

불규칙 진동하중을 받는 속 타워의 피로수명을 고려한 점용접 위치 최적설계

A Study on Optimal Spot-weld Layout Design of the Shock Tower Structure Considering Fatigue Life under Random Vibration Load.

이용훈* · 이승윤* · 배복수* · 임홍재†

Yong Hoon Lee, Seung Yoon Lee, Bok Soo Bae and Hong Jae Yim

Key Words : Spot weld(점용접), Shock tower(속타워), Fatigue analysis(피로해석), Optimal layout design(위치최적설계)

ABSTRACT

In this paper, optimal spot weld layout design of the shock tower structure is performed for increasing fatigue life of spot weld and fatigue life of shock tower simultaneously. To predict the fatigue life, linear static analysis is conducted then fatigue analysis is performed by applying random vibration load. To optimize the spot weld layout, design variables that have an effect on spot weld fatigue life are selected. Based on the DOE table, spot weld fatigue analysis is conducted. Finally, response surface model is made from fatigue analysis results and optimized spot weld layout model which increases fatigue life of spot weld and fatigue life of shock tower is determined.

1. 서 론

점용접(Spot weld)은 차체 조립에 일반적으로 사용되는 공정으로, 차체의 피로수명에 영향을 미치는 중요한 요소 중 하나이다. 이와 관련된 선행연구를 살펴보면 차량 뒷부분 테두리 점용접 개수와 위치를 최적화 하는 연구가 진행되었다⁽¹⁾. 그러나 이 연구는 각각의 점용접 부분의 밀도와 용접점 개수를 변경하여 원래의 내구수명과 비슷한 수명을 지니게 하는 점용접 개수를 정하는 것을 목표로 한 연구로, 단순모델을 사용하여 피로해석을 수행하였기에 실제로 적용하기에는 무리가 있다. 또 다른 연구로는 불필요한 점용접 개수를 줄이는 동시에 강성을 유지시키고자 설계자가 참고할 수 있는 점용접 설계 지수를 제시한 연구도 수행되었다⁽²⁾. 이 연구는 점

용접 개수를 줄이기 위해 민감도를 고려한 생존할 수 순위를 제시하였지만 단순히 강성만을 고려하여 피로를 고려한 위치최적에 적용하기에는 무리가 있다. 점용접의 피로수명을 고려한 점용접부 위치최적화를 위한 연구⁽³⁾는 모체의 피로수명을 고려하지 않고 점용접부의 피로수명만을 고려하였다.

본 연구에서는 피로파괴가 상대적으로 일어나기 쉬운 속 타워(Shock tower)부를 대상으로 점용접부의 피로수명과 속 타워부의 피로수명을 동시에 증가시킬 수 있는 점용접 위치최적화를 수행하고자 한다. 첫 번째 단계로 본 연구의 대상이 되는 차체 오른쪽 후방 속 타워부의 피로수명을 해석을 통해 예측하기 위해 유한요소모델을 생성하고 차체와 속 타워, 그리고 보강재를 점용접 한다. 다음으로 구속조건을 설정하고 단위 하중을 가하여 정적해석을 수행한 뒤 실제 주행시험을 통해 측정된 불규칙 진동하중 즉, 동하중 이력(Road load time history)을 적용하여 정적해석을 통해 얻은 응력과 중첩한 뒤 각 점용접부의 피로수명을 예측한다. 나아가 위치에 변화에 따라 피로수명에 영향을 받는 점용접을 설계 변수로(Design variable)선정하고 반응표면법(Response

† 교신저자: 정희원, 국민대학교

E-mail : hjyim@kookmin.ac.kr

Tel : (02)914-8812, Fax : (02)910-5037

* 국민대학교 자동차공학 전문대학원

Surface Method)를 통해 점용접과 속 타워부의 피로 수명을 동시에 증가시키는 점용접 위치최적설계를 수행한다.

