

차량 쏠림 개선을 위한 전륜 현가시스템의 기하공차 최적화

김 용 석[†] · 장 동 영^{*}

(2009년 1월 20일 접수, 2009년 7월 9일 수정, 2009년 7월 22일 심사완료)

Optimization of Geometric Dimension & Tolerance Parameters of Front Suspension System for Vehicle Pulls Improvement

Yongsuk Kim and Dongyoung Jang

Key Words : Vehicle Pulls(차량 쏠림), Vehicle Dynamics(차량 동역학), Front Wheel Alignment(전륜 정렬), GD&T(기하학적 치수 및 공차), Monte Carlo Simulation(몬테카를로 시뮬레이션), Variation Analysis(공차 해석), Design of Experiment(실험 계획법), Taguchi Robust Engineering(다구찌 강건 설계법), Quality Engineering(품질 공학)

Abstract

This study is focused on simulation-based dimensional tolerance optimization process (DTOP) to minimize vehicle pulls by reduction of dimensional variation in front suspension system. In previous studies, the effect of tires and wheel alignment sensitivity have mainly been investigated to eliminate vehicle pulls in nominal design condition without allocating optimal tolerance level for selected components, among various factors regarding vehicle pulls such as vehicle design parameters, vehicle weight balance, tires, and environmental factors. Unfortunately, there are wide variations in the real vehicle, and these have impacted actual vehicle pulls, especially wheel alignment effects from suspension geometry variation has not been considered in the previous studies. In the tolerance design of suspension, tolerance variables with the uncertainty such as parts dimensional variation, assembly process, datum position and direction, and assembly tool tolerance has a great influence on the variation of the suspension dimensional performances. This study introduces total vehicle pull prediction model in considering major key factors for vehicle pull sensitivity. The Monte Carlo-based tolerance analysis model using Taguchi robust method is developed to optimize dimensional tolerance parameters, satisfying on the target variation level.

기호설명

SWT : 조향 휠 토크
 μ_s : 조향 휠 토크의 평균
 σ_s : 조향 휠 토크의 표준편차

1. 서론

차량이 직진 주행할 때 조향 휠(steering wheel) 입력이나 외부로부터 외란이 없는 경우에도 종종 좌측 또는 우측으로 이탈하려는 현상이 발생하는 경우가 있다. 이 경우 운전자는 차량을 직진 주행시키기 위해서 핸들에 일정한 압력을 가해야 하는데 이와 같은 현상을 차량 쏠림이라고 한다.⁽¹⁾ 차량 쏠림 현상의 원인은 일반적으로 휠 얼라인먼트 및 타이어 특성의 좌우편차 그리고 노면 경사 등

[†] 책임저자, 회원, 지엠대우오토엔테크놀로지
E-mail : yongsuk.kim@gmdat.com
TEL: (032)520-5257

^{*} 교신저자, 회원, 서울산업대학교, 산업정보시스템학과

으로 알려져 있으며 이로 인해 편측으로 발생하는 힘(lateral force)과 모멘트(moment)가 차량을 한쪽으로 쏠리게 한다. 그리고 엔진이나 미션 등과 같은 사양에 따라 차량 하중 분포가 다르고, 운전자의 조건 등과 같이 여러 가지 다른 요소에 의해서도 차량 쏠림이 발생한다.

조영건⁽²⁾은 차량 쏠림(vehicle pull)이 발생하는 메커니즘 과정에 대한 연구와 발생 원인 규명 및 개선방안으로 타이어, 차체, 샤시 부품의 공차의 영향성을 연구하였다. 또한 오상현⁽³⁾은 쏠림 현상의 감소를 위해서는 좌우균형성 관련 인자의 좌우 편차를 최소화하는 것이 필요하고 이러한 노력에도 불구하고 차량에 따라서는 균형성을 얻기가 어려운 것이 현실이므로 쏠림 문제를 보완하거나 해결할 수 있는 차량의 캐스터(caster)와 타이어의 PRAT (plyster residual aligning torque) 등의 인자를 규명하고자 하였다. 구병국⁽⁴⁾과 이정환⁽⁵⁾은 차량이 주행 중 쏠림 인자에 대한 이론적 접근과 시뮬레이션을 통하여 쏠림의 경향성과 민감도를 분석하였다. 특히 타이어 인자인 코니시티, PRAT 와 차량 인자인 휠 얼라인먼트, 외부 인자인 차량무게(weight), 도로 경사(road slope) 등의 적용 방법과 서로의 민감도 분석 방법을 제시하였다. 구병국⁽⁶⁾은 복합적인 쏠림 원인을 효율적인 방법으로 접근하기 위해서 여러 분야에서 다양하게 적용되고 있는 실험계획법을 적용하였으며 설계인자로 차량의 휠 얼라인먼트(wheel alignment)와 타이어 요소를 고려하였으며 잡음인자로 도로조건, 탑승자 체중을 고려하여 ADAMS/CAR 와 타이어 해석모델을 활용한 S/N 비 및 평균의 주 효과를 분석하여 쏠림의 영향을 분석하였다.

기존 문헌 연구들을 통해 타이어, 휠 얼라인먼트, 도로 경사 등이 차량 쏠림에 원인임이 입증되었지만 이러한 차량의 쏠림은 차량과 타이어의 어느 한 부분의 단편적 문제가 아닌 복합적인 문제이다. 따라서 본 연구에서는 차량 쏠림의 여러 인자들의 변동을 고려한 통합된 통계적 예측모델을 제시하여 차량 쏠림을 평가하고 여러 차량 쏠림의 인자 중 특히 시스템 아키텍처 조건에 따라 결정 되는 현가시스템의 제조공차에 영향을 받는 휠 얼라인먼트(wheel alignment)의 개선 방안을 중점적으로 제시한다. 기존 연구들에서는 차량 시스템의 치수공차 인자들의 영향 분석 및 관리의 중요성에 대해 언급하였지만 관련 부품 및 시스템에 대한 최적화된 치수공차를 제시하지 못했다.

