

## 실험계획법을 이용한 휠 로더 전 차축의 최적형상에 관한 연구

### A Study on the Optimal Shape Design of Front Axle of Wheel Loader using the Design of Experiments

유대원<sup>1,✉</sup>, 이재학<sup>2</sup>  
Dae Won Yoo<sup>1,✉</sup> and Jai Hak Lee<sup>2</sup>

1 한국산업기술대학교 지식기반기술·에너지대학원 기계시스템설계학과 (Machine System Design, Graduate School of Knowledge based Technology and Energy, Korea Polytechnic Univ.)

2 한국산업기술대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design Engineering, Korea Polytechnic Univ.)

✉ Corresponding author: yoodw14@paran.com, Tel: 031-8041-1791

Manuscript received: 2011.8.5 / Revised: 2011.10.20 / Accepted: 2011.11.1

*Wheel loader is one of the construction machinery capable of variety of tasks and the demand on functional diversity and structural reliability is growing. As a study on the optimal shape design of front axle for wheel loader through the design of experiments, this paper assessed the design parameters affecting the maximum stress. As a result, a value of 126.77 MPa of minimum stress was obtained, and optimal factors showed the values of  $w = 100.0$  mm,  $\theta = 40^\circ$  and  $R = 118$  mm. It showed an accuracy of 98.7% compared with the structural analysis.*

Key Words: Design of Experiments (실험계획법), Wheel Loader (휠 로더), Axle (차축), Finite Element Analysis (유한요소 해석), Factor (인자), Level (수준)

#### 1. 서론

건설 중장비인 로더(loader)는 주로 건설현장에서 자갈, 모래, 흙 등을 퍼서 덤프차에 적재하는 장비로서 무한 궤도식(crawler type)과 휠 타입(wheel type)이 있으며, 기동성을 고려한 휠 타입인 휠 로더(wheel loader)가 가장 많이 사용되고 있다. 로더는 엔진(engine), 변속기(transmission), 액슬(axle), 버킷(bucket) 등으로 구성된다. 또한 버킷의 형태를 바꾸어 가며 여러 가지 작업을 수행하고, 종종 지게차의 용도로 사용되기도 한다. 휠 로더용 차축은 휠 로더의 품질 및 성능을 결정하는 핵심모듈 중 하나로서 현재 국내에서의 개발 수준은 매우 미흡하며, 개발비용이 많이 투입됨에 따라 중장비 업계에서는 대부분 선진 업체인 ZF, DANA 등에 차축을 수입해 의존하고 있는 실정이다.<sup>1,2</sup> 이

에 대한 건설기계의 시장규모 확대와 국가 기술력 향상을 위해서는 국내 업체의 원천 기술 확보가 절실히 요구된다.

Cho 등<sup>3,4</sup>은 4륜 구동과 4륜 조향 장치를 적용한 로더를 개발하였으며, Choung<sup>5</sup>은 11톤급 휠 로더를 대상으로 정적 및 동적 강도 특성과 운동 특성을 계측하여 구조해석 결과와 잘 일치하는 것을 확인하였다. Lee<sup>6</sup>는 4륜 모두 90° 회전하여 조향할 수 있는 기초 설계를 하고 분석하였고, Yoo<sup>7</sup>는 휠 로더 리프트 암의 경량화를 통해 기존 무게를 9% 정도 감소하는 효과를 얻었다.

Kwon<sup>8</sup>은 실험계획법을 통해 미니로더 main frame의 최대응력을 47.2% 감소하고 중량은 유지하는 효과를 얻었으며, Shin 등<sup>9</sup>은 중심합성계획법을 주축 형상에 적용하여, 스프링 중량을 23.11% 감소시켰고, Kwon 등<sup>10</sup>은 톨 홀더 스프링들에 실험계획

을 적용하여 11.6 %의 응력감소효과를 보였다. Kim 등<sup>11</sup>은 반응표면분석법을 이용하여 U-type 벨로우즈의 최대응력을 20 % 감소시키는 효과를 보였다.