2. 속 타워부와 점용접 피로해석

2.1 해석 모델의 구성

본 연구를 위해 Fig. 1의 실제 차량의 오른쪽 뒷부분 현가장치 위의 속 타워부를 해석 모델로 선정하였다. 속 타워부는 차체와 연결되는 휠 하우스 부분과 휠 하우스에 연결되어 현가장치를 지탱해 주는 지지 휠 하우스, 지지 휠 하우스 안쪽의 보강재, 속 업소버 마운트로 구성이 되어 있다. 피로해석에 앞서 선정된 모델을 유한요소모델로 전환하였으며 각 부재는 쉘 요소로 모델링 되었다. 전체 요소 개수는 28,963개이고 각 부재를 연결하는 점용접의 개수는 총 33개이다. 본 연구에서는 해석의 신뢰도가 높고 쉘 요소와 쉘 요소를 쉽게 연결하는 CWELD 요소⁽⁴⁾로 점용접 부분을 모델링 하였으며 요소의 너짓 지름은 4mm로 정의하였다.

2.2 준 정적 내구해석

생성된 해석 모델을 기반으로 피로해석을 진행하기 위해서는 준 정적 내구해석(Quasi-static fatigue analysis)⁽⁵⁾을 수행해야 한다. 준 정적 내구해석이란 정적 하중에 의한 해석 결과와 시간영역에서 정의되는 동하중 이력을 중첩하여 응력 또는 변형률을 구하는 방법이다. 이 방법을 토대로 피로해석을 하기 위해 스프링 마운트 센터 부분에 X, Y, Z 방향으로 단위하중 1N을 가하였다. 경계조건은 지지 휠 하우스와 보강재, 하중이 직접 전달되는 속 업소버 마운트 부분은 각각 두 개의 핀으로 연결되고 휠 하우스는 차체와 점용접으로 연결된다. 이를 적용하기 위해 휠 하우스의 점용접 위치를 6자유도 구속을 하고 핀으로 연결된 각 부재를 강체 요소로 결함을 하였다. 단위하중에 의한 정적 해석 값을 기초로, 차량이 30km/h의 속도로 내구 시험로를 주행할 때 속 업소버 마운트의 중심에서 측정된 동하중 이력을 중첩시켜 피로해석에 적용하였으며 X, Y, Z 방향으로 측정된 동하중 이력은 Fig. 3과 같다. 측정된 동하중 이력은 100초 동안 측정되었으며 종, 횡, 수직 방향의 동하중 이력을 단위 하중에 중첩시켜 피로 해석을 수행하였다. 피로해석에는 MSC/Fatigue가 사용되었다. 피로해석 시 불규칙한 동하중 이력에 의해 발생하는 응력을 카운트하기 위해 레인플로우 카운팅(Rainflow counting method)⁽⁵⁾ 등의 카운팅 방법

을 사용하여 응력의 횡수가 계산된다, 나아가 S-N곡선을 이용한 응력 수명접근법과 마이너 법칙(Minor's rule)⁽⁵⁾에 의해 피로 손상률이 계산된다. 위에서 언급한 피로해석 과정을 Fig. 2에 나타내었다.

2.3 속 타워 피로해석 및 비교

2.2절에서 설명한 과정대로 해석을 진행하여 속 타워의 어느 위치에서 피로파괴가 가장 먼저 발생할 것인지를 예측해보았다. Fig. 4에 나타난 해석 결과를 살펴보면 속 업소버 마운트와 현가장치가 연결되는 속 타워 부분에 100초 동안 가해진 동하중이 1.33×10^4 번(Life in repeats) 반복되면 피로파괴가 발생하며 주행거리는 11,079km라는 결과를 얻었다. 이 결과는 실제 내구 시험 시 피로파괴가 발생한 속 타워 부분과 일치한다는 것을 Fig. 4에 나타난 실험 결과를 통해 알 수 있다.

