

내구도를 고려한 차체 용접점의 합리적 감소 방안

최 누리^{*1)} · 주 병 현¹⁾ · 변 형 배²⁾ · 김 동 석²⁾ · 이 병 채¹⁾

한국과학기술원 기계공학과¹⁾ · GM 대우 자동차²⁾

Rational Reduction of the Number of Spot Welds in the Vehicle Body Considering Durability

Noori Choi^{*1)} · Byeong Hyeon Ju¹⁾ · Hyung Bai Byun²⁾ · Dong Seok Kim²⁾ · Byung Chai Lee¹⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

²⁾GM Daewoo Auto & Technology, 199-1 Chungchun-dong, Bupyeong-gu, Incheon 403-714, Korea

(Received 20 June 2006 / Accepted 30 August 2006)

Abstract : We suggest a design method for reducing the number of spot welds in the vehicle body in terms of durability. To reduce the number of spot welds, we use the DOE(Design of Experiments) analysis with two influence indices for the durability and the fatigue life of a spot weld itself. Through the suggested design method, we select spot welds that could be removed without serious reduction of durability of the whole model. We apply this new methodology to the BIW(Body In White) model of a vehicle by choosing some practical parts where durability-related point of view must be considered importantly by experience.

Key words : Spot welds(점용접), Durability(내구), Fatigue life(피로 수명), Design optimization(설계 최적화), DOE(실험계획법)

1. 서론

자동차는 긴 수명동안 다양한 환경에서 주행하므로 내구 특성은 NVH(Noise, Vibration and Harshness)나 충돌 특성과 함께 설계에서 반드시 고려되어야 할 특성이다. 차체 내구 시험에서 주로 관심사가 되는 부위 가운데 점용접부는 차체 조립에 많이 사용되면서 하나의 차체에 수천 개의 점용접이 산재되어 있어 차체나 부품을 설계하는 관점에서 매우 중요한 고려 사항이 된다. 한편, 차체나 부품의 생산 공정의 관점에서 점용접은 생산 비용과 시간의 절감에 중요하기 때문에 설계와 생산의 관점 모두를 고려하여 점용접의 수를 최적화하는 연구가 필요하다.

이러한 필요성에 의해 점용접의 개수나 위치를 최적화하는 연구가 국내외 여러 연구자들에 의해 진행되어 왔다. 그 가운데 내구 관점에 특히 관심 있는 연구자들은 파단 기준식을 정의하고 점용접 위치를 최적화한 연구를 수행하였고, 용접 위치를 이동시키기 위해 요소망을 적응적으로 재구성하였다.¹⁻³⁾ Zhang과 Taylor는 파단식 대신 피로 수명을 계산하여 이를 제한 조건이나 목적함수로 활용하여 점용접 위치를 최적화하였다.⁴⁾ 고유 모드와 동특성에 관심을 가진 연구자들은 차체의 고유치를 유지시키면서 점용접 수를 줄이는 연구를 수행하였으며,^{5,6)} 피로 수명의 관점에서 실험계획법을 도입하여 점용접 위치나 형상을 최적화하는 연구도 진행되어왔다.^{7,8)} 최근에는 모델링과 해석 과정에서 사

*Corresponding author, E-mail: noori.choi@gmail.com

용자들의 편의성을 높인 점용접 요소를 사용하여 내구 특성을 수치화하고, 실험 계획법을 통해 점용접 설계 최적화를 수행한 예도 있었다.^{9,10)}

본 연구에서는 앞선 연구¹⁰⁾에서 제안된 영향도 지수가 수명 변화에 미치는 영향을 보다 잘 평가하도록 수정하였으며, 새롭게 보완된 영향도 지수를 실험계획법에 적용하여 점용접 개수를 줄이면서 내구 강도 저하를 최소화하는 방법론을 제시하였다. 또한, 제안된 점용접 설계 최적화 기법을 실제 자동차 차체 모델에 적용해 보았다.

