

# 변형해석 및 공리적 설계에 의한 와이어 방전가공기의 설계평가

이형일\* · 우상우\*\* · 김주원\*\*\* · 김충연\*\*\*

## Design Evaluation of WEDM Based on Deformation Analyses and Axiomatic Design

Hyungyil Lee, Sangwoo Woo, Joowon Kim and Choongyeon Kim

**Key Words :** Wire Cut EDM (와이어 방전가공기), Design Evaluation (설계평가), Finite Element Method (유한요소법),  $\eta$ -factor (이터인자), Performance Accuracy (가공정밀도), Axiomatic Design (공리적 설계)

### Abstract

Recent industrial requirements for highly precise shape processing have brought the electric discharge machining (EDM) in great need. High precision in EDM is primarily achieved by high performance controllers. However there exists inherent precision loss due to structural deformation. On this background, we study structural deformation characteristics of wire cut EDM via finite element (FE) analysis and axiomatic design. Two different wire cut EDMs are selected as analysis models. 3D CAD package I-Deas is first used to construct FE models of wire cut EDMs, and then ABAQUS FE code is used for following structural analysis. Pertinency of FE mesh refinement is discussed in terms of  $\eta$ -factor. It is shown that performance accuracy of EDM depends strongly on the structural characteristics. Some design enhancements are suggested in an axiomatic design point of view. Finally we provide weight and temperature induced displacement discrepancies between wire end points as position functions of each subframe.

### 1. 서 론

산업의 급속한 발달과 더불어 복잡한 형상의 초정밀 가공에 대한 요구가 증가하고 있고, 또한 기능적 요구로 인해 금속재료의 특성도 다양화되어 가고 있다. 이러한 연유로 기계적 절삭가공만으로는 모든 기능요구를 충족시키기 매우 어렵다. 특히 제품의 정밀화, 고기능화로 인한 부품들의 소형화, 정밀화가 크게 대두되고 있기 때문에 가공정밀도가 뛰어난 방전가공의 필요성이 높아지고 있다. 최근 초소형이면서도 고기능을 지닌 제품들이 늘어나면서 미세방전 가공에 대한 관심도 커지고 있다. 방전가공은 다른 가공법보다 가공력이 작은 이점이 있어, 기존 방법으로는 어려웠던

미소가공에도 적용이 가능하다.<sup>(1~2)</sup> 방전가공기의 정밀도는 주로 고성능 제어기에 의해서 일차적으로 얻어진다. 그러나 모든 공작기계에서와 마찬가지로 방전가공기에도 자중과 온도변화에 의해 야기되는 태생적 구조변형오차가 존재한다.<sup>(3)</sup> 따라서 고정밀 방전가공기의 개발을 위해서는 이러한 구조변형오차를 분석하여 이를 구조설계개선 또는 기본구조 설계 자체에 반영해야 한다.

### 2. 와이어 방전가공기의 유한요소해석

#### 2.1 와이어 방전가공기의 유한요소 모델링

와이어 방전가공기의 구조 중 기계 변형에 큰 영향을 미치는 구조물은 테이블베드 (table bed), 새들베드 (saddle bed), 새들 (saddle), 컬럼베이스 (column base), 컬럼 (column), 헤드 (head) 등이 있다. (Fig. 1) 이들은 기계의 기본구조로서 기계자중의 대부분을 차지한다. 테이블베드의 상부에는 작업탱크 (work tank)와 폐가공물 등이 놓이게 되고 하부는 새들베드와 연결되어 지면에 고정된다.

\* 회원, 서강대학교 기계공학과

E-mail : hylee@ccs.sogang.ac.kr

TEL : (02) 705-8636 FAX : (02) 712-0799

\*\* 서강대학교 기계공학과 대학원

\*\*\* (주) 진영정기

새들베드의 상부에는 새들이 연결되고, 새들의 상부에는 컬럼하부에 해당하는 컬럼베이스가 연결된다. 컬럼의 상부정면에는 헤드가 부착되고 헤드에는 와이어 구동부가 부착되어 와이어가 하부암과 연결되는 기본적 구조가 이루어진다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 새들이  $x$  축 방향의 이송을 담당하고, 컬럼 베이스가  $y$  축 방향, 그리고 헤드는  $z$  축 방향의 이송을 담당하게 된다. 여기서  $x$ ,  $y$ ,  $z$ 는 각 방향을 따라 단위화된 좌표값들로 각각 -1과 1사이의 값을 갖는다. JW-35A와 JW-60A의 표준규격 및 기계 사양이 Table 1에 정리되어 있다. 각 모델의 설계 도면을 기초로 3D-CAD 패키지 I-DEAS<sup>(4)</sup>에서 만든 유한요소망을 ABAQUS<sup>(5)</sup>의 입력자료로 전환한 (exporting) 후, 유한요소해석을 수행한다. 이때 효율적 모델링을 위해 각 모델 구조형상의 단순화 작업이 필요하다. 이를 위해 응력전달과는 무관한 부분, 즉 소형 부품의 부착을 위한 형상 등은 무시하였다. 유한요소해석에 사용된 요소는 C3D20<sup>(6)</sup> 20절점 3차원 요소이며, 각 부품의 연결부위 즉 나사 체결부 등에는 각각의 특성에 따라 변위와 회전을 모두 구속하는 TIE<sup>(5)</sup>를 사용하였다.