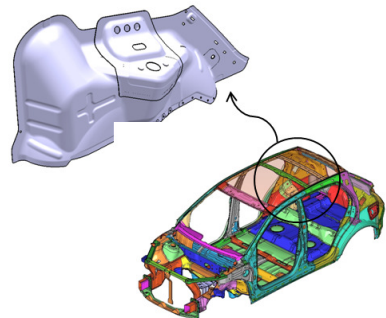


Fig. 1 BIW and shock tower structure

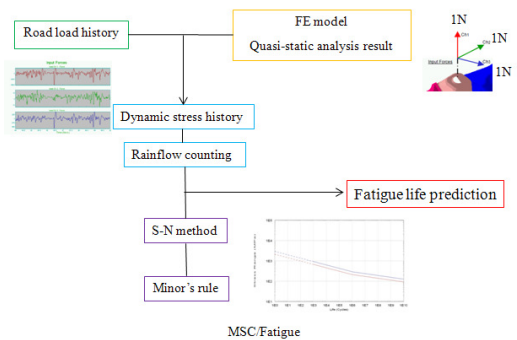


Fig. 2 Process of fatigue analysis

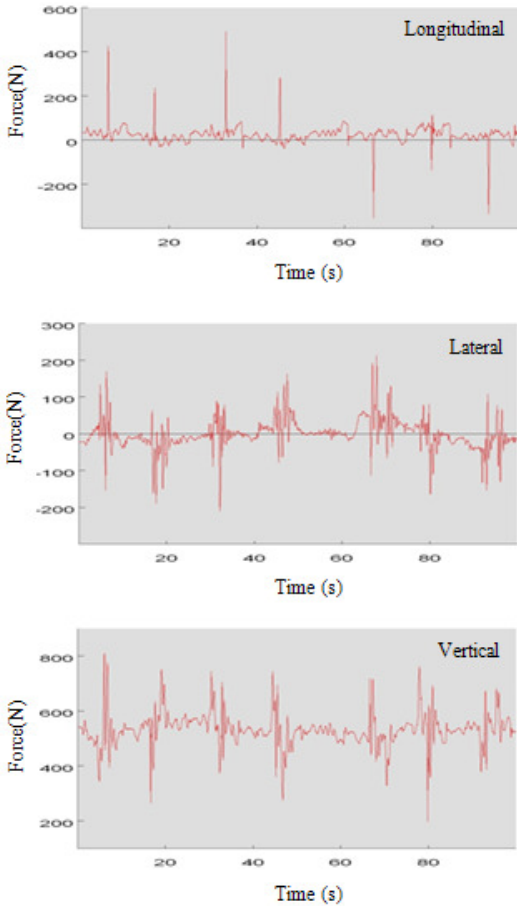


Fig. 3 Road load time history

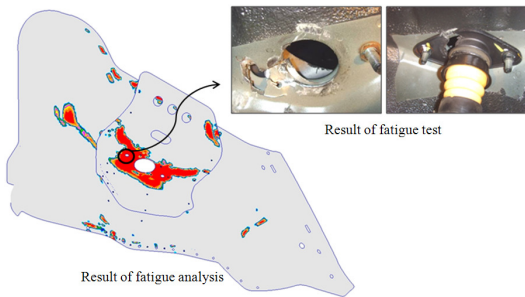


Fig. 4 Result of fatigue analysis

2.4 속 타워의 점용접부 피로해석

2.3절에서는 속 타워와 속 타워를 이루고 있는 부재에 대해 피로해석을 수행하였다. 그러나 본 연구의 목적이 점용접부의 피로수명을 증가시킴으로 속 타워의 피로수명까지 증가시키는 것이므로 점용접부에 대한 피로해석을 수행해야만 한다. 일반적으로

로 점용접으로 연결된 구조물의 경우 피로파괴가 점용접부에서 먼저 발생하는 경우가 존재하기 때문이다.

해석 과정은 속 타워 피로해석 과정과 동일하며 점용접 피로해석에 적용되는 S-N 곡선을 설정한 뒤 MSC/Fatigue의 점용접 피로해석 모듈(SPOTW)을 사용하여 해석을 수행하였다. 해석 결과를 살펴보면 속 타워 피로해석 결과와 동일하게 속 업소버 마운트와 보강재, 휠 하우스가 핀으로 연결되는 부분에 위치한 점용접의 내구성이 가장 약한 것을 확인할 수 있었으며 이를 Fig. 5에 나타내었다. 라이프인 리펫은 2.55×10^3 이고 주행거리로 환산하였을 경우 2,124km이다.