2. 내구 영향도 지수의 정의

자동차의 차체에서 점용접을 추가하거나 제거하면 전체적인 모델에서 위상이 불연속적으로 변하게 된다. 그런데, 점용접의 변화에 따른 위상의 변화는 전체 구조의 내구 성능에 영향을 주기 보다는 그 주변의 일부 용접점에만 영향을 미친다. 따라서 점용접을 설계할 때는 연속적인 설계 변수를 정의하여 민감도를 계산하여 점용접 개수를 줄이는 것 보다는 이산적인 효과를 고려하는 것이 타당하다. 이를 위해 Choi 등은 영향도를 하나의 점용접이 전체 점용접 모델의 내구 특성에 미치는 영향도를 ‘하나의 점용접이 제거 되었을 때 다른 점용접의 수명 변화에 미치는 영향’으로 정의하여 다음 두 식과 같이 표현하였으며, 이를 실험 계획법의 주 영향(main effect)으로 활용하였다.¹⁰⁾

$$S_i = \frac{1}{N} \sum_{i \neq j}^N \frac{(L_{cj} - L_{ij})}{L_{cj}} \quad (1)$$

$$S_i = \frac{1}{N} \sum_{i \neq j}^N \frac{(\text{Log}_{10}(L_{cj}) - \text{Log}_{10}(L_{ij}))}{\text{Log}_{10}(L_{cj})} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 S_i 는 점용접 i 의 내구 영향도 지수를 의미하며 N 은 모델에 포함된 점용접의 전체 개수를 의미한다. 또한, L_{cj} 는 점용접 i 가 제거되기 전의 점용접 j 의 수명을, L_{ij} 는 점용접 i 가 제거된 후 점용접 j 의 수명을 각각 나타내고 있다. 식 (1)에서는 내구 영향도 지수를 하나의 점용접 i 가 제거되었을 때 이를 제외한 나머지 점용접에서 발생하는 상대적인 수명 변화의 평균치로 나타내고 있으며,

이 때 사용된 점용접부의 수명은 점용접 내구 해석을 통해 직접적으로 계산된 수명이다.

그런데, 식 (1)에서 상대적인 변화를 고려하여 내구 영향도 지수에 반영하고 있지만 거의 무한 수명에 가까운 부위와 수명이 무척 짧은 부위를 동일한 조건으로 고려하게 될 경우 내구의 관점에서 더 중요한 부분의 효과가 충분히 반영되지 않을 수 있기 때문에 식 (2)에서는 수명 값을 바로 사용하지 않고 상용 로그를 취해 사용하였다.

그런데, 이와 같이 영향도 지수를 정의할 경우 제거된 점용접으로 인해 다른 점용접에서 수명이 변화되는 효과를 부호에 관계 없이 고려하게 된다. 따라서 주변 점용접 일부의 수명이 매우 짧아지더라도 나머지 점용접부에서 수명이 길어지는 쪽으로 변화가 나타나게 되면 실제로는 특정 부위 수명을 현저하게 낮추는 설계가 되기 때문에 제거되어서는 안되는 점용접의 영향도 지수가 그와는 반대로 평가될 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 위험 요소를 없애기 위해 다음과 같이 수정된 형태의 내구 영향도 지수를 제시하였다.

$$S_i = \frac{1}{N} \sum_{i \neq j}^N P_{ij} \quad (3)$$

where,

$$P_{ij} = \begin{cases} \frac{(\text{Log}_{10}(L_{cj}) - \text{Log}_{10}(L_{ij}))}{\text{Log}_{10}(L_{cj})} & \text{if } L_{cj} \geq L_{ij} \\ 0 & \text{if } L_{cj} < L_{ij} \end{cases}$$

정의된 식을 보면 이전의 연구에서와는 달리 설계 변경에 따라 피로 수명이 줄어든 점용접만 영향도 평가에 포함시키고 있으며 이를 통해 앞서 언급한 것과 같이 피로 수명을 높이는 효과와 줄이는 효과가 상쇄되어 설계 변경에 의해 내구 특성이 나빠지는 점용접부를 간과하게 될 가능성을 낮추어 보다 안전한 설계 결과를 준다.