본 연구에서는 공차에 따른 제조비용의 정확함

정보가 없는 상황에서도 휠 얼라인먼트의 목표 표준편차 품질수준을 만족하는 전륜 현가시스템의 치수공차 수준을 할당하기 위한 시뮬레이션 기반의 최적화 방법을 제안한다. 그리고 본 연구 모델을 휠 얼라인먼트의 캐스터(caster) 최적화에 적용하여 검증하였다. 차량 쏠림을 줄이기 위해서 캐스터 관련 전륜 현가시스템의 기하공차를 최적화하는데 목적을 두었다.

2. 차량 쏠림 평가

2.1 Total SWT(steering wheel torque)

차량 쏠림의 측정은 자유 제어 시험 방식(free control test)과 고정 제어 시험 방식(fixed control test)으로 나눌 수 있다. 자유 제어 시험은 일정한 속도(80kph 또는 100kph)로 진행하다가 정해진 지점에서 손을 떼 상태로 100m 를 진행한 후 중심선에서 벗어난 정도를 통해 쏠림 정도를 평가하는 방법이다⁽⁷⁾. 합격 판정기준은 좌우로 1 미터 이내 여야 한다. 고정 제어 시험은 직진로에서 차량이 직진 상태를 유지하면서 주행하기 위해 조향 휠에 가해지는 토크 량의 크기로 쏠림의 정도를 판단하는 시험방법으로서 이때 측정하는 토크를 RAT(residual aligning torque)라 한다.⁽⁸⁾ 즉 프런트 액슬(front axle)의 횡력(lateral force)이 제로(zero)가 되는 토크의 값으로 정의된다. 본 논문에서는 조향 휠 토크(steering wheel torque, 이하 SWT)로 쏠림의 정도를 판단하는 방식으로 차량 동역학 모델을 통해 얻을 수 있는 차량 쏠림의 여러 요인별 SWT 민감도를 고려한 각 요인의 평균, 표준편차의 합으로 전체 SWT 을 산출할 수 있는 모델을 적용한다.

2.1.1 휠 얼라인먼트 좌우 차-캐스터/캠버

캐스터의 좌우 편차에 의해 쏠림이 발생하고 캐스터 각이 크면 타이어가 돌아가는 복원력이 증대하여 직진 성능이 좋아진다. 캐스터 각이 작은 쪽으로 쏠림이 있으며 캠버는 기울어지는 방향으로 쏠림이 발생한다. 일반적으로 휠 얼라인먼트 좌우 차의 설계 사양은 제조사별로 다르나 통상± 0.5 으로 차량을 생산 한다.

2.1.2 타이어-코니시티/플라이스티어

코니시티(conicity)는 타이어 제조 시 좌우 치수 차이에 의해 타이어를 한쪽으로 미는 횡력에 의해 쏠림이 발생한다. 쏠림을 방지하기 위해 일반적으로 제조편차를 줄이고 코니시티의 방향을 나타내는 마킹 부위를 관리한다. PRAT (plyster residual

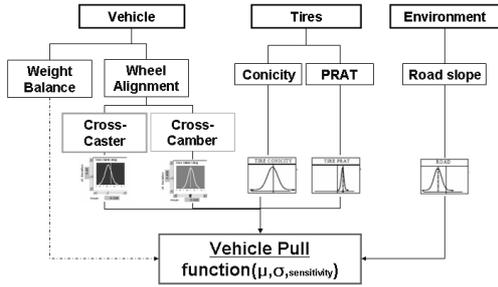


Fig. 1 Vehicle pull model and factors

aligning torque)는 타이어 벨트 방향에 의해 횡력의 차이가 발생하며 이로 인해 쏠림이 생긴다.⁽³⁾ 도로의 경사 및 차량 특성에 적합한 값을 결정하므로 차량마다 상이하다. 설계 사양은 $\pm 1.0 \sim \pm 1.5$ 으로 관리한다.

2.1.3 도로 경사(road slope)

도로 경사에 의한 쏠림 현상은 좌측 운전자(left handle driver, LHD) 차량인 경우 오른쪽의 낮은 도로 경사도로 인해 타이어를 한쪽으로 미는 횡력으로 쏠림이 발생한다. 국내 도로 건설 표준은 1° 이다. 도로 경사에 의한 쏠림을 최소화하기 위해서는 도로 경사의 특성에 둔감하게 차량의 특성을 제어하거나 타이어의 특성 값(i.e. conicity, PRAT)을 설정하는 과정이 요구된다.

2.2 확률변동을 고려한 차량 쏠림 예측 모델

Fig. 1 과 같이 차량인자에서 캐스터(caster), 캠버(camber)와 타이어 인자의 코니시티(conicity), PRAT, 그리고 외부 환경요인으로 도로 경사로 구성된 모델을 제시하였으며 각 인자들은 전체 SWT의 평균값이 최소로 되고 또한 표준 편차가 목표를 만족하는 설계 파라미터(parameter)값이 결정된다. 이를 수식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find } \mu_i \\
 & \text{Minimize } |\mu_s| \text{ and } \sigma_s \\
 & \text{where } \mu_s = \sum_i (\mu_i \times \text{Sensitivity}_i), \\
 & \sigma_s = \sqrt{\sum_i (\sigma_i \times \text{Sensitivity}_i)^2} \\
 & \text{s.t } 3\sigma_s \leq \text{Target Tolerance}
 \end{aligned} \tag{1}$$

각 인자들의 민감도(sensitivity)는 차량 동역학 해석 혹은 수리 모델을 통해 계산하여 사용할 수 있다. 이러한 민감도는 차량 고유의 아키텍처 지오메트리(architecture geometry) 특성에 의해 결정되므로 차량 모델에 따라 별도로 계산 되어야 한다.

