

가스터빈 블레이드 냉각공 정밀가공을 위한 EDM 기술 활용 Application of EDM for Gas Turbine Blade Cooling Hole Processing

#*김문영¹, 양성호², 박상열³, 최철준⁴

#*Moon-Young Kim(mykim@kps.co.kr)¹, Sung-Ho Yang², Sang-Yeol Park³, Choul-Jun Choi⁴

한전KPS(주) GT 정비기술센터

Key words : EDM(Electrical Discharge Machining), GTD 111DS

1. 서론

산업 및 항공기 분야의 가스터빈은 더 높은 효율과 안전성, 환경 친화성 등으로 인해 보다 성능이 향상된 가스터빈을 만들기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 제작사에서는 이를 위하여 터빈 입구 온도(TIT : Turbine Inlet Temperature) 상승을 통해 효율 향상을 기대하고 있으며, 이를 위하여 가스 터빈 부품 개발 시 재질(Material), 코팅(Coating), 냉각(Cooling)기술을 가장 중요하게 고려하는 3가지 요소이다. 현재 운전 중인 산업용 가스 터빈의 입구 온도는 1500℃급까지 보급되어 운전되고 있으나, 이온도는 블레이드나 연소기에 사용되는 초합금의 용융점(Melting point)보다 높은 온도이다. 따라서 이러한 환경조건에서 부품을 보호해 주기 위해 적용한 각각의 방법이 코팅 및 냉각기술이다. 특히, 초기의 냉각기술은 블레이드의 내부 냉각 기술만을 적용하였으나, 이것만으로는 충분하지 않아 70년대부터 막냉각(Film cooling)이 적용되기 시작하였다. 이 막냉각은 냉각 공기가 블레이드의 내부 중공으로부터 냉각공을 통해 유출되어 블레이드 표면을 막 형태로 감싸주어 고온의 연소가스가 블레이드 표면에 직접 닿지 않도록 보호해주는 냉각방식(Cooling system)이다[1].

이러한 냉각공 가공을 위하여 주로 EDM(Electric Discharge Machining) 및 ECM(Electro Chemical Machining)을 사용한다. ECM과 EDM은 일반적인 가공속도가 1~10mm/min 정도이나 Multiple electrode를 사용하면 동시에 여러 개의 냉각공을 가공할 수 있다. 또한, 에너지를 집적하여 비접촉식의 방법으로 냉각공을 가공하는 레이저 가공방법은 가공속도가 1~10mm/sec로 아주 빠르게 냉각공을 가공할 수 있다. 이렇듯 냉각공을 가공하는 방법들이 많이 있으나, EDM과 Laser를 이용한 냉각공 가공방법이 항공이나 산업용 가스터빈에서 가장 일반적으로 사용하는 가공방법이다[2].

따라서 본 연구에서는 블레이드에 대한 냉각공 가공을 위한 기초 실험을 위하여 EDM을 이용한 방법으로 가공성 비교실험을 하였다. 본 실험을 수행하기 위해 냉각공 가공을 위한 기준사양을 만들었고 가공방법 및 특성을 비교하여 적합한 가공방법 설정을 위한 기초 데이터를 확보하였다.

2. 실험 방법

2.1 EDM(Electric Discharge Machining)

방전가공이란 전기의 양극과 음극이 부딪힐 때 일어나는 스파크로 가공하는 방법이다. 스파크로 일어난 열에너지는 가공하고자 하는 재료를 녹이거나 기화시켜 제거함으로써 원하는 모양으로 만들어 준다. 물론 방전은 아주 작게 또는 아주 빠르게 일어나도록 제어되고, 시편의 가공부분은 아주 작은 입자가 되어 녹거나 기화되어 제거되기 때문에 정밀가공이 가능하게 된다. 이 방전가공의 절대조건은 스파크를 일으키기 위해 양극 역할을 하는 시편이 전기적으로 전도성을 띠어야 한다는 것이다. 이 조건 때문에 금속가공에서는 이미 오래전부터 방전가공이 널리 이용되어왔다. 일반적으로 다른 가공법에 비해 방전가공이 가지는 특징은 다음과 같다.

