In-Wheel EV의 선회 성능 개선을 위한 제어기 설계 및 최적화

빙글빙글

건국대학교 기계공학부

황필상, 전경훈

지도 교수: 김창완 교수님

2020년 8월 28일





목차

1. 서론

- 1.1 연구 배경
- 1.2 연구 주제
- 1.3 연구 이론 : 차량동역학
- 1.4 연구 이론 : DYC 알고리즘
- 1.5 연구 절차

2. In-Wheel EV MBD 해석

- 2.1 MBD 해석 개요
- 2.2 해석 모델
- 2.3 경계조건 & 하중조건
- 2.4 MBD 해석 결과

3. 최적설계

- 3.1 최적화 개요
- 3.2 DYC 알고리즘 설계
- 3.3 구동 토크 비율 & DYC
- 3.4 최적화 1 구동 토크 비율 최적화
- 3.5 최적화 2 DYC 알고리즘 최적화
- 3.6 최적화 3 구동 토크 비율 & DYC 알고리즘 최적화
- 3.7 최적화 해석 결과 비교

4. 결론





1. 서 론

- 1.1 연구 배경
- 1.2 연구 주제
- 1.3 연구 이론 : 차량동역학
- 1.4 연구 이론: DYC 알고리즘
- 1.5 연구 절차



1.1 연구 배경

- 친환경 규제로 전기 자동차 및 전기모터에 대한 연구 증가
- 내연기관차와 달리 바퀴별로 독립 구동이 가능한 In-Wheel 모터
- In-Wheel 모터의 빠른 응답성으로 더 개선된 선회 성능이 기대됨



전기차 모터 기술 현황

○ 선연수 기자 | ② 승인 2019.10.10 08:40 | ♀ 댓글 0

기존의 인라인(In-line) 방식은 모터를 차축에 연결해 축에 연결된 2개의 바퀴를 동시에 구동하는 형태였다. 이와 다르게 인휠(In-wheel) 방식은 자동차 바퀴휠(Wheel) 자체에 모터가 장착되는 형태로 각 바퀴가 독립적으로 구동되는 기술이다. 기존 시스템에 사용되던 변속기나 차동기어가 필요없게 되면서 차체를 더 가볍고 간단하게 제작할수 있다. 바퀴를 직접 제어하기 때문에 토크 응답성이 높고, 에너지 효율이 높으며, 차량이 회전할 경우 바퀴마다 토크가 온전히 독립적으로 발생해 안전성 또한 비교적 우수하다. 그러나 각 바퀴에 모터를 장착하고, 이에 따른 온도, 속도 등을 감지하는 센서 또한 각각 장착함으로써 높은 비용을 요구하게 된다. 또한 모든 바퀴를 감지하고 제어해야 하기에 고난이도의 데이터 분석시스템 설계가 필요하다.

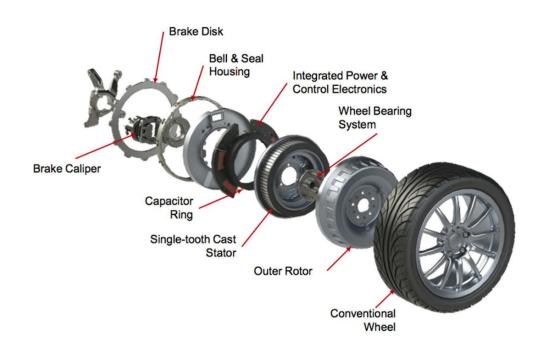


1.2 연구 주제

■ In-Wheel 모터

- 차량 선회 시 양쪽 바퀴의 회전수에 차이를 주어 안정성을 높여주는 차동 기어 부재
- 각 바퀴를 독립적으로 구동하여 구동력에 차이를 주고 선회 안정성 향상
- 동력 전달 장치가 제거되므로 차량 공간 확보에 유리
- 선회 성능 관점에서 In-Wheel에 관해 연구하고자 함

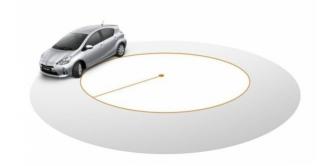




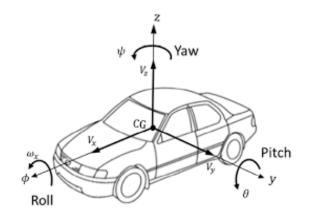


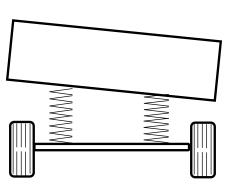


■ 선회시에 바깥쪽 바퀴의 회전반경이 안쪽 바퀴의 회전반경 보다 더 큼



- 선회시에 원심력에 의해서 바깥쪽으로 Roll이 발생 바깥쪽 바퀴에 하중이 더 가중
 - → 안 쪽 바퀴에 하중이 덜 걸려서 미끄러지는 현상









■ 좌, 우측 종방향 미끄러짐을 최소화 하여 차량의 슬립 방지

$$LongSlip = -\frac{V_x - r_e \Omega}{V_x}$$

LongSlip : 종방향 미끄러짐 (%)

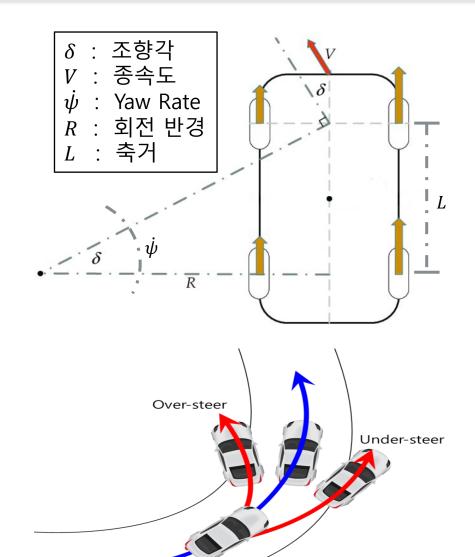
 V_x : 휠 중심 종방향 속도 (m/s)

 r_e : 유효 회전반경 (m)

Ω : 휠 각속도 (rad/s)

- 양의 슬립은 바퀴가 회전하고 있음을 나타내고, 음의 슬립은 미끄러짐을 나타냄
- 슬립이 -1인 바퀴의 표면 속도가 0이면 회전 없이 슬라이딩
- 속도 없이 회전을 하는, $r_e\Omega \neq 0$, $V_x=0$ 은 무한대의 슬립을 의미





• 조향각 δ 가 미소하면

 $\delta \cong \tan \delta = \frac{L}{R}$

• 목표 선회 반경 R은

 $R = \frac{L}{\tan \delta} \cong \frac{L}{\delta}$

• 종속도와 Yaw Rate의 관계식은

- $\dot{\psi} = \frac{V}{R}$
- 위 두 식을 연립하여 목표 Yaw Rate를 구함
- $\dot{\psi}_{des} = \frac{(\tan \delta)V}{L} \cong \frac{\delta V}{L}$

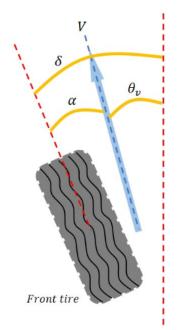
- Understeer : 입력 조향각 보다 더 적게 회전
- Oversteer : 입력 조향각 보다 더 많이 회전
- 목표 Yaw Rate 추종을 통해 중립조향 유지



