

< 논문 >

## 점용접부 내구 영향도 지수와 실험 계획법을 이용한 자동차 부품 점용접 설계

최누리<sup>†</sup> · 주병현<sup>\*</sup> · 박정민<sup>\*</sup> · 엄재성<sup>\*</sup> · 변형배<sup>\*\*</sup> · 김동석<sup>\*\*</sup> · 이병채<sup>\*</sup>  
(2006년 4월 14일 접수, 2006년 6월 19일 심사완료)

### Design of Spot Weld Based on the Durability Influence Index and the DOE Analysis

Noori Choi, Byeong Hyeon Ju, Jung Min Park, Jae Sung Eom, Dong Seok Kim, Hyung Bai Byun and Byung Chai Lee

**Key Words:** Spot Weld(점용접), Durability(내구), Fatigue Life(피로 수명), Influence Index(영향도 지수), DOE(실험 계획법)

#### Abstract

A practical method for reducing the number of spot welds in automotive structures considering fatigue crack initiation life is suggested. At first, an influence index for the durability and the fatigue life of a spot weld itself is defined and then taken as the main effect of the DOE analysis. Spot welds that can be removed without serious reduction of durability through numerical experiments are selected by the results of DOE. The proposed method was applied to the shock tower and LCA(lower control arm) structure of a vehicle, which are important components in durability-related point of view.

#### 1. 서 론

기계 구조물을 조립하는 방법은 접착이나 용접, 볼트를 이용한 체결 등 다양하지만, 자동차체를 비롯한 많은 기계 구조물에서 점용접은 중요한 조립 수단이다. 용접점을 통해 체결되는 구조간에 힘이 전달되기 때문에 점용접의 설계에 따라 체결된 구조의 강성과 피로 수명은 크게 달라진다. 한편, 생산 공정의 관점에서 점용접은 비용과 시간의 절감 측면과 밀접한 연관이 있기 때문에 설계와 생산의 관점 모두를 고려하여 점용접을 최적화하는 연구가 필요하다.

즉, 생산 시간과 비용의 절감 및 공정상의 이득을 위해 점용접의 수를 줄이거나 위치를 최적화 하되, 구조물의 강성을 비롯한 고유치 특성, 내구 특성 등의 설계 조건은 되도록 유지해야한다. 이 때, 점용접의 특성상 점용접의 변화에 따라 모델의 전체 강성의 변화는 있지만 질량의 변화는 무시할만하기 때문에 강성과 고유 모드는 독립적이지 않다고 볼 수 있다. 또한 점용접의 변화가 강성과 내구 특성의 변화에 미치는 영향을 놓고 볼 때 내구 특성에 더 민감한 영향을 준다.

내구 관점에 특히 관심 있는 연구자들은 파단 기준식을 정의하고 점용접 위치를 최적화한 연구를 수행하였고, 용접 위치를 이동시키기 위해 유한 요소 격자를 적응적으로 재구성했다.<sup>(1~4)</sup> Zhang과 Taylor는 파단 기준식 대신 피로 수명을 계산하여 이를 제한 조건이나 목적함수로 활용하여 점용접 위치를 최적화하였다.<sup>(5)</sup> 고유 모드와 동특

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과  
E-mail : noori.choi@gmail.com  
TEL : (042)869-3071 FAX : (042)869-3210

<sup>\*</sup> 한국과학기술원 기계공학과

<sup>\*\*</sup> GM 대우자동차

성에 관심을 가진 연구자들은 차체의 고유치를 유지시키면서 점용접 수를 줄이는 연구를 수행하였으며,<sup>(6,7)</sup> 피로 수명의 관점에서 실험계획법을 도입하여 점용접 위치나 형상을 최적화하는 연구도 진행되어왔다.<sup>(8,9)</sup> 하지만 이들 연구에서는 박판과 점용접을 각각 셀과 보 요소로 표현하고 있어 점용접부에서의 거동을 정확히 표현하기 어려울 뿐더러 모델링하기 위해서는 용접부에서 절점과 절점이 연결되어야 했다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근에는 점용접 요소를 활용하여 점용접을 설계하려는 시도가 있었다.<sup>(10)</sup>

본 연구에서는 기존 설계에서 내구 성능에 영향을 작게 미치는 일부 용접점을 제거하여 설계를 개선하려 하며, 경험을 통해 용접점의 수명은 몇 개의 인접한 용접점을 제거할 때만 영향을 받는 것을 알았다. 따라서 용접점 제거를 위한 기준 물리량으로 구조의 최소 수명 민감도 등은 적절하지 않았으며 다음 절에 설명한 바와 같이 점용접의 내구 성능을 대표하는 영향도 지수를 정의하였다. 또한, 제안된 영향도 지수를 실험계획법에 적용하여 점용접 개수를 줄이면서 내구 강도 저하를 최소화하는 방법론을 제시하고 이를 실제 자동차 부품에 적용해 보았다.

