

불규칙 진동하중을 받는 속 타워의 피로수명을 고려한 점용접 위치 최적설계

A Study on an Optimal Spot-weld Layout Design for a Shock Tower Structure Considering the Fatigue Life under Random Vibration Loads

이 용 훈* · 이 승 윤* · 배 복 수* · 이 상 범* · 임 홍 재†

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

(2011년 4월 25일 접수 ; 2011년 8월 2일 심사완료)

Key Words : Spot-weld(점용접), Shock Tower(속 타워), Fatigue Analysis(피로해석), Optimal Layout Design
(위치 최적설계)

ABSTRACT

In this paper, optimal spot weld layout design for a shock tower structure is presented. This design increases the fatigue life of the spot-welds thereby increasing the fatigue life of the shock tower itself. In order to predict the fatigue life, a quasi-static analysis has been conducted then a fatigue analysis was performed through the application of random vibration loads. In order to optimize the spot weld layout, the design variables that have an effect on the spot weld fatigue life were determined. A spot weld fatigue analysis was then conducted based on the experiment design. Finally, a response surface model was made using the fatigue analysis results and an optimized spot weld layout model, one that increases the fatigue life of the spot welds and thereby the fatigue life of the shock tower, was developed.

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 테두리의 점용접 개수와 위치를 최적화 하는 연구가 진행되었다⁽¹⁾. 이 연구는

각각의 점용접 부분의 밀도와 점용접 개수를 변경하여 원래의 내구수명과 비슷한 수명을 지니게 하는 점용접 개수를 정하는 것을 목표로 하였다. 또 다른 연구로는 불필요한 점용접 개수를 줄이는 동시에 차체의 동적강성을 유지시키고자 설계자가 참고할 수 있는 점용접 설계지수를 제시한 연구도 수행되었다⁽²⁾. 이 연구는 점용접 개수를 줄이기 위해 민감도를 고려한 생존횟수 순위를 제시하였지만 단순히 동적강성만을 고려하였으며 피로수명은 고려하지 않았다. 점용접의 피로수명을 고려한 점용접 위치최적화를 수행한 연구에서는 점용접으로 연결된 구조물의 피로수명은 고려하지 않고 점용접의 피로수명만을 고려하였다⁽³⁾.

이 연구에서는 상대적으로 피로파괴가 발생되기

† 교신저자; 정회원, 국민대학교
E-mail : hjyim@kookmin.ac.kr
Tel : (02)914-8812, Fax : (02)910-5037

* 국민대학교 자동차공학 전문대학원

이 논문의 일부는 2011년 춘계 소음진동 학술대회에서 발표되어 우수논문으로 추천되었음.

쉬운 속 타워를 대상으로 점용접의 피로수명과 속 타워의 피로수명을 동시에 증가시킬 수 있는 점용접 위치최적화를 수행하고자 한다. 첫 번째 단계로 이 연구의 대상이 되는 차체 오른쪽 후방 속 타워의 피로수명을 해석을 통해 예측하기 위해 유한요소모델을 생성하고 휠하우스와 속 타워, 보강재를 점용접한다. 생성된 모델에 구속조건을 설정하고 단위 하중을 가하여 정적해석을 수행한 뒤 실제 주행 시험을 통해 측정된 불규칙 진동하중 이력을 정적 해석을 통해 얻은 응력과 중첩하여 각 점용접의 피로수명을 예측한다. 나아가 위치의 변화에 따라 피로수명에 영향을 받는 점용접을 설계변수로 선정하고 반응표면법(response surface method)를 통해 점용접과 속 타워의 피로수명을 동시에 증가시키는 점용접 위치 최적설계를 수행한다.

2. 속 타워와 점용접 피로해석

2.1 해석 모델의 구성

이 연구를 위해 Fig. 1과 같이 차체의 오른쪽 후방에 위치한 속 타워를 해석 모델로 선정하였다. 속 타워는 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 점용접은 해석의 신뢰도가 높고 셀 요소와 셀 요소를 쉽게 연결하는 CWELD 요소⁽⁴⁾로 모델링 하였으며 요소의 너짓 지름은 4 mm로 설정하였다.

