

## 와이어 방전 가공 시 발생하는 열응력 분포에 관한 유한요소법적 고찰

반재삼\*(전남대 대학원), 김승욱(전남대 공동기기센터),  
김선진(서강정보대), 조규재(조선대 기계공학과)

### A study on the Thermal Stress Distribution for Wire Electircal Discharge by Finite Element Method

J. S. Ban(Mech. Eng. Dept., CNU), S. W. Kim(RFC., CNU),  
S. J. Kim(Seokang College), K. J. Cho(Mech. Eng. Dept., CSU)

#### ABSTRACT

The Purpose of this study is to know temperature and thermal stress distribution in specimens during processing of WEDM. If it is constant to the cutting speed and the thickness of material, it is very important to the effect of temperature and the thermal stress distribution after cutting processing. This paper show the analysis result of the distribution of temperature and the residual stress along the direction of thickness before processing of WEDM and after when the cooling temperature is 20℃. The maximum temperature of edge of specimens is 1600℃. It has little temperature gradient in the depth which is 5mm away from edge of specimens. Equivalent residual stress is result in 180.7 MPa at maximum temperature.

**Key Words** : Residual stress(잔류응력), Cooling Temperature(전해액 온도), WEDM(와이어 방전 가공), Equivalen stress(등가응력), Temperature gradient(온도 구배)

#### 1. 서론

최근 와이어 방전가공의 응용범위가 확대되고 있으나, 생산성을 향상시키기 위한 방안으로 가공성과 관련이 되는 가공조건들의 영향을 분석, 선정하고, 이들 인자의 영향을 이론적으로 명확히 규명한 후, 최적의 가공조건을 제시하지는 못하고 있다. 따라서 현재 현장에서는 보다 효율적인 와이어 방전가공을 위하여 가공경험이 풍부한 작업자의 경험에만 의존하고 있는 실정이다. 적정 가공조건 선정에 따른 문제를 해결하기 위한 연구는 방전현상에 따른 가공조건을 정확히 모델링하는 것이 어려워 대부분 특정한 환경조건에서의 가공 조건 결정에 관한 연구에 국한되어 있다. 이에 대한 연구로 J.A.Freeman<sup>1)</sup>과 R. Vaidynathan<sup>2)</sup>이 실험적 연구를 통하여 방전가공성을 표현하는 회귀모델의 기초를 제공하였고, T. Masuzawa<sup>3)</sup>은 동적 제트 분출법을 이용한 최적 방전가공법에 관한 연구를 등을 알 수 있다. 와이어 방전가공에 대한 연구로 J.Prohaszka<sup>4)</sup>는 와이어 방전 가

공시 와이어의 화학적 성분이 가공성에 미치는 영향에 대한 연구했고, Z.N.Guo<sup>5)</sup>는 와이어에 초음파진동을 가하였을 때의 방전가공성을, W.J.Hsue<sup>6)</sup>는 와이어 방전 가공시 코너부분의 가공에 대한 기하학적 해석에 대하여 연구하였다. W. Dekeyser<sup>7)</sup>는 전기방전으로 발생한 열이 유입된 와이어의 온도변화 계산 모델에 대해, J.T. Huang<sup>8)</sup>는 와이어 방전 가공시 방전 파라미터의 활용에 대한 것들이 있다. 국내에서는 최태건<sup>9)</sup>이 와이어 방전가공기의 와이어 장력제어에 대한 연구를, 강상훈<sup>10)</sup>은 CAD/CAM와이어 방전가공의 가공확대여유에 관해 연구를 했으나 와이어 방전가공의 가공성 향상을 위한 이론적 규명과 최적가공에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 연구 노력을 토대로 FEM을 이용하여 방전가공 시 냉각수 온도를 20℃로 일정하게 한 후, 일정두께의 시편재료(5×13×30)를 일정속도(20mm<sup>2</sup>/min)로 가공시 발생하는 열의 분포와 가공후 나타나는 잔류응력의 양을 정량적으로 밝혀내는 것을 그 목적으로 하고 있다.