## 2. 내구 영향도 지수의 정의

자동차의 차체나 부품에서 점용접의 위치나 개수가 변화하는 것은 그 모델의 위상이 변화하는 것이므로 그 영향도를 연속적인 변수를 이용해 정의하기는 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 하나의 점용접이 전체 점용접 모델의 내구 특성에 미치는 영향도를 ‘하나의 점용접이 제거되었을 때 다른 점용접의 수명 변화에 미치는 영향’으로 정의하였다. 이를 정량적으로 나타내기 위해 다양한 형태의 식을 사용할 수 있겠으나 본 연구에서는 점용접부 내구 영향도 지수를 다음과 같이 표현하였다.

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

식 (1)에서  $S_i$ 는 용접점  $i$ 의 내구 영향도 지수를 의미하며  $N$ 은 모델에 포함된 용접점의 전체 개수를 의미한다. 또한,  $L_{oj}$ 는 용접점  $i$ 가 제거되기 전의 용접점  $j$ 의 수명을,  $L_{ij}$ 는 용접점  $i$ 가 제

거된 후 용접점  $j$ 의 수명을 각각 나타내고 있다. 식에서는 내구 영향도 지수를 하나의 용접점  $i$ 가 제거되었을 때 이를 제외한 나머지 용접점에서 발생하는 상대적인 수명 변화의 평균치로 나타내고 있으며, 이 때 사용된 점용접부의 수명은 점용접 내구 해석을 통해 직접적으로 계산된 수명이다. 수명의 변화량을 지수에 반영할 때에는 수명 변화의 절대값이 같다 하더라도 원래 수명이 긴 부분에서의 변화 보다는 수명이 짧은 부분에서의 수명의 변화가 더 큰 의미를 갖기 때문에 수명의 변화 값을 직접 사용하지 않고 상대 변화 값을 사용하였다.

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 수명 값을 바로 사용하지 않고 다음과 같이 상용 로그를 취해 사용할 수도 있다.

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

이와 같이 식 (1) 혹은 (2)를 이용하면 각 용접점이 그 자신을 제외한 나머지 용접점의 수명에 미치는 영향을 정량적으로 나타낼 수 있다.

## 3. 영향도 지수와 실험 계획법을 이용한 점용접 설계 방법

내구 및 피로 수명의 관점에서 최적화를 할 때 그 대상이 판재의 두께나 재질이 아닌 점용접이라면 설계 변수의 변화가 수명에 미치는 영향이 극히 작기 때문에 민감도 정보를 정확히 얻을 수 없다. 따라서 본 연구에서는 점용접의 변화(유무)에 따른 위상의 변화를 직접적으로 고려할 수 있는 실험계획법을 사용하였다. 그런데 실험계획법의 경우 일반적인 2수준계에서 직교배열표가

$$L_{2^m}(2^{2^m-1}) \quad (3)$$

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 있으며, 결과적으로 설계 변수가 늘어나면 그에 따라 매우 많은 수의

