가속도 최적화 및 형상 최적화를 통한 수직 컬럼 이동형 머시닝 센터의 진동 저감에 대한 연구

조영덕*, 정원지+, 이춘만++, 윤상환+++

(논문접수일 2007. 6. 22, 심사완료일 2007. 9. 13)

Study on decreasing displacement of the MC(machining center) moved column with high-speed for optimization of acceleration and DOE(Design Of Experiment)

Young-Duk Cho*, Won-Jee Chung+, Choon-Man Lee++ and Sang-Hwan Yoon+++

Abstract

By the reason of increased demand of high productivity and quality, the manufacturer have an effort in many directions of a machine tool industries. Among there, we proposed method of decreasing displacement in MC(machining center). In other words, Quality related with vibration of a tool cutting products. For decreasing it, improved by optimizing a shape of the column-part and acceleration curves of motors In this paper we could find design factors has much influence on decreasing the displacement using the DOE(Design of Experiments) and optimized the level of the factors using ADAMS® and MINITAB.® And we suggest optimized a acceleration curve using Matlab®.

Key Words : the MC(machining center), DOE(Design of Experiments), the column-part, displacement, ADAMS®, MINITAB®, Matlab® Acceleration curve

1. 서 론

현재 초고속 공작기술은 고속 기술이 발전함에 따라 시간 단축에 따른 생산성 향상 및 가공 품질 개선을 목적으로 공작기계 부분에서 꾸준한 노력을 하고 있다. 현재 머시닝 센터(MC) 부분에서도 가공시간을 단축에 따른 형상 최적화 작업은 물론 가공 품질을 위해서 가공하는 툴의 끝단부분의 진동을 줄이기 위한 작업에 노력을 하고 있다.

* 국립창원대학교 기계설계공학과
\+ 교신저자, 국립창원대학교 메카트로닉스공학부 (wjchung@changwon.ac.kr)
주소: 641-773 경남 창원시 사림동 9번지
++ 국립창원대학교 메카트로닉스공학부
+++ 국립창원대학교 R&D 클러스터 사업단

이를 위해 본 논문은 급이송식 수직형 머시닝 센터를 해석 대상으로 삼았으며 머시닝 센터의 구조상 가장 큰 영향을 미치는 컬럼 부위의 제어 인자와 가속도 곡선을 변경함으로써 60m/min 의 속도로 급이송할 때 가공하는 헤드 툴 부근의 진동을 줄여 제품의 가공 품질을 향상시키는 방안을 연구하였다.

해석 소프트웨어는 동적 해석이 가능한 ADAMS®를 사용하였으며 통계적 프로그램 미니탭(MINITAB)®을 이용하여 실험계획법[1]을 뒷받침하였다. 또한 형상 최적화후 유한 저크(Finite jerk) 이론을 통하여 최적에 가속도 곡선을 정하였으며 진동 저감의 결과를 가져왔다.

2. 실험계획법

2.1 실험계획법

많은 변수들에 의하여 지배되는 복잡한 현상이 있을 때 각 변수가 전체현상에 미치는 현상을 알아보기 위하여 다양한 변수의 조합에 대하여 실험을 수행하여야한다[2].

실험계획법 (Design of Experiments, DOE)은 통계적 분석 기법으로 통계적 프로그램인 미니탭과 같이 많이 사용되어지고 있다. 이러한 실험계획법은 시간이 많이 소요되는 복잡한 해석을 수행할 때 실험계획법에 따라 해석을 수행하면 최소 횟수의 해석으로 인자의 영향을 파악해 주 인자가 무엇인지 파악 할 수 있다. 특히 이 방법을 이용하면 총 변수조합에 비하여 현저히 감소된 해석 수행만으로 각 변수의 영향을 확인할 수 있게 된다. 또한 현실적으로 제어가 가능한 제어변수(control factor)와 제어가 어려운 잡음 변수(noise factor)로 구분하여 최적 변수의 조합을 찾는 방법이 제안되었고 이는 복잡한 통계이론을 통하여 잡음변수의 영향을 차단코자하는 방안으로 받아들여지고 있다.

