

강건 설계 기법을 이용한 승용차의 품질 산포에 관한 연구

A Study on the Quality Deviation of Passenger Cars using the Robust Design

김기창* · 김찬목**
Ki-Chang Kim, Chan-Mook Kim

Key Words : Robust Design (강건설계), Moving System Tolerance (후드,도아,트렁크 리드 조립 시 발생하는 공차), Uncertainly (불확실성), Sensitivity Robustness (목적함수의 강건성), Feasibility Robustness (제한조건의 강건성), Sensitivity (감도), FRF Curve (주파수 응답 함수 곡선), Mother Car (개발 차종 이전의 양산중인 차종)

ABSTRACT

This paper describes the development process of body and full vehicle for reduced idle vibration through the data level of frequency and sensitivity. The vibration mode map is used to separate body structure modes from resonance of engine idle rpm and steering system. This paper describes the analysis approach process to reduce the variation of uncertainties for idle vibration performance at initial design stage. The robust design method is performed to increase the stabilization performance under vehicle vibration. It is used to predict the effects of the stiffness deviation according to the spot welding condition of the body structure. The tolerance associated with hood over slam bumper is analyzed for the quality deviation of the moving system in full vehicle. And the glass sealant stiffness and weight difference is considered for the deviation characteristic. The design guideline is suggested considering sensitivity about body and full vehicle by using mother car at initial design stage. It makes possible to design the good NVH performance and save vehicles to be used in tests. These improvements can lead to shortening the time needed to develop better vehicles.

1. 서론

최근 자동차 업계 동향은 시작차 제작에서 양산 개발에 이르기까지 안정적인 품질 확보를 위하여 정확한 성능 예측 및 품질 산포에 대한 관리가 요구된다. 이를 위한 대안으로 강건 설계를 이용한 차체 용접 품질에 대한 산포 해석을 검토하고 있으며, 설계 초기 단계에 완성차 품질 산포 관련 설계 인자에 대한 기여도 분석 및 품질 개선에 대한 관심이 높아지고 있다.

차량의 Idle 진동은 엔진 공회전 시 엔진 토크 변동에 의한 가진원이 엔진 마운팅부와 차체의 전달계를 통하여 운전자의 스티어링 휠에서 진동이 느껴질 때 스티어링 진동이라 하며, 시트 트랙이 마운팅되는 센터 플로워 판넬를 통하여 시트에서 진동이 느껴질때 플로워 진동이라 칭한다. 설계 초기 단계 Vibration Mode Map을 작성하여 엔진 Idle rpm 영역 대비Sub System간 모드 중첩이 되지 않도록 공진 회피 설계를 유도하고 있다. (1)

본 논문은 차량의 Idle 진동 저감을 위한 차체와 완성차 최적화 설계 프로세스에 관한 것으로, 설

계 초기 단계에 Mother Car 를 이용하여 강성 확보 및 감도 저감을 위한 설계 가이드를 제시하였다. 이를 위하여 강건 설계에 대한 이론적인 배경을 통하여 차체와 완성차 상태의 불확실성 인자를 도출하였다. 차체 측면에서 용접 너겟에 따른 용접 품질 산포 영향을 검토하였으며, 완성차 상태 후드 오버 슬램 범퍼의 무빙 공차, 글래스 실란트 강성 및 내수, 북미, 유럽 사양에 따른 중량 차이로 인한 진동 감도 영향을 분석하였다.

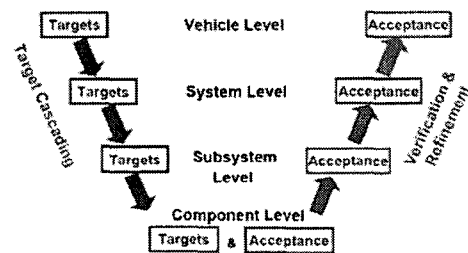


Fig.1 및 Flow Chart of Analysis Process

설계 초기단계에는 완성차에 대한 정확한 모델 구성이 불가하여 개선 업무 효율성을 위하여 Fig.1 과 같은 'V' Flow Chart 의 개념으로 시스템 단위의 목표 관리 및 해석 진행이 효과적이며, 품질 산포에 대한 기여도 분석을 통하여 Proto Car 제작 이전에 완성차 상태 Idle 진동에 대한 안정적인 성능 확보가 가능하였다.