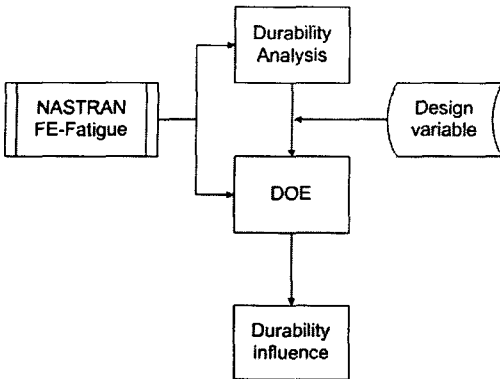


Fig. 1 Procedure of spot weld design

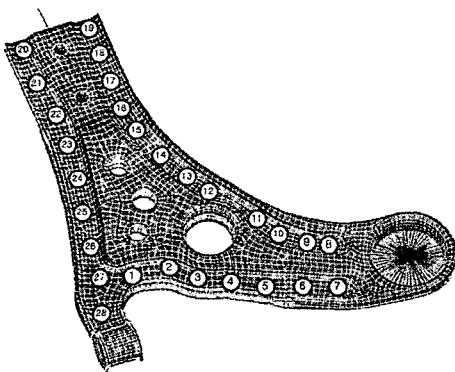


Fig. 2 FE model of an LCA

실험을 거듭해야 한다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 설계에 고려될 용접점에 대해 수명 해석을 먼저 수행한 후 그 결과를 가지고 수명이 긴 순서에 따라 설계 변수가 될 용접점을 선택하였다. 즉, 수명이 긴 용접점이 수명이 짧은 경우에 비해 제거되어도 전체 구조의 내구 특성에 영향을 덜 줄 것이라고 가정하였다. 이렇게 선택된 용접점을 설계 변수로 선정하고, 이들의 존재 유무에 따라 2단계 직교배열표를 구성하고, 앞서 정의한 내구 영향도 지수를 반응 값으로 분석하여 최종적으로 각 용접점의 영향도를 계산할 수 있다. 이 과정을 도식화하여 나타내면 Fig. 1과 같다.

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

Table 1 Durability influence index for the LCA

	1	3	28
Index 1 ( $\times 10^{-2}$ )	-1.36	-3.79	-3.98
Index 2 ( $\times 10^{-3}$ )	-8.62	-3.17	-4.93

Table 2 Change of fatigue life of spot welds

weld	original	remove 1	remove 3	remove 28
22	$3.19 \times 10^2$	$3.19 \times 10^2$	$3.19 \times 10^2$	$3.19 \times 10^2$
23	$1.16 \times 10^4$	$1.16 \times 10^4$	$1.16 \times 10^4$	$1.16 \times 10^4$
5	$2.81 \times 10^6$	$2.29 \times 10^6$	$2.84 \times 10^6$	$2.81 \times 10^6$
27	$1.30 \times 10^9$	$1.30 \times 10^9$	$1.30 \times 10^9$	$9.91 \times 10^7$
2	$6.98 \times 10^9$	$2.28 \times 10^9$	$1.72 \times 10^7$	$2.28 \times 10^9$

#### 4. 자동차 부품에 적용

앞 절에서 제안한 점용접 설계 방법론을 점용접으로 조립된 자동차 부품에 적용하여 내구 및 피로 수명 관점에서 큰 영향 없이 용접점의 개수를 줄여보았다. 시험 대상으로 택한 부품은 LCA(lower control arm)와 shock tower로 두 경우 모두 설계할 때 내구 및 피로 수명을 고려해야 하며 용접점이 다수 포함되어 있다.

##### 4.1 LCA

LCA는 볼 조인트, 고무 부시 등으로 이루어져 있으며 바퀴와 차체 또는 차축을 이어주는 부품으로 지면과 현가장치로부터 불규칙한 하중을 지속적으로 받는다. 본 연구에 사용된 모델은 Fig. 2와 같이 28개의 점용접을 포함하고 있으며, 벨지안로를 달린 후 얻은 15 자유도의 하중 이력을 해석에 사용하였다.

먼저 점용접 수명 해석을 해본 결과 Fig. 2의 용접점 번호 가운데 1, 3, 28번의 용접점이 가장 긴 수명을 보였기 때문에 이들을 변수로 실험 계획법을 적용해 보면 다음 Table 1과 같은 결과를 얻을 수 있다. Table 1에서 영향도 (1)은 식 (1)에 의해 내구 영향도 지수를 계산한 결과이고 영향도 (2)는 식 (2)에 의해 내구 영향도 지수를 계산한 결과이다. 결과를 보면 영향도 (1)의 경우 1번 용접점의 영향이 가장 작다고 평가된 반면 영향도 2의 경우 3번 용접점의 영향을 가장 작게 평가하고 있다.

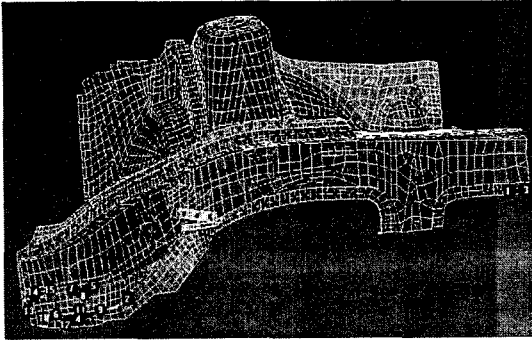


Fig. 3 FE model of shock tower

Table 3 Life change of spot welds according to removing 5 spot welds using influence index (1)

