

# iSight®를 이용한 툴 홀더 스피ndl의 변형 및 응력해석

## Stress and Deformation Analysis of a Tool Holder Spindle using iSight®

권구홍<sup>1</sup>, 정원지<sup>1,✉</sup>

Koo Hong Kwon<sup>1</sup> and Won Jee Chung<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 창원대학교 기계설계공학과 (School of Mechatronics, Changwon National Univ.)

✉ Corresponding author: wjchung@changwon.ac.kr, Tel: 055-267-1138

Manuscript received: 2009.12.31 / Revised: 2010.5.4 / Accepted: 2010.6.14

*This paper presents the optimized approximation of finite element modeling for a complex tool holder spindle using both DOE (Design of Experiment) with Optimal Latin Hypercube (OLH) method and approximation modeling method with Radial Basis Function (RBF) neural network structure. The complex tool holder is used for holding a (milling/drilling) tool of a machine tool. The engineering problem of complex tool holder results from the twisting of spindle of tool holder. For this purpose, we present the optimized approximation of finite element modeling for a complex tool holder spindle using both DOE (Design of Experiment) with Optimal Latin Hypercube (OLH) method (specifically a module of iSight® FD-3.1) and approximation modeling method with Radial Basis Function (RBF) (another module of iSight® FD-3.1) neural network structure*

Key Words: Optimized Approximation (최적근사화), Finite Element Modeling (유한요소모델링), Complex Tool Holder Spindle, (복합툴홀더스핀들), Optimal Latin Hypercube (OLH : 최적라틴하이퍼큐브), Radial Basis Function (RBF) Neural Network (RBF 뉴럴네트워크)

### 1. 서론

현재의 산업구조에서 소비자의 다양한 욕구를 충족시키기 위해서는 우수한 품질의 다양한 제품을 생산하여야 한다. 따라서 제품의 수명 주기가 급격히 단축되고 있으며 새로운 모델을 제작하기 위한 시간도 단축되고 있다. 이에 따른 정밀한 금형을 신속하게 제작하기 위한 기술이 필요하며 최근 이러한 기술적 대안으로 고속가공이 부각되고 있다.

고속가공의 정의는 공작물, 절삭가공, 절삭공구의 선정에 따라 다르게 정의 되지만, 밀링작업의 경우 공작물 재료에 따라 고속가공의 영역이 구분되고 일반적으로 10,000rpm 이상의 스피ndl 속도에

서의 가공을 엔드밀 가공에서의 고속가공이라 부른다. 이러한 고속가공은 범용가공에 비해 고정도 고품위 가공이 가능하며 이를 위해서 고속공작기계, 고속가공용 공구 그리고 특정 절삭재료에 대한 절삭특성 데이터가 필요하다. 이러한 고속절삭을 하는 가공기에서 진동의 발생은 생산제품의 불량률을 초래한다. 고속 가공기는 높은 회전 정밀도가 요구되는 기계이며 장시간 운전으로 인한 기계의 손상과 베어링부의 마모로 인한 이상 진동이 발생할 수 있으며 이러한 이상 진동으로 인하여 가공기의 수명이 단축되고 생산 제품의 불량률 발생하게 된다. 고속 가공기계의 불량 발생 원인은 회전부품의 불평형, 베어링이나 커플링의 축 정렬 불량, 축의 휨, 비틀림 진동, 기계적 느슨

함, 공진 베어링의 불량 등을 들 수 있으며 이상 진동의 원인은 복합적인 요인에 의해 일어나는 경우가 많다. 공작기계의 생산 효율과 가공 정밀도는 생산성에 대한 평가로 직접적으로 나타나는 인자이며 주축설계의 기본적인 고려사항이 된다. 주축 설계에 있어 일반적으로 높은 회전 정밀도와 고속 회전 성능, 그리고 큰 강성이 요구된다. 그리고 고속 가공기에서 공작물의 가공 시 고속회전에 의한 진동을 줄이고 공구 툴(Tool)의 회전 시 안정성을 기하기 위하여 툴 홀더(tool holder)가 사용되고 있다. 그러나 툴 홀더가 터렛 공구대와 맞물린 상태에서 회전 시 툴 홀더 스피들에 많은 deformation 발생하고 툴 홀더 스피들 끝단 부분에 많은 stress 에 의해 깨지는 현상이 종종 발생하는 경향이 있다.

