

Contents

- 환경차 개요
- 환경차 파워트레인(Powertrain)

환경차(Eco-Vehicle) 배경

• 환경차 종류

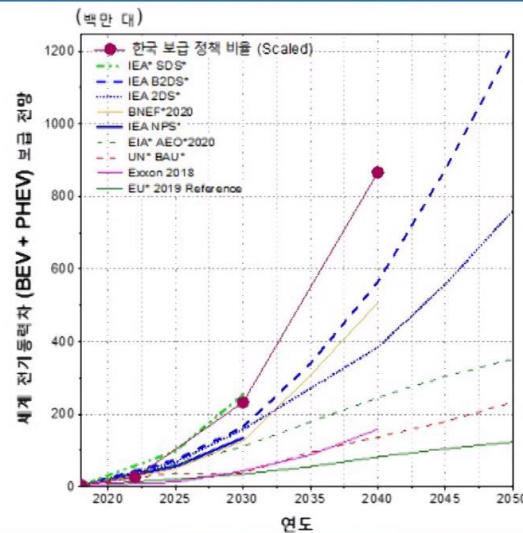
- Hybrid Electric Vehicle(HEV), Plug-in HEV(PHEV), Electric Vehicle(EV), Fuel Cell Electric Vehicle(FCEV)

• 배출가스/연비 규제

- 기후문제 심각성 인식 증대, 전 세계적으로 배출가스 및 연비 규제 강화 추세
- 고성능/고효율의 차량 개발 요구 : 기존 내연기관 차량으로는 한계, 환경차 개발 필요



국제 기관별 세계 승용차 중 배터리전기차(BEV) 및 플러그인 하이브리드 (PHEV) 보급 전망



국제 기관 별로 세계 승용차 중 전기동력차 보급 전망이 상이함.

- 국내 정책은 공격적인 시나리오의 방향을 따라가고 있음.

2030년 자동차 등록 전망
강시나리오; SDS (EV30@30)
xEV stock: 30%, xEV Sales 40%

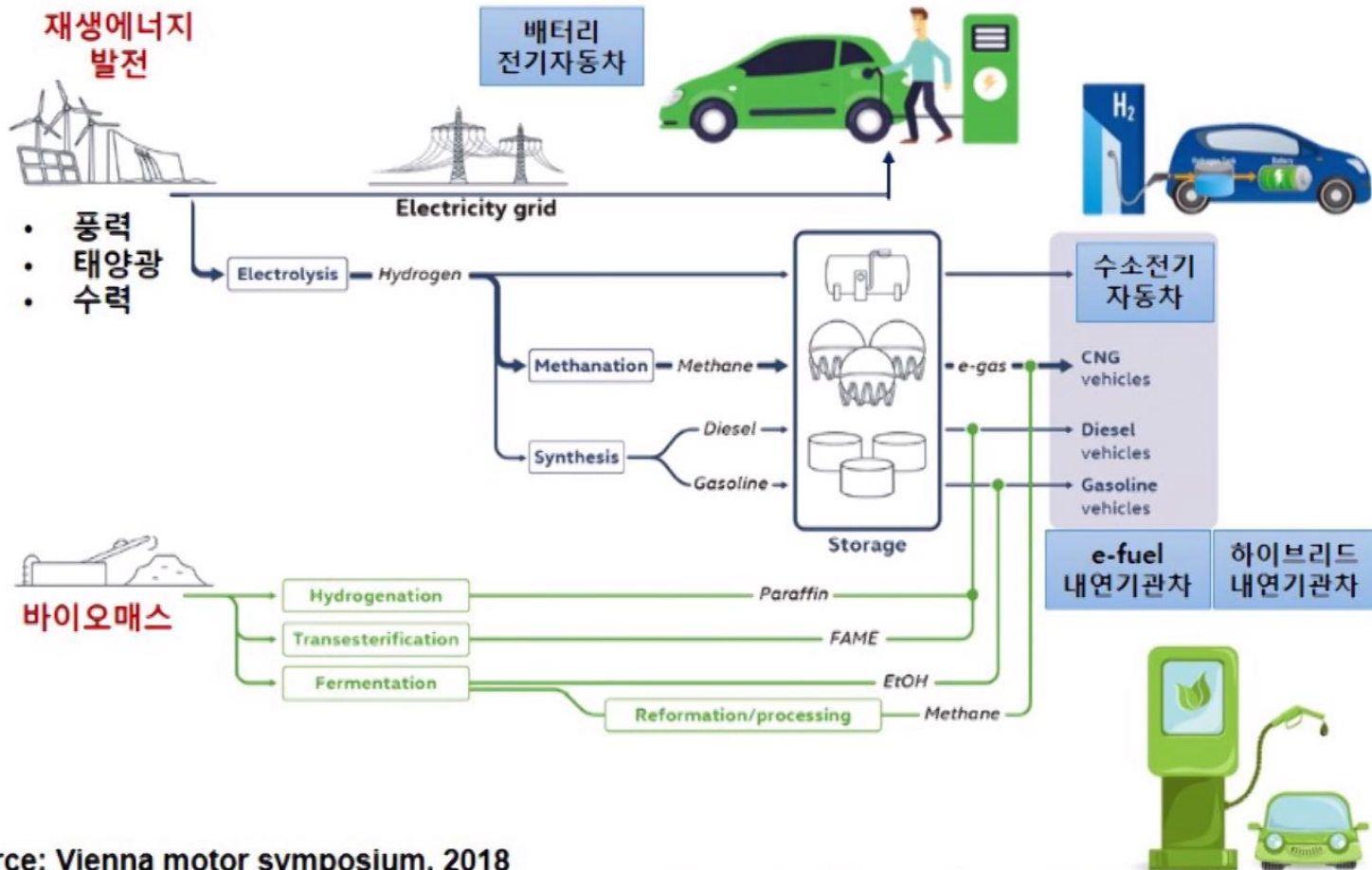
약시나리오; EIA (AEO2020)
xEV stock: 6%, xEV Sales 6%

- IEA NPS(글로벌 신 정책 시나리오)에 따르면, 2030년 BEV 및 PHEV는 누적 13,000만 대, 시장 점유율 15%. 배터리 전기차(BEV)의 경우 시장의 10% 판매율 전망

※ 자동차 기술 및 정책 개발 로드맵(2020. 5. 19, 한국자동차공학회) [Link](#)

환경차 과제 (1)

• 이상적인 환경차 동력 공급 시나리오

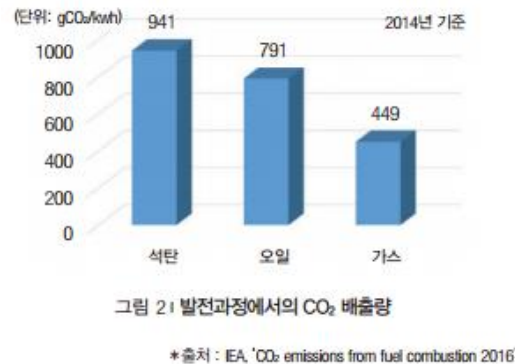


Source: Vienna motor symposium, 2018

※ 자동차 기술 및 정책 개발 로드맵(2020. 5. 19, 한국자동차공학회) [Link](#)

환경차 과제 (2)

- HEV/EV 이산화탄소(CO₂) 배출량 비교



아이오닉 EV (전비 7.1 km/kWh)

석탄발전 이용: 1 kWh 전기에너지 생산 시 CO₂ 941 g 생산

$$\frac{941 \text{ g/kWh}}{7.1 \text{ km/kWh}} = 132 \text{ g/km} \rightarrow 1 \text{ km 주행 시 CO}_2 \text{ 132 g 배출}$$

아이오닉 HEV (연비 22.4 km/L)

휘발유 1L 사용 시 CO₂ 2349 g 생산

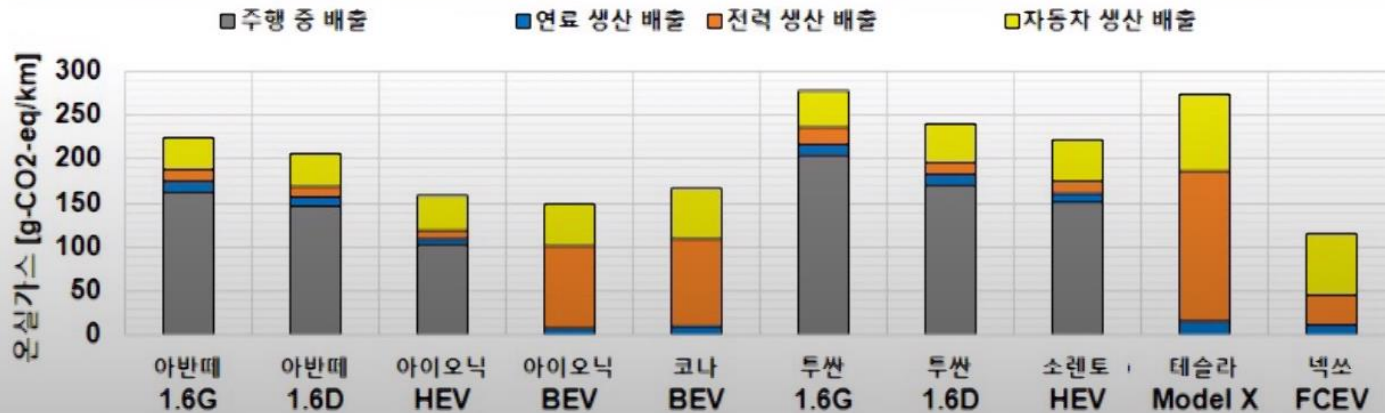
$$\frac{2349 \text{ g/L}}{22.4 \text{ km/L}} = 105 \text{ g/km} \rightarrow 1 \text{ km 주행 시 CO}_2 \text{ 105 g 배출}$$



