

〈論 文〉

# 高硬質재료 放電加工部の 피로파괴특성

김민건\* · 지정근\*\* · 태원필\*\*\*

(1992년 2월 25일 접수)

## Fatigue Fracture Characteristics at a Electro Discharge Machined Surface in High Strength Steel

Min-Gun Kim, Jung-Keun Gi and Weon-Pil Tai

**Key Words :** Fatigue(疲勞), Electro Discharge Machining(放電加工), Heat Affected Zone(熱影響部), Microstructure(微視組織), Residual Stress(殘留應力)

### Abstract

A study on the fatigue fracture at electro discharge machined(E.D.M) surface has been made with special emphases on the microstructure variation and the residual stress distribution at the E.D.H heat affected zone. Results obtained are summarized as follows. (1) E.D.M brings about a variation of microstructure in heat affected zone, structures of molten, quenching, tempering are formed in order of formation from E.D.M surface. (2) Residual stress generated by E.D.M reduces the fatigue strength of the material through the influencing fatigue crack initiation and growth. (3) Magnitude of the residual stress existed in a microscopic area is approximately estimated by a COD measurement method which was originally suggested by authors.

### 1. 서 론

방전가공법은 재료의 고경도화, 고내열화, 가공형상의 복잡화에 수반하여 점차 그 이용의 범위와 빈도가 높아지고 있는 첨단 기계가공법중의 하나이다. 이 가공법은 短間隙의 液中 불꽃방전이라는 가공방식이기 때문에 필연적으로 고정밀도의 가공이 가능하여, 우주항공산업, 자동차산업에 사용되는 難削材부품, 각종 金型, 프레스 다이(die) 등의 가공에 널리 이용되고 있다.

위와같이, 방전가공법은 여러분야의 부품생산에 널리 사용되고 있어서, 방전가공에 의해 생산된 부품의 사용도중에 발생할수 있는 「破壞의 문제」, 특

히 반복되는 사용응력을 받는 부품들에게서 주로 발생하는 「疲勞破壞」에 대한 검토가 시급히 요청된다고 할 수 있다. 一例를 들면, 방전가공에 의해 가공된 다이캐스팅용의 금형은 연속 加壓鑄造로 인한 반복하중 즉 피로하중을 받게 되는데, 이로인해 발생된 피로균열이 금형의 파괴를 초래하는 일이 가끔 있다. 이밖에도 산업기술의 발전에 따라 더욱 가혹한 상황하에서 사용되고 있는 각종 방전가공품들에게서 피로파괴의 문제는 항상 대두되고 있는 실정이나, 이 분야에서의 본격적인 연구는 국내에서 찾아보기가 어렵다.

방전가공(electro discharge machining ; E.D.M)은 가공액중에서 공작물과 전극과의 사이에서 발생하는 불꽃방전으로 가공물이 고온도로 가열되어 용융 혹은 氣化하면서 진행되므로, 放電痕의 표면조직은 急熱急冷에 의하여 담금질상태로 되는 특성을 지니게 된다. 따라서 이러한 특성상 방전가공 표면

\*정회원, 강원대학교 기계공학과

\*\*강원대학교 기계공학과 대학원

\*\*\*정회원, 강원대학교 재료공학과 대학원

층에는 필연적으로 심한 조직의 변화, 잔류응력의 誘起, 결함의 발생, 산화물의 混入 등을 수반하게 된다고 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 특히, 이들중에서도 잔류응력은 조직의 높은 熱的變形으로 인하여 표면층으로부터 상당한 깊이에 걸쳐서 발생하고 그 크기도 클 것으로 예상되어, 가공품의 피로수명에 막대한 영향을 미칠것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는, 방전가공면에서의 微視組織의 변화, 잔류응력의 분포등을 주된 연구대상으로 하여, 이들이 피로균열의 발생, 성장變動에 미칠 특이한 영향에 대하여 고찰하고자 한다.

