

진동특성 및 측면충돌 성능을 고려한 차체의 점용접 치수 최적화 연구

A Study on Optimal Spot-weld Layout Design of the Vehicle Body Structure Considering Vibration and Side Impact

신경호* · 이준영** · 박홍익** · 임홍재†

,Gyung Ho Shin, Jun Young Lee, Hong Ik Park and Hong Jae Yim

Key Words : Dynamic Stiffness(동강성), Side Impact(측면충돌), Spot-weld(점용접), Topology Optimization(위상최적화)

ABSTRACT

In this study we conduct the optimal spot-weld layout design of vehicle body structure considering dynamic stiffness and side impact. We conduct both linear static analysis and nonlinear analysis with a baseline model to verify the process. 13 design variables will be selected for the effect analysis. Then, topology optimization is conducted to each selected design variable. The design constraints are formulated to improve the dynamic stiffness and side impact performance. Objective function is to set the density of weld component. Optimal spot-weld layout design are compared with the baseline model to show the improvement.

1. 서 론

자동차 개발에 있어 고강도, 고강성의 차체를 설계하기 위해서는 진동 및 소음성능, 내구성능, 충돌 안전성능과 같은 설계 제약조건들이 차체 설계 초기 단계에 반영되어 보다 단기간 내에 차량이 제작될 수 있도록 설계과정이 이루어져야 한다. 차체 조립에 일반적으로 사용되는 공정인 점용접은 두 장 이상의 금속 판재의 겹침 이음새 부위에 접촉함으로써 통전 후 가압되는 방식의 용접기법으로 점의 개수, 위치 및 용접의 품질에 따라 용접된 조립부 및 전체 구조물의 성능을 포함한 조립공정의 속도와 원가에도 중요한 인자이다. 때문에 현재 많은 연구가 이루어지고 있으며 이러한 연구들로 점용접의

일정 간격 배치에 대한 연구와 용접부에서의 피로나 집중응력에 의해 발생하는 파단 위주의 연구가 주로 수행되어 왔지만 동강성 및 충돌성능에 대한 연구는 미흡한 실정이다.⁽¹⁾ 차체의 점용접 치수 최적화를 위해 선행된 연구로, 점용접의 개수에 따른 동강성 변화에 의한 비틀림 모드와 굽힘 모드 진동수의 합을 최대화하는 점용접 치수에 대한 연구가 수행되었다.⁽²⁾ 그러나 점용접 개수의 감소에 따른 강성의 변화를 보여준 연구로 확실한 최적모형을 제시하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 측면 충돌성능 및 동강성을 고려한 차체의 점용접 치수 최적화에 관하여 연구하고자 한다. 동강성 및 충돌성능에 영향을 주는 인자를 찾기 위해 차체를 여섯부분의 설계영역으로 나누고 효과분석을 수행한다. 10mm 간격으로 새로운 점용접 모델을 만들고 최적설계를 진행하여 최적화 모델을 수립하고 기본 모델과 비교 평가를 진행한다.

† 교신저자; 국민대학교 자동차공학과

E-mail : hjyim@kookmin.ac.kr

Tel : (02) 914-8812, Fax : (02) 910-5037

* 국민대학교 자동차공학 전문대학원

** 국민대학교 자동차공학 전문대학원

2. 단순 모델의 선형 및 비선형 해석

위상최적화를 수행하기 이전에 충돌에 의한 점용접의 응력변화에 따른 선형 및 비선형 해석 비교를 위해 Fig. 1와 같이 차체의 B-필라를 점용접에 대한 단순모델로 구성하고 해석을 진행하였다. B-필라 단순모델의 물성치는 Table. 1와 같으며 모델의 양 끝단을 6자유도 구속을 하였다. Fig. 2와 같이 각 A, B 부분에서의 용접점의 응력 값을 측정하였다. 각 부분의 점용접은 기존 점용접 위치를 따라 10mm 간격으로 파트 A는 100개 B는 80개의 용접점을 새롭게 배치하였다. 비선형 해석의 경우 측면 충돌시험과 동일한 조건을 구성하기 위하여 총 중량 1500 kg인 충돌차량을 90° 방향에 50 km/h의 속도로 충돌해석을 진행하였다. 선형해석의 경우 충돌위치 부분에 비선형 해석시 발생하는 응력을 적용하였고 Fig. 3에서 그 결과를 확인할 수 있으며 Fig. 4와 Fig. 5에서와 같이 해석 모델에서의 파트별 점용접 응력 값을 비교하였다. 선형 및 비선형 모델의 결과를 비교하였을 때 응력의 절대값은 차이가 발생하였으나, 용접점의 응력분포의 경우 그 경향이 매우 유사한 결과가 나타내는 것을 확인할 수 있다. 따라서 위상최적설계를 통한 점용접 치수 최적화의 경우 각각의 용접점에 작용하는 응력을 기준으로 응력이 상대적으로 적게 발생하는 용접요소를 소거하는 방식으로 비선형해석 모델에 적용하여 측면충돌성능을 향상시키는 위상최적설계 수행이 가능하다고 판단된다.

