한국공작기계학회 '99년도 춘계학술대회 논문집 pp.256~262

Ni기 내열합금의 표면조도에 의한 전해가공조건의 설정

Determination of ECM paramater Base on surface Roughness for Ni base Heat Resistant Alloy

이 상 준(삼성항공), 정 윤 교(창원대학교)

Abstract

By development of heat resistant alloy, there are much improvement of gas turbine engines. But heat resistant alloy has difficulty of machining. therefore, ECM (Electrochemical Machining) is used for Machining of 3 dimensional curved surface of Ni-base alloy. The purpose of this paper is to investigate ECM parameters that make the good surface for Ni-base alloy blade.

For this purpose, we have been investigated that center line average surface roughness(R_a), average R_a, Maximum R_a and Standard deviation of R_a for measuring positions is influenced on ECM parameters such as electrolyte types, dwell time, electrolyte pressure and sort of electrolyte for Inconel 718 and Waspaloy.

1. 서론

가스 터빈과 제트엔진의 재료로 사용되어지는 내열합금은 Ni, Co등이 함유되어진 Inconel 계열의 금속으로, 열전도율이 낮고, 고온강도가 크며, 절삭시 구성인선이 잘 발생되는 등의 가공상의 문제점을 가지고 있다. 이러한 내열합금에 대한 수요는 증가하고 있으나 이러한 재료를 가공하기 위한 가공방법의 개발은 미약한 상태에 있다. 이러한 Ni기 내열합금의 가공방법으로는 전기화학적인 방법인 ECM(Electrochemical Machining)이 일반적으로 사용되어지고 있다.[1-4] ECM은 공작물의 기계적 성질과는 관계없이 높은 가공성, 긴 공구의 수명, 복잡한 형상의 작업반복성이 뛰어나고 재료의 성질을 변화시키지 않는 물리적인 안정성과 가공 후 공작물에 잔류응력을 남기지 등의 장점이 있지만, 많은 장치 비용과 긴 개발기간 등이 단점으로 지적되고 있어 다른 분야에서는 상대적으로 이용 빈도가 작고 항공산업 및 일부 자동차부품사업에 널리 이용되어지고 있다.

그러나 이러한 ECM가공에서의 문제점도 적지 않다. 가공능률의 저하, 작업환경의 열악함은 일반적인 문제이며, 특히 Ni기 내열합금에 대하여서는 거의 모든 제품에 흐름자국(Flow mark)이 발생하고 있는 것이 현실이다. 흐름자국(Flow mark)의 발생은 Blade의 표면조도를 나쁘게 하며, Blade를 통과하는 유체의 흐름 특성에 변화를 주게 되어, 유량손실, 엔진효율의 감소 등의 악영향을 초래하게 된다.[5] 그러나 ECM가공중 공작물 표면의 전해액 흐름자국(표면조도)에 대하여 가공조건과의 관계를 분석한 Data는 매우 드문 실정이며[6] 가공위치별 조도 값으로 분석한 예는 없었다.

본 연구에서는 Ni기 내열합금재질로 이루어진 가스 터어빈용 엔진의 압축기 Blade를 대상으로 ECM가공을 수행하여 Blade표면조도를 양호한 상태로 만들 수 있는 ECM가공 조건을 찾고자 한다. 이를 위하여, ECM가공에서 전해액의 흐름방향, Dwell time, 전해액의 압력, 전해액의 종류 등의 작업조건이 공작물 표면의 흐름자국의 상태를 대변할 수 있는 표면조도에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하여 압축기의 효율을 극대화 할 수 있는 ECM가공조건을 찾는데 그 목적이 있다.

