

실험계획법을 이용한 초고속 스피ndl의 언클램핑 (unclamping) 시간 저감에 대한 최적 조건에 관한 연구

정원지*, 조영덕⁺, 이춘만⁺⁺, 정동원⁺⁺⁺, 송태진⁺⁺⁺⁺

(논문접수일 2005. 7. 8, 심사완료일 2006. 2. 28)

A Study on the Reduction of Unclamping Time by Design of Experiments

Won-Jee Chung*, Young-Duk Cho⁺, Choon-Man Lee⁺⁺, Dong-Won Jung⁺⁺⁺, Tae-Jin Song⁺⁺⁺⁺

Abstract

By the reason of increased demand of high productivity, the researches on manufacturing process and equipments for reducing cycle time have been made in many directions of a machine tool industries. Especially high productivity is very important to machining center with high-speed spindle. This paper proposed method of reducing T-T(tool to tool) time which results in shorter unclamping time. T-T time varies as factors such as a hydraulic system, a drawbar mass, a flow meter, a disc spring, piston and pipe diameters. In this paper We could find design factors has much influence on decreasing the unclamping time using DOE(Design of Experiment) and optimized the level of the factors using AMESim 4.0[®] and visualNastran 4D[®]. Finally, we have verified improved result of the optimized factors with initial design.

Key Words : DOE(Design of Experiments), high speed spindle(초고속 스피ndl), T-T(tool to tool) time, tool clamping(툴 클램핑), unclamping(언클램핑), hydraulic circuit(유압 회로), drawbar(드로우바), visual Nastran 4D[®], AMESIM 4.0[®]

1. 서론

최근 급속히 발전하고 있는 초고속 가공기술을 통한 가

공 시간의 단축으로 생산성 향상과 가공능률의 극대화가 이루어지고 있다. 공작기계의 고성능화와 생산원가 절감은 제조사들에게 있어서는 가장 중요한 목표라 볼 수 있으며

* 국립창원대학교 메카트로닉스공학과 (wjchung@changwon.ac.kr)

주소: 641-773 경남 창원시 사림동9번지

+ 국립창원대학교 기계설계공학과 대학원

++ 국립창원대학교 메카트로닉스공학과

+++ 국립창원대학교 기계설계공학과 대학원

++++ 위아(주)-WIA corporation

고성능화 측면에서 스피들의 고속화와 동시에 가공시간을 단축시키고 가공 표면을 개선시키는 효과가 요구된다. 하지만 가공시간을 단축시키기 위해 스피들의 고속화만을 지향할 수는 없다. 가공품의 완성을 위해서는 하나의 툴만 사용하는 것이 아니라 여러 툴을 사용해야 하기 때문이다. 따라서 가공품 완성의 시간단축은 툴의 교환 시간을 저감하는 것보다 밀접한 관계가 있다. 또한 툴의 교환은 로터리 암(rotary arm)과 툴 클램핑(tool clamping) 시스템으로 작동된다. 이러한 툴 클램핑 시스템은 유압을 이용하여 제어된다. 현재 기술로는 로터리 암이 작동하는 속도는 캠(cam)의 조절로서 짧은 시간까지 단축이 가능한 상태이다. 하지만 언클램핑(unclamping) 시간은 유압 시스템부분과 주축안의 드로우바(drawbar) 부분, 디스크 스프링(disc spring) 부분과 상관관계가 있으며 캠의 속도에 의한 성능이 못 미치는 실정이다.

이에 본 연구에서는 초고속스피들을 대상으로 실험계획법(Design of Experiment, DOE)⁽¹⁾을 적용하여 언클램핑 시 시간저감을 위한 최적조건을 구하는데 목적이 있다. 따라서 언클램핑 시스템에 영향을 미치는 주요 인자를 파악하고 도출된 인자는 직교배열표(orthogonal array)⁽²⁾를 구성하여 각 사양에 대한 유압회로 해석을 수행하였으며, 데이터 형태로 얻어지는 반응치에 대해서 S/N비와 평균분석을 실시하였고 이를 통해 최적 조건을 결정 하였다.

