

서브프레임의 진동모드를 고려한 점용접 너깃의 피로수명 최적설계

Fatigue Life Optimization of Spot Welding Nuggets Considering Vibration Mode of Vehicle Subframe

이 상 범*, 이 혁 재**
(Sang Beom Lee*, Hyuk Jae Lee**)

*국민대학교 기계자동차공학부, **한국 MSC
(접수일자: 2009년 8월 4일; 채택일자: 2009년 9월 8일)

본 논문에서는 점용접 너깃의 피로수명을 고려한 차량 서브프레임의 용접간격 최적화 설계기법이 제안된다. 주파수영역 피로해석기법에 의해 점용접 너깃의 피로수명이 평가된다. 피로해석에서 사용되는 입력 데이터는 벨지안로 프로파일을 통과하는 차량동역학 해석과 차량 서브프레임 유한요소모델의 모드 주파수 해석을 통해 얻는다. 주파수 영역 피로해석으로부터 얻은 피로수명 결과로부터 용접간격 최적화를 수행 할 설계점들이 선정된다. 점용접 너깃의 피로수명을 최대화시키는 용접간격을 얻기 위하여 4-요인, 3-수준 직교배열 실험계획법이 사용된다. 본 연구를 통하여 최적화된 서브프레임은 초기모 델에 비하여 최소 피로수명을 갖는 용접 너깃의 피로수명이 약 65.8 % 증대되는 것을 알 수 있다.

핵심용어: 내구해석, 주파수 응답 해석, 최적설계, 점용접, 진동해석

투고분야: 구조음향 및 진동 분야 (11.1)

In this paper, welding pitch optimization technique of vehicle subframe is presented considering the fatigue life of spot welding nuggets. Fatigue life of spot welding nuggets is estimated by using the frequency-domain fatigue analysis technique. The input data, which are used in the fatigue analysis, are obtained by performing the dynamic analysis of vehicle model passing through the Belgian road profile and also the modal frequency response analysis of finite element model of vehicle subframe. According to the fatigue life result obtained from the frequency-domain fatigue analysis, the design points to optimize the weld pitch distance are determined. For obtaining the welding pitch combination to maximize the fatigue life of the spot welding nuggets, 4-factor, 3-level orthogonal array experimental design is used. This study shows that the optimized subframe improves the fatigue life of welding nugget with minimum fatigue life about 65.8 % as compared with the baseline design.

Keywords: Durability analysis, Frequency response analysis, Optimum design, Spot welding, Vibration analysis

ASK subject classification: Structural acoustics and vibration (11.1)

I. 서론

차량 구조물의 피로 손상 중 많은 부분이 점용접 부위에서 발생한다. 차량 구조물의 기대 수명이 다하기 전에 점용접부가 파손되면 소음과 진동이 심하게 발생하여 승차감이 떨어지며 차량 안전성도 크게 저하된다. 따라서 점용접부의 수명을 차량 개발의 초기 단계에서 정확하게 예측하고 적절하게 설계할 수 있다면 차량의 안전성을

높일 수 있을 뿐만 아니라 과잉설계를 피함으로써 제조비용도 감소시킬 수 있을 것이다.

내구도 (durability)를 평가하는 방법으로는 실험적인 방법과 더불어 최근 많이 활용되고 있는 가상 내구도 (virtual durability) 평가방법이 있다. 가상 내구도 평가 방법은 하드웨어 시작품을 만들지 않고도 내구수명 평가가 가능하기 때문에 제품개발을 위한 시간과 비용을 획기적으로 줄일 수 있는 장점을 가지고 있으며 이와 관련하여 그동안 많은 연구가 이루어졌다 [1~9].

가상 내구도 평가방법으로는 시간영역 내구해석 (time-domain durability analysis)과 주파수영역 내구해석

책임저자: 이 상 범 (sblee@kookmin.ac.kr)
136-702 서울시 성북구 정릉동 861-1 국민대학교 기계자동차공학부
(전화: 02-910-5044; 팩스: 02-910-5037)

