피로손상의 누적에 따른 강성변화를 고려한 점용접부의 진동피로해석

강기원*

¹군산대학교 기계공학과

Vibration Fatigue Analysis of Spot Welded Component considering Change of Stiffness due to Fatigue Damage

Ki-Weon Kang^{1*}

¹Department of Mechanical Engineering, Kunsan National University

요약 본 논문의 목적은 진동 피로해석 기법을 적용하여 다수의 용접점을 포함하고 있는 점용접 구조물의 강성 변화를 고려하여 피로수명을 평가하는 것이다. 먼저 모재부 인장특성 및 점용접부의 인장 및 피로특성을 획득하였다. 유한요소법을 적용하여 S-N 선도를 획득하여 피로해석에 적용하였다. 주파수 응답해석을 수행하여 구조물의 전달함수를 획득하였고, 주파수영역에서 0.11의 PSD를 선정하여 수행하였다. 강성변화 및 고유진동수의 변화를 알아보기 위하여 점용접부의 총 6개 지점 중 최소수명이 발생하는 지점을 기준으로 1개씩 제거하여 반복 해석을 수행하였다. 따라서 강성이 낮아질수록 고유주파수도 낮아지는 것을 확인하였다. 이러한 조건하에서 진동피로해석을 수행하여 피로손상의 누적에 따른 전달함수의 변화를 고려한 진동피로해석을 수행하였다.

주제어 : 점용접 구조, 주파수 반응 분석, 진동 피로 해석, 피로 수명

Abstract The purpose of this paper was to evaluate the fatigue life to apply the vibration fatigue analysis considering the stiffness change of the spot welding due to fatigue damage accumulation. For this, the mechanical and fatigue properties of base and spot welded standard specimens were obtained through the tensile and constant amplitude fatigue test. The transfer function of the spot-welded structure was obtained from the frequency response analysis and fatigue analysis was performed under the condition of PSD=0.11. A vibration fatigue analysis that considered changes in the frequency response due to the fatigue damage that is, failure of some welding point was conducted on spot-welded structure. The fatigue life of the spot-welded structure was determined by combining the transfer function, the S-N curve of the tensile-shear spot-welded joint and the input PSD.

• **Key Words** : Spot-welded structure, Frequency response analysis, Vibration fatigue analysis, Fatigue life

1. 서론

한국 자동차 산업은 지난 10년간 급성장하며 선진국의 추격자 단계에서 벗어나 세계 5위의 눈부신 성장을 하고 있다. 따라서 자동차의 품질 및 신뢰성 향상에 대하여

지속적인 연구가 필요하며, 이러한 자동차의 품질 및 신뢰성을 향상시키기 위해 본 논문에서는 자동차의 점용접에 대하여 기술하고자 한다.[1] 점용접은 자동차, 가전제품 등의 생산공장에서 많이 사용되어지고 있으며 그 중

*교신저자: 강기원 (kwkang68@kunsan.ac.kr)

접수일 : 2013년 12월 10일, 수정일 2014년 1월 27일, 게재확정일 : 2014년 2월 6일

에서도 대상물품의 대량 생산 뿐만 아니라 용접기기로 손쉽게 용접하는 것이 가능하기 때문에 여러 생산 공장 에서 사용 중에 있다. 특히, 자동차 제작 부품에 차량의 종류에 따라서 차이는 있지만 점용접이 약 8000 ~ 9000 개가 사용되고 있으며, 조립공정의 자동화로 인하여 경제성과 차체 중량의 감소로 자동차 연비 개선효과가 있다.[2-3] 그러나 생산 공정의 오류나 용접조건 등이 맞지 않으면 점용접부의 불량으로 균열이 시작되고 더 나아가 부식이 발생하게 되는데 차량의 점용접부 파손 및 파괴의 문제가 될 수 있으므로 차체의 접합된 부품의 수명을 결정하는 가장 중요한 부분 중 하나이다.[4] 따라서 점 용접부의 피로파괴의 문제점을 개선하고 현실적인 수명을 예측하는 연구가 활발히 수행되고 이에 대한 피로수명 예측기술도 많이 발전하였다. 그 중 초기 개발에 요구되는 시간, 실험 횟수 및 비용을 줄일 수 있는 시뮬레이션을 이용한 피로해석 기법을 사용하였다.[5]