Vehicle model

$$\begin{aligned}
\mathbf{m}\alpha_{y} &= \mathbf{F}_{yf} + \mathbf{F}_{yr} \\
m(\ddot{y} + v_{x}\ddot{\psi}) &= F_{yf} + F_{yr} \\
&= 2C_{\alpha f}\alpha_{f} + 2C_{\alpha r}\alpha_{r} = 2C_{\alpha f}\left(\delta - \frac{\dot{y} + l_{f}\dot{\psi}}{v_{x}}\right) + 2C_{\alpha r}\left(-\frac{\dot{y} - l_{r}\dot{\psi}}{v_{x}}\right) \\
\ddot{y} &= -\frac{2C_{\alpha f} + 2C_{\alpha r}}{mv_{x}}\dot{y} - \left(\frac{2l_{f}C_{\alpha f} - 2l_{r}C_{\alpha r}}{mv_{x}} + v_{x}\right)\dot{\psi} + \frac{2C_{\alpha f}}{m}\delta
\end{aligned}$$

$$\begin{split} I_{z}\alpha_{yaw} &= l_{f}F_{yf} - l_{r}F_{yr} \\ I_{z}\ddot{\psi} &= l_{f}F_{yf} - l_{r}F_{yr} = l_{f}\left\{2C_{\alpha f}\left(\delta - \frac{\dot{y} + l_{f}\dot{\psi}}{v_{x}}\right)\right\} - l_{r}\left\{2C_{\alpha r}\left(-\frac{\dot{y} - l_{r}\dot{\psi}}{v_{x}}\right)\right\} \\ \ddot{\psi} &= -\frac{2l_{f}C_{\alpha f} - 2l_{r}C_{\alpha r}}{l_{z}v_{x}}\dot{y} - \frac{2l_{f}^{2}C_{\alpha f} + 2l_{r}^{2}C_{\alpha r}}{l_{z}v_{x}}\dot{\psi} + \frac{2l_{f}C_{\alpha f}}{l_{z}}\delta \end{split}$$



 δ : 조향각

 θ_n : 타이어 속도각

 $C_{\alpha f}$, $C_{\alpha r}$: 선회강성계수

m : 차량의 질량

α : 차량의 미끄러짐각

 ψ : Yaw

 $\dot{\psi}$: Yaw Rate

$$\begin{aligned} \alpha_f &= \delta - \theta_{vf} \\ \alpha_r &= -\theta_{vr} \\ F_{yf} &= 2C_{\alpha f}\alpha_f = 2C_{\alpha f} \left(\delta - \theta_{vf}\right) \\ F_{yr} &= 2C_{\alpha r}\alpha_r = 2C_{\alpha r} (-\theta_{vr}) \end{aligned}$$



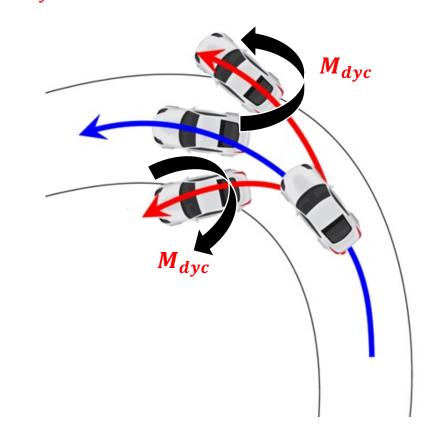
1.4 연구 이론 : DYC 알고리즘

Vehicle model

$$\begin{aligned} \boldsymbol{m}\boldsymbol{a}_{\boldsymbol{y}} &= \boldsymbol{F}_{\boldsymbol{y}f} + \boldsymbol{F}_{\boldsymbol{y}r} \\ \boldsymbol{m}(\ddot{\boldsymbol{y}} + \boldsymbol{v}_{\boldsymbol{x}}\ddot{\boldsymbol{\psi}}) &= F_{\boldsymbol{y}f} + F_{\boldsymbol{y}r} \\ &= 2C_{\alpha f}\alpha_f + 2C_{\alpha r}\alpha_r = 2C_{\alpha f}\left(\delta - \frac{\dot{\boldsymbol{y}} + l_f\dot{\boldsymbol{\psi}}}{\boldsymbol{v}_{\boldsymbol{x}}}\right) + 2C_{\alpha r}\left(-\frac{\dot{\boldsymbol{y}} - l_r\dot{\boldsymbol{\psi}}}{\boldsymbol{v}_{\boldsymbol{x}}}\right) \\ \ddot{\boldsymbol{y}} &= -\frac{2C_{\alpha f} + 2C_{\alpha r}}{m\boldsymbol{v}_{\boldsymbol{x}}}\dot{\boldsymbol{y}} - \left(\frac{2l_fC_{\alpha f} - 2l_rC_{\alpha r}}{m\boldsymbol{v}_{\boldsymbol{x}}} + \boldsymbol{v}_{\boldsymbol{x}}\right)\dot{\boldsymbol{\psi}} + \frac{2C_{\alpha f}}{m}\delta \end{aligned}$$

$$\begin{split} I_{z}\alpha_{yaw} &= l_{f}F_{yf} - l_{r}F_{yr} + M_{dyc} \\ I_{z}\ddot{\psi} &= l_{f}F_{yf} - l_{r}F_{yr} = l_{f}\left\{2C_{\alpha f}\left(\delta - \frac{\dot{y} + l_{f}\dot{\psi}}{v_{x}}\right)\right\} - l_{r}\left\{2C_{\alpha r}\left(-\frac{\dot{y} - l_{r}\dot{\psi}}{v_{x}}\right)\right\} + M_{dyc} \\ \ddot{\psi} &= -\frac{2l_{f}C_{\alpha f} - 2l_{r}C_{\alpha r}}{I_{z}v_{x}}\dot{y} - \frac{2l_{f}^{2}C_{\alpha f} + 2l_{r}^{2}C_{\alpha r}}{I_{z}v_{x}}\dot{\psi} + \frac{2l_{f}C_{\alpha f}}{I_{z}}\delta + \frac{M_{dyc}}{I_{z}} \end{split}$$

*M_{dvc}*를 통해 Under/Oversteer 해결 가능





1.4 연구 이론 : DYC 알고리즘

■ 목표 yaw moment

• Yaw Rate Error로 PI 제어

$$M_{DYC} = K_P(\dot{\psi}_{des} - \dot{\psi}) + K_I(\dot{\psi}_{des} - \dot{\psi})$$

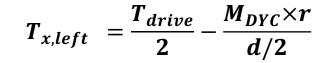
• 횡방향 운동방정식을 통해 아래의 식 만족

$$M_{DYC} = \frac{d}{2} (F_{x, right} - F_{x, left})$$

■ 구동 토크

• $T_{drive} = T_{x,left} + T_{x,right}$

■ 토크 분배 알고리즘



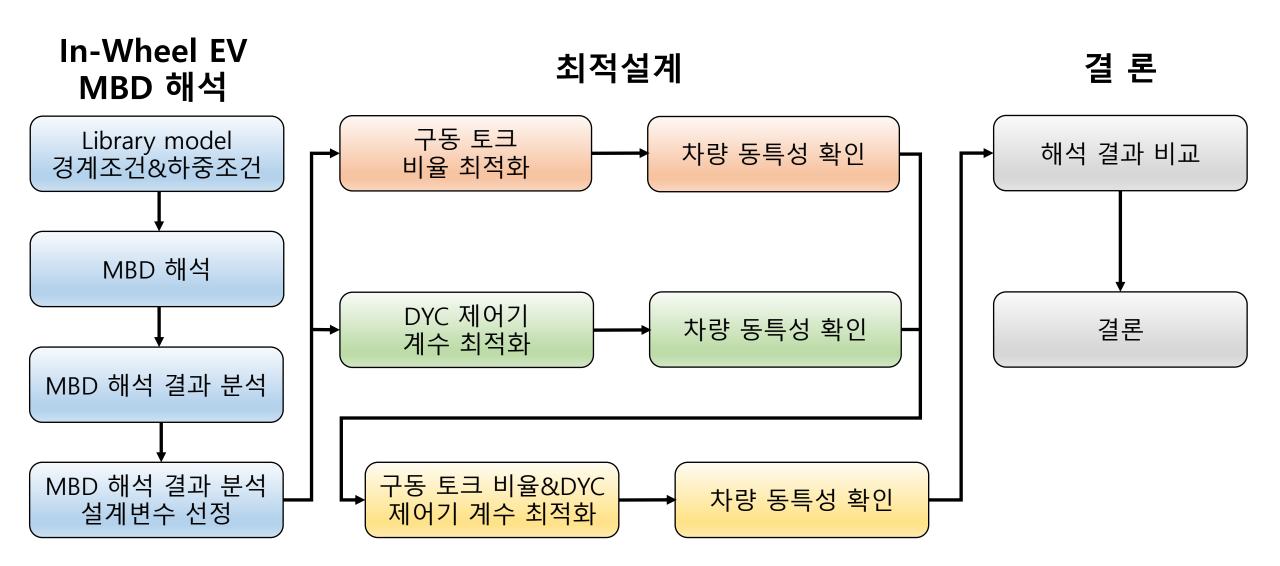
$$T_{x,right} = \frac{T_{drive}}{2} + \frac{M_{DYC} \times r}{d/2}$$







