

점용접부의 피로수명을 고려한 용접 피치 최적설계

이 상 범^{*1)} · 전 상 훈²⁾ · 임 홍 재¹⁾

국민대학교 기계자동차공학부¹⁾ · 국민대학교 자동차공학전문대학원²⁾

Optimum Design of Welding Pitch Considering Fatigue Life of Spot Welding Nuggets

Sang Beom Lee^{*1)} · Sang Hoon Jeon²⁾ · Hong Jae Yim¹⁾

¹⁾School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

²⁾Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received 18 February 2007 / Accepted 4 March 2008)

Abstract : The purpose of this paper is to propose a systematic method on the weld pitch design of a vehicle sub-frame considering the fatigue life of spot welding points. The input data, which perform the fatigue analysis on the spot welding nuggets, are obtained by both the dynamic analysis of the multi-body vehicle model passing through the virtual proving ground of a typical Belgian road and the quasi-static analysis with the finite element model of the vehicle sub-frame. By utilizing the life cycle data obtained from the fatigue analysis, the welding points to perform the pitch change are determined. The sensitivity analysis on the fatigue life of the welding points is carried out by using the three-level orthogonal array design, and through the results of the sensitivity analysis, the best combination on the welding pitch is determined. This study shows that as compared with the baseline design, the sub-frame redesigned by the proposed technique improves the fatigue life about 7 percent while reducing the number of welding points about 19 percent.

Key words : Design of experiments(실험계획법), Fatigue analysis(피로해석), Optimum design(최적설계), Orthogonal array design(직교배열설계), Spot welding(점용접), Sub-frame(서브프레임), Welding nugget(용접너깃)

1. 서론

점용접은 박판 철강재를 사용하는 차량의 차체 및 새시부품을 제작하는데 있어서 가장 많이 사용되는 제조방법으로서 승용차 제작 시 약 4,000 여개의 점용접을 하게 된다. 점용접의 대표적인 장점으로 빠른 작업속도를 제공하고 차체의 중량을 제조 및 조립과정에서 증가시키지 않는 것이다.

그러나 차량 주행 시 발생하는 내구문제의 약 70% 이상이 이러한 점용접과 관련된 부위에서 발생하게 되는데, 이는 부적절한 용접피치로 인한 점용

접 부위의 응력집중이나 용접불량 등으로 인하여 발생하는 것들이다. 따라서 점용접에 대한 내구성능은 차량의 수명과 안전도에 있어서 매우 중요하며 설계초기단계부터 반드시 고려해야 하는 사항이다.

차량 구조물의 점용접에 대한 내구수명을 예측하고 평가하기 위한 다양한 이론과 실험적 기법들이 그 동안 많은 연구자들을 통하여 개발되어 왔으며, 최근 들어 컴퓨터 성능의 비약적인 발전과 더불어 근사적 수치해법을 이용하는 다양한 종류의 상용유한요소해석 소프트웨어가 개발됨에 따라 설계초기 단계부터 점용접 부위에 대한 내구성능을 효과적으

*Corresponding author, E-mail: sblee@kookmin.ac.kr

로 평가할 수 있게 되었다.^{1,2)}

본 연구에서는 피로하중 하에 있는 차량 서브프레임의 점용접 내구성능을 향상시키기 위한 용접피치 최적설계기법을 제안한다. 정적 유한요소해석과 가상 벨지안 로드(virtual Belgian road) 주행 동역학 해석을 통하여 추출된 동하중 이력 데이터를 이용하여 서브프레임 점용접부에 대한 피로해석을 수행하고 이를 통하여 설계변경 할 변수를 선정한다. 또한 3-수준 직교배열 실험계획법을 이용하여 선정된 용접점의 피로수명에 대한 민감도해석을 수행하며, 계산된 민감도를 이용하여 최적의 용접피치를 결정한다. 본 연구를 통하여 개발한 설계기법의 효용성을 평가하기 위해 준중형 승용차의 전방 서브프레임을 대상으로 점용접 부위에 대한 피로수명을 설정하고 이를 만족시키는 용접피치를 결정한다.

2. 이론적 배경

본 연구에서 사용되는 점용접 피로해석(spot welding fatigue analysis) 기법과 3-수준 직교배열표(3-level orthogonal array)를 이용한 실험계획법(DOE; design of experiments)에 대해 기술한다.