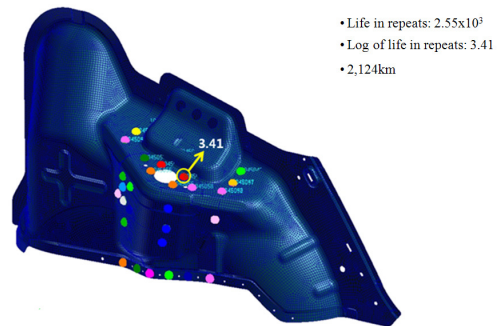


Fig. 5 Result of spot weld fatigue analysis

3. 점용접 위치최적 설계

3장에서는 설계 모델의 피로수명을 증가시키기 위해 점용접 위치 최적설계를 수행한다. 먼저 최적설계를 위한 설계변수를 선정한다. 나아가 선정된 설계 변수를 토대로 반응표면법을 통해 점용접의 피로수명뿐만 아니라 속 타워의 피로수명도 증가시키는 점용접 위치 최적설계를 진행한다.

3.1 설계 변수 선정

본 절에서는 피로파괴가 발생하는 점용접의 위치를 이동시킬 때 점용접의 피로수명 변화를 분석함으로써 위치에 따라 피로수명에 민감한 점용접을 선정한다.

이전 모델은 Fig. 6와 같이 6개의 점용접이 각 부재를 연결하고 있다. 우선 점용접의 위치 최적설계를 위해 일정한 간격으로 점용접을 추가로 배치하고 기준 피로수명 이상의 점용접을 제거함으로써 설계 변수를 선정한다. 각 점용접 간의 간격은 20mm이며 8개의 점용접을 추가하여 총 14개의 점

용접을 가지는 수정된 해석모델을 대상으로 피로 해석을 수행하였으며 Fig. 7에 기존의 점용접과 추가된 점용접의 위치를 나타내었다.

총 14개의 점용접에 설계변수에 1~14까지 번호를 부여하고 점용접 피로해석을 수행하였으며 Table 1에 결과를 정리하였다. 각 점용접의 피로수명을 살펴보면 대부분의 점용접이 무한 수명에 가까운 값을 가진다는 것을 Table 1을 통해 알 수 있다. 기존 6개의 점용접(Original)을 제외하고 추가된 8(new)개의 점용접 중 피로수명이 짧은 순서로 7, 10, 13 점용접을 설계변수로 선정하였다. 최종적으로 선정된 설계변수 9개의 점용접의 위치는 Fig 8과 같다.

