

와이어 방전가공에서 전류파형이 양극침식에 미치는 영향

조성산*, 오진혁**

Influence of Current Waveform on Anode Erosion in Wire Electric Discharge Machining

Sung-San Cho* and Jin-Hyuk Oh**

ABSTRACT

The effects of triangular and rectangular discharge current waveforms on anode erosion in wire electric discharge machining is investigated based on heat transfer analysis of half-space subject to time and space-dependent heat flux. The thermal load on the anode is simulated by a heat flux that is calculated from time-dependent discharge channel radius and energy. Evolution of the melting front during discharge, the molten volume at the end of discharge, and the anode erosion rate are presented. The predicted erosion rate is compared with the experimental result for qualitative verification of the analysis. It is demonstrated that the triangular current waveform is more efficient in eroding the anode than the rectangular one.

Key Words : Wire electric discharge machining(와이어 방전가공), Current waveform(전류파형), Anode erosion(양극침식)

1. 서론

방전가공의 속도와 정밀도는 가공조건에 따라 변화한다. 방전가공의 특성상 가공속도를 향상시키는 가공조건은 가공정밀도를 저해하고 반대로 가공정밀도를 향상시키는 가공조건은 가공속도를 저해하므로, 가공의 목적에 따라 적절한 가공조건을 선정해야 한다. 방전가공시 극간에서 발생하는 현상은 매우 복잡하여 이론적 접근이 난해하므로 방전가공기 제작업체 들은 실험 결과를 근거로 선정된 고유의 가공조건과 방전제어회로를 사용하고

방전펄스 및 단위시간당 방전에너지와 밀접한

연관이 있는 가공속도와 정밀도의 제어는 주로 방전 및 휴지시간과 방전 전류값을 조절하여 수행된다. 일반적으로 짧은 방전 및 휴지시간과 큰 방전 전류값을 사용하면 가공속도를 증가시킬 수 있지만, 가공액의 절연회복시간, 회로 저항에 의한 시간적 제약, 전원용량과 가격에 의한 제약 등에 의해 가공속도는 제한 받는다. 상기한 대표적인 가공조건 외에 가공속도와 정밀도를 제어하기 위해 사용되는 방법의 하나는 전류파형의 조절이다.

상용 와이어 방전가공기에서 사용되는 전류파형은 삼각파형과 사각파형으로 구분할 수 있다. 실험결과⁽¹⁾에 의하면 삼각파형은 사각파형에 비해 가공속도를 증가시키지만 상대적으로 거친 가공면