이와 같이 로더에 대한 전반적인 설계나 시뮬레이션을 통한 연구가 대부분이며, 차축에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 또한 실험계획법을 이용하여 무게나 응력을 감소하는 연구는 로더의 main frame,<sup>8</sup> 굴삭기의 암(arm),<sup>12</sup> 자동차 분야의 현가부품<sup>13</sup> 등에서 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 휠 로더용 전 차축에 대해 유한요소해석을 수행하여 피로한계응력과 비교·분석하였으며, 피로 파손을 예측하였다. 예측된 부분에 대해서는 개선형상을 제시하고, 실험계획법을 통해 최적의 형상을 연구하였다.

**2. 유한요소해석**

**2.1 차축 모델**

휠 로더의 전 차축은 Fig. 1 과 같으며, Front axle, Ring case, Hub drum, Hub wheel로 구성되어 있으며, 차 바퀴는 hub wheel 에 고정된다. hinge 는 정적 및 동적 시험에 사용되는 부품이며, 측면 block 은 hinge 와 슬라이드가 될 수 있는 부품으로 차축의 처짐을 자유롭게 한다. 유한요소해석을 하기 위해 SolidWorks v. 2011 과 SolidWorks simulation v. 2011 을 사용하여 해석하였다.

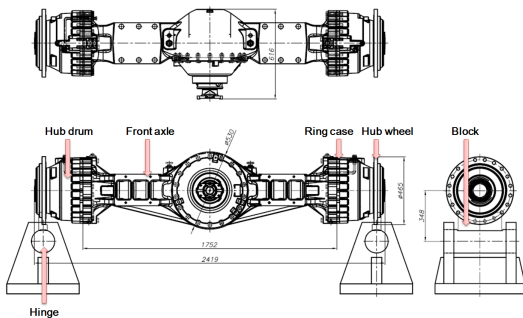


Fig. 1 Part name of the axle

**2.2 경계조건 및 재료물성**

차축의 경계조건은 Fig. 2 와 같이 좌우 대칭형상이므로 대칭조건을 부가하였다. 각 부품의 무게를 포함하기 위해 중력조건을 부가하였으며, hinge 와 block 은 자유롭게 처짐을 발생할 수 있도록 접촉조건을 부가하였다. hinge 는 z 축 회전 조건만 부가하였으며, 하중의 크기는 26.45ton 을 적용하였다.<sup>14</sup>

사용된 요소(element)는 tetra mesh 이며, 자동요소 생성기능을 이용하여 요소망을 생성하였다. 큰 변형을 발생하는 차축은 절점간격 8mm 로 세밀하게 나누었으며, 그 외 부품은 18mm 로 나누었다. 유한요소모델의 요소 수는 489,860 개, 절점 수는 745,266 개이다. hinge 와 block 은 SM45C 이며, hub wheel 은 SCMnM3B 이다. hub drum, ring case 와 axle 은 구상흑연주철인 FCD450 이며, Young's modulus 172GPa, Poisson's ratio 0.275, Mass density 6,640kg/m<sup>3</sup> 이다.

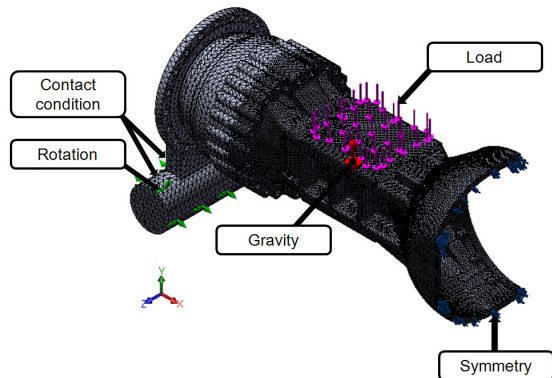


Fig. 2 Boundary conditions

**2.3 해석결과**

응력해석 결과 최대 등가응력(Max. Von Mises stress)은 Fig. 3 과 같으며, 263.6MPa 의 값을 나타낸다. 최대 처짐량은 중앙 하부에서 4.7mm 의 값을 나타낸다. 차축 재료의 피로한계응력은 인장강도의 50%인 235MPa 의 값을 가지며, 피로한계응력을 넘는 부분은 최대응력이 작용하는 부분이다. 또한 단 형태와 중앙 리브(rib)에 의해 응력집중이 발생하고 파손이 발생할 가능성이 큰 부분이다. 따라서 Fig. 4 와 같이 단 부분을 제거하고 라운드를 형성할 수 있는 최소 값인 100mm 로 형상을 변경하여 재 해석하였다.