2.1 점용접 피로해석

본 연구에서는 점용접의 내구수명을 예측하는 방법으로 MSC/Fatigue에서 제공하는 점용접 피로해석 모듈(SPOTW)을 이용한다. 이는 준정적 내구해석 기법(quasi-static fatigue analysis)에 기반을 둔 점용접부 피로해석 모듈로서 응력-수명 접근법(S-N method)을 사용하여 내구수명을 예측한다.

2.1.1 응력-수명 접근법

준정적 내구해석 기법은 시스템에 동하중이 가해지는 방향으로 단위 하중(unit load)을 가하여 변형률을 계산한 후, 시스템에 가해지는 동하중 이력(dynamic load history)을 적용하여 선형 중첩의 개념으로 시스템의 동응력(dynamic stress)을 계산한다. 이와 같이 계산된 동응력은 레인플로 사이클 집계(rain-flow cycle counting) 기법에 의하여 주요 응력 진폭에 대한 반복수를 계산한다. 마지막으로, 누적된 동응력으로 인한 피로수명을 예측하기 위하여 Miner의 손상이론을 적용한다. 이는 재료의 응력-수

명선도(S-N curve)와 가해진 동응력 반복수의 비를 이용하는 방법으로 식 (1)과 같이 정의된다.

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \tag{1}$$

식 (1)의 누적손상이론에서 손상량 D 가 1에 도달하면 파손된다는 것을 의미한다. 여기서 N_i 는 응력 크기 S_i 에서의 피로수명을 나타내며, n_i 는 응력크기 S_i 에서의 반복수를 나타낸다.^{3,4)}

2.1.2 점용접 피로해석

동하중을 받는 차체의 점용접 이음에 대한 피로수명 예측을 위해 Rupp가 제안한 방법⁴⁾을 사용한다. Fig. 1에 Ruff가 제안한 점용접 이음의 피로수명 예측 과정을 나타내고 있는데, Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 두 박판 사이에 빔 요소(Beam element)로 연결된 점용접부는 Fig. 1(c)의 정적해석(static analysis)을 통해서 점용접 이음에 작용하는 용접부 힘과 용접부 모멘트가 계산되며, 계산된 힘과 모멘트는 점용접 너깃(nugget)에서의 축방향 응력(axial stress)과 박판에서의 반경방향 응력(radial stress)을 계산하는데 사용된다. 계산된 너깃과 박판의 응력을 응력-수명 접근법을 사용하여 점용접 피로수명이 예측된다.

본 연구에서는 점용접의 유한요소 모델링을 위해 MSC/NASTRAN에서 제공하는 용접요소(CWELD)를 이용한다. 점용접 피로수명예측 과정은 기존의 빔요소를 이용하는 경우와 동일하지만 용접요소를 이용하면 메시 밀도(mesh density)가 서로 다른 부품

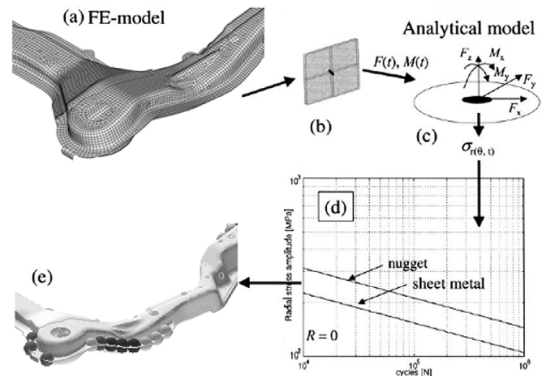


Fig. 1 Estimation process for the fatigue life of spot welds

을 자유롭게 연결할 수 있고, 또한 유한요소 모델링 과정에서의 오차를 줄임으로써 더 나은 해석 결과를 기대할 수 있다.⁴⁾

2.2 직교배열표를 이용한 실험계획법

특성치에 영향을 미치는 요인을 찾아내기 위한 큰 그물을 치기 위해서는 2ⁿ형 실험계획이 많이 사용된다. 그러나 수준수가 반드시 3개이어야 하거나, 인자가 계량치이기 때문에 현재의 조건보다 큰 쪽이 좋은가 혹은 작은 쪽이 좋은가가 명확하지 않을 때에는 3^m형의 실험이 사용되고 3-수준계의 직교배열표가 활용된다. 아래의 식 (2)에 3-수준 직교배열표에 대한 수식을 나타내었다.⁵⁾

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

여기서 m 은 2 이상의 정수, 3^m 은 실험의 크기, $(3^m-1)/2$ 은 직교배열표의 열의 수를 나타낸다. 3-수준계의 가장 작은 직교배열표는 $m=2$ 인 $L_9(3^4)$ 이며, Table 1과 같이 구성된다.