(frequency-domain durability analysis)으로 분류할 수 있다. 시간영역 내구해석 방법은 구조물의 내구평가를 수행하는 기본적인 방법으로서 자동차 구조로부터 얻는 하중과 응답결과를 시간이력의 형태로 표현하는 방법으로서 동적 효과가 구조물의 피로수명에 미치는 영향이 무시할 수 있을 정도로 작다는 가정 하에서 사용되기 때문에 주요 강성이 큰 차량부품에 대한 내구평가에 적합한 방법이다 [10]. 그러나 대상 구조물이 유연하며 엔진이나 주행 노면 (driving road surface)을 통하여 가해지는 동하중이 구조물의 고유진동수와 근접할 경우에는 시스템의 동특성이 구조물의 피로수명에 심각한 영향을 미친다 [11]. 예를 들면 차량이 불규칙한 노면을 통과할 때, 차량의 서브프레임 (subframe)이 갖는 고유진동수와 노면으로부터 서브프레임에 전달되는 가진주파수 (excitation frequency)가 서로 근접하는 경우, 차량 시스템에 전달되는 동하중은 서브프레임의 피로수명에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 이러한 문제는 주파수영역 내구해석을 통해 피로수명에 대한 동적 특성을 고려할 수 있다. 주파수영역 내구해석은 가상시험로 (VPG: virtual proving ground)를 통과하는 차량 모델의 동역학 시뮬레이션을 통해 얻은 동하중 이력데이터와 서브프레임 유한요소모델의 주파수응답 데이터를 결합하여 수행한다.

본 연구에서는 유연한 동적 특성 (flexible dynamic characteristics)을 갖는 차량 전방 서브프레임의 점용접 부에 대한 내구수명을 분석하고 이를 기초로 용접너트의 피로수명을 최소화시키기 위한 용접 간격 최적화 설계기법을 개발하였다. 먼저 가상 벨지안로 (virtual Belgian road)를 통과하는 동역학 시뮬레이션을 수행하여 차량 전방 서브프레임에 가해지는 동하중 이력을 구하였으며 서브프레임에 대한 유한요소해석을 수행하여 동응력 (dynamic stress) 및 주파수응답 데이터를 산출하였다. 산출된 데이터들을 결합하여 주파수영역 내구해석을 수행하였으며 이를 통하여 서브프레임 점용접부의 피로수명을 평가하였다. 또한 3-수준 직교배열 실험계획법을 이용하여 용접점의 피로수명에 대한 민감도해석을 수행하였고 계산된 민감도를 이용하여 최적의 용접간격을 결정하였다. 본 연구를 통하여 개발한 설계기법의 효용성을 평가하기 위해 준중형 승용차의 전방 서브프레임을 대상으로 점용접 부에 대한 피로수명을 설정하고 이를 만족시키는 용접간격을 결정하였다.

II. 내구해석 이론

2.1 주파수영역 내구해석

주파수영역에 있어서 구조물의 피로손상은 응력 파워스펙트럼 밀도 (PSD: power spectral density) 함수의 통계적 특성을 근거로 하여 평가된다. 응력 파워스펙트럼 밀도함수는 일반적으로 유한요소 주파수 응답해석을 이용하여 산출되며 이것의 통계적 특성은 모멘트 파워스펙트럼 밀도함수를 통하여 구할 수 있다. 응력 파워스펙트럼 밀도함수의 n 번째 스펙트럼 모멘트는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df \quad (1)$$

여기서 f^n 은 구조물의 n 번째 주파수이고, $S(f)$ 는 응력 파워스펙트럼 밀도함수를 나타낸다.

재료피로특성 (material fatigue properties)은 일반적으로 응력진폭수준 S_i 와 평균파손사이클 (mean failure cycle)을 나타내는 N 사이의 관계를 정의하는 S-N 선도에 의해 평가된다. 높은 사이클($N \geq 10^3$) 피로문제에 경우 S-N 선도는 다음 식과 같이 간단한 형태로 표현된다.

$$B = NS_i^m \quad (2)$$

이 식에서 B 와 m 은 하중조건 및 평균응력, 표면처리, 온도 등과 같은 환경조건에 따라 변하는 재료물성치이다. 불규칙 하중에 의한 누적피로손상은 Palmgren-Miner 법칙에 의해 다음 식과 같이 표현된다.

$$D = \int_0^\infty \frac{n(S_i)}{N(S_i)} dS_i + \int_0^\infty \frac{p(S_i)N}{N(S_i)} dS_i \quad (3)$$

여기서 $n(S_i)$ 는 응력진폭수준 S_i 에서의 반복수를 나타내며, $p(S_i)$ 는 응력진폭의 확률밀도함수를 나타내고 있다. 식 (2)를 식 (3)에 대입하면 불규칙 응력응답으로부터 피로손상에 대한 일반식이 얻어진다.