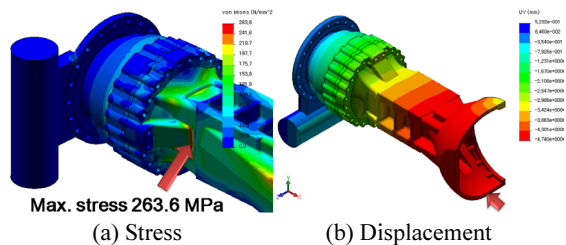


Fig. 3 Stress and Displacement results (Before)

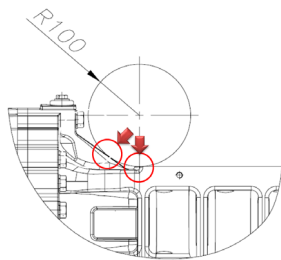


Fig. 4 Round 100mm

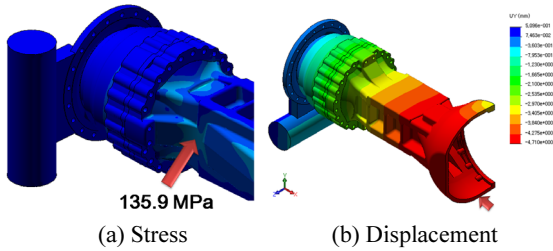


Fig. 5 Stress and Displacement results (After)

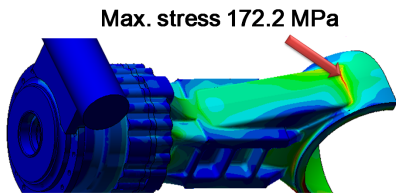


Fig. 6 Location of maximum stress

개선 후 재해석한 결과는 Fig. 5 와 같으며, 최대응력이 작용했던 부분에서는 약 48.5% 응력이 감소한 135.9MPa 의 값을 나타내었다. 최대 처짐량은 4.7mm 의 값을 나타내었으며, 최대응력이 작용하는 부분은 Fig. 6 과 같이 172.2MPa 의 값을 나타낸다.

3. 실험계획법

개선 후 최대응력은 재질의 피로한계응력보다 작아 피로에 의한 파손은 없을 것으로 판단하였으며, 개선 형상인 라운드 100mm 의 최적 형상을 찾기 위해 실험계획을 계획하고, 수치 해석 통계 프로그램인 MINITAB v. 14 를 사용하였다.

3.1 실험 인자와 수준 선정

실험 인자는 Fig. 7 과 같이 w,  $\theta$ , R 로 선정하였다. 그 이유는 개선 전 단 형태에 의해 최대응력

이 발생하였고, 개선 후 라운드 및 리브에 대한 최적의 형상을 찾기 위함이다. 차축의 무게도 하나의 인자가 될 수 있으나 그 차이가 미미하여 배제하였다. w 의 수준은 기존 크기인 95.5mm 에서 100mm,  $\theta$  는 35.3° ~ 40° , R 은 100mm 에서 130mm 로 선정하였다. w 는 볼트 머리 부분과 관련이 있어 최대 100mm 까지 가능하다.  $\theta$  는 R 과 관계가 있고 각이 점점 커지면 수직으로 세워지는 경향이 있어 40° 로 선정하였으며, R 은 130mm 까지 가능하다.

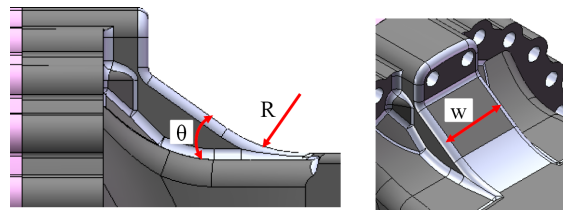


Fig. 7 Experimental factors and levels

3.2 요인배치법

Fig. 8 은 실험인자가 w,  $\theta$ , R 로 세 개인 2<sup>3</sup> 요인 실험의 자료 표현방식이며, 처리조합은 모두 8 개가 있다. 이를 표현하면 { $(1), w, \theta, R, w\theta, wR, \theta R, w\theta R$ }과 같다. 여기서 -1 은 수준이 낮은 것을 의미하며, +1 은 수준이 높은 것을 의미한다. 또한 (1) 은 숫자 1 이 아닌 모든 인자의 낮은 수준에서 실험이 이루어진다는 의미이다.<sup>15</sup>