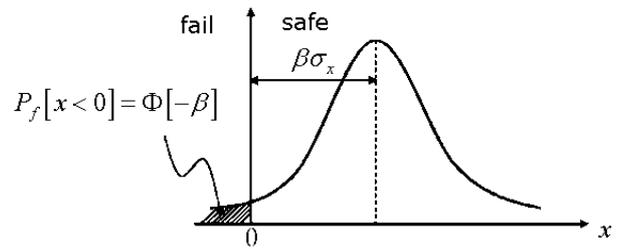


Fig. 2 System reliability

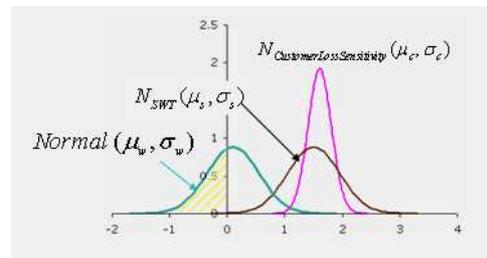


Fig. 3 Vehicle pull reliability with customer loss function

차량 쏠림의 예측모델에서 보는 것처럼 실제 차량에서 제어할 수 있는 인자 중에는 캐스터와 캠버의 좌우 차가 큰 영향을 미치므로 휠 얼라이먼트가 차량 쏠림을 줄이기 위해 관리해야 할 하나의 요소로서 본 연구의 과제로 선정하였다.

2.3 시스템 신뢰성과 워런티(warranty) IPTV

시스템의 신뢰성은 시스템이 원하는 성능을 얼마나 잘 만족시켜주는지를 나타내는 성능지수로서, 설계자가 원하는 설계영역 안에 있을 확률로서 정의된다. 불확정성을 포함하는 공차로 인한 시스템의 신뢰도 평가함수를 $g(x)$ 라 정의하자. 여기서 x 는 확률변수를 의미한다. Fig. 2에서 보는 것처럼 성능 평가함수 $g(x) = 0$ 는 실패 영역(failure region)과 안정 영역(safe region)을 나누는 제한영역을 의미한다.⁽⁸⁾

차량 쏠림을 예측하기 위해 사용된 모델인 식 (1)로부터 얻은 전체 SWT의 평균과 표준편차로 정규분포를 얻을 수 있다. 쏠림의 기대 값에 따른 고객의 불만족도로부터 고객 손실 함수를 정규화하여 구할 수 있으며 중심에서 벗어날수록 산포가 클수록 고객불만의 크기는 커진다. 이러한 고객불만의 크기를 구하기 위해서는 Fig. 3에서 보는 것처럼 고객 손실 함수(누적 확률 분포)로부터 얻은 확률밀도함수의 고객 손실 민감도 분포와 식 (1)로부터 얻은 전체 차량 쏠림 예측 분포와의 관계를 살펴볼 필요가 있다. 워런티(warranty) 지수를 구하기 위해 다음 식 (2)을 사용하여 고객 손실 함수와 차량 쏠림 정규분포와의 차이를 구한다.

Table 1 Target of vehicle pull factors and total SWT prediction

Steering Torque Contributors	Mean	sd(σ)	Sensitivity	Total Steering Wheel Torque				Predicted Warranty IPTV
				Mean	-3 σ	+3 σ	sd(σ)	
Cross Caster (Deg)	0.32	0.167	-0.154					
Cross Camber (Deg)	0.23	0.167	0.292					
Road Slope (Deg)	0.60	0.500	-0.241					
Plysteer RAT (Nm)	-0.06	0.424	-0.048					
Conicity (N)	0.00	16.640	-0.002	-0.127	0.541	0.2864	0.138	1.67

$$Normal(\mu_w, \sigma_w) = N_{CustomerLossSensitivity}(\mu_c, \sigma_c) - N_{SWT}(\mu_s, \sigma_s) \quad (2)$$

where $\mu_w = \mu_c - \mu_s,$

$$\sigma_w = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_s^2}$$

시스템의 성능에 대한 고객의 불만 정도를 신뢰도 함수로 변환하고 시스템 신뢰성의 파괴확률로서 식 (3)을 이용하여 얻을 수 있다.

$$P_f[x < 0] = \Phi\left(\frac{0 - \mu_w}{\sigma_w}\right) = \Phi\left(-\frac{\mu_w}{\sigma_w}\right) = \Phi(-\beta) \quad (3)$$

where $\beta = \frac{\mu_w}{\sigma_w}$

식 (3)으로부터 정규분포표를 이용하여 파괴 확률 값을 얻는다. 워런티 IPTV(incident per thousand vehicle)는 차량 천대당 결점 수이므로 백분율(percent)값에서 환산하여 고객 불만족도를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 신차 개발 초기 설정된 차량 슐림 워런티 IPTV 목표가 1.67 인 각 인자들의 할당된 목표를 Table 1 과 같이 정의하였다.

2.4 휠 얼라인먼트(wheel alignment)⁽⁷⁾

휠 얼라인먼트는 조종 성능(handling)에 영향을 미치는 인자 중 하나로서 서스펜션과 스티어링 시스템을 구성하는 각 부품이 휠과 어떤 각도로 부착되어 있는지를 나타내며, 캐스터, 캠버, 토우, 회전 각도 등으로 이루어 진다. 이들 여러 각도는 차량 중량이 현가의 각 가동 부분에 알맞게 분배되도록 설계되어야 주행 중 안전성과 최대의 타이어 수명을 확보할 수 있다.

조향 휠의 조작력을 가볍게 하기 위해 Fig. 4(a)와 같이 앞 바퀴를 앞에서 볼 때 그 위쪽이 약간 바깥쪽으로 기울어지게 설치하는데 이 경사를 캠버라고 하고, 이 각도를 캠버 각(camber angle)이라고 한다. 일반적으로 캠버 각은 0.5~2.0 정도이다.