## 2. 유한요소 모델링

본 논문에서 유한 요소법을 이용한 잔류응력 분포 예측 과정은 먼저 온도 분포 해석을 하여 전체 모델에 작용된 온도이력(Temperature history)을 일차적으로 해석하여 그 해석의 결과로부터 얻은 온도 분포를 바탕으로 열응력 및 변위를 구하는 2단계 해석 과정으로 나누어 해석을 진행하였다. 계산은 유한요소법을 이용하여 주어진 Wire Cutting 조건과, 온도 변화에 따른 재료의 물성치(열팽창계수, 열전도도, 항복응력)를 고려하여 먼저 온도 분포 해석으로부터 절단부 주위의 온도 분포를 얻어낸 다음 열팽창으로 인하여 발생하는 응력 및 변위를 계산하는 순서로 수치 해석을 하였다. 계산은 UNIX. Workstation(RS 6000, IBM사)에서 실행하였으며, 유한요소 해석을 수행하기 위한 Modeling은 MARC의 전용 Preprocess 인 Mentat330(MSC, 미국)에서 기하학적 형상(Geometry)과 요소(Element) 형성 및 Element Type를 선정하였다. 또한 여기서 얻은 모델을 상용 Code인 MARC(Ver 7.3, MSC, 미국)를 이용하여 해석을 수행하였다. 잔류응력 해석 시 해석적 열원(Heat source)의 선정에 있어서 열의 발생은 와이어의 아크 발생부를 따라 규칙적으로 발생한다고 가정하여 선형 열원(Line source)으로 선택하여 해석 경계면에 전체적으로 열이 분포되어 전달되는 것으로 하였다. 또한 실제에 있어서는 절연유 분류에 의해 일정한 파형을 가지면서 진동 요인을 가지고 있을 수 있으나 해석 시 필요한 Memory 용량이나 해석 시간 등을 감안해서 이러한 요인들은 생략하여 해석하였다. 모재는 상온으로부터 wire cutting에 의한 입열이 시작되는 예열 과정과 용융, 가열후 냉각의 과정을 거치게 된다. 이 모델을 해석하기 위하여 8-절점(node) 요소를 사용하였고, 해석을 효과적으로 하기 위하여 열원의 근처에서는 요소 내의 온도구배가 큰 점을 감안하여 요소 크기를 작게하고 열원에서 멀어지는 부분으로 갈수록 크게 하였다.

## 3. 구성 방정식

### 3.1 열전달 수식화

열전달 해석(Heat Transfer Analysis)시 온도에 의해 변화하는 재료의 열 적인 특성(열팽창계수, 열전도도, 비열)과 주위 표면들에서의 대류에 의한 열 손실량도 유한요소 모델 내에 포함시켜 계산하였다. 응력 및 변위 해석은, 앞에서 얻어낸 온도 해석의 결과를 저장하여 응력 해석 시 그 온도 분포 이력을 읽어서 사용하였다. 3차원 비등방(anisotropic) 재료에서 열전달 방정식을 고려해 보면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) + Q_i = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{-----}(1)$$

여기서,

T : Temperature, t : Time

k : Heat conduction coefficient

Q<sub>i</sub> : Internal heat generation rate per unit volum

ρ : Density, c<sub>p</sub> : Specific heat

이 식을 풀기 위해서 초기 조건(Initial Condition)과 경계조건을 적용하여 보면, 시간이 0인 상태에서 온도 분포는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \quad \text{-----}(2)$$

여기서 T<sub>0</sub>는 초기 온도이다.

Wire cutting의 경우 피 가공물을 가공하는 요소는 Joule Heat와 Discharges에 의한 온도이며, 최종 wire 온도는 열전달 계수 h에 큰 영향을 받는다<sup>11)</sup>. 경계조건은 Wire 가공 중 재료 경계에서 발생하는 흡열과 방열의 과정은 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>12)</sup>.