- 전기 방전에 의한 높은 열에너지로 아주 단단한 재료도 쉽게 가공
- 기계적인 응력을 가하지 않고 가공
- 복잡한 모양 가공 가능
- 정밀 가공 가능
- 컴퓨터 수치제어기기(CNC)와 연결하여 공정의 프로그램화 및 자동화 가능

방전가공 기계는 전기에너지를 스파크 방전이 일어나는 동안에 플라즈마 방전 채널을 통해 열에너지로 변환한다. 이 열 에너지는 공정 중에 공작물 재료를 용융시키고 기화시킨다. 용융된 공작물과 전극 재료는 공작물 표면에서 고체화되어 새로운 수정층(Recast layer)을 형성한다. 여기서 고온은 2가지 효과를 만든다. 첫째,

수정층에서 열영향부(Heat affected zone)를 생성한다. 둘째, 고온은 공작물에서 열응력(Thermal stress)을 만든다. 따라서 방전가공은 가공면에 형성된 수정층(Recast layer)이 방전 크레이터(Discharge crater)와 미세균열(Micro-crack)을 포함하기 때문에 표면 품질이 열악하다는 단점을 가지고 있다. 이것은 미세 구멍의 직경에 영향을 미치고, 기하학적 형상의 정밀도를 악화시킨다. 그러므로 가공 시 정밀도를 향상시키기 위하여 피검사체에 대한 정확한 가공인자들을 파악하는 것이 중요하다.

2.2 EDM 가공 장비

Table 1은 냉각공 가공을 위한 세부장비 사양을 보여주고 있으며, Fig. 1은 EDM Super drilling machine을 이용한 가공실험장치 그림이다.

Table 1 Specification of EDM drilling machine

Maker	KTC
Model	MK-814MC
Max Work piece size (W×D×H)	700 × 400 × 200mm
X, Y table stroke	350 × 200mm
Z-axis stroke	350mm
Electrode guide travel distance	350mm
Usable electrode diameter	Ø 0.1 ~ 4.0mm
Usable electrode length	200 ~ 400mm
Outside dimension (W×D×H)	1200 × 1210 × 1850mm
Max, power input	4KVA
Input voltage	AC 3Ø, 200 ~ 220V, 50 ~ 60Hz
Max, machining current	30A



Fig. 1 EDM super drilling machine Fig. 2 Drilling test on flat specimen and cooling hole drilling test

2.3 가공 방법

Fig. 2는 냉각공 가공을 위하여 기준 블레이드 소재와 같은 GTD 111DS 소재의 평판 시편(20×30×6.6)을 제작하여 기본 변수 설정을 위하여 동일한 형상의 예비실험을 보여주고 있다. 냉각공의 크기가 두 가지로 이를 만족시키기 위하여 지름이 작은 0.8mm 전극을 1차 가공 후 1.3mm 크기의 전극봉으로 2차 가공하였다. 두 개의 냉각공이 만나는 지점의 구조가 Reducer type으로 원호처리를 위해 전극에 인위적으로 가공처리를 하지 않고 자연방전으로 만들어지도록 하였다. 냉각공의 기준 크기는 Ø0.84, Ø1.35나 산업용의 전극봉이 없어 Ø0.8, Ø1.3의 전극봉을 사용하여 실험하였다[3].

Table 2 Machine factor for cooling hole drilling

	Flat specimen		Blade	
	Ø0.8	Ø1.3	Ø0.8	Ø1.3
Depth(mm)	14	4	25	4
Processing time(sec.)	90	25	100	35
Equipment setting	12/03	12/03	12/03	12/03



Fig. 3 Cooling hole specimen

Table 2은 평판 시험편과 블레이드의 냉각공 가공을 위한 기본 변수들이다. 실험시험편에 기본값을 설정하기 위하여 11회의 시험을 거쳐 평판 시험편에 3개의 홀과 블레이드 리딩 에지(Leading edge)에 5개의 냉각공을 가공하였다.