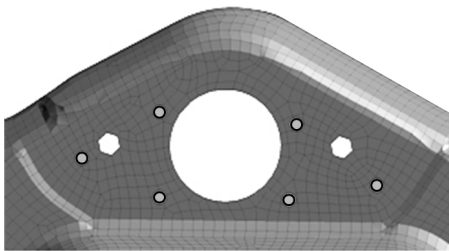


Fig. 6 Location of original spot weld

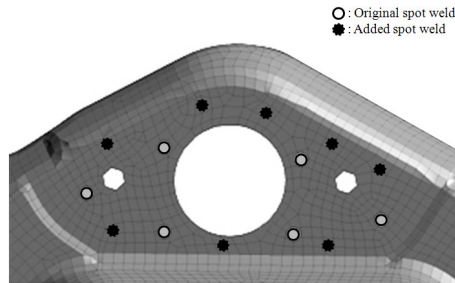


Fig. 7 Location of added spot weld

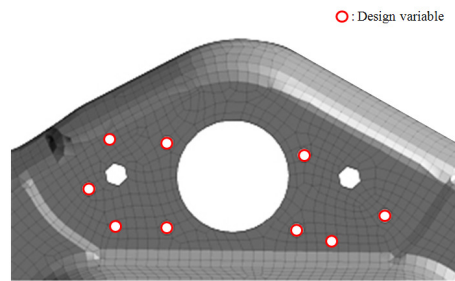


Fig. 8 Location of design variables

Table 1 Spot weld fatigue analysis results

Design variable	Life repeats	km
1(original)	1.0×10^{10}	8.7×10^6
2(original)	7.8×10^5	6.5×10^2
3(original)	2.5×10^6	2.1×10^6
4(original)	7.4×10^4	6.0×10^1
5(original)	3.8×10^5	3.1×10^2
6(original)	5.6×10^9	4.7×10^6
7(new)	2.6×10^6	2.2×10^3
8(new)	2.2×10^8	1.8×10^5
9(new)	1.8×10^8	1.5×10^5
10(new)	3.5×10^5	2.9×10^2
11(new)	1.3×10^{12}	1.0×10^9
12(new)	1.1×10^{10}	9.4×10^6
13(new)	7.3×10^4	6.0×10^1
14(new)	1.8×10^8	1.5×10^5

3.2 점용접 위치 최적설계

3.1절에서 선정된 9개의 점용접을 설계변수로 하여 기본모델(Base model)을 생성하였다. 이전의 피로 해석 수행과 동일한 조건으로 기본 모델의 피로 해석과 점용접 피로해석을 각각 수행하였으며 그 결과를 Fig. 9과 Fig. 10에 나타내었다. 속 타워부의 최소수명을 라이프인 리핏으로 나타내면 1.60×10^5 , 점용접의 최소수명은 1.3×10^4 이다. 이를 주행거리로 환산할 경우 각각 133,280km, 10,996km이다. 이상의 결과를 바탕으로 기본모델 수명 이상의 피로수명을 가지는 점용접 위치 최적설계를 진행한다. 최적화를 위한 제약조건 및 목적함수를 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize fatigue life of spot weld} \\
 & \text{Subject to} \\
 & \text{Minimum fatigue life of spot weld} \geq \text{Base model}
 \end{aligned} \tag{1}$$

본 연구에서는 점용접 위치 최적설계를 위해 반응표면법을 사용하였다. 반응표면모델을 생성하기 위하여 ISCD-II(Incomplete Small Composite Design-II) 실험계획법을 사용하였다. 이는 플라켓-버만(Plackett-Burman) 실험점에 중심점만 추가한 것으로 가장 적은 횟수의 실험횟수를 지니는 실험계획법이다⁽⁶⁾.

실험계획표를 작성하기 위해 설정된 9개의 점용접에 대해 각각 X, Y축 방향을 고려한 총 18개의 요인(DV1~DV18)을 선정하였으며 실험계획표에 의해 총 54회의 해석을 수행하였다. 54번의 해석 시 적용

되는 각 방향으로의 섭동량은 $\pm 1.5\text{mm}$ 이다.

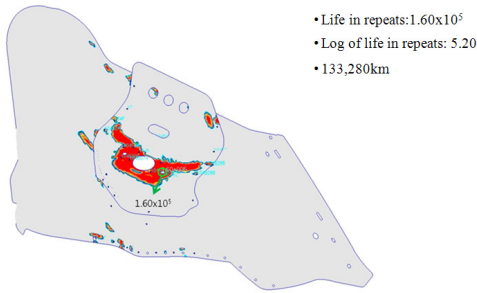


Fig. 9 Result of fatigue analysis(base model)

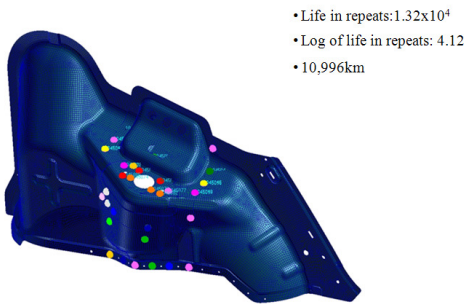


Fig. 10 Result of spot weld fatigue analysis(base model)