본 논문의 목적은 다수의 점용접부를 포함한 엔진룸에 장착되는 차량 부품 대상으로 주파수응답 해석 및 진동피로해석을 수행하여 피로수명을 평가하는 것이다. 이를 위해 먼저 대상모델의 특성 검토를 통해 모델의 장착 위치 및 외력의 종류 및 방향을 확인하고 재료의 물성을 파악하였으며, 대상물에 사용되는 재료를 사용하여 시험편을 제작하여 인장 특성을 도출하였다. 구조해석 범용 상용코드인 Patran/Nastran[6~7]을 이용하여 주파수응답해석을 수행하였다. 총 6개의 점용접부를 가진 구조물의 점용접부를 1개씩 제거하여 강성변화를 고려한 진동 피로해석을 수행하였다. 이를 통하여 강성변화를 고려한 점용접부의 피로 수명을 예측하였다.

2. 진동피로해석 이론

대상물의 진동피로해석은 정규모드해석과 주파수 응답해석을 수행한 후 동하중이력을 주파수 영역의 PSD 형태로 입력하여 피로수명을 평가하며, 진동피로해석에서 피로 손상률은 Dirlik[8]에 의하여 식(1)과 같이 정의되며 피로 손상률의 역수가 피로수명으로 나타난다. Miner's rule[9]과 같이 손상률의 합 D가 1보다 크면 대상 구조물은 파괴가 발생한다.

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{S_t}{K} \int S_a^m f_{s_a}(S_a) dS_a \\ = \frac{E[P]T}{b} \int_0^\infty S_a^m f_{s_a}(S_a) dS_a \quad (1)$$

여기서 $f_{s_a}(S_a)$ 는 하중의 확률분포함수 나타내며, 파라미터 k 와 m 값은 재료의 물성치로 정의된다. 그리고 $E[P]$ 는 임의 시간동안 전체 수명반복수의 초당 최고치 횟수를 나타낸다. S_t 는 전체 수명반복수, S_a 는 응력진폭, dS_a 는 응력히스토그램에서 응력구간을 나타낸다. 응력 발생빈도를 나타내는 n_i 는 $\frac{K}{S_m}$ 로 나타내었다. 이와 같이 식(1)을 사용하여 주파수 영역에서 피로 손상률을 구할 수 있으며 Monte Carlo 방법을 사용하여 동하중이력곡선의 특성을 표현하는 확률분포 함수 $f_{s_a}(S_a)$ 를 경험식으로 구하여, 하중이력의 파워 스펙트럼과 대상구조물의 주파수응답 값을 중첩하여 응력파워 스펙트럼을 산출한다.

3. 실험 및 해석방법

3.1 재료 및 시험편

본 논문에서 사용되는 재료는 POSCO 제 아연도금강판(Galvanized steel sheet)으로 모재부의 두께가 1.3mm 및 1.4mm를 가진다. 도금의 두께는 8.4mm~11.2mm 이며, 도금방법은 냉간압연 재료에 전기화학적으로 표면에 아연도금을 처리한 것이다. 이에 대한 인장특성을 획득하기 위하여 인장시험을 수행하였으며, 인장실험 규격 KS B 0801[10]을 사용하였다. 따라서 Fig. 1과 같은 인장 시험편을 각각 7개를 제작하였다.

점용접부는 상기와 동일한 재료로 두께 1.3mm와 1.4mm인 강판을 Table 1에 제시한 조건에 따라 단일 점용접 하였으며, 인장 및 피로시험편 모두 양쪽 끝에 보강판을 덧대어 두께를 조정함으로써 경계조건에 대해 편심이 발생하지 않도록 하였다.