차량의 직진성을 부여하기 위해 Fig. 4(b)와 같이 앞 바퀴의 설치 각을 앞뒤로 경사지게 한 것을 캐스터라고 한다. 캐스터 각은 차에 따라 다소 차이가 있으나

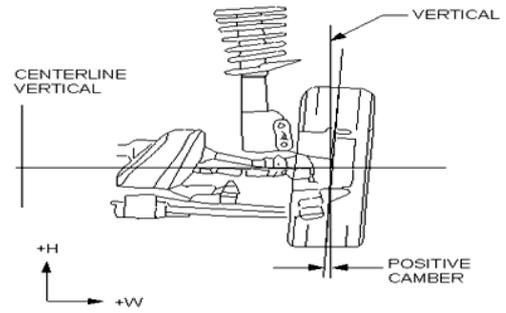


Fig. 4(a) Camber

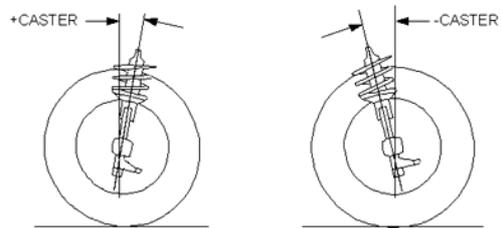


Fig. 4(b) Caster

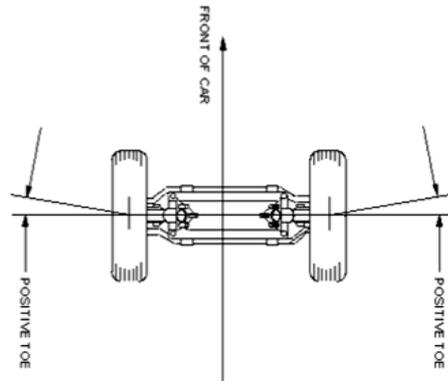


Fig. 4(c) Toe

보통 0.5 ~ 10 의 값을 가진다. Fig. 4(c) 와 같이 차량을 위에서 보았을 때 바퀴가 전면에서 후면에 이르는 중심을 지나는 직선과 이루는 각을 토우라고 한다. 주행 시 전륜의 경우 캠버와 회전 저항력 등에 의해 차체 바깥으로 향하게 되는 경향이 있다. 미리 적당량의 토우 인(일반적으로 2~8mm)을 두면 주행 중 상쇄되어 바퀴는 자동차의 진행방향과 일치한 완전 전방을 향하게 된다.

2.5 기하 공차(geometric dimensioning and tolerancing, 이하 GD&T)⁽⁷⁾

기하공차는 기술도면(engineering drawing)에 부품 정보를 정확하게 전달하기 위해 사용되는 국제적

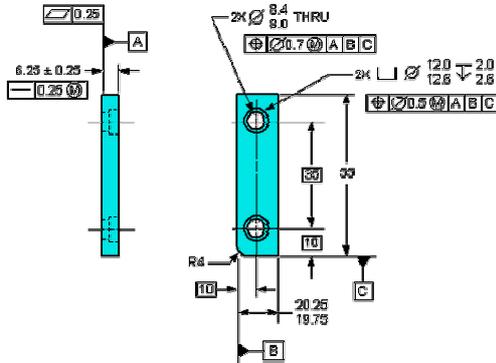


Fig. 5 Example of GD&T

인 언어이다. 기하공차는 Fig. 5 과 같이 몇 가지의 기호(symbol)와 규칙(rule)으로 구성되어 있다. 기하공차를 사용함으로써 실제 물건을 만들거나 조립, 검사할 경우 설계자의 의도를 정확히 이해하고 그에 맞게 작업 할 수 있다. 또한 완성된 조립체의 기능을 고려하여 공차를 부여하게 됨으로 불필요하게 공차 값을 엄격하게 주는 일을 줄일 수 있다.

치수(dimension)란 측정할 때 기준이 되는 수치이고 공차(tolerance)는 정해진 치수에서 허용 가능한 치수의 변위를 말한다. 기존의 치수 중심의 방식으로는 조립공정에 따라 누적되는 공차를 정확히 관리할 수 없다. 최종 조립체에서 각 단품에 이르기까지 일관성 있는 데이텀(datum) 정보와 형상의 자세 등 기하공차의 정보가 조립 공정 순서에 따라 정의되어야 한다.

2.6 공차해석 방법

제품개발단계에서 제품의 치수와 공차설계 문제는 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 공차설계는 설계과정에서 과학적인 방법이 아닌 설계자의 경험과 지식에 의해 결정되는 경우가 많으며 이런 경우 최종제품의 품질 및 성능이 목표치 보다 떨어지거나 제품자체가 불량품으로 처리 되는 경우가 발생한다. 따라서 최적공차 설계를 위해서는 공차설계 시 각 부품들의 공차 누적으로 인한 제품의 품질변동에 대하여 보다 과학적인 해석 방법과 최적의 공차 배분방법이 제품개발과정에 적용되어야 한다.⁽⁹⁾

본 연구에서 사용된 공차해석 방법인 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)은 각 부품이 주어진 사양을 만족하지만 일정하지 않다고 가정하고 컴퓨터에서 부품을 임의로 조립하고 조립품

Table 2 Mean and Standard deviation of wheel alignment data from Current Plant

Steering Torque Contributors	Mean	sd(σ)	Sensitivity	Total Steering Wheel Torque				Predicted Warranty IPTV
				Mean	-3 σ	+3 σ	sd(σ)	
Cross Caster (Deg)	0.56	0.260	-0.154	-0.152	0.5926	0.289	0.147	2.08
Cross Camber (Deg)	0.27	0.220	0.282					
Road Slope (Deg)	0.60	0.500	-0.241					
Plyster RAT (Nm)	-0.05	0.424	-0.048					
Conicity (N)	0.00	16.640	-0.002					

의 산포를 측정하는 방법이다.⁽¹⁰⁾

2.7 다구찌 강건설계^(11,12)

다구찌는 품질을 제품이 출하된 시점으로부터 사회에 끼친 손실로 정의하고 특성치가 목표치에서 멀어지면 멀어질수록 손실의 비중을 더 주자는 의미에서 특성치의 목적 특성에 따라 손실함수를 2 차식으로 근사화하여 정의하였다. 본 연구에서는 작을수록 좋은 망소 특성(smaller the better)을 적용하였다. 강건설계는 직교배열표상에 제어 인자와 잡음인자를 동시에 고려하여 S/N 비를 최대화하는 제어인자의 조건 즉 잡음인자 하에서도 특성치의 분산이 작고 평균이 목표 치에 근접하는 제어 인자의 조건을 찾아내는 것이다.