### 2. 시험재료 및 실험방법

사용된 재료는 각종 금형, 프레스 다이, 나사질 삭용 다이스 등에 널리 사용되는 炭素工具鋼 STC 5중으로, 그 화학성분과 기계적 성질을 Table 1, Table 2에 나타내었다.

시험편은 Fig. 1의 형상대로 기계가공하여 Fig. 2에 따른 과정을 거친후, 殘留應力材와 非殘留應力材 2종류로 구분하였다.

시험편 중앙홀은 방전가공기에서 0.4 mm의 텅스텐 전극봉을 사용하여 직경 0.6 mm로 가공하였다.

균열開口變位(COD)를 측정하기 위한 장치는 Fig. 3과 같이 구성하였다. 우선 균열양쪽에 비커스 경도계 압자로 標點을 찍어놓고, 현미경과 TV 카메라를 통하여 균열영상을 모니터 스크린에 약 1200 배로 비추어내어, 연결된 자동계측장치에 의하여 COD를  $\pm 0.05 \mu\text{m}$ 의 정밀도로 측정하였다.

사용된 시험기는 MTS社의 유압식 재료시험기이며, 응력波型은 正弦波, 응력比는  $R = -1$ 이다.

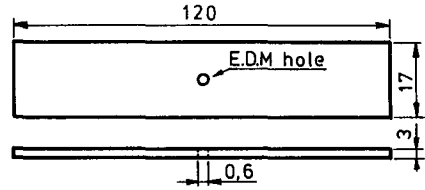


Fig. 1 Configuration of fatigue test specimens

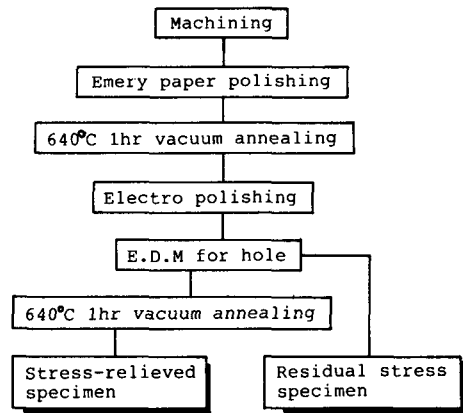


Fig. 2 Process of specimen preparation

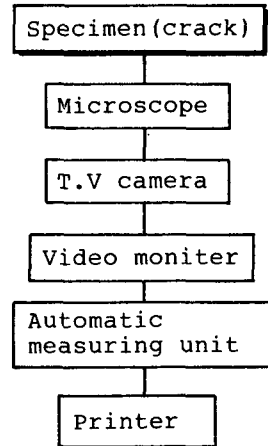


Fig. 3 Automatic COD measuring apparatus

Table 1 Chemical composition of the testing material

Material	C	Si	Mn	P	S
STC 5	0.8	<0.35	<0.50	<0.030	<0.030

Table 2 Mechanical properties of the testing material

Yield Strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	Hardness Hv (100 g)
724	964	12	50	220

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 방전가공 熱影響部에서의 미시조직의 변화

방전현상은 가공금속을 變態點 以上の 높은 온도를 가열시키고 또한 가공액(본 연구에서는 백동유) 중에서 일어나기 때문에, 가공면에는 急熱急冷 조직이 生成될 것으로 예상된다.

Fig. 4에 방전가공 구멍을 半徑방향으로 절단한 조직사진과 各組織層에서의 경도값을 나타내었다. 조직사진으로부터, 방전가공 표면에서 깊이방향으로 하얗게 보이는 부분, 진하게 腐蝕된 부분, 素地 조직 順으로 미시조직이 변해 있음을 알 수 있다. 加工面의 斷面조직을 용융층과 열변화층으로 나누어 검토하면, 우선 표면으로부터 용융층(구역 I)이 형성되고, 구역 II는 부식(부식액은 2% Nital)이