이러한 현상을 줄이기 위해 툴 홀더 스피들(tool holder spindle)의 베어링 위치 변화를 통하여 툴 홀더 스피들의 deformation 을 알아보고 시제품을 제작하여 50mm test bar 를 이용한 내경의 흔들림을 측정한다. 최적 설계 값을 찾아 툴 홀더 스피들의 deformation 을 줄이면 툴 홀더 스피들의 회전 시 베벨기어를 통해 공구에 전달되는 진동을 줄일 수 있을 것이라 판단된다. 그리고 툴 홀더 스피들 끝단의 길이와 두께의 변화를 통하여 툴 홀더 스피들 끝단의 stress 를 알아보고 값이 최소가 되는 최적의 형태를 찾고자 한다. Fig. 1 은 툴 홀더의 설계도면이며 이를 검증해 볼 필요가 있다. 설계 검증을 위하여 Fig. 2 와 같이 툴 홀더 전체의 어셈블(Assemble)된 모델의 간섭 검증으로서 간섭 체크 결과 각 파트간의 간섭은 일어나지 않았다. 이를 통해 기본 설계 안이 올바르게 작성됐음을 확인할 수 있다.

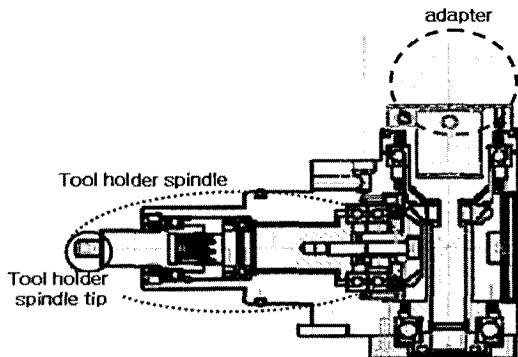


Fig. 1 Drawing of complex tool holder

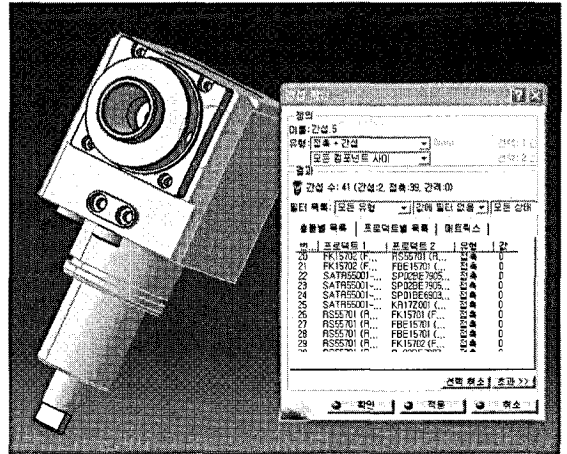


Fig. 2 Interference verification of 3-D model

## 2. 복합 툴 홀더 스피들의 모델링

본 해석을 위해 상용 FEM(Finite Element Model) 해석 도구인 ANSYS Workbench®11.0 을 사용하였다. 사용한 요소는 Shell 63 과 Solid 186 이며 Fig. 3 에서는 툴 홀더 전체의 모델이 아닌 연구에 필요한 툴 홀더 스피들 부분만 모델링 하였으며 mesh 를 생성하였다. Fig. 3 에서는 베어링의 위치를 실선으로 표시하였으며 툴 홀더 스피들 끝단은 점선으로 표현하였다.

해석에 사용된 스피들의 물성치는 table 1 과 같다. 스피들의 총 길이는 137mm 이며 스피들 전방에 1 개의 베어링과 중간에 1 개의 베어링 후방에 1 개의 베어링으로 지지되고 있는 구조이다. 해석에 사용된 베어링 3 개의 물성치는 동일하며 table 2 와 같다. 툴 홀더 스피들 끝단은 공구의 회전을 위하여 다른 공구가 맞물려진다. 그리고 회전시의 터렛 공구대와와의 맞물린 끝단에 stress 가 가해져 툴 홀더 스피들 끝단의 깨지는 현상이 발생하여 길이와 두께에 변화를 주어 연구하였다.