Fig. 3은 실험한 결과를 Image analyser로 관찰하기 위해 마운팅한 시험편으로 (a)는 6.175Hrs의 운전이력을 갖는 7FAe 1단 블레이드의 Cooling hole에서 채취한 시험편이고, (b)는 평판 시험편, (c)는 7FA 블레이드 리딩 에지에 가공한 시험편이다. 이 시험편을 통해 냉각공의 직진도, 진원도 및 수정층(Recast layer)을 측정하였다.

3. EDM 가공 결과

3.1 사용재 블레이드

Fig. 4는 상당 운전시간(EOH : Equivalent Operation Hour) 6.175Hrs의 운전이력을 갖는 7FAe 1단 블레이드의 냉각공을 절단한 단면으로서 수정층(Recast layer)은 운전 중 산화로 인해 확인할 수 없었으며, 가공면의 직진성도 우수하게 나타났다.



Fig. 4 Real blade cooling hole section

3.2 평판시험 냉각공 가공결과

Table 3은 평판시험편의 진원도를 측정한 결과이다. 실제 블레이드의 냉각공 기준값이 $\phi 0.84$, $\phi 1.35$ 이나 $\phi 0.8$, $\phi 1.3$ 의 전극봉을 사용하여 가공한 결과 기준치 범위 안에 들어옴을 알 수 있었으며, 또한 우수한 직진도 성능을 보여주고 있다. Table 4는 가공 경계면에 대한 수정층(Recast layer)을 측정한 결과 평균 $11.8\mu m$ 및 $12.6\mu m$ 로 기준치인 $38\mu m$ 이내로서 가공요구조건을 만족하고 있다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 수정층(Recast layer)이 전반적으로 균일한 양상을 보여주고 있으며, Fig. 6은 국부적으로 가장 큰 Recast된 부위로 그 값이 $28.556\mu m$ 으로 기준치인 $50\mu m$ 안에 들어오고 있다.

Table 3 Measuring result for plate specimens

		1	2	3	Avg.
1st Hole ($\phi 0.8mm, \mu m$)	90	818.23	818.98	819.20	818.80
	180	818.27	818.86	819.12	818.75
2nd Hole ($\phi 1.3mm, \mu m$)	90	1324.8	1325.3	1325.2	1325.1
	180	1325.3	1325.1	1324.9	1325.1

Table 4 Measuring result for recast layer

		1	2	3	4	5	Avg.
Recast layer (μm)	$\phi 0.8$	11	13	12	15	8	11.8
	$\phi 1.3$	13	12	11	12	15	12.6

Table 5 Measuring result for surface roughness of cooling hole

		1	2	3	4	5	Avg.
Surface roughness ($Ra, \mu m$)		6.08	6.75	6.93	6.24	5.11	6.22

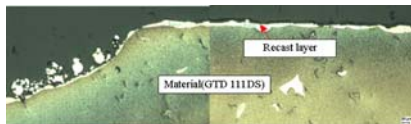


Fig. 5 Cooling hole section for plate specimen

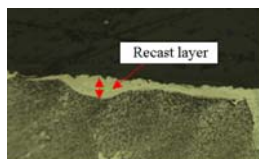


Fig. 6 Maximum recast layer of plate specimen(max.=28.556 μm)

3.3 블레이드 냉각공 가공결과

Table 6은 블레이드의 진원도 측정한 결과로서, 냉각공의 기준값 $\phi 0.84$, $\phi 1.35$ 이나 $\phi 0.8$, $\phi 1.3$ 의 전극봉으로 가공한 결과 각각의 평균값이 $819.05\mu m$, $1324.4\mu m$ 로서 가공오차범위인 $\pm 0.05mm$ 를 만족시키고 있으며, Fig. 7은 $\phi 0.8$ 냉각공에 대한 수평 단면으로 진원도와 직진도가 매우 우수한 성능을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

