승용차 도어에 대한 형상최적설계

Shape Optimization of an Automotive Door

*강동헌[1], #이권희[2], 박영철[2], 송병철[1], 공형걸[1], 송학관[1]
*D. H. Kang[1], #K. H. Lee(leekh@dau.ac.kr)[2], Y. C. Park[2], B. C. Song[1], H. G. Kong[1], Xueguan Song[1]
[1]동아대학교 기계공학과 대학원, [2]동아대학교 기계공학과

Key words : Automotive door, Kriging, Structural Optimization, Tailor Welded Blank

1. 서론

자동차부품의 경량화 설계를 위해서 두가지 접근방법을 고려할 수 있다. 하나는 설계 및 제조기술에 의한 경량화 구현이고, 또 다른 하나는 재료기술에 의한 경량화 구현이다. 전자의 경우, 합체박판(tailor welded blank), 액압성형(hydrofor-ming)및 최적화 기술 등[1]이 있다. 후자의 예로는 주로 철강재료의 대체 재료를 개발하거나 고강도 철강재료를 개발하는데 관련된 기술이다. 최근에 수행된 경량화 및 신재료 기술을 이용한 차량개발과제로는 PNGV(Partnership for a New Generation Vehicle), ULSAB(Ultra Light Steel Auto Body), ULSAC(Ultra Light Steel Auto Closure), ULSAS(Ultra Light Steel Auto Suspension)[2] 등이 있다. 본 연구에서는 이러한 부품개발 추세에 부응하고자 자동차 앞문의 구조최적설계를 위한 방법을 제시하고자 한다.

자동차 도어에 합체박판기술[3-4]을 적용할 경우에는 힌지 및 내판의 보강재를 제거하고 내판, 외판만으로 강성을 유지하도록 한다. 초기 모델의 보강재를 제거하였으므로 목표강성을 유지하기 위해서는 합체박판의 파팅라인의 위치 및 각 파트의 두께를 적절히 결정해야 한다. 이때 검토되어야 할 구조 성능[5-6]은 프레임강성(frame stiffness), 수직새그강성(vertical sag stiffness), 벨트라인 강성, 동적강성(dynamic stiffness)등이 있다. 도어 프레임의 강성이 약하게 되면, 도어의 개폐 시 떨림 현상과 고속주행 시 바람소음이 차 내부로 전달될 수 있다. 반면에 수직새그강성이 약하게 되어 도어의 수직 처짐이 크게 되면 도어의 개폐 시 안정성에 문제가 생긴다. 그리고 내판의 보강재를 제거했으므로 벨트라인의 강성을 검토해야 한다. 벨트라인의 강성이 약하면 도어의 개폐시 떨림이나 유리창의 올림▪내림 시에 진동이 발생할 수 있다. 또한 동적강성이 낮게 되면 도어의 닫힘 시 떨림 진동이 크게 나타날 수 있다.

도어의 합체박판 구조의 최적화 문제는 구조최적설계 분류에서 보면, 형상최적설계(shape optimization)의 분야에 속한다. 그리고 이 최적화 문제는 각 파트의 두께가 규격으로부터 결정되어야 하므로 이산설계(discrete design) 문제이다. 그러나 이 문제를 기존의 상용소프트웨어를 이용할 경우, 최적화의 수행이 어렵다. 먼저, 형상최적설계 관점에서 보면, 도어의 유한요소모델이 복잡하고 불규칙하므로 형상설계변수의 정의 자체가 어렵다. 또한 이산설계의 관점에서 보면, 비록 일부 상용소프트웨어[7]가 이산설계기법을 제공하고 있지만 이산설계의 특성상 많은 국부 최적점 중 하나를 찾는데 만족하고 있다.

도어의 구조최적설계에 관련된 기존의 연구에서는 실험계획법을 이용하거나 연속설계공간(continuous design space)에서 구한 최적해로부터 가공된 값(round up values)을 최적해로 결정하고 있다. 또한 참고문헌[8-9]에서는 소극적인 형상최적설계 기법을 적용하였다.

본 연구에서는 기존의 연구 및 상용소프트웨어가 갖고 있는 한계를 극복하기 위하여 크리깅 및 시뮬레이티드 어닐링 알고리듬을 이용한 이산설계기법을 제안하였다. 크리깅 내삽법(interpolation)은 주로 비선형성이 강한 함수를 예측하는데 주로 사용되고 있지만 비선형성이 크지 않은 함수에도 좋은 결과를 제공한다. 도어의 구조최적설계를 위하여, 먼저 정적강성 및 동적강성의 반응치에 대한 크리깅 근사모델을 정의한다. 그 다음 크리깅 근사모델을 가지고 이산설계변수 및 연속설계변수를 갖는 최적화문제를 시뮬레이티드 어닐링 알고리듬으로 해결하였다. 설계변수로는 합체박판의 각 파트의 두께 및 세로방향 파팅라인의 위치이다.