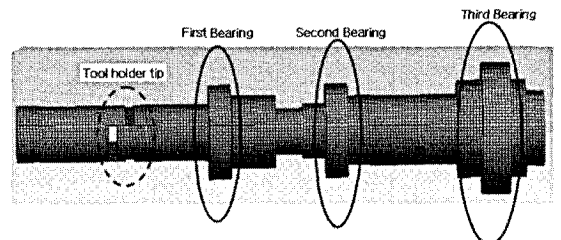


Fig. 3 Finite element modeling of tool holder spindle

Table 1 Material properties of spindle

Property (unit)	E (MPa)	Density (g/mm <sup>3</sup> )	Poisson's ratio
	850	7.8	0.3

Table 2 Material properties of bearing

	Axial rigidity (N/μm)	Radial rigidity (N/μm)
Bearing	40	180

### 3. iSight 을 이용한 최적설계

#### 3.1 실험계획을 위한 파라미터 선정

실험에 있어서 데이터에 산포를 준다고 생각되는 무수히 많은 원인들 중에서 실험에 직접 취급되는 원인을 인자라고 부른다. 실험을 실시하기 이전에 대한 충분한 계획이 없이는 원하는 실험의 목적을 달성하기 어렵다. 실험계획법이란 실험에 대한 계획 방법을 의미하는 것으로, 해결하고자 하는 문제에 대하여 어떠한 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험 횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이라고 정의할 수 있다. 하나의 실험계획법을 수립한다고 하는 것은 해결하고자 하는 문제에 대하여 인자, 실험방법, 실험순서를 선정하여 실험 후 얻어지는 데이터에 대한 최적 분석방법을 선택하였다는 의미이다.

본 연구에서 베어링은 상용제품을 사용하게 됨으로써 사양이 이미 정해져 있다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 툴 홀더 스피ndl의 전체 deformation 과 툴 홀더 스피ndl 끝단의 stress 에 대한 연구이므로 툴 홀더 스피ndl 구속 주축을 지지하는 베어링의 위치, 툴 홀더 스피ndl 끝단의 길이와 두께를 최적의 조건으로 선정되었다는 가정 아래 베어링의 위치, 툴 홀더 스피ndl 끝단의 길이와 두께가 툴 홀더 스피ndl과 툴 홀더 스피ndl 끝단에 얼마만큼 영향을 미치는지 알아보고 iSight® FD-3.1의 OLH(Optimal Latin Hypercube)방법을 이용하여 베어링의 최적의 위치와 툴 홀더 스피ndl 끝단의 길이와 두께를 찾아보았으며 100 개의 데이터를 얻어 내었다. 공구와 연결되는 어댑터(adapter)와 터렛공구대와 연결되는 툴 홀더 스피ndl을 연결하는 베벨기어가 중요한 요인이 될 수도 있지만 본 연구에서는 어댑터와 툴 홀더 스피ndl의 연결 기능으로만 사용하였다고 판단되어 설계인자로 채택하지 않았다.

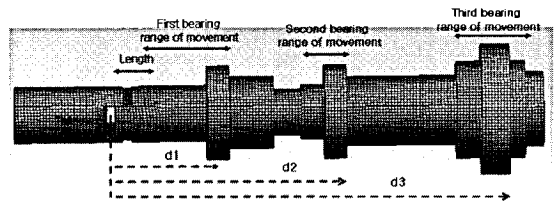


Fig. 4 Ranges of movement and positions for 3 bearing positions

Fig. 4 에서는 툴 홀더 스피ndl에서 3 개의 베어링의 이동 할 수 있는 위치를 d1, d2, d3 로 나타내며 툴 홀더 스피ndl 끝단의 길이와 두께의 변화의 폭을 나타낸다. 여기서 베어링의 위치에 따라 툴 홀더 전체에서 베어링을 지지하는 부분이 달라지면서 힘을 분산할 수 있을 것이라 판단되어 베어링의 위치를 스피ndl을 변형과 관련된 인자로 채택하였다. 스피ndl의 베어링 초기위치와 lower boundary 와 upper boundary, 툴 홀더 스피ndl 끝단의 두께와 길이의 변화를 Table 3 과 같이 주었다.