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.⁽³⁾ 또한 변수조합은 실험으로부터 얻어지는 분석결과와 신뢰성을 확보하기 위하여 신중하게 선택되어야 한다. 실험계획법(Design of Experiments, DOE)은 통계적 분석 기법으로 최근의 경영혁신 도구로 사용되는 6 시그마의 측정 단계에 많이 이용되고 있다. 이러한 실험계획법은 실제 실험을 할 때에도 매우 유용하게 사용될 수 있을 뿐만 아니라 CAE(Computer Aided Engineering)에도 적용되면 매우 유용하게 사용되어 질 수 있다. 즉, 시간이 많이 소요되는 복잡한 해석을 수행할 때 실험계획법에 따라 해석을 수행하면 최소 횟수의 해석으로 인자의 영향을 파악해 주 인자가 무엇인지 파악 할 수 있다. 즉 이 방법에 따르면 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 최소화 하는 것이다. 잡음인자의 영향으로부터 품질을 강건⁽⁴⁾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 값으로 결정하면 되는 것이다.

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 특성치를 언클램핑 시의 동작시간으로 선정하여 동작시간이 작을수록 좋은 망소 특성을 선정 하였다. 망소 특성의 S/N비는 다음 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다.

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

위 식에서 n 은 측정값의 수를 나타내고 y_i 는 측정된 특성값을 나타내며 S/N값의 단위는 데시벨[dB]이다⁽⁵⁾.

2.2 언클램핑 시스템

모터의 회전으로 펌프가 작동을 하여 유량을 토출한다. 토출된 유량은 여러가지 관과 이음새 부분 등을 걸쳐 압력이 손실된다. 솔레노이드 방향전환밸브에서 전기적 신호가 오면 유량은 언클램핑 시스템으로 흐르고 밸브를 통과한 유량은 압력손실을 제외한 만큼 피스톤에 작용한다. 작용한 유량

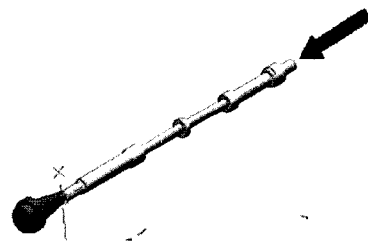


Fig. 1 The simplified model about the clamping system for visual Nastran 4D[®]

은 Fig. 1의 그림과 같이 드로우바를 밀게 되고 드로우바 끝에 연결된 콜릿(collet)이 벌어져 톨생크 부분이 빠지게 되어 언클램핑이 된다.

2.3 유압회로 해석

유압회로의 해석은 Sketch Mode에서 시뮬레이션 모델을 구성하여 빠르고 정확하게 해석할 수 있는 장점을 지닌 IMAGINE사의 AMESim 4.0[®]을 사용하였다. 유압 발생으로부터 언클램핑 되기까지의 회로도로는 Fig. 2와 같다⁽²⁾.

㉠ 부분은 모터와 펌프 부분으로서 초기압력과 총유량은 D 사의 20,000rpm 스피들의 제원에 따라 6.9Mpa, 25 L/min으로 설정하였다. 또한 ㉡ 부분은 밸브와 호스부분으로써 각 호스는 실제 곡관으로 배치되나 실제 압력손실은 미미하다고 가정하여 회로상에서는 일직선관으로 모델링 하였다. 각 호스들은 길이와 직경이 다르며 호스들을 이어주는 이음관(어댑터, 컨넥터, 엘보우 등) 부분은 압력손실을 Weisbach-Darcy식을 이용하여 이론적으로 계산하였고, 이 결과를 회로상의 호스부분에 직접 적용하였다. 전기적 신호에 따라 언클램핑과 클램핑에 필요한 유량의 방향을 조절해 주는 2 port 4-way spring return solenoid 방향전환 밸브를 사용하였으며 오일의 밸브 출입 시 오리피스 효과는 생략하였다.

㉢ 부분은 피스톤과 드로우바 부분이며 M으로 표시된 부분은 피스톤이 밀어주는 질량으로 Fig. 3의 그림처럼 드로우바와 디스크 스프링의 질량을 더한 값으로 정하였다. ㉣ 부분은 클램핑력을 의미하여 일반적으로 10,000~30,000rpm

의 스피들에서는 클램핑력이 12740N으로 작용한다고 알려져 있다. 여기서 언클램핑 동작이라 함은 유압실린더가 작동하여 피스톤 로드와 스피들 내부에 있는 드로우바를 밀어줌으로써 그 거리가 9.5mm에 도달할 때를 말한다.