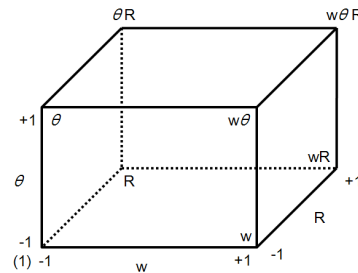


Fig. 8 Treatment combinations

2<sup>3</sup> 완전요인 실험은 Table 1 과 같이 계획하고, 반응치 Y 는 유한요소해석으로 얻은 최대 등가응력의 결과이다. 분석 결과는 Table 2 와 같으며, w\* $\theta$ , w\*R 은 P 값이 각각 0.099, 0.644 로 유의하지 않은 인자이고, w,  $\theta$ , R,  $\theta$ \*R 은 각각 0.043, 0.003, 0.024, 0.013 으로 유의한 인자로 나타났다.

Table 1 2-level 3-factor full factorial design

Std. run	w (mm)	θ (°)	R (mm)	Y (MPa)
1	95.5	35.3	100.0	135.93
2	100.0	35.3	100.0	135.61
3	95.5	40.0	100.0	129.17
4	100.0	40.0	100.0	128.26
5	95.5	35.3	130.0	139.02
6	100.0	35.3	130.0	138.67
7	95.5	40.0	130.0	128.16
8	100.0	40.0	130.0	127.38

Table 2 2-level 3-factor full factorial design

Term	Effect	Coefficient	T	P
Constant	-	132.775	6638.75	0.000
w	-0.590	-0.295	-14.75	0.043
θ	-9.065	-4.533	-226.62	0.003
R	1.065	0.533	26.62	0.024
w*θ	-0.255	-0.127	-6.37	0.099
w*R	0.025	0.012	0.62	0.644
θ*R	-2.010	-1.005	-50.25	0.013

각 요인의 영향력을 판단하는 기준은 유의확률인 P 값의 크기로 결정한다. 유의하다, 유의하지 않다는 것은 P 값과 유의수준인 α(0.05)의 값으로 비교하는데, P 값이 0.050 보다 작다면 유의하다라는 것을 의미한다.<sup>16</sup> 여기서 계수(coefficient)는 효과(effect)를 반으로 나눈 값이며, T 값은 검정 통계량으로 계수를 표준오차로 나눈 값이다.

반응치 Y 에 대한 수학적 모형은 코드화된 단위로 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$Y = 132.775 - 0.295w - 4.533\theta + 0.533R - 1.005\theta * R \quad (1)$$

Fig. 9 는 인자 하나 하나의 효과를 나타낸 주효과도이며, 직선의 기울기가 클수록 반응치 Y 에 대해 더 큰 영향을 준다고 판단한다. θ 의 기울기가 가장 크므로 반응치에 큰 영향을 준다고 할 수 있다. 주 효과는 실험인자의 높은 수준에서 측정된 반응 평균값에서 실험인자의 낮은 수준에서 측정된 반응 평균값을 뺀 값이다. 처리조합의 기호로 표시하면 식(2)~(4)와 같다.

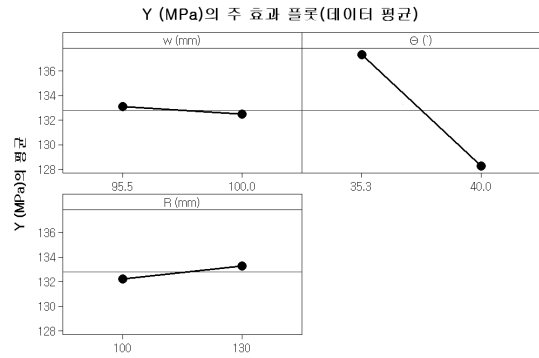


Fig. 9 Main effects

$$w = \frac{1}{4}(w + w\theta + wR + w\theta R) - \frac{1}{4}\{(1) + \theta + R + \theta R\} \quad (2)$$

$$\theta = \frac{1}{4}(\theta + w\theta + \theta R + w\theta R) - \frac{1}{4}\{(1) + w + R + wR\} \quad (3)$$

$$R = \frac{1}{4}(R + wR + \theta R + w\theta R) - \frac{1}{4}\{(1) + w + \theta + w\theta\} \quad (4)$$

Fig. 10 은 교호효과를 나타낸 것이며, 두 개의 선이 평행을 이룰 때는 교호효과가 존재하지 않는 상태를 의미하고, 기울기의 부호가 다르거나 x 자 형태를 이루면 교호효과가 존재한다는 것을 의미한다. w\*θ 와 w\*R 은 교호효과가 거의 없는 상태이며, θ\*R 은 기울기의 부호가 반대이므로 교호효과가 크게 존재한다.