김지영 인턴 / 20190324 YONHAPNEWS
트위터 @yonhap_graphics 페이스북 tune.kr/LeYN1

환경차 과제 (3)

한국자동차공학회(KSAE, 2020)의 전생애주기분석을 통한 국내 운행 차량의 온실가스 배출량 평가



차종 별 한국 온실가스 감축량 기여

-교통부문 온실가스 관리 시스템(KOTEMS)

온실가스 감축 기여도

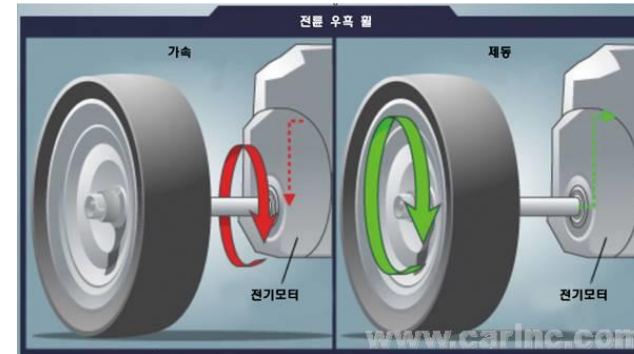
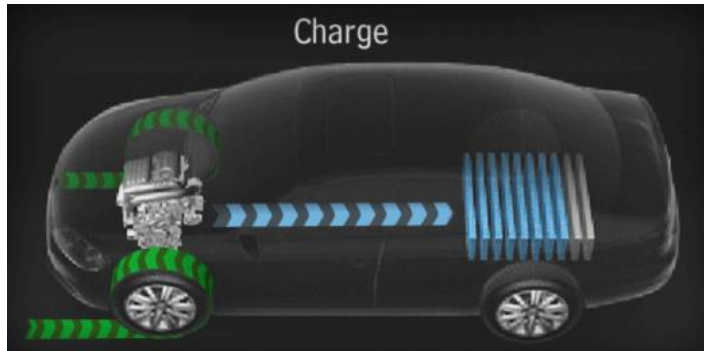
수송 CO ₂ 감축 전략	차량 수 (만 대)	가정	온실가스 감축 잠재량 (tonCO ₂ /년)
내연기관차 효율향상	1,500	목표 연비 24.3km/L	16,864,442
하이브리드차 보급	400	-	2,361,976
배터리전기차 보급	300	-	3,894,744
수소전기차 보급	85	58% 온실가스 감축	2,110,215
합계			25,231,377



환경차 기술

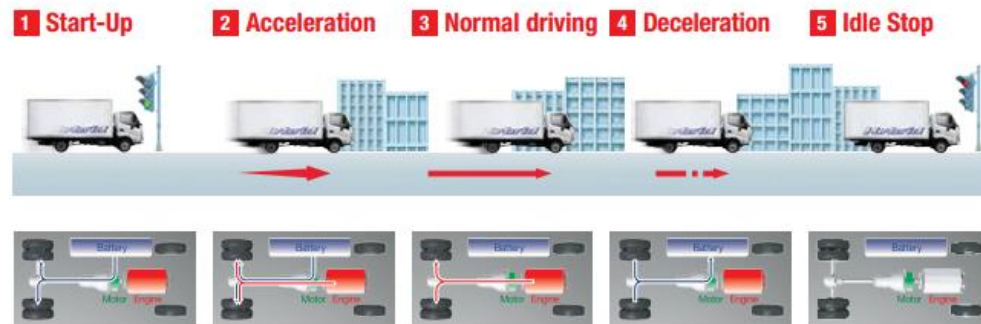
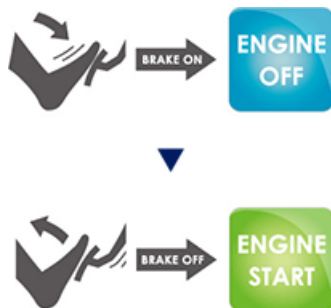
- 회생제동 (Regenerative Braking)

- 제동 시 발생하는 기계에너지를 통해 발전기를 구동, 배터리를 충전

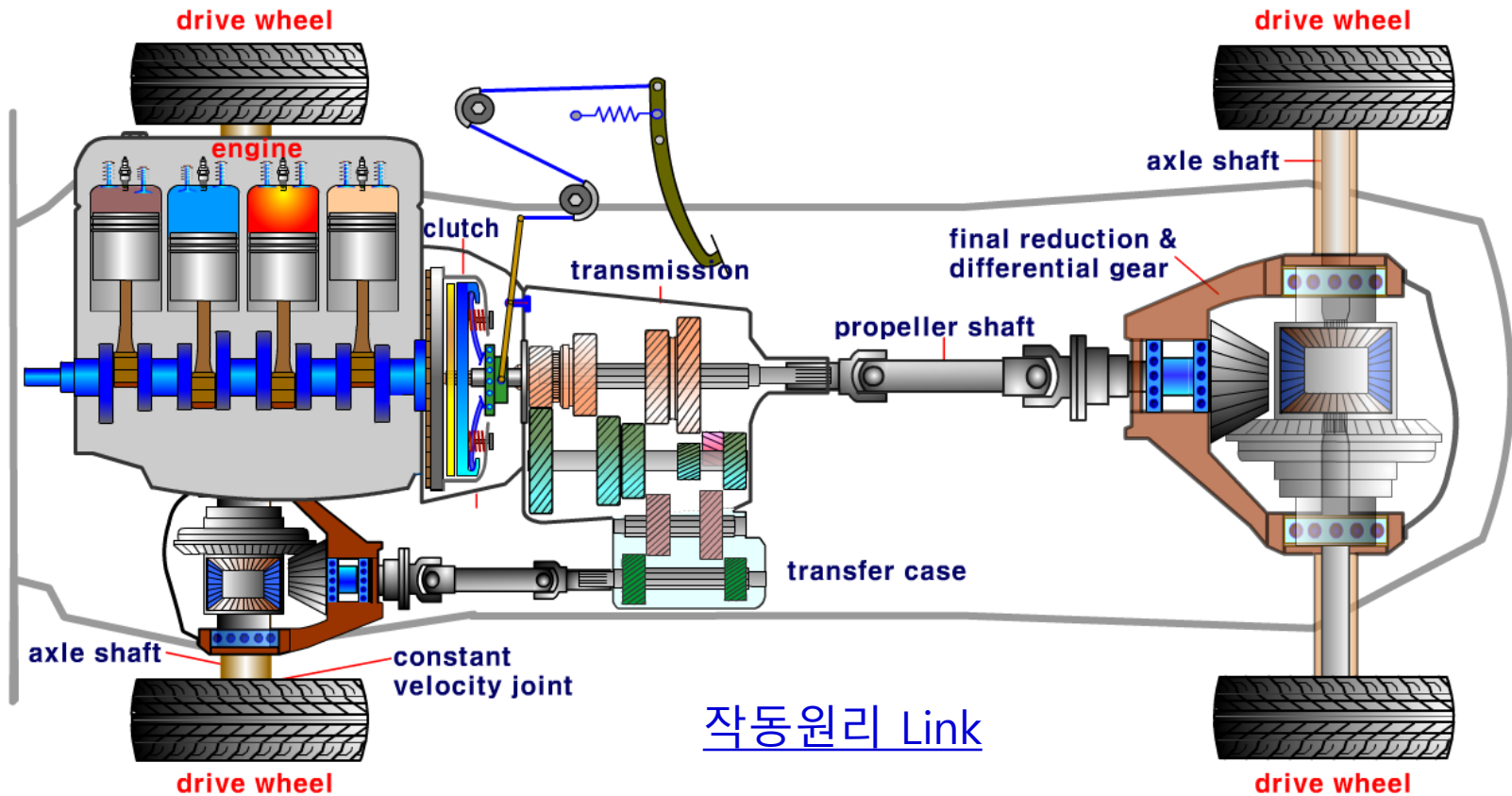


- ISG (Idle Stop & Go)

- 차량의 주행 상태에 따라 엔진을 자동으로 On/Off 하여 공회전을 최소화, 차량 효율 향상(교통 정체 시)
- 내연기관 차량(ICEV)의 경우 갑작스런 엔진 On/Off에 의해 운전자에게 불쾌감 발생 및 발진 지연 발생
- HEV의 경우 모터로 초기 구동 후 엔진을 구동, 부드럽고 즉각적인 발진감 구현 가능



동력전달시스템(Powertrain) 기초

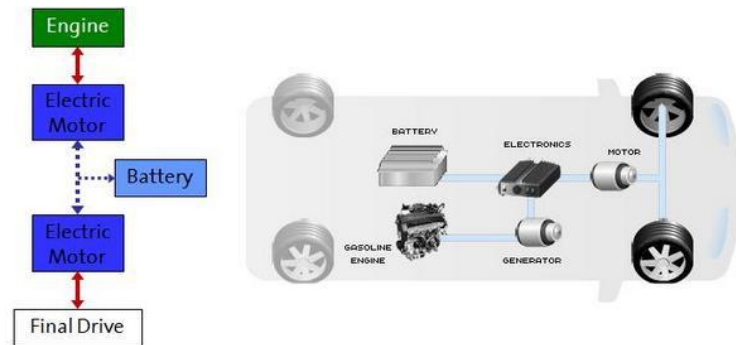


※ 강주원 자동차 홈

HEV 파워트레인 (1)