Table 3 Base line lower boundary and upper boundary of 5 design variables (unit : mm)

	Initial Value	Lower Bound	Upper Bound
First Bearing (d1)	29.5	11.5	37
Second Bearing (d2)	69.5	60.5	70.5
Third Bearing (d3)	120	115	127
Tool holder spindle tip length	10.5	5.5	15.5
Tool holder spindle tip Thickness	8	4	12

실험계획법 DOE(Design of Experiment)는 iSight FD-3.1 의 DOE 방법 중의 하나인 OLH 을 사용하여 베어링들의 lower boundary 와 upper boundary 사이의 값 그리고 툴 홀더 스피ndl 끝단의 두께와 길이의 값들을 적절히 샘플링하여 100 회의 실험계획법을 수립하여 각각의 경우마다 ANSYS

Worckbench®11.0 의 전산해석을 통하여 수행한 뒤 RBF(Radial Basis Function) 근사기법을 통하여 최적 값을 산출하였다.

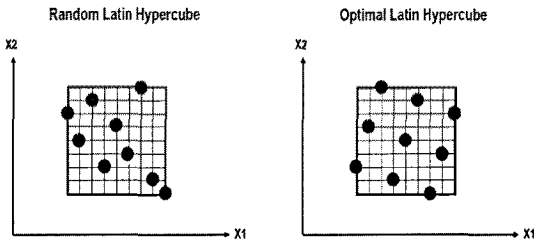


Fig. 5 Optimal Latin hypercube method

OLH 는 Fig. 5 에서 보는 바와 같이 샘플링을 할 때 랜덤방식이 아닌 일정한 규칙에 의해서 샘플링 하는 방식을 iSight® FD-3.1 에서 제공하는 기능중의 하나로 신뢰도가 높은 ANOVA(Analysis of Variance)분석과 모델에 맞는 근사기법을 제공하여 준다는 이점이 있다. Fig. 6 에서는 iSight® FD-3.1 과 ANSYS Worckbench®11.0 과의 연동하는 방법에 대한 것을 나타내었다. 연동하는 방법은 우선 ANSYS Worckbench®11.0 을 사용하여 처음 설계된 데이터를 바탕으로 해석을 실행하여 최초 해석 값을 Log 파일로 만들어서 iSight® FD-3.1 로 불러 들여 Fig. 7 에서 보는 바와 같이 input 과 output 인자를 결정하고 input 인자의 값을 lower boundary 와 upper boundary 로 설정하여 움직일 수 있는 거리를 나타낸다.

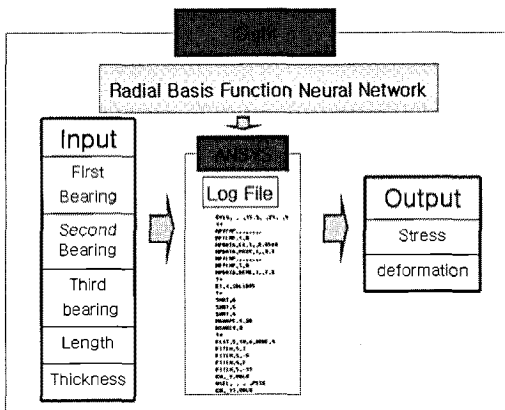


Fig. 6 Procedure of simulation using ANSYS Worckbench®11.0 iSight® FD-3.1

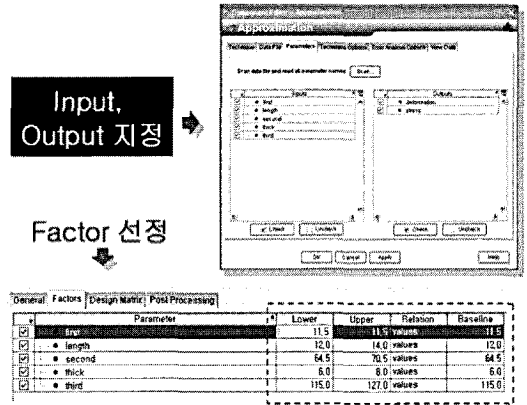


Fig. 7 iSight® FD-3.1 5 design variables simulation

그리고 iSight® FD-3.1 에서 몇 개의 데이터를 산출 할 것인지를 설정한다. 본 연구에서는 100 개의 데이터를 산출하였다. 그리고 프로그램을 실행 시키면 각 인자의 변화에 따른 모델링을 iSight® FD-3.1 에서 자동으로 실행하여 해석을 수행한다. iSight® FD-3.1 을 사용하면서 인자에 따른 모델링과 해석을 여러 번 수행하는 번거로움을 없애고 한번 에 모든 해석을 실행할 수 있다. Table 3 에서의 설계변수 값을 대입하여 iSight® FD-3.1 을 이용하여 Table 4 에서 보는 바와 같은 OLH 데이터를 산출 하여 값을 나타내었다.