1.5 연구 절차





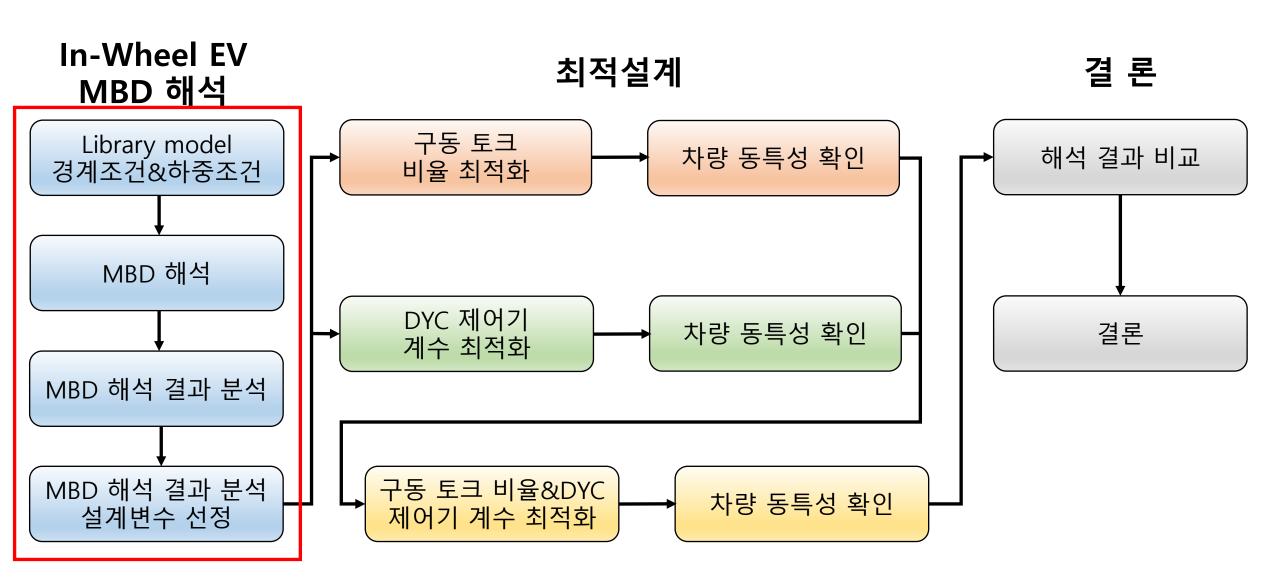
2. In-Wheel EV의 MBD 해석

- 2.1 MBD 해석 개요
- 2.2 해석 모델
- 2.3 경계조건 & 하중조건
- 2.4 MBD 해석 결과





연구 절차





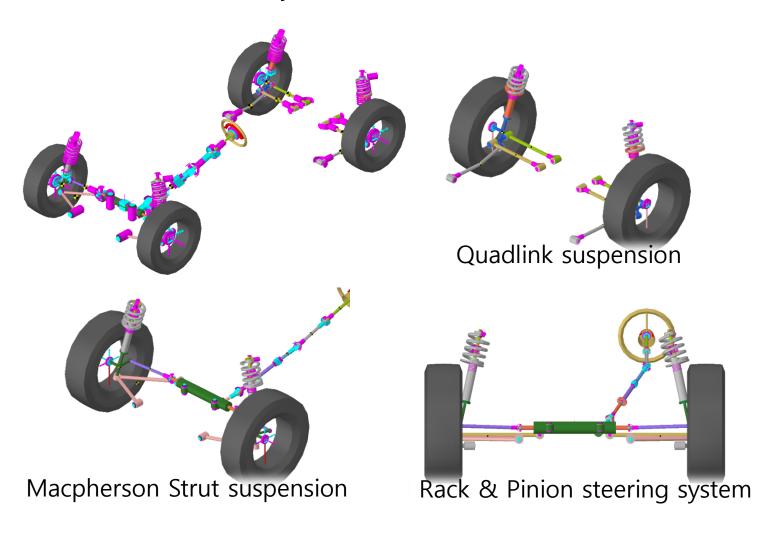
2.1 MBD 해석 개요

- 차량이 선회할 때의 동특성을 확인하기 위해 MBD (Multi Body Dynamics) 해석 진행
- MotionSolve Library Full Vehicle 을 이용해 In-Wheel EV로 재구성
- 안정적인 MBD 해석을 위해 초기 속도를 부여하고, 경계조건 & 하중조건을 적절히 부여
- 조향각 (Steering angle)에 따라 달라지는 조향비 (Steering Ratio)를 MBD해석을 통해 확인
- 동일한 조향각, 구동 토크를 가한 상황에서의 MBD 해석



2.2 해석 모델

■ Motionsolve 내 Library 모델 사용



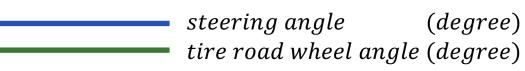
■ Full Vehicle 제원

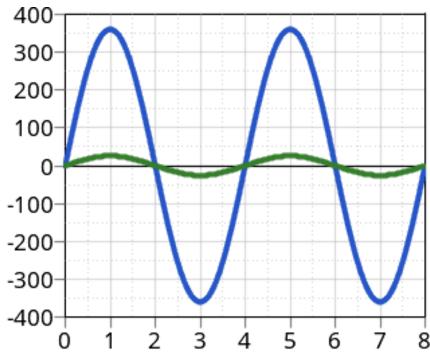
d (tread)	1.500 m
$\mathit{l_f}$ (front wheel to CG)	1.469 <i>m</i>
l_r (rear wheel to CG)	1.231 <i>m</i>
m (mass)	1261 <i>kg</i>
r (unloaded radius)	0.3135 m
r_e (Effective rolling radius)	0.3105 m



2.2 해석 모델

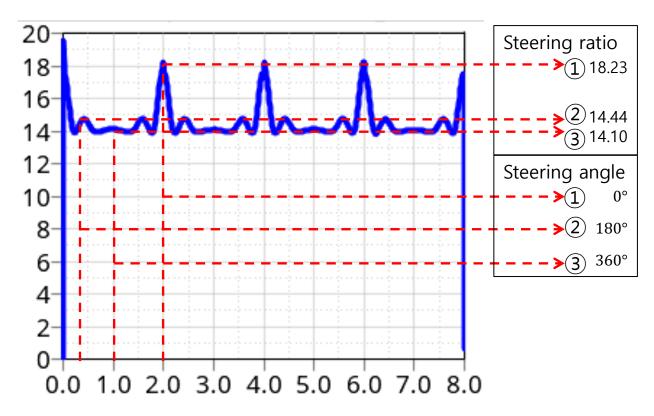
• $steering\ ratio = \frac{steering\ angle}{tire\ road\ wheel\ angle}$





• $steering \ angle = 360^{\circ} \cdot \sin(\frac{\pi}{2}t)$

steering ratio(degree/degree)





2.3 경계조건 & 하중조건

- 조향각: 180° (STEP 함수 이용) STEP(TIME,0.05,0,0.10,180D)
- 지면에서의 바퀴 각도 : 180° / 14.44 = 12.47°
- 접촉 조건 : MF/Swift Tire
- 단일 마찰계수 부여가 아닌 타이어 모델 사용
- 초기 속도 : 3 m/s
- 초기 속도 부여를 통해 해석 초기에 과도한 진동 억제