3. 시뮬레이션과 최적화

3.1 문제 정의

차량 쏠림의 휠 얼라인먼트 영향을 분석하고 변동을 최소화 하기 위한 현가 시스템의 각 부품의 기하공차를 최적화하기 위해, 현재 완성차 A사의 소형 차종 중 휠 얼라인먼트 측정 데이터로부터 Table 2 처럼 캐스터 및 캠버의 평균과 표준편차를 얻을 수 있었다. 특히 캐스터 표준편차의 개선 목표인 0.167 을 달성하기 위해 중점 관리해야 할 부품과 기하 공차 값을 차량 쏠림에 의한 전체 warranty 목표 및 공차에 의한 시스템 개발 비용을 고려하여 최적화 하고자 한다.

3.2 치수 공차 최적화 프로세스

최적화 과정이 없어 적용되는 공차 수준은 설계자나 외주업체의 경험에 따라 엄격하게 공차를 적용하거나 험거운 공차를 적용하게 된다. 본 연구에서 제안하는 최적화 접근법은 Fig 6 처럼 차량 쏠림(vehicle pull) 예측 모델을 통해 차량쏠림의 각 공헌인자들에 대한 목표값 설정하고 그 중에서 휠 얼라인먼트 관련 인자인 캐스터, 캠버를 분석하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션 모델을 만들고 캐스터, 캠버에 영향을 미치는 주요 인자를 민감도 분

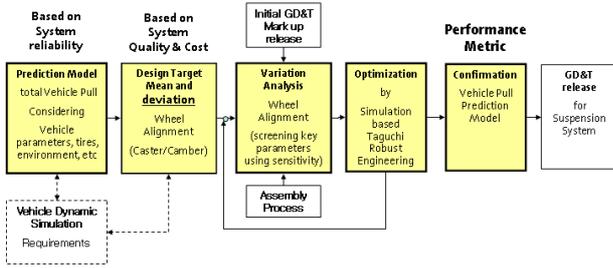


Fig. 6 Dimensional tolerance optimization process for minimize in vehicle pulls

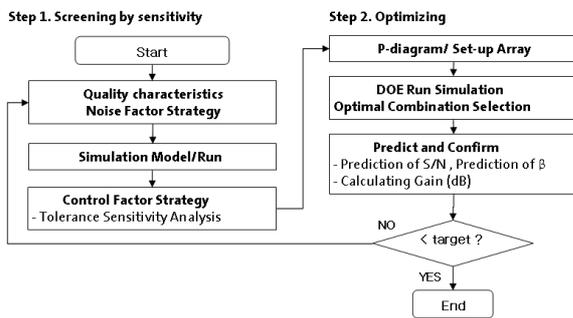


Fig. 7 Detailed dimensional tolerance optimization process using Taguchi Robust Method

석을 통해 선별한다. 최적의 공차 조합을 결정하기 위해 목표 품질 수준과 실제 시뮬레이션 결과의 표준 편차와의 차이를 최소화하는 것을 품질특성으로 하였다. 강건 설계(robust design)를 위해 각 부품의 치수공차를 설계인자(control factors)로 하고 각 부품 및 조립공정의 변동을 잡음인자(noise factors)로 하는 다구찌 실험 계획법(design of experiment, DOE)을 적용하여 최적의 공차 조합을 결정한다. 결과를 검증하기 위해 차량 쏠림 예측 모델(vehicle pull prediction model)을 통해 그 결과의 유효성을 평가한다. 즉 차량 쏠림을 최소화하기 위한 휠 얼라인먼트에 관련된 각 부품 혹은 시스템에 적용되는 기하공차의 수준을 비용과 품질관점에서 최적화된 공차를 할당할 수 있는 치수공차 최적화 프로세스(dimensional tolerance optimization process, 이하 DTOP)를 제안하였다.

Fig. 7은 DTOP의 공차 해석 및 최적화 상세 과정이다. 첫 번째 단계는 품질특성, 잡음인자 선정, 시뮬레이션 모델 및 민감도 분석을 통해 주요 공차 인자를 선정한다. 두 번째는 선정된 인자들을 통해 품질 특성을 만족하는 최적의 공차 인자 수준을 결정하기 위한 최적화 과정이다.

3.3 목적 함수 (objective function)

최적화의 목적함수는 품질 특성치(y_i)가 목표 품

Table 3 Noise factors combination

Noise Factor Compounding	Actual Part Variation			
	2σ	3σ	4σ	
Actual Assembly Variation	2σ	N1	N4	N7
	3σ	N2	N5	N8
	4σ	N3	N6	N9

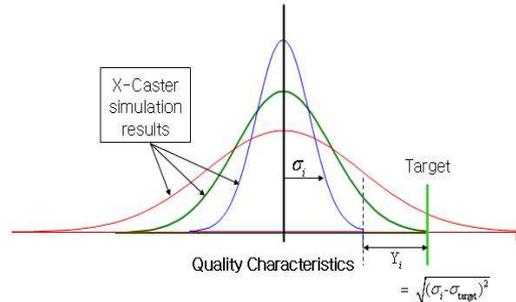


Fig. 8 Objective function concept

질 수준에 가장 근접한 품질변동을 갖게 하는 최적의 공차 조합을 선택하는 것으로 Fig. 8 처럼 어떠한 외부의 영향에도 y_i (품질 특성치)를 최소화하는 식 (4), 식 (5)과 같이 제약 조건 없는 다구찌의 망소 품질 특성을 적용하였다.