2001년 2월 2일 접수

* 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과

** 홍익대학교 대학원 기계공학과

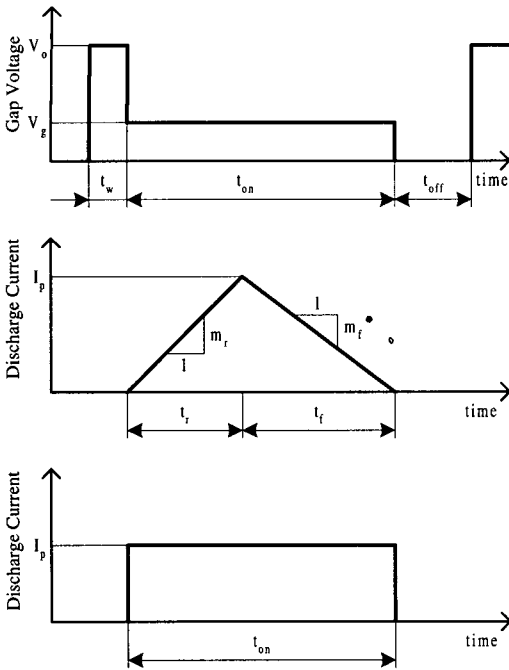


Fig. 1 Discharge voltage and current waveform

을 생성시킨다. 한편, 삼각파형⁽²⁾과 사각파형⁽³⁾에 대해 방전시간에 따른 용융부 부피의 변화를 해석한 결과에 의하면 두 파형 모두 정성적으로 유사한 결과, 즉 방전시간을 증가시키면 용융부 부피가 증가한다는 결과를 도출하고 있지만, 발표된 결과만으로 두 파형이 양극침식에 미치는 영향을 비교하는 것은 불가능하다. 상기한 연구결과 외에 전류파형의 영향에 관한 발표된 연구결과는 매우 미미하다. 따라서, 본 논문에서는 삼각 및 사각전류파형을 대상으로 전류파형, 방전시간 및 최대방전전류의 변화에 따른 양극(와이어 방전가공의 경우 가공물) 용융부의 기하학적 특성을 해석하고 가공속도와의 관계를 규명한다.

2. 양극침식모델

Fig. 1 은 방전가공시 시간에 따른 극간전압과 삼각 및 사각 전류파형의 변화를 개략도로 보여준다. 극간에 전압 V_0 를 인가하면 지연시간 t_w 가

경과한 후 방전이 시작되며, 이때 극간전압은 방전전압 V_g (가공물이 철강재일 때 25V 내외^(2,5))로 감소하고 전류가 흐른다. 전류파형은 방전제어회로에 따라 삼각 또는 사각파형을 나타낸다. 삼각파의 경우 방전개시 후 전원이 차단되기까지의 시간 t_r 동안 전류는 지속적으로 상승하며, 전원이 차단된 후에는 방전제어회로 내에 형성되는 역기전력에 의해 시간 t_f 동안 전류가 감소하면서 방전이 지속된다. 즉, 방전전류가 흐르기 시작하는 시점을 $t=0$ 으로 가정하면, 삼각전류파형은 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$I(t) = \begin{cases} m_r t & : 0 \leq t \leq t_r \\ m_f(t - t_r) + m_r t_r & : t_r \leq t \leq t_r + t_f \end{cases} \quad (1)$$

여기서, m_r 과 m_f 는 전류의 상승 및 하강속도를 나타내며, 관계 $m_r t_r + m_f t_f = 0$ 을 만족한다. 상용와이어 방전가공기에서 삼각파의 최대전류 I_p 는 전원이 차단되는 시점의 전류값이며, 방전시간은 전류상승시간을 의미한다.

사각파의 경우에는 방전개시와 동시에 방전제어회로에서 허용하는 최대전류 I_p 가 흐르며, 방전시간 t_{on} 동안 일정한 전류가 흐르다가 전원차단과 동시에 전류도 차단된다. 즉, 사각전류파형은 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$I(t) = I_p \quad : \quad 0 \leq t \leq t_{on} \quad (2)$$

방전은 방전에 필요한 극간조건이 만족되는 국부적 영역에서 원기둥 형상의 방전채널(플라즈마 상태)이 형성되면서 발생하며, 방전채널 내에서 전자와 양이온의 이동에 의해 방전전류가 흐른다. 방전채널 내의 전자만이 양극과 충돌하므로 양극용융은 플라즈마의 성질과 무관한 단순 열에너지 유입에 의해 발생하는 것으로 간주할 수 있다. 따라서, 양극에 유입되는 단위시간당 에너지 Q 는 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$Q(t) = \eta V_g I(t) \quad (3)$$

여기서, η 는 총 방전에너지 중에서 양극에 유입되는 에너지 비율을 나타내며, 일반적으로 0.8~1.2 내의 값이다.^(2,4) 방전전류 $I(t)$ 는 삼각파와 사각파의 경우 각각 식 (1)와 (2)로 주어지므로, 유입 에

너지는 사각파의 경우 일정하지만, 삼각파의 경우에는 전류상승시간 동안 증가하다가 전류가 하강하는 동안에는 감소한다.