2.4 제어인자 선정

언클램핑 시스템의 작동에서 펌프의 용량 및 모터회전수의 출력이 중요한 파라미터로 작용하고 있으며 또한 유압관의 길이나 직경 뿐만 아니라 유압실린더의 피스톤 직경과 로드의 직경 또한 중요한 파라미터로 작용한다. 따라서 이를 고려하여 6개의 인자에 대하여 실험계획을 수행함으로써 Table 1과 같은 주인자를 찾아내었다.

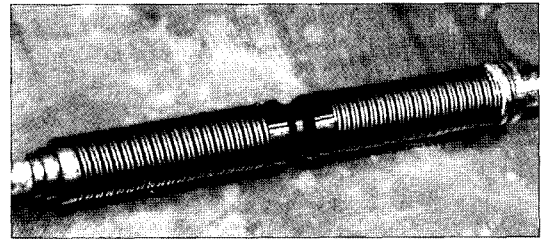


Fig. 3 The unclamping system circuit for AMESim 4.0[®]

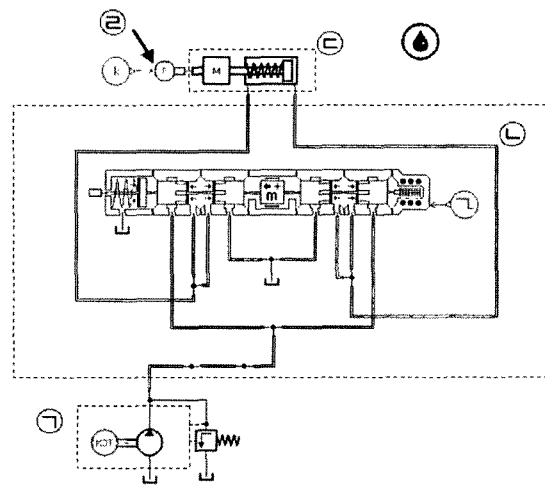


Fig. 2 The unclamping system circuit for AMESim 4.0[®]

Table 1 Initial value of factors

NO	제어인자	Initial value
1	총 파이프 길이(mm)	12
2	파이프 직경(mm)	12
3	드로우바의 질량(kg)	3
4	피스톤 직경(mm)	84
5	유량(L/min)	25
6	디스크 스프링 상수(N/m)	680,000

Table 2 Factors and levels used in experiment

NO	제어인자	수준-1	수준-2	수준-3
1	총 파이프 길이(mm)	10	12	14
2	파이프 직경(mm)	6	12	18
3	드로우바의 질량(kg)	2	3	4
4	피스톤 직경(mm)	64	84	104
5	유량(L/min)	10	25	40
6	디스크 스프링 상수(N/m)	480,000	680,000	680,000

Table 3 Orthogonal array table for $L_{27}(3^6)$

	파이프 길이 (mm)	파이프 직경 (mm)	드로우 바의 질량 (kg)	피스톤 직경 (mm)	유량 (L/min)	디스크 스프링 상수 (N/m)
1	10	6	2	64	2	480,000
2	10	6	2	64	3	680,000
3	10	6	2	64	4	880,000
4	10	12	3	84	2	480,000
5	10	12	3	84	3	680,000
6	10	12	3	84	4	880,000
7	10	18	4	104	2	480,000
8	10	18	4	104	3	680,000
9	10	18	4	104	4	880,000
·	·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·	·
25	14	18	3	64	2	480,000
26	14	18	3	64	3	680,000
27	14	18	3	64	4	880,000

제어인자의 수준 수는 3수준 6개이며 실험계획법을 이용하기 위한 수준값은 Table 2로 나타내었다. 제어인자의 수준-1, 2, 3의 설정은 D사의 20,000rpm 설계 및 담당자와 기술적 교류를 통한 유압 부분의 적용 가능한 범위와 피스톤쪽의 내부구조 등의 기준을 참고하여 선정하였다.

또한 이를 바탕으로 직교배열표(Orthogonal array)를 만들어보면 Table 3과 같으며 3^6 인 729번의 실험이 아닌 총 27회의 유압회로 실험으로 해석을 할 수 있다. AMESim[®]으로 모의실험한 결과는 통계프로그램인 MINITAB[®]에 이용하여 최적인자를 도출하는데 사용하였다.