3. 영향도 지수와 실험계획법을 이용한 점용접 설계 방법

내구 및 피로 수명의 관점에서 최적화를 할 때 그 대상이 관재의 두께나 재질이 아닌 점용접이라면 설계 변수의 변화가 수명에 미치는 영향이 극히 작

기 때문에 민감도 정보를 정확히 얻을 수 없다. 이러한 어려움을 극복하기 위해 연구자들은 실험 계획법을 사용해 성과를 얻었다.⁷⁻¹⁰⁾ 따라서 본 연구에서도 점용점의 변화(유무)에 따른 위상의 변화를 직접적으로 고려할 수 있는 실험 계획법을 사용하였다. 실험 계획법의 경우 일반적인 2수준계에서 직교배열표가

$$L_{2^m}(2^{2^m-1}) \quad (4)$$

과 같이 1보다 큰 양의 정수 m 에 따라 정해지므로, 실험의 횟수가 $L_4(2^3)$, $L_8(2^7)$, $L_{16}(2^{15})$, $L_{32}(2^{31})$, ...로 나타낼 수 있다. 그런데, 차체에 포함된 점용점의 수는 대략 4,000 개가 넘어 이들 모두를 설계 변수로 잡을 경우 실험 수가 매우 크게 늘어난다. 또한, 내구 및 피로 수명 해석을 위한 차체 모델은 NVH나 강성을 평가하기 위한 모델에 비해 정확한 응력 및 반력 값을 요구하기 때문에 매우 세밀한 격자로 구성되어 해석에 걸리는 시간도 무척 길어지기 때문에 실험 계획법을 실제 차체 모델에 적용하기는 어려워진다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 일차적으로 설계 및 실험, 해석 경험에 의해 차체 점용점부 가운데 내구 관점에서 특히 중요한 부분을 선정하여 점용점 피로 수명 해석을 먼저 수행한 후 그 결과를 가지고 수명이 긴 순서에 따라 설계 변수가 될 점용점을 선택하였다. 즉, 수 천개의 점용점 가운데 내구 관점이 아닌 충돌이나 강성, 변위 등을 제어하기 위해 필요한 점용점은 내구 관점에서 설계하는 대상에서 제외하고, 직접적인 설계 대상 점용점 가운데 수명이 긴 점용점이 수명이 짧은 경우에 비해 제거되어도 전체 구조의 내구 특성에 영향을 덜 줄 것이라고 가정하였다. 이렇게 선택된 점용점을 설계 변수로 선정하고, 이들의 존재 유무에 따라 2단계 직교배열표를 구성하고, 앞서 정의한 내구 영향도 지수를 반응 값으로 분석하여 최종적으로 각 점용점의 영향도를 계산할 수 있다. 이렇게 평가된 영향도를 바탕으로 제거가 가능한 점용점을 선택한 후 실제로 제거했을 때에 미치는 효과를 검증하여 최종적인 설계를 얻을 수 있다. 이 과정을 도식화하여 나타내면 Fig. 1과 같다.

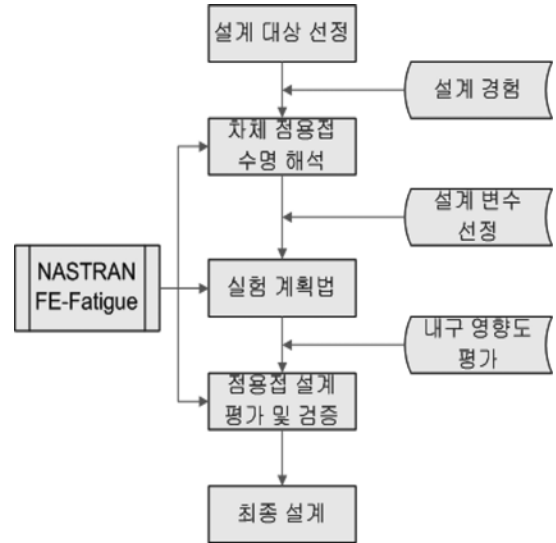


Fig. 1 Spot weld design optimization process

이와 같은 설계를 위해서는 점용점을 격자와 관계없이 표현하고, 박판이 아닌 점용점에서 피로 수명을 직접 계산할 수 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 유한 요소 해석 과정과 피로 수명 해석에 NASTRAN과 FE-Fatigue를 사용하였고, 점용점은 CWELD 요소로 표현하였다.

