

## DFSS 를 적용한 5 톤 이상 상용차용 변속배력장치의 BALL-STOP 구조부 강건설계

정원지(창원대학교 기계설계공학과), 정동원\*(창원대학교 대학원 기계설계공학과),  
송태진(창원대학교 대학원 기계설계공학과), 조영덕(창원대학교 기계설계공학과),  
윤찬현(㈜ 영동테크)

The robust design of Ball-Stop part for power shift for vehicle with more heavier than 5 ton by using DFSS

W. J. Chung(Mecha. Design. Eng. Dept. CNU), D. W. Jung(Mecha. Design. Eng. Dept. CNU),  
T. J. Song(Mecha. Design. Eng. Dept. CNU), Y. D. Cho(Mecha. Design. Eng. Dept. CNU),  
C. H. Yoon(Young Dong Tech CO., LTD)

### ABSTRACT

The main function of Ball-Stop part is to operate power shift for vehicle with more than 5 ton when a driver changes gear using suitable force. This paper presents the implementation of a DFSS(Design For Six Sigma) for robust design of Ball-Stop part of power shift. The factors influencing Ball-Stop part performance is derived to find control factor. Based on this factor, contact force between head and detent pin analysis is performed to get optimal factor is analyzed and compared with contact force test result to verify reliability of design. This makes clear the reason why the proposed one is necessary and the role of DFSS.

**Key Words** : BALL-STOP part(볼스탑 구조부), DFSS(Design for six sigma), 설계변수(Design variable), ADAMS®, Orthogonal array(직교배열표), QFD(Quality functional deployment), 제어인자, Contact force(접촉 힘) S/N 비(signal to noise ratio)

### 1. 서론

현재 5 톤 이상 상용차용 변속기에 있어 기존 사용되고 있는 저단 변속기에서 벗어나 변속비를 늘려 출력을 증대 시키는 다단 변속기에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 운전자가 느낄 수 있는 최소의 피로도, 최대의 안전성 및 최적의 승차감을 주기 위해 최소한의 조작만으로 기어를 변속을 용이하게 하는 변속배력장치가 필요하다. 이 장치는 여러 부분이 서로 복합적으로 연계되어 있으며 엔지니어는 이러한 복합적인 문제를 해결하기 위해 여러 가지 방법으로 최적화 설계에 대한 연구를 계속 해 왔다. 이를 위해 운전자가 가장 편안한 조작력으로 변속을 할수 있도록 변속배력장치의 BALL-STOP 구조부가 적절한 접촉 힘(60N)을 가지고 있

어야 한다. 일반적으로 BALL-STOP 구조부의 성능을 만족시키기 위해 컨셉 설계 후 해석을 수행하게 된다. 해석 결과에 따라 설계 변수(Design variable)를 변경한 후 재해석이 수행되며 목표치를 만족할 때까지 이 과정이 반복된다. 설계 변수의 변경은 전적으로 엔지니어의 경험과 시행착오에 의존하기 때문에 소요시간의 변동이 크며, 최적의 설계 변수를 찾기가 힘들다는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위해 DFSS(Design for six sigma)를 이용하여 변속배력장치의 BALL-STOP 구조부에 영향을 미치는 설계 변수들로부터 초기 설계 단계에서 고려해야 할 제어인자들을 QFD(Quality functional deployment) 단계를 거쳐 도출하였다. 도출된 인자는 직교배열표(Orthogonal array)를 구성하여 해석을 수행하였으며, 평균분석을 통해

최적 사양을 결정하였다. 결정된 최적 사양은 해석 및 수행을 통해 기존 변속배력장치의 BALL-STOP 구조부와 성능을 비교하여 검증하였다.

## 2. DFSS 에 의한 최적 설계

### 2.1 제어인자 선정 및 직교배열표

DFSS 란 제품의 연구 개발 단계에서부터 공정 능력을 감안하여 식스 시그마 품질 수준을 달성할 수 있도록 하는 최적화 설계를 의미한다. DFSS 는 Fig. 1 에서 보이는 바와 같이 전개 되며, 이에 따라 도출된 BALL-STOP 구조부의 도안은 Fig. 2 와 같이 디텐트 핀 부분과 헤드의 두 부분으로 구성되어 있다. QFD(Quality functional deployment) 1,2 단계를 거쳐 설계 변수들을 선정하였으며, QFD 2 단계에서 8 개의 설계변수를 선정하였다. 최종적으로 운전자가 가장 편안한 조작력으로 변속을 할 수 있는 조건을 고려하여 5 개의 제어인자를 결정하였다. 제어인자의 수준 수는 4 수준이 1 개, 2 수준이 4 개이며, 그에 관한 내용은 Table 1 에 나타나 있다.