[Table 1] Spot welding condition

	current (kA)	pressur e (kgf)	nugget diameter (mm)
passed product	9.8	350	6~7

점용접부 인장 및 피로시험편은 KS B 0528 [11]의 규격을 참조하여 Fig. 2와 같은 시험편을 각각 12개씩 제작하여 인장 및 피로 시험을 수행하였다.

[Fig. 1] Base specimen of tensile test

[Fig. 2] Spot welding of specimen

3.2 모재부 및 점용접부의 인장 및 피로시험

3.2.1 모재부 인장시험

아연도금강판에 대한 모재부의 인장특성을 획득하기 위해 인장시험을 수행하였다. 인장시험기는 Instron사의 8801이며 인장시험 조건은 실온대기 조건 하에서 크로스 헤드속도 2mm/min으로 설정하였다. 이 때 변형률은 50mm의 표점 거리(gauge length)를 갖는 변위 계측기를 사용하여 측정하였다. 각각의 시험편에 대해 KS B 0802[12]를 참조하여 7개씩 인장시험을 수행하였다.

3.2.2 점용접부 인장 및 피로시험

아연도금강판의 점용접부에 대해 인장 및 피로특성을 획득하기 위해 인장 및 피로시험을 수행하였다. 인장시험의 경우를 살펴보면 모재부 인장시험에 사용한 Instron사의 8801이며 인장시험조건은 모재부 인장시험과 동일한 조건인 실온 대기조건 하에서 크로스 헤드속도 2mm/min으로 설정하였다.

점용접부의 피로시험의 경우는 실온 대기 조건하에서 응력비 $R=0.1$, 하중속도 15Hz로 피로시험조건을 설정하였다. 총 12개의 시험편을 가지고, 모재부의 인장시험결과에서 획득한 인장강도에 따른 하중비를 설정하였다. 0.11 수준의 피로 하중 당 시험편 2개씩을 사용하여 피로특성을 평가하였다. 피로한도(fatigue limit) 3×10^6 cycles로 정의하였고, KS B 0528[11]의 규격 따른 피로시험을 수행하였다.

3.3 유한요소법을 이용한 진동피로해석방법

3.3.1 주파수응답 해석 방법

상용코드인 MSC Patran/Nastran[6~7]을 이용하여 모델링 및 주파수응답 해석을 수행하였다. 모델링의 요소는 Shell요소로 설정하였고 Mesh 격자 요소로 Quad 4 및 Tri 3 요소를 사용하였다. Fig. 3은 전체적인 모델링을 나타낸 것이며 A-sheet는 1.3mm, B-sheet는 1.4mm의 두께를 가지며 질량은 1.4kg이다. 재료의 물성은 모재부 인장시험에서 획득한 각각 7개의 두께 1.3mm와 1.4mm의 시험편에 대한 평균값을 부여했으며 Table 2는 연구대상물의 물성을 나타낸 것이다. 전체 모델의 요소는 20,097개 절점은 20,544개로 구성되며, 하중은 관성하중 1g를 부여하였다. 또한 경계조건은 MPC 요소 2개를 사용하여 점용접부에 대한 최대응력유도를 위해 설정하였다. 또한 점용접부의 특화 요소인 cweld 요소를 사용하여 너트 지름 6mm인 총 6개의 점용접부를 구현했다.

[Table 2] Material Properties

	test piece 1.3mm	test piece 1.4mm
Modulus of elasticity(GPa)	185.7	195.3
Poisson's ratio	0.3	0.3

주파수응답해석 조건은 공진을 검출하기 위하여 주파수 범위 5~1000Hz까지 설정하였고 주파수 증분은 10Hz로 설정하였다. 연구 대상물의 하중조건은 $PSD=0.11g^2/Hz$ 로 설정하였으며 Fig. 4는 주파수영역에서 선정된 PSD 곡선을 나타낸 것이다.