4. 자동차 차체에 적용

앞 절에서 제안한 점용점 설계 방법론을 점용점으로 조립된 자동차 차체에 적용하여 내구 및 피로 수명 관점에서 큰 영향 없이 점용점의 개수를 줄여 보았다. 시험 대상으로 정한 모델은 Fig. 2의 BIW 모델이며 내구 및 피로 수명 해석을 위해 세밀한 격자로 구성되어 32만개 이상의 셀 요소와 4800 여개의 점용점 요소(patch-to-patch CWELD element)를 포함하고 있다.

앞 장에서 언급한 바와 같이 이렇게 세밀한 모델을 대상으로 4,800 여개의 설계 변수를 가지고 실험 계획법을 적용하기는 불가능하기 때문에 본 연구에서는 설계 경험과 내구 시험 및 해석 결과에 근거하여 설계 대상 부분을 선정하고자 했다. Fig. 3은 내구 관점에서 취약한 점용점부를 나타내고 있으며, 이들 가운데 뒷 문쪽에 위치한 점용점들을 설계 대상으로 잡았다.

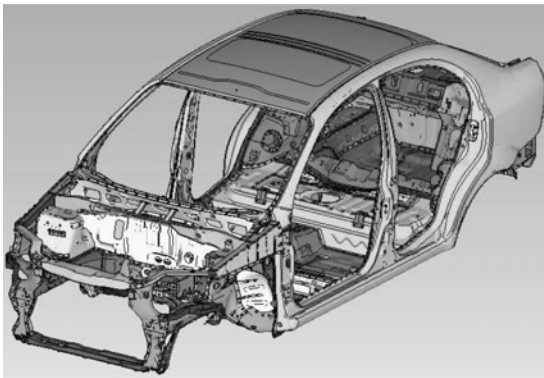


Fig. 2 BIW FE model for fatigue analysis

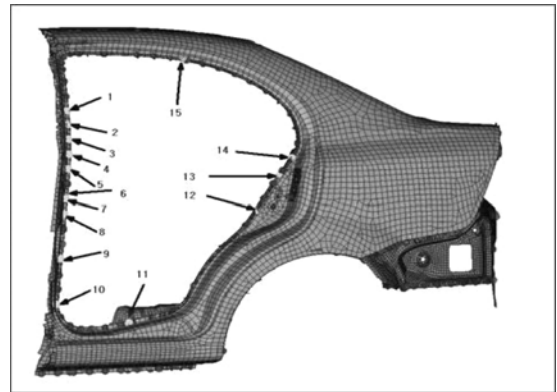


Fig. 4 Spot welds selected as design variables

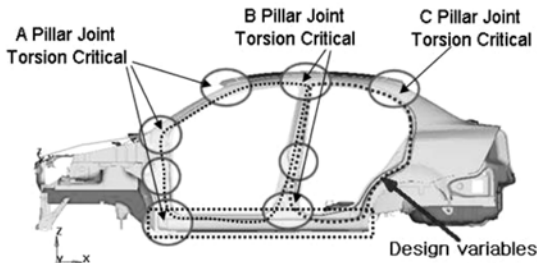


Fig. 3 Design area for spot weld design optimization

이렇게 일차적으로 선택된 설계 영역의 점용접들을 대상으로 FE-Fatigue를 이용하여 점용접부 피로 수명 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 하중 이력은 하나의 범프 힐을 지나는 하중을 가정하여 앞과 뒤쪽 현가장치와 연결되는 부분에 반복적으로 가했으며, 수명은 이러한 반복 하중 이력을 몇 회(cycle) 견딜 수 있는가를 의미하게 된다.