방전에너지의 양극 유입은 양극과 맞닿은 방전채널의 단면적을 통해 발생한다. 원기둥 형상의 방전채널 단면적은 방전이 진행되는 동안 증가한다. 단위시간당 유입에너지 Q 가 일정할 때 시간에 따른 방전채널 반경 $R(t)$ 의 변화는 식 (4)로 주어진다⁽⁶⁾.

$$R \tan \left(\frac{T_b k R \pi^{3/2}}{Q} \right) = 2\sqrt{\alpha} \quad (4)$$

여기서, T_b , k , α 는 양극 재료의 기화온도, 열전도계수, 열확산계수이다. 식 (4)에서 $T_b k R \pi^{3/2} / Q$ 는 상용 방전조건 하에서 미소한 값이므로, 식 (4)를 식 (5)로 근사화한다.

$$R^2 = \frac{2Q\sqrt{\alpha}}{T_b k \pi^{3/2}} \quad (5)$$

사각파의 경우에는 방전이 진행되는 동안 일정한 방전전류가 흐르므로 식 (3)에서 $I(t) = I = \text{constant}$ 로 표시한 후, 식 (5)에 대입하면 식 (6)을 얻는다.

$$R^2 = \frac{2\eta V_g \sqrt{\alpha}}{T_b k \pi^{3/2}} I t^{1/2} \equiv K I t^{1/2} \quad (6)$$

삼각파의 경우에는 방전이 진행되는 동안 전류값이 변화하므로 방전시간을 미소구간으로 분할하고 시간구간별로 일정한 전류가 흐른다는 가정 하에서 식 (6)을 적용한다. 즉, 시간구간 $t_i \leq t \leq t_{i+1}$ 동안 평균 전류값,

$$\bar{I}_i = [I(t_i) + I(t_{i+1})] / 2 \quad (7)$$

에 해당하는 일정한 전류가 흐른다는 가정 하에서 시간구간 초기의 방전채널 반경을 R_i 로 표시하고 시간 $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ 가 경과한 후의 방전채널 반경 R_{i+1} 을 식 (6)을 적용하여 표현하면 식 (8)을 얻는다.

$$R_{i+1} = \sqrt{K \bar{I}_i \left(\frac{R_i^4}{K^2 \bar{I}_i^2} + \Delta t \right)^{1/4}} \quad (8)$$

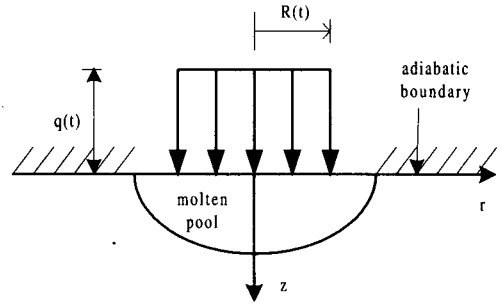


Fig. 2 Half-space subject to time and space-dependent heat flux

따라서, 식 (8)을 시간구간별로 \bar{I}_i 를 변화시켜가면서 순차적으로 적용하여 시간에 따른 방전채널 반경의 변화를 산출한다.

방전채널 단면적 내에서 양극에 유입되는 에너지는 가우스 분포를 나타내는 것으로 알려져 있지만 본 해석에서는 균일분포를 가정한다. 그러면, 양극으로 유입되는 단위시간 단위면적당 에너지 $q(t)$ 는 식 (9)로 주어진다.

$$q(t) = \frac{Q(t)}{\pi R^2(t)} \quad (9)$$

따라서, 식 (6) 또는 식 (8)로 산출된 방전채널 반경을 식 (9)에 대입하면 단위시간 단위면적당 유입에너지를 시간의 함수로 얻을 수 있다.

양극으로 유입되는 방전에너지에 의해 형성되는 용융부의 특성을 고찰하기 위해 열전달 해석을 수행한다. Fig. 2는 반무한체로 가정된 양극 표면에서 반경 $R(t)$ 의 원 내부에 단위시간 단위면적당 $q(t)$ 의 에너지가 유입되는 상황을 보여준다. 방전에너지가 유입되지 않는 표면에서 가공액으로 전달되는 에너지 손실은 반무한체 내의 온도분포에 미미한 영향을 미치므로⁽²⁾ 단열 조건을 가정하면, 반무한체 내의 온도를 지배하는 방정식과 초기 및 경계조건은 원통 좌표계에서 식 (10)으로 주어진다.