$$D = \frac{TE(p)}{B} \int_0^\infty S_i^m p(S_i) dS_i \quad (4)$$

여기서 T 는 불규칙하중의 지속시간을 나타내며, $E(p)$

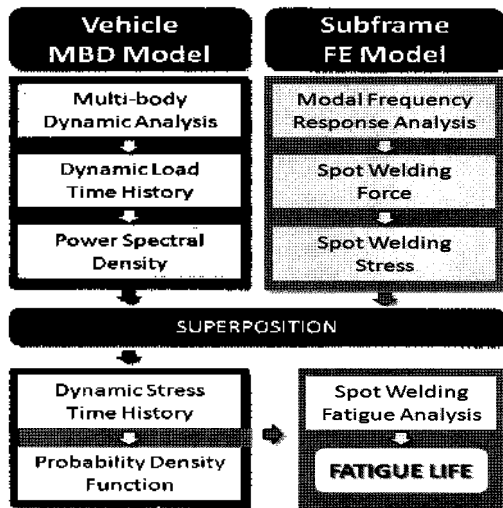


그림 1. 주파수 영역 내구해석 과정
Fig. 1. Process of frequency-domain durability analysis.

는 초당 피크의 회수를 나타낸다. 누적피로손상이 1보다 크면 구조물에서 파괴가 발생한다.

2.2 피로해석 과정

Fig. 1에 본 연구에서 수행하는 내구도 해석과정을 나타내고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 구조물 진동모드를 고려한 점용접 너깃 (nugget)의 내구해석을 수행하기 위해서는 크게 4 가지 해석과정을 수행하게 된다. 즉, 다물체 동역학 해석 (MBD: multi-body dynamic analysis)을 통하여 동하중 시간이력에 대한 파워 스펙트럼 밀도를 구하고 이와 동시에 서브프레임의 모드 주파수 응답해석 (modal frequency response analysis)을 통하여 용접점 너깃의 응력을 구한다. 이들 두 종류의 데이터를 연성하여 동응력 시간이력 데이터를 구한 후 이를 피로해석 과정에 입력하여 점용접 너깃들에 대한 피로수명을 평가한다.

III. 서브프레임의 유한요소해석

3.1 서브프레임 모델링

주파수영역 내구해석을 수행하기 위해 모델링한 준중형 승용차의 전방 서브프레임 유한요소모델을 Fig. 2에 나타내었다. 전방 서브프레임은 프론트 멤버 (front member), 리어 멤버 (rear member) 및 사이드 멤버 (side member) 등으로 구성되며, 각 멤버들은 외판 (outer panel), 내판 (inner panel) 및 보강판 (reinforcement panel) 등으로 구성되어 있다. 본 연구에서 사용한 모델은 56,000여개의 요소와 51,000여개의 절점 및 110개의 점용접 요

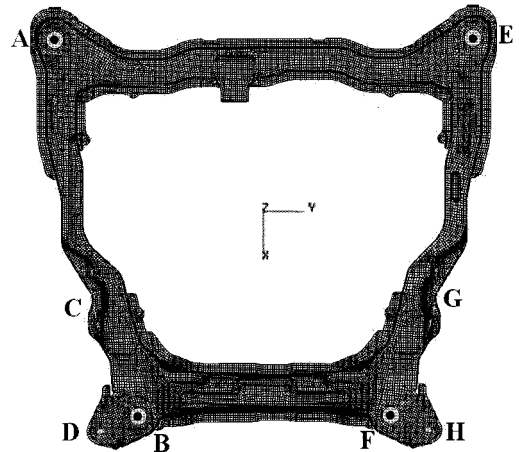


그림 2. 차량 서브프레임의 유한요소모델
Fig. 2. Finite element model of vehicle subframe.

표 1. 서브프레임의 재료물성치
Table 1. Material properties of subframe.

Young's modulus	2.1E+05 MPa
Poisson ratio	0.29
Density	7.85E-09 N·s ² /mm ⁴
Mass	21.6 kg

소 CWELD [12]로 모델링되었다. 용접요소는 외판, 내판, 보강판 등 박판 사이에서 각 박판에 수직하게 모델링하였다. 용접요소의 길이는 용접되는 전체 판 두께의 절반이 되도록 모델링하였으며, 너깃은 직경 5 mm로 모델링하였다. Table 1에 전방 서브프레임의 재료물성치를 나타내었다.

