

# 실험계획법을 활용한 드라이브샤프트의 설계기법 연구

## Design Technique Study on the Drive-shaft using DOE

\*#배원락<sup>1</sup>, 정창현<sup>2</sup>

\*#W. R. Bae(wrbae@ghi.re.kr)<sup>1</sup>, C. H. Jeong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>경북하이브리드부품연구원 산업화지원부, <sup>2</sup>자동차부품연구원 차체사시연구센터

Key words : Drive-shaft, Birfield joint, Contact normal stress, DOE, Response Surface Method(RSM)

### 1. 서론

자동차의 드라이브샤프트는 엔진의 고출력 동력을 바퀴에 전달하기 위한 부품으로서 조향과 구동의 양 기능을 수행하는 등속조인트, 그리고 양 등속조인트를 연결해주는 샤프트의 조합으로 구성되어 있다(Fig.1). 등속조인트는 차량의 장착 위치에 따라 변속기 쪽(Inboard)에 장착되어 동력전달 기능과 축 방향 운동이 가능한 슬라이드형 조인트와 차륜 쪽(Outboard)에 장착되며 상대적으로 높은 작동각이 요구되는 고정형 조인트로 나뉜다.



Fig. 1 Drive-shaft

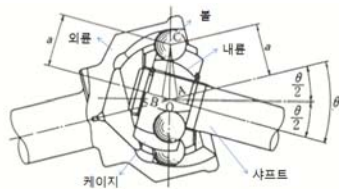


Fig. 2 Birfield joint components

본 논문에서는 전륜구동 차량의 고정형 조인트로 가장 널리 사용되는 버필드 조인트의 설계기법 연구를 위해 실험계획법적 접근방법을 사용하였다. 먼저 등속조인트의 주 관심 성능인자를 접촉응력으로 결정하고 이에 대한 설계인자들을 선정한 후 각 설계인자들에 대한 민감도 분석, 강건설계, 최적설계의 순서로 진행하였다.

### 2. 등속조인트의 구조와 접촉응력

고정형 조인트의 대표적인 모델인 버필드 조인트는 Fig. 2와 같이 외륜, 내륜 및 6개의 볼과 케이지, 샤프트, 부트에 의해 구성된다. 외륜과 내륜의 홈 중심 A, B는 조인트 중심 O에 대해 축 방향 좌우로 등거리만큼 오프셋(Offset) 되어있어서 작동각이 주어진 상태에서 회전할 때라도 볼은 입력 축과 출력축이 이루는 각의 2 등분 면에 위치하게 되고 따라서 입력 축과 출력축의 속도가 항상 같게 된다. 이때 토크는 볼을 통하여 내륜 및 외륜 간에 전달하게 되며 볼과의 접촉면에는 상대적으로 높은 접촉응력이 발생한다.

이렇듯 등속조인트는 그 내부 부품들의 접촉에 의하여 동력전달이 이루어지며, 이때의 접촉응력은 등속조인트의 용량(정정격 토크, 동정격 토크) 및 내구수명 결정에 매우 중요한 인자로서 [1] Hertz 접촉응력 [2]를 계산하여 구한다.

저자는 앞선 연구 [3]에서 버필드 조인트의 Hertz 접촉응력 계산식을 유도해 보였으며 그 결과는 다음과 같다

샤프트를 통해 전달받은 전달토크( $M_x$ )와 버필드 조인트 내부의 각각의 볼이 받는 하중( $p$ )의 관계식 (1)을 유도하고, 볼과 트랙사이의 접촉은 점접촉을 가정하여 최종적으로 Hertz 접촉응력 계산식 (2)을 얻었다.

$$M_x = m(P \sin \alpha \cos \gamma)R \quad (1)$$

$$p_0 = C_p \sqrt[3]{k} \quad (2)$$

여기서  $m$ 은 볼 개수,  $R$ 은 조인트 반지름, 각도  $\alpha$ ,  $\gamma$ 는 접촉각(contact angle)과 경사각(skew angle),  $k$ 는  $P/d^2$ ,  $C_p$ 는 적합도 상수,  $p_0$ 는 외륜 트랙과 내륜 트랙에서 Hertz 접촉응력 최대값을 나타낸다.