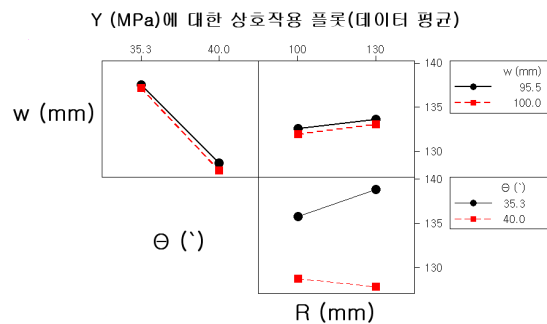


Fig. 10 Interactions

w, θ, R 의 교호효과는 식(5)~(7)과 같다. w\*θ 의 교호효과는 θ 의 높은 수준에서 w 의 효과를 θ 의 낮은 수준에서 w 의 효과로 뺀 값으로 계산된다.

$$w^* \theta = \frac{1}{4} \{ (w\theta + w\theta R) - (\theta + \theta R) \} - \frac{1}{4} [ (w + wR) - \{ (1) + R \} ] \tag{5}$$

$$w^* R = \frac{1}{4} \{ (wR + w\theta R) - (R + \theta R) \} - \frac{1}{4} [ (w + w\theta) - \{ (1) + \theta \} ] \tag{6}$$

$$\theta^* R = \frac{1}{4} \{ (\theta R + w\theta R) - (R + wR) \} - \frac{1}{4} [ (\theta + w\theta) - \{ (1) + w \} ] \tag{7}$$

주 효과도나 교호효과도를 보면 직선의 관계를 나타내고 있다. 하지만 곡선의 형태를 가지고 있을 수도 있기 때문에 중앙 점에서의 반복실험을 통해 곡률효과(curvature effect)를 판단해야 한다. 만약 곡률효과가 존재한다면 2 차식 이상의 수학적 모형이 필요하며, 다 수준(multi level) 실험 혹은 반응표면분석법(response surface methodology)을 이용한 추가적인 실험이 필요하다.<sup>17</sup>

중앙 점 반복실험을 통해 곡률효과와 P 값이 0.020 을 나타내었다. 이는 유의수준보다 작기 때문에 유의하며, Fig. 11, 12 와 같이 주 효과도와 교호효과도를 보더라도 직선의 관계가 아닌 2 차 이상의 관계를 가지고 있음을 확인하였다.

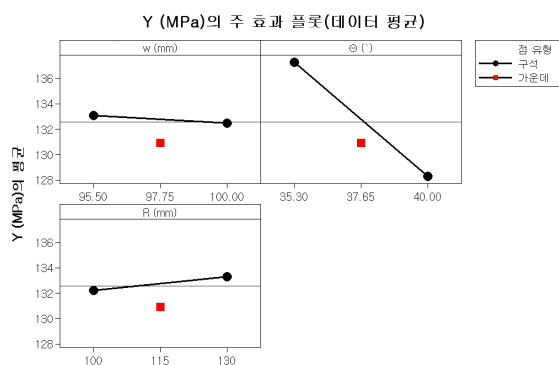


Fig. 11 Main effects of the curvature

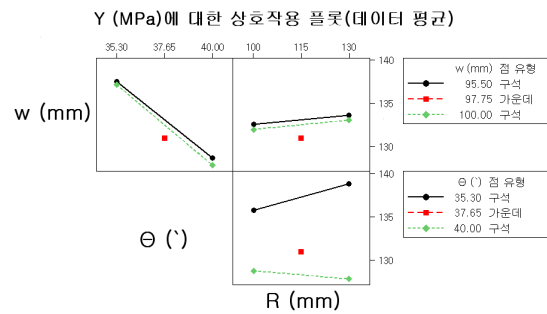


Fig. 12 Interactions of the curvature

### 3.3 반응표면분석법

반응표면분석법 중 중심합성 내접설계에 대한 계획은 Table 3 과 같으며, 반응치 Y 는 유한요소해석으로 값을 얻은 결과이다. 내접설계를 선택한 이유는 수준의 범위를 초과할 수 없기 때문이다.