Table 7은 가공 경계면에 대한 수정층(Recast layer)을 측정한 결과 $\phi 0.8$, $\phi 1.3$ 에 대해 각각 $9.82\mu m$, $11.4\mu m$ 로 기준치인 $38\mu m$ 이내로서 가공요구조건에 만족하고 있다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 수정층(Recast layer)이 평판 가공보다 얇고 약간 불균일하게 나타나고 있으며, Fig. 9는 국부적으로 가장 큰 Recast된 부위로 그 값이 $70.839\mu m$ 으로 기준치인 $50\mu m$ 을 약간 초과함을 알 수 있다. 이는 가공 전류와 시간의 조절을 통해 가공 품질을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

Table 6 Measuring result for blade cooling hole

		1	2	3	4	5	Avg.
1st Hole ($\phi 0.8mm, \mu m$)	90	819.02	818.40	819.43	819.20	819.53	819.12
	180	818.98	818.58	819.10	819.02	819.21	818.98
2nd Hole ($\phi 1.3mm, \mu m$)	90	1323.1	1323.4	1324.3	1325.3	1324.8	1324.2
	180	1324.2	1324.5	1324.7	1324.8	1324.5	1324.5

Table 7 Measuring result of recast layer

		1	2	3	4	5	Avg.
Recast layer(μm)	$\phi 0.8$	10.8	13.8	6.6	8.0	9.9	9.82
	$\phi 1.3$	12	14	9	9	13	11.4

Table 8 Measuring result for surface roughness of cooling hole

		1	2	3	4	5	Avg.
Surface roughness($Ra, \mu m$)		6.45	6.33	6.50	6.24	6.80	6.46

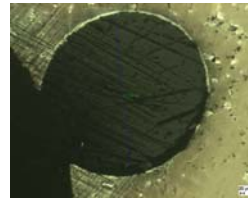


Fig. 7 Cooling hole horizontal section

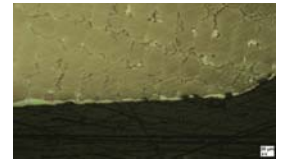


Fig. 8 Cooling hole vertical section

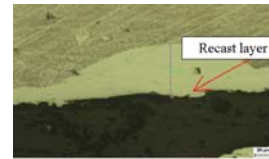


Fig. 9 Recast layer on drilling area of blade cooling hole

4. 결론

1단 블레이드 소재인 GTD 111DS 소재를 평판과 실제 블레이드에 EDM super drilling machine을 이용한 블레이드 냉각공 가공 실험을 통하여 다음과 같은 사항을 결론을 내렸다.

- (1) 가공면에 대한 진원도 및 직진성은 기준치를 만족하는 품질을 얻을 수 있었다.
- (2) 가공면의 수정층(Recast layer)은 평판 시험에서 전체적으로 균일하게 나타났으나 국부적으로 초과하는 현상이 나타났다. 이러한 문제점은 냉각공 가공시간과 전류의 조절을 통해 품질을 확보할 수 있다고 판단된다.
- (3) 방전가공(EDM) 조건에서는 수정층(Recast layer)에 미세크랙 등이 나타나지 않았다.
- (4) 주요 가공변수는 전류와 가공시간 즉 가공속도가 가공품질의 주요 변수로 작용하고 있음을 확인할 수 있었다.

후기

본 논문은 산자부에서 주관하는 전력산업연구 개발과제(2005. 09. 01 ~ 2009. 08. 31)의 1단계 연구보고서를 활용하여 작성한 논문입니다.

참고문헌

1. P. W. French, M. Naeem, and K. G. Watkins, "Laser Percussion Drilling of Aerospace Material using a 10kW Peak Power Laser using a 400 μm Optical Fibre Delivery System," 1, 2003
2. Kees Verhoeven, "Modelling Laser Percussion Drilling," Eindhoven University Press, 3-4, 2004
3. G. Thawari, J. K. Sarin, Sundar, G. Sundararajan and S. V. Joshi, "Influence of Process Parameters during Pulsed Nd:YAG Laser Cutting of Nickel-Base Superalloy," Journal of Material Processing Technology, Vol. 170, Issues 1-2, pp. 229-239, 2005