이상과 같이 구한 접촉응력은 조인트가 수용할 수 있는 최대 정적토크 용량을 결정하면서 또한 등속조인트 내구수명 계산의 기본이 된다. 최대 정정격토크는 베어링의 정정격 하중(static load rating)과 유사한 개념으로 내부 전동체의 영구 변형률이  $1/10^4$ 에 이를 때의 토크 값으로 정의하며, 내부 최대 접촉응력이 대략 4100MPa에 도달할 때의 조인트 입력토크로 계산한다.

본 연구에서는 등속조인트의 설계기법 검토에 앞서서 구한 설계식을 이용하였으며, 설계식의 적용을 위하여 전용 설계프로그램을 개발하고, 또한 비선형 접촉해석을 수행하여 설계식의 신뢰성을 검증하였다 (Fig. 3과 Table 1 참조). 중대형 승용차용 등속조인트를 대상으로 작용 토크 3300Nm가 작용할 때 조인트 내부 부품들의 접촉부 응력을 구하였으며 설계식 결과(설계프로그램 계산결과)와 상당히 유사함을 확인할 수 있었다.

Table 1 Contact Normal Stress Comparison between Equation Solving and FEM Analysis Results

| Contact Normal Stress [MPa] | Equation | FEM   | Diff.[%] |
|-----------------------------|----------|-------|----------|
| Birfield Joint Outer Race   | 4,034    | 3,978 | -1.4     |
| Birfield Joint Inner Race   | 4,383    | 4,091 | -6.7     |

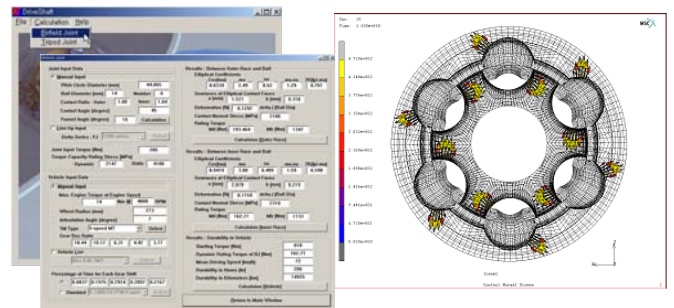


Fig. 3 Design Program & Nonlinear Contact Normal Stress Analysis

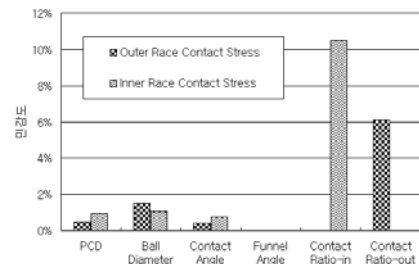


Fig. 4 Design Sensitivity Analysis Results

### 3. 등속조인트 설계기법 연구

#### 3.1 주요 설계변수 민감도 분석

먼저 주요 설계변수를 선정하여 등속조인트의 접촉응력에 대한 민감도 분석을 수행하였다(Fig. 4). 버필드 조인트의 외륜에서는 접촉률에 대한 민감도가 볼 지름, PCD(Pitch Circle Diameter), 접촉각, 입구각의 민감도보다 높게 나타났다. 따라서 접촉응력을 성능지표로 삼아 설계를 할 때 접촉률을 신중히 고려해서 변경해야 함을 알 수 있다. 내륜에서도 접촉률의 민감도가 볼 지름, PCD, 접촉각, 입구각의 민감도보다 큰 값을 보였다. 의외로 입구

각의 민감도가 상대적으로 매우 낮은 값을 나타냈다. 따라서 접촉응력을 성능지표로 삼을 때 외륜과 내륜 공히 접촉률의 선정이 매우 중요하다.