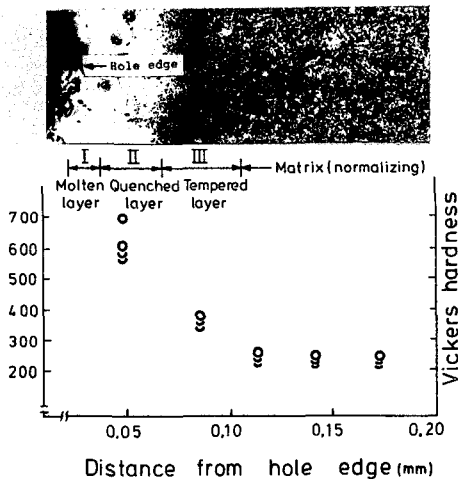


Fig. 4 This figure shows the hardness following the microstructure variation

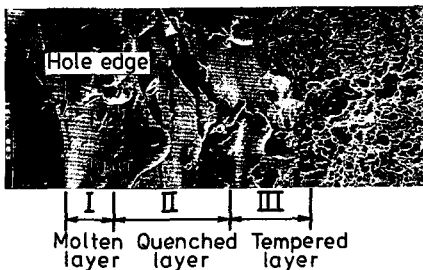


Fig. 5 SEM micrograph of the tensile fracture surface in heat affected zone

잘 안되어 있는점 또한 그 비커스 경도값이 600정도인 것으로 미루어 담금질 조직층, 구역 III은 진하게 부식되어 있고 경도값이 400부근인 것으로 미루어 템퍼링조직층에 해당된다고 판단된다.

이러한 사실을 더욱 명확히 하기 위하여, Fig. 5에 방전가공 구멍을 引張破壞시켜 그 破面사진을 보였다. 사진에서 방전가공면으로부터 약 0.04 mm깊이에 걸쳐 용융층과 담금질층의 파면으로 보이는 전형적인 劈開破面이 관찰되고, 그 다음으로 素地の 延性破面이 계속됨을 알 수 있다.

#### 3.2 방전가공이 母材의 疲勞強度에 미치는 영향

방전가공에 따른 미시조직의 변화는 필연적으로 표면층에 잔류응력을 발생시켜 母材의 피로성능을 左右할 것으로 생각된다. 따라서, 방전가공에 의하여 잔류응력이 생성된 잔류응력재와 640°C 1시간 진공어닐링처리를 하여 잔류응력을 제거시킨 非잔류응력재의 疲勞限度를 조사하였다.

그 결과 Fig. 6에서 보는 바와 같이, 公稱응력으로 구한 잔류응력재의 피로한도는 88 MPa, 非잔류

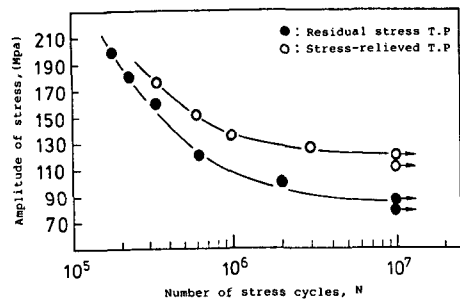


Fig. 6 S-N curves

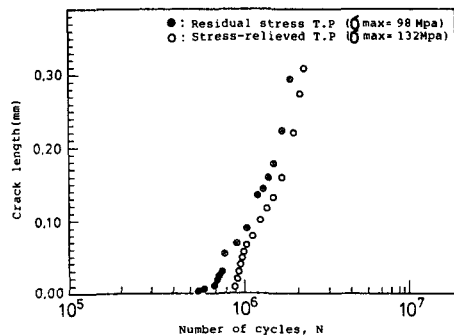


Fig. 7 Feature of crack propagation in residual stress specimen and stress-relieved specimen

응력재 120 MPa로, 방전가공으로 誘起된 잔류응력을 제거한 시험편에서 더 높은 피로한도값을 보였다. 이 결과는, 방전가공으로 표면층에 생성된 잔류응력은 금속의 피로성능에 害로운 응력으로, 곧 방전가공은 가공재의 피로강도를 低下시킴을 말해주고 있다.