[Fig. 3] FE-model

[Fig. 4] Power spectral density

3.3.2 진동 피로 해석

본 연구에서 진동 피로 해석을 수행하기 위해 MSC/Fatigue[13]를 사용하였으며, 차량 부품의 피로 해석에 공진을 고려하여 전체 피로 수명을 산출하는 진동 피로해석방법을 적용하였다.. 또한, 진동피로해석의 피로 손상률 이론인 Dirlik[8] 및 평균응력 영향을 고려하기 위해 Goodman을 설정하여 진동 피로해석을 수행하였다.

4. 실험 및 해석결과

4.1 모재부 및 용접부 인장 및 피로 실험

4.1.1 모재부의 인장특성

모재부 인장시험은 두께가 1.3mm 및 1.4 mm인 각 7 개씩의 시험편을 대상으로 수행하였고 Fig. 5과 같은 응력-변형률 선도도 결과를 도출하였다. Table 3은 인장시험 결과의 평균값을 나타냈다.

[Table 3] Base specimen of tensile test mean results

specimen	Elastic modulus (GPa)	Stress at Yield (Offset 0.2 %) (MPa)	Tensile stress (MPa)	Break Stain (%)
1.3mm	185.7	203.1	337.1	42.6
1.4mm	195.3	332.7	592.1	27.5

(a) s-e curves for 1.3mm

(b) s-e curves for 1.4mm

[Fig. 5] $\sigma - \epsilon$ curves of base specimen

4.1.2 점용접부 인장 및 피로특성

점용접부는 인장-전단 하중을 받기 때문에 응력-변형률 선도도 나타내기가 어려우며 Fig. 6과 같이 하중-변위 선도도 결과를 나타내었다. Table 4는 7개 시험편을 인장 시험 수행한 결과의 평균값을 나타내었다.

점용접부의 피로시험은 Fig. 7과 같이 하중-수명 선도를 획득하였다. 하중-수명 선도 데이터는 점용접부에 가해지는 하중이 인장-전단 하중이므로 응력-수명 데이터를 획득하기 어렵다. 이를 가지고 유한요소법을 이용한 응력-수명 데이터를 획득하기 위한 기초데이터를 정립하였다.

[Table 4] Tensile test results of spot welding specimen

Tensile test data	
Max. load	Max. displacement
11206.84	2.12

4.1.3 유한요소법을 이용한 응력-수명 결과 도출

일반적으로 임의의 피로하중을 가하여 피로파괴에 도달하게 될 때 재료에 대한 피로하중은 탄성영역 구간에서 발생된다. 또한 점용접부는 인장-전단의 하중을 받기 때문에 직접적으로 응력-수명 결과를 도출하기가 어렵다. 이러한 한계점을 극복하고자 점용접부의 인장시험을 수행한 결과와 유한요소법을 이용하여 같은 시험편과 하중 및 경계조건을 부여하고 해석한 결과를 비교하였다. Table 5는 점용접부의 탄성영역에서 4, 5 및 6kN의 하중이 점용접부 시험편에 작용했을 때의 변위 결과 값이다.

또한 이러한 해석 결과검증은 응력-수명 데이터를 획득할 때 결과에 대한 신뢰성을 기반하기 위함이다. 그 다음으로 앞서 점용접부에 대한 피로시험 통해 획득한 하중-수명 데이터를 가지고 유한요소해석을 이용하여 응력-수명 선도를 획득한다.

이러한 과정을 통해 획득한 본 재료의 점용접부 응력-수명 선도에 대한 관계식은 식 (2)와 같고, Fig. 8은 이에 대한 응력-수명 선도이다.

$$\sigma = 2134.7 N_f^{-0.184} \quad (2)$$

[Table 5] Spot welding specimen experiment compared analysis results

Load(kN)	Displacement(mm)	
	experiment	Analysis
4	0.132	0.156
5	0.183	0.190
6	0.225	0.234

[Fig. 6] P - δ curves for spot welding

[Fig. 7] P - N curves for spot welding

[Fig. 8] Spot weld specimen for S - N curve

여기서 σ 는 임의의 응력이고, N_f 는 임의의 응력에 대한 수명을 나타낸다.