• Hybrid Electric Vehicle (HEV)

- 엔진과 모터의 두 가지 동력원을 주행 조건에 따라 적절히 사용
- 일반적으로 직렬형, 병렬형, 복합형의 3가지 종류로 나눔



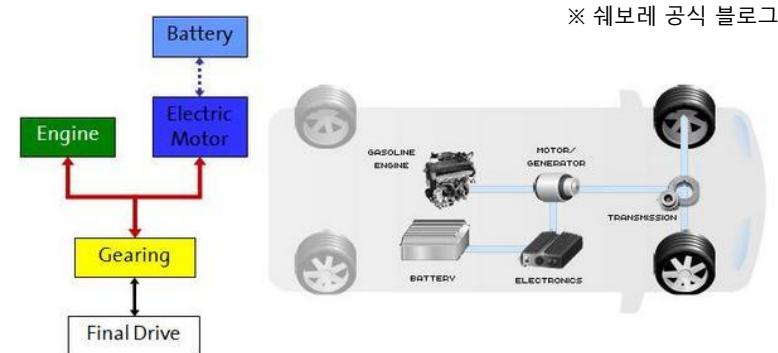
Series Hybrid

주행 상황 / 엔진 및 모터 제어



시동	저속 주행	가속 주행	가속 / 등판	정속 주행	감속 / 충전	정지
엔진시동 없이 차량 구동에 필요한 히어 브레이크 시스템을 준비합니다.	저속 주행 시 엔진 구동없이 모터만으로 구동하여 연료 소모가 없으며 정속합니다.	운전자의 가속 요구를 파악하여 엔진을 자동으로 시동하고 엔진과 모터 사용을 적절히 분배하여 우수한 연비를 제공합니다.	엔진과 모터를 동시에 구동하여 가속 및 등판 시 강력한 파워를 제공합니다.	엔진 또는 모터로 구동되며 배터리 전량이 적정 수준 이하일 경우 충전합니다.	엔진을 정지하고 회생 제동 시스템을 통해 제동 시 발생하는 에너지를 회수하여 배터리를 충전합니다.	정차 혹은 신호대기 시 엔진 및 모터를 정지시켜 배출가스 및 연료소모가 없습니다.

※ 현대자동차 홈페이지



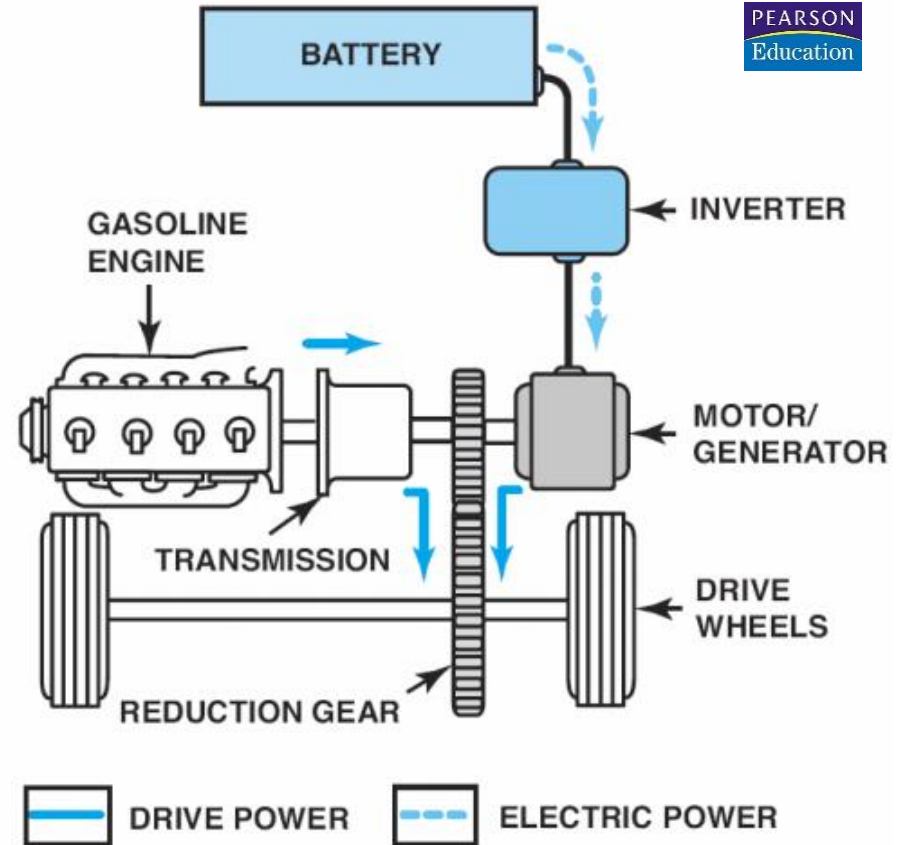
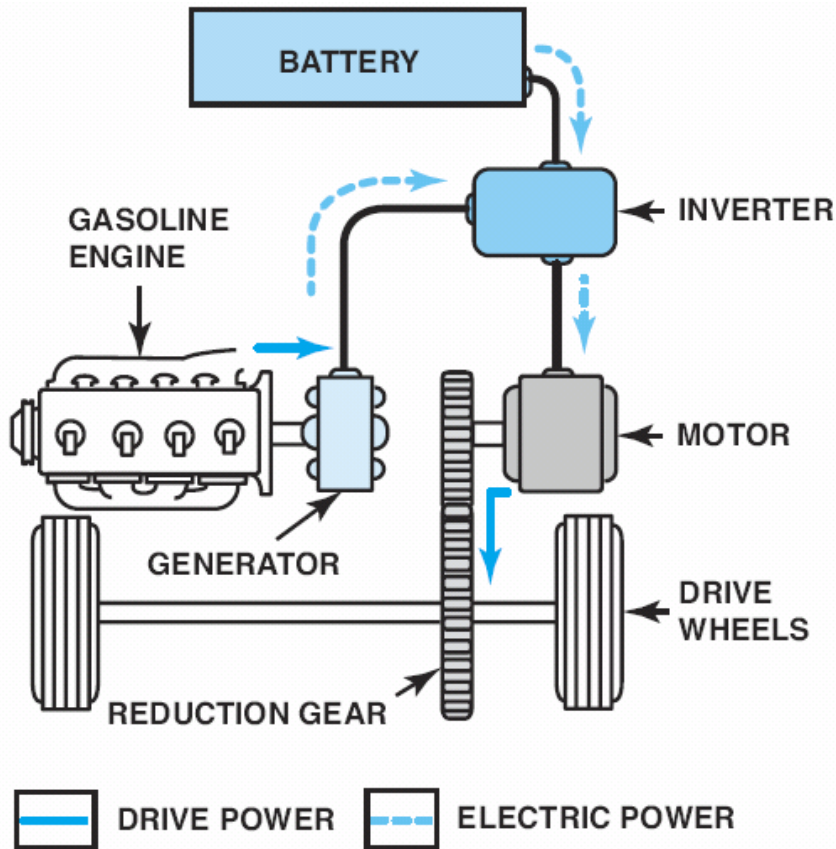
Parallel Hybrid

※ 웨보레 공식 블로그

구분	장점	단점
직렬형 (Series)	구조 간단 제어 용이 엔진 최적 구동	동력 성능 ↓ 설치 공간 증가
병렬형 (Parallel)	다운사이징 가능 동력 성능 ↑	구조/제어 복잡 운전성 ↓

HEV 파워트레인 (2)

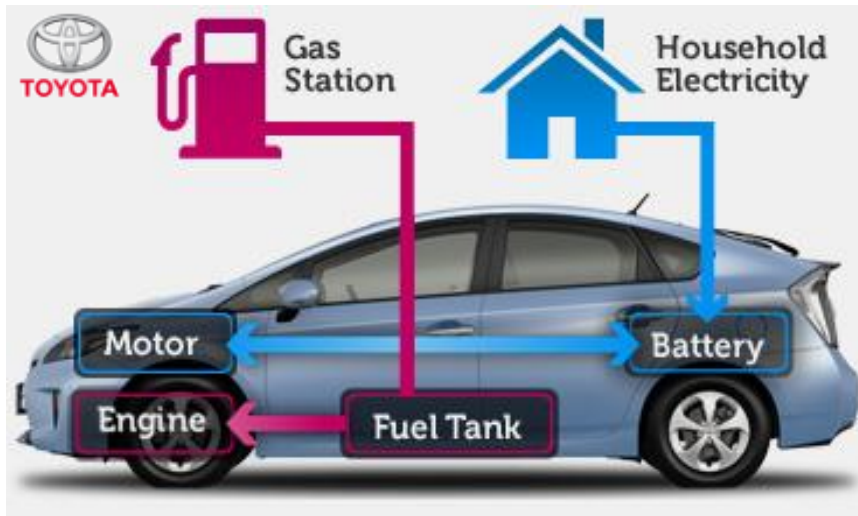
- 직렬형/병렬형 파워트레인 구성



HEV 파워트레인 (3)

- Plug-in Hybrid Electric Vehicle(PHEV)

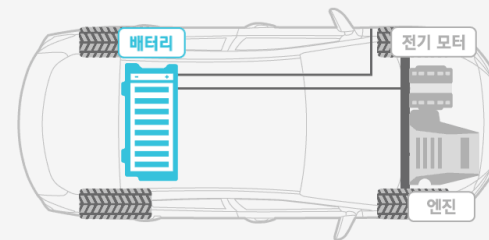
- 파워트레인 구성은 HEV와 동일, 외부 전원으로부터 배터리 충전 기능 추가
- HEV 대비 전기모터 사용 영역 확대, 고용량 배터리 탑재



2. 플러그인 하이브리드 자동차 (PHEV)

Point, 배터리 외부 충전 가능

배터리 용량을 늘려 전기차 모드의 주행거리를 연장합니다.
가전제품처럼 플러그를 꽂아 배터리를 충전하고,
배터리가 일정량 이하로 소모되면 전기차 모드에서 하이브리드 모드로 전환합니다.