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = q \quad \text{-----}(3)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_w - T_s) \quad \text{----}(4)$$

여기서,

q : Uniformly distributed Heat input

n : Outer normal vector to the boundary

h : Heat convection coefficient

T<sub>w</sub> : Cooling temperature, T<sub>s</sub> : Surface temperature

Wire 가공에서의 열 공급원(Heat source)인 Wire의 온도를 계산하기 위하여 식을 1차 식으로 나타내어 보면 다음과 같다<sup>13)</sup>.

$$\frac{d^2 T(x)}{dx^2} - m \frac{dT(x)}{dx} - \frac{hL}{kS} T(x) = -\frac{q}{k} \quad (5)$$

여기서,

$$m = \frac{\rho c_p V_w}{k}, \quad V_w : \text{Wire Winding Velocity}$$

### 3.2 잔류응력의 기본 계산식

잔류응력을 위한 Strain 값을 구하는 기본식은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이는 전체 Strain 양은 Elastic Strain, Plastic Strain 그리고, Thermal Strain의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^p + \epsilon_{ij}^{th} \quad \text{-----}(6)$$

여기서, ε<sub>ij</sub> : Total Strain, ε<sub>ij</sub><sup>e</sup> : Elastic Strain

ε<sub>ij</sub><sup>p</sup> : Plastic Strain, ε<sub>ij</sub><sup>th</sup> : Thermal Strain

이 식 중 Elastic Strain 부분을 Hook's Law 에 적용시키면<sup>14)</sup>

$$\epsilon_{ij}^e = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \cdot \delta_{ij} \quad \text{-----}(7)$$

여기서,  $\delta_{ij}$  : Kronecker symbol

$\nu$  : Poisson's ratio, E : Young's modulus

와 같이 나타낼 수 있으며, Thermal strain 부분은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{ij}^{th} = \alpha (T - T_r) \quad \text{-----}(8)$$

또한 Plastic Strain 부분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{ij}^p = \int_0^t \dot{\epsilon}_{ij}^p dt \quad \text{-----}(9)$$

#### 4. 응력 해석

유한 요소 해석의 계산 순서는 크게 나누어, 온도 분포 해석 단계와 응력 / 변위 해석 단계, 그리고 각각의 결과 해석 단계로 나눌 수 있다. 재료의 기하학적 형상(Geometry)은 무한 평판으로 가정할 수 있으나 시간과 Computer 메모리 용량, 그리고 신뢰도를 고려하여 5×13×30(mm)로 결정하였다. 이 모델을 해석하기 위한 요소(Element)는 절점(node)이 8개인 Quad8 요소를 선택하여 Mesh를 만들었으며, 온도 분포 해석을 위한 경계조건(Boundary Condition)은 그림 1에 나타낸 것과 같이 Y-Z 평면에 대한 X-symmetric과 X-Y 평면에 대한 Z-symmetric 조건을 적용하였다. Fig.1 에는 Wire에서 발생된 입열을 모델에 적용한 경계조건을 나타낸 그림으로서 Y-축으로 균일하게 열이 가해진다고 가정하여 적용하였다. 여기서 얻어진 온도 이력(history)은 MARC 출력 파일(Output File)인 dat file에 저장되어 있으며 그림에는 초기온도(절연유)가 상온인 20℃로 적용을 한 후 재료에 잔류하는 최대, 최소 온도를 나타내고 있다. 해석은 Coupled Analysis Option을 사용하였고, 가공 후에 냉각수 온도가 약간 증가하지만 증가량이 해석에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. 해석 결과도에서 재료 내의 최대온도는 약 20.41℃이고 최저 온도는 약 20.4℃로서 큰 온도구배는 없는 것으로 나타났다. Fig.2는 방전에 의해 발생된 열이 재료의 두께 방향으로 전달되어 재료 내에서 분포하는 온도 분포 선도를 나타내었다. 해석상에서는 그림에서와 같이 피 가공물이 절단된 표면은 약 1630℃까지 온도가 상승되고 있다는 것을 알 수 있다. 하지만 절연유에 의한 급격한 온도 손실이 발생되어 약 5mm이상이 되면 거의 온도 변화가 없는 것으로 판단된다.