보다 정확한 반응표면모델을 생성하기 위해 54번의 해석결과를 분석하여 점용접의 피로수명에 직접적으로 영향을 미치는 요인을 분석하였다. Easy Design 프로그램을 사용하여 점용접의 위치와 피로수명의 관계를 분석하였다. 그 결과 피로수명에 영향을 미치는 요인을 20% 수준에서 스크리닝 했을 때 총 5개의 요인이 남는다. 그러나 이중 요인 1번(DV1)과 요인 12번(DV12)의 경우 점용접 자체의 수명이 무한수명에 가깝기 때문에 상대적으로 수명이 짧은 나머지 3개의 요인을 선정하여 반응표면모델을 생성한다. 선정된 요인은 점용접 번호 3(A), 4(B), 5(C)번의 Y축 방향으로의 이동이며 각 점용접의 위치를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에 표기된 세 가지 요인을 토대로 반응표면모델을 생성한다. 반응표면을 생성하기 위해 박스-벤켄법(Box-Behnken)⁽⁸⁾에 의해 만들어진 Table 2와 같은 실험계획표를 이용하여 총 30번의 해석을 진행하였다. 각 변수의 섭동량은 $\pm 5\text{mm}$ 로 설정하였으며 선정되지 않은 점용접은 기본모델의 위치에 고정시키고 MINITAB을 사용하여 반응표면모델을 생성한 뒤 최적화를 진행하였다.

●: New design variable

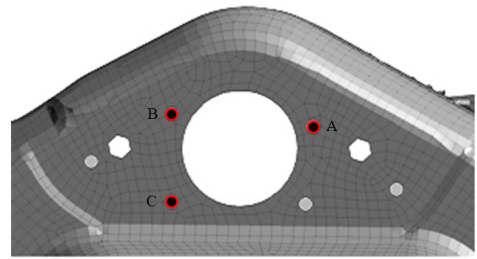


Fig. 11 Location of new design variables

Table 2 Design of experiment for Box-Behnken design

Case	DV2	DV3	DV3	Case	DV4	DV5	DV6
1	0.0	0.0	0.0	16	0.0	5.0	-5.0
2	5.0	-5.0	0.0	17	0.0	0.0	0.0
3	-5.0	0.0	-5.0	18	-5.0	-5.0	0.0
4	5.0	0.0	5.0	19	5.0	5.0	0.0
5	-5.0	0.0	5.0	20	0.0	0.0	0.0
6	-5.0	-5.0	0.0	21	5.0	5.0	0.0
7	0.0	5.0	-5.0	22	0.0	5.0	5.0
8	-5.0	5.0	0.0	23	5.0	0.0	-5.0
9	-5.0	0.0	-5.0	24	0.0	-5.0	-5.0
10	0.0	0.0	0.0	25	5.0	-5.0	0.0
11	0.0	-5.0	5.0	26	0.0	-5.0	5.0
12	0.0	-5.0	-5.0	27	0.0	0.0	5.0
13	-5.0	5.0	0.0	28	5.0	0.0	5.0
14	0.0	0.0	0.0	29	0.0	5.0	5.0
15	-5.0	0.0	-5.0	30	-5.0	0.0	5.0

3.3 최적화 결과 및 검증

MINITAN을 사용하여 이루어진 최적화 결과를 살펴보면 A 용접은 현재 위치에서 음의 Y축 방향으로 1.4mm, B 용접은 양의 Y축 방향으로 2.0mm, C 용접은 양의 Y축 방향으로 5.0mm 이동하였을 때 최대 피로수명을 가진다는 결과를 얻을 수 있었다. 구체적으로 최적화된 위치로 각 점용접을 이동시키면, 기본모델에 비해 A 용접은 139.6%, B 용접은 29.2%, C 용접은 95.0% 피로수명이 증가된 점용접 위치 최적화가 수행되었다.

반응표면모델을 통해 이루어진 최적화 결과를 검증하기 위하여 최적화 된 위치에 A, B, C 점용접을 위치시킨 후 점용접 피로해석을 수행하였다. 그 결과 최적화 된 결과와 피로해석 결과의 오차가 각각 1.9%, 2.6%, 6.1% 로 결과가 거의 일치한다는 것을 확인할 수 있었다. 기본모델과 최적화 모델과의 비

교 및 해석 결과와의 비교 검증 결과를 Table 3, 4에 정리하였다.