Table 4 iSight® FD-3.1 OLH simulation

	first	length	second	thick	third
1	26.18	14.09	68.08	4.404	81.06
2	12.27	8.03	62.92	7.152	73.64
3	35.2	6.71	63.13	9.414	70.45
4	36.48	12.07	66.36	4.727	48.18
5	15.62	10.85	62.82	8.929	111.82
6	27.21	14.69	63.63	5.455	24.85
7	13.82	13.38	69.49	5.778	87.42
8	34.94	7.22	65.35	6.667	109.7
9	11.76	8.33	65.25	7.071	26.97
10	29.02	8.63	61.51	9.576	107.69
11	30.56	8.43	64.34	4.808	12.12
12	30.82	10.65	60.5	9.737	53.48

88	34.42	11.26	67.03	11.434	110.62
89	36.74	13.28	68.18	10.303	91.67
90	13.56	7.82	62.12	10.465	39.7
91	30.3	10.15	68.48	12.0	66.21
92	18.2	10.75	64.64	4.162	22.73
93	26.95	8.73	67.87	4.081	51.36
94	17.94	11.26	70.3	5.535	38.64
95	21.8	7.12	63.83	9.01	11.06
96	26.44	13.18	68.28	4.242	20.61
97	24.12	7.72	69.99	7.96	59.85
98	22.32	11.16	65.65	11.515	106.52
99	14.33	9.54	66.66	10.949	17.42
100	21.03	11.36	70.4	9.657	31.21

### 3.2 최적설계

현재까지 개발되어 온 전체 최적화 알고리즘은 통계적 요소가 포함되어 있는가의 유무에 따라 크게 결정론적 방법과 통계적 방법의 두 가지로 나눌 수 있다.

최근에는 이러한 결정론적인 방법과 통계적인 방법을 모두 적용할 수 있는 최적 설계도구들이 개발되었다. 본 연구에서는 (주)Engineous 사의 iSight® FD-3.1 을 이용하여 최적 설계를 수행하였다. iSight® FD-3.1 은 13 가지의 최적화 알고리즘을 이용하여 최적화를 수행하는데 크게 수리적 기법, 탐색적 기법, 경험적 기법으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 RBF 근사기법을 이용하여 근사모델을 구축하여 베어링 및 톨 홀더 스프링 끝단의 두께와 길이의 최적의 값을 찾아 톨 홀더 스프링 전체의 최소 deformation 과 톨 홀더 스프링 끝단의 최소 stress 를 찾아보았다.

일반적으로 최적 설계를 수행할 때 FEM 으로 모든 경우의 해석 결과를 토대로 나온 값을 직접 이용한다면 정확한 통계치가 나오지만, 비선형 해석 같은 해석 시간이 긴 해석이나 해석의 횟수가 많이 필요로 하는 경우 최적설계에 많은 시간이 걸리는 단점이 있을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 RBF 근사기법을 이용하여 최적 설계의 데이터를 산출하였다.

RBF 신경망은 다차원 공간에서 curve fitting 하는 방법이다. 따라서 학습은 훈련 집합에 가장 잘 일치하는 다차원 공간에서의 하나의 곡면을 찾는 것이다. 교사 있는 학습으로써 미리 구성된 정확한 입, 출력 훈련 쌍을 이용하여 학습하는 방법을 사용한다. RBF 신경망의 구조는 Fig. 8 에 도식화 하였다.

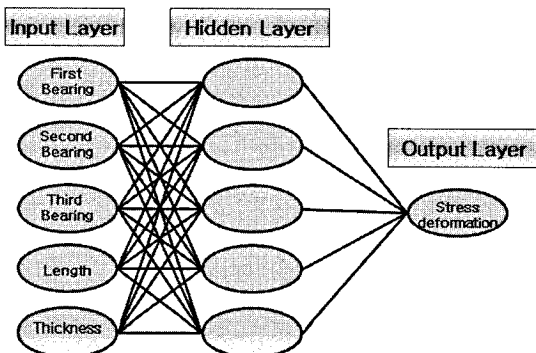


Fig. 8 Radial basis function neural network structure

RBF 방법은 근사식에 의한 오차율이 발생하게 된다. 일반적으로 오차율은 직접 구해야 하지만 iSight® FD-3.1 을 사용하게 되면 Fig. 9 에서와 같이 iSight® FD-3.1 에서 자동적으로 구해주게 된다. 여기서 최대 오차율은 29.8% 팽창회 크게 나왔다. 하지만 1000 개의 해석을 수행하기 때문에 오차율은 줄어 들 것이며 오차율을 알아보기 위해 재현성 해석을 수행하여 오차율을 비교해 보았다.