Fig. 2에서 A, B, E, F 점은 차체와 부싱 (bushing)으로 연결되며, C, D, G, H 점은 부싱을 통하여 LCA (lower control arm)와 연결된다. 따라서 노면으로부터 입력되는 동하중은 LCA의 볼 조인트 (ball joint)를 통해 C, D, G, H 점으로 전달되어 서브프레임의 용접 너깃들에 대한 피로수명에 영향을 주게 된다.

3.2 고유진동해석

전방 서브프레임 유한요소모델을 자유경계 구속조건 하에 Lanczos법을 이용하여 고유진동해석을 수행하였으며 그 결과 중 82.8 Hz의 1차 비틀림 진동모드와 117.7 Hz의 1차 굽힘 진동모드를 Fig. 3과 Fig. 4에 각각 나타내었다. 해석 결과로부터 전방 서브프레임이 80 Hz 이하로 가진다면 시스템의 동적 거동이 서브프레임의 내구수명에 거의 영향을 미치지 않겠지만 80 Hz 이상으로 가진다면 서브프레임의 고유진동수와 만나는 범위에서 공진이 발생할 수 있다. 즉, 80 Hz 이상의 주파수로 가진다면

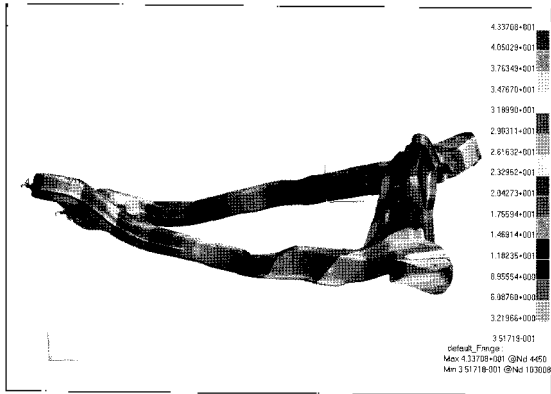


그림 3. 서브프레임의 1차 진동모드 (82.8 Hz)
Fig. 3. 1st vibration mode of subframe (82.8 Hz).

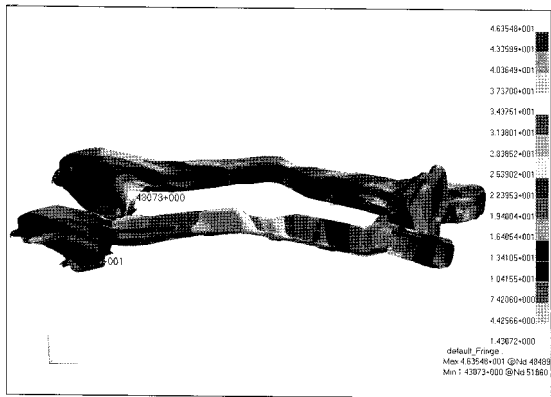
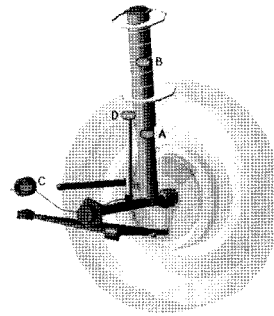


그림 4. 서브프레임의 2차 진동모드 (117.7 Hz)
Fig. 4. 2nd vibration mode of subframe (117.7 Hz).

서브프레임의 고유진동수를 고려한 해석방법이 사용되어야 한다는 것을 알 수 있다.

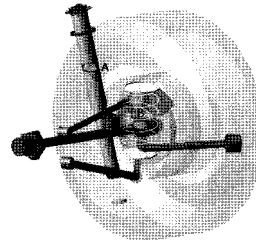
IV. 차량 동역학 해석

본 연구에서 사용한 실차 모델은 1,365 kgf 중량의 준중형 승용차로서 40 km/h의 속도로 가상 뱀지안로 100 m 구간을 통과하는 해석을 수행하였으며, 이를 통하여 전방 서브프레임에 가해지는 동하중이력 데이터를 구하였다. 본 연구에서 사용된 차량의 전방 현가장치는 맥퍼슨 스트럿형 (MacPherson strut type), 후방 현가장치는 더블 위시본형 (double wishbone type)으로 구성하였다. 전후 현가장치의 기구학적 모델은 다물체 동역학해석 프로그램인 ADAMS를 이용하여 모델링 하였으며 이를 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다. Fig. 7은 전방 서브프레임의 A-점에 가해지는 x, y, z 방향의 동하중 이력들을 각각 나타내고 있다.