수명 해석을 통해 얻은 결과를 토대로 설계 변수를 선택하였는데, 수명이 긴 점용접들을 순서대로 15개 선택하였다. 설계 변수를 잡을 때 다겹(multi-sheet) 용접인 경우에는 다겹 용접을 표현하고 있는 점용접 요소 모두를 하나의 설계 변수로 보았고, 그 부위에서의 수명은 그 부위의 점용접 요소 가운데 가장 짧은 수명으로 놓았다. 이렇게 선택된 설계 변수는 Fig. 4에 나타내었다.

설계 변수들에 대해 $L_{16}(2^{15})$ 직교 배열표를 구성하고 새롭게 제안된 영향도 평가 지수식 (3)을 반응값으로 삼아 실험 계획법에 의한 분석을 수행해 보면 Fig. 5와 같은 결과를 얻을 수 있다.

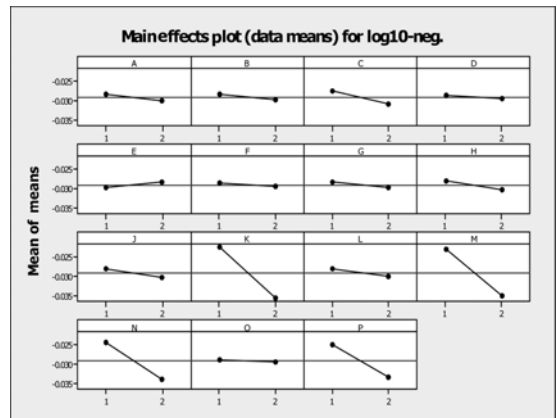


Fig. 5 Analysis result of DOE

Fig. 4에서의 설계 변수 번호 1~15는 Fig. 5의 변수 번호 A~P에 각각 대응되고 있다. 결과를 보면 10, 12, 13, 15번 점용접이 제거될 경우 주변 점용접에서 수명이 크게 떨어질 것으로 예상되고 있다. 또한 3, 7, 8, 9, 11번의 경우에도 주변 점용접의 수명을 약간 떨어뜨릴 것으로 예상할 수 있다. 이에 비해 4, 5, 6, 14번의 경우 제거되어도 주변 점용접의 수명을 크게 변화시키지 않을 것으로 보인다.

위 분석 결과를 바탕으로 제거할 대상 점용접의 순위를 정한다면 5, 14, 4, 6, 2, 1, 7, 8, 9, 11의 순서가 될 것이다. 그러나 이러한 순서에 의해 바로 점용접을 제거하는 것은 설계 과정에서 근접한 두 개 이상의 점용접이 동시에 빠지게 되는 경우에 대한 고려가 미흡하기 때문에 위험성을 가지고 있다. 따라서 실제로 제거될 점용접을 결정하기 위해서는 점용접

의 연속된 위치도 함께 고려해야 하며, 본 연구에서는 이에 따라 2, 5, 7, 14번의 점용접을 제거하여 변경된 설계의 유효성을 살펴보았다.

Table 1에서 알 수 있듯이 수명이 낮은 점용접부의 수명은 전혀 변화가 없으며, 1.0×10^9 cycle 이상의 수명을 가진 일부 점용접부에서 수명이 감소함을 볼 수 있다. 또한, 감소한 수명도 여전히 매우 긴 수명을 유지하고 있어 전체적인 차체의 내구 강도나 피로 수명에 큰 영향을 주지 않는다고 볼 수 있다. 한편, 최종적으로 제안된 점용접 설계안에 대해 고유치 해석 및 강성 해석을 통해 결과의 적합성을 평가해 본 결과 기존의 설계와 동일한 결과를 보여 제안된 최적화 모델이 다양한 설계 고려 사항들에 대해서도 여전히 유효함을 확인할 수 있었다.