2. ECM의 원리

ECM은 공구를 음극(Cathode)으로 하고 피삭재를 양극(Anode)으로 하여 그 사이에 전해액을 흘려 금속의 용출반응을 이용하여 가공하는 것을 말한다. 전해액은 Cathode와 Anode사이에 고속으로 흐르며 비교적 저전압이며 단락장치를 가진 직류가 흐른다. Cathode와 Anode의 가공틈(Cut gap)이 작은 곳에 전류밀도가 크기 때문에 틈새가 큰 공작물에 비해 공작물의 가공량이 많아져 일정시간의 경과 후 Anode의 모양이 공구의 모양과 상보상태(Mirror image)가 된다.

Fig. 1은 전해가공의 원리를 설명하고 있는 그림이다. 그림에서 나타난바와 같이, 공작물에 직류전원을 연결시키고 전해액으로 NaCl 염용액을 사용하면 전해액에서는 물이 분해되어 수소기(H^+)와 수산화기(OH^-)로 나뉘어지며 NaCl도 분해된다.

$$H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$$

$$NaCl \rightarrow Na^+ + Cl^-$$

Anode에서는 Fe원자가 2개의 전자를 내어놓고 전해액중에 녹아있는 Cl^-와 결합한 후 다시 OH^-와 치환되어 슬러지로 배출된다.

$$Fe^{2+} + 2Cl^- \rightarrow Fe(Cl)_2$$

$$Fe(Cl)_2 + 2OH \rightarrow Fe(OH)_2 + 2Cl^-$$

Cathode에서는 H^+이온이 모여들어 전자를 얻어 수소를 발생하게 된다.

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$$

3. 실험장치 및 실험방법

3-1 실험장치

본 실험에서 사용되어진 ECM장비는 CNC에 의해 제어되어지는 4개의 선형축을 가지고 있으며 최대 전해전류 10000A, 최대축 이송속도 20 in/min, 최대가공 전압은 20V이다. 전해액은 $NaNO_3$용액과 NaCl용액을 사용하도록 되어있고 프로그램에 의해 일정한 농도와 온도, pH를 맞출 수 있도록 되어있다. Table 1은 본 실험에서 사용되어진 ECM장비의 사양을 나타낸다.

Fig. 2는 ECM가공의 계통도를 보이고 있다. 전해액은 Flow box내에 공급되어지고 가공 종료 후 전해액 탱크로 보내어져 Sludge가 Filter에 의해 걸러져 재사용되어지며, 전해액의 흡입 및 배출은 NC제어가 가능하도록 되어있다. 사용되어진 전극은 구리-텅스텐 합금으로 5축 NC 밀링장비를 이용하여 가공하였다. ECM가공을 위한 공작물은 Inconel 718 니켈합금과 Waspaloy 니켈합금을 사용하였으며, 그 성분은 Table 2에 표시하였다.

ECM가공 후 Blade면의 조도는 촉침식 표면조도계(Mitutoyo)에 의하여 중심선 평균조도(R_a) 및 최대거칠기(R_{max})를 측정하였다.

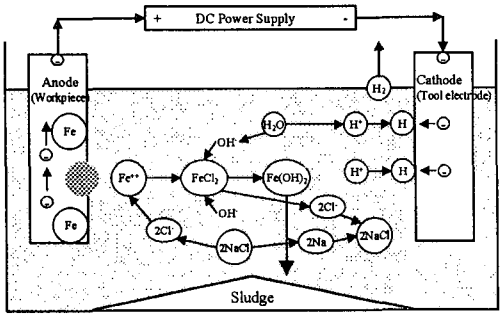


Fig. 1 ECM Mechanism

Table 1 Specification of ECM machine

Item	Specification
Machine	4axis ECM machine
Cathode	Cu-W(5axis milling Machining)
Electrolyte	$NaNO_3$, NaCl
Feed	0.0005~20 in/min(front gap) 0.003~20 in/min(side gap)
Voltage	3~20 V
Current	250~10000 A
Electrolyte pressure	0~250 lb/in^2
Electrolyte tempreature	90~110 °F
Pump power	125 HP

Table 2 Material composition(%)