Find Tolerance_j ($j=1, m$)

$$Objective \text{ Minimize } Q = k \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right] \tag{4}$$

where $Y_i = \sqrt{(\sigma_i - \sigma_{target})^2}$

또는

$$Maximize \ S / N(\eta)$$

$$= 10 \log_{10} \frac{1}{k \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right]}$$

$$= 10 \log_{10} \frac{1}{k \left[y^{-2} + \sigma_{n-1}^2 \right]}$$

3.4 단계 1: 설계 인자 선정 프로세스

현가시스템에 관련된 단품 및 조립과정에 발생하는 품질수준을 2σ에서 4σ까지 적용하여 실제 제조 과정에서 발생할 수 있는 상황을 고려하였으며 이러한 잡음인자 조합으로 각 실험 조건 별 총 9 번의 반복실험을 하였다.

본 연구에 적용된 프런트 현가시스템의 구성도와 3D 설계 모델은 Fig. 9 와 Fig. 10 과 같으며 공

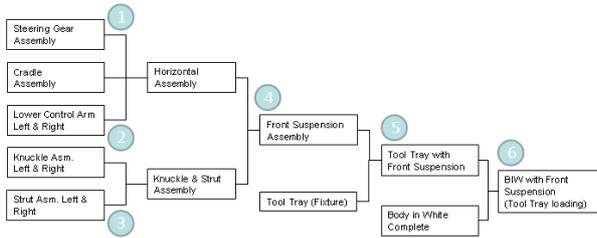


Fig. 9 Front suspension system structure

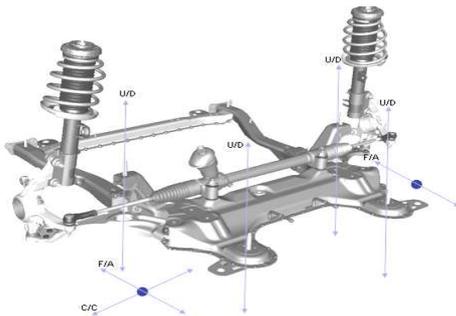


Fig. 10 Front suspension system

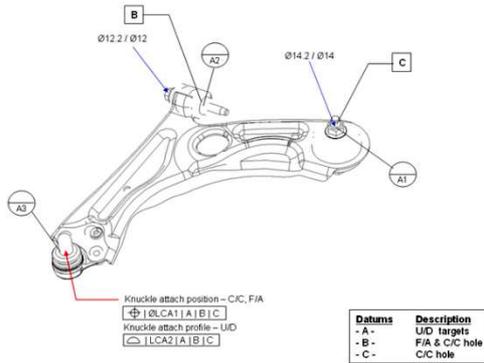


Fig. 11 GD&T markup (LCA)

Index	Tol.	Point	Part	Range	Percent
1	fc4	LCALh2yz	Cradle	M:3.000	31.28%
2	fc5	LCALh2yz	Cradle	M:3.000	24.36%
3	fc6	LCALh1xyz	Cradle	M:2.000	16.08%
4	B2	FIXp7xy	BIW	M:2.000	13.33%
5	B3	STRUT_L-1xyz	BIW	M:2.000	9.13%
6	fs_L4	STRUT_L-1XYZ	STRUT_LH	M:6.000	1.32%
7	LCA_L1	LCAL-3Z	LCA_LH	M:0.750	1.30%
8	float_C11	LCALh1xyz	Cradle	M:0.500	1.00%
9	fs_L3	STRUT_L-1XYZ	STRUT_LH	M:4.000	0.58%
10	B2	FIXp8x	BIW	M:2.000	0.37%

Fig. 12 Analysis result - sensitivity

차해석 모델링을 위한 입력사항이다.

시스템의 3D 설계 모델 데이터와 조립공정에 대한 정의가 완료되면 각 부품 및 공정단위로 관련된 기하공차를 정의하게 된다. Fig. 11 은 로워 암(lower control arm, 이하 LCA)부품의 기하공차 예이다. 공차해석 프로그램인 3DCS 를 사용하여 해석을 수행하였다. 3DCS 는 몬테카를로 방법을

Table 4 Selected control factors and level

Part Name	Underline : Initial Condition				
	Control Factors		1 Level	2 Level	3 Level
Lower Control Arm	A	LCA1	0.50	<u>0.75</u>	1.50
	B	fc4	1.00	<u>2.00</u>	3.00
Cross Member	C	fc5	1.00	<u>2.00</u>	3.00
	D	fc6	0.50	<u>1.00</u>	2.00
Body-In-White	E	B2	0.50	<u>1.00</u>	2.00
	F	B3	0.50	<u>1.00</u>	2.00

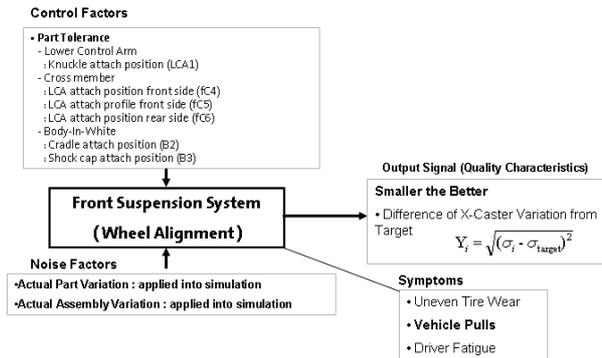


Fig. 13 P-diagram for front wheel alignment

시뮬레이션에 사용하는 상용 해석 프로그램이며, 모델의 처짐이나 변형을 고려하지 않고 강제 라는 가정하에 시뮬레이션(7)을 수행한다.