JW-35A의 총 요소수는 약 9,300개, 총 절점수는 62,000개이며 유한요소모델의 전체하중은 1985 kgf로 계산되었다. 또한 JW-60A의 총 요소수는 약 10,000개, 총 절점수는 70,000개이며, 유한요소

Table 1 Boundary conditions for FE analysis

	$x$	$y$	$z$	Loading position
Table	-	-	850 kgf (35A) 2,250 kgf (60A)	Weight of work piece & work tank (B)
Wire feeder load	-	-	20 × 3 kgf	Joint of wire-feeder & head (C, D)
Weight of body	-	-	g : 9.81 m/s <sup>2</sup>	Distributed load (whole body)
Temperature of body	20°C	20°C	20°C	Whole body
Constraint	clamp	clamp	clamp	Bottom face of table bed & saddle bed (A)

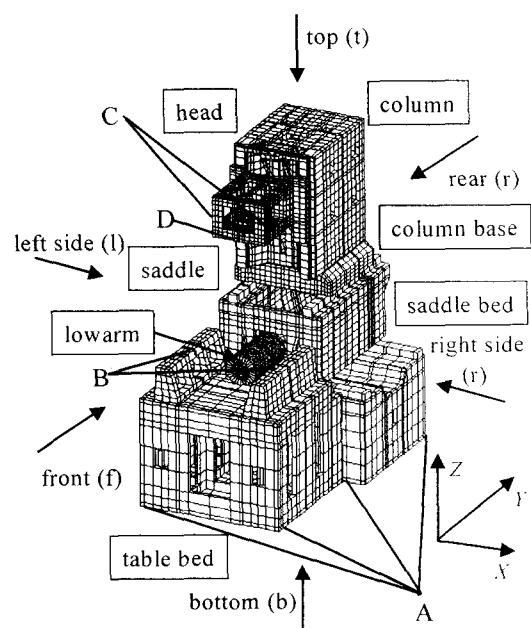


Fig. 1 Finite element model of JW-35A wire cut EDM

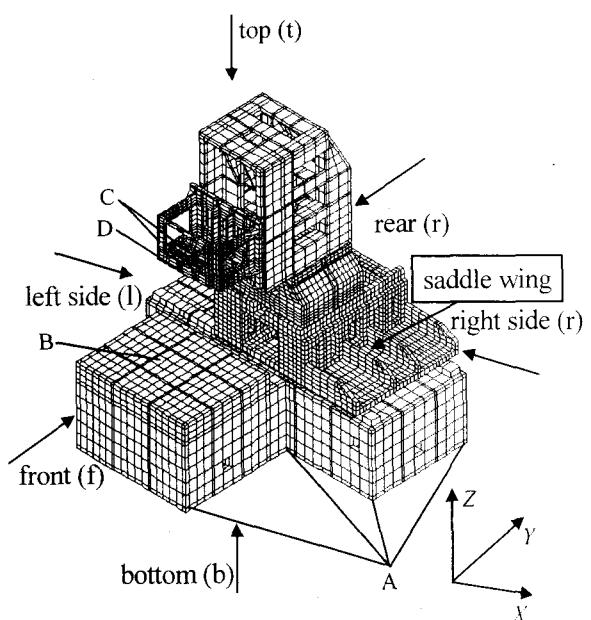


Fig. 2 Finite element model of JW-60A wire cut EDM

보델의 총 하중은 4,677 kgf로 계산되었다. Table 1에 나타나 있는 실제 기계의 하중보다 유한요소모델의 하중이 작은 이유는 유한요소모델 중에 외부케이스 및 해석에 영향이 작은 여러 부분을 생략하여 모델링 하였기 때문이다. Figs. 1-2는 이와 같이 생성된 JW-35A와 JW-60A의 유한요소모델들이다. 경계조건으로는 지면과 고정되는 테이블베드와 새들베드의 바닥면 A부분을  $x$ ,  $y$ ,  $z$  축 방향으로 변위 및 회전 모두 구속한다. 하중조건으로는 먼저 와이어 방전 가공기 구조물 자체의 자중과 외부 온도변화에 의한 온도변형량을 고려한다. 그리고 피가공물 최대 허용하중과 워크탱크의 하중을 압력으로 계산하여 테이블베드 상단 B부분에 가한다. 또한 와이어 구동부와 연결되는 C와 D부분에 와이어 장력 (20kgf)이 가해진다. Table 1에 이러한 경계 및 하중 조건이 정리되어 있다. 실제 가공시 발생할 수 있는 구조변형량은 상당히 작기 때문에 완전탄성으로 해석하며, 재료는 일반 주조강으로 탄성 계수는 152.4GPa, 푸아송비는 0.29, 밀도는 8,200 kgf/m<sup>3</sup>이다.