Table 1 Table of orthogonal array for $L_9(3^4)$

No. of experiment	Column number			
	1	2	3	4
1	0	-1	-1	-1
2	0	+1	+1	+1
3	-1	0	-1	+1
4	-1	-1	+1	0
5	-1	+1	0	-1
6	+1	0	+1	-1
7	+1	-1	0	+1
8	+1	+1	-1	0

3. 용접점 피로해석

3.1 유한요소모델

용접점 위치최적설계를 수행하기 위해 모델링한 준중형 승용차의 서브프레임(sub-frame) 유한요소 모델을 Fig. 2에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 서브프레임은 프런트멤버(front member)와 리어멤버(rear member) 및 사이드멤버(side member)로 구성되며, 각 멤버들은 외판(outer panel), 내판(inner panel), 보강판(reinforcement panel)으로 구성되어 있

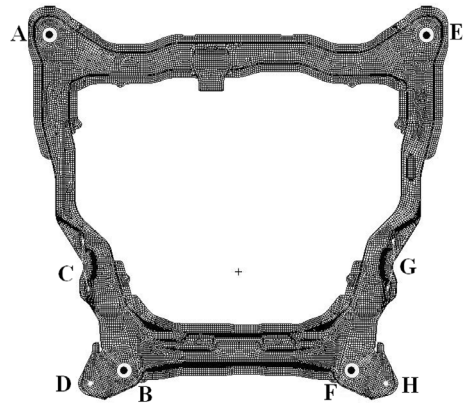


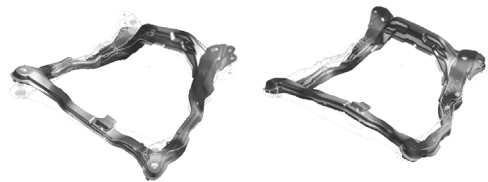
Fig. 2 Finite element model of vehicle sub-frame(Model I)

다. 이 모델은 56,000여개의 요소와 54,000여개의 절점 및 110개의 용접요소로 모델링하였다. 이 모델의 물성치를 Table 2에 나타내었다.

최적설계에 앞서 유한요소모델의 타당성을 검증하기 위하여 실제 승용차 서브프레임의 고유진동수 실험 결과와 비교하였다. Fig. 3 및 Table 3에서 보는 바와 같이 유한요소모델은 실험결과와 5% 이내의 오차를 보여 해석 모델이 실제 모델과 잘 일치함을 알 수 있다.

Table 2 Material properties of vehicle sub-frame

Young's modulus	2.07×10^5 MPa
Poisson ratio	0.29
Density	7.85×10^{-9} N-s ² /mm ⁴



(a) 1st vibration mode (b) 2nd vibration mode
Fig. 3 Vibration analysis results of vehicle sub-frame

Table 3 Verification of the natural frequencies on FE model

Model	Natural frequency (Hz)	
	1 st mode	2 nd mode
Experiment	84.26	123.71
Simulation	82.84	117.68
Percent change	-1.5%	-4.6%

Fig. 2의 서브프레임 모델에서 A, B, E, F 지점은 차체와 부싱(bushing)으로 연결되며, C, D, G, H 지점은 부싱을 통하여 LCA(lower control arm)과 연결된다. 따라서 노면으로부터 입력되는 동하중은 LCA의 볼 조인트(ball joint)를 통해 C, D, G, H 지점으로 전달되어 서브프레임의 용접점에 대한 피로수명에 영향을 주게 된다.