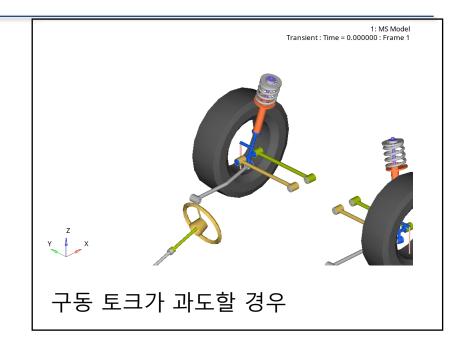
TNO_car205_60R15.tir [LONGITUDINAL_COEFFICIENTS]		
PDX1	= 1.0422	\$Longitudinal friction Mux at Fznom
PDX2	= -0.08285	\$Variation of friction Mux with load
[LATERAI	_COEFFICIENTS]	
PDY1	= 0.8785	\$Lateral friction Muy
PDY2	= -0.06452	\$Variation of friction Muy with load
•••••••		

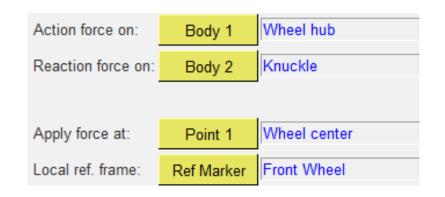
Translational velocity	
✓ Vx:	-3000.0000
□ Vy:	0.0000
□ Vz:	0.0000
Rotational velocity	
☐ Wx:	0.0000
☐ Wy:	0.0000
₩z:	9.6630

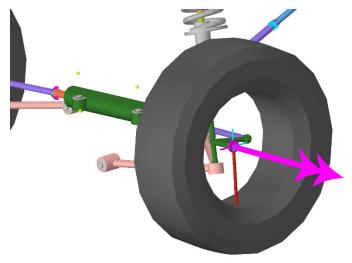


2.3 경계조건 & 하중조건

- Library model Powertrain 및 동력전달장치 제거
- 전륜 양쪽 바퀴에 직접 토크 부여로 인휠 모터 장착 가정
- 인휠 모터 장착시 너클에서 반력을 받는 것을 논문으로 확인
- 각 바퀴에 Torque : 250 N·m (STEP 함수 이용) STEP(TIME,0,0,1,250) (후륜 서스펜션이 과도한 변형이 일어나지 않고, 내연기관 구동 토크와 유사하도록 250 N·m 선정)





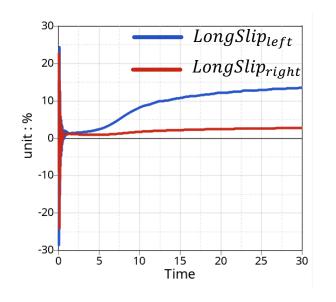


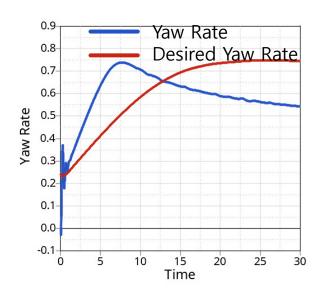


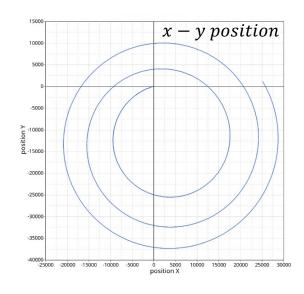


2.4 MBD 해석 결과

■ MBD 해석 결과 (LongSlip, Yaw Rate Error, x - y positon)







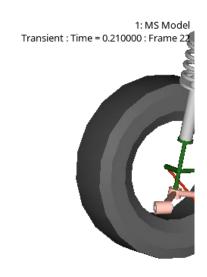
- 안쪽 바퀴가 바깥쪽 바퀴보다 종방향 미끄러짐이 심하게 발생
- 목표 Yaw Rate 를 추종하지 않고 주행
- 선회반경이 일정하지 않으며 점점 바깥쪽으로 이탈





2.4 MBD 해석 결과 문제 확인

- 안쪽 바퀴가 과하게 미끄러지는 영상
- 선회반경이 동일하지 않고 증가하는 영상
- ** 예시를 위해 동영상으로 확인 가능하도록 구동토크와 조향각을 과하게 부여함



1: MS Model Transient : Time = 0.000000 : Frame 1









3. 최적설계

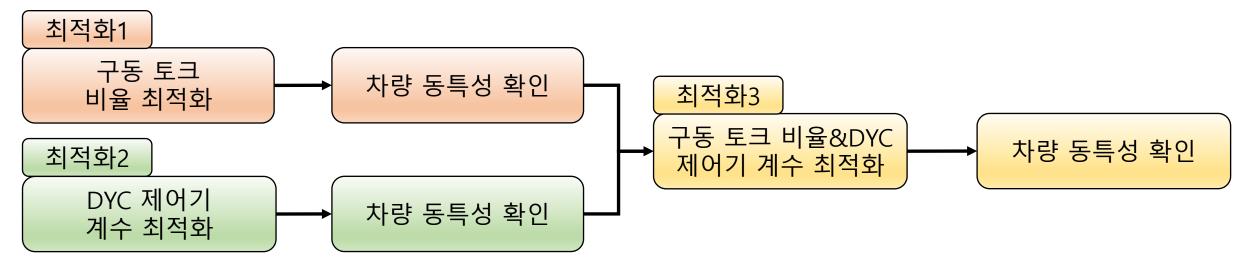
- 3.1 최적화 개요
- 3.2 DYC 알고리즘 설계
- 3.3 구동 토크 비율 & DYC
- 3.4 최적화 1 구동 토크 비율 최적화
- 3.5 최적화 2 DYC 알고리즘 최적화
- 3.6 최적화 3 구동 토크 비율 & DYC 알고리즘 최적화
- 3.7 최적화 해석 결과 비교





3.1 최적화 개요

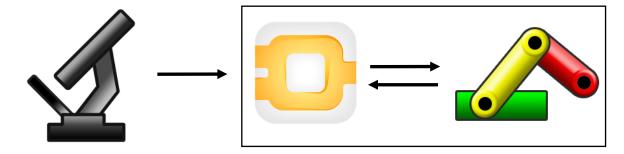
- 바퀴의 종방향 미끄러짐을 감소시키도록 설계
- 차량이 Under/Oversteer 하지 않도록 목표 Yaw Rate를 추종하도록 설계
- 회전반경을 줄일 수 있도록 설계
- 최적화 1은 종방향 미끄러짐을 감소시키도록 **구동 토크 비율 최적화**
- 최적화 2는 목표 Yaw Rate를 추종하도록 DYC 알고리즘(제어계수) 최적화
- 최적화 3은 위의 두가지 목적을 충족 시키도록 **구동 토크 비율 & DYC 알고리즘(제어계수) 최적화**

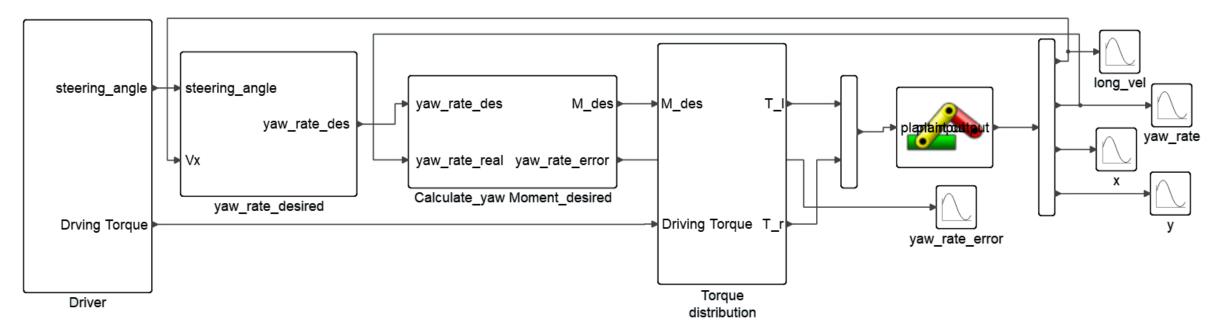




3.2 DYC 알고리즘 설계

- Activate를 이용해 DYC(Direct Yaw moment Control) 알고리즘 구현
- MotionSolve 와 Co-Simulation을 통해 MBD 해석
- Hyperstudy를 이용해 Co-Simulation을 최적화