## 2.2 가공위치모델에 따른 와이어 상하단부의 상대변위오차

방전가공기 작동시 각 부품들은 공작물의 가공을 위하여 이동된다. 이 경우 각 이송위치에 따른 와이어 상하단부의 변위차가 기계 가공정밀도를 저하시키는 가장 중요한 변수이다. 일반적으로 가공물이 놓이고 먼저 헤드높이 ( $= z$  축 좌표)가 결정된 상태에서 각 축의 이송 중립점에서 최종보정을 한다. 따라서 중립점에서의 최종보정후 절대변위와 이송후의 절대변위와의 차이를 구조변형에 기인한 가공오차로 볼 수 있다. 유한요소해석을 통하여 얻은 각 가공 위치에서의 절대변위로부터 상대변위를 계산하기 위한 식들이 아래에 정의되어 있다. 우선 식 (1)-(2)와 같이  $x$ ,  $y$ ,  $z$  각 방향별로 상대변위를 구한 다음 식 (3)-(4)를 이용하여 상대변위의 절대값을 계산한다.

$$u_{pi} = u_{pi}^t - u_{pi}^b ; \quad u_{ni} = u_{ni}^t - u_{ni}^b \quad (1)$$

$$\delta_{pi} = u_i^b - u_i^n ; \quad (i = x, y, z) \quad (2)$$

$$u^b = \sqrt{u_{px}^2 + u_{py}^2 + u_{pz}^2} \quad (3)$$

$$\delta^b = \sqrt{\delta_{px}^2 + \delta_{py}^2 + \delta_{pz}^2} ; \quad \delta_{xy}^b = \sqrt{\delta_{px}^2 + \delta_{py}^2} \quad (4)$$

$u_{pi}'$  : 가공위치  $p$ 에서 와이어 상단부(t)의  $i$  방향성분 절대변위

$u_{pi}^b$  : 가공위치  $p$ 에서 와이어 하단부(b)의  $i$  방향성분 절대변위

$u_{ni}'$  : 가공위치 중립점(n)에서 와이어 상단부(t)의  $i$  방향성분 절대변위

$u_{ni}^b$  : 가공위치 중립점(n)에서 와이어 하단부(b)의  $i$  방향성분 절대변위

$u_{pi}$  : 가공위치  $p$ 에서 와이어 하단부(b)에 대한 상단부(t)의  $i$  방향성분 상대변위

$u_{ni}$  : 가공위치 중립점(n)에서  $i$  방향성분 상대변위

$\delta_{pi}$  : 가공위치  $p$ 에서 중립점(n)에 대한  $i$  방향성분 상대변위

$u^b$  : 가공위치  $p$ 에서 상대변위 크기

$\delta^b$  : 가공위치  $p$ 에서 중립점(n)에 대한 상대변위 크기

$\delta_{xy}^b$  : 가공위치  $p$ 에서 중립점(n)에 대한  $xy$  평면상에서의 상대변위 크기

## 2.3 위치 모델에 따른 상대변위 특성

JW-35A의 헤드와 와이어 구동부의 체결점에서 구한 절대변위와 하부암에서 구한 절대변위의 차로부터 Tables 2-3과 같은 상대변위를 계산하였다. 모든 위치모델 가운데, 자중만을 고려한 경우에는 n-f-t 위치모델이 24.3 μm, 주위온도변화만을 고려한 경우에는 r-f-t 위치모델이 28.3 μm로 가장 큰 상대변위를 갖는 것으로 나타났다. 이것은 다른 위치모델에 비해 바닥 고정부에 대한 헤드부분의 자중과 모멘트 영향이 크기 때문이라고 볼 수 있다. 상대오차가 가공정밀도에 직접적인 영향을 줌을 고려할 때, 자중만을 고려한 경우와 주위온도변화만을 고려한 경우는 각각 상대변위가 가장 큰 n-f-t, r-f-t 모델과 같은 위치에서 가공시 가공정밀도가 가장 떨어진다고 볼 수 있다. 하지만 여기서  $\delta$ 와 함께 고려해야 할 중요한 요소로서  $\delta_{xy}$ 가 있다. 실제 가공에 있어서는 와이어가 상하로 이동하면서 감김과 풀림의 작용을 하여  $z$  축 방향의 상대변위는 조절할 수 있다. 그러므로 실제 가공오차의 직접적인 요인은  $x$ ,  $y$  축의 상대변위이다. 이런 점을 생각할 때 자중만을 고려한 경우와 주위온도변화만을 고려한 경우는 각각  $\delta_{xy}$ 가 가장 큰 r-f-t, n-n-b 위치모델이 실제 가공오차가 가장 크다고 할 수 있다.

