

자동차용 엔진 풀리 설계 변수의 상관관계 분석

김형중*(서울대학교 기계항공공학부 대학원), 천두만(서울대학교 기계항공공학부 대학원),
안성훈(서울대학교 기계항공공학부), 장재덕(㈜한국파워트레인), 홍순석(㈜한국파워트레인),
황범철(㈜한국파워트레인)

Correlation Analysis of Design Parameters for Automotive Engine Pulley

H. J. Kim(School of Mechanical and Aerospace Engineering, SNU), D. M. Chun(School of Mechanical and Aerospace Engineering, SNU), S. H. Ahn(School of Mechanical and Aerospace Engineering, SNU),
J. D. Jang(KAPEC), S. S. Hong(KAPEC), and B. C. Hwang(KAPEC)

ABSTRACT

The Digital Meister is an advisory system to help the designer using the knowledge obtained from design and analysis data. In this paper, Taguchi method was applied to analyze the design parameters of automotive engine pulley. As a finite element method (FEM), ALGOR Multi-physics was used for analyzing the static analysis. As a result, two bending positions and material thickness were highly related to the maximum stress. These correlations between design parameters and analysis result will be used for supporting the design process of Digital Meister.

Key Words : Digital Meister (디지털 마이스터), Parametric design (파라메트릭 설계), Finite element analysis (유한 요소 해석), Design of Experiment (실험계획), Automotive engine pulley (자동차용 엔진 풀리)

1. 서론

자동차용 엔진 풀리는 가솔린 또는 디젤 엔진의 부품으로, 일반적으로 엔진마다 약 5~8 개가 사용된다. 엔진 풀리의 설계에는 다양한 차종에 따라 여러 치수와 형상 및 하중이 적용되기 때문에, 각각의 요구조건에 따른 유연한 설계 공정이 요구된다. 현재 엔진 풀리 설계는 숙련된 설계자들의 경험에 의존하며 설계 지식의 관리 및 재사용이 효율적으로 이루어지지 못하고 있다.

이와 같은 유사하며, 반복적인 설계/해석 공정의 효율성을 향상시키기 위해서는 공정 내에서 존재하는 각종 지식들을 추출하고 관리하는 시스템이 필요하다. 디지털 마이스터는 이러한 효과적인 지식 관리를 지원하기 위한 시스템이다. Fig. 1은 일반적인 풀리 설계/해석 공정과 디지털 마이스터가 적용되어 정보를 수집하고 제공하는 관계를 보여준다.

풀리는 자동차의 동력을 전달하는 부분에서 V 벨트와 함께 사용된다. 따라서 V 벨트에서 풀리에 작용하는 하중을 해석하고 이를 풀리 설계에 반영

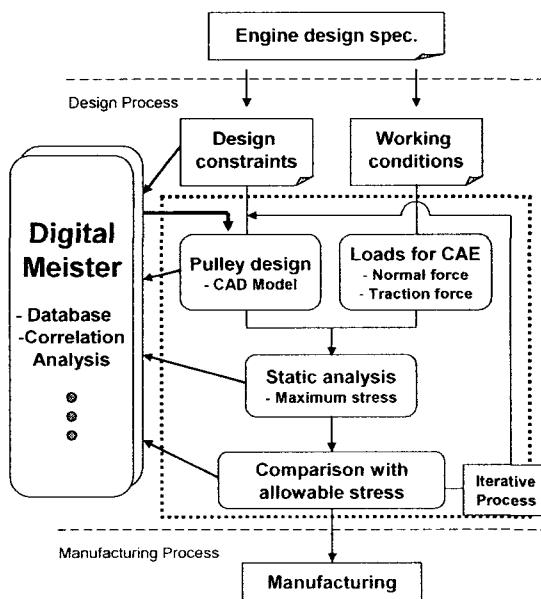


Fig. 1 Engine pulley design flow

하는 기술이 매우 중요하다. V 벨트에 대한 해석과정은 유효마찰계수를 구함으로써 평벨트와 유사하게 취급하는 과정이 알려져 있다. 이와 관련하여 이강수¹등은 V 벨트용 풀리에 대한 CAE 해석과정을 정량화하였다. 하지만 이와 같이 정량화된 해석 시스템을 기반으로 설계 작업을 진행하더라도 다양한 풀리 설계 인자들에 대한 적절한 평가는 쉽지 않다. 또한 모든 인자들을 고려하는 설계 과정은 많은 시간이 필요한 작업이 된다. 이와 관련해서 설계 변수를 변화시켜 제품에 미치는 영향을 파악하는 실험계획법의 하나로 다구찌 기법(Taguchi Method)이 많이 사용된다.^{2~4}

본 논문에서는 엔진 풀리 설계 지원을 위한 정보를 추출하기 위해 다구찌 기법을 해석 과정에 적용하였다. 이를 통해 추후 풀리 설계 시 기반 자료로 활용 될 수 있는 풀리 해석에 주요한 변수들의 특성을 파악하고자 하였다.