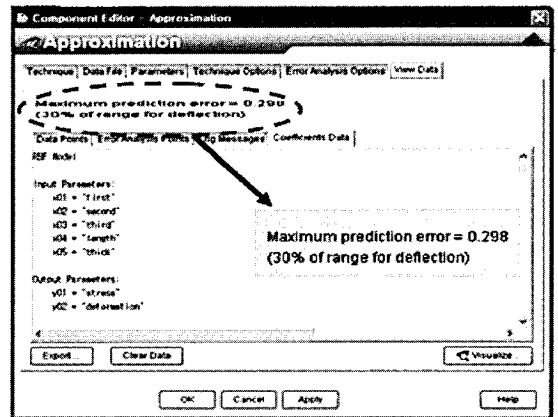


Fig. 9 iSight® FD-3.1 approximate expression interpretation

Table 5 iSight® FD-3.1 RBF simulation

	first	length	second	thick	third
1	13.482	68.2297	116.249	14.039	7.043
2	20.419	69.2508	126.604	9.044	11.1351
3	22.077	68.9444	126.123	15.35	8.028
4	25.644	69.0586	115.973	6.201	10.6386
5	23.392	66.6862	118.099	11.636	9.6777
6	18.455	67.7072	118.303	14.029	8.9009
7	24.077	66.6201	123.769	15.25	9.7738
8	24.203	67.8453	120.91	11.806	8.8448
9	19.356	69.9114	126.712	8.623	5.7618
10	11.68	66.9505	123.553	9.184	9.7097
11	14.617	65.4249	125.847	14.569	11.5195
12	22.33	66.5601	116.229	14.109	7.362
989	21.644	65.995	124.902	9.174	5.5055
990	14.149	67.9514	116.417	14.999	9.4294
991	14.041	65.1967	125.787	13.608	6.4104
992	22.509	67.473	126.568	13.718	7.4034
993	12.591	65.7733	122.804	14.749	10.014
994	22.779	65.5691	117.27	11.506	6.5507
995	21.104	64.0303	120.562	9.424	10.2462
996	13.356	68.2658	123.917	6.611	7.1471
997	16.293	69.7312	121.378	13.218	10.875
998	16.203	69.4489	126.207	10.465	10.991
999	21.69	67.9114	124.55	10.975	4.3684
1000	22.419	66.0786	124.538	5.82	11.6156

RBF 방법을 통한 데이터를 1000 개를 해석하였으며 각각의 인자는 Table 5 에서 알 수 있다. RBF 방법으로 구해진 최적의 값은 Fig. 10 과 같다.

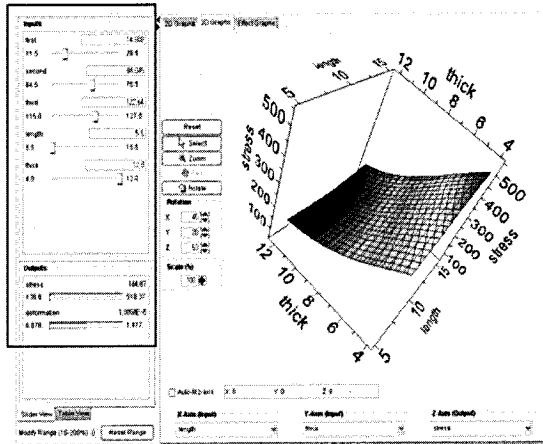


Fig. 10 Optimized approximation model

그리고 iSight® FD-3.1 의 RBF 방법으로 구한 최적의 값은 최초 설계의 값보다 stress 는 213.86MPa deformation 은  $1.0695 \times 10^{-5}$  으로 stress 는 16.3% deformation 11.8%가 줄었다.

Table 6 에서 최초 설계 값과 RBF 를 통한 stress 와 deformation 의 값을 비교하였다.