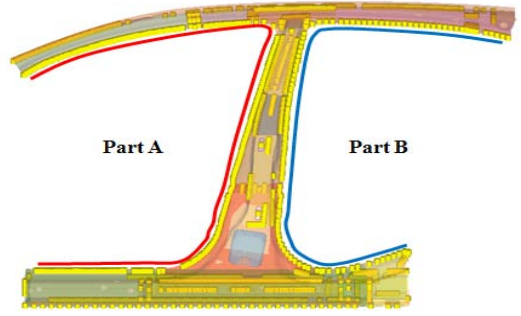
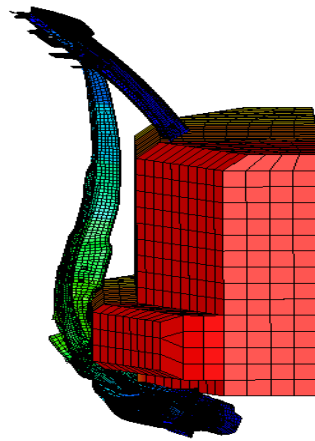
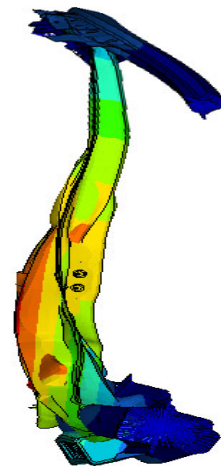


Fig. 2 Spot-weld locations in B-pillar model



(a) crash analysis



(b) static analysis

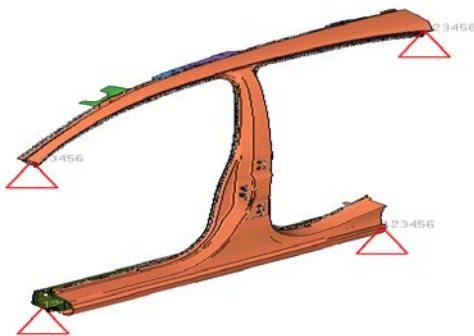


Fig. 1 Simple model of B-pillar

Fig. 3 Result of crash and static analysis

Property	B-pillar	Spot weld
Young's modulus	200	210
Poisson ratio	0.3	0.3
Density(kg/mm ³)	7.83 × 10 ⁻⁶	3.5 × 10 ⁻⁴

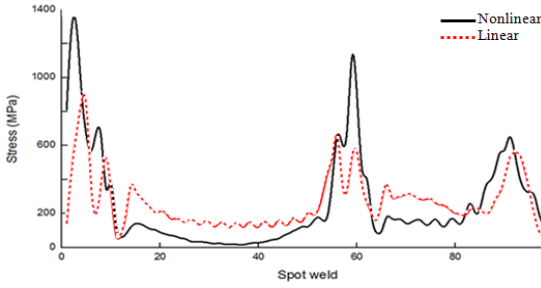


Fig. 4 Spot-weld stress of part A

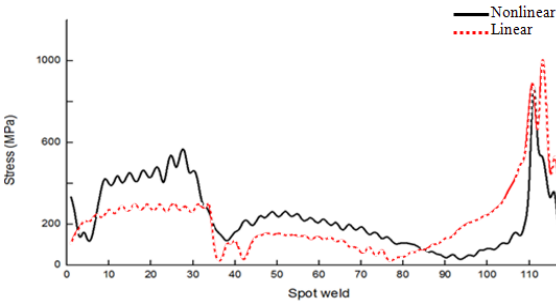
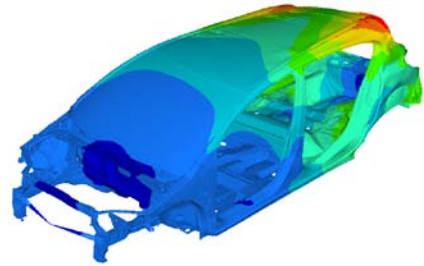
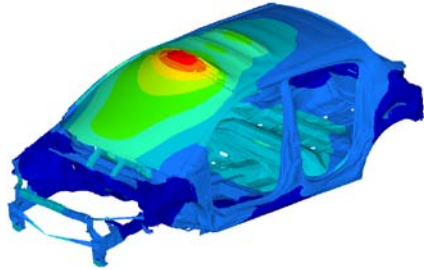