2. 해석 모델

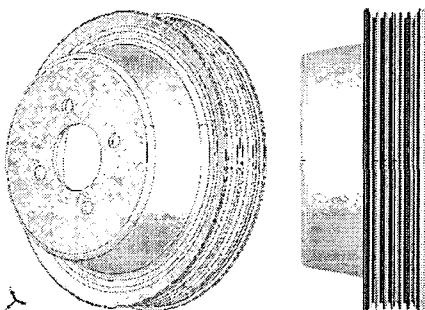


Fig. 2 CAD model of typical pulley

엔진 풀리의 일반적인 모델은 Fig. 2 와 같다. V 벨트와 접하는 그루브(Groove), 브라켓(Bracket) 또는 허브(Hub)와 접하는 고정부, 그리고 이 두 부분을 연결해주는 연결부로 구분된다. 엔진 풀리는 엔진 설계 시 주어진 조건들에 많은 영향을 받으며, 제약 조건들로는 V 벨트를 통한 동력 전달을 위한 그루브의 규격 및 위치, O.P.D. (Over Pin Diameter) 등이 있다.

Table 1 은 엔진 풀리의 설계 자료의 분석을 통해 선정된 주요 설계 변수들을 보여준다. 본 논문에서는 총 15 개의 변수들 중, 엔진 설계 조건으로부터 영향을 받는 9 개의 변수와 일반적인 규격을 사용하는 3 개의 변수를 제외한 나머지 3 개의 변수들에 대해서 다구찌 기법을 적용하기로 하였다. 대상 부분에 대한 파라메트릭 형상은 Fig. 3 과 같다.

엔진 풀리 정적 해석을 수행하기 위한 유한요소 해석 프로그램으로 ALGOR 의 Multi-Physics 를 사용하였다.⁵

Table 1 Parameters of pulley design

| No. | Parameter | Fixed by engine design |
|-----|----------------------------|------------------------|
| 1 | Belt type | ✓ |
| 2 | Groove count | ✓ |
| 3 | 1st bending position (A) | |
| 4 | 2nd bending position (B) | |
| 5 | Rolled fillet radius | △ |
| 6 | Groove connection shape | △ |
| 7 | Bracket hole size | ✓ |
| 8 | Bracket size | ✓ |
| 9 | Distance of groove center | ✓ |
| 10 | Over Pin Diameter (O.P.D.) | ✓ |
| 11 | Bolt size | ✓ |
| 12 | Bolt position | ✓ |
| 13 | Bolt count | ✓ |
| 14 | Thickness (C) | |
| 15 | Pulley material | △ |

△: Use typical values

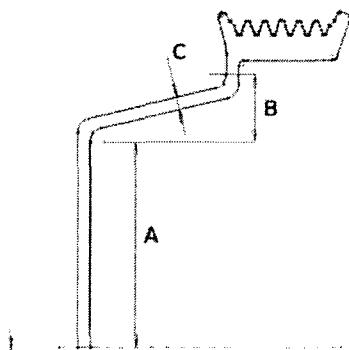


Fig. 3 Parameters of target area

Fig. 4 는 Fig. 2에서 예로 들었던 엔진 풀리의 정적 해석 결과를 보여준다. 고정부 주변(대상 부분)에서 큰應력이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

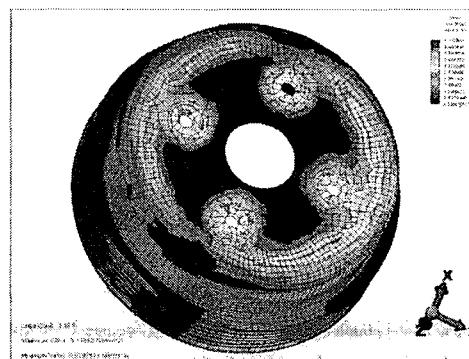


Fig. 4 Static analysis of steel pulley

3. 해석결과

3.1 다구찌 기법의 적용

다구찌 기법은 일본의 다구찌가 구현한 구체적인 제품 최적화 기법으로 직교배열표 기반으로 이루어진다. 이는 요인간의 직교성을 갖는 실험계획을 통해 동일한 실험횟수에서 보다 좋은 검정을 할 수 있고, 정도가 높은 추정을 할 수 있게 한다.

