게 결정경계가 굵어진다든지, 입자의 크기가 달라진다든지 하는 등의 변화는 두드러지지 않았다.

다만 재주조층에 근접한 0.01mm 이내의 깊이에서 석출물이 모재보다는 훨씬 높은 밀도로 고르게 분포하고 있었고 모재나 HAZ 부위에서의 경도 변화는 거의 감지되지 않고 있다.

방전가공으로 인한 표면변질층에서 입계균열이나 입계산화(IGA or IGO) 등의 결함은 발견되지 않았다. 다만 광학현미경을 이용한 시편 검사 시에 재주조층을 뚫고 모재로까지 진입한 균열처럼 보이는 결함이 발견되어 우려하였으나, SEM 관찰 결과 선택적 에칭인 것으로 생각되었으며(Fig. 10), 모재 내에 존재하고 있던 석출물이 방전으로 인해 증발함으로써 공동과 같은 표면굴곡을 형성한 것으로 판단되었다(Fig. 11). 이때의 깊이는 재주조층

Fig. 9 The thickest area of recast layer

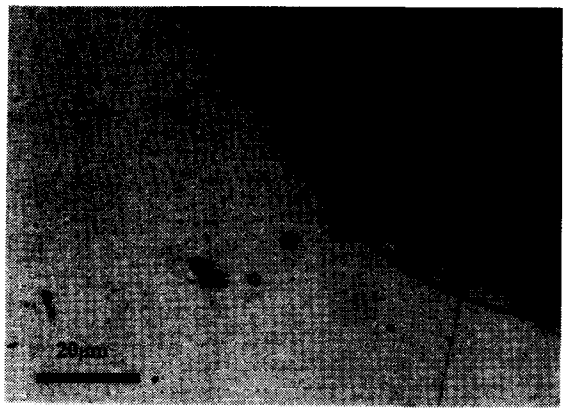

Fig. 10 Optical micrograph focusing on a cavity created in base metal

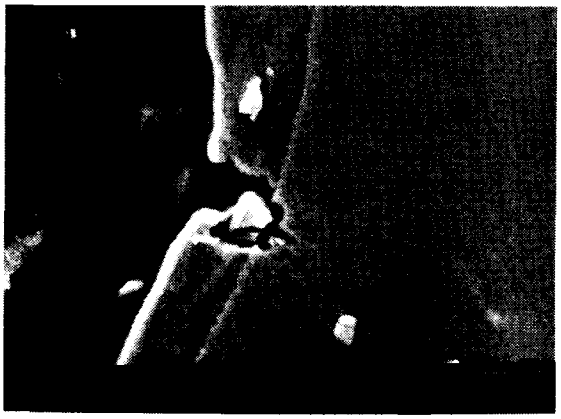

Fig. 11 Enlarged view of the cavity through SEM micrograph

을 포함하여 0.012mm 이고 재주조층을 제외한 모재부분의 깊이는 0.004mm 이내로 기준치 이내인 것을 알 수 있었다.

AMZ 의 적합성여부를 판단하기 위한 마지막 항목으로써 구리성분을 함유하고 있는 지의 여부를 판단하기 위하여 EDS 분석을 시도하였다. 가스터빈의 고온부 부품소재로 많이 쓰이는 니켈기 고용강화형 초합금의 경우 Al, Ag 또는 Cu 와 같은 저융점금속이 가공의 결과로써 표면을 오염시킨 채로 고온운전에 투입될 경우, 고온강도를 감소시키는 오염물질로써의 구실을 하는 것으로 알려져 있다 [8, 9]. 따라서 방전가공에 의해 표면에 생성되는 재주조층에 전극의 주성분인 구리가 이행되어 남을 경우, 고온으로 운전되는 동안 낮은 용융점으로 인해 모재 또는 결정입계를 취약하게 할 가능성이 있으므로, 이를 방지할 필요가 있다.

전극으로부터 공작물측으로의 구리성분 이행은 방전조건에 따라 양적으로 줄어들기는 하였으나, 전극의 종류를 바꾸지 않는 한 완전히 제거하기는 어려웠다. Fig. 12 는 냉각홀의 길이방향 단면에서의 EDS 분석위치를 나타내며, Fig. 13, 14, 15 는 각 위치에서의 성분 최대치를 나타내는데, 열영향부나 모재층을 제외한 재주조층에서만 미소량의 구리성분이 검출되고 있음을 보여주고 있다.

구리 성분이 고온부 회전익의 냉각구멍 내벽에 이행됨으로써 발생할 수 있는 결함에 대해 규명하고 있는 연구결과는 찾기가 어려웠으며, 향후의 지속적인 연구과정을 통해 개선해야 할 과제로 일단락지었다.