4.2 주파수응답해석 및 진동피로해석 결과

4.2.1 주파수응답해석 결과

유한요소모델을 이용하여 주파수 응답해석을 수행하였다. 진동 피로해석에서 연구 대상물에 가진주파수와 고유주파수가 중첩될 경우 응답되는 값은 최대에 이르게 되며, 이 결과값을 토대로 피로 손상률을 반영하기 때문에 주파수 응답해석은 매우 중요하다. 주파수응답해석의 정확성을 높이기 위해 다음과 같이 해석을 하였다. 첫째 최대 가진 주파수의 영역에 대해 충분히 큰 영역까지 설정해야 한다. 두 번째로 주파수의 증분의 크기는 최대 응답에 대해 주파수 구간이 만족할 수 있는 결과를 얻기 위해 적절한 작은 값을 설정해야 한다. 이러한 과정을 통하여 주파수응답해석을 수행하였다. Fig. 9는 점용접부를 하나씩 제거하여 나온 응력분포 나타낸 것이다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 점용접부를 하나씩 제거 했을 때

6개의 점용접부에서는 2번째 점용접부에서 최대응력이 발생하였으며, 나머지는 순차적으로 최대응력이 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 보다 명확한 평가를 위하여 가속도-주파수 선도와 응력-주파수 선도를 도출하였다. Fig. 10은 대표적인 점용접부가 6개 일 때 응력-주파수 곡선 및 가속도-주파수 곡선을 나타낸 것이다. Fig. 10 (a)에서 확인할 수 있듯이 고유주파수는 약 560Hz에서 발생하며, 최대응력은 29MPa이 나오는 것을 확인 할 수 있었다.

4.2.2 진동 피로해석 결과

진동피로해석을 수행하기 위해 앞서 선행된 연구모델의 주파수 응답해석을 통해 결과를 획득하였으며, 주파수 영역에서 하중이력데이터는 PSD 형태로 0.11 수준으로 선정하였다. 또한 점용접부의 시험편 제작 및 실험을 수행하였고 그에 대한 인장특성을 도출하였으며, 주파수 응답해석을 수행하였다. 이에 대한 데이터로 진동피로해석에 설정하여 해석을 수행 하였다. Fig. 11은 진동피로해석을 통하여 나온 수명 분포를 나타낸 것이다. 총 6개 점용접부를 포함한 연구모델은 2번째 점용접부에서 최소 수명을 나타내었다. 그다음 첫 번째 세 번째 점용접부 순으로 나타났다. 같은 방법으로 최소 수명 지점을 제외한 총 5개의 점용접부에 대하여 재해석 결과 첫 번째 점용접부 지점에서 최소 수명을 나타내었고 다음 세 번째, 네

(a) $\sigma - f$ curve

(b) $g - f$ curve

[Fig. 10] Transfer function at non-damaged structure

번째 순서로 피로 수명이 증가하였다. 같은 방법으로 총 4개 점용접부를 포함한 연구모델에 대해 피로해석 수행한 결과 4개의 경우 세 번째, 네 번째, 다섯 번째 순서로 피로수명이 증가하였다. 3개의 경우 네 번째, 다섯 번째, 여섯 번째 순으로 피로수명이 증가함을 알 수 있었다. 또한 Table 5는 0.11수준에서의 피로수명을 나타낸 것이다.