A : Front Damper
B : Front Spring
C : Anti-roll Bar Bushing
D : Anti-roll Bar Pivot

그림 5. 맥퍼슨 스트럿형 전방 현가장치
Fig. 5. MacPherson strut type front suspension.



A : Rear Damper
B : Rear Spring

그림 6. 더블 위시본형 후방 현가장치
Fig. 6. Double wishbone type rear suspension.

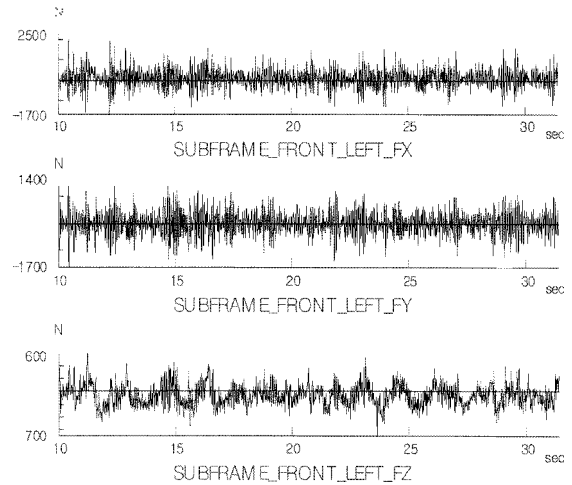


그림 7. 전방 서브프레임의 A-지점에 작용하는 동하중 이력
Fig. 7. Dynamic load histories acting at A-point of front subframe.

V. 서브프레임의 피로해석

5.1 피로해석 재료

본 연구에서는 피로해석 프로그램인 MSC/FATIGUE를 사용하여 내구해석을 수행하였으며 차량 시스템의 특성을 고려하여 판재는 SPOT_SHEET_GENERIC을 사용하였고, 너트는 SPOT_NUGGET_GENERIC을 사용하였다 [13]. Table 2에 재료물성치를 나타내었으며 판재와 너트에 대한 S-N 선도를 Fig. 8에 나타내었다.

표 2. 내구해석을 위한 시뮬레이션 조건
Table 2. Simulation conditions for durability analysis.

Material type	SPOT_SHEET_GENERIC	SPOT_NUGGET_GENERIC
Ultimate tensile strength	5.0E+02 MPa	5.0E+02 MPa
Elastic modulus	2.1E+05 MPa	2.1E+05 MPa
Stress range intercept	2.9E+03 MPa	2.1E+03 MPa
Fatigue transition life	1.0E+06 cycle	1.0E+06 cycle
First fatigue strength exponent	-0.1667	-0.1667
Second fatigue strength exponent	-0.09091	-0.09091
R-ratio of test	-1	-1

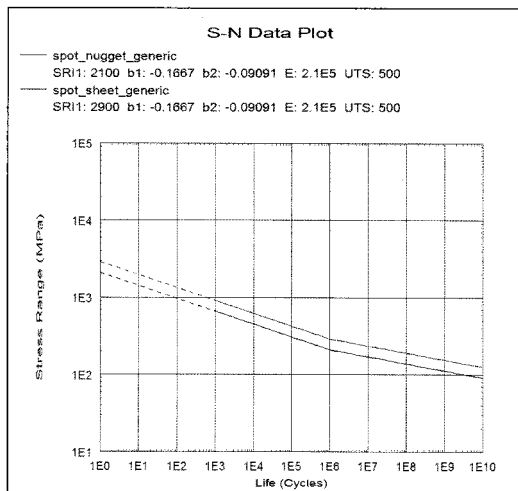


그림 8. 점용접의 시트와 너깃에 대한 S-N 선도
Fig. 8. S-N data plot on sheet and nugget of spot weld.