**Table 2** Displacement difference of JW-35A (unit :  $\mu\text{m}$ ) Weight Only

Position	$\delta_{px}$	$\delta_{py}$	$\delta_{pz}$	$\delta_{xy}$	$\delta$
1. n-n-n	0	0	0	0	0
2. r-n-n	-5.6	3.4	-15.4	6.6	16.7
3. n-r-n	-0.3	3.3	-12.7	3.3	13.1
4. n-f-n	-0.4	4.9	-14.7	4.9	15.5
5. n-n-t	-0.3	4.5	-16.9	4.5	17.5
6. n-n-b	-0.4	3.4	-17.1	3.4	17.4
7. n-r-t	-0.4	3.7	-11.7	3.7	12.3
8. n-f-t	-0.4	5.5	-23.7	5.5	<b>24.3</b>
9. r-r-t	-4.1	3.1	-10.1	5.1	11.3
10. r-f-t	-8.1	4.5	-19.9	<b>9.3</b>	21.9
11. r-f-b	-6.6	3.7	-19.9	7.6	21.3
12. r-r-b	-3.3	2.6	-10.1	4.2	10.9

**Table 4** Displacement difference of JW-60A (unit :  $\mu\text{m}$ ) Weight Only

Position	$\delta_{px}$	$\delta_{py}$	$\delta_{pz}$	$\delta_{xy}$	$\delta$
1. n-n-n	0	0	0	0	0
2. l-n-n	0.5	1.3	6.3	1.4	6.5
3. r-n-n	0.2	1.9	6.3	1.9	6.6
4. n-f-n	0	0	-0.4	0	0.4
5. n-r-n	0	-7.3	-1.3	7.3	7.4
6. n-n-t	1.2	-1.7	16.0	2.1	16.1
7. n-n-b	1.2	-0.6	15.9	1.3	15.9
8. l-f-t	-0.3	4.8	9.4	4.8	10.6
9. l-f-b	1.2	-3.0	15.2	3.2	15.5
10. l-r-t	1.2	7.1	13.9	7.2	15.7
11. l-r-b	1.3	0.6	19.5	1.4	<b>19.6</b>
12. r-f-t	0.9	-9.4	16.6	<b>9.4</b>	19.1
13. r-f-b	1.0	-4.2	16.2	4.3	16.8
14. r-r-t	1.1	6.4	13.6	6.5	15.1
15. r-r-b	1.0	-6.4	4.7	6.5	16.1

**Table 3** Displacement difference of JW-35A (unit :  $\mu\text{m}$ ) Temp (20°C) Only

Position	$\delta_{px}$	$\delta_{py}$	$\delta_{pz}$	$\delta_{xy}$	$\delta$
1. n-n-n	0	0	0	0	0
2. r-n-n	-4.8	6.5	16.2	8.1	18.1
3. n-r-n	-4.1	6.3	9.8	7.5	12.3
4. n-f-n	-4.2	7.3	14.5	8.4	16.8
5. n-n-t	-4.4	6.8	19.7	8.1	21.3
6. n-n-b	-4.3	9.3	20.2	<b>10.2</b>	22.6
7. n-r-t	-4.5	6.5	7.5	7.9	10.9
8. n-f-t	-4.3	7.3	25.6	8.5	26.9
9. r-r-t	-4.6	6.4	13.7	7.9	15.8
10. r-f-t	-6.3	7.0	26.7	9.4	<b>28.3</b>
11. r-f-b	-5.6	6.7	26.8	8.7	28.2
12. r-r-b	-4.3	6.2	21.5	7.5	22.7

**Table 5** Displacement difference of JW-60A (unit :  $\mu\text{m}$ ) Temp (20°C) Only

Position	$\delta_{px}$	$\delta_{py}$	$\delta_{pz}$	$\delta_{xy}$	$\delta$
1. n-n-n	0	0	0	0	0
2. l-n-n	3.7	1.0	-12.0	3.8	12.6
3. r-n-n	1.7	0.4	-12.0	1.7	12.1
4. n-f-n	0	0	0.7	0	0.7
5. n-r-n	0.3	-5.9	1.4	5.9	6.1
6. n-n-t	9.9	-1.3	-20.2	10.0	22.5
7. n-n-b	9.6	-0.5	-30.0	9.6	31.5
8. l-f-t	-2.8	4.0	-17.8	4.9	18.5
9. l-f-b	9.7	-2.4	-28.8	9.9	30.5
10. l-r-t	10.3	4.7	-26.3	<b>11.3</b>	28.6
11. l-r-b	10.7	0.6	-36.9	10.7	<b>38.4</b>
12. r-f-t	7.1	-2.5	-31.4	7.5	32.3
13. r-f-b	7.8	-3.4	-30.6	8.5	31.8
14. r-r-t	8.7	5.2	-25.8	10.1	27.7
15. r-r-b	8.2	-5.1	-17.8	9.7	20.3