따라서 제어할 수 있는 영향력이 큰 인자를 찾아내어 이 인자들의 영향력을 최대로 하여 잡음의 영향력을 최소로 하는 것이다. 잡음인자의 영향으로부터 품질을 강건[3]하게 유지하기 위하여 S/N비(Signal to Noise)를 사용한다. S/N비는 신호 대 잡음의 비율을 뜻하는 것으로서 각각의 조절인자의 S/N비를 크게 만드는 값을 그 인자의 최적인자로 결정하면 된다.

S/N비는 목적함수, 즉 특성치(characteristic value)에 의해 그 정의가 달라지게 되는데 특성치는 망목(normal is best), 망소(lower is better), 망대(higher is better)특성으로 나누어진다. 본 연구에서는 특성치의 대상을 가공부분의 진동현상을 두었으므로 진동이 적으면 적을수록 좋은 망소 특성을 선정 하였다.

3. 컬럼 부위 최적화

3.1 머시닝 센터의 구성

본 연구의 대상은 H사의 급이송식 머시닝 센터를 모델로 하였으며 Fig. 1와 같이 헤드(head), 컬럼(column), 새들(saddle), 베이스(base)로 크게 4부분으로 나누어진다. 각각 볼스크류(Ball screw) 방식으로 모터에 의해 60m/min의 속도로 급이송하며 헤드 끝부분에 가공툴이 부착되어 공작물을 가공한다.

3.2 머시닝 센터의 컬럼 부위

머시닝 센터에서의 어느 부분이 동적 거동시 진동에 가장 영향을 많이 미치는지 알기 위해서 선행적으로 정적해석의 결과가 필요하다. 이를 위해 ANSYS workbench®를 이용하여 Fig. 2와 같이 정적 처짐을 구하였다. 최대 변위는 헤드 부분에서 생기며 베이스나 새들 부위는 변위 발생이 거의

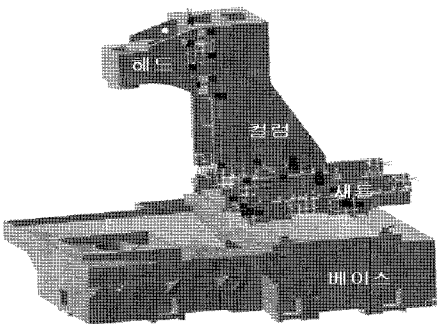

Fig. 1 Composition of the MC(machining center)

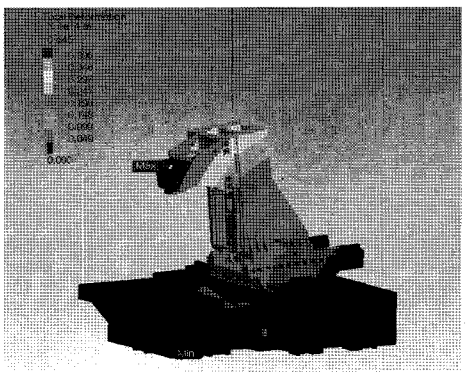

Fig. 2 The static analysis of the vertical MC

생기지 않았다. 특히 컬럼 부분의 휨이 헤드 부분의 변위에 가장 많은 영향을 미치는 것을 확인할 수 있으며 이는 설계 시 가장 고려해야 할 부분이 컬럼 부위임을 증명하여 준다.

컬럼 부위의 형태는 Fig. 3과 같으며 전체적으로 안쪽 부분이 비어 있고 다수의 구멍이 있어 재료적인 측면에서 질량을 상당히 줄였다. 컬럼의 밑면에는 새들 부분이, 옆면에는 헤드 부분이 LM guide(Linear Motion guide)와 Block에 의해서 결합된다. 또한 한 쪽 옆면에 위치한 부분에는 리브(rib)를 경사를 주어 지지하게 되어 있어 컬럼이 이동할 시에 진동현상을 줄여주는 역할을 한다.

3.3 Column 부 주요인자

형상 최적화에 사용되는 변수는 Fig. 3의 1~5번과 같이 x방향 두께, y방향 두께, x방향 컬럼 길이, y방향 컬럼 길이, 리브의 각도로 선정하였으며 이를 토대로 실험계획법을 수행하였다. 제어인자의 선정은 컬럼 부위의 형상들 중 헤드 부분에 영향을 미칠 수 있는 인자로만 구성하였다. 컬럼의 높이는 머시닝 센터의 스트로크(stroke)의 길이가 정해진 관계로 제어인자로 선정하지 않았다.