	Ni	Cr	Mo	Ti	Al	Cb+Ta	F	Zr	B	Co
Inconel718	50~55	19	3.1	0.9	0.6	5.3	1	-	-	-
Waspaloy	remainder	19	4.25	3.0	1.4	-	-	0.07	0.007	19

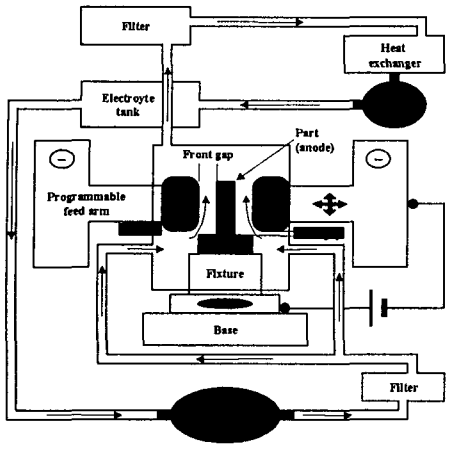


Fig. 2 ECM system

Table 3 Experimental conditions

Item	Conditions	Remark
Dwell time	0, 6 sec 6, 10, 14 sec	0.003" Cut gap increase 0.004" Cut gap increase
Flow type	Normal direction One side one direction One side two direction Two side one direction	Normal flow Smooth flow(1side) Smooth flow(2side) Smooth flow(both side)
Dev. of electroyte pressure	35, 45, 55, 60, 75psi	
Workpiece	Inconel 718, Waspaloy	

3-2 실험방법

본 실험에서는 전압과 Feed rate는 Gap size와 밀접한 관련이 있으므로 작업조건을 달리 하지 않고 프로그램상에서 일정하게 유지하도록 하였다. 전해액의 정도와 온도는 각 전해액에 따라 일정하게 관리 될 수 있도록 하였으며, 전해액의 흐름방향, Dwell time, 전해액 압력, 전해액의 종류 등을 달리하여 이에 따른 표면조도에의 영향을 검토하였다. 실험에서 사용되어진 조건은 Table 3에서 나타내었다.

전해액 흐름방향이 표면조도에 미치는 영향을 알기 위하여 크게 4가지로 구분하여 검토하였다. Fig. 3의 Normal flow는 기본적인 전해액의 흐름으로서 90° 의 급격한 유로 변화가 생기기 때문에 Vena contracta현상에 의해 전해액의 흐름속도가 빨라지며 이상유동이 나타날 가능성이 크다고 할 수 있다. 이러한 현상을 피하기 위해 한 방향에 대해서만 전해액이 부드럽게 유입되어질 수