실험횟수는 2<sup>n</sup> 요인실험의 실험 점과 2n<sub>a</sub> 개의 축 점 그리고 n<sub>c</sub> ≥ 1 개의 중심점으로 이루어져 총 실험 점의 수는 2<sup>n</sup>+2n<sub>a</sub>+n<sub>c</sub> 개이다. 외접설계의 경우 많은 중심점에서의 실험이 효과적이며, 보통 n<sub>c</sub>=3~5 회, 내접설계의 경우 n<sub>c</sub>=1~2 회로 충분하다. 여기서, n 은 인자의 수가되며, n<sub>a</sub> 는 축 점의 수, n<sub>c</sub> 는 중심점의 수이다.<sup>18</sup>

Table 3 Central composite design

Std. run	w (mm)	θ (°)	R (mm)	Y (MPa)
1	95.5	35.3	100.0	135.93
2	100.0	35.3	100.0	135.61
3	95.5	40.0	100.0	129.17
4	100.0	40.0	100.0	128.26
5	95.5	35.3	130.0	139.02
6	100.0	35.3	130.0	138.67
7	95.5	40.0	130.0	128.16
8	100.0	40.0	130.0	127.38
9	95.5	37.65	115.0	131.24
10	100.0	37.65	115.0	130.42
11	97.75	35.3	115.0	137.07
12	97.75	40.0	115.0	128.02
13	97.75	37.65	100.0	132.36
14	97.75	37.65	130.0	133.03
15	97.75	37.65	115.0	130.91

분석결과는 Table 4 와 같으며,  $w*\theta$ ,  $w*R$  의 P 값이 유의수준보다 높기 때문에 유의하지 않고, 나머지 인자는 모두 유의하게 나타났다. 풀링(pooling) 후 결과는 Table 5 와 같다.

Table 4 Results of central composite design

Term	Coefficient	T	P
Constant	131.434	794.521	0.000
w	-0.318	-3.267	0.022
$\theta$	-4.531	-46.554	0.000
R	0.493	5.065	0.004
$w*w$	-0.736	-3.832	0.012
$\theta*\theta$	0.979	5.103	0.004
$R*R$	1.129	5.885	0.002
$w*\theta$	-0.127	-1.172	0.294
$w*R$	0.012	0.115	0.913
$\theta*R$	-1.005	-9.236	0.000

Table 5 Pooling results

Term	Coefficient	T	P
Constant	131.434	831.835	0.000
w	-0.318	-3.421	0.011
$\theta$	-4.531	-48.740	0.000
R	0.493	5.303	0.001
$w*w$	-0.736	-4.012	0.005
$\theta*\theta$	0.979	5.343	0.001
$R*R$	1.129	6.161	0.000
$\theta*R$	-1.005	-9.670	0.000

Fig. 13, 14 의 주 효과도와 교호효과도를 보면 완전요인배치법에서 곡률효과를 예측한 것과 같이 곡선의 형태를 나타내고 있다. 주효과도에서 인자 w 와  $\theta$  의 값이 증가하면 반응치 Y 의 값이 낮아지는 경향을 나타내며, w 의 효과는 적고  $\theta$  의 효과가 가장 크게 나타났다. 인자 R 의 값이 증가하면 반응치 Y 의 값이 감소하다 증가하는 경향을 나타내었다.

또한 교호효과에서  $w*\theta$  와  $w*R$  은 약간의 효과가 있는 것으로 보이나 P 값이 유의하지 않게 나타났으며,  $\theta*R$  경우에는 기울기의 부호가 바뀌는 현상으로 교호효과가 크게 나타났다.