이러한 잔류응력이 피로과정에서 어떠한 경로를 통하여 피로강도의 低下를 초래케하는가를 자세히 검토하기 위하여, 각각의 경우에 대하여 균열의 발생시기와 성장특성을 고찰하여 Fig. 7, Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7은 잔류응력재와 非잔류응력재 각각의 피로한도값보다 10% 큰 응력을, Fig. 8은 두 재료에 同一응력을 부하한 균열발생, 성장의 결과이다. 그 결과, 균열발생시기는 Fig. 7에서 잔류응력재  $5.7 \times 10^5$  사이클, 非잔류응력재  $8.7 \times 10^5$  으로 잔류응력재가 빠르고, Fig. 8의 경우는 잔류응력재  $7 \times 10^4$ , 非잔류응력재  $8.6 \times 10^5$  으로 잔류응력재가 훨씬 빨랐다. 또한 Fig. 9는 Fig. 7의 결과를 각 균열길이에 대한 균열성장속도를 나타낸것인데, 非잔류응력재보다 잔류응력재에서 보다 큰 초기 균열성

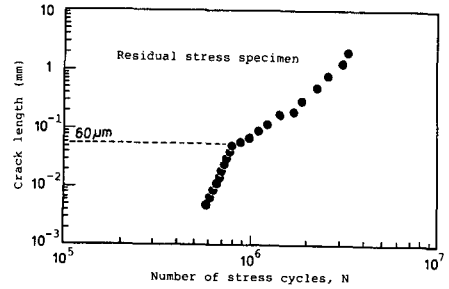
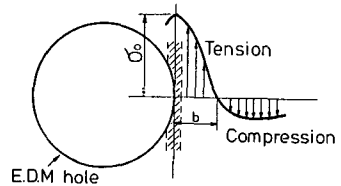


Fig. 10 Magnification of a early stage of crack growth in Fig. 7



(a) Residual stress distribution in the vicinity of E.D.M hole edge

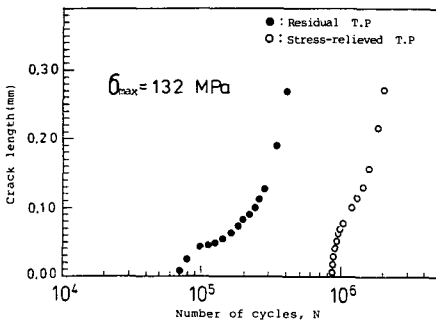
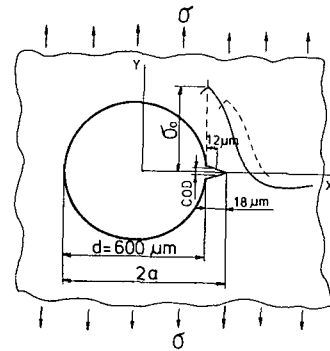


Fig. 8 Feature of crack propagation in residual stress specimen and stress-relieved specimen under the same cyclic loading



(b) Figure indicates both the re-distribution of residual stress following the fatigue cracking and the COD to calculate the magnitude of  $\sigma_0$

Fig. 11

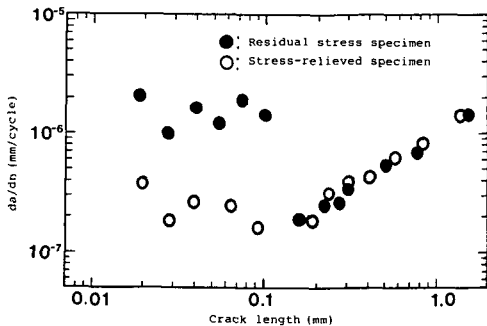


Fig. 9 Variation of crack growth rate with crack length

장속도를 보여주고 있다.

이 사실들은 방전가공 표면층에는 引張性 잔류응력이 존재하여 균열발생과 성장을 助長하고 있음을 말해주고 있으며, 그 결과 잔류응력재에서 더 낮은 疲勞限度 값을 보였다고 할수 있다.