$$\frac{1}{\alpha} \frac{dT}{dt} = \frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{d^2T}{dz^2} \quad (10)$$

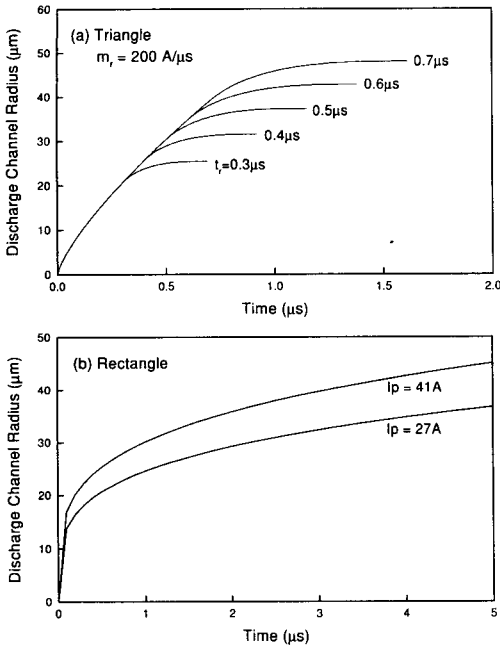


Fig. 3 Discharge channel expansion

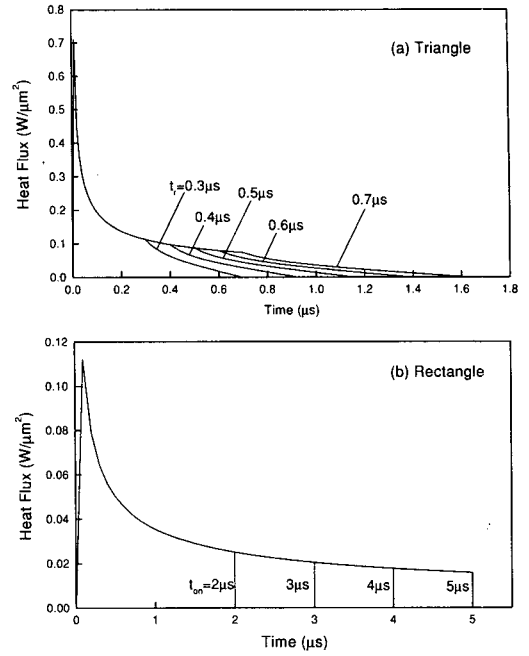


Fig. 4 Heat Flux

$$\begin{aligned}
 T &= T_o & : t = 0 \\
 -k \frac{dT}{dz} &= q(t) & : z = 0, 0 \leq r \leq R(t) \\
 -k \frac{dT}{dz} &= 0 & : z = 0, r \geq R(t) \\
 T &= T_o & : t \geq 0, z = r = \infty
 \end{aligned}$$

에너지 유입 면적과 단위시간 단위면적당 유입 에너지가 변화하는 조건에서 식 (10)에 대한 해석해는 존재하지 않으므로, 유한요소기법으로 수치해를 구한다.

열전달 해석에 필요한 경계조건은 대우중공업 A320 와이어 방전제어기에서 사용하는 방전조건을 근간으로 선정하였다. 삼각파는 전류상승속도 $m_r = 200, 152A/\mu s$ 와 전류상승시간 $t_f = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7\mu s$ 의 경우를 고려하였다. 전류하강시간은 측정결과에 근거하여 $t_f = 1.3t_r$ 을 가정하였다. 사각파형은 최대 방전전류 $I_p = 41, 27A$ 에 대해 방전시간 $t_{on} = 2, 3, 4, 5\mu s$ 의 경우를 고려하였다. 방전시 극간전압 $V_g = 25V$ 와 양극에 유입되는 에너

지 비율 $\eta = 0.1$ 을 가정하였다⁽²⁻⁵⁾.