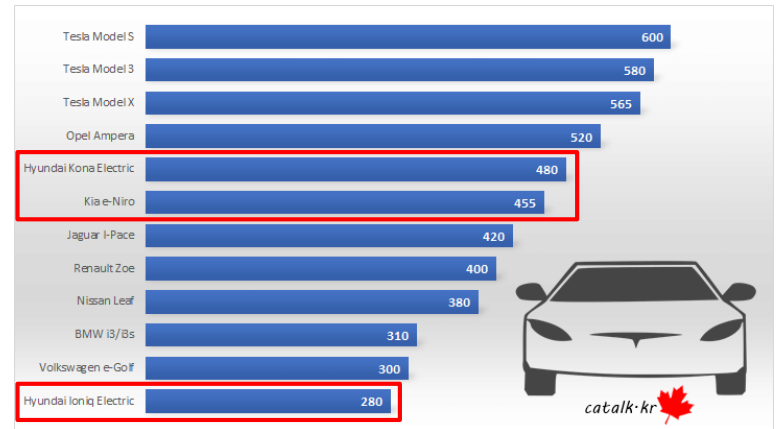
 플러그인 충전

※ 자료 : HMG 저널

EV 파워트레인 (1)

• Electric Vehicle(EV)

- 순수 전기모터를 이용하여 동력 발생, HEV 대비 구조/제어 간단
- 최근 배터리 기술 등의 발전으로 과거 대비 주행거리가 크게 향상, 충전시간 및 인프라 문제



※ 아이오닉(IONIQ)/코나(KONA) 사양 비교

구분	IONIQ			KONA
	HEV	PHEV	EV	
배터리 용량 (kWh)	1.7	8.9	38.3	64
모터 출력(kW)	32	44.5	100	150
모터 주행거리 (km)	-	46	271	406

전기동력차 종류와 특징

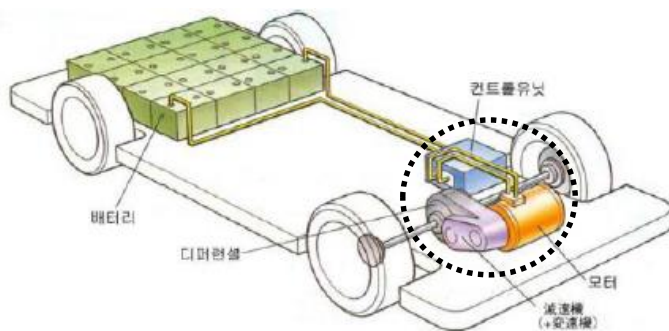
	하이브리드 전기차(HEV)	플러그인 하이브리드 전기차(PHEV)	전기차(EV)
동력 발생 장치	엔진 > 모터 (보조동력)	모터 > 엔진 (방전시)	모터
배터리 용량	0.98~1.8 kWh	4~16 kWh	10~30 kWh (테슬라는 60 이상)
특징	주행조건별 엔진과 모터를 조합한 최적 운행으로 연비 향상	단거리는 전기로 주행, 장거리 주행 시 엔진 사용	충전된 전기 에너지만으로 주행
주요 차량 (제조사)	프리우스(도요타), 시빅(혼다) 쏘나타·아이오닉(현대차) K5·니로(기아차)	볼트(지엠), 프리우스(도요타) i8(베엠베), 쏘나타(현대차) F3DM(바이아디)	리프(닛산), 모델S(테슬라) ZOE(르노), i3(베엠베) 쏘울EV(기아차)

※ 친환경차 각축전, 패권은 누구 손에? [한겨레, 2016. 5. 1]

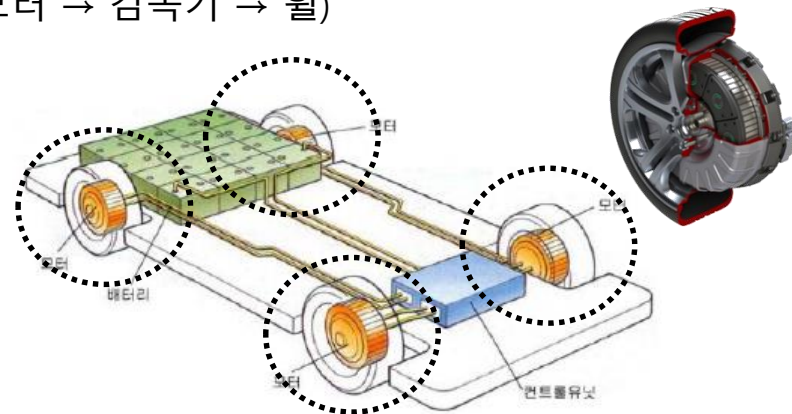
EV 파워트레인 (2)

• EV 구동방식

- 직렬형 HEV에서 엔진/발전기를 제외한 구조와 유사 (모터 → 감속기 → 휠)
- 별도의 배터리 충전장치 필요



< 엔진 치환형 >



< 인휠 모터형 >

전기차 모터 구동방식	장점	단점
엔진 치환형	▪ 차량 개발 용이 (기존 내연기관 시스템 활용)	▪ 에너지 효율 측면 불리 ▪ 부가적인 모터 제어기능 요구
인휠(In-Wheel) 모터형	▪ 동력전달요소(구동축 등) 불필요 ▪ 동력 손실 적음 (주행 효율 향상) ▪ 구동시스템 단순화 (공간 확보 용이) ▪ 기동성능 우수 (각 휠 독립제어) ▪ 샤시 및 차량 제어기능 단순화	▪ 고도의 인휠 모터 제어 기술 요구

FCEV 파워트레인 (1)

• Fuel Cell Electric Vehicle(FCEV)

- 파워트레인 구성은 일반 EV와 동일, 수소연료전지를 통한 전원 공급
- EV와 달리 충전시간이 짧고 주행거리가 내연기관 수준, 가격/인프라/안정성 문제로 현재 대중화 미흡

수소전기차의 성능

최대 항속 거리 | 미국 인증 · 복합연비

현대 넥쏘



최대 항속 거리	611km
최고 속도	177 km/h
가속 성능 (0→100km/h)	9.2 초
모터 최대토크 (N·m)	395

토요타 미라이



최대 항속 거리	502km
최고 속도	175km/h
가속 성능 (0→100km/h)	10.4초
모터 최대토크 (N·m)	335

혼다 클래리티



최대 항속 거리	579km
최고 속도	164km/h
가속 성능 (0→100km/h)	11.8초
모터 최대토크 (N·m)	300

※ 가속성능은 현대차(연구소) 자체 평가 결과

※ 최대 항속거리는 도로상황, 운전방식, 차량크기, 정비상태, 외기온도 등에 따라 달라질 수 있음



※ 현대차 홈페이지 참조

ZERO Emission



Modern(모던)
세제혜택 적용 전 판매가격
72,034,950
세제혜택 후 판매가격
68,900,000

3250만원 지원
수소차 살때 보조금 받으세요

수소차 구매 시 현대자동차 넥쏘
2019.9.2(월) 09시~ 예산 소진 시
정부 2,250만원(6.5%인센티브) 지원
수소차 판매량 1,000대 달성
수소차 구매 시 정부 3250만원 지원
문의: 1588-0331~324-3155