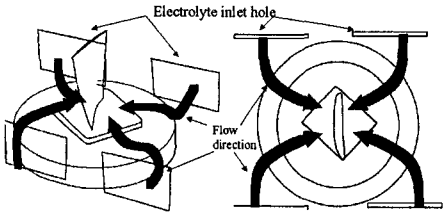


Fig. 3 Normal flow

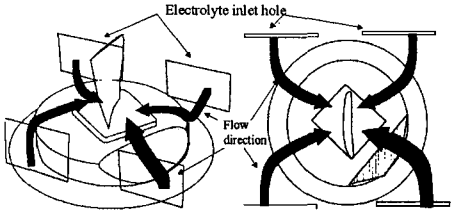


Fig. 4 One side one direction flow

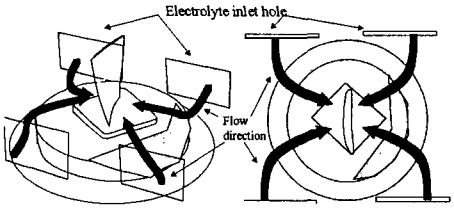


Fig. 5 One side two direction flow

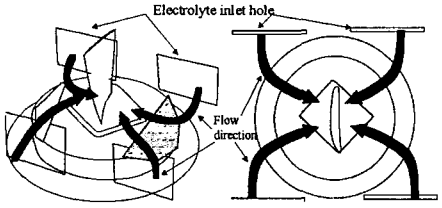
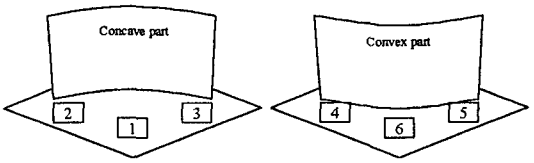
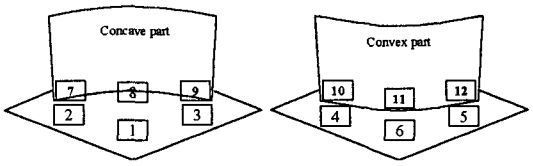


Fig. 6 Two side one direction flow

있도록 Fixture를 개량한 것이 Fig. 4의 One side one direction flow이다. 다시 같은 면에 대하여 다른 방향에 경사를 두면 부분적으로 전해액이 편심되어 들어가지만 전해액의 흐름이 One side one direction flow보다 비교적 균일하게 한 것이 Fig. 5의 One side two direction flow이다. 다시 양쪽방향으로 전해액이 합쳐지는 중간부분에 경사를 두어 전해액이 균일하게 흐르면서도 급격한 유로 변화를 거치지 않고 부드럽게 유입하도록 한 흐름이 Fig. 6의 Two side one direction이다. 본 연구에서는 이러한 4가지 타입의 흐름이



(a) Inconel 718 measuring position



(b) Waspaloy measuring position

Fig. 7 Measuring position

Blade의 표면조도에 미치는 영향을 비교하였다.

표면조도의 측정은 Inconel 718인 경우 육안상 상대적으로 거칠게 나타난 Side gap으로 가공된 부분을 측정하였다. Fig. 7은 그 측정위치를 나타낸 것으로 ①②③의 위치는 concave부분의 전해액이 유입되는 부분이고 ④⑤⑥은 convex부분에 전해액이 유입되는 위치이다. 그리고 Waspaloy의 경우는 전해액의 방향이 Side gap에서 Front gab으로 바뀌는 부분의 Airfoil의 조도값인 ⑦⑧⑨⑩⑪⑫의 위치를 추가하여 측정하였다.

4. 전해가공조건과 표면조도

4-1 Flow type이 표면조도에 미치는 영향

전해액은 전극과 공작물사이에서 가공에 직접 관여할뿐만 아니라 가공 중 발생하는 슬러지 및 수소 Gas를 배출시키고 냉각효과도 있기 때문에 표면에 직접 관여한다. 따라서, 전해액을 이상유동 없이 부드럽게 유입되게 하거나 균일하게 흐르게 하는 것은 ECM가공 표면에 매우 큰 영향을 미친다.

Fig. 8은 Inconel 718에 대하여 Normal flow, One side one direction flow, One side two direction flow의 전해액의 흐름유형에 따라 Side gap의 위치별로 중심선 평균조도 R_a의 값을 측정 비교한 값이다. 그림에서 보는바와 같이, R_a의 값이 ①번 위치에서는 전해액의 흐름이 급격히 변화하는 Normal flow보다, 전해액의 흐름을 부드럽게 한 다른 흐름유형이 표면의 상태가 양호하

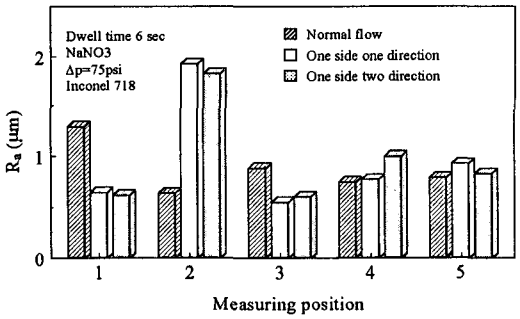


Fig. 8 The comparison of R_a depend on flow direction and measuring position

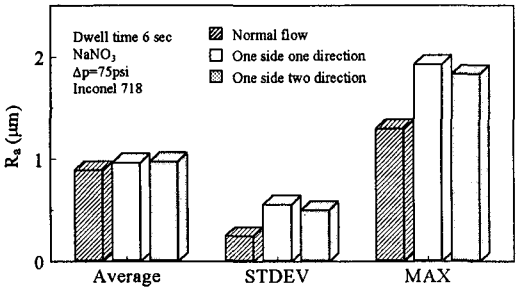


Fig. 9 The comparison of average R_a, maximum R_a and standard deviation depend on flow direction