2.5 최적인자 도출

각 사양에 따른 유압회로를 해석하여 언클램핑 시스템 작동시간의 결과 값으로부터 통계프로그램인 MINITAB[®]을 이용하여 S/N비와 평균값을 도출하고 최적 수준을 결정하였다. A~F에 해당하는 인자는 Table 1과 Table 2에서 선정한 제어인자 1에서 6번까지의 항목과 일치한다. Fig. 4는 인자별 S/N비를 나타내었으며 유압과 파이프 직경, 피스톤 직경이 다른 인자에 비하여 S/N비의 개선효과가 큰 것으로 나

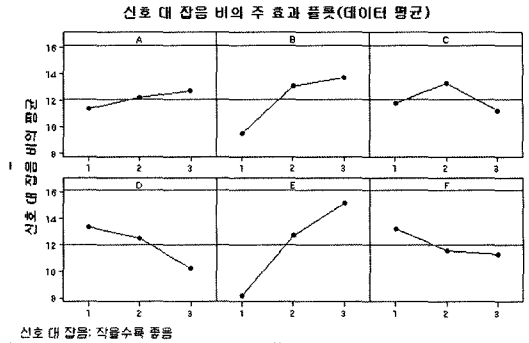


Fig. 4 S/N ratio for design variables using MINITAB[®]

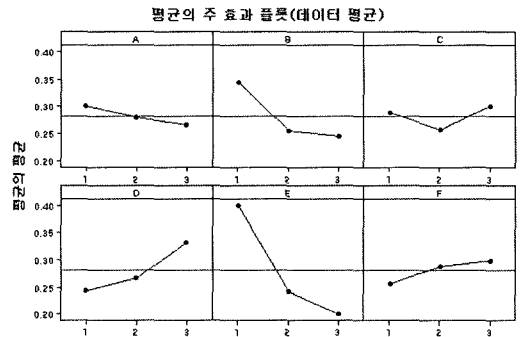


Fig. 5 Mean ratio for design variables using MINITAB[®]

Taguchi 분석: C7 대 A, B, C, D, E, F

신호 대 잡음 비에 대한 반응 표

수준	A	B	C	D	E	F
1	11.284	9.417	11.711	13.365	8.149	13.259
2	12.194	13.035	13.245	12.534	12.765	11.563
3	12.632	13.659	11.155	10.212	15.197	11.290
달린 단위	1.348	4.243	2.090	3.153	7.048	1.969
	6	2	4	3	1	5

평균에 대한 반응 표

수준	A	B	C	D	E	F
1	0.2989	0.3442	0.2871	0.2436	0.4001	0.2553
2	0.2779	0.2540	0.2557	0.2666	0.2424	0.2881
3	0.2653	0.2439	0.2993	0.3320	0.1996	0.2987
달린 단위	0.0336	0.1003	0.0437	0.0884	0.2006	0.0433
	6	2	4	3	1	5

Fig. 6 Session window of S/N ratio

타났다.

Fig. 5는 조합된 인자들에 대한 평균값을 나타낸 것으로 어떤 인자가 다른 인자들에 비해 큰 영향을 미치는지 알 수 있다. 결과로 얻은 S/N비와 평균값을 바탕으로 인자별 기여

도를 고려하여 최적인자를 설정하였다.

Fig. 4와 Fig. 5에서는 특정 인자가 언클램핑 시스템에 영향을 가장 많이 미치는 정도는 정량적으로 알 수가 없다. 따라서 Table 5와 같이 MINITAB®에서 제공하는 세션표를 이용하여 각 인자들이 언클램핑 시간에 영향을 주는 정도를 판단할 수 있었다. 유량의 변동이 가장 큰 영향을 주며 파이프 직경, 피스톤 직경의 순서로 언클램핑 시간에 영향을 주는 것으로 나타났다.

2.6 주요 제어인자 분석

먼저 제일 큰 영향을 미치는 유량의 변화에 대한 시간 그래프는 Fig. 7, 파이프 직경의 변화 Fig. 8, 피스톤 직경의 변화는 Fig. 9의 그래프로 나타났다.

그래프에서 볼 수 있듯이 유량이 점점 많아질수록 언클램핑 시간은 줄어들다. 하지만 계속적으로 큰 유량을 사용하는 것은 좋은 것만이 아니다. 또한 시설 규모가 커지므로 비용적인 문제가 야기된다. 파이프는 지름이 작은 것보다는 각 시스템에 적절한 직경의 파이프가 좋으며 피스톤 직경은 기