NAVER

수소충전소찾기

통합검색 웹사이트 지도 블로그 동영상

정렬 기간 영역 옵션유지 캐짐 캐짐

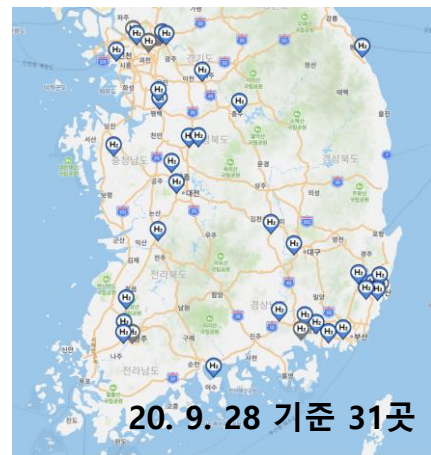
연관검색어 전국 수소충전소 수소차 충전소

웹사이트

저공해차 통합누리집

<https://www.ev.or.kr/>

충전기 지원안내 · 회원카드 신청 · 구매안내 · 충전:
전기차 충전소, 충전 위치제공, 충전기 사용법, 전기차
금, 저공해차 정보

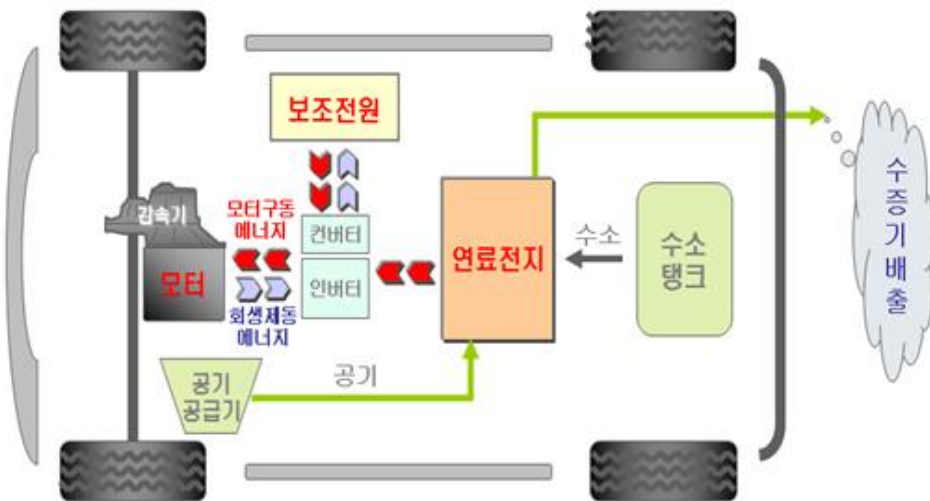


20. 9. 28 기준 31곳

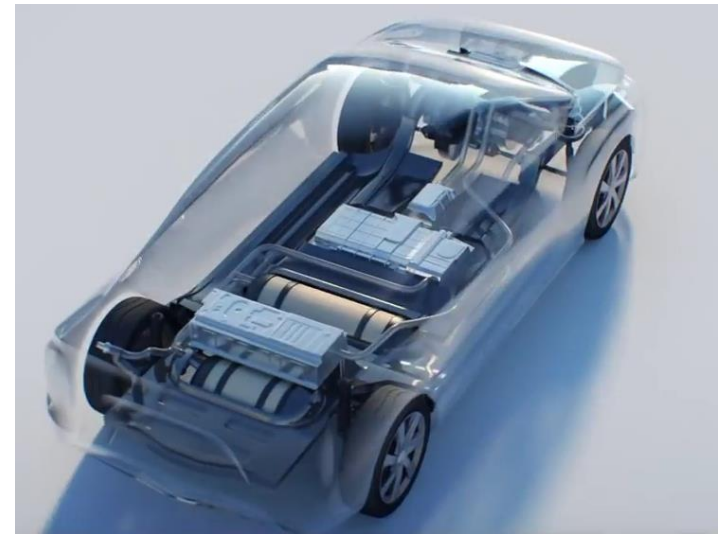
FCEV 파워트레인 (2)

• FCEV 구동원리

- 수소탱크 : 연료전지에 수소 공급
- 연료전지 : 외부로부터 공기, 수소탱크로부터 수소를 공급받아 화학 반응을 통해 물과 전기로 변환
- 배터리 : 회생제동 등으로 인한 여유 전기에너지를 저장, 주행상황에 따라 사용



※ 자료제공=국토부



YouTube TOYOTA Fuel cell – How does it work?

환경차 파워트레인 요약

친환경차 분류

	하이브리드 (HEV)	플러그인 하이브리드 (Plug-in HEV)	전기차 (EV)	수소연료 전지차 (FCEV)
구조 · 특징	엔진+모터(보조동력)  배터리 0.9~1.8kwh	엔진+모터(모터로 주행가능)  배터리 4~16kwh	모터만으로 주행  배터리 10~30kwh	수소/산소로 전기발생  배터리 0.9~8kwh
개발 과제	· 일반차 대비 가격상승분 최소화	· 전기 충전 인프라 구축 및 급속 충전 기술개발 · 배터리 성능 향상(에너지밀도 증대, 가격저감)		· 수소충전 인프라 구축 · 고가의 부품가격 인하

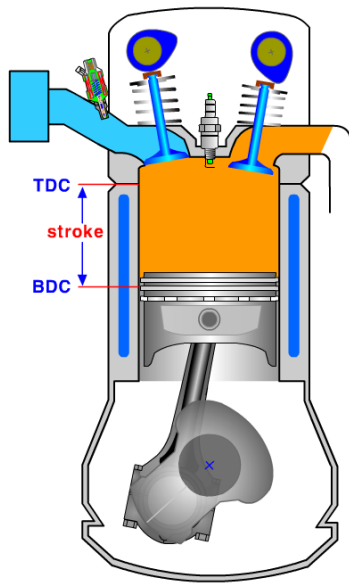
※ 글로벌 자동차 지각변동 [매일경제, 2015. 11. 19]

Contents

- Power Source : Engine/Motor
- Power Transfer : Clutch/Transmission
- Power Storage : Battery
- Driving Resistance
- Driver Controller

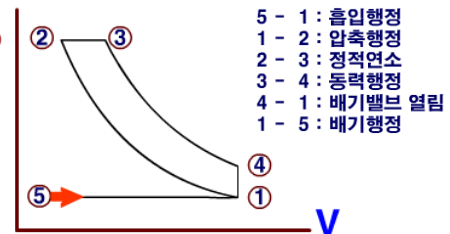
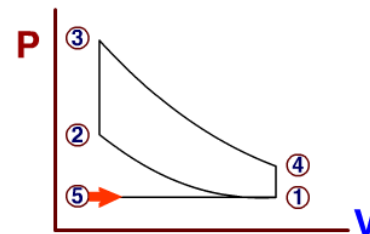
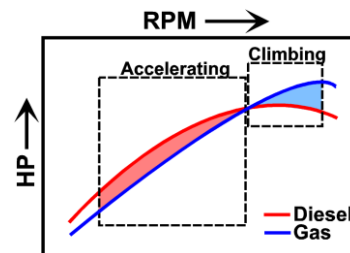
Engine

- Generation of the power to drive a vehicle
- Operating principle
 - Force generation by fuel injection and ignition in the cylinder
 - Torque generation on a crank shaft from the force through the mechanical linkage



[작동원리 Link](#)

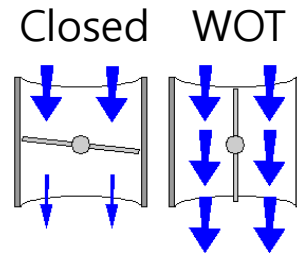
Specification	Gasoline Engine (Otto)	Diesel Engine
Ignition Type	Spark Ignition	Compression Ignition
Compression Ratio	Between 8:1 and 12:1	Between 16:1 and 22:1
Efficiency	25-30%	36-45%
Maximum Engine Speed	7000-8250 RPM	up to 5250 RPM
Exhaust Temperature (under full load)	700-1200 Degrees Celsius	300-900 Degree Celsius



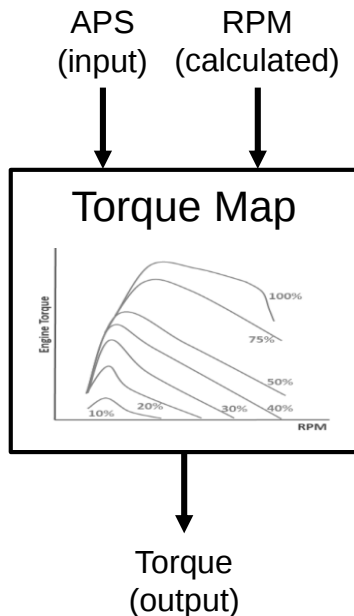
5 - 1 : 흡입행정
1 - 2 : 압축행정
2 - 3 : 정적연소
3 - 4 : 동력행정
4 - 1 : 배기밸브 열림
1 - 5 : 배기행정

Torque Map Model

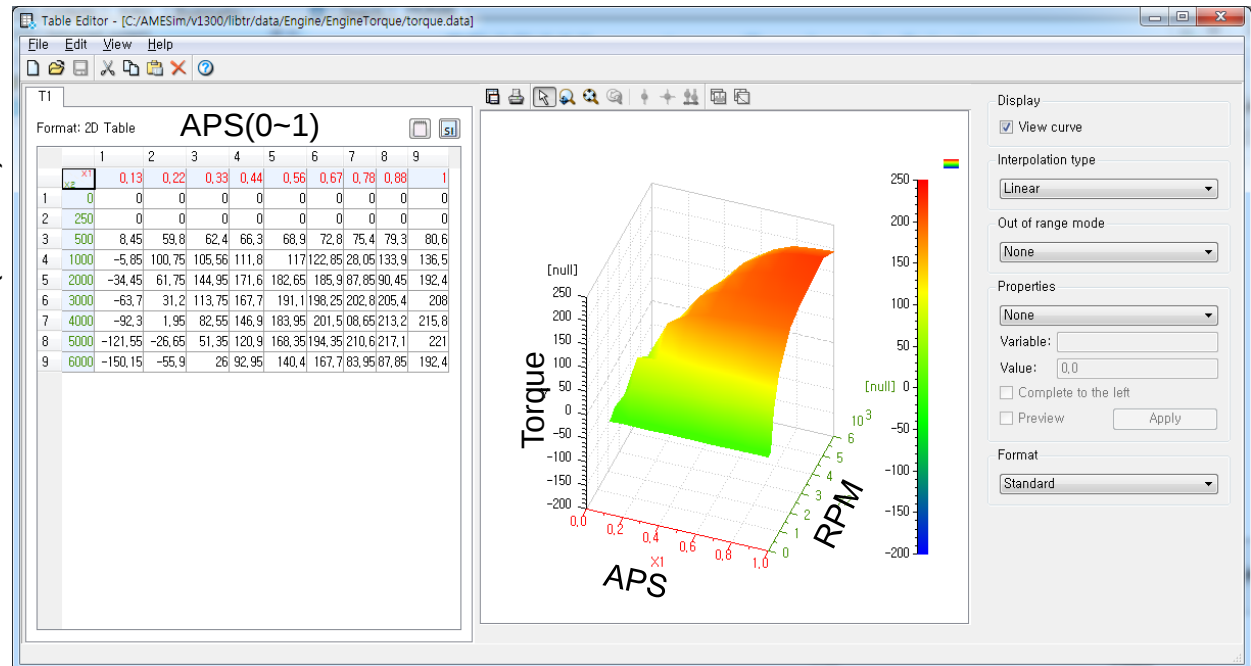
- Input : APS (accelerator pedal sensor)
- Output : engine torque
- Calculation of the engine torque from the experimental torque map