였다. 그러나, 반대쪽에서는 흐름의 변화가 없으므로 표면조도의 변화는 없었다. Fig. 9는 각 위치에서의 R_a값의 평균과 표준편차 그리고 최대값을 흐름의 유형별로 나타낸 그림이다. 표준편차의 의미는 측정위치에 따라 R_a값의 산포를 나타내는 인자로서, 이 값이 크면 산포가 크고 이 값이 작으면 산포가 작음을 의미한다. 그림에서 보는바와 같이, 전체적인 R_a의 평균은 큰 차이를 보이지 않고 있으나 전해액의 흐름이 균일한 Normal flow가 평균, 표준편차 및 최대값이 비교적 작아 안정적인 표면을 얻을 수 있고, 전해액의 흐름이 균일하지 못한 One side one direction flow, One side two direction flow는 조도값이 매우 좋지 않은 면이 있어 부적절한 가공조건임을 알 수 있다.

Fig. 10은 Waspaloy에 대하여, Normal flow와 Two side one direction flow 두 유형의 흐름으로 전해액을 유입하였을 때 각 위치에서의 R_a값을 비교한 그림이다. Front gap과 Side gap 어느

곳이나 대부분의 위치에서 Two side one direction flow가 R_a값이 작음을 알 수 있다. 단, Two side one direction flow의 조건을 만들기 위한 가공부위 끝점에 위치한 ③④⑤번의 위치에서는 Normal flow가 오히려 양호하였다. Fig. 11은 각 위치에서의 R_a의 평균, 표준편차, 최대값를 비교 한 것인데 어느 것이나 Two side one direction flow쪽이 바람직한 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 R_a뿐 아니라 R_{max}로도 측정하여 흐름의 유형별로 비교하여 보았으나 R_a의 결과와 같은 경향을 나타내었다.

4-2 Dwell time이 표면조도에 미치는 영향

Dwell time은 전극을 움직이지 않고 전류의 변화만으로 가공하는 것으로 본 장비에서는 Dwell time 1초 증가시 Cut gap은 약 0.01″ 씩 증가하도록 되어있으며, Dwell time의 증가는 동일한 유량에 대하여 Cut gap이 크지게 되므로 동일유량에 대하여 흐르는 면적이 증가하여 전해액의 속도가 감소되고 전해액의 이상유동 현상의 가능성이 줄어든다고 할 수 있다.

Fig. 12는 Inconel 718에 대하여 Dwell time을 달리하여 ECM가공한 후 각 위치별로 R_a값을 측정한 그림이며, Fig. 13은 각 위치에서의 R_a값의 평균과 표준편차 그리고 최대값을 나타낸 그림이다. Dwell time이 6초인 경우가 0초에 비하여 전해액의 유동속도가 늦어 균일하게 유입되므로 표면조도가 양호하며 안정적으로 가공되어짐을 알 수 있다.

Fig.14는 Waspaloy를 Dwell time을 달리하여 ECM가공후 각 위치별로 R_a값을 측정 비교한 그림이며, Fig. 15는 각 위치의 R_a값을 평균과 표준편차, 그리고 최대값을 표시한 그림이다. Dwell time이 6초에서 10초로 증가하였을 경우 표면조도는 매우 양호하여졌으며, 산포도 줄어들었음을 알 수가 있다. 그러나 다시 14초로 증가한 경우에는 오히려 표면조도가 악화됨을 알 수가 있다.