최종적으로 최적화된 점용접의 위치를 적용하여 속 타워부의 피로수명을 해석하였다. 그 결과 최소 수명이 2.1×10^5 으로 기본모델에 비해 33.8% 증가되었으며 km로 환산할 경우 133,280km에서 178,262km로 증가하였다.

Table 3 Comparison between base model and RSM

Spot weld	A	B	C
Base model	3.5×10^5	1.3×10^4	1.6×10^5
RSM	8.1×10^5	1.8×10^4	2.9×10^5
Increase	139.6%	29.2%	95.0%

Table 4 Comparison between analysis and RSM

Spot weld	A	B	C
Analysis	8.3×10^5	1.7×10^4	3.1×10^5
RSM	8.1×10^5	1.8×10^4	2.9×10^5
Error	1.9%	2.6%	6.1%

4. 결론

본 연구에서는 불규칙 진동하중을 받는 속 타워부의 피로수명을 증가시키는 것을 목표로 속 타워부의 점용접에 대한 위치 최적설계를 수행하였다. 최적화에 앞서 초기 6개의 점용접을 14개로 증가시킨 후 수명 분석을 통해 9개의 점용접을 설계변수로 선택하였다. 9개의 점용접의 X, Y축 방향을 고려하여 18개의 요인을 적용한 실험계획표를 생성하고 해석을 수행하였다. 해석을 통해 확인된 각 점용접의 위치와 피로수명의 관계를 분석하여 18개의 요인 중 3개의 요인만을 선택하여 반응표면모델을 생성하고 점용접의 피로수명을 최대화하는 점용접의 위치최적화를 진행하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 최적화된 위치에 놓인 A, B, C 점용접의 피로수명은 기본모델에 비해 139.6%, 29.2% 95.0% 증가하였다. 반응표면모델을 통해 얻은 최적화 결과를 검증하기 위해, 최적화된 점용접의 위치를 적용하여 피로해석을 수행하였다. 그 결과 각 점용접의 피로수명이 반응표면모델과 1.9%, 2.6%, 6.1%의 차이를 보였다.

2) 최종적으로 최적화된 결과에 점용접을 위치시키고 속 타워부의 피로해석을 수행한 뒤 기본 모델과의 피로 수명을 비교한 결과 최소 피로수명이 33.75% 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

3) 단순히 속 타워의 두께를 증가시키거나 보강재를 덧대는 방법으로 피로수명을 증가시키는 방법이 아닌 점용접부의 피로수명을 증가시킴으로 동시에 속 타워부의 피로수명까지 증가시킬 수 있음을 확인하였다. 이는 향후 실제 차량의 피로파괴 현상을 해결하는데 이용이 될 수 있을 것으로 예상된다.

참고 문헌

- (1) Puchner. K., Dannbauer. H. and Meise. M., 2006, Spot Weld Optimization Regarding Stiffness and Fatigue Using Standard Software, SAE 2006 World Congress & Exhibition, No. 2006-01-1247.
- (2) Eom., J. S., Joo., B. H. and Lee., B. C., 2006, Optimization on The Spot Welded Configuration of Vehicle Components Considering The Structural Performance, KSME 2005 fall conference, pp. 1638~1641.
- (3) Lee., S. B., Jeon, S. H. and Yim., H. J., 2008, Optimum Design of Welding Pitch Considering Fatigue Life of Spot Welding Nuggets, Trans. of the KSME, Vol. 16, No.4, pp. 179~185.
- (4) Jeon., S. H., 2003, A Study on the Spot Welding Pitch Optimization for Thin-Walled Structures Considering Fatigue Life, Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, A Master's Thesis.
- (5) Lee., C. W., 2002, Shape Optimization for Maximizing Fatigue Life of Suspension Component Using the Experimental Design, Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, A Master's Thesis.
- (6) Kim., B. J., 2005, Multidisciplinary Design Optimization of an Aluminum Space Frame, Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, A Doctor's Thesis.