$$T_e = f(APS, RPM)$$

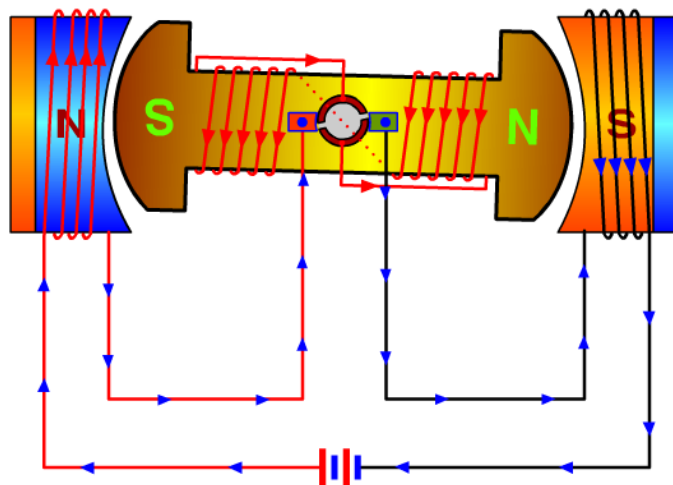


RPM (0~6000)

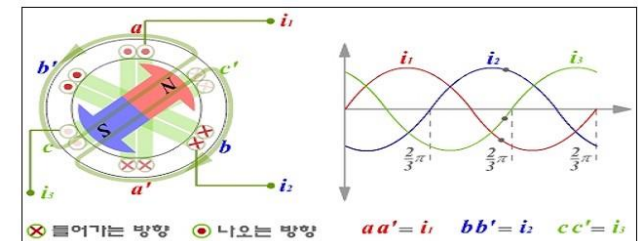
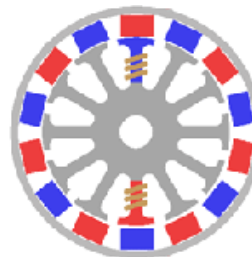
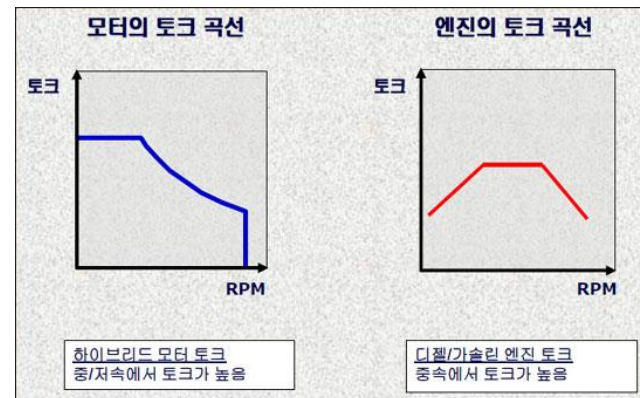


Motor

- Generation of the power to drive a vehicle
- Operating principle
 - Generation of a rotating magnetic field from an electric current
 - Mechanical torque generation on a rotating shaft from the magnetic force

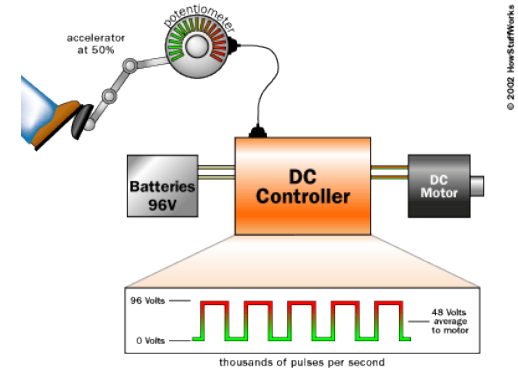


작동원리 Link

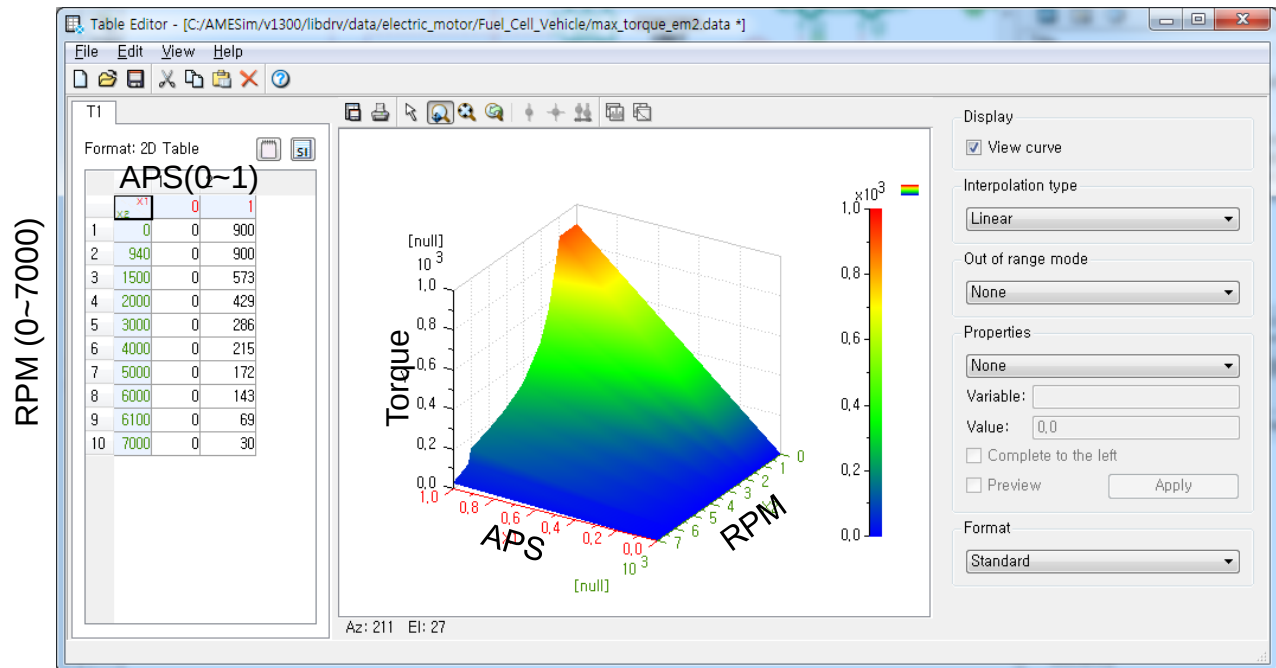
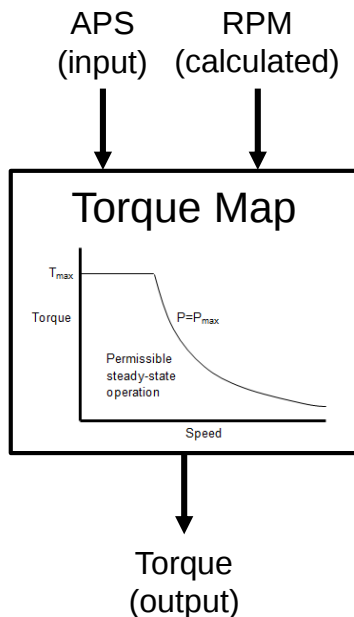


Torque Map Model

- Input : APS (accelerator pedal sensor)
- Output : motor torque
- Calculation of the motor torque from the experimental torque map