Tables 4~5에 나타나 있는 JW-60A의 상대변위를 살펴보면 중립 위치에 대한 상대변위가 가장 큰 모델은 자중만을 고려한 경우와 주위온도변화만을 고려한 경우 모두 각각  $19.6 \mu\text{m}$ ,  $38.4 \mu\text{m}$ 의 값을 갖는 l-r-b 위치모델이다. 이것은 JW-60A는 자중만을 고려한 경우와 주위온도변화만을 고려한 경우 모두 상대변위가 가장 큰 l-r-b 모델과 같은 위치에서 가공할 때 가공정밀도가 가장 떨어진다는 것으로 볼 수 있다. 하지만 여기서도 JW-35A에서와 마찬가지로  $\delta_{xy}$ 를 생각하면 자중만을 고려한 경우는 r-f-t, 주위온도변화만을 고려하면 l-r-t 위치모델이 실제가공오차가 가장 크다고 할 수 있다.

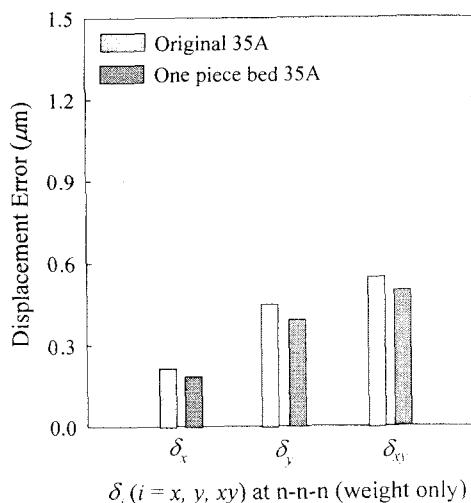
### 3. 모델들의 구조변형 특성 및 성능

#### 3.1 $\eta$ -factor에 의한 요소망 세분정도 평가

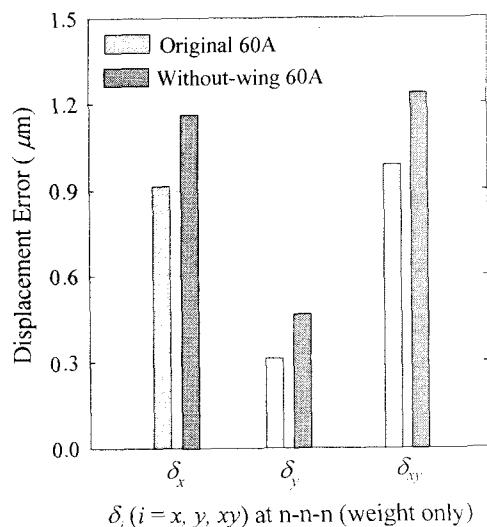
JW-35A와 JW-60A의 유한요소 응력해를 이용하여 구한  $\eta$ -factor<sup>(6~8)</sup> 값들은 각각 0.196, 0.208이다. 이러한 0.2 근처의 값들은 일견 유한요소망이 충분히 세분화되어있지 않음을 나타낸다. 그러나 두 모델이 같은 크기의  $\eta$  값을 가지므로 유한요소해를 통한 구조변형특성의 정성적인 비교는 가능하다. 그리고  $\eta$ -factor의 절대적인 값이 다소 큰 것에 대한 데이터의 신뢰성을 살펴보고자 한쪽 면이 완전 구속된 외팔보로 해석을 수행하였다. 치수가  $100 \times 100 \times 1000$  ( $\text{mm}^3$ )인 세장보를 사용하여 자중만 준 경우, 자중과 온도변화 ( $20^\circ\text{C}$ )를 동시에 준 경우, 집중하중을 준 경우의 최대변위와 최대응력에 대해서 결과 값을 분석하였다.  $\eta$ -factor의 값이 양호한 0.005에 대해 다소 큰 편인 0.2의 경우를 비교하였는데, 최대변위의 경우 6.4, 0.7, 10 % 작은, 그리고 최대응력의 경우도 23, 6.4, 38 % 작은 값을 보였다. 이것은  $\eta$ -factor가 0.005일 때 즉 요소망이 매우 잘 짜여진 경우와 비교하여 응력 값은 오차가 크지만 변위 값은 오차가 충분히 작다는 것을 나타낸다. 이로부터 본 연구의 유한요소모델과 상응하는 유한요소 변위에는 유효하다고 볼 수 있다.