2.2 불규칙 진동하중 이력해석

이 연구에서는 해석을 통해 속 타워 및 점용접의

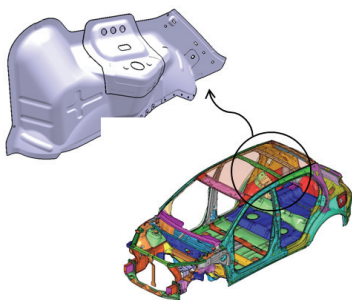


Fig. 1 BIW and a shock tower structure

피로수명을 예측하기 위해, 차량이 30 km/h의 속도로 내구 시험로를 주행할 때 속 업소버 마운트의 중심에서 100초 동안 측정된 불규칙 진동하중 이력을 시험을 통해 측정하였다. 측정된 X, Y, Z 방향으로의 불규칙 진동하중 이력은 Fig. 3과 같다.

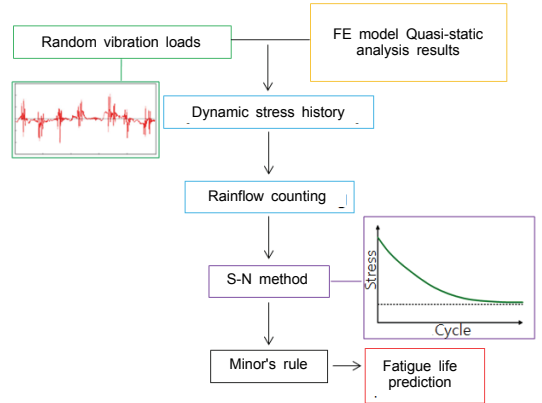


Fig. 2 Process of a fatigue analysis

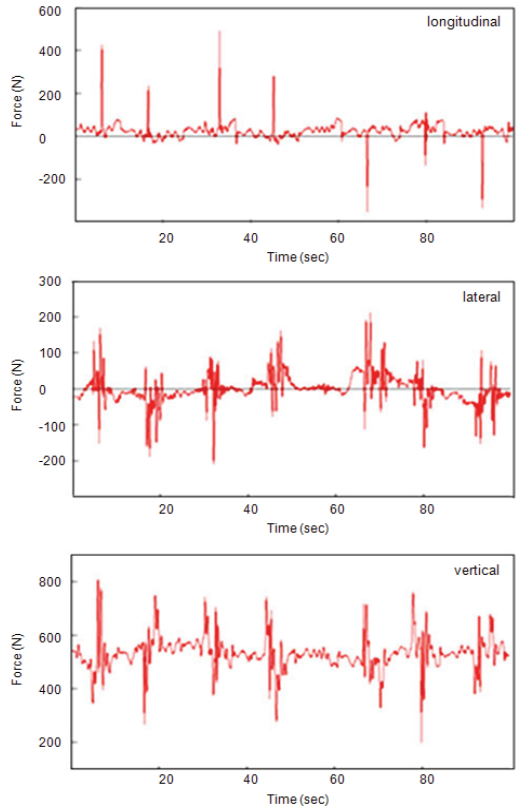


Fig. 3 Random vibration loads

2.3 준정적 내구해석

생성된 해석 모델 및 측정된 진동하중 이력을 기반으로 피로해석을 진행하기 위해서는 준정적 내구해석(quasi-static fatigue analysis)⁽⁵⁾을 수행해야 한다. 준정적 내구해석이란 정적 하중에 의한 해석 결과를 시간영역에서 정의되는 불규칙 진동하중 이력과 중첩하여 응력 또는 변형률을 구하는 방법이다. 이 방법을 토대로 피로해석을 하기 위해 스프링 마운트 센터 부분에 X, Y, Z 방향으로 단위하중 1 N을 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 위치에 6자유도를 모두 구속하고 핀으로 연결된 각 부재를 강제 요소로 결합하였다. 단위하중에 의한 정적 해석 값을 토대로 측정된 불규칙 진동하중 이력을 단위하중에 의한 해석 결과와 중첩하여 피로해석에 적용하였다. 이 연구의 피로해석에는 상용 프로그램인 MSC/Fatigue가 사용되었다. 피로해석 시 불규칙한 진동하중 이력에 의해 발생하는 응력을 카운트하기 위해 레인플로우 카운팅(rainflow counting method)⁽⁵⁾ 등의 카운팅 방법을 사용하여 응력의 횡수가 계산되며, S-N 곡선을 이용한 응력 수명접근법과 마이너 법칙(minor's rule)⁽⁶⁾에 의해 피로 손상률이 계산된다. 위에서 언급한 피로해석 과정을 Fig. 2에 나타내었다.