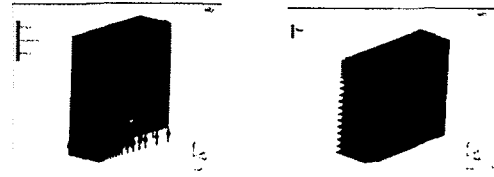


Fig1. Boundary condition

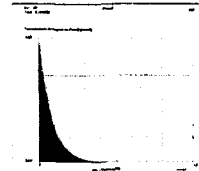
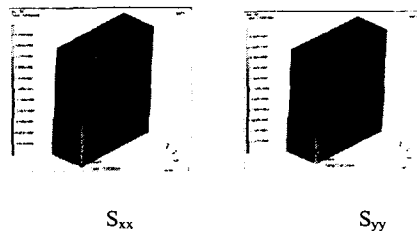
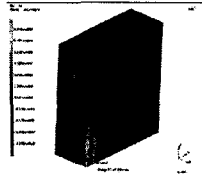


Fig.2. Path plot of temperature

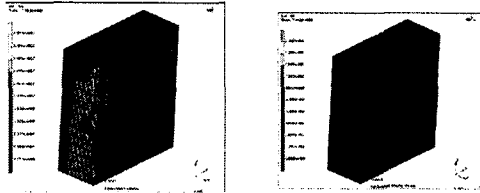
Fig. 2에서 Wire에 의해 재료표면에 전달된 온도 분포를 보면 표면의 최대 온도는 1,632℃이며, 이후 급격히 감소하여 약 5mm이상이 되면 20℃로 전혀 온도 구배가 없는 것을 볼 수 있다. Fig.3은 Wire cutting 후의 나타난 각각의 잔류 응력(Stress) 분포도이다. 경계조건에서 발생하는 응력들은 고정 조건에 의한 오차(err)라고 볼 수 있으므로 무시하고 S<sub>xx</sub>의 응력(Component 11 of Stress) 분포도에서는 표면의 경우 인장응력이 약 2.152 MPa 정도로 거의 미미하며, y 방향으로 약 5mm 깊이에서 최대 5MPa 정도의 압축응력이 발생됨을 알 수 있다. S<sub>yy</sub>의 응력(Component 22 of Stress)의 경우 전체적으로 큰 잔류응력의 형성은 볼 수 없으며 약 7MPa 내외의 인장과 압축응력이 분포하고 있다는 것을 볼 수 있다. 또한 S<sub>zz</sub>의 응력(Component 33 of Stress)의 경우도 S<sub>xx</sub>과 거의 같은 위치에서 약 4MPa의 인장응력과 압축응력이 형성됨을 알 수 있다. Fig. 4에서는 가공 후 충분한 시간을 경과 시켜 냉각시킨 다음 등가 잔류응력과 등가 Strain을 보여 주고 있으며, Fig. 5에서는 이때 나타난 등가 응력선도를 그래프로 나타내었다. 해석의 결과로서 등가 응력의 최대 값은 약 180.7 MPa 정도 응력이 잔류하는 것으로 계산되었으며, 깊이 방향으로 들어 갈수록 응력이 급격히 저하되는 것을 확인 할 수 있음을 볼 수 있다.