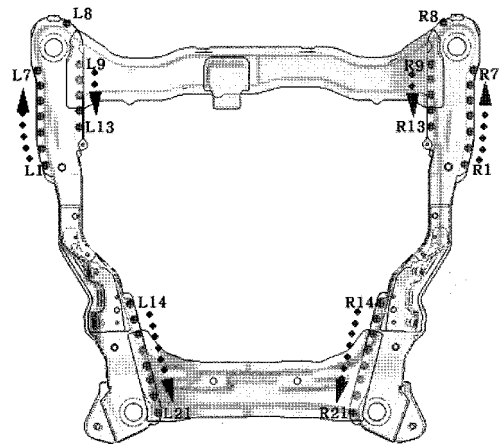


그림 9. 전방 서브프레임의 점용접 위치
Fig. 9. Spot welding positions of front subframe.

5.2 벨지안로 통과 내구도 평가

본 연구에서는 110개의 점용접 중 좌우측 사이드 멤버의 상판과 하판을 결합하는데 사용되는 42개의 용접점만을 대상으로 벨지안로 통과 피로해석을 수행하되, Fig. 9에 피로해석에 사용되는 용접 너깃의 위치를 L1~L21과 R1~R21로 나타내었다. 이 모델을 이용하여 피로해석을 수행하였으며 사용된 42개의 너깃 중 피로수명이 짧은 5개의 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

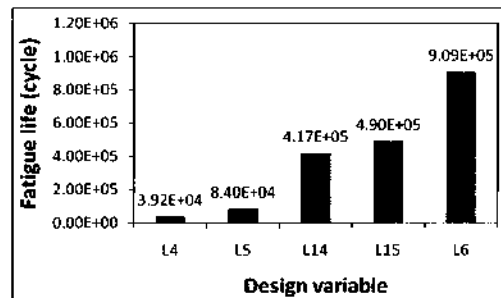


그림 10. 벨지안로 주행 시뮬레이션에 따른 차량 서브프레임의 용접너깃의 피로수명 사이클

Fig. 10. Fatigue life cycle of welding nuggets of vehicle subframe by Belgian road driving simulation.

VI. 점용접 위치최적설계

6.1 설계변수 선정

전용접 위치 최적설계를 수행하기 위하여 5.2절의 피로해석 결과에서 최소 피로수명을 보인 용접점 L4와 주변 용접점인 L3, L5, L6을 용접점 위치변경을 위한 설계변수로 선정하였으며, Fig. 11에서 보는 바와 같이 각 설계변수의 수준으로 수평방향이동 (-1, +1)과 이동하지 않는 값 (0)으로 설정하였다. 그리고 각 점용접 간 최소간

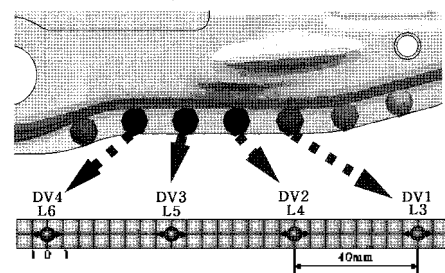


그림 11. 위치 최적화를 위한 설계변수
Fig. 11. Design variables for location optimization.

격은 25 mm로 제한하고 이동수준은 각 이동방향에 대해 5 mm로 선정하였다.

6.2 용접간격 민감도해석

직교배열 실험계획법을 이용하여 용접점의 위치 변동에 따른 너짓의 피로수명 사이칼에 대한 민감도 해석을 수행하였다. 이를 위해 먼저 Table 3과 같이 4인자 3수준 직교 배열표 $L_9(3^4)$ [14]를 작성한 후 각 실험모델에 대해 수파수영역 피로해석을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 12에 각 모델별로 나타내었다. 이 그림에서 적색은 피로수명이 가장 긴 것을 의미하고 청색은 피로수명이 가장 짧은 것을 의미한다. 그리고 화살표는 각 실험에 대하여 가장 짧은 피로수명을 나타내는 용접점의 위치를 표시하고 있으며 Table 3에 최소 피로수명 사이칼을 나타내었다.

Table 3에서 보는 바와 같이 가장 긴 피로수명을 나타내는 9번 실험과 가장 짧은 피로수명을 나타내는 3번 실험을 비교해 볼 때, 용접점의 위치변화에 따라 최소 피로수명이 약 1.8배의 차이가 발생함을 알 수 있다. 이는 용접너짓의 피로수명이 용접점의 위치변화에 매우 민감하게 반응한다는 것을 의미한다. 용접점의 위치변화가 너짓의 피로수명에 미치는 영향을 알아보기 위하여 민감도 해석을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 이 그림으로부터 최적화된 모델의 설계변수 L3, L4, L5, L6의 조합은 +1, -1, -1, -1임을 알 수 있다.