### 3.3 방전가공 熱影響部에서의 잔류응력 分布

Fig. 7에서 잔류응력재 균열성장곡선의 初期부분에 注目하면, 균열길이 0.06 mm 부근에서 變曲點

이 나타나고 그 前後의 균열성장속도가 현저히 달라짐을 관찰할수가 있다. 이 부분을 좀더 명확히 관찰하기 위하여 Fig. 10에 그 확대도를 보였다.

그림에서 알수 있듯이, 특정 균열길이를 前後하여 성장속도가 빠르고 느려지는 것은, 가공표면층에 생성된 인장성 잔류응력이 어느 깊이에서 압축성 잔류응력으로 천이함을 보여주고 있다. 물론, 잔류응력의 초기분포형태가 응력의 반복회수<sup>(2)</sup> 및 균열의 발생성장<sup>(3)</sup>과 더불어 변화하게 되겠지만, 이 특징적인 균열성장패턴은 방전가공 열영향부에서의 概略적인 잔류응력분포상태를 엿볼수 있게 해준다. 다시 말해서, Fig. 11(a)에 제시한 모양의 분포를 한다고 생각할 수가 있다. 이 분포는 맞대기 용접을 행한 용접선 부근의 잔류응력분포와 類似한 형태인데, 그림에서 斜線으로 표시한 부분을 용접선으로 가정하고 방전가공의 열영향부가 용접의 그것과 유사하다는 점을 감안하면, Fig. 11(a)의 분포는 타당성이 있다. 이 분포에서의 천이점 b는 Fig. 10와 Fig. 4의 미시조직의 변화의 경계선을 고려하여 대략 방전가공 표면으로부터 0.06 mm 부근으로 추정된다.

여기서, Fig. 11(a)의 잔류응력분포가 편리상 Terada가 제안한 분포를 한다고 가정하면, 잔류응력분포곡선은 다음식으로 주어진다.<sup>(4)</sup>

$$\sigma_r(x) = \sigma_0 \left[ 1 - \left( \frac{x}{b} \right)^2 \right] e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x}{b} \right)^2} \quad (1)$$

이 식속에서, 인장잔류응력의 최대값인  $\sigma_0$ 를 구할 수 있다면 방전가공 열영향부에서의 定量的인 잔류응력분포를 알 수 있게 되므로,  $\sigma_0$ 값은 다음과 같은 방법을 사용하여 구하였다.

본 연구의 방전가공 열영향부에서의 잔류응력은 아주 작은 영역에 微視적으로 분포하기 때문에, Mather의 穿孔法<sup>(5)</sup> 등과 같은 통상적인 잔류응력 측정법으로는 측정할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 미시균열의 開口變位(COD)를 측정함으로써 그 위치에서의 잔류응력값을 계산하는 독특한 방법을 사용하였다. 구체적으로, Fig. 11(b)에서 보는 바와 같이, 방전가공 구멍가장자리에 최대 인장잔류응력  $\sigma_0$ 가 발생하게 되고, 이 가장자리에 피로균열을 발생시키면 잔류응력은 점선처럼 再分布하면서  $\sigma_0$ 가 나타나는 위치도 약간 이동하게 된다.<sup>(3)</sup> 그러나 이 균열의 그림에 표시한 COD는 역시  $\sigma_0$ 의 영향을 支配적으로 받게 될 것으로 생각되고,

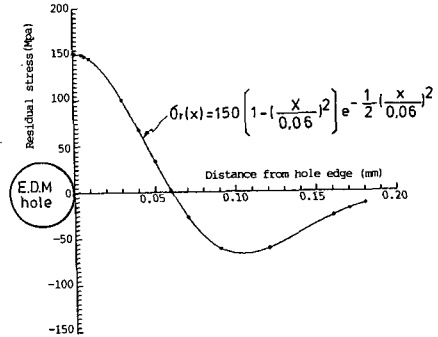


Fig. 12 Quantitative residual stress distribution in the vicinity of E.D.M hole

따라서 이 COD를 측정하여 다음식<sup>(6)</sup>에 代入함으로써  $\sigma_0$ 의 근사값을 구하였다.