선정한 제어인자의 수준 수는 3수준 5개이며 실험계획법을 이용하기 위한 수준값은 Table 1로 나타내었다. 주인자를 선정한 기준은 H사의 머시닝 센터 설계 및 담당자의 의견과 정적해석의 응력현상을 참고하여 결정하였다. 색으로 칠해진 부분이 개발하고자 하는 머시닝 센터의 설계값, 즉 초기값(Initial value)을 나타낸다.

3.4 직교배열표

이를 바탕으로 직교배열표(Orthogonal array)[4]를 만들어 보면 Table 2와 같으며 3^5인 총 243번의 실험이 아닌 27회의 동특성 해석으로 대신할 수 있다. ADAMS®로 동적 해석한 결과는 통계프로그램인 미니탭에 이용하여 최적인자를 도출하는데 사용하였다.

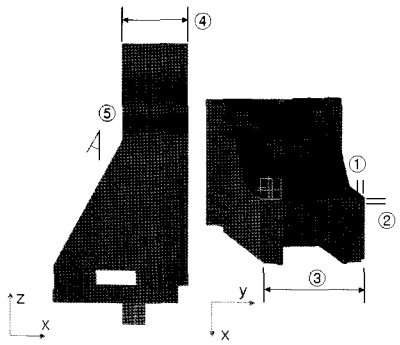

Fig. 3 Condition of considering the column-part for design

3.5 동특성 해석

3D 모델링 프로그램인 CATIA V5®로 각 부분별 모델링이 끝나면 동특성 해석을 수행하기 위해서 전문 정적해석 프로그램인 ANSYS® 를 이용하여 mesh 정보 및 모달정보를 가진 ADAMS 파일(*.mmf)로 변환이 필요하다. Fig. 4

Table 1 Variable range of design parameter for

No.	Factors	Level-1	Level-2	Level-3
1	x-axis thickness (mm)	15	17.5	20
2	y-axis thickness (mm)	15	17.5	20
3	x-axis total length (mm)	500	525	550
4	y-axis total length (mm)	300	325	350
5	Rib angle(°)	20	30	40

Table 2 Orthogonal array table for L27(35)

	X축 두께 (mm)	Y축 두께 (mm)	X축 길이 (mm)	Y축 길이 (mm)	리브 각도 (°)
1	15	15	500	300	20
2	15	15	500	300	30
3	15	15	500	300	40
4	15	17.5	525	325	20
5	15	17.5	525	325	30
6	15	17.5	525	325	40
7	15	20	550	350	20
8	15	20	550	350	30
9	15	20	550	350	40
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
25	20	20	550	300	20
26	20	20	550	300	30
27	20	20	550	300	40

의 모습이 CATIA에서 불러온 컬럼 부분 파일을 ANSYS상에서 나타낸 모습이다.

메쉬를 나눈 후 ADAMS에서 joint 가 되는 부분이나 힘이 걸리는 지점에는 ANSYS 상에서 미리 노드점을 지정하여 주어야 한다. 이는 ADAMS에서 LM guide 부분과 조립(assembly) 할 때, 다른 노드점과 구별되는 특징을 가진다.

각 부분별로 ADAMS의 workspace로 옮겨지면 LM guide 부분과 block 부분을 모델링하여 결합하여 준다. LM guide 및 block 부분은 실제 제작시 강성을 크게 주기 위하여 다이아몬드 처리를 하기 때문에 유연체로 하는 대신 강체로 지정하여 준다. 전 부분을 초기위치상으로 조립한 모습은 Fig. 5와 같다.

각 부분별에 위치한 슬라이드 joint의 속도 그래프 값은 Table 3과 같으며 공작기계 가감속도 5G와 LM guide를 따라 움직이는 전체 스트로크를 고려하여 계산하였다. 일반적으로 볼스크류를 구동하는 모터의 그래프를 사다리꼴 형태로 보고 가속시간, 등속시간, 감속시간을 구하였다.

ADAMS에서 진동을 측정하는 방법은 강체의 해석과 유연체 해석의 차이를 이용하였다. ADAMS에서는 간단하게 각 파트별로 강체와 유연체로 바꾸어 해석을 수행할 수 있다. 즉 강체의 해석 그래프와 유연체의 해석 그래프의 차이가 발생한 진동이라 예측하였다. 각 경우에 수에 해당하는 세 방향 축의 그래프를 통하여 변위를 구하였다.