* 현대자동차 선행개발센터 차량해석팀
 E-mail : 9362579@hyundai-motor.com
 Tel : (031) 368-5427, Fax : (031) 368-2733

** 국민대학교 자동차공학전문대학원

2. 강건 설계

최적설계는 제한조건을 만족하면서 목적함수를 극대화 시키는 설계값을 찾아내는 설계기법이며, 최적 설계를 통해 얻어진 값이 여러가지 산포 인자에 대하여 강건성을 가지려면 목적 함수의 강건성과 제한조건의 강건성을 동시에 가져야 한다.

목적함수의 강건성은 설계변수와 시스템 파라미터의 변동에 대하여 설계값에서의 목적함수값의 변동이 민감하지 않은 것이며, 제한조건의 강건성은 설계변수와 시스템 파라미터의 변동에 대하여 가능한 한 제한조건을 위반하지 않고 가용영역에 존재하는 성질을 말한다. ⁽²⁾

설계변수의 수가 유한한 유한차원 최적설계 문제는 목적함수 $f(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ 와 제한조건 함수 $G_j(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ 로 구성되며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{Minimize } f(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \quad (1)$$

$$\text{Subject to } G_j(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \geq 0 \quad j=1,2,\dots,m \quad (2)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad i=1,2,\dots,n$$

- \mathbf{x} : 설계변수 벡터
- \mathbf{p} : 시스템 파라미터 벡터
- x_i^L : 설계변수의 하한값
- x_i^U : 설계변수의 상한값
- n : 설계변수의 개수
- m : 제한조건의 수

최적설계문제를 풀어 얻은 최적값은 설계변수들의 변동을 고려하지 않은 확정론적 최적해이다.

2.1 강건성 지수

강건성 지수(P_r)는 강건설계를 위하여 개발되어진 지수이며, 제품성능의 분포인 시스템 확률밀도함수($\phi(FR)$)와 강건성 가중함수($W(FR)$)의 곱을 설계범위에서 적분한 값이다.

$$P_r = \int_{FR^*-\Delta}^{FR^*+\Delta} W(FR)\phi(FR)dFR \quad (3)$$

여기서 Δ 는 설계변동 범위, FR 은 기능적 요구이고, FR^* 는 목표값이다. 시스템의 확률밀도함수는 제품의 공차로 인하여 성능이 일정한 분포를 가지는 것을 표현한다. 강건성 가중함수는 목표값에 가까울수록 큰 가중치를 주고, 설계범위의 경계에서는 작은 가중치 주기 위하여 도입되었다. ⁽⁶⁾

2.2 목적함수의 강건성

설계변수나 시스템 파라미터가 어떤 분포를 갖게 되면 그로 인해 목적함수 값도 분포를 갖게 되는데 강건 최적해에서는 목적함수의 변동량을 작게 유지하면서도 설계변수의 분포를 크게 할 수 있다. 설계변수와 시스템 파라미터를 서로 독립적인 확률변수로 가정하고 평균 μ_f 와 분산 σ_f^2 를 적분식과 기대값으로 표현하면 다음과 같다. ⁽³⁾

$$\mu_f = \iint \dots \int f(\mathbf{x})z_1(x_1)\dots z_i(x_i)\dots z_n(x_n)d\mathbf{x} \quad (4)$$

$$= E[f(\mathbf{x})] \quad (5)$$

$$\sigma_f^2 = \iint \dots \int \{f(\mathbf{x}) - \mu_f\}^2 z_1(x_1)\dots z_i(x_i)\dots z_n(x_n)d\mathbf{x} \quad (6)$$

$$= E[\{f(\mathbf{x}) - \mu_f\}^2]$$

$z_i(x_i)$: 설계변수 x_i 의 확률밀도함수

2.3 제한조건의 강건성

제한조건이 있는 최적설계 문제에서 설계 값들의 불확실성으로 인한 제한조건의 위반량이 적으면 적을수록 좋기 때문에 제한조건의 강건성은 강건 최적설계 과정 중에 고려해야 한다. ⁽³⁾