$$COD = \frac{4(3\sigma + \sigma_0)}{E} \sqrt{(a + r_p^*)^2 - X^2} \quad (2)$$

단,  $r_p^* = \frac{\sigma^2 a}{2\sigma_y^2}$

본 실험에서는 18  $\mu\text{m}$ 의 균열을  $\sigma = 112 \text{ MPa}$ ,  $N = 1.4 \times 10^5$  사이클에서 구멍가장자리에 발생시켜,  $X = 306 \mu\text{m}$ 에서의  $\sigma = 110 \text{ MPa}$  負荷 前後에서의 균열 開口變位の 差를 COD로 본 결과 그 값이 0.6  $\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 이 값을 (2)식에 代入하여  $\sigma_0 = 150 \text{ MPa}$ 를 얻었다. 이 값은 또한 鋼板의 맞대기 용접선에 생성되는 인장잔류응력의 최대값<sup>(7)</sup>과 거의 가까운 값을 확인할 수 있다.

이렇게 얻어진  $\sigma_0$ 값과 인장, 압축의 천이점 b값을 (1)식에 代入하여 얻어진 열영향부에서의 定量的인 잔류응력분포를 Fig. 12에 나타내었다.

#### 4. 결 론

高硬質재료 방전가공부에서의 微視組織의 변화, 殘留應力の 分布 등을 주된 연구대상으로 하여, 이들 因子가 피로균열의 發生, 성장舉動에 미칠 特異한 영향에 대하여 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 진공어닐링처리를 하여 방전가공으로 발생한 잔류응력을 제거시킨 시험편과, 방전가공의 잔류응력이 그대로 존재하는 시험편의 疲勞限度는 各各  $\sigma_e = 117 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_e = 88 \text{ MPa}$ 로 잔류응력을 제거한 시험편의 疲勞限度가 더 높음을 알수 있다. 이것은 방전가공에 의한 잔류응력이 疲勞強度에 有害함을

말해 주고 있다.

(2) 방전가공은 加工部の 微視組織의 變化를 초래하여, 가공표면으로부터 담금질조직, 템퍼링 조직, 素地順의 미시조직이 형성된다.

(3) 방전가공 熱影響部에서는 미시적 잔류응력이 발생하여, 피로균열의 발생, 성장에 영향을 미친다. 加工面 附近에는 引張性 잔류응력이 분포하여 균열 발생시기의 단축과 빠른 성장속도를 가져오며, 특정 천이점을 지나면 壓縮性 잔류응력이 분포하여 균열성장속도도 늦어진다.

(4) 방전가공 열영향부에 誘起되는 잔류응력은 아주 작은 領域에 분포하는 잔류응력으로, 그 크기는 COD를 이용한 잔류응력 측정방법으로 近似的으로 추정할 수 있다.

## 후 기

이 논문은 1991년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모(지방대학육성)과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었습니다.

## 참고문헌

(1) 日本放電加工技術研究會編, 放電加工技術便覽,

pp. 63~66.

(2) Masubuchi, M., 1980, "Analysis of Welded Structures," Pergamon Press, pp. 329~330.

(3) Underwood, J.H., Pook, L.P. and Sharples, J. K., 1977, "Fatigue Crack Propagation Through a Measured Residual Stress Field in Alloy Steel," ASTM STP 631, pp. 402~415.

(4) Terada, H., 1976, "An Analysis of the Stress Intensity Factor of a Crack Perpendicular to the Welding Bead," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 8, pp. 441~444.

(5) Nawwar, A.M., Mclachlan, K. and Schewchuk, J., 1976, "A Modified Hole-Drilling Technique for Determining Residual Stresses in Thin Plates," Experimental Mechanics, Vol. 33, pp. 226~232.

(6) 金相哲, 1985, "破壞力學," 民音社, pp. 140.

(7) 川田, 1972, "機械要素の強度設計と残留應力のもつ意義," 日本機械學會誌, 第15卷 第2號 pp. 2~7.