운전자 조작력을 고려하여 헤드부에 가해지는 힘은 150N 이며 그에 대한 출력으로는 헤드가 움직이는 방향으로 작용하는 접촉 힘으로 선택하였다. 헤드부의 앞쪽으로 공압이 작용하게 되는데 여기서 생기는 슬롯저항을 노이즈 인자로 선정하였다. 직교 배열표는  $L_8(2^4 \times 4^1)$  을 이용하였다. 각 제어인자 및 노이즈 인자와 대응하는 직교 배열표를 만들어 보면 Table 2 와 같으며 총 24 회의 해석을 필요로 한다.

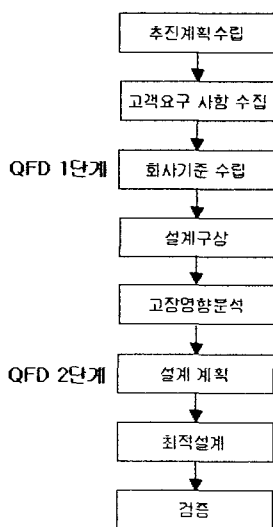


Fig. 1 DFSS process

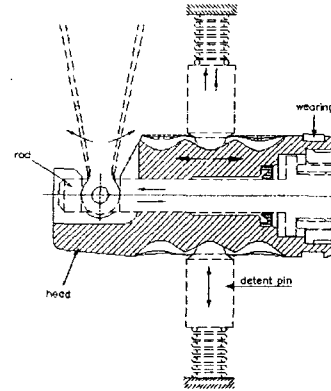


Fig. 2 Ball-Stop part concept view

### 2.2 해석 및 최적 인자 도출

해석을 위해 사용한 툴은 ADAMS<sup>®</sup>이며, 앞서 만들어진 직교 배열표에 따라 총 24 번의 해석을 수행하였다. BALL-STOP 구조부는 크게 디텐트 핀과 헤드의 두 부분으로 나누어지며 각각의 해석 결과에서 시간에 따른 헤드부가 작동하는 방향의 접촉 힘을 측정하였다. Fig. 3 에서 접촉 힘은 헤드부가 운전자 조작력으로 작동 될 때 디텐트 핀이 헤드를 잡아주는 역할을 하는 것을 나타내며 이 힘에 따라 기어변속 시 운전자가 조작력을 크게 주거나 작게 주어야 하는 문제가 발생하게 된다. 따라서 BALL-STOP 구조부의 설계가 아주 중요하다.

설계 변수를 현실적으로 제어 가능한 제어변수 (Control Factor)와 제어가 어려운 잡음변수 (Noise Factor)로 구분하여 최적제어 변수의 조합을 찾는 것을 제안하였는데, 이는 복잡한 통계 이론을 통하여 잡음변수의 영향을 차단하고자 하는 것으로 이해하기 쉽고 현실적인 방안으로 받아들여지고 있으며 강건 설계(Robust Design)의 기본적인 수단을 이루고 있다. 강건 설계는 제어 할 수 있는 영향력이 큰 인자를 찾아내어 이 인자들의 영향력을 최대한으로 하여 잡음의 영향력을 최소화 하는 것이다. 교란인자의 영향으로부터 품질을 강건하게 유지하기 위하여 S/N 비(signal to noise ratio)를 사용한다. S/N 비 신호 대 잡음의 비율을 뜻하는 것으로 신호입력과 잡음의 비율로서 나타낸다. 즉, 각각의 조절인자의 S/N 비를 크게 만드는 값을 그 인자 값으로 결정하면 이렇게 선정된 값은 잡음에 대하여 강건해진다.

S/N 비는 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. 공압의 작동

없이 조작력 150N 이 작용하였을 때, 디텐트 핀과 HEAD 사이에 적절한 접촉 힘(60N) 을 가지고 있어야 하므로 특성치를 디텐트 핀과 헤드사이의 접촉힘으로 선정하여 망목특성을 선정하였다. 망목특성의 S/N 비는 다음과 같다.

$$S/N\beta = \frac{\text{모평균}\mu\text{의 제곱}(\mu^2)\text{의 추정값}}{\text{분산}\sigma^2\text{의 추정값}} \quad (1)$$

만약 n 개의 데이터  $y_1, y_2, \dots, y_n$  이 얻어지면,

$$\sigma^2 \text{의 추정 값은,} \\ \hat{\sigma}^2 = V = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / (n-1) \quad (2)$$