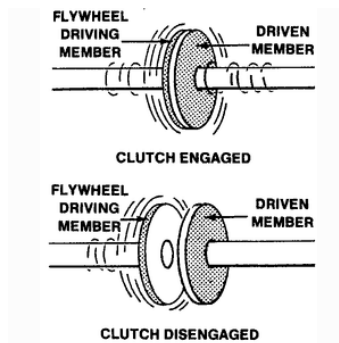
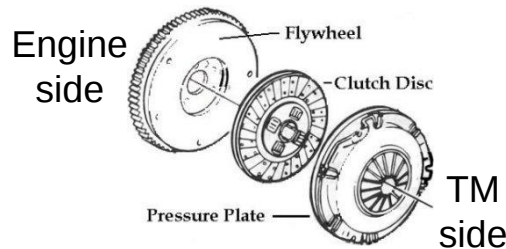


$$T_m = f(APS, RPM)$$

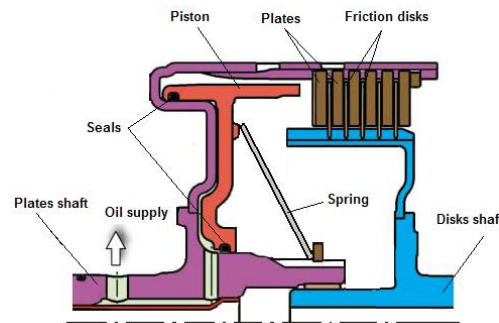


Clutch

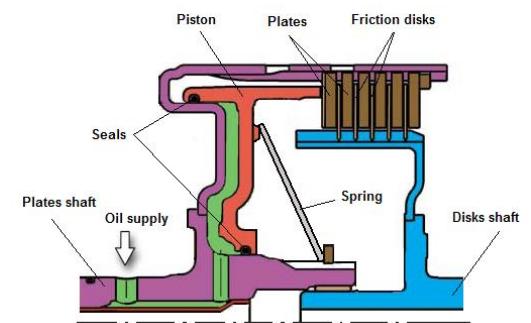
- Torque transfer or cut-off between input and output shaft
- Operating principle
 - Generation of the friction torque on a clutch disk by the clutch engaging or disengaging
 - Synchronization of both shaft speeds



< Single Disk >



Disengaged

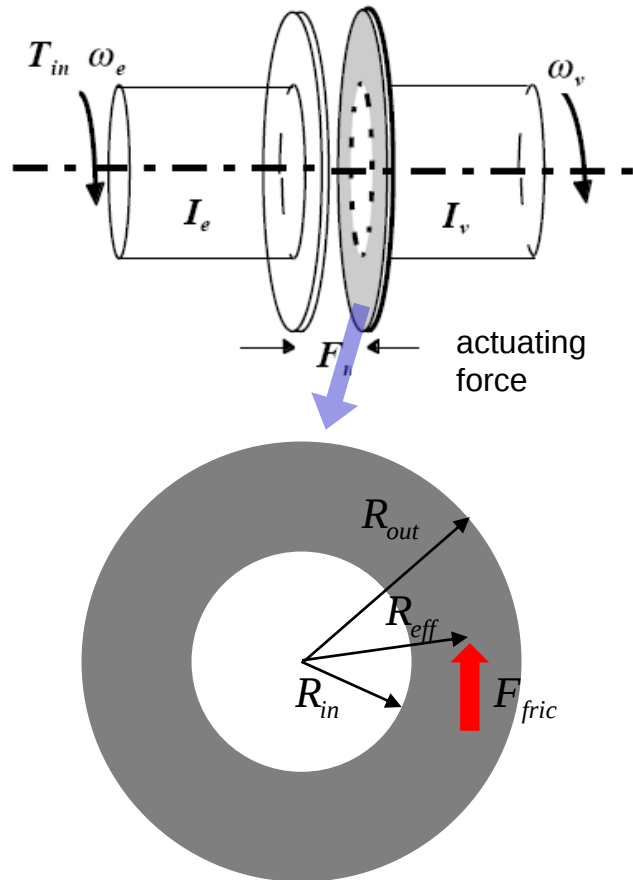


Engaged

< Multi Disk >

Friction Torque Model

- Input : clutch actuating force
- Output : output shaft torque



1. Output torque equation

$$T_{out} = \begin{cases} F_{fric} R_{eff} & (\omega_{rel} \neq 0) \\ T_{in} & (\omega_{rel} = 0) \end{cases}$$

F_{fric} : friction force [N]

R_{eff} : effective friction radius [m]

ω_{rel} : relative speed of shafts [rad/s]

2. Friction equation

$$F_{fric} = \mu_{disk} F_n$$

$$F_n = F_{act} \tanh\left(2 \frac{\omega_{rel}}{d\omega}\right)$$

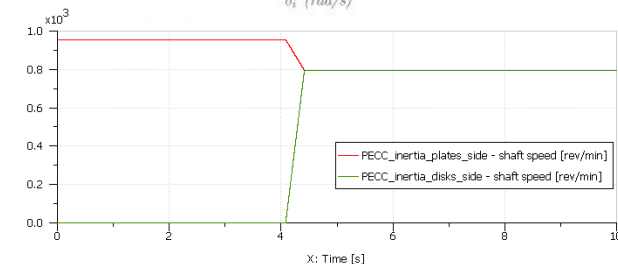
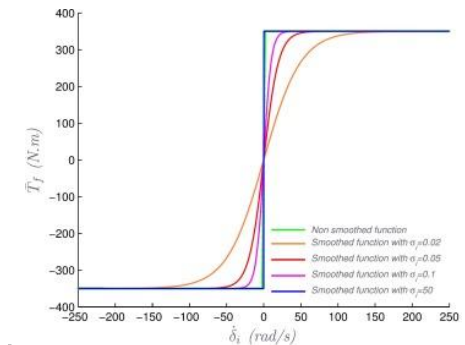
$$\omega_{rel} = \omega_e - \omega_v$$

$$R_{eff} = \frac{2(r_{out}^3 - r_{in}^3)}{3(r_{out}^2 - r_{in}^2)}$$

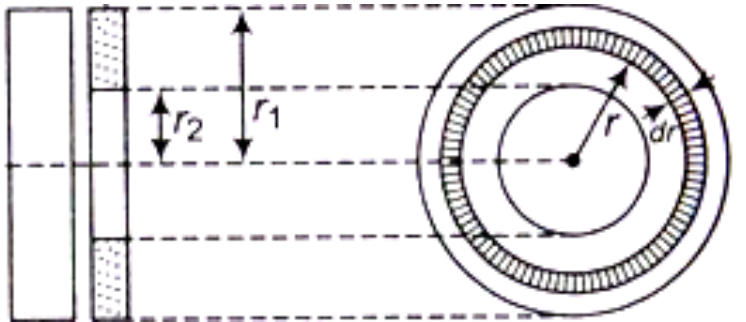
μ_{disk} : friction coefficient

F_n : normal force on disk [N]

F_{act} : clutch actuating force [N]



Effective Friction Radius



$$dA = 2\pi r \times dr$$

P : normal pressure

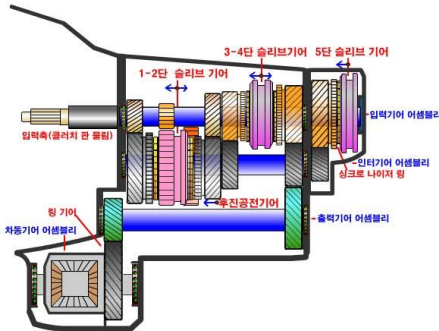
$$F_n = P \int_{r_2}^{r_1} 2\pi r \, dr \quad P = \frac{F_n}{\pi(r_1^2 - r_2^2)}$$

$$T = \mu P \int_{r_2}^{r_1} 2\pi r^2 \, dr = 2\mu\pi \frac{F_n}{\pi(r_1^2 - r_2^2)} \times \frac{r_1^3 - r_2^3}{3}$$

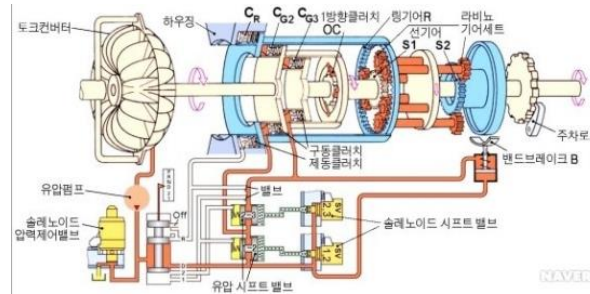
$$T = \mu F_n R_{eff} \quad \therefore R_{eff} = \frac{2(r_1^3 - r_2^3)}{3(r_1^2 - r_2^2)}$$

Transmission

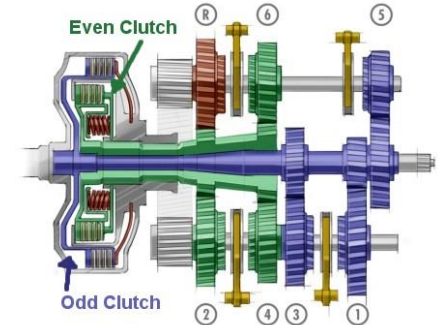
- Conversion of the torque and speed from input shaft to the proper torque and speed on output shaft
- Operating principle
 - Selection of a proper gear by operating a clutch
 - Increasing or decreasing of the torque and speed from input shaft



< Manual Transmission(MT) >

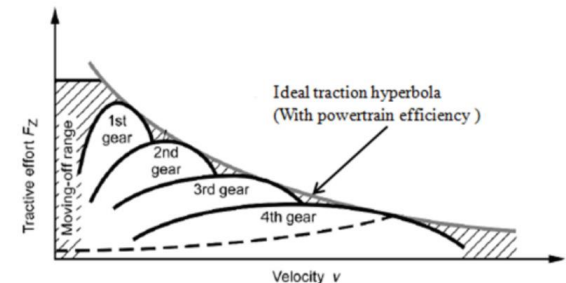
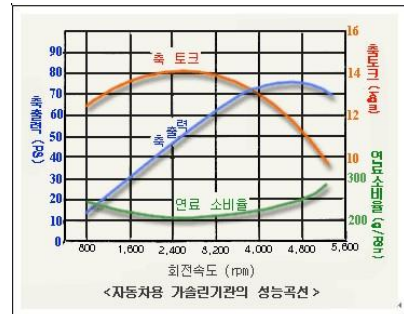