최악 경우 방법은 설계 값들의 변동을 고려한 최악 조합들 중에서 제한조건이 제일 큰 값을 갖는 설계조합을 찾고 그 값이 제한조건을 만족하도록 하는 방법이다. 벌칙항 방법은 일반적으로 다음과 같은 새로운 제한조건을 정의한다.

$$G_j - k\delta \geq 0 \quad (7)$$

벌칙항 방법은 벌칙항 δ 을 제한조건 변화량의 절대값이나 노름(norm)값으로 구하거나 식(8)과 같은 제한조건의 분산값의 형태로 구할 수 있으며 상수 k 를 곱해서 벌칙항의 크기를 조절할 수 있는 방법이다.

$$\sigma_{G_j}^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial G_j}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2 + \sum_{i=1}^r \left(\frac{\partial G_j}{\partial p_i} \sigma_{p_i} \right)^2 \quad (8)$$

확률론적 방법은 설계 과정에서 제한조건을 위반하는 확률을 구해서 확정론적 제한조건으로 변환시킨 후 최적 설계를 수행하는 방법이다.

3. 품질 산포 해석 프로세스

본 논문은 선행 검토 단계 실차 IDLE 진동 성능을 안정적으로 확보하기 위하여 강건 설계를 이용한 차체와 완성차 상태의 불확실성 인자 도출 및 품질 산포 해석 프로세스에 관한 것이다.

3.1 차체 용접 품질산포 해석

자동차의 차체는 프레스 성형된 판넬과 멤버가 3000~5000 점에 달하는 점 용접 (spot welding)에 의해 결합되어 구성된다. 점 용접이란 두장 이상의 박판을 겹친 후 상하에서 가압하면서 수분의 1 초간 큰 전류를 흘리면 전류에 의한 저항 발열로써 전극팁 사이의 부위는 온도가 급상승되어 점 형태로 용융 접합되는 방법이다. 점 용접의 품질을 지배하는 3 요소는 가압력, 용접 전류, 용접 시간 이다.

(1) 용접 너겟에 따른 강성 차이

전류의 크기는 2 겹 용접인 경우 8000 A, 3 겹 용접 인 경우 9000~10000 A 를 적용하며, 고장력강 판과 도금 강판 적용 시 차이가 날수 있다.

점 용접 너겟(Nugget)은 직경 6 mm 를 표준으로 하며, NASTRAN Cweld element 는 5 mm 기준으로 Fig.2 와 같이 Area 가 연결되게 구성된다.

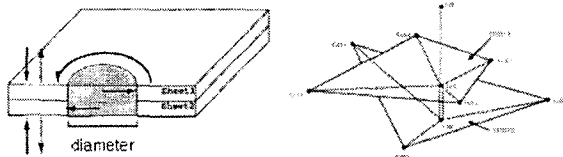


Fig.2 Analysis Element of Spot Welding Condition

용접 너겟 산포에 따른 골격 강성 해석 결과 모드에 따라 Table 1 과 같이 0.15~1.49 Hz 강성 차가 발생할 수 있으며, 너겟 평균치로 계산하였다.

Table 1 Analysis Result of Nugget Deviation

Frequency (Hz)	CWELD DIAMETER VARIATION			
	6 mm	5 mm	4 mm	3 mm
Mode 1	28.62	28.46	28.21	27.75
Mode 2	30.52	30.34	30.06	29.56
Mode 3	45.06	44.78	44.33	43.57
Mode 4	46.20	45.93	45.52	44.81
Mode 5	47.50	47.42	47.28	47.01
Mode 6	50.18	49.96	49.63	49.02

(2) Robust Design 을 이용한 산포 해석

점 용접에 의한 차체 품질 산포 영향을 분석하기 위하여 MSC Robust Design Module 을 이용하였다. 해석 조건은 용접 5 % 삭제 및 물성치 3 % 편차에 대한 23 회 차체 고유진동 해석을 통하여 Table 2 와 같이 표준 편차를 구하였다.