$\mu^2$ 의 추정치는,

$$S_m = (y_1 + y_2 + \dots + y_n)^2 / n \text{ 인 경우,} \\ E(S_m) = \hat{\sigma}^2 + n\hat{\mu}^2 \text{ 이 성립} \\ \hat{\mu}^2 = \frac{1}{n}(S_m - V) \quad (3)$$

따라서 식(2),(3)을 식(1)에 대입하여 정리하면,

$$S/N\beta = \frac{1}{n} \frac{(S_m - V)}{V} \quad (4)$$

실제로 사용되는 S/N 비의 값은 식(4)에 사용대수를 취하고 10을 곱하여 데시벨[dB]단위로 나타낸다. 즉,

$$S/N\beta = 10 \log \left[ \frac{1}{n} \frac{(S_m - V)}{V} \right] \quad (5)$$

이 S/N 비 값을 크게 하는 것이 최적조건이 된다.

접촉힘의 결과값으로부터 통계적 해석 프로그램인 MINITAB®을 이용하여 S/N 비와 평균값을 도출하고 최적 수준을 결정하였다. Fig. 4는 인자별 S/N 비를 나타내었으며 디텐트 핀의 스프링 값 및 볼 베어링의 유,무, 그리고 헤드부분의 홀의 각도가 다른인자 대비 S/N 비의 개선효과가 큰 것으로 나타났다. Fig. 5는 조합된 인자들에 대한 평균값을 나타낸 것이다. 여기서 볼 베어링의 유,무, 디텐트 핀의 스프링 상수값, 헤드부 홀의 각도인자가 다른 인자들에 비해 큰 영향을 미치고 있다. S/N 비와 평균값을 동시에 생각하여 이를 바탕으로 인자별 기여도를 고려하여 최적인자를 설정하였다.

Table 1 Level of design variables

No	제어인자	수준-1	수준-2	수준-3	수준-4
1	스프링 상수(N/m)	7000	7500	8000	8500
2	헤드 홀의 각도(°)	30	40	-	-
3	볼 베어링 구조	유	무	-	-
4	헤드 재질	Aluminum	Steel	-	-
5	볼 재질	Aluminum	Steel	-	-

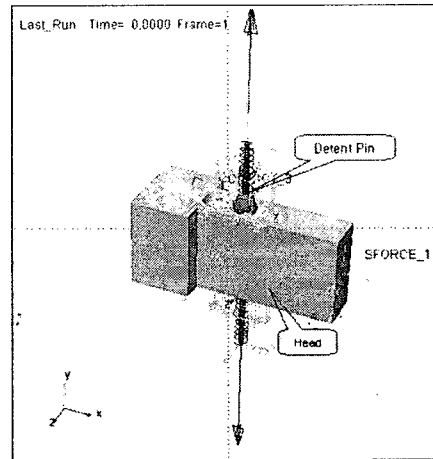
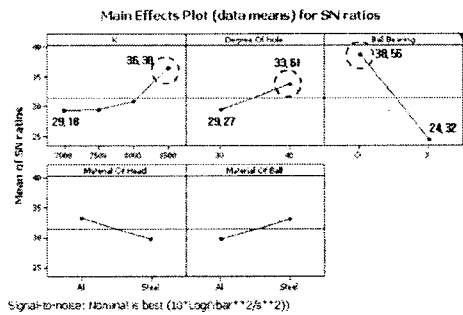


Fig. 3 The simplified Ball-Stop part model



Signal-to-noise: Nominal is best (10\*log10(bar(y)\*\*2/s\*\*2))

Fig. 4 S/N ratio value response for design variables

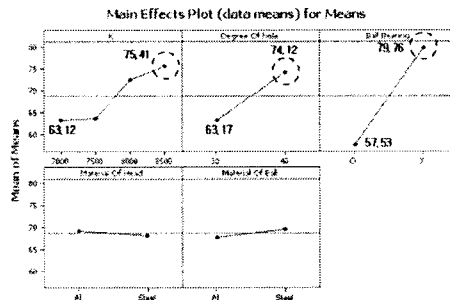


Fig. 5 Mean value response for design variables

Table 2  $L_8$  Orthogonal array

실험 순서	헤드부 높이	헤드부 각도	디텐트 핀 위치	디텐트 핀 직경	디텐트 핀 길이	디텐트 핀 재료	디텐트 핀 표면처리	디텐트 핀 윤활유	디텐트 핀 윤활유 온도	디텐트 핀 윤활유 점도
CA1	1000	90	12	1.0	10	Aluminum	Polishing	None	25	100
CA2	1000	90	12	1.0	10	Steel	None	None	25	100
CA3	1000	90	12	1.0	10	Steel	None	None	25	100
CA4	1000	90	12	1.0	10	Aluminum	Polishing	None	25	100
CA5	1000	90	12	1.0	10	Aluminum	None	None	25	100
CA6	1000	90	12	1.0	10	Steel	None	None	25	100
CA7	1000	90	12	1.0	10	Steel	None	None	25	100
CA8	1000	90	12	1.0	10	Aluminum	None	None	25	100