ADAMS에서 나타나는 그래프는 Fig. 6과 같으며 붉은 선이 강체로 해석한 그래프, 파란선이 유연체로 해석한 모습이며 분홍선이 이 두 그래프의 차이를 나타낸 그래프이다. Fig. 6의 그림을 참고하면 두 그래프의 차이(분홍선)에 measure 기능을 써서 측정한 결과 Min 값은 -0.0063, Max 값은 0.0098로 나타났다. 이는 총 변위가 두 값의 합인 16.1μm 이라는 것을 알 수 있다.

3.6 최적인자 도출과정

각 사양에 따른 동적 해석을 수행하여 나온 변위의 결과값으로부터 통계프로그램인 미니탭®을 이용하여 S/N비와

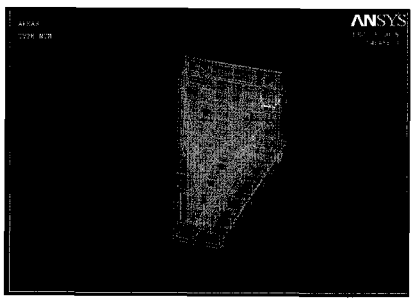

Fig. 4 The modeling of the column-part by ANSYS®

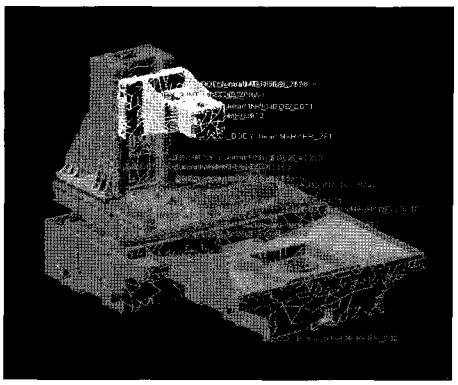

Fig. 5 The simplified machining center by ADAMS

Table 3 The values of the velocity profile

입력할 사항	이송 속도 (m/min)	총 이동거리 (mm)	가속도(G)	가속도 (mm/s^2)	가감속시 이동거리(mm)	등속구간 이동거리(mm)
Saddle 이동	60	1000	0.5	4900	204.08	795.92
Column 이동	60	420	0.5	4900	204.08	215.92
Head 이동	60	520	0.5	4900	204.08	315.92

결과로 알 수 있는 것	가속시간(s)	등속시간(s)	감속시간(s)	가속범위(s)	등속범위(s)	감속범위(s)
Saddle 이동	0.204	0.796	0.204	0~0.204	0.204~1	1~1.204
Column 이동	0.204	0.216	0.204	0~0.204	0.204~0.42	0.42~0.624
Head 이동	0.204	0.316	0.204	0~0.204	0.204~0.52	0.52~0.724

평균값을 도출하고 최적 수준을 결정하였다[5].

Fig. 7~9는 설계변수에 대한 각 세 방향의 발생한 진동 현상을 최소로 하는 S/N 비에 대한 주효과 선도를 나타낸다. S/N 비는 목적함수, 즉 특성치에 의해 정의가 달라지며 특성치는 여기서는 망소특성을 가진다. 주효과 선도는 설계의 방향을 결정하는데 도움을 준다.