본 연구에서는 임의의 앞 도어의 강성을 유지하도록 하는 합체박판 도어의 구조최적설계 기법을 제시하였다. 각 구조 반응치를 계산하기 위해 상용유한요소 프로그램인 GENESIS 6.0[10]을 이용하였다.

2. 합체박판 및 최적화 기법

자동차 차체는 알반적으로 내판과 외판 및 보강재로 구성된다. 이런 부품들은 강판재료(blank)를 성형공정한 후 점용접을 통해 조립된다. 그러나 1980년대 초부터 자동차 업계에 합체박판기술이 알려진 이후, 국내, 미국, 일본의 업계에서는 많은 부품들이 합체박판으로 대치되고 있다. 특히 도어 설계 시 내판의 각종 보강재를 제거한 후 설계에 합체박판 기술이 널리 적용되고 있다. 합체박판은 단일 강판을 성형하기 전에 두 개 이상의 강판을 재단하여 용접하고 성형하는 제조기술이다. 이러한 합체박판을 위한 재료로는 고강도 강(high strength steel) 및 알루미늄합금 5000, 6000시리즈가 사용된다.

이러한 합체박판 기술은 다음과 같은 장점이 있다. 먼저, 차체 전체의 금형수를 줄일 수 있고, 분리된 각 파트별로 상이한 두께나 재료를 사용함으로써 강성 및 강도를 높일 수 있다. 따라서 적용된 부품의 중량을 감소시킬 수 있다. 또한 성형공정 후의 재료를 재생하여 사용할 수 있다. 반면에, 재단된 강판의 두께가 달라 성형 및 용접에 불리하고, 비선형 용접라인의 설정이 어렵다는 점이다. 그리고 분리된 각 파트의 두께 및 재질 분포의 최적화가 어렵다는 것이다.

본 연구에서는 위에서 언급된 단점 중, 각 파트의 두께의 최적값을 결정하는 방법을 제시하고자 한다.

3. 도어의 형상최적설계

설계 변수는 Fig. 1 과 같이 정의 되며 시뮬레이티드 알고리듬을 적용하기 위한 목적함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\Phi = w + \alpha \cdot \sum_{i=1}^{6} \left(Max\left[g_i, 0 \right] \right) \qquad (1)$$

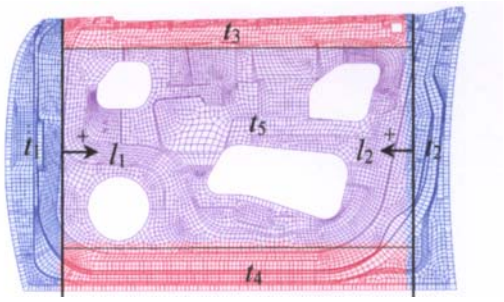

Fig. 1 Design variables for TWB door design

여기서 g_i (i=1,..,6)는 제한조건 식에서 부등방정식의 왼쪽 항을 의미하고, a는 유용성(feasibility)을 만족시키기 위한 임의의 큰 수이다.

본 연구에서는 두 가지 경우에 대하여, 식 (1)을 최소화 시키는 최적해를 산출하였다. 첫 번째는 설계변수가 식 (2)와 같이 연속설계변수라고 가정한 후 최적해를 산출하였다. 두 번째는 식 (3), (4)와 같이, 치수설계변수는 이산변수, 형상설계변수는 연속변수라고 가정한 후 최적해를 산출하였다.

$$[t_1,\ t_2,\ t_3,\ t_4,\ t_5,\ l_1,\ l_2]^T \in R^n \quad (2)$$

$$[t_1,t_2,t_3,t_4,t_5]^T \in Z = \{z_d:\ d=1,\ 2,\ ...,\ 11\} \quad (3)$$

$$[l_1,l_2]^T \in R^{n-5} \quad (4)$$

여기서 Z (mm)={0.60, 0.65, 0.70, 0.75, 0.80, 0.90, 1.00, 1.20, 1.30, 1.40, 1.50}이다. 치수설계의 이산값은 실제 현장에서 사용되는 강판의 두께이다. 시뮬레이티드 어니링 알고리듬 적용 시, 임의의 실수형 변수 t_k에 대한 이산값 z_k는 다음과 같이 대치시킬 수 있다.

$$z_k = nearest[t_k,\ (z_1,\ z_2,\ ...,z_{11})] \quad (5)$$

여기서 *nearest* 함수는 t_k와 식 (3)의 이산집합 원소 중 가장 근접해 있는 원소를 z_k로 대치시키는 역할을 한다.