**3.2 등속조인트의 강건설계 검토**

이 절에서는 강건설계(Robust Design) 기법을 적용하여 목적하는 최적의 등속조인트 설계에 도움을 주고, 설계자에게 유용한 설계 데이터베이스를 축적하는 일련의 과정을 보여준다.

등속조인트의 접촉응력을 반응인자로 취하고, 이에 따라 제어인자와 잡음인자를 선정하여 각각의 조인트에 대하여 강건설계 검토를 수행하였다.

민감도 분석의 결과에서 유출할 수 있듯이 접촉률이 버펄드 조인트의 접촉응력에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단되지만 실제 제품에서 그 값은 단조공정 설계의 정확성, 펀치의 마모, 맨드릴의 마모, 작업 환경 변화, 소재 및 열처리 등에 영향을 받으며 민감하게 변화하기 때문에 정확히 제어하기란 매우 어려우며 설계도면 상에서 그 상한과 하한 값을 제한하는 실정이다. 따라서 접촉률의 변화를 2 수준의 잡음인자(Noise Factor)로 선정하고 그 밖의 인자들을 3 수준의 제어인자(Control Factor)로 선정하여 잡음에 강건한 설계 방안을 모색해보고자 한다.

강건설계를 위한 실험배치로 직교배열표  $L_9(3^4)$  을 이용하였다. 여기서 유의할 점은 잡음인자인 외륜의 접촉률은 내륜의 접촉응력에 영향을 주지 않으며, 내륜의 접촉률은 외륜의 접촉응력에 영향을 주지 않을 것은 자명하므로, 이들 각각에 대해서 직교배열표에 의한 검토를 수행한 점이다.

Fig. 5는 위에서 구한 직교배열표의 결과로부터 S/N비의 주 효과도와 반응인자 평균의 주 효과도를 보여주고 있다. 잡음(접촉률의 변동)에 대하여 보다 강건한, 즉 그래프에서 신호 대 잡음 비의 평균이 큰 경우는 모든 제어인자가 수준 3일 때임을 알 수 있으며 반응인자인 평균 역시 망소특성을 고려할 때 모든 제어인자가 수준 3에서 최상의 성능을 기대할 수 있다.33 DOE를 이용한 최적설계 검토

민감도 분석과 강건설계 기법을 통하여 구동축의 주요 설계인자에 대한 분석을 수행하였으며 설계인자와 성능인자의 수학적 모형을 수립하여 최적조건을 도출하는 과정이 남았다.

최적화 방법으로는 반응표면법(Response Surface Method, RSM)을 사용하였다.

버펄드 조인트는 외륜과 내륜의 접촉응력을 고려해야 하지만, 접촉면의 기하학적 형상 조건에 의해 통상적으로 내륜의 접촉응력이 높게 나온다. 이는 동일한 설계인자 조건에서 값이 높게 나오는 내측 접촉응력만을 접촉응력 제한 값과 비교 검토하는 것으로 충분하다.

반응표면법을 이용하여 목표하는 버펄드조인트에 요구되는 성능을 만족하면서(내륜 접촉응력이 접촉응력 제한 값과 일치하는 조건, 망목특성) 최적화된 설계인자들을 구하기 위해 설계인자와 수준을 선택하였으며, 요인의 수는 4개로 중심합성계획법(Central Composite Design)을 적용하여 총 31회의 시험횟수가 정해졌다. 이를 바탕으로 내륜 접촉응력과 설계인자들의 상관관계 모형을 근사하기 위하여 MINITAB를 이용하여 반응표면법을 수행하였다. 처음에는 모든 인자들의 효과를 검토하였으며, 풀링(Pooling) 과정을 통해 유의한 인자들을 선별함으로써 아래와 같은 반응인자(Y)와 설계인자의 상관 모형을 찾았다.