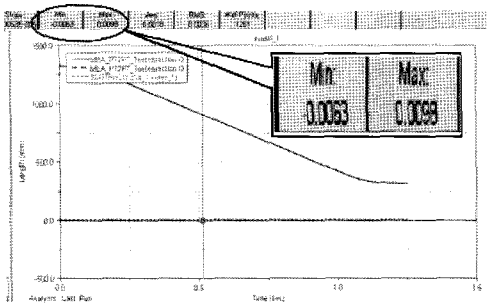

Fig. 6 Flexible and rigid graphs of ADAMS®

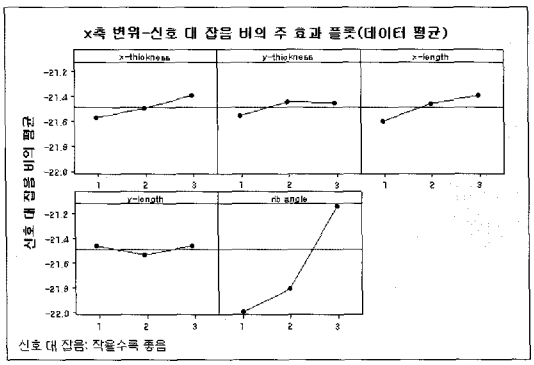

Fig. 7 S/N ratio of displacement about the x-axis for MINITAB®

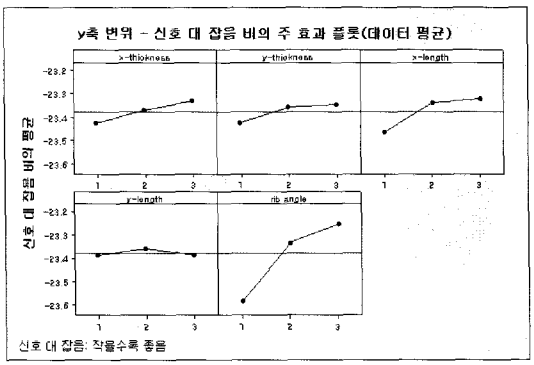

Fig. 8 S/N ratio of displacement about the y-axis

먼저 x축 변위 결과는 Fig. 7과 같으며 x축 방향 변위에 리브의 각도가 가장 큰 영향을 미치는 요인이라 확인 할 수 있다. y축 두께와 y축 길이는 x축 방향 진동에 미치는 영향이 극히 적음을 알 수 있었으며, x축 두께와 길이는 x축 방향의 변위에 조금의 영향을 주는 것으로 나타났다.

Fig. 8과 Fig. 9의 그래프 역시 y축 변위와 z축 변위를 나타내며 x축 변위 결과와 같이 리브의 각도가 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3.7 최적인자 분석

x,y,z 축에서 나온 결과로 세 방향으로부터 벡터의 합성값을 구하는 방법과 일치한 방법으로 ISO 값을 구하였다. 이 ISO 방향의 합성 값을 구함으로써 머시닝 센터에서 발생하는 진동 정보를 알 수 있으며 다른 경우의 수와 비교가 된다. ISO 방향의 27번의 값을 얻은 후 다시 미니탭 상에서 S/N 비를 그래프로 표현하면 Fig. 10과 같다.

그래프 분석 결과 리브의 지지점이 10°가 변함에 따라 가

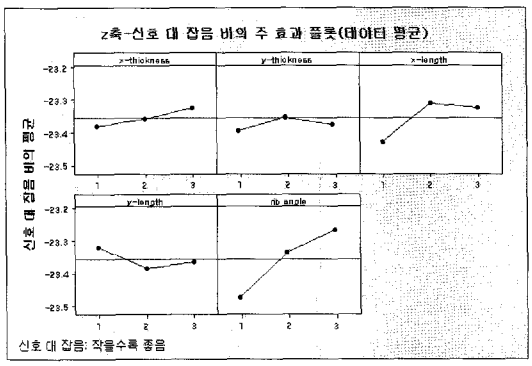

Fig. 9 S/N ratio of displacement about the z-axis

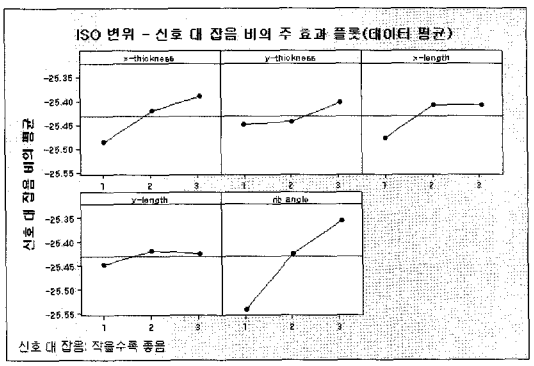

Fig. 10 S/N ratio of displacement about the ISO-axis

장 많은 영향을 미치며 x축 두께와 길이가 그다음으로 y축 두께와 길이는 거의 작은 영향을 미치는 것으로 나타났다.

3.8 최적인자 타당성 분석

우선 각 인자들의 S/N비 값이 가장 좋은 값인 x축 두께의 3수준, y축 두께의 3수준, x축 길이의 3수준, 등의 조건으로 S/N비 값을 구해본 결과 27개의 직교배열표상의 S/N비의 최고값보다 좋은 결과가 나왔다.

앞의 결과에서 도출한 최적인자를 적용하여 최적사양에 대한 동특성 해석을 수행하였다. 최적 설계의 효과를 알아보기 위해 이전과 동일한 조건으로 해석하여 그 결과를 비교하였다.