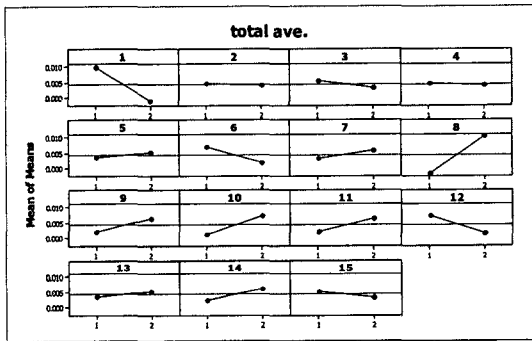
weld	original	changed	difference
32275	9.86E+12	9.42E+12	-4.48E+11
32283	2.25E+05	2.47E+05	2.18E+04
32317	2.64E+15	3.91E+15	1.27E+15
32555	2.78E+16	5.51E+16	2.73E+16
32556	3.13E+11	3.71E+11	5.85E+10
34594	1.15E+19	3.86E+18	-7.63E+18

4.2 Shock tower

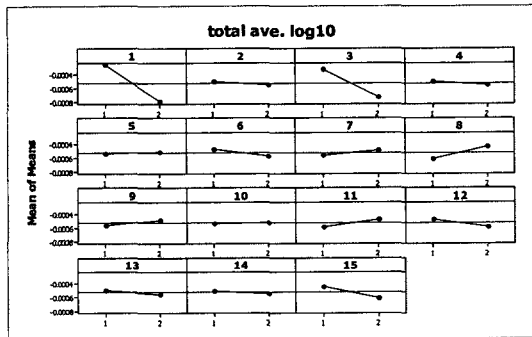
Shock tower는 strut tower라고도 불리우며, 지면으로부터 들어오는 하중을 많이 받는 부분으로 Fig. 3과 같은 모델을 사용 하였고, 하중은 하나의 범프 힘을 반복적으로 지나는 것으로 가정하여 적용하였다. 이 모델은 200개 이상의 점용접이 포함되어 있어 실험 계획법을 바로 적용하기는 매우 어렵다. 따라서 FE-Fatigue를 통해 점용접 수명 해석을 먼저 수행하여 수명이 긴 점용접 15개를 실험 계획법에 적용할 설계 변수로 선택하였다. 이렇게 선택된 설계 변수를 가지고 실험 계획법에 의해  $L_{16}(2^{15})$  직교배열표를 구성하였고, 식 (1)과 식 (2)에 따른 내구 영향도 지수를 분석해보면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 4의 분석표는 15개의 설계 대상 점용접의 영향도를 보여주고 있다. 각각의 그래프에서 왼쪽 끝점은 점용접이 존재하는 경우의 영향을 나타내며 오른쪽 끝점은 점용접을 제거한 상태에서의 영향을 의미한다. 또한, 각각의 그래프 기울기가 음수인 경우는 그 점용접을 제거하면 전체적으로 수명이 떨어짐을 의미하며 기울기가 없거나 양수일 경우 수명이 떨어지지 않는다고 볼 수 있다. 결과를 보면 두 평가가 약간의 차이는 있지만 1, 3, 6, 12, 15 등 다섯 개의 점용접은 제거하기 어렵다는 결론을 주고 있다.

이 결과를 토대로 가장 영향이 적은 것으로 판단되는 점용접을 5개 선택하여 제거한 후 나머지 점용접에서의 수명의 변화를 통해 제거 대상 선정 방법이 적절한지 살펴보았다. Table 3은 영향도 지수 (1)에 의해 5개의 점용접을 선택하여 제거했을 때의 결과 가운데 원래 수명에 비해 변경된 설계에서의 수명이 3% 이상 변화가 발생한 용접점을 나타낸 것이다. 표에서 수명차가 음수



(a) DOE analysis result using influence index (1)



(b) DOE analysis result using influence index (2)

Fig. 4 Influence of spot welds in shock tower

1번, 3번 28번 용접점을 제거할 경우 발생하는 나머지 용접점에서의 수명 변화를 직접 살펴보면 Table 2와 같다. Table 2는 전체 점용접 가운데 가장 수명이 짧은 점용접과 수명의 변화가 발생한 점용접을 나타내고 있다. 결과를 보면 두 경우 모두 수명이 짧은 부위에서의 수명 변화가 없고 수명이 긴 쪽에서 수명의 변화가 있고, 결과적으로 전체 구조의 내구 특성에 심각한 영향을 주지는 않고 있음을 확인할 수 있다.