Fig. 5 Spot-weld stress of part B



(a) First torsion mode



(b) First bending mode

Fig. 6 Result of natural frequency analysis

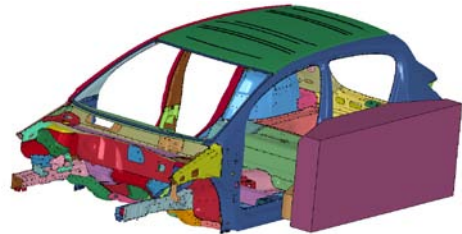
3. 차체 점용접 시스템의 동강성 및 충돌해석

3.1 고유진동 모드해석

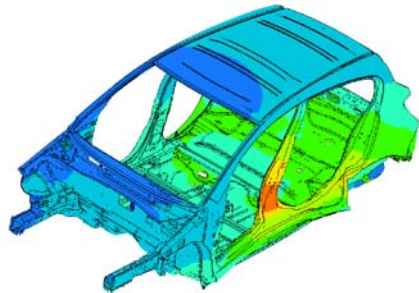
본 연구의 설계제약조건으로 정의될 기본모델의 동강성을 판단하기 위해 고유진동모드 해석을 진행하였다. 차체 후방의 결합부가 차체 강성에 취약한 부분임을 Fig. 6에서 모드 형상을 통해 확인할 수 있고 그 결과는 Table. 2에서 확인할 수 있다.

3.2 측면충돌해석

본 연구에서는 IIHS 측면충돌시험 평가 기준을 바탕으로 설계제약조건을 위해 기본모델 충돌해석을 수행하였다. 비선형 해석 프로그램인 LS-DYNA를 사용하여 IIHS 측면 충돌시험 조건 기준과 동일한 방법으로 구성하고⁽³⁾⁽⁴⁾ 해석 시간은 5msec 단위로 50msec 까지 해석을 수행하였고 이를 Fig. 7에서 확인할 수 있다. 측면충돌에서는 운전자의 좌석 중심선을 기준으로 B-필라의 최대 침입위치에 의해 충돌성능이 결정된다. 기본모델의 침입량은 220mm가 발생하였음을 확인할 수 있다.



(a) crash analysis condition



(b) Result of crash analysis in base model

Fig. 7 Crash analysis in base model

Table. 2 Result of First natural frequency of base model

No	Mode	Frequency [Hz]
1	First torsion	37.70
2	First bending	51.84

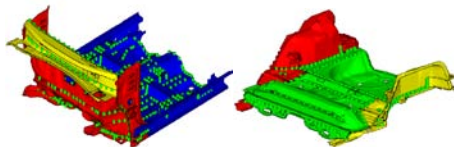
4. 효과분석을 통한 설계변수 설정

4.1 차체해석모델 세분화

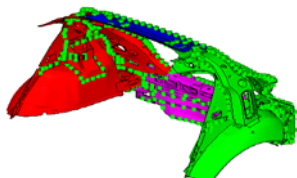
본 연구에서는 차체의 동강성 및 측면충돌성능에 영향을 주는 인자를 찾기 위해서 효과분석을 진행하였다. 차체를 차실바닥, 후방바닥, 후방, 좌측, 우측 사이드 그리고 천정의 여섯부분을 바탕으로 다시 Fig. 8과 같이 차실바닥부분 및 후방바닥에서 각각 3개의 변수를 선택, Fig. 9와 같이 후방 부분은 4개의 변수, 그리고 Fig. 10, Fig 11과 같이 좌, 우측 사이드 및 천정 부분은 1개의 변수를 설정하여 총 13개의 설계변수를 선정하였다.