3.3 구동 토크 비율 & DYC

$$T_{drive} = T_{left} + T_{right}$$

■ 구동 토크 비율로 제어

$$T_{left} = Torque \ Ratio \times T_{drive}$$

$$T_{right} = (1 - Torque Ratio) \times T_{drive}$$

■ 구동 토크 비율 & DYC 알고리즘으로 제어

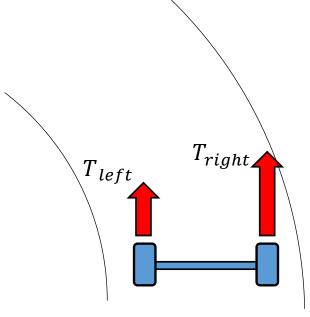
$$T_{left} = Torque \ Ratio \times T_{drive} - \frac{M_{DYC} \times r}{d/2}$$

$$T_{right} = (1 - Torque Ratio) \times T_{drive} + \frac{M_{DYC} \times r}{d/2}$$

■ DYC 알고리즘으로 제어

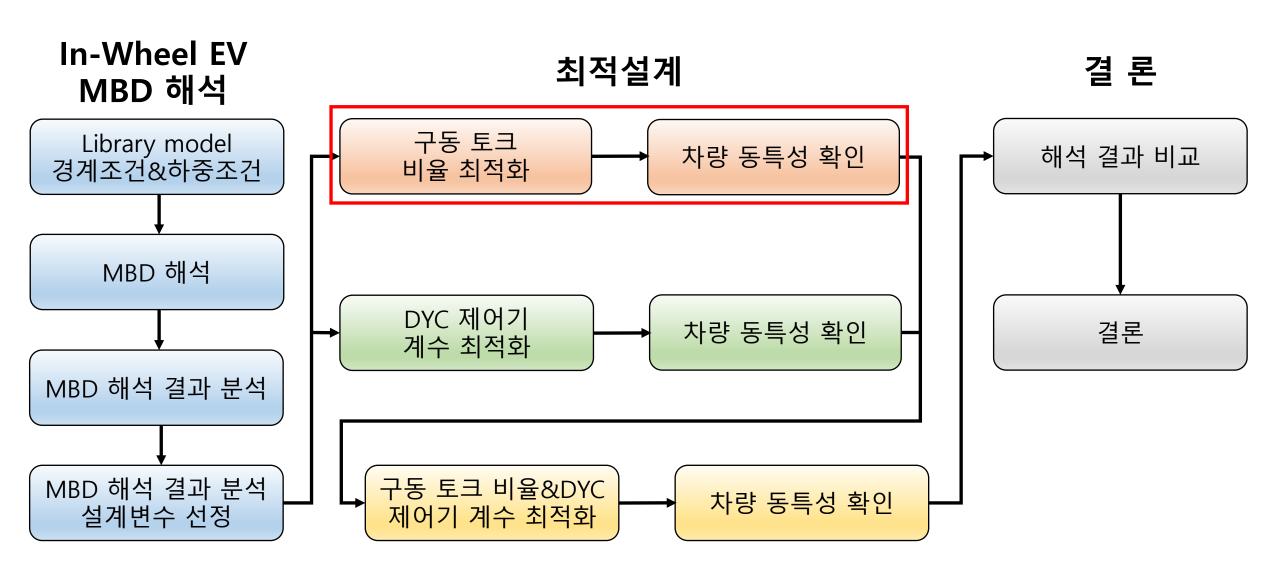
$$T_{left} = 0.5 \times T_{drive} - \frac{M_{DYC} \times r}{d/2}$$

$$T_{right} = 0.5 \times T_{drive} + \frac{M_{DYC} \times r}{d/2}$$





연구 절차





3.4 최적화 1 구동 토크 비율 최적화

- 안쪽 바퀴의 미끄러짐을 바깥쪽 바퀴의 미끄러짐만큼 감소
- 양쪽 바퀴의 종방향 미끄러짐의 합을 최소화

설계변수	토크 분배 비율 (Torque ratio)
목적함수	자, 우측 바퀴 종방향 미끄러짐 최소화 $RMS2 = \sum ((LongSlip_{left})^2 + (LongSlip_{right})^2)$
	$RMS2 = \sum_{time} ((LongSup_{left})^{-} + (LongSup_{right})^{-})$

$$T_{left} = Torque Ratio \times T_{drive}$$

$$LongSlip = -\frac{V_{x} - r_{e}\Omega}{V_{x}}$$

설계변수	Lower Bound	Reference	Upper Bound
토크 분배 비율	0	0.5	1

- 토크 분배 비율은 0~1.0 을 갖는다.
- Reference는 구동 토크 비율의 차등이 없는 0.5로 선정





3.4 최적화 1 구동 토크 비율 최적화

■ 반응표면법(ARSM)을 이용한 최적화



■ 최적화 결과 및 변화율

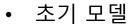
설계변수	좌우 토크 분배 비율
기존 모델	0.5000 : 0.5000
최적화 모델	0.2037 : 0.7963

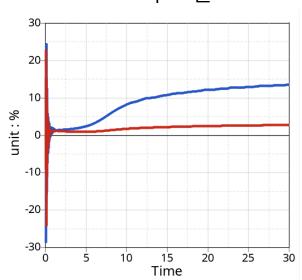
- Adaptive Response Surface Method(ARSM)
- Number of Evaluations: 50
- Absolute Convergence: 0.001
- Relative Convergence: 1.000
- Input Variable Convergence: 0.001



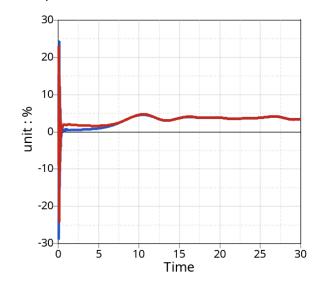
3.4 최적화 1 구동 토크 비율 최적화 결과

■ 종방향 미끄러짐 LongSlip_{left} LongSlip_{right}





• 좌, 우측 토크 분배 비율 최적화 모델



- 안쪽 바퀴의 종방향 미끄러짐이 많이 감소함
- 안쪽, 바깥쪽 바퀴의 종방향 미끄러짐이 거의 일치하게 됨
- *RMS*2: 301610.18 → 27614 **90.84%** 감소

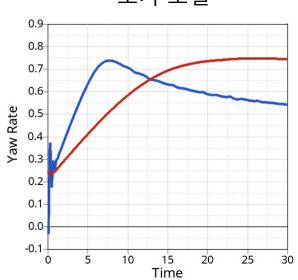


3.4 최적화 1 구동 토크 비율 최적화 결과

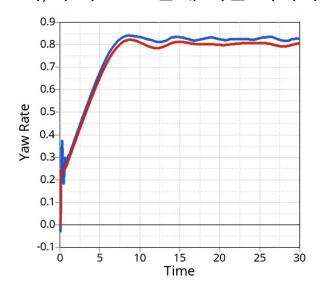
Yaw Rate Error

Yaw RateDesired Yaw Rate

• 초기 모델



좌, 우측 토크 분배 비율 최적화 모델



- 초기 모델은 목표 Yaw Rate와 Yaw Rate가 서로 경향성이 없음
- 최적화 1 모델은 경향성이 거의 <mark>일치</mark>하며 Yaw Rate Error가 매우 작음
- *RMS*2: 446.63 → 2.014 **99.5%** 감소