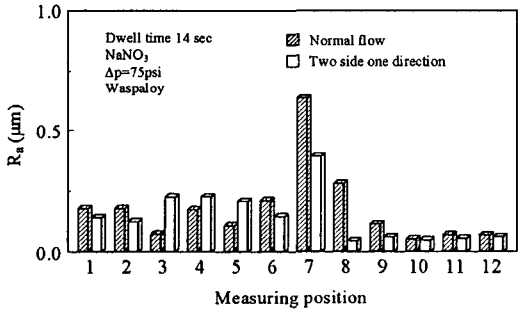


Fig. 10 The comparison of R_a depend on flow direction and measuring position

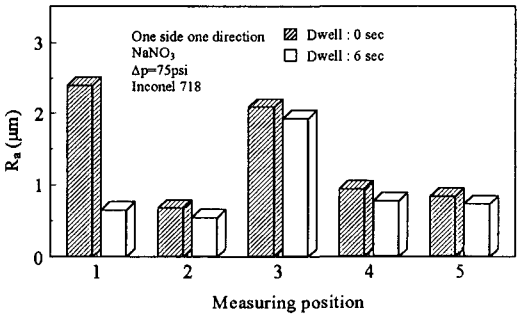


Fig. 12 The comparison of R_a depend on dwell time and measuring position

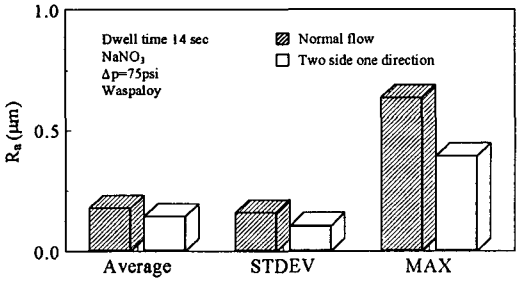


Fig. 11 The comparison of average R_a, maximum R_a and standard deviation depend on flow direction

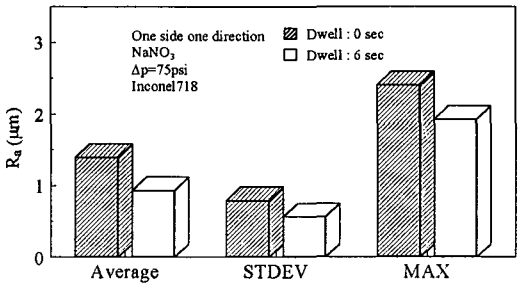


Fig. 13 The comparison of average R_a, maximum R_a and standard deviation depend on dwell times

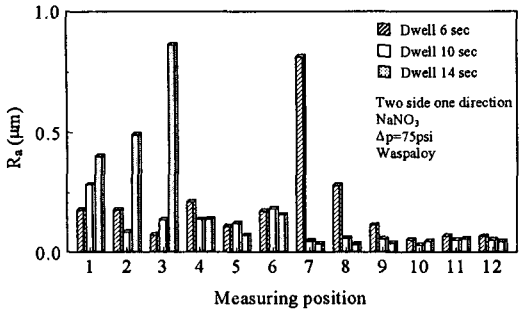


Fig. 14 The comparison of R_a depend on dwell time and measuring position

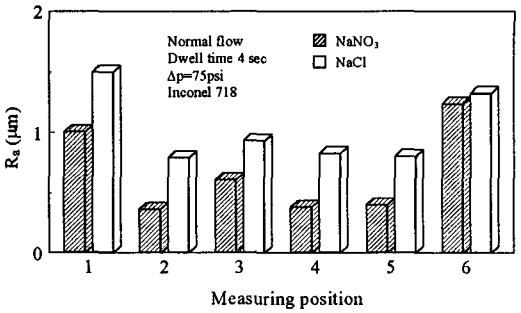


Fig. 16 The comparison of R_a depend on electrolye type and measuring position

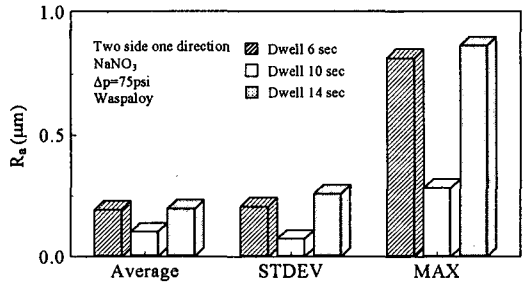


Fig. 15 The comparison of average R_a, maximum R_a and standard deviation depend on dwell times