Table 2는 완전요인 실험계획법과 직교배열표의 실험수를 비교한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 완전요인 실험법은 인자수가 늘어날수록 기하급수적으로 실험량이 많아지는 반면 직교배열표는 작은 실험으로도 통계학적으로 완전요인 실험법만큼 인자간의 상호관계를 유추할 수 있는 장점이 있다.

Table 2 Comparison of experiment number

| Factor | Level 2 | | Level 3 | | |
|--------|--------------|-----------|---------|--------------|-----------------|
| | Latin square | Full exp. | Factor | Latin square | Full exp. |
| 3 | 4 | 8 | 4 | 9 | 81 |
| 7 | 8 | 128 | 13 | 27 | 1594323 |
| 11 | 12 | 2048 | 40 | 81 | $\approx 12E18$ |
| 15 | 16 | 32768 | | | |

실험계획법은 그루브와 고정부의 연결부분에 대해 실험을 설계하였다. 엔진 풀리의 실험 변수로는 Table 1의 변수 중 A, B, C를 대상으로 하였다. 해석을 위한 풀리의 구동 조건은 Table 3과 같이 고정하였으며, 이는 일반적인 풀리 해석 조건 중의 하나이다.¹ 각 변수의 수준은 제작 가능성을 고려하여 Table 4와 같이 3 수준으로 설정하였다. 3 수준계

Table 3 Analysis conditions

| Con. | Belt tension (N) | RPM | Groove number | Contact angle (deg) |
|-------|------------------|------|---------------|---------------------|
| Value | 3000 | 3000 | 6 | 180 |

Table 4 Level of the design variables

| Factor | Level | Size (mm) |
|--------|-------|-----------|
| A | 0 | 40 |
| | 1 | 43 |
| | 2 | 46 |
| B | 0 | 10 |
| | 1 | 12 |
| | 2 | 14 |
| C | 0 | 2.3 |
| | 1 | 2.6 |
| | 2 | 3.0 |

직교배열인 $L_9(3^4)$ 형은 실험회수는 9 회이고 열의 수가 4 개이며, 본 실험에서는 설정된 설계변수대로 직교배열표를 만들어 9 가지의 조건에 대하여 해석을 수행하였으며, 결과는 Table 5에 보인다.⁶

직교배열표에서 직교성이 있으면 중복된 배치는 일어나지 않고 그만큼 실험횟수는 줄이더라도 효율적인 분석이 가능하다.⁶ 오차항은 원래 제어 불가능한 인자를 넣어서 나중에 SN 비(Signal to Noise ratio)를 구할 때 쓰이나 특별히 제어할 수 없는 인자를 넣지 않고 직교배열표의 형식에 빈 공간이 생길 때 오차항을 삽입해 주어도 된다. 이럴 때의 오차항의 의미는 직교배열표에서 선형모델을 만들었을 때 실제로 나온 값과의 차이가 되는데 무한대의 실험을 하면 이 오차항은 없어질 것이다.

Table 5 Orthogonal array $L_9(3^4)$

| Experiment No. | Factor | | | |
|----------------|--------|---|---|----|
| | A | B | C | E* |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | 0 | 2 | 2 | 2 |
| 4 | 1 | 0 | 1 | 2 |
| 5 | 1 | 1 | 2 | 0 |
| 6 | 1 | 2 | 0 | 1 |
| 7 | 2 | 0 | 2 | 1 |
| 8 | 2 | 1 | 0 | 2 |
| 9 | 2 | 2 | 1 | 0 |

*E: error term

특성치는 최대 응력의 값이 작을수록 좋은 망소(lower is better) 특성을 선정하였으며, SN 비는 다음식 (1)을 이용하여 계산하였다

$$SN = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

Table 6 Experiment result and SN ratios

| Experiment No. | Max. stress (MPa) | SN ratio (dB) |
|----------------|-------------------|---------------|
| 1 | 234.820 | -47.42 |
| 2 | 210.878 | -46.48 |
| 3 | 178.816 | -45.05 |
| 4 | 232.146 | -47.32 |
| 5 | 181.173 | -45.16 |
| 6 | 218.650 | -46.79 |
| 7 | 178.871 | -45.05 |
| 8 | 214.645 | -46.63 |
| 9 | 236.977 | -47.49 |

위의 특성식에서 n 은 측정값의 수를 나타내고 y_i 는 측정한 특성값을 나타내며, SN 값의 단위는 데시벨(dB)이다. Table 6는 계산된 SN 비를 나타내고 있다.