양극의 물성치는 탄소강(0.1C%)의 물성치, 즉 밀도 $7850kg/m^3$, 기화온도 $3000^\circ C$, 용융온도 $1500^\circ C$, 비열 $494J/kg^\circ C$, 열전도계수 $45.8W/m^\circ C$, 열확산계수 $11.8 \times 10^{-6} m^2/s$ 을 사용하였다.

3. 결과 및 토의

Fig. 3 은 삼각 및 사각파형에 대해 방전시간 동안 방전채널 반경의 변화를 보여준다. 삼각파의 경우 전류상승시간 동안 채널반경은 거의 일정한 속도로 증가하다가 전류가 하강하면서 채널반경 증가속도가 감소하여 종단에는 거의 변화가 없다. 전류 상승기의 채널반경 평균확장속도는 전류 하강기의 약 4 배에 해당하며, 이 결과는 Spur 등⁽²⁾의 실험결과와 일치한다. 따라서, 삼각파에 적용한 식 (8)의 합당성이 검증된 것으로 사료된다. 사각파형의 경우 채널반경은 초기에 급격히 증가하며 시간이 경과할수록 증가속도는 점진적으로 감소하지만 방전 종료시점까지 지속적으로 증가한다.

Fig. 4 는 삼각 및 사각파형에 대해 방전시간

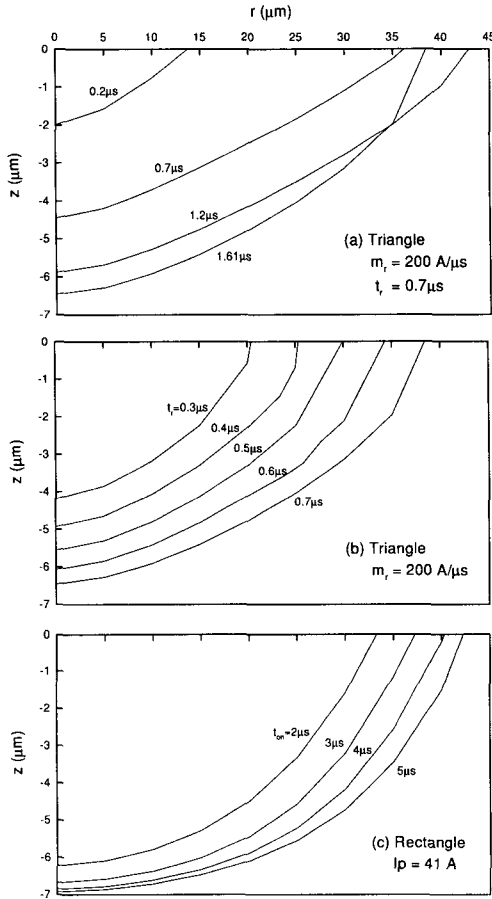


Fig. 5 Evolution of melting front

동안 단위시간 단위면적당 유입에너지의 변화를 보여준다. 두 파형 모두 초기에 큰 에너지가 유입되며 시간이 경과할수록 감소한다. 삼각파의 경우 전류가 하강하기 시작하면서 에너지 유입률은 더 빨리 감소한다. 사각파의 경우에는 단전되는 순간에 에너지 유입이 중단된다. 펄스당 방전에너지가 약 2mJ 인 삼각파($m_t = 200A/\mu s$, $t_r = 0.6\mu s$)와 사각파($I_p = 41A$, $t_{on} = 2\mu s$)를 비교하면, 방전시간의 전반부에서 삼각파의 단위시간 단위면적당 유입에너지가 사각파보다 더 큼을 알 수 있다.