실험점수 n_s=100인 모델이 n_s=70인 모델에 비하여 변위 및 고유진동수 반응치의 예측이 더 우수함을 알 수 있었다. 반면에 중량은 n_s=70인 모델이 n_s=100인 모델 보다 약간 우수하게 나타나고 있는데, 이는 n_k를 크게 하거나 θ_i을구할 때, 다른 국부최적해를 찾으면 바뀔 수 있는 결과이다. 본 연구에서 산출된 각 반응치의 크리깅 모델에 대한 θ_i 및 β값은 수록하지 않았다.

전반적으로 오차를 평가해 보면, 중량 및 변위 반응치는 그 편차가 소수점 둘째자리에서 발생하므로 매우 정확한 근사모델이라 할 수 있다. Fig. 2 는 각 반응값들에 대한 합체박판 도어(tailor welded blank) 와 전통적 방법의 도어의 최적해를 비교해 보았다.

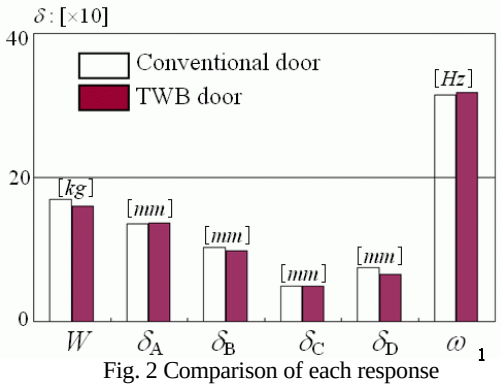

Fig. 2 Comparison of each response

4. 결론

본 연구에서는 도어의 합체박판설계 시, 적용할 수 있는 구조최적설계 기법을 크리깅 근사모델 및 시뮬레이티드어닐링 알고리듬에 기초하여 제안하였다. 제시된 방법에 의한 최적해는 기존의 연구[9]에서 고려되지 않았던 벨트라인 강성을 제한조건에 추가하였으며, 기존 연구의 최적해보다 약 3%의 중량이 추가 감소되었다. 초기모델 대비 약 1kg의 중량감소를 가져는데, 이는 내판어셈블리 기준 일반도어에 비해 약 15%의 중량감소량이다.

후기

본 연구는 한국산업기술재단 지역혁신 인력양성사업 지원으로 수행되었음

참고문헌

1.Porsche Engineering Services, Inc., "The Design, Materials, Manufacturing, Structural Performance and Economic Analysis of the Ultra Light Steel Auto Closures Program: Engineering Report," 2000.
2. http://www.ulsab.org, 2006.
3. B. Kinsey, Z. Liu, J. Cao, "New Apparatus and Method for Forming Tailor Welded Blanks," SAE 1999-01-0681, 1999.
4. The Auto/Steel Partnership Tailor Welded Blank Project Team, "Tailor Welded Blank Applications and Manufacturing: A State-of-the-Art Survey," 2000 Town Center-Suite 320 Southfield, MI 48075-1123, 2001.
5. S.I. Song, G.J. Park, "Optimal Design of Lightweight High Strength Door with Tailored Blank," Transactions of KSAE, Vol.10, No.2, pp.174-185, 2002.
6. W.S. Hwang, D.Y. Lee, M.S. Ha, "Structural Design of Door Assembly to Apply Tailor Welded Blanks Technique," Transactions of KSAE, Vol.10, No.2, pp.228-233, 2002.
7. MSC.Software Corporation, "MSC.NASRAN 2004 Design Sensitivity and Optimization User's Guide," pp.123-124, 2004.
8. J.K. Shin, K.H. Lee, S.I. Song, G.J. Park, "Automotive Door Design with the ULSAB Concept Using Structural Optimization," Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol.23, No.4, pp.320-327, 2002.
9. K.H. Lee, J.K. Shin, S.I. Song, Y.M. Yoo, G.J. Park, "Automotive Door Design Using Structural Optimization and Design of Experiments," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D(Journal of Automobile Engineering), Vol.217, No.10, pp.855-866, 2003.
10. VR & D, GENESIS Ver.6.0, 2000.