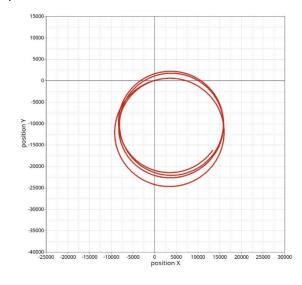


3.4 최적화 1 구동 토크 비율 최적화 결과

- **회전 반**경 *x* − *y position*
 - 本기모델

 15000
 10000
 -5000
 -5000
 -20000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -25000
 -250

• 좌, 우측 토크 분배 비율 최적화 모델

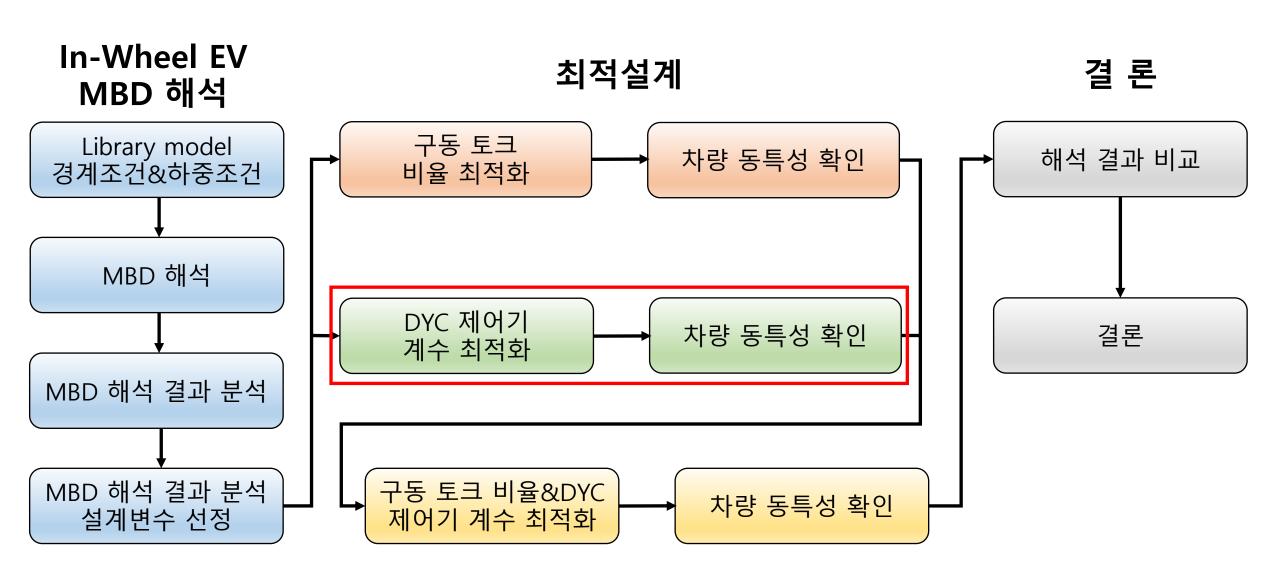


- **초기 모델**은 시험시간 30초 동안 수렴하지 못하지만 최적화 1 모델은 거의 수렴하며, 시험시간 30초에서의 회전반경이 많이 감소함
- 회전 반경: 25.12*m* → 13.44*m* 46.50% 감소





연구 절차

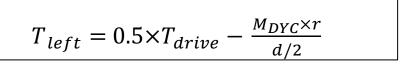


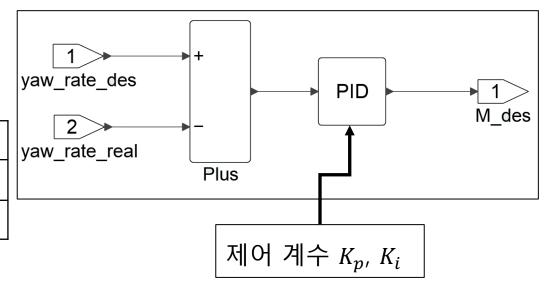


3.5 최적화 2 DYC 알고리즘 최적화

설계변수	PI 제어기 제어 계수 K_p , K_i
목적함수	목표 Yaw Rate에 대한 오차 최소화 $RMS2 = \sum_{time} (yaw \ rate_{desired} - yaw \ rate)^{2}$

설계변수	Lower Bound	Reference	Upper Bound
K_p	20	500	50000
<i>K</i> :	1	50	2500





- 전체 구동 토크인 500 N·m의 10%만큼을 M_{DYC} 에 의한 구동토크로 가정
- M_{DYC} 는 바퀴에서 $\frac{M_{DYC} \times r}{d/2}$ 의 구동토크로 변하고 초기모델의 Yaw Rate Error가 약 0.25이므로 K_p = 500 일 때를 기준으로 선정



3.5 최적화 2 DYC 알고리즘 최적화

■ 반응표면법(ARSM)을 이용한 최적화



- Adaptive Response Surface Method(ARSM)
- Number of Evaluations: 50
- Absolute Convergence: 0.001
- Relative Convergence: 1.000
- Input Variable Convergence: 0.001

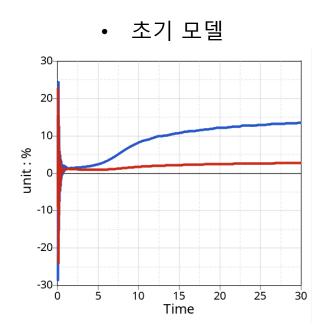
■ 최적화 결과 및 변화율

설계변수	K_p	K_i
기존 모델	500	50
최적화 모델	661.25	52.9



3.5 최적화 2 DYC 알고리즘 최적화 결과

■ 종방향 미끄러짐 LongSlip_{left} LongSlip_{right}



• DYC 알고리즘 최적화 모델

30
2010%: jiun
-10-20-30
0 5 10 15 20 25 30

Time

- 안쪽 바퀴의 종방향 미끄러짐이 많이 감소함
- 하지만 최적화 1 처럼 안쪽 바퀴와 바깥쪽 바퀴의 미끄러짐 정도가 일치하지는 않음
- *RMS*2: 301610.18 → 73571 **87.66**% 감소



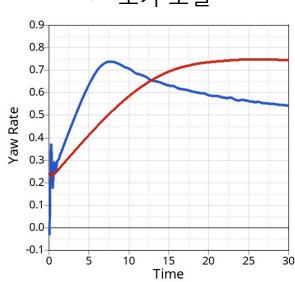


3.5 최적화 2 DYC 알고리즘 최적화 결과

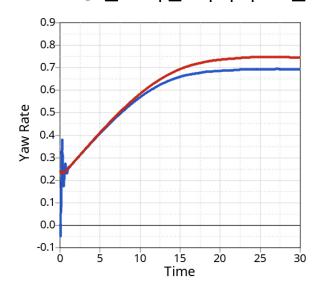
Yaw Rate Error

Yaw RateDesired Yaw Rate

• 초기모델



• DYC 알고리즘 최적화 모델



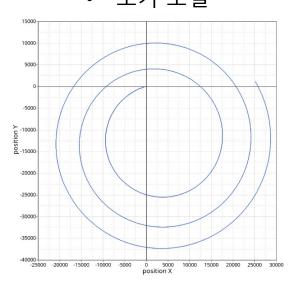
- 최적화 2 모델의 경우 정상상태 오차가 존재
- 목표 Yaw Rate와 Yaw Rate가 서로 경향성이 있음
- *RMS*2: 446.63 → 4.51 **98.99%** 감소