Table 4는 머시닝 센터를 개발하는 조건과 최적의 조건에서의 해석 수행 결과를 나타낸 표이다. 기존의 사양에서의 머시닝 센터의 값과 실험계획법을 통해 최적 조건에서 해석한 결과를 비교하면 각 축마다 거의 약 7.5%의 개선 효과를 보여주고 있다. 또한 x축 방향으로 가장 많은 감소 현상이 나타났다. 이러한 개선의 결과는 머시닝 센터의 진동을 저감시키는 방향과 일치한다.

4. 유한 저크(Finite jerk)

4.1 유한 저크

형상 최적화가 끝난 후, 가속도 곡선의 변경이 전체 진동 정도에 어떤 영향이 있는지 알아보기 위해 가속도 커브에 유한저크 이론을 이용하여 적용하였다. 즉 각 부분별로 슬라이드 현상이 발생하는 부분에 유한 저크(finite jerk) 개념을 도입하여 진동이 최저가 되는 곡선을 찾는 것이다.

이전의 연구에서 소개된 연속되는 저크(continuous jerk)[7]의 개념을 도입한 가속도 생성은 방대한 연산량에 의해서 실제 적용이 불가능하다. 따라서 유한 저크의 개념은 연속된 저크의 복잡한 계산을 대처할 수 있도록 제안되었다. 제안된 유한 저크 알고리즘은 서보 모터의 적용 면에서 효과적임을 실험에 의해 검증하였다[8]. 이 연구는 유한 저크 알고리즘이 기존의 사다리꼴 속도 곡선을 이용한 가속 알고리즘에 비해 진동 면에서 좋은 결과를 도출할 수 있음을 실험적으로 보여주고 있다. 따라서 제한된 유한 저크 알고리즘은 기존의 사다리꼴형 속도 생성 알고리즘보다 향상된 알고리즘임과 동시에 연속된 저크 알고리즘의 단순화된 형태라 할 수 있다.

Table 4 The displacement comparison of conditions

	x축	y축	z축
설계 머시닝 센터	18μm	12.1μm	10.9μm
27개중 S/N비가 제일 좋은 값	16.9μm	11.4μm	10.3μm
최적 조건 수행 값	16.1μm	11.3μm	10.1μm

Fig. 11은 시간 t에 따른 유한 저크 알고리즘의 속도, 가속도, 저크 선도를 나타내고 있다. 그리고 가속구간인 ($\triangle t \le t \le T_{rf}$) 에서의 속도와 가속도식은 (1) 과 (2)에 각각 나타내었으며 속도식을 미분하면 가속도식을 유추할 수 있다.

$$\dot{q}(t)=\begin{cases}\dfrac{A}{2\Delta t}t^2 & (0 \le t \le \triangle t)\\ At-\dfrac{A}{2}\Delta t & (\triangle t \le t \le T_{rf}-\triangle t)\\ -\dfrac{A}{2\Delta t}(t-T_{rf})^2+AT_{rf}-A\Delta t & (T_{rf}-\triangle t \le t \le T_{rf})\end{cases} \quad (1)$$

$$\ddot{q}(t)=\begin{cases}Jt & (0 \le t \le \Delta t)\\ A & (\Delta t \le t \le T_{rf}-\Delta t)\\ -\dfrac{A}{\Delta t}t+\dfrac{A}{\Delta t}T_{rf} & (T_{rf}-\Delta t \le t \le T_{rf})\end{cases} \quad (2)$$

등속구간에서의 속도 크기가 주어져있다고 하면 가속구간에서의 최대 가속도 크기 A는 (3)에서와 같이 정해진다.

$$A=\frac{V}{T_{rf}-\Delta t} \quad (3)$$

따라서 유한 저크의 크기 J또한 (4)에서 얻을 수 있다.