Table 6 Comparison of initial finite element modeling with optimized approximation model of RBF

	Initial Finite element modeling	Optimized Approximation model	Reduction Rate
Stress (MPa)	267.38	223.86	16.3%
Deformation (mm)	$1.3256 \times 10^{-5}$	$1.1695 \times 10^{-5}$	11.8%

RBF 방법에 의해 구해진 값들은 근사모델을 이용하여 구한 값이므로 타당성을 확보하기 위하여 최적 설계 값을 이용하여 stress 에 대한 재현성 해석을 수행하여 Fig. 11 에 나타내었다. 재현성 해석 결과 table 7 에서 보는 바와 같이 error 는 약 2.6% ~2.8% 나타났다. 오차율은 크지 않지만 조금의 오차가 발생하였다. 이것은 근사모델의 한계 때문에 발생한 것으로 여겨지며 RBF 방식에서 1000 회보다 더 많은 해석을 수행할 때 줄어들 것이라고 생각된다.

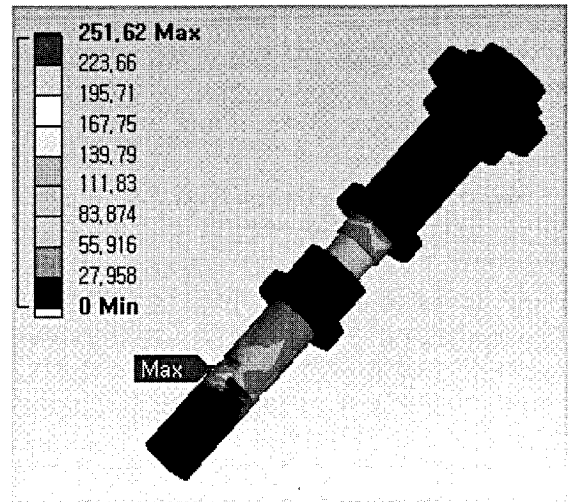


Fig. 11 Stress tool holder spindle interprets

Table 7 Finite element modeling and optimized approximation model of RBF with error

	Finite element modeling	RBF	error
Stress (MPa)	251.62	258.32	2.8%
Deformation (mm)	$1.2575 \times 10^{-5}$	$1.2903 \times 10^{-5}$	2.6%

### 3.3 Tool Holder 시제품 제작

설계된 툴 홀더에 대하여 RBF 근사모델에 의한 각 파라미터의 수준인 first bearing, second bearing, third bearing, tool holder spindle tip length, tool holder spindle thickness 에 맞추어 Fig. 12 과 같이 시제품을 제작하였으며 Fig. 13 에서 보는 바와 같이 tool holder spindle 내경 흔들림을 측정하였다. 내경 흔들림을 측정한 이유는 툴 홀더 스피들에 변형이 발생했을 경우 터렛 공구대와 공구를 연결하는 툴 홀더 내부에서 진동이 미리 발생하여 공구의 회전 시 진동에 영향을 줄 수 있다는 전제에서 실험을 수행하게 되었다.

측정 시에는 50mm test bar 를 사용하였으며 table 8 에서 나타낸 측정결과 내경 흔들림의 값이 기존의 0.02mm 에서 0.008mm 로 현저히 줄어들었다. 몇 번의 실험을 통해 얻은 결과 값에 오차는 존재하지만 실험 결과에서 인자의 변화를 통하여 툴 홀더 스피들의 변형을 조금이나마 줄였다고 판단된다.

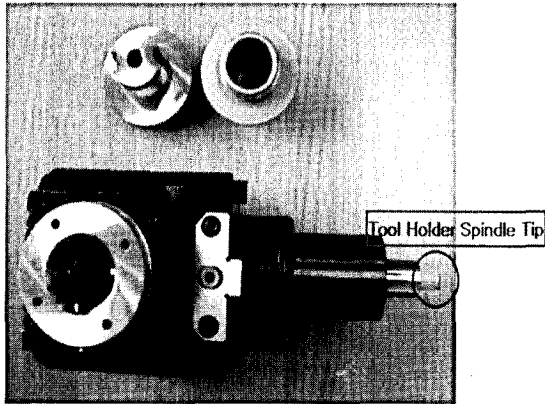


Fig. 12 Prototype of complex tool holder



Fig. 13 Measurement of twisting deformation

그리고 툴 홀더 스피들 끝단의 깨지는 현상은 많은 시간이 소요되었지만 현재 공작기계 사용에 툴 홀더를 직접 적용하여 실험 중에 있으며 기존의 툴 홀더 스피들과 함께 사용하면서 새롭게 제작된 툴 홀더와 기존에 제작된 툴 홀더의 사용수명을 통하여 실험을 수행하고 있다. 그리고 툴 홀더 스피들 끝단에 미치는 stress 가 ANSYS Worckbench@11.0 를 통한 해석으로 줄어들었다는 것은 이미 확인할 수 있었다.