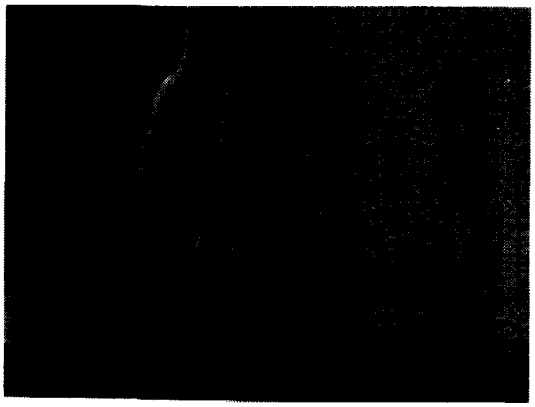

Fig. 12 Locations of X-ray irradiation for EDS analysis

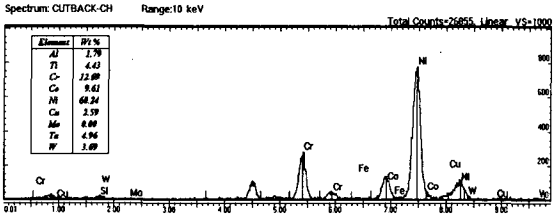

Fig. 13 EDS spectrum of the location "A" in recast Layer

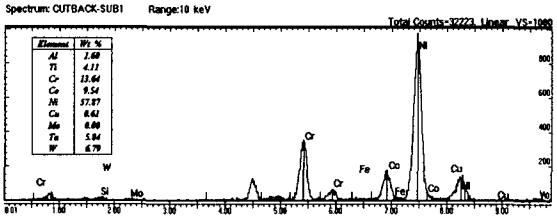

Fig. 14 EDS spectrum of the location "B" in HAZ

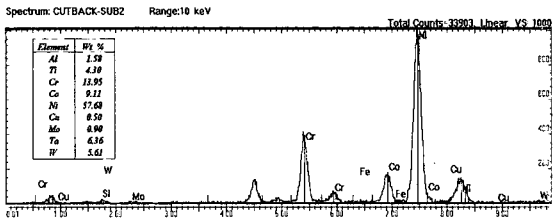

Fig. 15 Spectrum of the location "C" in base metal

4. 결론

상용화된 가스터빈 모델의 1 단 회전익 중 날개부 후연의 냉각홀 출구부위에 피로균열이 미세하게 발생하여 내부벽으로 진행하고 있는 결함을 제거하기 위하여 방전가공을 적용한 결과, 가공으로 인해 생성된 표면변질층(AMZ)이 기계적 재질적 품질기준을 만족하는 범위 내에서 미세균열층의 결함을 완벽하게 제거할 수 있었다. 따라서 이번 연구에서 설정하였던 표면품위 기준과 방전가공 조건 및 치공구 등은 실제의 재생정비 공정에 적용 가능한 것으로 결론내릴 수 있었다. 그러나 전극봉에서 공작물로 이행되는 구리성분은 재주조층에서 미세하게나마 검출되어 정해 놓은 품질기준에 벗어났으며 이는 앞으로 개선해야 할 연구과제로 남았다.

참고문헌

1. Seth, B. B., "Superalloy-The Utility Gas Turbine Perspective," Superalloy 2000, Proceeding of the 9th International Symposium on Superalloys, TMS, pp. 3-16, 2000.
2. Matta, R. K., Mercer, G. D., Tuthill, R. S., "Power Systems for the 21th Centry-'H' Gas Turbine Combined Cycle," Proceedings of '00 GE State-Of-the Art Technology Seminar, GER 3935B, pp. 471-509, 2000.
3. Rhee, D. H., Cho, H. H., "Heat Transfer Characteristics on Effusion Plate in Impingement/ Effusion Cooling for Combustor," J. of KSME (B), Vol. 24, No. 3, pp. 435-442, 2000.
4. Kim, B. G., Woo, S. J., Cho, H. H., "The Influence of Heat Conduction on the Temperature and Thermal Stress Distributions in Film Cooled Turbine Blades," J. of the Eng. Research Int., Yonsei Univ., Vol. 28, No. 2 (45), pp. 191-199, 1996.
5. Beltran, A., Pepe, J. J., Schilke, P. W., "Advanced Gas Turbines Materials and Coating," Proceedings of the 38th GE Turbine SOA Technology Seminar, GER-3569E, GE Power Generation, 1994.
6. "Technical Report - Surface Integrity," J. of Manufacturing Engineering, pp. 51-57, July 1989.
7. Institute of Advanced Manufacturing Science, Inc., "Surface Integrity," Machining Data Handbook, 3rd Ed., Vol. 2, pp. 18-98 ~ 18-106, 1980.
8. Bradley, E. F., Superalloy – A Technical Guide, ASM Int., 1988.
9. Choudhury, A., Kemmer, H., Leybold, A. G., "Vacuum Induction Melting (VIM)," ASM Metals Handbook, 9th Ed., Vol. 15, Casting, pp. 393-399, 1988.