Fig. 6은 상관 모형으로부터 최적의 설계인자를 찾아낸 결과를 나타내며, Table 3은 최적조건의 설계인자들을 사용하여 실제 반응인자를 해석한 값을 보여주고 초기값을 지정하지 않은 경우 최적조건은 실제 해석에서도 목적값(4100MPa)에 거의 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 따라서 앞에서 세운 반응인자와 설계인자의 상관 모형식(3)이 매우 정확함을 알 수 있다.

$$Y = -65.64A - 110.08B - 71.17C + 2.14A^2 + 5.27B^2 + 2.14C^2 + 0.37A*B + 2.13A*C + 0.38B*C \quad (3)$$

Table 2 Factor Definition for the Robust Design

| Factor         | Description                  |
|----------------|------------------------------|
| Control Factor | A PCD                        |
|                | B Ball Diameter              |
|                | C Contact Angle              |
|                | D Funnel Angle               |
| Noise Factor   | E Contact Ratio - Outer Race |
|                | F Contact Ratio - Inner Race |

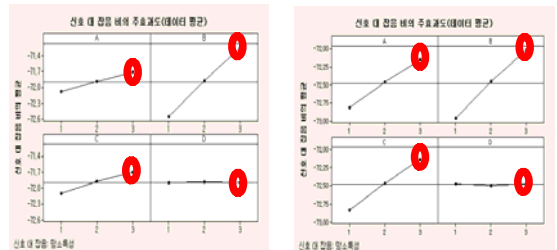


Fig. 5 Main Effect Plot of S/N Ratio(Left : Outer Race, Right : Inner Race)

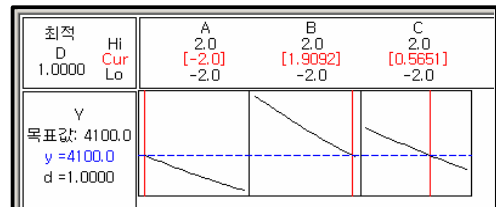


Fig. 9 Optimal Results of RSM for assigned no initial condition

Table 3 Analysis Results on Optimal Response Condition

| Factor    | 설계인자    |           |          | 반응인자 Y   |
|-----------|---------|-----------|----------|----------|
|           | A       | B         | C        |          |
| 초기 값 지정 無 | Code -2 | 1.9092    | 0.5651   | 4101 MPa |
| Real      | 57mm    | 21.9092mm | 45.1302° |          |
| 특성        | 최소값     | 중간값       | 중간값      |          |

**4. 결론**

본 연구에서는 등속조인트 설계기법 기술개발 결과를 보여주었다. 등속조인트의 주요 성능 지표인 접촉응력 설계식을 이용하여 여러 설계인자에 대해 민감도 분석을 수행함으로써 주요 설계인자의 유의성을 검토하고, 강건설계 기법과 최적설계 기법을 적용하여 목적하는 최적의 구동축을 설계하는데 바탕이 될 설계 데이터베이스를 구축하였다.

- 1) 등속조인트의 주요 성능 지표인 접촉응력에 기반을 둔 설계방법을 제시하였다.
- 2) 시험계획법에 기반을 두어 등속조인트에 대한 강건설계 기법과 최적설계 기법을 적용하고 최적의 설계안을 제시하였다.

**참고문헌**

1. F. Schmelz, Count H. C. Seherr-Thoss, E. Aucktor, "Universal Joints and Driveshafts- Analysis, Design, Applications" Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1992
2. J. Brandlein, P. Eschmann, L. Hasbargen, K. Weigand, "Ball and Roller Bearings", John Wiley & Sons, Chichester, 1999
3. C. H. Jeong, D. H. Jung, W. R. Bae, J. Y. Kim, J. S. Im, "Strength Design of Driveshafts for Passenger Cars", Transactions of KSAE, Vol. 15, No. 3, pp.114-123, 2007
4. "Universal Joint and Driveshaft Design Manual", Advances in Eng. Series, No.7, SAE, 1979