4.2 효과분석

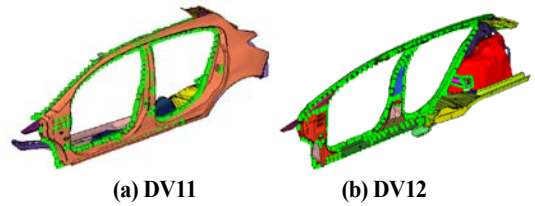
본 연구에서는 차체의 동강성 및 측면충돌성능에 영향을 주는 인자를 찾기 위해서 효과분석을 진행하였다. 차체를 차실바닥, 후방바닥, 후방 효과분석을 진행하였다. 실험계획법은 2-수준 부분 요인 설계 중 Plackett-Burman 직교 배열 설계를 이용하였다.⁽⁵⁾ Fig. 12와 Fig. 13에서 확인할 수 있듯이 동강성에 유의한 설계 변수의 경우 DV3, DV10, DV13을 제외한 모든 변수들이 동강성에 유의한 설계변수로 나타났다. 그 중 DV7와 DV8의 경우 동강성에 대한 성능지수에 크게 영향을 미치는 변수이고 DV11과 DV4는 측면충돌에 크게 영향을 미치는 변수로 두 경우 모두 차체 후방부분 결합부의 점용접 개수 및 위치 변화에 민감하다는 것을 확인할 수 있었다.



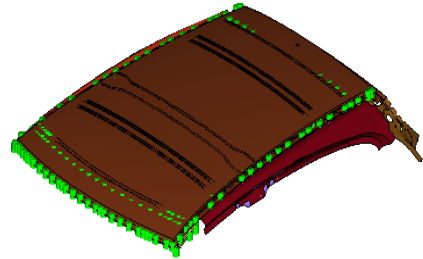
(a) DV1, DV2, DV3 (b) DV4, DV5, DV6
Fig. 8 Design variables of section of vehicle floor



(DV7, DV8, DV9, DV10)
Fig. 9 Design variables of section of rear panel



(a) DV11 (b) DV12
Fig. 10 Design variables of section of sidebody



DV13
Fig. 11 Design variables of section of roof

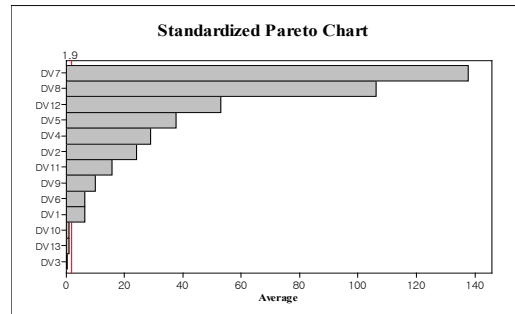


Fig. 12 Standardized Pareto chart

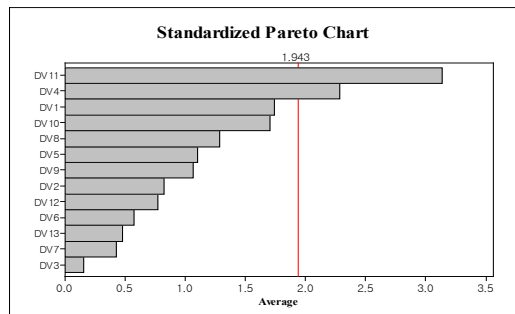


Fig. 13 Standardized Pareto chart

6. 최적설계

6.1 동강성 최적설계

먼저 13개 설계변수의 기존 점용접 위치를 따라 10mm 간격으로 새로 점용접을 재배치하고 이를 소거하는 방식으로 최적화를 진행하였다.

설계 영역 설정은 연속적인 설계영역에 적용되는 위상최적설계에 따른 점용접의 불연속적인 설계영역을 적용하기 위해 두 부재가 하나의 점용접으로 이루어진 곳을 선정하였다. 설계변수는 점용접 개수와 점용접 요소의 밀도이고 설계계약조건은 동강성의 유지 및 향상이다. 목적함수는 동강성을 유지 및 향상시키며 점용접 개수의 최소화이다.

최적화 결과 효과분석 시 동강성에 민감한 것으로 확인하였던 DV7, DV8, DV11의 경우 용접점의 개수 증가 및 위치의 변화를 확인할 수 있었다. 다른 변수들의 경우 용접점의 개수가 DV2, DV4, DV5, DV9의 경우 10%, DV3, DV6, DV10, DV13은 20% 감소한 것을 확인하였다.