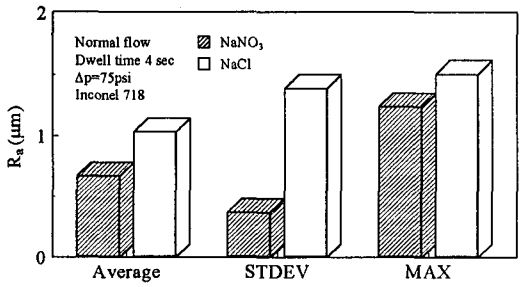


Fig. 17 The comparison of average R_a, maximum R_a and standard deviation depend on electrolye type

따라서 Cut gap이 충분히 확보되어 있는 상태에서의 지나친 확대는 가공 gap사이의 전해액의 속도를 떨어뜨리며 가공의 명확성 측면에서 보장할 수 없다고 사료된다.

4-3 전해액이 표면조도에 미치는 영향

전해액은 ECM에서 공작물의 금속이온과 결합하여 다시 OH^-이온과 치환하게 되어 가공을 이루는 중간촉매 역할을 하게 되므로 ECM 가공표면에 미치는 영향은 매우 크다.

Fig. 16은 Ni기 내열합금의 ECM에서 가장 일반적으로 사용되는 NaCl과 $NaNO_3$ 2종류의 전해액을 사용하여, Inconel을 대상으로 ECM가공하여 표면조도를 각 위치별로 비교한 그림이며, Fig. 17은 각 위치별 R_a의 평균, 표준편차와 최대값을 나타낸 그림이다. $NaNO_3$에 의해 가공되어진 표면이 NaCl로 가공되어진 표면의 조도값 보다 매우 양호하며 각 위치별로 표면조도의 산포도 작음을 알 수 있다.

4-4 전해액의 압력이 표면조도에 미치는 영향

전해액의 압력차가 높을수록 전해액의 흐름과 슬러지의 배출이 원활하여 가공이 잘되는 곳으로 알려져있다. 그러나 그 압력을 지나치게 높게 한 경우는 Cavitation의 발생과 기포발생 및 진동 등으로 가공이 불안정해지게된다.

Fig. 18은 Waspaloy에 대하여, 전해액의 입구와 출구의 압력 차이별로 ECM가공한 후 측정위치별로 R_a의 값을 비교한 그림이며, Fig. 19는 각 위치의 R_a의 평균값, 표준편차 및 최대값을 표시한 것이다. Δ75psi에서 Front gap의 일부에서 조도가 나쁘게 되는 경향이 있으며, Δ75psi조건에서는 가공 중 소음 및 진동현상도 감지되었다. Δ45psi와 Δ60psi의 경우는 Side gap이나 Front gap에서 조도의 특별한 경향을 보이지 않고 있으나, 전체적으로 R_a의 평균, 표준편차와 최대값의 비교에서는 Δ60psi가 보다 양호한 결과를 나타내고 있다. 정상적인 가공조건에서는 전해액의 압력이 높을수록 좋으나 특정압력 이상이 되면

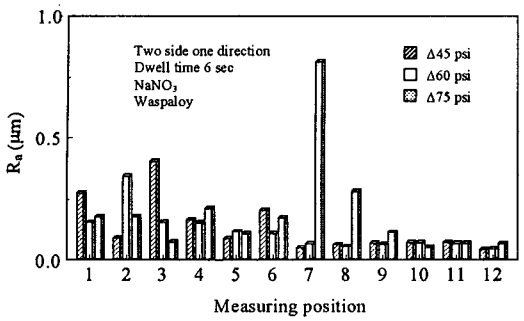


Fig. 18 The comparison of R_a depend on electrolye pressure and measuring position