로 발생한 경우, 설계 변경에 따라 수명이 줄어드는 것을 의미한다. 제거된 점용접의 위치는 Fig. 5에 파란 원으로 위치를 나타내었으며, 점용접 제거로 인해 수명이 줄어든 점용접은 빨간 원으로 위치를 나타내었다. Table 4는 영향도 지수 (2)에 의해 5개의 점용접을 선택하여 제거한 결과 가운데 수명의 변화가 원래 수명에 비해 3% 이상인 점용접에서의 수명 변화를 나타내고 있으며, 제거된 점용접과 이로 인해 수명이 줄어든 점용접의 위치를 각각 Fig. 6에 나타내었다.

결과를 보면 영향도 식 (2)에 따라 점용접을 제거할 때가 식 (1)에 따라 제거할 때 보다 더 많은 점용접에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 결과는 영향도 식 (1)에 의해 선택된 용접점이 모델의 가장자리에 있음을 의미하기 때문에 다른 부품과의 연결을 고려한다거나 차량 전체를 대상으로 해석할 경우 결과는 더 비슷해질 것으로 보인다. 수명이 줄어드는 점용접을 조사해 보면, 영향도 식 (1)에 의한 결과의 경우 원래 수명이  $1 \times 10^{13}$  사이클 이상인 안전한 부위임을 알 수 있고 영향도 식 (2)의 경우도 원래 수명이  $4 \times 10^9$  사이클 이상인 점들에서만 수명의 감소가 일어났다. 또한 감소된 수명도 모두 안전한 범위 내에 들어있음을 확인할 수 있었다.

**Table 4** Life change of spot welds according to removing 5 spot welds using influence index (2)

weld	original	changed	difference
31928	1.28E+16	2.02E+16	7.40E+15
31929	3.21E+13	2.48E+13	-7.26E+12
31982	3.25E+16	5.35E+16	2.10E+16
32038	1.43E+18	8.49E+17	-5.84E+17
32039	1.25E+17	1.12E+17	-1.29E+16
32090	7.25E+08	9.54E+08	2.29E+08
32117	1.56E+14	2.37E+14	8.15E+13
32274	4.56E+11	3.84E+11	-7.34E+10
32275	9.86E+12	9.42E+12	-4.48E+11
32283	2.25E+05	2.47E+05	2.18E+04
32317	2.64E+15	3.91E+15	1.27E+15
32563	4.19E+09	1.40E+09	-2.79E+09
32564	8.58E+12	4.59E+12	-3.99E+12

모델에서 수명이 가장 낮은 점용접의 경우 수명이  $1 \times 10^3$  사이클 미만의 점용접은 수명의 변화가 전혀 없었으며, 그 밖에  $1 \times 10^6$  사이클 이하의 점용접에서도 수명 변화가 1%를 넘지 않았다. 따라서 모델 전체를 보았을 때 내구 및 피로 수명에 끼치는 영향은 심각하지 않음을 알 수 있으며 결과적으로 내구 관점을 고려하여 제거될 대상 점용접을 적절하게 선택했다고 볼 수 있다.

5. 결 론

점용접의 내구 성능을 고려하여 용접점 수를 줄이는 합리적 방법을 제안하였다. 점용접 요소를 사용한 모델을 이용하여 점용접의 내구 영향도 지수를 정의하였고, 이 지수를 이용하여 실험 계획법에 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.

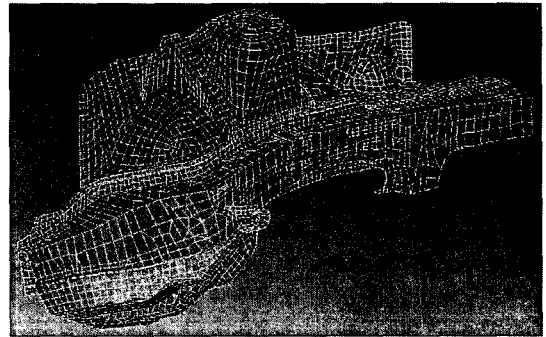


Fig. 5 Removed weld elements by index (1)