### 2.3 최적인자 타당성 분석

앞의 결과에서 도출한 최적인자를 적용하여 최적 사양에 대한 접촉힘의 해석을 수행하였다. 최적 설계의 효과를 알아보기 위해 이전에 적용하였던 사양을 동일한 조건으로 해석하여 그 결과를 비교하였다.

Fig. 6은 시간에 따른 헤드부와 디텐트 핀 사이의 접촉힘을 나타내는 것이다. 기존의 사양에서의 접촉힘은 88.9N, 최적사양은 60N으로 감소하여 약 40%의 개선 효과를 보여주고 있으며, 작동 시간 또한 단축된다는 것을 알 수 있다. 이러한 개선의 결과는 BALL-STOP 구조부가 가져야 하는 값에 정확히 일치한다.

해석 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 최적 사양을 샘플로 제작하여 Fig. 7의 접촉 힘에 대한 필요 조작력의 실험을 실시하였다. 실제 실험에서의 조작력에 따르는 접촉 힘은 60N으로 해석결과와 거의 동일한 결과 값을 보여준다는 것을 확인할 수 있었다.

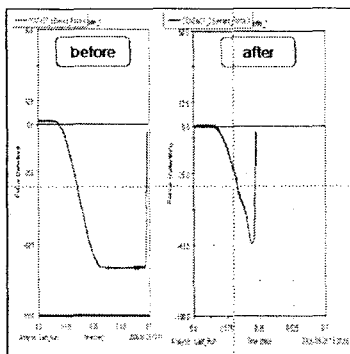


Fig. 6 Contact force between Head and Detent Pin

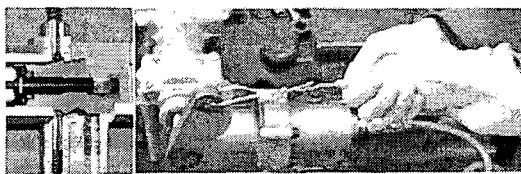


Fig. 7 Ball-Stop part contact force test

### 3. 결론

본 논문에서는 DFSS를 이용하여 BALL-STOP 구조부에 대한 최적 사양을 유도하였고 해석 및 시험을 통해 그 효과를 검증하였다. 그로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) BALL-STOP 구조부 설계 단계에서 고려해야 할 5가지 제어인자를 제시하였다. 가장 중요한 세 가지 제어인자는 볼 베어링의 유무, 디텐트 핀의 스프링 상수 값, 헤드부 홈의 각도이며, 원하는 접촉 힘을 얻기 위해서는 무엇보다도 헤드부 홈의 가공 각도를 달리하며 디텐트 핀의 끝 부분은 베어링 구조를 가져야 한다.

2) 최적사양의 접촉 힘 해석결과, 기존의 사양에 비해 접촉 힘이 약 40%정도 개선되어 목표 값에 도달하였으며, 이는 현사양 대비 최적사양의 S/N 비가 16[db]만큼 개선된 것이다. 또한 시간상의 절감 효과도 있어 DFSS 적용 시 성능개선에 상당한 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

### 후기

본 연구는 창원대학교 공작기계기술연구센터, 산업자원부 지방기술혁신사업(RT104-01-03)지원으로 수행되었습니다. 또한 본 과제는 산업자원부의 출연금등으로 수행한 지역전략산업 석.박사 연구인력 양성사업의 연구결과입니다.

### 참고문헌

1. H.S. KIM, C.B. KIM, "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, 2003.
2. MSC. Working Knowledge, 2000, MSC. ADAMS / Control Tutorial Guide.
3. Lawrence P. Sullivan, "Quality Function Deployment," American Supplier Institute. INC, 1998.
4. Genichi Taguchi, yuin wu, "TAGUCHI's Quality Engineering Handbook," Wiley, 2001.
5. 이상복, 이태테크 미니탭사업팀, "MINITAB 사용자핸드북," 이태테크, pp. 168-192, 2002.
6. 박성현, 이명주, 이강군 "6 시그마 설계를 위한 DFSS," KSA 한국표준협회, pp. 41-99, 2001.
7. 박성현, "현대실험계획법," 민영사, pp. 631-646, 1999.