#### 3.2 구조에 따른 변형 특성

35A와 60A의 부품들을 비교해 보면 등가응력 분포상태는 큰 차이를 보이지 않으며 변형양상도 두 모델 모두 자체변형은 비슷하고, 다만 35A 부품들의 회전과 비틀림 등이 60A보다 큰 것을 볼 수 있다. 이러한 사실들을 확인하기 위하여 35A의



(a) One piece bed vs original



(b) Without-wing vs original

Fig. 3 Comparison of  $\delta_i$  between original model and modified model

분리된 베드를 일체형으로 모델링한 35A 수성모델과 60A에서 새들의 날개 구조물을 제거한 60A 수성모델을 추가로 해석하였다. 35A에 날개구조물을 부착하려면 구조물 전체의 전면적 수정이 필요하기 때문에 60A의 날개 구조물을 제거하는 방법으로 같은 조건을 만들어 변형양상을 알아보았다. 먼저 일체형 베드를 갖는 35A의 수성모델은

기준모델에 비해 전체적으로는 약 1.2%, 가공정밀도와 직접적 관련이 있는  $xy$ 평면상에서의 상대변위오차는 10% 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 베드 분리형의 경우에 나사조인트 등의 연결부위에서 발생할 수 있는 변형집중에 의한 오차증가 요소가 제거된 것으로 해석할 수 있다. Fig. 3은 이런 구조특성의 상대변위오차에 대한 영향을 보여준다. 즉 베드구조물의 일체형 제작여부와 날개 등의 보완구조물 설치여부에 따라서 오차를 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한 새들의 날개 구조물을 제거한 60A 수정모델은 기준모델에 비해 전체적으로는 약 18%, 가공정밀도와 직접적 관련이 있는  $xy$ 평면상의 변위오차는 22%의 큰 차이로 증가한다. 해석결과를 살펴보면  $z$ 축 방향의 상대변위오차는 기준모델과 별 차이 없으나  $xy$ 평면상의 상대변위오차는 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 날개 구조물이  $z$ 방향보다는  $xy$ 평면상에서의 상대변위오차 발생을 방지함으로써 60A의 구조적 안정성에 크게 기여하는 것으로 이해할 수 있다.

#### 4. 공리적 접근에 의한 설계개선 기법

##### 4.1 공리적 접근을 통한 구조변수 선정

와이어 방전가공기의 정밀도 향상을 위해서는 다음과 같이 FRs를 정의할 수 있다.

- FRI : WEDM의 구조적 정밀도 향상
- FR11 : 자중 변위오차 감소
- FR12 : 열 변형오차 감소
- FR13 : 자중에 의한 변위오차 보정
- FR14 : 열에 의한 변형오차 보정

공리적 설계<sup>(9-11)</sup>의 다음 단계로 이러한 4개의 FRs를 만족시켜 줄 수 있는 설계변수들 (DPs)을 정의하고 이런 값들을 결정하여야 한다. 와이어 방전가공기의 오차는 크게 자중에 의한 것과 열변형에 의한 것으로 나눌 수 있는데 각각의 변위양상을 파악하고 일반식을 구함으로서 정밀도를 향상시킬 수 있다. 이런 측면에서 FRs를 만족시키기 위해 다음과 같이 DPs를 정의하였다. 이를 이용하여 설계행렬 [DM]을 작성하면 다음과 같은 대각행렬을 얻을 수 있다. 여기서  $X$ 는 DP가 FR에 영향을 주는 것을 의미하며  $O$ 은 DP가 FR에 무관함을 나타낸다.

DP1 : WEDM의 변위 일반식

DP11 : 자중 변위 양상 파악

DP12 : 열 변형 양상 파악

DP13 : 자중에 의한 변위 일반식

DP14 : 열에 의한 변형 일반식

$$\begin{pmatrix} \text{FR 11} \\ \text{FR 12} \\ \text{FR 13} \\ \text{FR 14} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X & O & O & O \\ O & X & O & O \\ O & O & X & O \\ O & O & O & X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{DP 11} \\ \text{DP 12} \\ \text{DP 13} \\ \text{DP 14} \end{pmatrix}$$

위의 행렬은 자중과 열에 의한 변형오차 감소는 WEDM의 기하학적인 최적화를 통하여 이루어지고 자중과 열에 의한 변위 일반식을 이용하여 자중과 열에 의한 변위보정이 이루어진다는 것을 나타낸다. 위와 같은 행렬은 비연결 설계임 알 수 있다. 이런 설계는 별다른 문제없이 각각의 FRs를 개선시킬 수 있는 DPs를 선정하면 최적의 개선안이 나올 수 있다는 것을 의미한다.