3.2 점용접 피로해석 과정

Fig. 4에 본 연구에서 수행하는 점용접 피로해석 과정을 나타내고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 점용접 피로해석을 하기에 앞서 각 용접점에 작용하는 용접힘(weld force)을 계산하기 위하여 정적해석을 실시하는데, 부싱요소의 비선형성과 LCA와의 연결특성에 의해 발생할 수 있는 오차를 배제하기 위하여 관성제거 정적해석(inertia relief static analysis)⁶⁾을 수행하였다. 이를 위해 Fig. 2의 A~H 지점에 1N의 단위하중을 각각 x, y, z 방향으로 부가하여 총 24개의 하중조건을 생성하였다.

Fig. 5는 서브프레임이 장착된 차량 동역학해석용 ADAMS 모델을 보여주고 있으며, 40Km/h의 주행속도로 100m 구간의 가상 벨지안 로드 주행시험을 통해 각 하중입력위치에서 동하중 이력을 추출하였다.

Fig. 6은 서브프레임의 A-점에 가해지는 x, y, z 방향의 동하중 이력을 나타내고 있다.

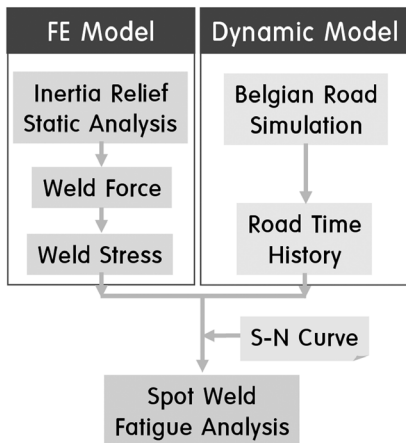


Fig. 4 Fatigue life calculation process of spot welds

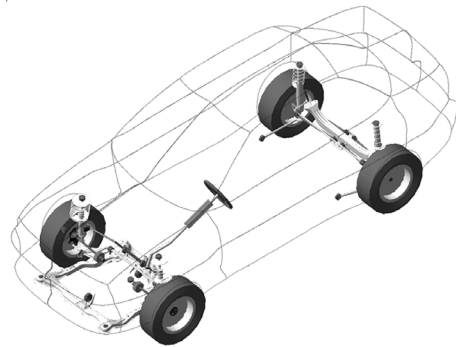


Fig. 5 Vehicle dynamic model for virtual proving ground simulation

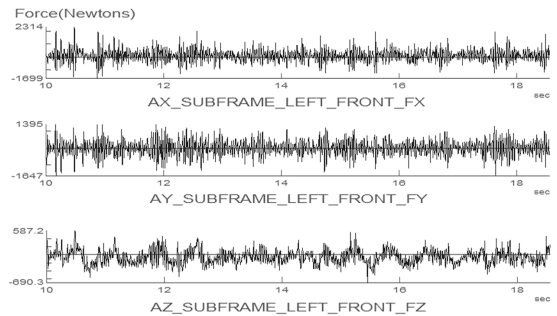


Fig. 6 Load time history of the point A on sub-frame

3.3 기본모델의 피로해석

앞 절에서 제시한 방법으로 차량 서브프레임 (Model I)에 대한 피로해석을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이 그림에서 적색 점은 상대적으로 피로수명이 긴 부위를, 청색 점은 피로수명이 짧은 부위를 나타낸다. 이 그림에서 보는 바와 같이 화살표로 표시한 플랜지의 형상이 급격히 변하는 부분에서 피로수명이 상대적으로 짧은 것을 알 수 있다.



Fig. 7 Fatigue analysis result on the initial model(Model I)

3.4 용접점 개수 축소모델의 피로해석

용접점 개수를 줄이기 위해 피로수명이 상대적으로 긴 10개의 용접점을 제거하고 Fig. 8에 나타낸 model II와 같이 40mm 등간격으로 용접점을 재배치하였다. 이 모델을 이용하여 좌·우측 사이드 멤버의 상판과 하판을 결합하는데 사용되는 42개의 용접점만을 대상으로 피로해석을 다시 수행하였으며 그 결과를 Fig. 9에 나타내었고, Table 4에 용접점의 피로수명 하위 5개의 위치를 나타내었다.