Fig. 5 는 시간에 따른 용융부의 변화를 보여준다. Fig. 5(a)는 $t_r = 0.7\mu s$ 의 삼각파에 의해 방전이 진행되는 동안 용융부가 변화하는 모습을 보여준다. 방전시간 $0\mu s \leq t \leq 1.2\mu s$ 동안 용융부의 크기는

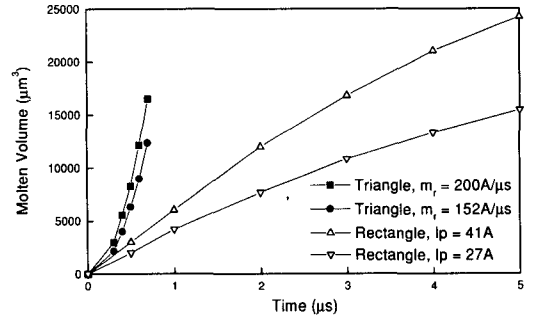


Fig. 6 Variation of molten volume with time

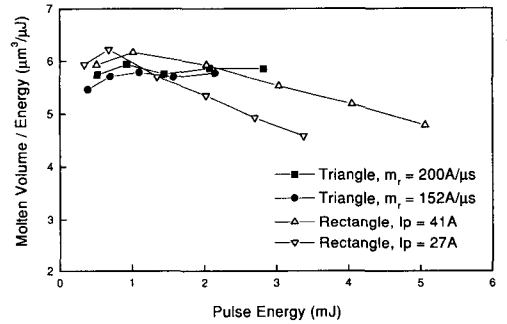


Fig. 7 Variation of molten volume per unit discharge energy with pulse energy

깊이와 반경방향으로 증가한다. 한편, 잔여 방전시간 $1.2\mu s \leq t \leq 1.61\mu s$ 동안 용융부 깊이는 계속 증가하지만 용융부 표면 반경은 감소한다. Fig. 5(b)는 전류상승시간이 다른 삼각파에 의해 형성되는 용융부의 최종형상을 보여준다. 전류상승시간이 증가할수록 용융부의 깊이 및 표면 반경 모두 증가한다. Fig. 5(c)는 $I_p = 41A$ 인 사각파의 총 방전시간과 용융부 최종형상의 관계를 보여준다. 방전시간이 증가할수록 용융부 깊이와 표면반경 모두 증가한다. 그러나 깊이 증가율은 지속적으로 감소하여 방전시간 $4\mu s \leq t \leq 5\mu s$ 동안의 깊이 변화는 매우 미미하다. 사각파에서 최대전류값이 동일한 경우에는 총 방전시간이 달라도 방전이 진행되는 동안 방전채널 반경(Fig. 3(b))과 단위시간 단위면적당 에너지 유입률(Fig. 4(b))의 변화는 동일하다. 따라서, Fig. 5(c)는 방전이 진행되는 동안 용융부 형상의 변화를 보여주는 것으로 이해할 수도 있다.

Fig. 6 은 삼각 및 사각 단위 펄스방전에 의해

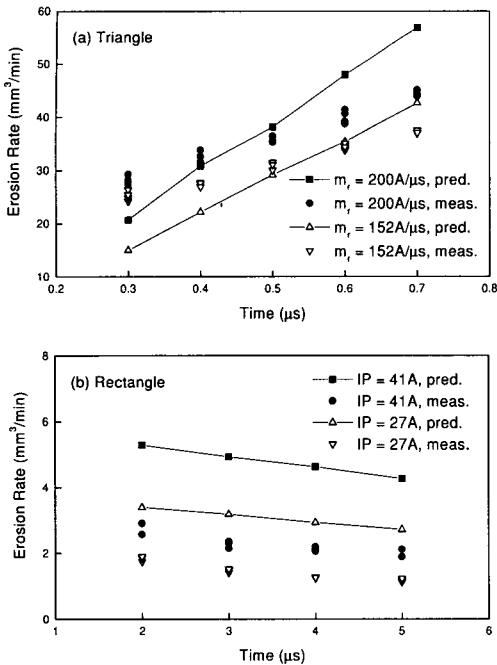


Fig. 8 Erosion rate

형성되는 용융부 부피와 방전시간의 관계를 보여 준다. 삼각파와 사각파 모두 방전시간이 증가할수록 용융부 부피가 증가한다.