S<sub>zz</sub>

Fig3. Components of Stress After cooling



S<sub>eqv</sub>

Strain eqv

Fig4. Stress of Distribution after cooling

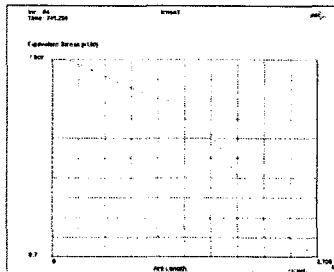


Fig 5. Path plot of stress- $s_{zz}$  through thickness direction

#### 4. 결론

본 연구에서는 열분포 및 응력분포를 유한 요소법을 이용하여 보다 정량화 하기 위하여 상용코드인 Marc7.3을 이용, 와이어 방전 가공시 발생하는 열의 분포 상태와 열에 의한 잔류응력분포를 계산하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

방전 가공시 절단되는 면의 최고 온도는 약 1630℃까지 상승하지만 재료의 두께 방향으로 들어갈수록 급격한 온도 강하가 이루어짐을 알수 있었고, 이때 깊이 방향의 잔류응력은 약 10MPa이다. 또한 등가 잔류응력은 약 180.7MPa이며, 이 응력도 온도 분포와 같이 재료의 깊이에 따라 급격히 감소하는 것을 알수 있었다.

#### 참고문헌

1. J.A.Freeman and D.M. Skapura, "Neural Networks : Algorithms, Application, and Programming Techniques," Addison - Wesley, New York, 1991.
2. R.Vaidynathan, "Performance Representation and Optimization of Electrical Discharge Machining," Ph.D Dissertation, Univ. of New York, 1980.
3. T. Masuzawa, X. Cui, N. Taniguchi, "Improved Jet Flushing EDM," Annals of the CIRP, Vol.41, 1992.
4. J. Prohaszka, A.G. Mamalis, N.M. Vaxevanidis, "The Effect of Electrode Material on Machinability in Wire Electro-discharge Machining", Journal of Materials Processing Technology 69, pp. 233 ~ 237, 1997.
5. Z.N. Guo, T.C. Lee, T.M. Yue, W.S. Lau, "Study on the Machining of WEDM with Ultrasonic Vibration of the Wire", Journal of Materials Processing Technology, 69, pp. 212 ~ 221, 1997.
6. W.J. Hsue, Y.S. Liao, S.S. Lu, "Fundamental Geometry Analysis of Wire Electrical Discharge Machining in Corner Cutting " International Journal of Machine Tool & Manufacture, 39, pp. 651 ~ 667, 1999.
7. W. Dekeyser, R. Snoeys, M. Jennes, " A Thermal Model to Investigate the Wire Rupture Phenomenon for Improving Performance in EDM Wire Cutting," Journal of Manufacturing Systems, Volume 4/No2, pp. 179 ~ 187, 1983.
8. Y.S.Liao, J.T.Huang, H.C. Su, " A Study on the Machining-parameters Optimization of Wire Electrical Discharge Machining", Journal of Materials Processing Technology, 71, pp. 487 ~ 493, 1997.
9. 최태건, " 와이어 방전가공기의 와이어장력제어 ", 연세대학교 석사학위 논문 1993.
10. 강상훈, 박원조, 배성환, " CAD/CAM 와이어 방전가공의 가공확대여유에 관한 연구 ", 대한기계학회, 제17권 2호, pp. 380 ~ 384, 1993.
11. W. Dekeyser 외 5인, "A Thermal Model to Investigate the Wire Rupture Phenomenon for Improving Performance in EDM Wire Cutting" Journal of Manufacturing Systems Vol, 4. No. 2
12. 양영수, "이크 및 레이저빔을 이용한 열가공 공정에서 잔류응력에 관한 연구" Ph.D. thesis in KAIST, 1991.
13. R. A. C. Slater. "Engineering Plasticity" The Macmillan Press LTD, 1977.
14. 이진범, "A Study on the Determination of Optimal Electrical Discharge Machining Parameters, Ph. D. Ulsan Univ thesis, 1998.