#### 4.2 설계행렬식 결정

설계방정식을 바탕으로 자중에 의한 변형오차 감소를 위해 DP11로 각 위치에서의 자중에 의한 변형양상파악을 선택하였는데, 이것은 최적설계 이론을 바탕으로 현재 모델의 자중에 의한 변위양상을 파악하고 단면 2차 모멘트 증가에 의한 처짐 감소와 보정무게의 설치에 의한 처짐 감소에 의해 변형오차를 감소시킬 수 있다. 같은 개념을 열변형 (DP12)에 대해서도 적용할 수 있다. 자중에 의한 변위를 보정하기 위해 DP13으로 각 위치에서의 자중에 의한 세 방향 변위를 선택하였다. WEDM 가공시 각 부분이 여러 위치에 갔을 때, 자중에 의한 처짐을 전산모사를 통해 미리 구하고 이것을 콘트롤러에 입력함으로써 그 오차를 보정할 수 있다. 같은 개념으로 열변형에 의한 변위를 보정하기 위해 DP14로 각 위치에서의 열에 의한 세 방향 변위를 선택하였다. WEDM이 가공을 하면서 각 부분이 여러 위치에 갔을 때, 열에 의한 변형을 전산모사를 통하여 미리 구하고 이것을 콘트롤러에 입력함으로써 그 오차를 보정할 수 있다. 위의 공리적 접근 설계방법으로 구한 DP에 의해 일반식과 변형양상은 무관함을 보였으므로, 이를 바탕으로 구조해석으로부터 얻은 각 위치 모델의 상대변위를 이용하여 변형량을 예측할 수 있는 회귀식을 유도하였다.

**Table 6** Regression coefficients for JW-35A  
(Weight Only)

	$\delta_x$	$\delta_y$	$\delta_z$
$C_{it}^0$	-0.3	4.5	-16.9
$C_{it}^1$	-6.1	3.8	-15.0
$C_{it}^2$	-0.1	0.8	-5.2
$C_{it}^3$	-1.6	-4.6	17.2
$C_{in}^0$	0	0	0
$C_{in}^1$	-5.6	3.4	-15.4
$C_{in}^2$	0.3	-3.3	12.7
$C_{in}^3$	12.7	4.0	2.7
$C_{ib}^0$	-0.4	3.4	-17.1
$C_{ib}^1$	-4.6	-0.3	2.1
$C_{ib}^2$	0	4.3	-25.7
$C_{ib}^3$	-1.6	-3.7	-3.3

먼저 각 축의 이송량을  $x, y, z$ 로 정하고 최대 이송량에 대해서  $\pm 1$ 로 단위화시킨 것에 대하여 각 방향의 변위량을 다음과 같은 식 (5)로 유도하였다.  $\delta_i$ 는 각 모델에 대한 방향별 변위이고,  $N_i$ 는  $z$ 에 대한 형상함수,  $C_{ij}^k$ , ( $k=0, 3$ )는 미정계수들이다. 이러한 형태의 일반식은 응답표면방법 (Response Surface Methods)<sup>(12)</sup>에 기초하여 유도하였다. 응답표면방법은 여러 변수에 의해 영향을 받는 문제와 이러한 문제를 수식화하기 위해서 사용되는 모델링과 분석에 유용하게 사용되는 수학적이고 통계적인 방법이다. 여기서는 각 변수에 대해 선형회기에 해당하는 두 bilinear 함수의 곱으로 상대변위 오차를 보정할 일반식 (6)을 구성하였다.

$$\delta_{ij} = C_{ij}^0 + C_{ij}^1 x + C_{ij}^2 y + C_{ij}^3 xy \quad (5)$$

$$\delta_i = \delta_{ij} N_j \quad (6)$$

$$(i=x, y, z) ; (j=t, b, n)$$

$$N_t = z(z+1)/2$$

$$N_n = (z+1)(1-z)$$

$$N_b = z(z-1)/2$$

**Table 7** Regression coefficients for JW-60A  
(Weight Only)

	$\delta_x$	$\delta_y$	$\delta_z$
$C_{it}^0$	1.2	-1.7	16.0
$C_{it}^1$	1.7	-7.7	4.5
$C_{it}^2$	-1.8	-0.6	-3.1
$C_{it}^3$	-0.2	0.6	-0.8
$C_{in}^0$	0	0	0
$C_{in}^1$	-0.5	-1.3	-6.3
$C_{in}^2$	0	7.3	-0.4
$C_{in}^3$	-1.6	-8.6	-5.9
$C_{ib}^0$	1.2	-0.6	15.9
$C_{ib}^1$	-0.1	-0.6	-1.5
$C_{ib}^2$	-0.1	-3.0	-0.2
$C_{ib}^3$	-0.1	-1.2	1.9

자중만을 고려한 경우의 해석에 대한 회기계수들을  $C_{ij}^k$ 이 Tables 6-7에, 온도만을 고려한 경우의 회기계수들이 Tables 8-9에 정리되어 있으며, 회귀식으로부터 계산된 상대변위는 자중만을 고려한 경우에는 모든 위치에서 6% 미만의 오차를 갖는다. 그리고 온도변화만을 고려한 해석에 관한 회귀식으로부터 계산된 상대변위는 최대 10% 미만의 오차를 갖지만, 보통 6%내외의 오차를 나타내고 있다. 따라서 일반식을 이용하면 유한요소해석을 하지 않은 임의 위치에 대한 상대변위도 비교적 정확하게 유추할 수 있다. 이와 함께 본 연구와 같은 선형 탄성해석의 경우는 자중과 온도변화에 대한 상대변위 값들의 단순중첩으로 일반식을 재구성할 수 있으므로 공학적으로 매우 유용하다고 판단된다.