2.4 속 타워의 피로해석

2.2절에서 설명한 과정대로 피로해석을 진행하여 속 타워의 어느 위치에서 피로파괴가 가장 먼저 발생할 것인지를 예측해보았다. Fig. 4에 나타낸 해석 결과를 살펴보면 속 업소버 마운트와 현가장치가 연결되는 속 타워 부분에 100초 동안 가해진 불규칙 진동하중이 1.33×10^4 번(life in repeats) 반복되면 피로파괴가 발생할 수 있다는 해석 결과를 얻었다. 이 결과는 실제 내구 시험 시 피로파괴가 발생한 속 타워 부분과 일치한다는 것을 Fig. 4에 나타낸 실험 결과를 통해 알 수 있다. 이러한 결과를 기반으로 이 연구에서는 측정된 불규칙 진동하중 이력을 피로해석에 적용한 뒤 점용접의 위치 최적화를 통해 점용접 및 속 타워의 피로수명을 증가시키고자 한다.

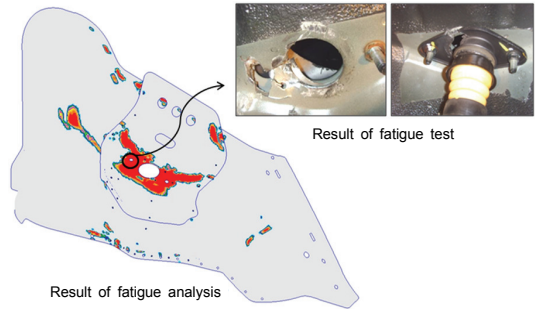


Fig. 4 Result of a fatigue analysis

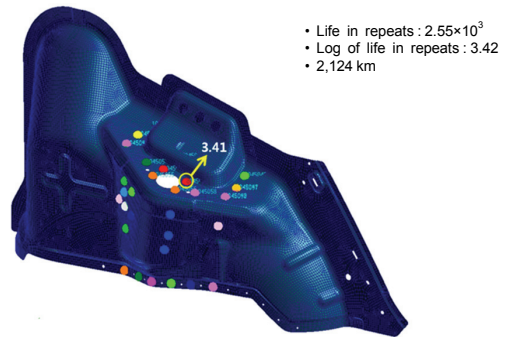


Fig. 5 Result of the spot weld fatigue analysis

2.5 속 타워의 점용접 피로해석

2.3절에서는 속 타워와 속 타워를 이루고 있는 부재에 대해 피로해석을 수행하였다. 그러나 이 연구의 목적이 점용접의 피로수명을 증가시킴으로 속 타워의 피로수명까지 증가시키는 것이므로 점용접에 대한 피로해석을 수행해야만 한다. 일반적으로 점용접으로 연결된 구조물의 경우 피로파괴가 점용접에서 먼저 발생할 수 있기 때문이다⁽⁷⁾.

해석 과정은 속 타워 피로해석 과정과 동일하며 점용접 피로해석에 적용되는 S-N 곡선을 설정한 뒤 MSC/Fatigue의 점용접 피로해석 모듈을 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 있으며 이를 Fig. 5에 나타내었다.