$$J=\frac{A}{\Delta t} \quad (4)$$

이것은 유한 저크를 이용한 가속도 곡선은 유한 저크의 시간 Δt에 의존한다는 것을 나타내고 이 크기를 달리 함에

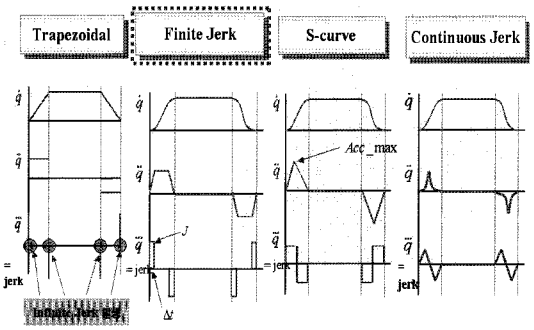

Fig. 11 Acceleration and Jerk Profiles for Finite Jerks

따라 다양한 유한 저크 가속곡선을 얻을 수 있다. 그러므로 수직 컬럼 이동형 MC의 가속도 곡선의 Δt를 찾아내어 어느 정도의 진동이 감소하는지에 초점을 맞추었다.

4.2 Matlab과 ADAMS의 연동으로 최적화 수행

Δt를 찾아 진동 정도를 파악하기 위해서 ADAMS와 Matlab을 연동시켰다. 다음 Fig. 12가 Matlab 상에서 플랜트(Plant)를 짠 모습이다. 즉 x,y,z축 방향의 이동정도가 Input으로 들어가 Matlab 상에서 그래프로 표시된다.

이를 바탕으로 Matlab에서의 샘플링(sampling) 시간을 0.001초로 두어 유한 저크 계산을 하였다. 우선 유연체로 x축, y축, z축 순서로 0.001초 시간 간격의 이동 값들을 ADAMS와 연동하여 구한 후, MC가 강체일 경우도 동일한 방법으로 값을 구한다. 이 두 개의 값들의 편차를 비교하여 나온 결과를 이동시 발생하는 진동이라 추정하였다. Matlab에서 작성한 프로그램 및 그래프는 Fig. 13과 같다.

편차들의 값들을 분석한 결과 유한 저크 곡선중 Δt 부분이 31% 정도에서 두 값들이 가장 적은 편차를 보였다. 이는

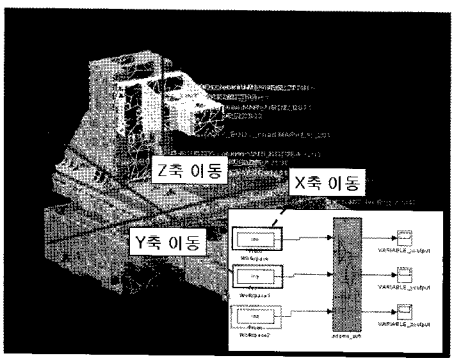

Fig. 12 Plant using Matlab

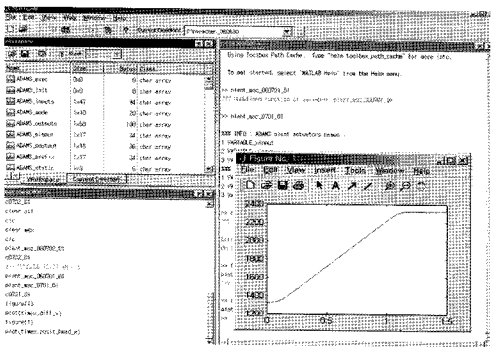

Fig. 13 Program and graph using Matlab

사다리꼴 가속도 곡선 중 31% 되는 점이 꼭지점이 될 때 진동이 가장 최소로 발생한다는 것을 증명한다.

Matlab에서 편차로 구한 계산결과는 x축 : 15.6μm, y축 : 11.1μm, z축 : 9.8μm 결과가 나왔다. 이에 해당하는 값과 ADAMS 상의 실험값과 같음을 증명하기 위하여 Fig. 14와 같이 가속도 함수로 유한 저크의 곡선을 표현하였다. 그림은 선정한 Δt값을 참고하여 가속도 함수 값으로 변경하여 대입한 모습이다. 대입한 결과 Matlab에서 구한 결과와 ADAMS 상에서 시뮬레이션 한 결과가 일치하였으며 이를 통해 두 프로그램 사이의 연동성과 정확성을 검증하였다.

Matlab에서 나온 값은 실험계획법을 이용하여 형상을 최적화한 결과와 비교하면 Table 5와 같으며 약 2%의 개선효과를 나타냈다.