Fig. 7 은 삼각파와 사각파에 대해 단위 방전에너지 당 용융부 부피와 펄스 방전에너지의 관계를 보여준다. 펄스 방전에너지가 적을 때 단위 방전에너지 당 용융부 부피는 파형에 무관하게 유사하다. 한편, 펄스 방전에너지가 증가할수록 사각파의 단위 방전에너지 당 용융부 부피는 감소하고, 삼각파의 경우에는 펄스 방전에너지와 무관하게 거의 일정하게 유지된다. 즉, 양극침식 에너지 효율의 관점에서 펄스 방전에너지가 증가할수록 삼각파가 사각파보다 유리해 짐을 알 수 있다.

해석결과의 검증을 위해 양극침식속도, 즉 가공속도를 대상으로 실험결과와 비교하였다. 해석결과에 근거한 가공속도는 식 (11)로 산출하였다.

$$\dot{V} = \frac{\lambda V_p}{t_{on} + t_{off}} \quad (11)$$

여기서, \dot{V} 는 가공속도, V_p 는 단위 펄스방전에 의해 형성되는 용융부 부피, λ 는 용융금속 비산

효율, 그리고 불완전 절연회복과 아아크 방전 발생시 방전제어기가 수행하는 방전 및 휴지시간의 조절에 따른 단위시간당 방전회수 감소의 영향을 감안한 일종의 보정계수이다. 비산효율에 관한 기존의 실험결과⁽³⁾와 기존의 실험에서 배제된 불완전 절연회복과 아아크 방전 발생의 영향을 감안하여 본 해석에서는 파형 및 방전에너지에 무관하게 $\lambda = 50\%$ 를 가정하였다.

가공속도 측정실험은 대우중공업 A320 와이어 방전가공기에서 직경 0.25mm 의 황동 와이어로 두께 $d = 40\mu m$ 의 고합금 공구강 STD11 을 절단가공하면서 수행하였다. 가공속도는 길이 l 을 절단하는데 소요되는 시간 t_c 와 가공폭 w 를 측정하여 식 (12)로 산출하였다.

$$\dot{V} = \frac{dwl}{t_c} \quad (12)$$

방전시간과 방전전류는 해석에 사용된 조건을 사용하였다. 해석과정에서 고려되지 않은 휴지시간은 가공액의 절연회복 최소시간보다 길어야 안정적인 방전이 가능하므로, 예비실험을 근간으로 삼각파의 경우에는 전류상승시간의 10 배, 사각파의 경우에는 방전시간의 33 배를 사용하였다. 기타 가공조건은 모든 실험에서 동일하게 유지하였다.

Fig. 8 은 방전시간과 가공속도의 관계에 관한 해석 및 실험결과를 보여준다. 해석 및 실험결과 모두 삼각파의 경우에는 방전시간과 가공속도 사이에 비례관계가 존재하고, 사각파의 경우에는 반비례관계가 존재함을 보여준다. 파형에 따라 방전시간과 가공속도의 관계가 다르게 나타나는 이유는 다음 사실로 설명이 가능하다. 방전시간 증가에 따른 용융부 부피의 증가율(Fig. 6)은 삼각파가 사각파에 비해 상대적으로 매우 크다. 한편, 실험에서 안정적인 가공을 위해 사용된 휴지시간의 방전시간에 대한 비율은 삼각파가 사각파에 비해 작다. 따라서, 방전시간 증가에 따른 용융부 부피의 증가율과 방전시간에 대한 휴지시간의 비율의 차이에 의해 가공속도와 방전시간의 관계는 삼각파에서는 비례관계로 나타나고 사각파에서는 반비례관계로 나타나는 것으로 사료된다. 사각파의 반비례관계는 기존의 연구결과⁽³⁾와 일치한다. 한편, 삼각파의 경우에는 비교할 수 있는 자료가 없다. 휴지시간에 의해 방전시간과 가공속도의 관계가 영

향을 받는지 여부를 확인하기 위해 삼각파에 대해 휴지시간을 변화시키면서 동일한 실험을 수행하였다. 실험결과 휴지시간을 변화시켜도 방전시간과 가공속도의 정성적 관계는 변함이 없었다.