3. 점용접 위치최적 설계

3장에서는 설계 모델의 피로수명을 증가시키기

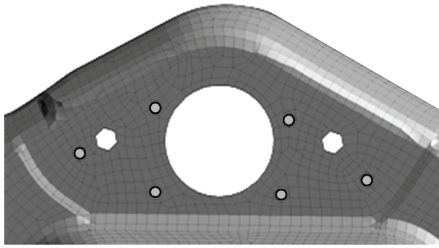


Fig. 6 Location of original spot weld

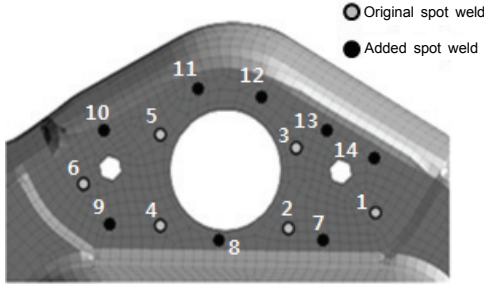


Fig. 7 Location of added spot weld

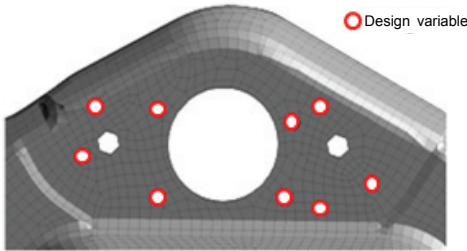


Fig. 8 Location of design variables

위해 점용접 위치 최적설계를 수행한다. 먼저 최적설계를 위한 설계변수를 선정한다. 나아가 선정된 설계 변수를 토대로 반응표면법을 통해 점용접의 피로수명뿐만 아니라 속 타위의 피로수명도 증가시키는 점용접 위치 최적설계를 진행한다.

3.1 설계 변수 선정

이 절에서는 상대적으로 내구성이 약한 점용접의 위치를 이동시킬 때 점용접의 피로수명 변화를 분석함으로써 위치에 따라 피로수명에 민감한 점용접을 선정한다.

기존 모델은 Fig. 6과 같이 6개의 점용접이 각 부재를 연결하고 있다. 우선 점용접의 위치 최적설계를 위해 일정한 간격으로 점용접을 추가로 배치하고

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

기존 피로수명 이상의 점용접을 제거함으로써 설계 변수를 선정한다. 각 점용접 간의 간격은 20 mm이며 8개의 점용접을 추가하여 총 14개의 점용접을 가지는 수정된 해석모델을 대상으로 피로해석을 수행하였으며 Fig. 7에 기존의 점용접과 추가된 점용접의 위치를 나타내었다.

총 14개의 점용접에 1~14까지 번호를 부여하고 동일한 과정으로 점용접 피로해석을 수행하였으며 Table 1에 해석 결과를 정리하였다. 각 점용접의 피로수명을 살펴보면 대부분의 점용접이 무한 수명에 가까운 값을 가진다는 것을 Table 1을 통해 알 수 있다. 그러나 4번, 5번 점용접의 경우 피로수명이 상대적으로 짧은 것을 해석 결과를 통해 확인할 수 있다. 이는 속 업쇼버 마운트 중심에 가해지는 불규칙 진동하중에 의해 점용접 4번과 5번 주위에서 상대적으로 높은 응력이 발생되기 때문이다.

Table 1에 나타난 각 점용접의 피로수명을 토대로 위치의 변화에 따라 피로수명에 민감한 설계변수를 선정하고자 한다. 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.

3.2 점용접 위치 최적설계

3.1절에서 선정된 9개의 점용접을 설계변수로 하여 기본모델을 생성하였다. 이전의 피로해석과 동일한 조건으로 기본모델의 피로해석과 점용접 피로해석을 각각 수행하였으며 그 결과를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 속 타워의 최소수명을 라이프인 리프트로 나타내면 1.60×10^5 , 점용접의 최소수명은 1.3×10^4 이다. 이러한 결과를 바탕으로 기본모델 수명 이상의 피로수명을 가지는 점용접 위치 최적설계를 진행한다. 최적화를 위한 제약조건 및 목적함수를 식 (1)과 같이 정의하였다.