6.3 용접간격 최적설계

최적화된 용접간격을 Fig. 14에 나타내었으며, 이 모델에 대하여 피로해석을 수행한 결과를 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 보는 바와 같이 최적화된 모델은 40 mm

표 3. 각 실험 모델에 따른 용접점 L-4의 피로수명
Table 3. Fatigue life of the welding point L4 in each experimental model.

	L3	L4	L5	L6	Minimum Life cycle
1	0	0	0	0	3.92E+04
2	0	-1	-1	-1	4.52E+04
3	0	+1	+1	+1	2.80E+04
4	-1	0	-1	+1	2.89E+04
5	-1	-1	+1	0	2.88E+04
6	-1	+1	0	-1	3.26E+04
7	+1	0	+1	-1	4.52E+04
8	+1	-1	0	1	4.98E+04
9	+1	+1	-1	0	5.17E+04

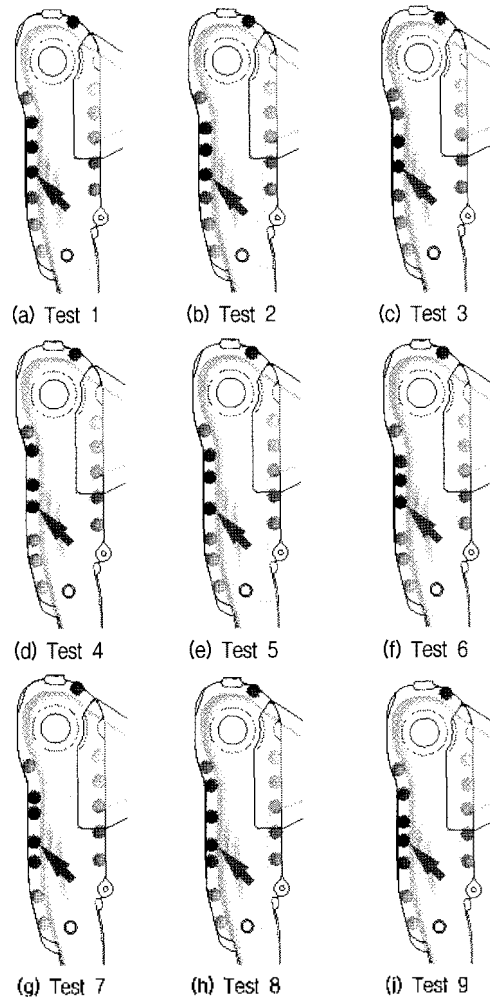


그림 12. 용접점의 위치변화에 따른 용접너짓의 피로수명
Fig. 12. Fatigue life of welding nuggel according to position change of welding points.

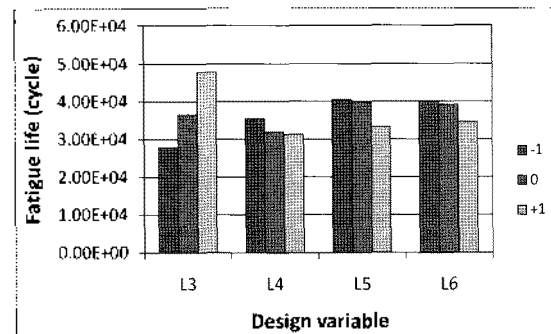


그림 13. 용접위치 민감도해석
Fig. 13. Sensitivity analysis of welding position.

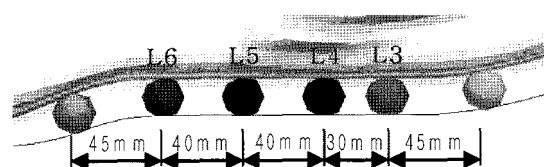


그림 14. 최적화된 서브프레임의 점용접 간격
Fig. 14. Spot welding pitch of optimized subframe.

표 4. 피로수명 사이클 비교
Table 4. Comparison of fatigue life cycle.

Subframe model	Minimum fatigue life (cycle)
Initial model	3.92E+04
Optimized model	6.05E+04

로 용접간격을 일정하게 만든 초기모델에 대해서 최소 피로수명이 발생하는 용접점 L4의 피로수명이 3.92E+04 사이클에서 6.05E+04 사이클로 65.8% 증가하였다.