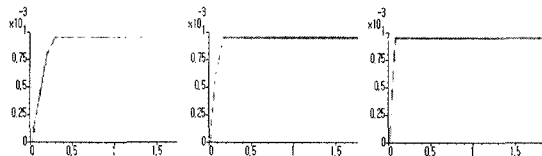


Fig. 7 The displacement of drawbar according to flow levels

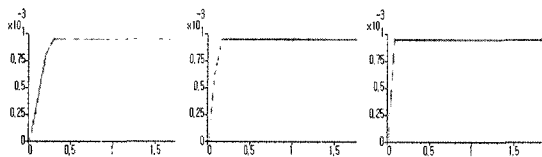


Fig. 8 The displacement of drawbar according to pipe diameter levels

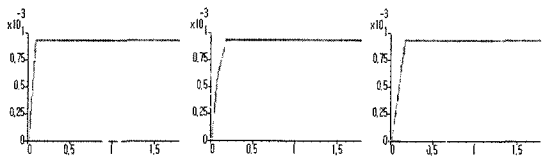


Fig. 9 The displacement of drawbar according to piston diameter levels

존의 사양보다는 작은 것이 좋지만 고속 스피들의 중요한 회전 밸런스를 고려해야 한다.

드로우바 질량이나 스프링 상수 등 언클램핑 시간에 영향을 미치지 않는 인자들의 그래프는 각 수준별 3개의 그래프가 모두 변동없이 유사한 결과를 보여 영향이 적은 인자임을 확인했다.

2.7 최적인자 타당성 분석

Fig. 10과 같이 우선 각 인자들의 S/N비 값이 가장 좋은 값인 A인자의 3수준, B인자의 3수준, C인자의 2수준 등의 조건으로 S/N비 값을 구해본 결과 27개의 직교배열표상의 S/N비의 최고값인 19.9136 값보다 더 좋은 21.1720 값이 나왔다.

앞의 결과에서 도출한 최적인자를 적용하여 최적사양에 대한 언클램핑 시의 작동 시간에 대한 유압회로 해석을 수행하였다. 최적 설계의 효과를 알아보기 위해 이전과 동일한 조건으로 해석하여 그 결과를 비교하였다.

Fig. 11은 언클램핑 시스템의 작동시간에 따른 드로우 바의 이동거리를 기존의 사양과 최적의 사양의 그래프를 나타낸 것이다. 기존의 사양에서의 언클램핑 작동시간은 0.196sec, 최적사양에서의 작동시간은 0.099sec으로 감소하여 약 50%의 개선 효과를 보여 주고 있다. 이러한 개선의 결과는 언클

신호 대 잡음 비의 주 효과 플롯(데이터 평균)

Taguchi 분석: C7 대 A, B, C, D, E, F

예측 값

신호 대
잡음 비 평균
21.1720 0.0598148

예측을 위한 요인 수준

A	B	C	D	E	F
3	3	2	1	3	1

Fig. 10 S/N ratio value of optimized condition

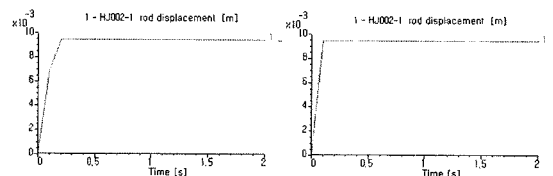


Fig. 11 The displacement of drawbar using optimized condition

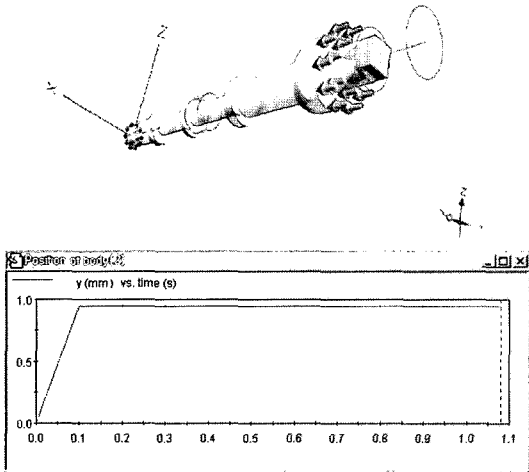


Fig. 12 The model of unclamping system using visual Nastran 4D[®]

램핑 시스템이 가져야하는 방향과 일치한다. 해석 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 각 인자들이 다른 조건이 동일한 상태에서 언클램핑 시간에 어떤 영향을 미치는지 언클램핑 기구부의 모의실험 하였으며, 또 언클램핑 시스템을 실제와 동일하게 visual Nastran4D[®]의 workspace상에서 모델링을 실시하였고 최적사양에 대한 조건을 부여함으로써 그 결과를 도출하였다.