## 5. 요 약

본 연구에서는 유한요소해석을 통한 와이어 방전가공기의 설계검증을 위하여 두 모델을 선정하여 CAD 패키지 I-DEAS를 이용하여 3차원 유한요소모델을 모델링한 후 상용 유한요소해석코드인 ABAQUS로 각 모델의 가공위치에 따른 해석을 수행하였다. JW-35A와 JW-60A 두 모델의 상호비교 타당성 여부를 확인하기 위하여  $\eta$ -factor 개념을 이용하였다. 이어 공리적 설계 개념을 도입하여 오차보정을 위한 설계변수들의 선택과 방법이

**Table 8** Regression coefficients for JW-35A  
(Temperature only : 20°C)

	$\delta_x$	$\delta_y$	$\delta_z$
$C_{it}^0$	-1.1	1.8	39.7
$C_{it}^1$	-4.6	-3.9	-4.5
$C_{it}^2$	3.3	-0.3	-12.2
$C_{it}^3$	0.8	0.8	0.7
$C_{in}^0$	0	0	0
$C_{in}^1$	-1.8	1.5	36.2
$C_{in}^2$	-1.1	1.3	29.8
$C_{in}^3$	2.2	-1.6	-40.3
$C_{ib}^0$	-1.3	1.3	40.2
$C_{ib}^1$	-0.7	0.3	-6.1
$C_{ib}^2$	-3.1	-0.2	-8.1
$C_{ib}^3$	3.8	-0.1	-4.5

적절함을 보이고 두 모델의 유한요소해석 결과를 상호 비교하여 구조물의 설계를 검증하고 변형 예측식을 유도하였다. 본 연구를 통해 유도된 변형 예측식 (5)-(6) 형태의 접근방법은 비단 방전가공기 뿐만 아니라 이와 유사한 형태의 공작기계에도 적용할 수 있을 것이다.

### 참고문헌

- (1) 김규만, 김보현, 인치현, 최덕기, 주종남, 1998, “미세방전을 이용한 미소구멍가공에서 가공율 특성의 고찰,” 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 학술강연회 초록집, pp. 14~17.
- (2) 김규만, 김보현, 주종남, 1997, “미소 축, 구멍 가공용 미세 방전가공기의 개발,” 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 1075~1079.
- (3) 신정호, 곽병만, 1998, “수평형 머시닝센터에 대한 구조해석 및 최적설계,” 대한기계학회 추계 학술대회 논문집 (A), pp. 396~401.
- (4) I-DEAS Master Series 6.0, 1999, *Student Guide* (P-30002), Structural Dynamics Research Corporation, Milford, OH.
- (5) ABAQUS *User's Manual*, 1998, Version 5.8, Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, RI.
- (6) Cook, R. D., 1995, *Finite Element Modeling for Stress Analysis*, John Wiley & Sons, Inc., Chapter 5, pp. 141~144.
- (7) Wiberg, N. E. and Abdulwahab, F., 1997, “Error Estimation with Postprocessed Finite Element Solutions,” *Computers and Structures*, Vol. 64, No. 1, pp. 113~137.
- (8) Zienkiewicz, O. C. and Zhu, J. Z., 1973, “A Simple Error Estimator and Adaptive Procedure for Practical Engineering Analysis,” *International Journal of Numerical Method Engineering*, Vol. 6, pp. 55~61.
- (9) Suh, N. P., 1990, *The Principles of Design*, Chapters 2~3, Oxford University Press, NY.
- (10) Suh, N. P., 1995, “Axiomatic Design of Mechanical Systems,” *Journal of Biomechanical Engineering, Transactions of ASME*, Vol. 117 (B), pp. 2~10.
- (11) 이형일, 서현, 2000, “차량 복합판형부품의 설계개선 기법들,” 대한기계학회논문집 (A), 제24권, 제5호, pp. 1103~1114.
- (12) Montgomery, D. C., 1996 *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, Inc., Chapter 14, pp. 575~578.

**Table 9** Regression coefficients for JW-60A  
(Temperature only : 20°C)

	$\delta_x$	$\delta_y$	$\delta_z$
$C_{it}^0$	9.9	-1.3	-30.2
$C_{it}^1$	6.2	-5.6	-8.2
$C_{it}^2$	-7.7	2.0	5.6
$C_{it}^3$	-1.2	2.4	1.4
$C_{in}^0$	0	0	0
$C_{in}^1$	3.7	-1.0	12.0
$C_{in}^2$	0	0	0.7
$C_{in}^3$	-12.1	-1.1	33.2
$C_{ib}^0$	9.6	-0.5	-30.0
$C_{ib}^1$	-0.6	0.4	2.8
$C_{ib}^2$	-0.8	-2.4	0.4
$C_{ib}^3$	-0.4	-0.9	-3.8