Ⅶ. 결론

본 연구에서는 차량의 전방 서브프레임에 대한 점용접 부의 내구수명을 분석하고 용접너깃의 피로수명을 최대화시키는 용접간격 최적설계를 수행하였다.

- (1) 차량 서브프레임의 진동특성을 고려하는 점용접 피로수명 최적화 설계기법을 개발하였다.
- (2) 가상 벨지안로를 통과하는 동역학 시뮬레이션을 수행하여 차량 전방 서브프레임에 가해지는 동하중 이력을 구하였으며 서브프레임에 대한 유한요소해석을 수행하여 동응력 및 주파수응답 데이터를 산출하였다.
- (3) 산출된 데이터들을 결합하여 주파수영역 내구해석을 수행하였으며 이를 통하여 서브프레임 점용접부의 피로수명을 평가하였다.
- (4) 4-인자, 3-수준 직교배열 실험계획법을 이용하여 용접점의 피로수명에 대한 민감도해석을 수행하였고 계산된 민감도를 이용하여 최적의 용접간격을 결정하였다.
- (5) 본 연구를 통하여 개발한 설계기법의 효용성을 평가하기 위해 준중형 승용차의 전방 서브프레임에 있는 점용접 너깃의 용접간격을 최적화하였으며 최소 피로수명 용접점의 수명을 초기모델에 비해 65.8% 향상시켰다.

참고 문헌

1. J. S. Majcher, R. D. Michaleson, and A. R. Solomon, "Analysis of vehicle suspensions with static and dynamic computer simulations", *SAE Paper*, no. 76183, 1976.
2. R. W. Landgral and F. A. Conle, "Vehicle durability analysis", in *Concurrent Engineering of Mechanical Systems*, The

- University of Iowa, vol. 1, pp. 239-259, 1989.
3. G. S. Choi, H. K. Min, and S. H. Paik, "Dynamic stress of vehicle using virtual proving ground approach", *SAE Paper*, no. 2000-01-0121, pp. 1-7, 2000.
4. W. Steiner, G. Slinwender, and B. Unger, "Fatigue simulation of power train components during the design process", *International Journal of Automotive Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 9-16, 2001.
5. P. Heyes, "A spot-weld fatigue analysis module in the MSC/Fatigue environment", *MSC 3rd French Users' Conference Proceedings*, 1996.
6. S. B. Lee and H. J. Yim, "Fatigue analysis of vehicle chassis component considering resonance frequency", *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, vol. 13, no. 6, pp. 94-101, 2004.
7. S. B. Lee, S. H. Jeon, and H. J. Yim, "Optimum design of welding pitch considering fatigue life of spot welding nuggels", *Transactions of Korean Society of Automotive Engineers*, vol. 16, no. 4, pp. 179-185, 2008.
8. A. R. Henderson, "Frequency domain fatigue damage estimation method suitable for deterministic load spectra", *British Wind Energy Conference*, vol. 21, pp.1-3, 1999.
9. S. B. Lee, W. S. Han, and H. J. Yim, "A study on resonance durability analysis of vehicle suspension system", *Journal of Acoustical Society of Korea*, vol. 22, no. 6, pp.512-518, 2003.
10. H. J. Yim, E. J. Haug, and B. Dopker, "Methods for accurate stress-time history computation", in *Concurrent Engineering of Mechanical Systems*, The University of Iowa, vol. 2, pp. 117-134, 1990.
11. E. Y. Kuo and S. G. Kelkar, "Vehicle body structural durability analysis", *SAE Paper*, no. 951096, pp. 135-150, 1995.
12. MSC, NASTRAN, *MSC/NASTRAN User's Guide*, MSC Software Co., Los Angeles, CA., 2001.
13. MSC, NASTRAN, *MSC/Fatigue Quick Start Guide*, MSC Software Co., Los Angeles, CA., 1999.
14. S. H. Park, *Modern Design of Experiments*, Min Young Sa, Seoul, 2002.

저자 약력

●이 상 범 (Sang Beom Lee)

한국음향학회지 제21권 제2호 참조

●이 혁 재 (Hyuk Jae Lee)

2002년 2월: 국민대학교 기계자동차공학부 학사
2004년 2월: 국민대학교 자동차공학전문대학원 석사
현재 한국 MSC 연구원