6.2 측면충돌성능 최적설계

앞선 최적설계의 모델을 생성하고 측면충돌성능 최적설계를 진행하였다. 최적설계 정식화로는 설계영역과 설계 변수는 동강성 최적설계와 동일하게 설정하였고 제약조건은 기본 모델의 B-필라의 최대변위에 따른 충돌성능 유지 또는 향상이고 목적함수는 충돌성능을 유지 또는 향상시키면서 점용접 개수의 최소화이다.

최적화 결과 DV11의 경우 기본 모델의 점용접 개수와 동일하지만 위치가 변화한 것을 결과를 확인할 수 있었다. 이는 앞서 수행된 최적설계와 동일한 결과로 차체 강성에 크게 영향을 미치는 부분은 차체 후방의 결합부이기 때문이라 판단된다. DV4, DV5, DV9는 기본모델의 점용접 개수 대비 10% 감소한 것을 확인할 수 있었다. DV3, DV6, DV10, DV13의 경우 기본 모델의 점용접 개수 대비 20% 감소한 것을 확인할 수 있었다.

7. 최적화 모델 평가

7.1 고유모드해석 평가

고유모드 해석을 진행하기에 앞서 부분 최적화가 진행된 모델을 생성하였다. DV7과 DV8, DV11의 경우 기본모델과 같은 점용접 개수로 설정하였고, 나머지 변수들에 대해서는 동강성 성능지수의 영향을 우선으로 하여 DV2, DV4, DV5, DV9는 10% 감소 DV3, DV6, DV10, DV13은 20% 감소하여 전체적으로 6.7%의 점용접 개수가 감소한 최적화 모델을 생성하고 고유모드 해석을 진행하였다. 해석 결과 첫 번째 비틀림 모드, 굽힘모드의 경우 기본모델 대비 0.68% 0.36% 향상되었다.

7.2 측면충돌성능 평가

최적화 모델의 측면충돌성능 평가를 진행하였고 해석 방법은 앞서 진행한 기본모델 측면충돌 해석과 동일하다. 충돌해석 결과 B-필라 최대 변형이 212mm 발생함을 확인하였다. 이는 220mm 기본모델의 B-필라 최대변위보다 3.6% 감소한 것을 확인할 수 있었고 IIHS 기준 Acceptable 임을 확인하였다.

8. 결 론

본 연구에서는 차체의 동강성 및 측면충돌 성능을 고려한 차체의 점용접 치수 최적화를 위한 위상 최적설계를 수행하였다. 먼저 13개로 차체를 세분화 한 후 효과 분석을 수행하여 동강성 및 측면충돌성능에 민감한 부분을 확인하였다.

설계변수는 점용접의 강성밀도 제약조건은 기본 모델 측면충돌성능 및 동강성의 유지 및 향상이고 목적함수는 점용접 개수의 최소화이다. 그 결과 동강성의 경우 첫번째 굽힘 모드, 비틀림 모드가 각각 0.68%, 0.36% 향상되었음을 확인할 수 있었고, 측면충돌성능의 경우 B-필라 변형이 3.6% 감소한 것을 확인할 수 있었다. 차체의 전체 점용접의 개수는 이를 만족하며 기본모델 대비 6.7% 감소한 것을 확인하였다.

향후 연구진행 방향으로서는 정강성 및 피로수명을 동시에 고려한 점용접 치수에 대한 최적설계를 수행할 것이다.

참 고 문 헌

(1) Ryu, S. U. and Lee, T. S., 1998, Development of Optimal Design System for Spot Weld Joints(Part I) – Optimization Methodology, KSME 1998 fall Conference, pp. 408~413.

(2) Leiva, J. P. Recek, Wang. S and Watson, B.C., 2001, Automobile Design Using the GENESIS Structural Optimization Program, Nafems Seminar: Advances in Optimization Technologies for Product Design.

(3) Watanabe, K., Tachibana, M., Wiemann, M. and Frankenberg, D., 2006, Vehicle Side Structure Concept using Ultra High Strength Steel and Rollforming Technology, SAE, No.2006-01-1403.

(4) Thomson, W. T. and Dahleh, M. D., 1998, Theory of Vibration with Applications 5/e, Prentice-Hall Inc.

(5) Park, S. H., 2004, Design of Experiments With Minitab, Eraetec.