Table 2 Analysis Result using Robust Design Method

Frequency (Hz)	Minimum	Maximum	Difference	Mean Value	Standard Deviation
Mode 1	28.46	28.68	1.11	28.09	0.35
Mode 2	30.34	30.56	1.15	29.96	0.33
Mode 3	44.78	45.22	2.96	44.07	0.60
Mode 4	45.93	46.43	2.86	45.31	0.64
Mode 5	47.42	47.86	3.13	47.12	0.63
Mode 6	49.96	50.64	3.97	49.33	0.73

해석 결과 모드에 따라 1.11~3.97 Hz 까지 용접 품질에 따른 산포가 발생할 수 있으며, 실제 차량 제작 상태와는 차이가 있다고 판단된다.

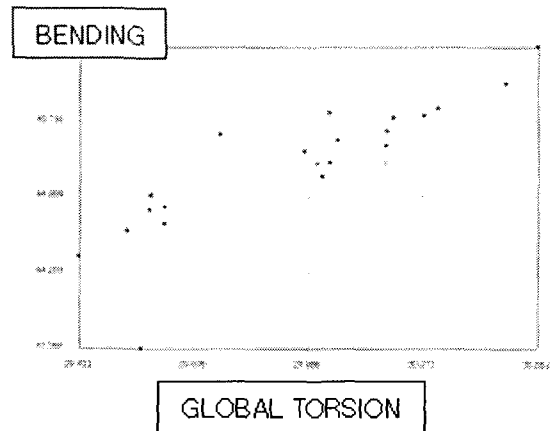


Fig.3 Mode Sensitivity of Body Structure

Fig.3 은 굽힘 모드와 비틀림 모드간 주파수 대역에 따른 모드 상관 관계를 도시하고 있다.

본 연구의 직접적인 목표는 선형 영역에서의 용접 너겟과 물성치의 영향을 분석하기 위함이며, 충돌 및 내구 문제인 용접 파단 해석은 인장 강도를 고려한 비선형 영역으로 관심 영역이 다르다.

3.2 완성차 품질 산포 해석

완성차는 범규 대비 수출 지역에 따른 사양 차로 인해 중량 차가 발생하며, 후드, 트렁크 등의 무빙 공차 영향으로 품질 산포의 원인이 될 수 있다.

(1) 후드 오버 슬랩 범퍼의 무빙 공차

무빙 공차에 대한 영향을 분석하기 위하여 차량 전방부 후드 오버 슬랩 범퍼에 대한 공차 범위 1 mm 를 벗어날 경우의 프론트 사이드 멤버 전방부에서의 진동 감도 변화를 분석하였다.

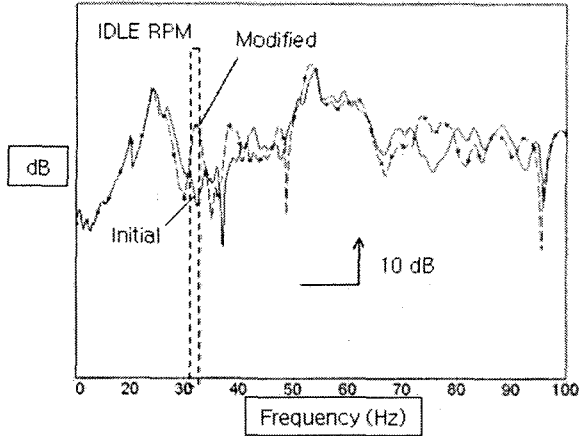


Fig.4 FRF Curve of Moving Deviation

해석 결과 Fig.4 와 같이 초기 모델 (Initial) 대비 오버 슬랩 범퍼 공차 범위를 넘어 미 고려 (Modified) 모델 적용 시 엔진 IDLE RPM 영역에서 차체 진동 감도가 불리하여 모드 중첩에 의한 실차 IDLE 진동 성능 저하가 예상된다.