Fig. 12는 visual Nastran4D[®]의 workspace상에서의 최적사양에 대한 모사실험을 나타낸다. 모사실험을 통한 언클램핑 작동에 따른 해석결과와 최적사양일 때의 AMESim 4.0[®]의 그래프와 거의 동일한 결과 값을 보여주어 모의실험 결과의 타당성을 입증한다.

2.8 교호작용

교호작용이란 2인자 이상의 특정한 인자수준의 조합에서 일어나는 효과를 일컫는다. 본 논문에서는 언클램핑 시스템에서 많은 영향을 미치는 제어인자 3가지를 구하였으며 이 인자들 사이의 상호 교호작용을 MINITAB[®]을 이용하여 Fig. 13과 같이 구하였다. 여기서는 언클램핑 시간에 영향을 적게 미치는 인자는 제외하였다.

그래프를 보면 주요 제어인자들의 수준별 값이 거의 평행하게 나타난다. 이를 통해 분산분석을 통한 각 변수 간의 선정한 제어인자들의 수준수 사이에는 교호작용(Interaction)은 없으며 S/N비를 이용하여 최적조건을 찾아내는 것은 수준별 조건 선정이 타당하다고 할 수 있다.

C7에 대한 상호작용 플롯(데이터 평균)

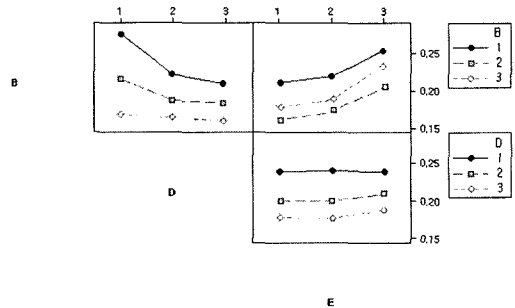


Fig. 13 The interaction graph of main factors

3. 결론

본 논문에서는 실제 시스템을 꾸미지 않고 AMESim 4.0[®]의 유압회로와 실험계획법 이용하여 제어인자들을 정하여 최적 설계를 도출해 냈다. 그로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 언클램핑 시스템에 고려해야 할 6가지 제어인자를 선택하여 영향을 크게 미치는 3가지 제어인자를 실험계획법과 모의실험을 통해 검증하였다. 파이프 직경, 피스톤 직경, 유량이 시스템에 큰 영향을 미치며 디스크스프링 상수나 드로우바의 질량, 파이프 길이는 영향이 적게 나타났다.
- (2) 실험계획법에 따른 조건에 의해 AMESim[®]을 사용하여 모의실험을 하였고 MINITAB[®]에서 통계처리를 하여 S/N비 값과 평균값을 구하였다. 또한 교호작용을 통해 언클램핑 시간을 최저로 줄일 수 있는 조건을 구했다. 이 조건으로 AMESim[®]을 통해 모의 실험한 결과 기존보다 약 50%의 개선효과를 낼 수 있었으며 이 실험을 검증하기 위해 동역학 소프트웨어인 visual Nastran 4D[®]를 이용하여 같은 조건인 상태에서 언클램핑 시간을 확인해본 결과 거의 동일한 시간의 그래프를 확인하였다.

본 논문에서의 최적 조건의 설계는 언클램핑 시간을 저감하게 하며 결과적으로 T-T time을 줄일 수 있다. 앞으로의 연구 방향을 소프트웨어 상에서의 모의실험이 아닌 실제 스펀들을 대상으로 실험을 한다면 최적조건의 타당성을 더 입증될 것이라 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) Yi, J. W., Park, J. S, Lee, K. H. and Park, G. J., 2001, "Development of an Optimization Algorithm Using Orthogonal Arrays in Discrete Design Space,"

Transactions of the KSME, A, Vol. 25, pp. 1615~1626.

- (3) Kim, H. S., Kim, C. B. and Yim, H. J., 2003, "Quality Improvement for Break Judder using design for Six Sigma with Response Surface Method and Sigma Based Robust Design," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 4, No. 4, pp. 193~201.
- (4) Lawrence P. Sullivan, 1998, *Quality Function Deployment*, American Supplier Institute. INC.
- (5) Genichi Taguchi, Yuin Wu, 2001, *TAGUCHI's Quality Engineering Handbook*, Wiley.
- (6) IMAGINE, 2000, *AMESim User's Manual*.