Fig. 8 은 해석 및 실험결과 모두 가공속도의 관점에서 삼각파가 사각파보다 유리함을 보여준다. 이 결과는 다음의 사실들로 설명이 가능하다. 첫째 Fig. 7 에 의하면 펄스당 방전에너지가 적을 때 삼각파와 사각파의 단위 방전에너지당 용융부 부피는 유사하지만, 펄스당 방전에너지가 증가하면 사각파의 단위 방전에너지당 용융부 부피가 감소하여 상대적으로 삼각파가 유리해진다. 둘째, 실험결과에 의하면 삼각파는 사각파에 비해 절연회복에 필요한 휴지시간이 상대적으로 짧으므로, 큰 duty factor 값을 갖는다. 셋째, 삼각파는 사각파에 비해 방전주기가 짧으므로 단위시간당 방전 회수가 많다. 이상의 비교는 해석결과가 실험결과와 정성적으로 일치함을 보여주며, 따라서 해석의 합당성이 검증된 것으로 판단된다.

해석결과와 실험결과는 전류파형, 방전시간 및 가공속도의 관계에서 정량적으로 차이를 나타낸다. 본 해석은 방전에너지와 전류파형이 용융금속의 비산효율, 가공액의 절연회복속도 및 아아크 방전 발생가능성 등에 미치는 영향을 고려하지 않고 단순히 일정한 보정계수 λ 를 사용하고 있으므로, 정량적 차이가 발생하는 것으로 사료된다. 그러나, 해석결과와 실험결과의 정량적 차이가 일정한 관계를 나타내므로 보다 정확한 모델 개발의 가능성을 예견할 수 있다.

4. 결론

와이어 방전가공시 전류파형이 양극침식에 미치는 영향을 고찰하기 위해, 시간과 공간적으로 변화하는 에너지원에 의해 반무한체 표면 일부가 가열될 때 형성되는 용융부 부피를 해석하여 다음 결론을 얻었다. 삼각파와 사각파의 경우 모두 방전시간을 증가시키면 형성되는 용융부 부피는 증가한다. 그러나, 방전시간 증가에 따른 용융부 부피의 증가율은 삼각파가 사각파에 비해 상대적으로 크므로, 휴지시간을 고려한 가공속도는 방전시간이 증가할수록 삼각파의 경우에는 증가하지만 사각파의 경우에는 감소한다. 가공속도에 관한 해

석결과는 실험결과와 정량적으로는 다소 차이가 있으나 정성적으로는 일치한다. 방전에너지의 양 극침식효율은 펄스 방전에너지가 적을 때에는 삼각파와 사각파 모두 유사하지만, 펄스 방전에너지가 증가하면 삼각파의 효율이 사각파에 비해 상대적으로 좋아진다.

참고문헌

1. Tarng, Y. S., Ma, S. C., and Chung, L. K., "Determination of Optimal Cutting Parameters in Wire Electric Discharge Machining," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 35, pp. 1693-1701, 1995.
2. Spur, G., and Schonbeck, J., "Anode Erosion in Wire-EDM - A Theoretical Model," *CIRP Annals*, Vol. 42, pp. 253-256, 1993.
3. Patel, M. R., Barrufet, M. A., Eubank, P. T., and DiBitonto, D. D., "Theoretical models of the electrical discharge machining process. II. The Anode Erosion Model," *J. Appl. Phys.*, Vol. 66, pp. 4104-4111, 1989.
4. DiBitonto, D. D., Eubank, P. T., Patel, M. R., and Barrufet, M. A., "Theoretical Models of the Electrical Discharge Machining Process. I. A Simple Cathode Erosion Model," *J. Appl. Phys.*, Vol. 66, pp. 4095-4103, 1989.
5. McGeough, J. A., "Advanced Methods of Machining," Chapman and Hall, pp. 128-152, 1988.
6. Banerjee, S., Prasad, B. V. S. S., and Mishra, P. K., "Analysis of Three-Dimensional Transient Heat Conduction for Predicting Wire Erosion in the Wire Electrical Discharge Machining Process," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 65, pp. 134-142, 1997.