본 연구에서는 각 조립 체의 공차에 의해 변화 되는 캐스터, 캠버, 토우 값의 양과 여기에 영향을 미치는 주요인자들에 대해 알아보기 위한 시뮬레이션 모델을 만들었으나 우선 캐스터에 대해 적용한 결과를 중심으로 기술하였다.

Fig. 12 는 캐스터에 대한 민감도 해석 결과이며 상위 10 개 항목을 보여주고 있다. 크로스 멤버 (cross member)의 로워 암(LCA)과 조립 되는 지점의 위치공차 인자인 LCA attach position front side(fc4), LCA attach position front side (fc5), LCA attach position rear side(fc6)가 전체의 72%를 차지하였다. 그리고 스트러트(strut)가 조립되는 차체의 cross member attach position(b2), shock attach position(b3) 지점의 공차가 22%로 민감하였다. 나머지 21 개 공차항목의 영향은 단 1.2%에 불과하였다. 상위 10 항목 중 가장 전체 누적 공차에 영향을 미치는 인자를 선별하여 Table 4 와 같이 설계인자(control factor)로 선정하였다.

각 인자의 수준은 공차해석 결과 얻은 민감도 분석 결과와 부품 공급업체 및 설계자의 경험적 데이터를 기준으로 공차의 수준을 결정한 기존의 방식의 공차조합을 2 수준으로 하고 보다 엄격한 1 수준과 공차 확대가 가능한 영역으로 3 수준을

Table 7 ANOVA result [f(2, 6:0.05) = 5.14]

Factor	SS	DF	V	F
A	2.038776	2	1.019388	5.627571*
B	19.68942	2	9.844712	54.34811*
C	13.11897	2	6.558487	36.20638*
D	5.519844	2	2.759922	15.23626*
E	6.775834	2	3.387917	18.70313*
F	1.189413	2	0.594706	3.283099
e	1.086851	6	0.181142	1
Total		18		

Table 8 Average S/N by control factor

S/N	A	B	C	D	E	F
1	22.8	22.0	22.2	22.7	22.6	23.0
2	23.2	23.1	23.2	23.1	23.0	23.2
3	23.7	24.6	24.3	24.0	24.1	23.6

Table 9 Gain analysis between predicted and simulation

	S/N		Mean	
	Predicted 추정치	Actual Simulation	Predicted 추정치	Actual Simulation
Baseline Design	22.66	22.04	0.06	0.07
Optimized Design	27.65	26.61	0.02	0.04
Gain	4.99dB	4.57dB	-0.04	-0.03

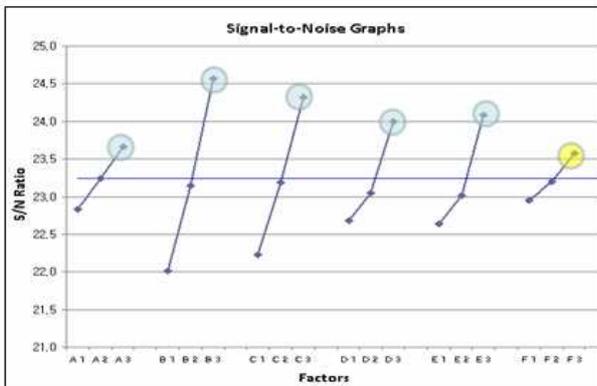


Fig. 15 Optimized combination of tolerance level

측은 다음 식에 의해 계산 된다.

$$\frac{S}{N}_{predicted} = \bar{T} + \sum \Delta_i \quad (6)$$

where $\Delta_i = S/N_i - \bar{T}$

최적조건에서의 S/N 예측 값은 다음과 같이 구하였다. $S/N_{optimized} = 23.2 + (0.41 + 1.33 + 1.07 + 0.75 + 0.84) = 27.65$ db.

기존 방식에 의해 결정된 공차조합에 대해서는 다음과 같다. $S/N_{baseline} = 23.2 + (0.0 - 0.1 - 0.06 - 0.19 - 0.23) = 22.66$ db 이다.

Table 9 는 초기공차 조합과 최적조건 공차조합의 예측 치와 실제 시뮬레이션 결과를 보여준다.

Table 10 DTOPT result ($\sigma=0.15$)

Steering Torque Contributors	Mean	sd(σ)	Sensitivity	Total Steering Wheel Torque				Predicted Warranty IPTV
				Mean	-3 σ	+3 σ	sd(σ)	
Cross Caster (Deg)	0.32	0.150	-0.154	-0.127	0.5396	0.285	0.137	1.63
Cross Camber (Deg)	0.23	0.167	0.282					
Road Slope (Deg)	0.60	0.500	-0.241					
Plyster RAT (Nm)	-0.06	0.424	-0.048					
Conicity (N)	0.00	16.640	-0.002					

본 연구의 캐스터 최적화로 부터 얻은 예측 추정치의 기대 이득은 4.99dB 이었다. 최적조건으로 얻은 공차의 조합을 실제 시뮬레이션 모델에 적용한 결과는 초기 조건 대비 4.57 dB 의 개선 효과가 있었다. 예측의 추정치와 실제의 이득(gain)의 차이가 0.42dB 로서 9.2% 정도 차이가 있었지만 다구찌의 경험 법칙에 의해 30% 이내면 최적화 조건이라 할 수 있다.

4. 적용 결과 분석

4.1 휠 얼라인먼트 변동(variation) 개선

목표 품질 수준(3 $\sigma=0.5$)에 대한 휠 얼라인먼트 캐스터의 강건성을 평가하였다. 목표 표준편차와의 차이에 대한 변동을 최소화하는 것을 목적함수로 두었으며 실제 최적조건으로 얻은 4.57dB 이득(gain)값을 식 (7)과 식 (8)에 대입하여 계산하면 41%의 변동을 줄이는 개선 효과가 있었다.

$$\frac{\sigma_{opt}}{\sigma_{base}} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{gain}{6}} \quad (7)$$

$$\%Reduction = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{gain}{6}} \quad (8)$$

본 연구의 공차 최적화 프로세스를 통해 최적의 공차수준을 적용한 결과는 표준편차 $\sigma=0.15$ 이며 설정된 목표 값($\sigma=0.167$) 에 가장 근접함을 알 수 있다.