(2) 수출 사양에 따른 중량 차이

수출 지역에 따른 범규 및 고객 선호도에 따른 사양 및 중량 차로 인한 감도 영향을 분석하였다.

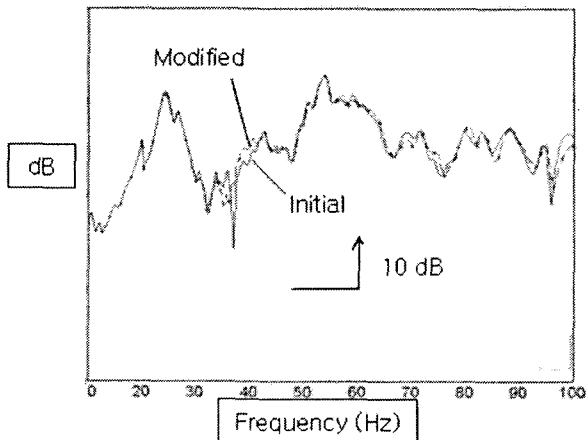


Fig.5 FRF Curve of Mass Difference

Fig.5 와 같이 초기 모델 (Initial) 대비 중량을 최대 26 Kg 정도 증대한 모델 (Modified) 적용 시 40 Hz 전후 영역에서 진동 감도가 다소 불리해 지나 전반적으로 유사한 수준이다. 차량 전후 중량 배분에 따른 진동 감도 양상이 달라질 수 있기 때문에 본 논문의 중량 분석은 경향으로 봐야한다

(3) 글래스 실란트 강성 영향

글래스 실란트에 대한 해석 물성치를 10 배 축소 적용 시 40 Hz, 80 Hz 전후 영역 진동 감도 다소 불리하나 전반적으로 유사한 수준이다.

4. 결론

본 논문은 안정적인 IDLE 진동 성능을 확보하기 위한 선행 개발 단계 품질 산포 해석 프로세스에 관한 것으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 차체 용접 품질 산포 영향을 분석하기 위하여 너겟 변화와 강건 설계에 의한 표준 편차 범위에 대한 해석 검토로 설계 가이드를 제시하였다.
- (2) 완성차 상태 무빙 공차에 대한 영향 분석 결과 후드 오버 슬랩 범퍼가 공차 범위를 벗어난 경우 IDLE RPM 영역과 모드 중첩에 의한 진동 감도 불리해 질 수 있어 공차 관리가 요구된다.
- (3) 선행 개발 단계 MOTHER CAR 를 이용한 품질 산포에 대한 설계 가이드 제시로 Proto Car 이진 안정적인 성능 향상, 시험차 축소 및 개발 기간 단축 효과가 기대된다.

참고문헌

- (1) 김기창, 김찬목, "주파수와 감도를 고려한 스티어링 시스템 설계 프로세스 연구", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, 수송기계 pp.208-211, 2005
- (2) 정도현, 이병재, "확률조건 근사화를 통한 효율적인 강건 최적설계 기법의 개발", 대한기계학회 논문집 A 권, 제 24 권 제 12 호, pp. 3053-3060, 2000
- (3) 정도현, 이병재, "기계 구조의 강건 설계를 위한 최적화 기법의 개발", 대한기계학회 논문집 A 권, 제 24 권 제 1 호, pp. 215-224, 2000
- (4) 조준호, 오재용, 임동규, 강성중, "스티어링 시스템의 모델링 및 진동 해석", 한국소음진동공학회지:소음진동, 1226-0924, 제 2 권 2 호, pp.125-134, 1992
- (5) 김찬목, 김도연, "승용차 스티어링 칼럼 시스템의 진동해석에 관한 연구", 한국소음진동공학회지:소음진동 1216-0924, 제 8 권 3 호, PP.494-503, 1998
- (6) Kwang-Hyeon Hwang and Gyung-Jin Park, "A New Information Index of Axiomatic Design for Robustness," Transactions of KSME A, Vol. 26, No. 10, pp. 2073-2081, 2002