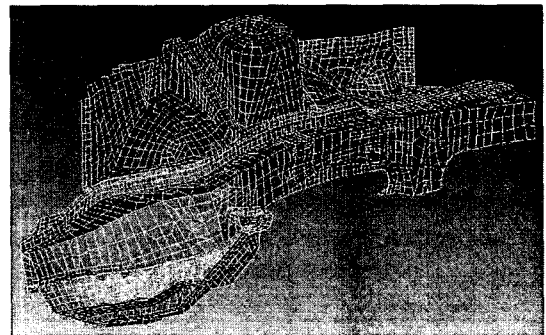


Fig. 6 Removed weld elements by index (2)

제안된 방법을 점용접으로 조립되어 점용접부의 내구 특성이 고려되어야 하는 부품인 lower control arm과 shock tower 모델에 적용하였다. Lower control arm에 적용하여 두 가지 영향도 계산식을 이용해 제거 가능한 용접 점을 각각 하나씩 얻었고, 점용접을 제거한 경우 두 가지 결과 모두  $1 \times 10^6$  사이클 이하의 수명을 가진 점용접에서는 수명의 변화가 전혀 없으며,  $1 \times 10^9$  사이클 이상의 긴 수명을 보이던 안전한 점에서 수명이 줄어들었으나 변화된 수명 역시  $1 \times 10^9$  사이클 이상의 긴 수명을 보여 제안된 결과에 따라 설계를 변경해도 내구 측면에서 볼 때 안전한 결과임을 확인할 수 있었다.

Shock tower 모델의 경우 두 가지 영향도 평가식에 의해 각각 5개의 제거 대상 점용접을 찾아냈으며, 이 점용접을 제거하여 변경된 설계에 대해 수명 변화를 조사해 본 결과 역시  $1 \times 10^6$  사이클 이하의 수명을 가지는 점용접에서의 수명 변화는 거의 없었으며, 대부분의 수명의 감소는  $1 \times 10^9$  사이클 이상의 수명을 가지는 안전한 부위에서 발생하였음을 확인할 수 있었다. 또한 줄어든 수명 값 자체도 내구 관점에서 안전한 범위에 있어 결과적으로는 대략 모델 전체로 보았을 때 2%에 해당하는 점용접을 제거하여 생산 비용과 조립 시간을 줄일 수 있는데 비해 수명이 낮은 부위에는 전혀 수명의 변화를 초래하지 않고 있어 피로 및 내구 수명의 관점에서는 영향을 주지 않는 결과를 얻었다.

## 후 기

본 논문은 GM 대우 자동차의 지원으로 수행된 과제를 통해 연구되었다.

## 참고문헌

(1) Ryu, S. U., Lee, J. C. and Lee, T. S., 1998, "Development of CAD Tool for Optimal Spot Weld Joints," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 22,

No. 1, pp. 148~159.

- (2) Ryu, S. U. and Lee, T. S., 1998, "Development of Optimal Design System for Spot Weld Joints: Part I Optimization Methodology," *Proc. KSME(A)*, pp. 408~413.
- (3) Park, J. W., Chae, S. W. and Lee, T. S., 2000, "Adaptive Finite Element Mesh Construction for Optimal Design of Spot Welding," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 24, No. 7, pp. 1763~1770.
- (4) Chae, S. W., Kwon, K. Y. and Lee, T. S., 2002, "An Optimal Design System for Spot Welding Locations," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 38, pp. 277~294.
- (5) Zhang, Y. and Taylor, D., 2001, "Optimization of Spot-welded Structures," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 37, pp. 1013~1022.
- (6) Leiva, J. P., Wang, L., Recek, S. and Watson, B. C., 2001, "Automobile Design Using the GENESIS Structural Optimization Program," *Nafems Seminar: Advances in Optimization Technologies for Product Design*.
- (7) Leiva, J. P., Watson, B. C., Kosaka, I. and Vanderplaats, G. N., 2002, "Dynamic Finite Element Analysis and Optimization in GENESIS," *9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*.
- (8) Jeon, S. H., Lee, S. B., Kim, H. S. and Yim, H. J., 2003, "A Study on the Spot Welding Location Optimization for the Thin-walled Structures Considering Fatigue Life," *Proc. KSAE*, pp. 1453~1458.
- (9) Kim, M. S., Lee, C. W., Son, S. H., Yim, H. J. and Heo, S. J., 2003, "Shape Optimization for Improving Fatigue Life of a Lower Control Arm Using the Experimental Design," *Tran. KSAE*, Vol. 11, No. 3, pp. 161~166.
- (10) Choi, N., Park, J. M. and Lee, B. C., 2005, "Optimization on the Number of Spot Weld Point of Vehicle Components Using DOE with CAE Analysis," *Proc. KSME(A)*.