[Fig. 9] Frequency response analysis results for spot welding 3~6point

[Table 5] Vibration fatigue life results for 0.11 PSD

Welding	Failure position	Life(sec)
6points	2	2.24×10^2
	1	2.95×10^2
	3	2.69×10^4
5points	1	0.49×10^2
	3	3.63×10^3
	4	1.11×10^5
4points	3	6.92×10^2
	4	7.41×10^5
	5	1.31×10^9
3points	4	1.82×10^3
	5	1.73×10^7
	6	5.75×10^{14}

[Fig. 11] Contour of vibration fatigue results 4~6point

5. 결론

본 연구에서는 차량에 많이 사용 점용접부에 대한 피로수명 평가 하였다. 이에 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 아연도금강판의 점용접부 시험편을 제작하여 인장 특성을 획득하였으며, 점용접부에 대한 인장 및 피로특성 및 점용접부에 대한 응력-수명 선도를 획득하였다.
- (2) 점용접부 6개를 포함하는 자동차 부품에 대하여 선형 정적 및 주파수 응답해석을 수행하였다. 강성 변화 및 고유진동수의 변화를 알아보기 위해 점용접부를 1개씩 제거하여 반복 수행하였으며, 이를 점용접부 50% 파손 시까지 수행하였다. 이에 대하여 강성이 낮아질수록 고유진동수도 낮아지는 것을 확인하였다. 진동피로해석 결과에서 고유주파수를 고려하였기 때문에 피로수명이 짧게 예측되는 것을 확인하였다.

감사의 글

This work was supported by a Human Resources Development of the KETEP grant (No. 20124010203240) and by Research Program (B551179-12-07-00) funded by the Korea Research

Council for Industrial Science & Technology (ISTK).

REFERENCES

- [1] Kwak, S. J., Jin, J. W., Kim, T. S., Noh, K. H. and Kang, K. W., "Hardness Estimation of Compressor Journal using Instrumented Indentation Technique", Transactions of the KSMTE, Vol. 21, No. 3, pp. 376-381, 2011.
- [2] Lee, S. B., Jeon, S. H. and Yim, H. J., "Optimum Design of Welding Pitch Considering Fatigue Life of Spot Welding Nuggets", Transactions of the KSMTE, Vol. 16, No. 4, pp. 179-185, 2008.
- [3] Eom, J. S., Choi, N. R., Lee, B. C., and Kim, D. S., "Study on optimization of spot welds arrangement for structural rigidity, "Transactions of the KSME, pp. 106-109, 2006.
- [4] Na, E. G., Oh, S. H., and Kim, J. K., "Study on Characteristics of Weldability for the Spot Weld Region of the Car Body," Transactions of the KSAE, pp. 57-61. 2013.
- [5] Nam, et al., "Fatigue Analysis of Spot-welded Multi-Lap Joint of STS301L Using the Maximum Stress", Transactions of the KSAE, Vol. 11, No. 6, pp. 101-107, November, 2003.
- [6] MSC. Software, MSC. Patran Users guide, Ver 2012.
- [7] MSC. Software, MSC. Nastran Users guide, Ver 2012.
- [8] Turan Dirlik, 1985, Application of computer in Fatigue Analysis, University of Warwick, Ph. D. Thesis.
- [9] Miner, M. A. 1945, "Cumulative Damage in Fatigue", J. Appl. Mech., Vol. 12, Trans ASME, Vol. 67, pp. A159-A164.
- [10] KS B 0801, 2003, "Method of Tensile Test for Metallic Materials", Korean Standard.
- [11] KS B 0528, 2001, "Method of Fatigue Testing for Spot Welded Joint", Korean Standard.
- [12] KS B 0802, 2003, "Method of Tensile Test for

Metallic Materials”, Korean Standard.

[13] MSC. Software, MSC. Fatigue. Quick Start Guide,
Ver 2012.

저자소개

강 기 원(Ki-Weon Kang)

[비회원]

- 1991년 ~ 1996년 : 대우자동차 안
전시험 주임연구원
- 1993년 2월 : 한양대학교 한양대학
원 기계설계학과(기계설계학석사)
- 2001년 2월 : 한양대학교 한양대학
원 기계설계학과(기계설계학박사)

- 2001년 ~ 2008년 : 스포츠과학연구원 책임연구원
- 2004년 ~ 2008년 : 두원공과대학 겸임교수
- 2008년 ~ 현재 : 국립 군산대학교 부교수

<관심분야> : 복합재료, 피로