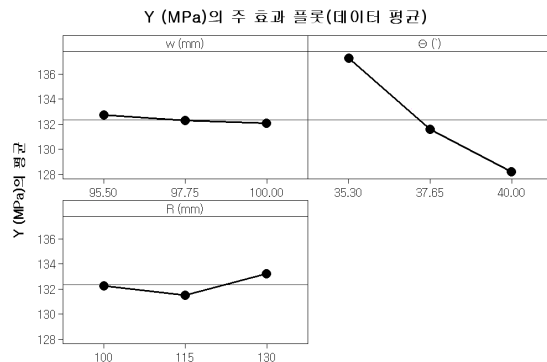


Fig. 13 Main effects

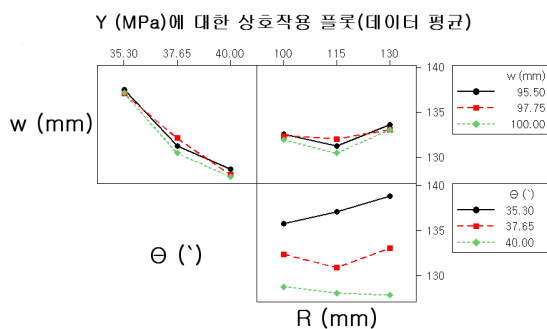


Fig. 14 Interactions

통계적으로 유의한 인자는 w,  $\theta$ , R,  $w*w$ ,  $\theta*\theta$ ,  $R*R$ ,  $\theta*R$  이므로 코드화된 수학적 모형은 다음과 같이 식(8)로 표현된다.

$$Y = 131.434 - 0.318w - 4.531\theta + 0.493R - 0.736w^2 + 0.979\theta^2 + 1.129R^2 - 1.005\theta*R \quad (8)$$

### 3.4 반응최적화

중심합성계획법으로 얻은 반응치 Y 에 대한 수학적 모형을 가지고, 통계프로그램인 MINITAB 의 반응최적화 도구를 사용하여 최저의 응력 값을 얻었으며, 그 결과는 Table 6 과 같다. 반응치 Y = 126.77MPa 에 대한 인자의 수치는 w=100mm,  $\theta$  = 40°, R=118mm 의 값을 가진다.

Table 6 Results of response optimization

w (mm)	$\theta$ (°)	R (mm)	Min. stress (MPa)
100	40	118	126.77

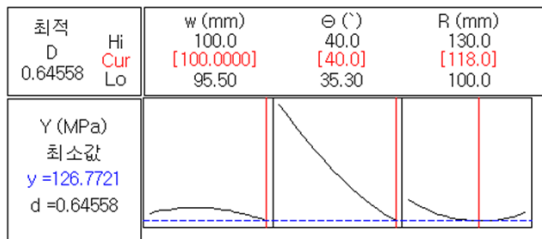


Fig. 15 Response optimization plot

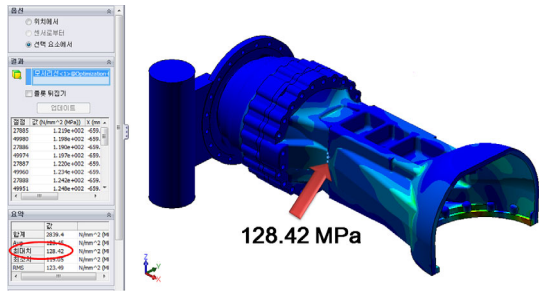


Fig. 16 FEM results

Fig. 16 과 같이 반응최적화를 통해 얻은 수치로 재해석한 결과 128.42MPa 의 값을 나타낸다. 반응 최적화 결과와의 정확도는 약 98.7%를 나타내었다.

4. 결론

본 논문에서는 휠 로더 전 차축에 대해 유한요소해석 결과와 피로한계응력을 비교·분석하였으며, 피로 파손을 예측하였다. 최대응력이 작용하는 부분에 대해 개선 형상을 적용하여 재 해석하였으며, 개선 형상에 대해 실험계획을 실시하여 최적의 조건을 도출하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1) 차축에 발생하는 최대 등가응력은 263.6MPa 로 재질의 피로한계응력 235MPa 보다 높게 나타나 파손을 예측하였다. 최대응력이 발생하는 부분은 단 형태와 중앙 리브에 의해 응력집중이 발생하는 부분이며, 가장 취약한 부분이다. 따라서 단 부분을 제거하고 라운드를 형성할 수 있는 최소값인 100mm 로 형상을 변경하여 재 해석한 결과 48.5% 응력이 감소한 135.9MPa 의 값을 나타냈다.