이는 제품개발 초기에 제조 공차에 의한 충분한 분석자료가 없는 상태에서 시스템의 신뢰성에 근거한 워런티와 제조비용을 동시에 고려하고 품질 목표에 최적화된 공차 수준을 조기에 결정 할 수 있는 효과적인 방법임을 입증하였다.

4.2 차량 쏘림 개선

최적화 된 기하공차를 적용한 현가 시스템의 캐스터 품질 변동을 고려하여 Table 10 과 같이 total SWT 표준편차를 구하면 $\sigma=0.137$ 얻었다. 이는 초기의 total SWT 표준편차인 $\sigma=0.147$ 을 6.8% 개선하였다.

5. 결 론

차량 쏠림을 평가하기 위해 여러 차량 쏠림 인자들을 확률론적인 예측 모델을 적용하여 total SWT(steering wheel torque)를 산출하였다. 각 차량 쏠림 인자들은 차량 고유의 특성에 의한 민감도(sensitivity)를 갖고 있으며 이러한 민감도는 아키텍처 지오메트리(architecture geometry)의 공칭 값(nominal value)에 따라 영향을 받는다. 본 연구는 공칭 값과 더불어 각 인자의 표준편차에 의한 품질 변동(variation)에 관점을 두어 이러한 품질 변동을 목표 값에 최대한 근접하기 위한 최적화 방안을 제안하였다.

차량 쏠림 예측 모델을 통해 SWT 를 최소로 하는 휠 얼라인먼트의 쏠림 인자 중 캐스터 목표 표준편차($\sigma=0.167$)를 선정하였다. 연구 모델의 해석 결과는 크로스 멤버(cross member)의 로워 암(lower control arm)과 조립되는 지점의 위치공차 LCA attach position front side(fc4), LCA attach position front side(fc5), LCA attach position rear side(fc6)가 전체의 72%를 차지하였으며 스트러트(strut)가 조립되는 차체(BIW)의 cross member attach position(b2), shock attach position(b3) 지점의 공차가 22%로 민감하였다. 이러한 분석을 근거로 전체의 94%에 해당하는 6 개의 주요 기하공차 인자를 선별하여 부품 품질 변동($2\sigma \sim 4\sigma$)과 조립 공정의 변동($2\sigma \sim 4\sigma$)의 잡음조건(noise condition)에서 최적화된 공차조합인 A3-B3-C3-D3-E3-F3 얻었다.

최적화된 기하공차 조합은 캐스터에 의한 휠 얼라인먼트 변동을 41% 개선하였다. 또한 개선된 휠 얼라인먼트는 차량 쏠림을 6.8% 개선하였다.

향후에 캐스터 최적화뿐만 아니라 캠버 최적화에도 본 연구 모델을 적용하여 휠 얼라인먼트의 변동을 최소화하는 추가 연구가 요구된다. 본 연구의 예측모델에는 차량의 무게 배분, 차량의 높이 차, 승객 무게, 횡풍 등의 영향 등을 고려하지 않았다. 차량 쏠림은 복잡하고 다양한 원인에 의해 발생하는 현상이며 고객 불만 사항도 다양하게 나타나므로 향후 연구에는 좀 더 많은 쏠림 인자

를 고려한 예측 모델을 개발할 필요가 있다.

참고문헌

- (1) Lee, J. H. and Lee, J. W., 2000, "Tire and vehicle pull I-Experimental Results," *KSAE*, Vol. 8, No. 4, pp. 194~201.
- (2) Cho, Y. G., Park, J. Y. and Oh, Y. H., 2006, "Theory of Vehicle Drift and Pull," *KSAE, Fall Conference Proceeding*, pp. 767~772.
- (3) Oh, S. H. and Gim, G., 1998, "A Study on Vehicle Pull," *KSAE, Spring Conference Proceeding*, pp. 645~650.
- (4) Koo, B. K., Kim, S. J. and Cho, C. T., 2005, "An Approach to Vehicle Pull Using ADAMS," *KSAE, Fall Conference Proceeding*, pp. 1343~1348.
- (5) Lee, J.W. and Mun, S. H., 1999, "Tire and Vehicle Pull II - Basic theory, Simulation, and Verification," *KSAE, Fall Conference Proceeding*, pp. 518~525.
- (6) Koo, B. K., Lee, C. H., Shin, Y. D. and Cho, C. T., 2006, "An Study on Efficient Analysis Method of Vehicle Pull Using Deign Experiments," *KSAE, Fall Conference Proceeding*, pp. 956~961.
- (7) Choo, Y. J., Son, J. M. and Kim, Y. S., 2007, "Study on the Effect of Dimensional Tolerance in Vehicle Pull," *KSAE, Fall Conference Proceeding*, Vol. II, pp. 713~719.
- (8) Choi, J. H., Lee, S. J. and Choi, D. H., 1998, "Study on Tolerance and Reliability Analysis of Mechanical Systems with Uncertainty," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, No. 1, pp. 215~226.
- (9) Tahk, J. K., 2005, "Accumulated Tolerance Analysis for Optimal Tolerance Design," *KSAE, Fall Conference Proceeding*, pp. 1743~1752.
- (10) Kim, J. Y., 1999, "Optimal Tolerance Allocation using Genetic Algorithm, Monte Carlo Simulation and Quality Loss Function," *Seoul National University, Master Thesis*, pp. 14~15.
- (11) Shin, D. K., 1994, "Robust Design and Tolerancing for Dynamic Systems," *KAIST, Master Thesis*, pp. 4~10.
- (12) Park, K. J., Lee, T. H., Lee, K. H. and Hwang, K. H., 2004, "A Review of Robust Design Methodologies," *Trans of the KSME A*, Vol. 28, No. 9, pp. 1368~1383.