Table 1 Reduction of fatigue life of spot welds

요소 번호	기본 모델	최적화 모델	수명 감소 (%)
327290	1.85×10^3	1.85×10^3	0.0
326853	5.48×10^5	5.48×10^5	0.0
326908	3.12×10^6	3.12×10^6	0.0
326989	1.40×10^9	1.29×10^9	8.0
327737	2.24×10^{12}	2.07×10^{12}	7.8
326916	2.77×10^{17}	1.95×10^{17}	29.5

5. 결론

자동차의 차체에서 점용접의 내구 성능을 고려하여 설계를 최적화하기 위해 점용접 요소를 사용한 모델을 이용하여 점용접부 내구 영향도 지수를 정의하였다. 특히, 영향도 지수에 점용접이 차체의 내구 성능에 미치는 효과를 정확하게 반영시키도록 고안하였다. 이 지수를 이용하여 실험계획법에 따라 제거될 점용접을 선택하여 용접점 개수를 최적화하는 방법론을 제시하였다. 점용접 요소에서 직접 계산된 수명을 사용하여 내구 해석을 수행하여 모델의 형상과 거동을 보다 정확하고 쉽게 표현할 수 있었다.

제안된 방법을 내구 및 피로 수명 평가를 위한 BIW 모델에 적용하였으며 그 결과로 선택된 점용접을 제거하여도 BIW 모델 전체의 수명이나 강성 등에 영향이 거의 없으며, 특히 주변 점용접의 경우

수명이 매우 긴 일부 점용접부의 수명이 약간 줄어든 것을 확인할 수 있었다.

이렇게 선택된 결과는 변위의 제어나 공정상의 문제점 등 설계상의 다른 고려 요건들에 대한 종합적인 고려를 통해 실제 설계 및 공정에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 GM 대우 자동차의 지원으로 수행된 과제의 연구 결과의 일부이다.

References

- 1) S. U. Ryu and T. S. Lee, "Development of Optimal Design System for Spot Weld Joints: Part I Optimization Methodology," Proc. KSME(A), pp.408-413, 1998.
- 2) J. W. Park, S. W. Chae and T. S. Lee, "Adaptive Finite Element Mesh Construction for Optimal Design of Spot Welding," Trans. KSME(A), Vol.24, No.7, pp.1763-1770, 2000.
- 3) S. W. Chae, K. Y. Kwon and T. S. Lee, "An Optimal Design System for Spot Welding Locations," Finite Elements in Analysis and Design, Vol.38, pp.277-294, 2002.
- 4) Y. Zhang and D. Taylor, "Optimization of Spot-welded Structures," Finite Elements in Analysis and Design, Vol.37, pp.1013-1022, 2001.
- 5) J. P. Leiva, L. Wang, S. Recek and B. C. Watson, "Automobile Design Using the GENESIS Structural Optimization Program," Nafems Seminar: Advances in Optimization Technologies for Product Design, 2001.
- 6) J. P. Leiva, B. C. Watson, I. Kosaka and G. N. Vanderplaats, "Dynamic Finite Element Analysis and Optimization in GENESIS," 9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, 2002.
- 7) S. H. Jeon, S. B. Lee, H. S. Kim and H. J. Yim, "A Study on the Spot Welding Location Optimization for the Thin-walled Structures Considering Fatigue Life," Fall Conference

- Proceedings, KSAE, pp.1453-1458, 2003.
- 8) M. S. Kim, C. W. Lee, S. H. Son, H. J. Yim and S. J. Heo, "Shape Optimization for Improving Fatigue Life of a Lower Control Arm using the Experimental Design," Transactions of KSAE, Vol.11, No.3, pp.161-166, 2003.
 - 9) N. Choi, J. M. Park and B. C. Lee, "Optimization on the Number of Spot Weld Point of Vehicle Components Using DOE with CAE Analysis," Proc. KSME(A), 2005.
 - 10) N. Choi, B. H. Joo, J. M. Park, J. S. Eom, B. C. Lee, H. B. Byun and D. S. Kim, "Design of Spot Weld Based on the Durability Influence Index and the DOE Analysis," Trans. KSME(A), Submitted.