2) 개선형상에 대해 실험계획을 실시한 결과 인자 w 와  $\theta$  의 값이 증가하면 반응치 Y 의 값이 낮아지는 경향을 나타내었으며, w 의 효과는 적고  $\theta$  의 효과가 크게 나타났다. 인자 R 의 값이 증가하면 반응치 Y 의 값이 감소하다 증가하는 경향을

나타내었으며,  $\theta$  의 효과가 가장 크다는 것을 확인하였다.

3) 반응치 Y 의 최소값은 126.77MPa 로 w=100mm,  $\theta=40^\circ$ , R=118mm 의 최적의 인자 값을 나타내었다. 유한요소해석 결과는 128.42MPa 로 98.7%의 정확도를 나타내었다.

4) 기존 모델에 비해 개선된 형상과 이를 통해 최적화한 결과 51.3%의 응력감소 효과를 얻었다.

참고문헌

1. Park, Y. J., Oh, J. Y., Yun, U. K. and Lee, G. H., "Design Parameter Analysis of the Proportional Control Valve for Wheel-Loader Automatic Transmission," J. of KSPE, Vol. 27, No. 5, pp. 27-35, 2010.
2. Pak, J. Y., Yoo, W. S., Kim, H. W., Hong, J. M. and Ko, K. G., "Three Dimensional Modeling and Simulation of a Wheel Loader," Proc. of the KSME Autumn Conference, pp. 870-874, 2004.
3. Cho, H. D., Yoon, M. C. and Kim, Y. J., "Development of Loader Equipped with 4WD and 4WS(II)," J. of the Korea Society of Machine Tool Engineers, Vol. 8, No. 1, pp. 150-157, 1999.
4. Jo, S. G., "Development of Loader Applied with 4 Wheel Driving and 4 Wheel Steering System," M.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kyungil University, pp. 1-5, 2002.
5. Chung, J. M., Kim, G. S., Jang, W. S., Choe, I. H. and Heo, M. S., "Study on the Static/Dynamic Measurements and Structural Analysis Procedure of Wheel Loader," Proc. of the KSME Autumn Conference, pp. 1303-1309, 2003.
6. Lee, S. S. and Kim, S. H., "Design and analysis of four wheel 90° steering Loader," J. of Agricultural Science, Vol. 17, pp. 31-45, 2006.
7. Yoo, S. W., "Optimal design of Wheel loader lift arm shape," M.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Inha University, pp. 1-27, 2009.
8. Kwon, K. B. and Shin, D. Y., "Optimal Design of a Mini-Loader Based on the Design of Experiments," Trans. of KSME A, Vol. 35, No. 6, pp. 693-699, 2011.
9. Shin, J. H. and Lee, C. M., "A Study on Spindle Shape Design using Design Experiments," J. of

- KSPE, Vol. 26, No. 4, pp. 102-127, 2009.
10. Kwon, K. H. and Chung, W. J., "Stress Analysis of a Tool Holder Spindle using DOE with iSIGHT<sup>®</sup>," Proc. of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers Spring Conference, pp. 348-353, 2009.
  11. Kim, H. J., Kim, H. S., Kim, J. P., Park, J. H. and Yun, M. J., "Shape Optimization for Performance Improvement of Ship's U-type Bellows," J. of Ocean Engineering and Technology, Vol. 20, No. 6, pp. 123-129, 2006.
  12. Kim, J. M., Chung, W. J., Park, K. B., Kang, J. M., Jung, A. K., Joo, C. H. and Lee, S. K., "Optimal Design of Excavator Arm Part Using Design of Experiments," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 361-362, 2007.
  13. Lee, C. W., Kim, M. S. and Yim, H. J., "Shape Optimization for Maximizing Fatigue Life of Suspension Component Using the Experimental Design," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 726-731, 2002.
  14. SBP&T, "23~26ton class W/LOADER AXLE Endurance Test Mode," ES-01, pp. 4-6, 2006.
  15. Bak, S. H. and Kim, J. U., "Modern Design of Experiments Using the MINITAB," Minyoungsa, pp. 309-317, 2010.
  16. Yoo, M. H., "A Study on Design Optimization and Stress Relaxation Phenomenon on Lip Seal," Ph.D. Thesis, Graduate School of Knowledge-based Technology and Energy, Korea Polytechnic University, pp. 54-73, 2009.
  17. ELETEC, "Design of Experiments," pp. 225-309, 2010.
  18. ELETEC, "MINITAB 15<sup>®</sup> for DOE," pp. 225-307, 2008.