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

이 연구에서는 점용접 위치 최적설계를 위해 반응표면법을 사용하였다. 반응표면모델을 생성하기 위하여 ISCD-II(incomplete small composite design-II) 실험계획법을 사용하였다. 이는 플라켓-버만(placket-burman) 실험점에 중심점만 추가한 것으로 가장 적은 횟수의 실험횟수를 지니는 실험계획법이다⁽⁸⁾.

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 적용되는 각 방향으로의 섭동량은 ± 1.5 mm이다.

보다 정확한 반응표면모델을 생성하기 위해 54번의 해석 결과를 분석하여 점용접의 피로수명에 직접적으로 영향을 미치는 요인을 분석하였다. Easy design 프로그램을 사용하여 점용접의 위치와 피로수명의 관계를 분석하였다⁽⁹⁾. 그 결과 피로수명에 영향을 미치는 요인을 20% 수준에서 스크리닝했을 때 총 5개의 요인이 남는다. 그러나 이 중 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

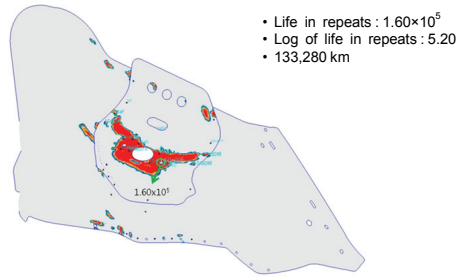


Fig. 9 Result of fatigue analysis(base model)

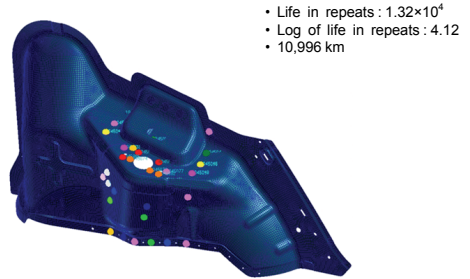


Fig. 10 Result of spot weld fatigue analysis(base model)

실험계획표를 이용하여 총 30번의 해석을 진행하였다. 각 변수의 섭동량은 ± 5 mm로 설정하였으며 선정되지 않은 점용접은 기본모델의 위치에 고정시킨 후 해석을 수행하였다. 해석된 결과를 토대로 상용 프로그램인 MINITAB을 사용하여 반응표면모델을 생성한 뒤 최적화를 진행하였으며 생성된 근사다항식은 식 (2)~(4)와 같다.

Polynomial approximation

$$\begin{aligned} & \text{Fatigue life of spot weld A} \\ & = 345168 - 1029944x - 73677y + 218805z \\ & \quad + 1377437x^2 + 115223y^2 - 201622z^2 \\ & \quad - 34902xy - 219379xz + 85179yz \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \text{Fatigue life of spot weld B} \\ & = 13203 - 460x + 2023y + 3054z + 2648x^2 \\ & \quad + 7638y^2 - 3007z^2 - 63xy + 8489xz + 5046yz \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \text{Fatigue life of spot weld C} \\ & = 156499 + 20283x - 8440y + 26348z + 15964x^2 \\ & \quad - 26002y^2 + 77558z^2 + 7732xy + 22422xz \\ & \quad + 107749yz \end{aligned} \quad (4)$$