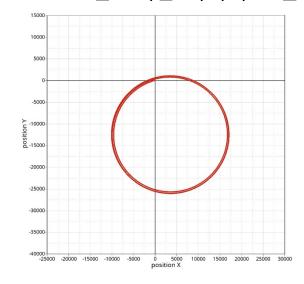


3.5 최적화 2 DYC 알고리즘 최적화 결과

- **회전** 반경 *x y position*
 - 초기 모델



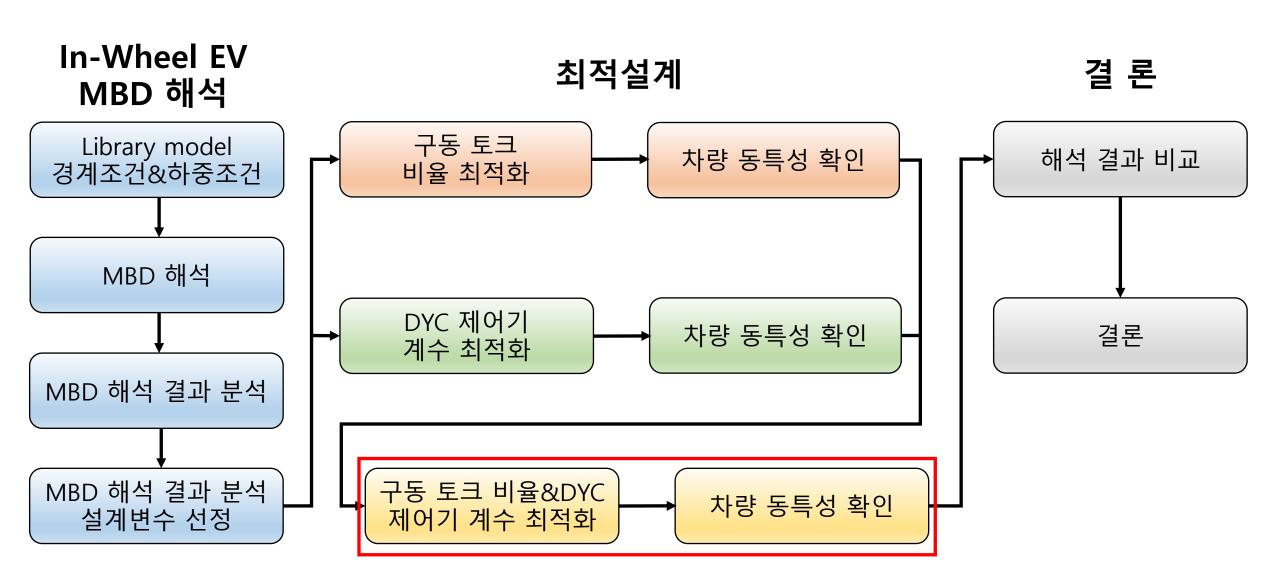
• DYC 알고리즘 최적화 모델



- 최적화 1 모델보다 선회 반경이 더 많이 수렴함
- 회전 반경: 25.12*m* → 13.56*m* **46.02**% 감소



연구 절차





3.6 최적화 3 구동 토크 비율 & DYC 알고리즘 최적화

설계변수	토크 분배 비율, PI 제어기 제어 계수 (K_p, K_i)
	목표 Yaw Rate에 대한 오차 최소화
목적함수	$RMS2 = \sum_{time} (yaw \ rate_{desired} - yaw \ rate)^{2}$

$$T_{left} = Torque \ Ratio \times T_{drive} - \frac{M_{DYC} \times r}{d/2}$$

$$T_{right} = (1 - Torque \ Ratio) \times T_{drive} + \frac{M_{DYC} \times r}{d/2}$$

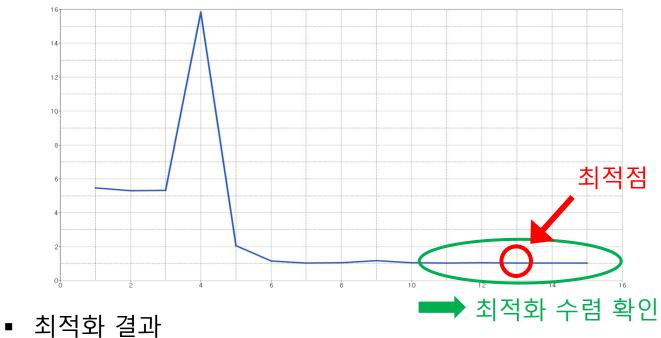
설계변수	Lower Bound	Reference	Upper Bound
K_p	20	500	50000
K_i	1	50	2500
토크 분배 비율	0	0.5	1

■ 설계변수와 설계 범위는 최적화 2 와 동일하게 선정



3.6 최적화 3 구동 토크 비율 & DYC 알고리즘 최적화

■ 반응표면법(ARSM)을 이용한 최적화



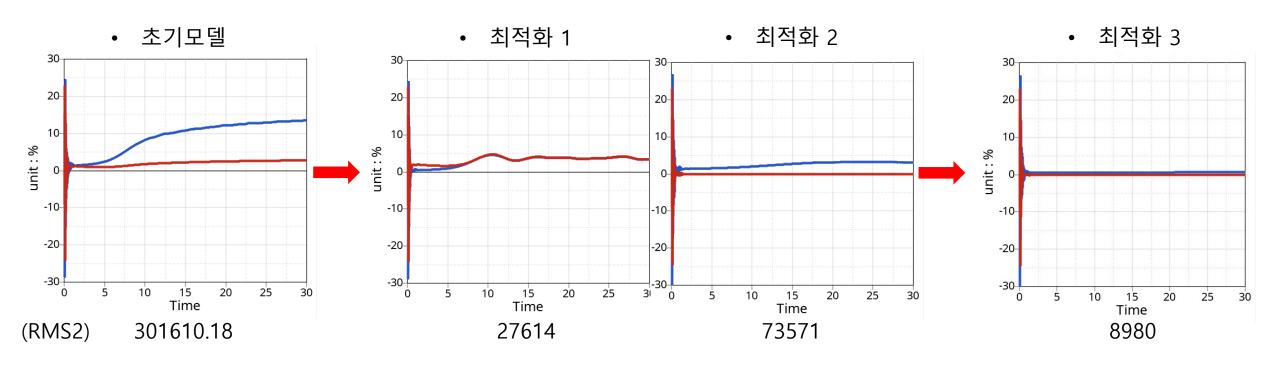
설계변수	K_p	K_i	토크 분배 비율
기존 모델	500	50	0.5000:0.5000
최적화 모델	592.70	49.27	0.1999:0.8001

- Adaptive Response Surface Method(ARSM)
- Number of Evaluations: 50
- Absolute Convergence: 0.001
- Relative Convergence: 1.000
- Input Variable Convergence: 0.001



3.6 최적화 3 구동 토크 비율 & DYC 알고리즘 최적화 결과

- 종방향 미끄러짐 LongSlip_{left} LongSlip_{right}



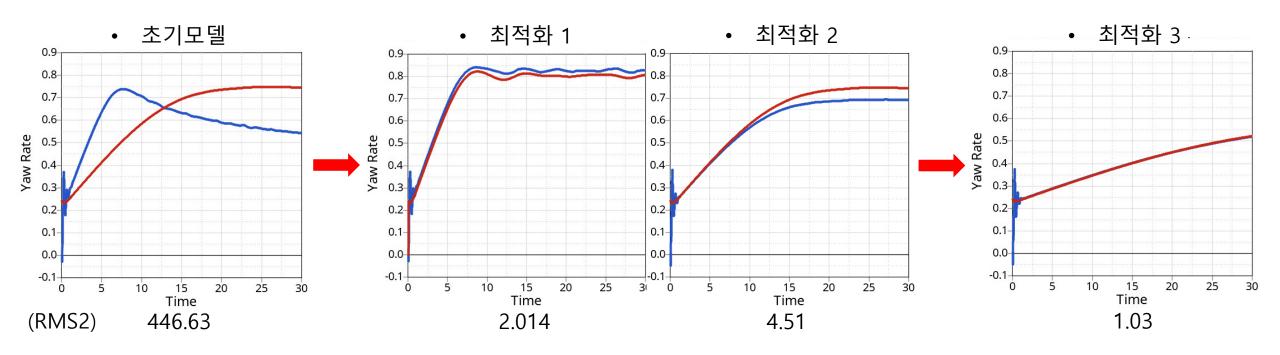
- 최적화 1의 경우 목표 종방향 미끄러짐이 약간 진동하는 경향이 있음
- 최적화 2는 종방향 미끄러짐을 잘 개선하긴 하지만 안쪽, 바깥쪽이 서로 일치하진 않음
- 최적화 3의 경우 종방향 미끄러짐이 더 개선되었고 양쪽이 거의 일치하며, 진동하지 않음