Table 8 Comparison of initial prototype with optimized prototype

	Initial Prototype	Optimized Prototype	Reduction Rate
Twisting Deformation	0.02	0.008	60%

#### 4. 결론

본 연구에서는 툴 홀더 스피들의 변형 툴 홀더 스피들 끝단의 깨지는 현상을 줄이기 위한 설계인자로 first bearing, second bearing, third bearing, tool holder spindle tip length, tool holder spindle thickness 의 베어링 위치 변화와 툴 홀더 스피들 끝단의 길이와 두께의 변화를 통하여 툴 홀더 스피들의 deformation 과 툴 홀더 스피들 끝단의 stress 를 알아보았다. RBF 근사기법에 의하여 구해진 근사모델의 베어링 위치는 first bearing 14.90mm, second bearing 68.04, third bearing 122.64, tool holder spindle tip length 5.5, tool holder spindle tip thickness 12.0 일 때의 output 예상 결과는 stress 258.32 MPa deformation  $1.2903 \times 10^{-5}$ mm 로 초기 데이터인 stress 267.27 MPa 보다 약 3.34% 줄었으며 deformation 은  $1.3109 \times 10^{-5}$ mm 로 약 한 1.57% 줄었다는 것을 알 수 있다. 그러나 이것은 근사모델을 이용하여 구한 값이므로 타당성을 확보하기 위하여 재현성 해석결과 근사모델과는 약 2.6%~2.8%의 오차를 나타내었다. 그리고 시제품 제작하여 툴 홀더 스피들의 변형 측정결과 기존보다 변형 된 값이 0.02mm 에서 0.008mm 로 60%줄었으며 이를 통해 툴 홀더 스피들의 설계가 기존의 설계 값보다 향상되었음을 알 수 있다.

#### 후 기

이 논문은 2009~2010 년도 창원대학교 연구비와 지식경제부 지방기술혁신사업[RTI04-01-03] 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Lim, J. S., Nam, K. Y., Chung, W. J. and Lee, C. M., "Development of 24,000rpm high- speed spindle by statistical Method," Proc. of KSMTE Spring Conference, pp. 285-290, 2006.
2. Park, K. B. Chung, W. J. and Lee, C. M., "Model Updating of High-Speed Spindle," Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 17, No. 2, pp. 7-12, 2008.
3. Kim, W., Lee, C. M. and Hwang, Y. K., "FE-analysis of Shrink Fits and Internal Clearance for Ball Bearing of Machine Tool," Journal of Korean Society for

- Precision Engineering, Vol. 26, No. 5, pp. 135-141, 2009.
4. Park, K. B., Chung, W. J., Lee, C. M., Cho, Y. D. and Kim, J. H., "Finite Element Modeling and Simulation for Shape Design of a Super High-Speed Rotating-Shaft Using Design of Experiment," MSV07(International Conference on Modeling, Simulation & Visualization Methods), pp. 157-163, 2007.
  5. Tae Sung Software & Engineering, Inc., "ANSYS® Classic Training Manual," 2008.
  6. Cho, Y. D., Chung, W. J., Lee, C. M., Hwang, Y. K., Kim, J. H., Park, K. B. and Yoon, S. H., "Simulation Techniques for Visualizing Phenomena in a Body of Rotation," MSV07(International Conference on Modeling, Simulation & Visualization Methods), pp. 67-73, 2007.
  7. Jung, D. W., Chung, W. J., Kim, H. C., Bang, Y. M. and Yoon, Y. M., "Six Sigma Robust Design of Fork Park for LCD Transfer System," WMSCI(World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics), pp. 347-352, 2006.
  8. Engineous Korea, "iSight Training Book," 2006.
  9. LEE, S. B., "Minitab User Handbook," ERETEC Inc., 2002.
  10. Jo, Y. J., Jeon, E. C. and Kang, J. H., "A Study on the Optimum Design of Independent Suspension Final Reduction Gear," Journal of KSMPE, Vol. 7, No. 4, pp. 135-141, 2008.