Table 7 Analysis of variances

| Factor | S | Φ | V | F ₀ |
|--------|---------|--------|---------|----------------|
| B | 207.19 | 2 | 135.10 | 1.56 |
| C | 4085.44 | 2 | 2042.72 | 23.53 |
| E | 347.21 | 4 | 86.80 | |
| T | 4702.84 | 8 | | |

Table 6과 7은 각각 요인의 수준별 SN 비와 각 요인 별 변동(S), 자유도(Φ), 분산(V), F 검정값(F₀)을 보여준다. Table 7에서 최대 응력값에 기여하는 인자는 B-C-A 순서로 나타났으며, B와 C 인자가 최대 응력값을 좌우할 수 있는 주요 인자로 나타났다. 이는 B 요인의 설계 부분이 그루브에 작용하는 벨트의 인장력에 A 부분보다 더 큰 영향을 받으며, C는 재료의 두께로써 두꺼울수록 낮은 특성값을 갖기 때문이라고 판단된다. 그리고 Table 8의 각 요소의 수준별 SN 비의 비교를 통해 최적 수준은 A0, B1, C2로 나타났다.

Table 8 Response table of SN ratios

| Level | A | B | C |
|-------|---------|---------|---------|
| 0 | -46.314 | -46.593 | -46.948 |
| 1 | -46.424 | -46.092 | -46.097 |
| 2 | -46.393 | -46.446 | -45.087 |

이와 같은 다구찌 기법의 결과를 통해 요소 B와 C가 최대 응력값에 미치는 영향을 수식화할 수 있는 기반 자료를 구하였으며, 이를 통해 이후 유사한 풀리의 형상에 대한 설계 시 초기 설계치 작성 및 성능 예측을 위한 자료로 활용이 가능하다.

4. 결론

본 연구에서는 엔진 풀리의 설계 지원을 위한 디지털 마이스터 개발의 한 과정으로, 기반 정보의 추출을 위해 다구찌 기법을 이용하였다. 엔진 풀리의 정적 해석은 ALGOR Multi-physics를 사용하였으며, 그 결과에 대해 SN 비를 계산하고 분산분석표를 작성하였다. 이를 통해 최대 응력값의 변화에 각 요소들이 미치는 영향을 확인하였다.

본 연구를 통해 엔진 풀리 설계시 두 가지의 굽힘(Bending) 위치와 재료의 두께가 최대 응력과 갖는 상관관계를 도출하였다. 이렇게 얻어진 정보는 수식화되어 데이터베이스에 저장되며, 디지털 마이스터를 통해 설계/해석 공정에서 사용자에게 전달

된다. 또한 다양한 변수들에 대한 평가를 통해 설계 모델을 분류하고 그에 따른 여러 변수들을 동시에 고려함으로써 정적 해석 결과인 최대 응력뿐만 아니라, 비용 및 생산성까지도 평가가 가능한 디지털 마이스터로 발전시켜 나아갈 것이다.

후기

본 연구는 두뇌한국 21 사업과 산업자원부 중기 거점기술개발 사업(10016432)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- 이강수, 홍종해, 손종호, 이상현, “V 벨트용 폴리 설계/해석 시스템 개발,” 한국 자동차공학회 논문집, 제 10 권, 제 6 호, pp. 209 – 218, 2002.
- 정재한, 신수현, 이상률, “유한요소법에 의한 선형모터의 설계 변수 최적화,” 대한기계학회 논문집, 제 26 권, 제 7 호, pp. 1232 – 1240, 2002.
- 고성호, 한석영, 최형연, “실험계획법을 이용한 구조물의 최적설계,” 한국 공작기계학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp. 34 – 39, 2001.
- Yi, J. W., Park, J. S., Lee, K. H., and Park G. J., “Development of an Optimization Algorithm Using Orthogonal Arrays in Discrete Design Space,” Transactions of the KSME, A, Vol. 25, pp. 1615 – 1626, 2001.
- ALGOR V16 User’s Manual, ALGOR, 2004.
- 이상복, “알기쉬운 다구찌기법,” 상조사, 1991.