3.6 최적화 3 구동 토크 비율 & DYC 알고리즘 최적화 결과

Yaw Rate
 Desired Yaw Rate



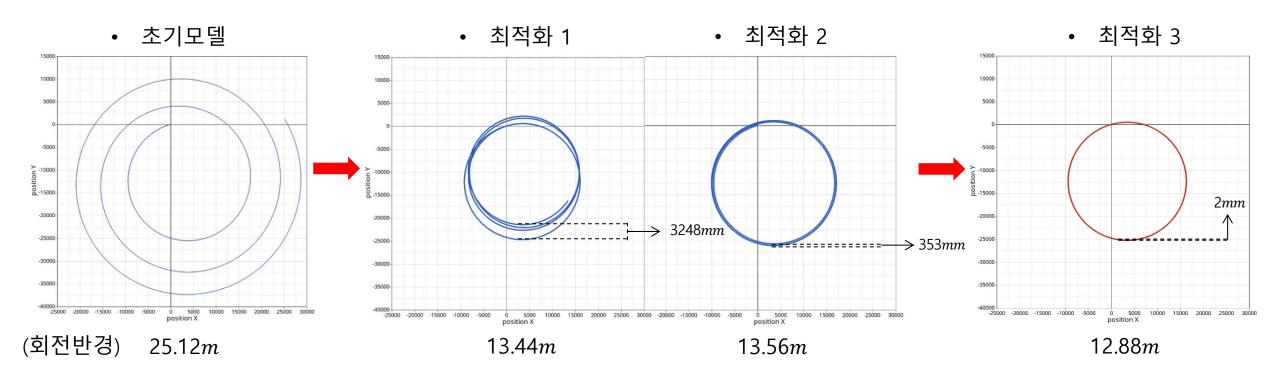
- 최적화 1, 2, 3 모두 목표 Yaw Rate와 Yaw Rate가 같은 경향성을 가짐
- **최적화 1**의 경우 목표 Yaw Rate와 Yaw Rate가 **진동**하는 경향이 있음
- 최적화 2가 진동하지 않는 이유는 매 순간 적절한 제어를 하는 PI 제어이기 때문으로 판단됨
- **최적화 3**의 경우 목표 Yaw Rate와 Yaw Rate가 **진동하지 않으며 거의 수렴**함





3.6 최적화 3 구동 토크 비율 & DYC 알고리즘 최적화 결과

■ **회전 반경** *x - y position*



• 최적화 1, 2 모델 보다 최적화 3 모델은 회전반경이 더 감소하였으며, 수렴율도 더 높음



3.7 최적화 해석 결과 비교

- 구동 토크 비율과 DYC 알고리즘 제어계수를 모두 고려한 최적화 3이 종방향 미끄러짐, Under/Oversteer, 선회반경이 모두 가장 잘 개선됨
- 선회 시에 **안쪽 바퀴가 하중이 덜 작용해서 미끄러지는 현상**과 바**깥쪽 바퀴가 안쪽 바퀴보다 회전이 더 많아야 하는 원리**를 이용해, **종방향 미끄러짐을 개선**
- Under/Oversteer 현상을 목표 Yaw Rate 추종을 통해 개선하는 DYC 알고리즘을 적용해 Yaw Rate Error 와
 회전 반경을 개선

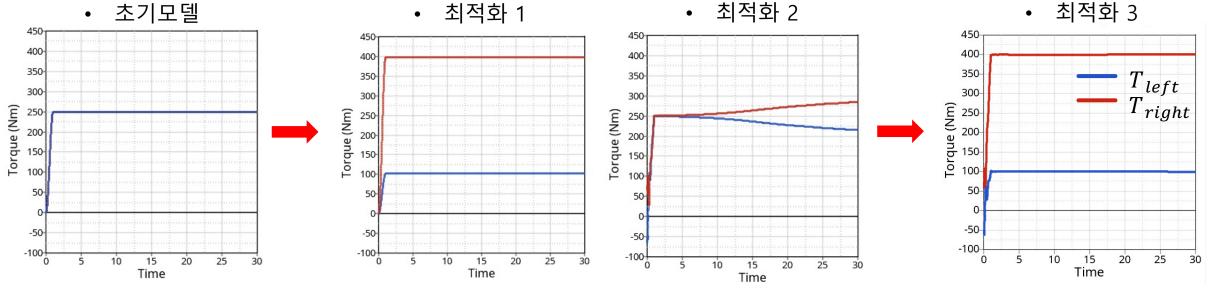
	초기 모델	최적화 1	최적화 2	최적화 3
LongSlip	301610.18	27614 (90.84% 감소)	73571 (87.66% 감소)	8980 (97.02% 감소)
Yaw Rate Error	446.63	2.014 (99.5% 감소)	4.51 (98.99% 감소)	1.03 (99.77% 감소)
회전 반경	25.12 <i>m</i>	13.44 <i>m</i> (46.50% 감소)	13.56m (46.02% 감소)	12.88 m (48.73% 감소)





3.7 최적화 해석 결과 비교

■ 좌우 바퀴 구동 토크 (T_{left}, T_{right})



설계 변수	토크 분배 비율	K_p	K_i
초기 모델	0.5000 : 0.5000	0	0
최적화 1	0.2037 : 0.7963	0	0
최적화 2	0.5000 : 0.5000	661.25	52.9
최적화 3	0.1999 : 0.8001	592.70	49.27

- T_{right} = 400 N·m 에 거의 수렴하여 안정적인 제어가 가능함
- 최적화 1과 정상 상태에서 구동 토크가 유사하게 보이지만 차량 동특성은 더 개선된 결과를 가짐



4. 결 론

- 결 론
- 참고문헌



4. 결 론

- In-Wheel EV의 구동 토크 제어기 설계 수행
- Library Full Vehicle을 이용해 In-Wheel EV에 적합하게 재구성
- MBD 해석을 이용해 In-Wheel EV 선회 성능 해석
- **차량동역학** 내용을 고려해 설계 수행
- DYC **알고리즘 제어기** 구현 및 설계
- 좌, 우 바퀴별 **종방향 미끄러짐의 최소화**를 위한 **구동 토크 비율 최적화**
- 목표 Yaw Rate 추종을 통해 Under/Oversteer를 방지하는 제어기 최적화
- 구동 토크 배분 후 DYC 알고리즘을 적용하여 더 개선된 선회 성능을 확인함
- 초기 모델 대비 (좌, 우 동일 토크 배분)

LongSlip **97.02%** 감소 (*RMS*2: 301610.18 → 8980)

Yaw Rate Error **99.77**% 감소 (*RMS*2: 446.63 → 1.03)

회전 반경 **48.73%** 감소 (25.12*m* → 12.88*m*)





참고문헌

① Tilt Type Steering Column의 Tilt Angle에 따른 Steering Ratio Variation에 관한 연구 정우준, 김국태, 오정용, 박수용 (2010) 한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회, 2010.11

① Steering Ratio 결과가 합리적인지 참고

2 Tyre and Vehicle Dynamics. Hans Pacejka (2012). Butterworth-Heinemann. P. 469

② 종방향 미끄러짐에 관한 정리 참고

③ 차량동역학 Vehicle dynamics : an introduction. 박보용, 허승진 공저

■■● ③ **횡방향 차량동역학** 정리 참고

4 The Control Strategy of Electronic Differential for EV with Four In-wheel Motors 2010 Chinese Control and Decision Conference ● **④ DYC 알고리즘** 적용 참고

⑤ 인휠 시스템 너클 최적화 설계. 전진무, 민경휘, 김여정, 김동현 (2018). 한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회, 1155-1158

⑤ **구동 토크 부여** 시 **너클이 반력**을 받는 것이 합리적인지 참고



감사합니다