$x, y, z = \text{movement of spot weld A, B, C}$

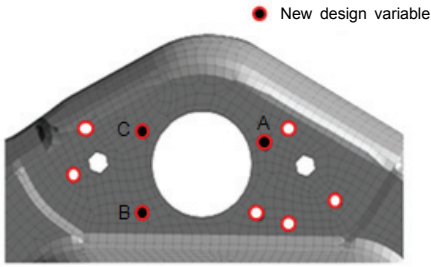


Fig. 11 Location of new design variables

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

MINITAB을 사용하여 얻은 근사다항식을 통한 최적화 결과를 살펴보면 A용접은 현재 위치에서 음의 Y축 방향으로 1.4 mm, B용접은 양의 Y축 방향으로 2.0 mm, C용접은 양의 Y축 방향으로 5.0 mm 이동하였을 때 최대 피로수명을 가진다는 결과를 얻을 수 있었다. 구체적으로 최적화된 위치로 각 점용접을 이동시키면, 기본모델에 비해 A용접은 139.6%, B용접은 29.2%, C용접은 95.0% 피로수명이 증가된 점용접 위치 최적화가 수행되었다.

반응표면모델을 통해 이루어진 최적화 결과를 검증하기 위하여 최적화 된 위치에 A, B, C점용접을 위치시킨 후 점용접 피로해석을 수행하였다. 그 결과 최적화 된 결과와 피로해석 결과의 오차가 각각

Table 3 Comparison of spot-weld fatigue life between the base model and the optimized model

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

Table 4 Difference between analysis results and optimized results

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

1.9%, 2.6%, 6.1%로 결과가 거의 일치한다는 것을 확인할 수 있었다. 기본모델과 최적화 모델과의 비교 및 해석 결과와의 비교 검증 결과를 Tables 3, 4에 정리하였다. 최종적으로 최적화된 점용접의 위치를 적용하여 속 타워의 피로수명을 해석하였다. 그 결과 최적화된 모델의 최소수명은 2.1×10^5 으로 기본모델에 비해 33.8% 증가되었다.

4. 결 론

이 연구에서는 불규칙 진동하중을 받는 속 타워의 피로수명을 증가시키는 것을 목표로 속 타워 점용접의 피로수명을 최대화하는 점용접 위치 최적설계를 수행하였다. 최적화에 앞서 9개의 점용접의 X, Y축 방향을 고려하여 18개의 요인을 적용한 실험 계획표를 생성하고 해석을 수행하였다. 해석을 통해 확인된 각 점용접의 위치와 피로수명의 관계를 분석하여 18개의 요인 중 3개의 요인만을 선택하여 반응표면모델을 생성하고 점용접의 피로수명을 최대화하는 점용접의 위치 최적화를 진행하였다. 이 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 최적화 결과와의 차이는 각각 1.9%, 2.6%, 6.1%였다.

(2) 최종적으로 최적화된 결과에 점용접을 위치시키고 속 타위의 피로해석을 수행한 뒤 기본 모델과의 피로수명을 비교한 결과 최소 피로수명이 33.8% 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

(3) 단순히 속 타위의 두께를 증가시키거나 보강재를 덧대는 방법이 아닌 점용접의 피로수명 증가를 통해 속 타위의 피로수명까지 증가시킬 수 있음을 확인하였다. 이는 향후 실제 차량의 피로파괴 현상을 해결하는데 이용이 될 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

이 연구는 2010년도 국민대학교 교내연구비를 지원 받아 수행되었음.

참 고 문 헌

(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) Fang, J., Hoff, C., Holman, B., Mueller, F. and Wallerstein, D., 2001, Weld Modeling with MSC.Nastran, pp. 4~7.

(5) Suresh, S., 1991, Fatigue of Materials, pp. 502~505.

(6) Julie, A. B., Jess, J. C. and James, L. H., 1989, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, pp. 199~200.

(7) Kang, K. W. and Kim, J. K., 2010, Vibration Fatigue Analysis for Multi-point Spot-welded SPCC Structure Considering Change of Dynamic Response, Trans. of the KSME, Vol. 34, No. 9, pp. 1193~1199.

(8) Raymond, H. M. and Douglas, C. M., 1995, Response Surface Methodology, pp. 169~324.

(9) Kim, M. S., 2009, User's Guide for Easy Design Version 1.0, pp. 25~30.