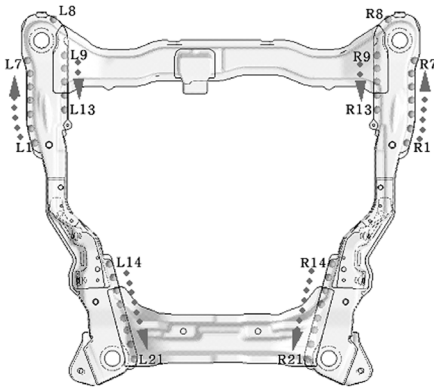


Fig. 8 Reduction of the number of spot welding points (model II)

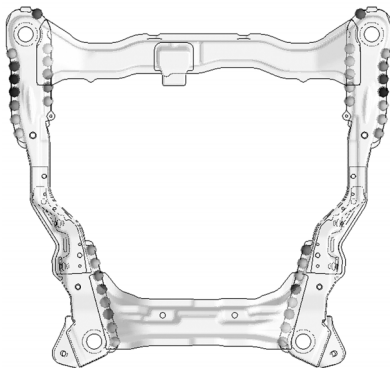


Fig. 9 Fatigue analysis result of sub-frame (Model II)

Table 4 Fatigue analysis results of the spot welding points for the left side member of sub-frame

	Damage	Life cycle
L4	1.608E-5	6.220E4
L5	8.337E-6	1.200E5
L16	1.835E-6	5.450E5
L18	1.588E-6	6.300E5
L6	8.789E-7	1.140E6

4. 점용접 위치최적설계

4.1 설계변수 선정

점용접 위치 최적설계를 수행하기 위하여 3.4절의 피로해석 결과에서 최소피로수명을 보인 용접점 L4와 주변 용접점인 L3, L5, L6을 위치변경을 위한 설계변수로 선정하였으며 각 위치조절점의 수준으로서 Fig. 10과 같이 수평방향이동(-1, 1)과 변동하지 않는 값(0)으로 설정하였다.

용접점 간격에 대한 구속조건으로써, 점용접 시 적정한 전기적 저항값의 확보를 위한 고려가 필요하다. 1mm 두께의 연강 박판을 점용접 할 때 용접점 사이의 간격은 최소 12mm 이상 되어야 하며, 박판의 두께에 비례하여 이 간격은 넓어져야 한다. 이 조건을 만족시키지 못하면 Shunt 효과의 발생으로 용접부 불량현상이 나타난다고 알려져 있다.⁷⁾

전방 서브프레임의 박판두께가 2mm이므로 각 점용접 간 최소간격을 25mm로 구속하고 이동수준은 각 이동방향에 대해 5mm로 설정하였다.

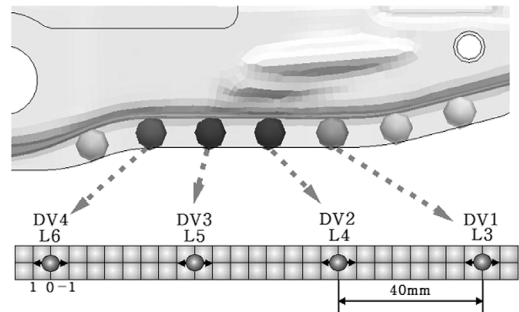


Fig. 10 Design variables for location optimization

4.2 민감도 해석

직교배열 실험계획법을 이용하여 각 설계조건에 대한 민감도 해석을 수행하였다. 이를 위해 Table 5와 같이 4인자 3수준 직교 배열표를 구성하여 8개의 실험모델을 생성하였다. 각 모델에 대해 앞서 수행했던 방법과 동일한 조건으로 피로해석을 수행하였으며 각 실험별 최저피로수명을 이 표에 나타내었다. 이 표에 나타난 최저피로수명은 모두 model II와 동일한 위치인 L4점에서 발생하였다.

Table 5로부터 알 수 있는 바와 같이 가장 긴 피로수명을 보이는 8번 실험결과를 가장 짧은 피로수명

Table 5 Minimum fatigue life of the welding point-L4 for each experimental model

	DV1	DV2	DV3	DV4	Life cycle
1	0	-1	-1	-1	7.174×10^4
2	0	1	1	1	4.570×10^4
3	-1	0	-1	1	4.587×10^4
4	-1	-1	1	0	4.570×10^4
5	-1	1	0	-1	5.180×10^4
6	1	0	1	-1	7.173×10^4
7	1	-1	0	1	7.897×10^4
8	1	1	-1	0	8.211×10^4