5. 결 론

본 논문에서는 컬럼 이동형 급이송 머시닝 센터를 대상으로 ADAMS란 동적 시뮬레이션 프로그램과 실험계획법 이용하여 제어인자들을 정하여 최적 설계를 도출해 냈다. 또한 유한 저크 이론을 도입하여 Matlab과 ADAMS를 연동하여 최적의 가속도 곡선도 구하였다. 그로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

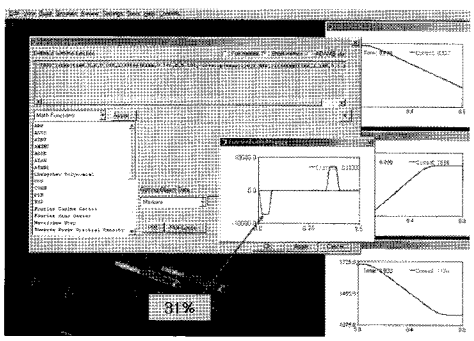

Fig. 14 Program and graph for ADAMS

Table 5 The displacement comparison of ADAMS & Matlab

	x축	y축	z축
컬럼 부위 최적 조건 수행 값	16.1μm	11.3μm	10.1μm
유한 저크 이론을 이용한 값	15.6μm	11.1μm	9.8μm

1) 머시닝 센터의 컬럼 부위 설계시 발생하는 진동 현상에 고려해야 할 제어인자 5가지를 실험계획법과 모의실험을 통해 검증하였다. 가장 큰 영향을 미치는 요인은 지지대의 각도로 나타났으며 x축의 두께 및 길이 역시 영향을 미치고 있으며 y축의 두께 및 길이는 적은 영향을 미치는 것으로 나타났다.
2) 실험계획법에 따른 조건에 의해 ADAMS를 사용하여 모의실험을 하였고 통계 프로그램 미니탭에서 통계처리를 하여 S/N 비구하였다. 또한 최적의 조건으로 모의 실험한 결과 기존보다 평균적으로 약 7.5%의 개선효과를 낼 수 있었다.
3) 유한 저크 이론을 통하여 Matlab과 ADAMS를 연동하여 실험한 결과 최적 조건의 시간은 가속도 사다리꼴 곡선에서 31%정도에 꼭지점을 형성할 때라고 도출하였다. 이 때 실험해 본 결과 컬럼 부위가 최적일 때보다 전체적으로 약 2%의 개선효과를 나타냈다.
4) 가속도 곡선 최적화 및 형상부위 최적화를 통하여 구한 값은 실제 설계값보다 약 9%의 개선되었다.

본 논문에서의 최적 조건의 설계는 컬럼 부위의 형상 최적화 및 가속도 최적화를 통하여 가공 부분의 진동 현상을 줄일 수 있었다. 앞으로의 연구 방향은 재료적인 비용을 고려한 실험수행과 연속저크에 해당하는 연산이 가능하다면 더 타당한 최적조건이 나올 수 있으리라 여겨진다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Park, S. H, 2001, *Modern Design of Experiments*, Miyongsa, PP. 16~18.
(2) Chung, W. J., Cho, Y. D, Lee, C. M., Jung, D. W., and Song, T. J., 2006, "A Study on the Reduction of Unclamping Time by Design of Experiments," *Transactions of the KSMTE*, A, Vol. 15, pp. 1~7.
(3) Lawrence P. S., 1998, *Quality Function Deployment*, American Supplier Institute. INC.
(4) Chung, W. J., Jung, D. W., and Song, T. J., 2003, "A Study on Robust Design of Ball-Stop Part for Power Shift of Heavy Vehicle Using DFSS," *Transactions of the KSMTE: A*, Vol. 15, pp. 8~14
(5) Taguchi G., and Wu Y., 2001, *TAGUCHI's Quality Engineering Handbook*, Wiley.
(6) Seomoon technologies, 2004, *ADAMS-Full Simlulation Traning Guide*.
(7) Chung, W. J., Park C. K., Hong, D. S., Kim, D. Y., Kwon J. R., and Park, B. S., 2003, "A New Optimization Technique For Wafer-Transfer Crane Dynamic Control Using A Genetic Algorithm," *Proc. of Int. Conf. on Computer, Communication and Control Technologies (CCCT 2003)*, pp.388~393.
(8) Chung, W. J., Kim, S. H., Jung, D. W., Kim, G. T, Park, M. H., and Shin, K. S., 2005, "Experimental Study on AC Servomotor Acceleration Optimization Using Finite Jerk." *submitted to SCI 2005*.