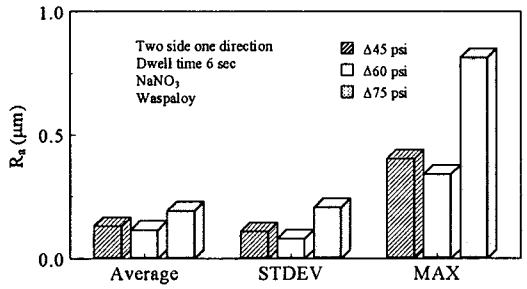


Fig. 19 The comparison of average R_a, maximum R_a and standard deviation depend on electrolye pressure

오히려 역효과를 가져온다고 할 수 있다. 이와같은 현상은 R_{max}에서도 같은 경향을 보여주었다.

5. 결론

본 연구에서는 Ni기 내열합금 재질의 압축기 블레이드를 대상으로 ECM가공을 수행하여 양호한 표면조도를 얻기 위한 가공조건의 선정을 위하여 전해액의 흐름방향, Dwell time, 전해액 압력, 전해액 종류의 변화에 대한 표면조도를 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전해액은 전체 가공면에 대해 고르게 유입이 되어야 하며, 가공면에 대해 전해액 유입의 편심이 존재할 경우 전해액의 흐름을 개선하더라도 큰 효과를 가져오지 못한다. 또한 전해액이 가공틈내로 유입시에 급격한 유로 변화 없이 부드럽게 유입되게 설계되어야 좋은 조도를 얻을 수 있다.

(2) ECM가공시에 충분한 Cut gap이 확보되어야 하며, 이를 위해 Dwell times을 주는 것은 조도향상을 위해 좋은 방법이다. 본 실험에서는 Inconel 718의 경우 0초보다는 6초가 양호하였고, Waspaloy의 경우 10초가 가장 양호하다.

(3) NaCl과 NaNO3의 전해액중 Inconel 718에 대해서는 NaNO3 전해액이 전해 가공후 표면조도를 더 양호하게 하였다.

(4) 전해액의 압력차가 클수록 가공표면이 양호하지만, 본 실험에서는 Wasploy의 경우 Δ60psi가 가장 양호한 표면조도를 보여주었고, Inconel 718의 경우 Δ55psi가 가장 양호한 표면조도를 보여주었으며, 양쪽 재질 모두 이보다 높은 경우 좋지 않은 표면조도를 보여주었다.

참고문헌

(1) H. Tipton "The Calulation of Tool Shapes for Electro chemical Machining" Fundamentals Electrochemical Machining, The Electrochemical Society, pp. 87~101, 1971.

(2) R. H. Nilson and Y. G. Tsuei, "Free Boundary Problem for the Laplace Equation with Application to ECM Tool Design", Trans. of ASME, pp. 54~58, March 1976.

(3) V. K. Jane and P. C. Pandey, "Tool Design for ECM-A Finite Element Approach" ASME Journal Engineering for Industry Vol. 103, pp. 183~191, 1981.

(4) M. S. Reddy, V. K. Jane and G. K. Lai, "Tool Design for ECM : Correction Factor Method", ASME Journal Engineering for Industry Vol. 110, pp. 111~118, 1988.

(5) K. Bammert and T. V. Vorburger, "Influence of Manufacturing Tolerences and Surface Roughness of Blade on Performance of Turbine", ASME SN-CTA-047, pp. 3~8, 1976.

(6) J. F. Evans and P. J. Bodem "Surface Finish Produced during Electrochemical Machining on Nickel and Nimonic in Chloride Electrolytes" ASME, pp 40~62, 1971.