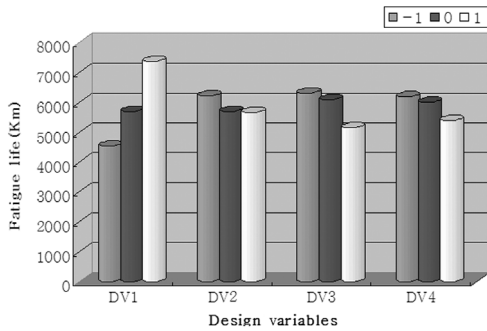


Fig. 11 Design sensitivity analysis for the fatigue life

을 보이는 2번이나 4번 실험결과와 비교해 볼 때, 점 용접 이음의 위치변화에 따라 최소피로수명이 약 44.3%의 차이가 발생함을 알 수 있다. 이는 각 점 용 접 이음의 위치 변화에 따라 피로수명이 민감하게 변한다는 사실을 말해주는 것으로서 각 설계변수에 대한 민감도 해석이 요구됨을 알 수 있다. 이를 위해 피로수명의 용접점 위치에 대한 민감도 해석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 이 그림으로부터 최적화된 모델의 설계변수 조합은 (1, -1, -1, -1)임을 알 수 있다.

4.3 용접피치 최적설계

최적화된 모델의 용접피치를 Fig. 12에 나타내었 으며, 이 모델에 대하여 피로해석을 수행한 결과를 Table 6의 Model III에 나타내었다. Table 6에서 보는 바와 같이 최적화된 모델(Model III)은 40mm로 용접 피치를 일정하게 만든 모델(Model II)에 대해서 약 30%의 피로수명이 증가하였으며, 초기모델(Model I)에 대해서는 용접점 10개의 감소와 더불어 약 7.8%의 피로수명이 증가하였다.

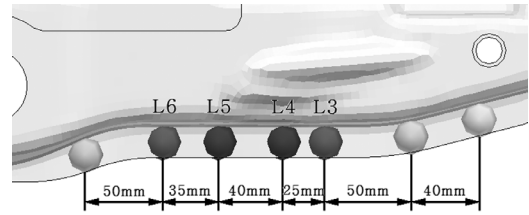


Fig. 12 Spot welding pitch for optimized model(Model III)

Table 6 Comparison of the fatigue life cycle and the number of spot welding points for each model

	Life cycle	Number of welding points
Model I	9.049×10^4	52
Model II	6.220×10^4	42
Model III	9.757×10^4	42

5. 결론

본 연구에서는 차량 서브프레임의 결합에 사용되는 점용접의 피로수명을 고려한 용접피치설계에 대한 체계적인 방법을 다음과 같이 제시하였다.

- 1) 서브프레임의 정적 유한요소해석과 차량의 가상 벨지안 로드 주행 동역학 해석을 통하여 추출된 동하중 이력 데이터를 이용하여 서브프레임 점용접부에 대한 피로해석을 수행하고 이를 통하여 설계변경 할 변수를 선정하였다.
- 2) 선정된 용접점을 3-수준직교배열 실험계획법을 이용하여 피로수명에 대한 설계변수의 민감도를 산출하였다.
- 3) 산출된 설계민감도를 이용하여 최적화된 용접 피치를 갖는 모델을 구성하였다.
- 4) 본 연구에서 제시한 최적화기법을 준중형 승용차의 서브프레임에 적용하여 기존모델에 비해 점용접 개수를 약 19 % 줄이면서 피로수명을 약 7 % 향상시킨 모델을 얻을 수 있었다.

References

- 1) Y. Zang, "Optimization of Spot-welded Structures," Finite Element in Analysis and Design, Vol.37, pp.1013-1022, 2001.
- 2) 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.
- 3) K. Y. Lee, Mechanical Behaviors of Materials, Yonsei Univ. Press, pp.80-82, 1999.
 - 4) MSC/Fatigue User's Guide Ver.2001, MSC. Software Co., pp.660-722, 2001.
 - 5) S. H. Park, Modern Design of Experiments, Min Young Sa, pp.11-21, 423-475, 1990.
 - 6) MSC/Nastran User's Guide Linear Static Analysis Ver.2001, MSC. Software Co., pp.432-451, 2002.
 - 7) T. S. Lee, “Development of CAD Tool for Optimal Spot Weld Joints,” Transactions of KSME, Vol.22, No.1, pp.148-159, 1998.