< Automatic Transmission(AT) >



< Dual Clutch Transmission(DCT) >

구분	MT	AT	DCT
Efficiency	↑	↓	↑
Drivability	↓	↑	↑
Cost	↓	-	↑



Transmission

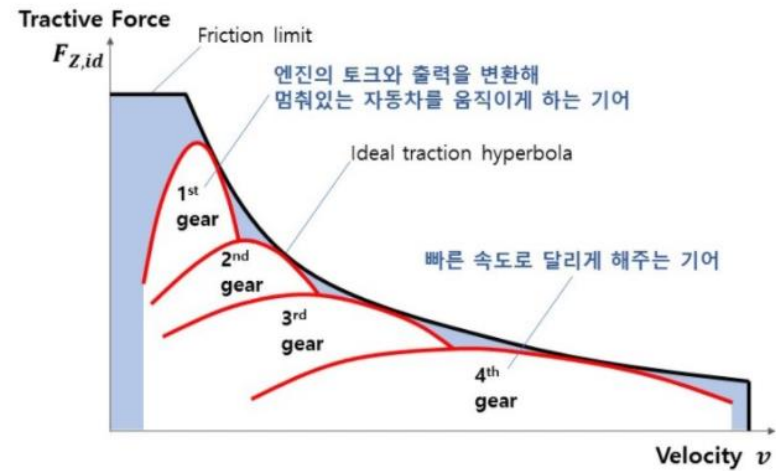
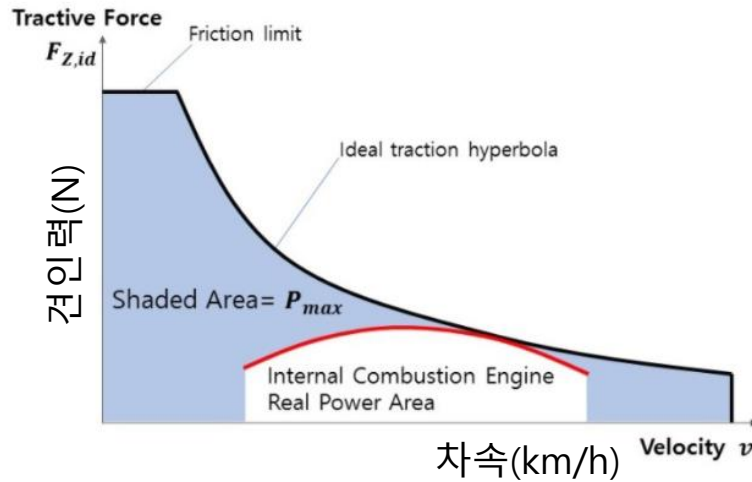
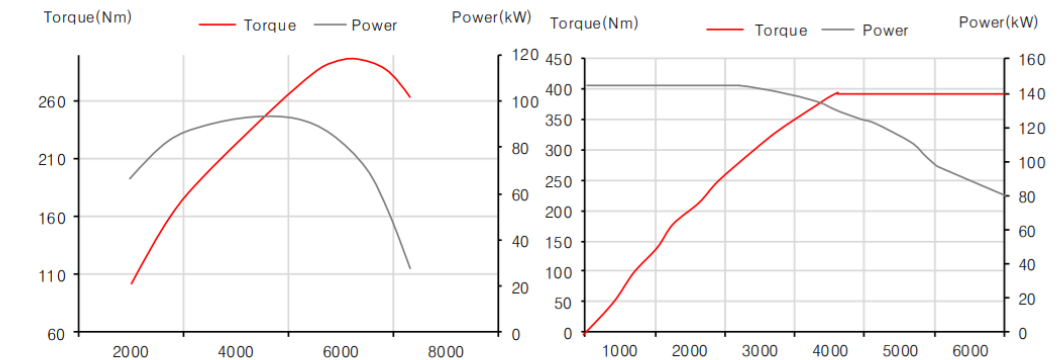


도표 28 내연기관(좌)과 전기모터(우)의 토크와 출력 커브 비교



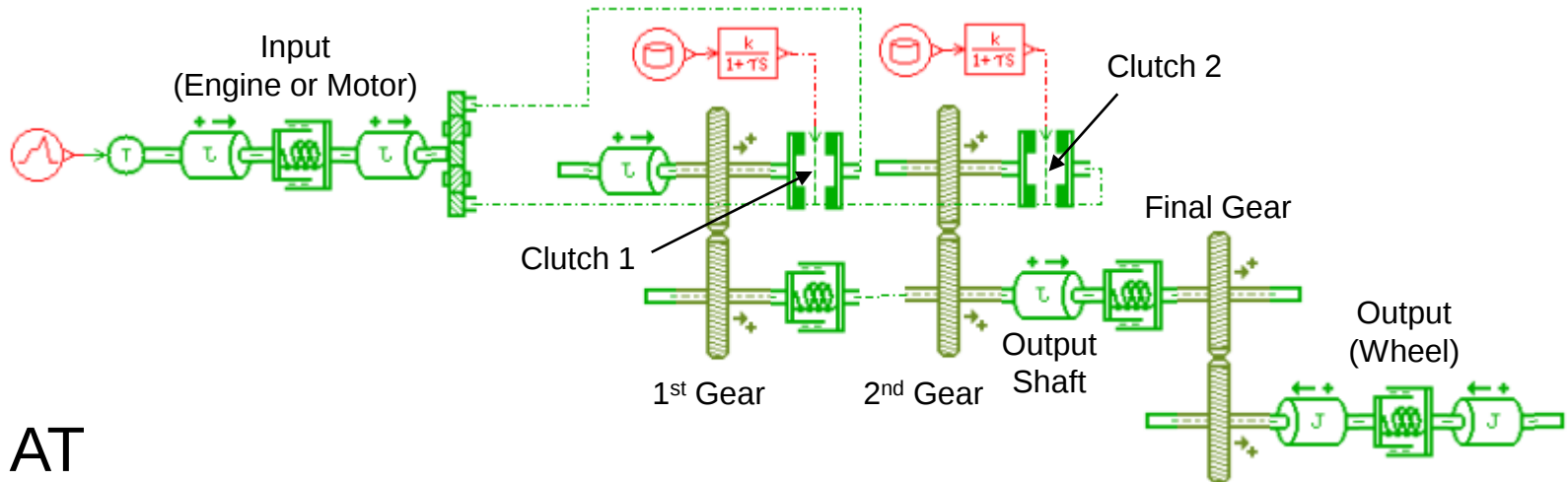
자료: Geotab, 유진투자증권

$$P = T \times \omega$$

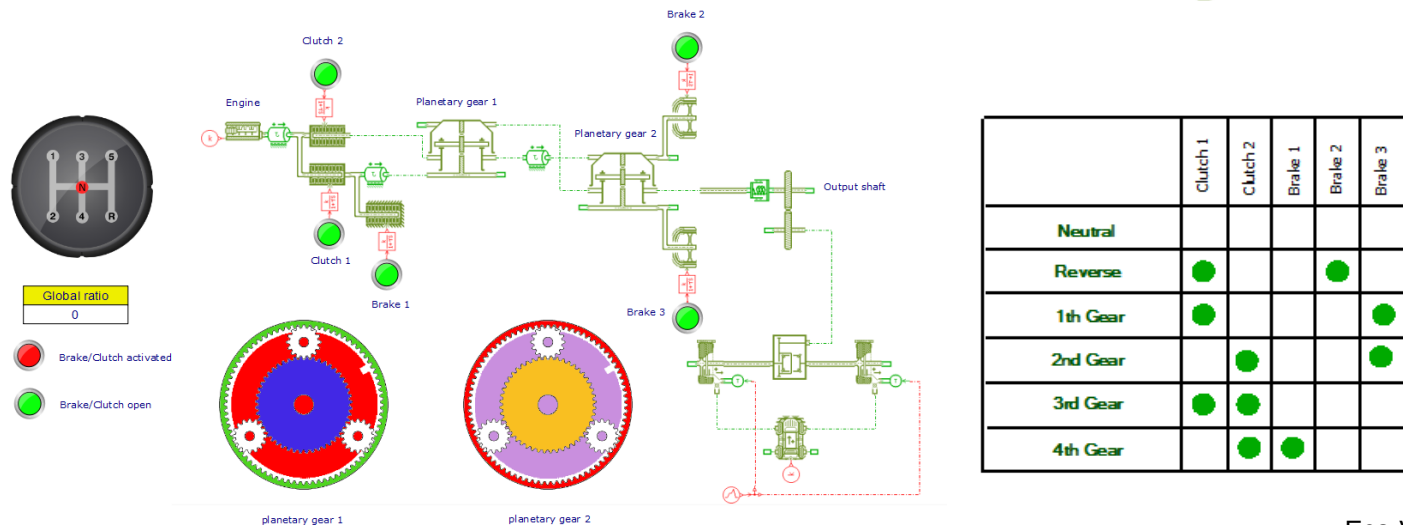
출력 토크 회전수

Geartrain

- MT/DCT



- AT



Parallel Gear Model (MT/DCT)

- Input : input torque/speed
- Output : output torque/speed

1. Gear ratio

$$GR = \frac{\text{\# of driven gear teeth}}{\text{\# of drive gear teeth}}$$

2. Output torque & speed

$$T_{out} = T_{in} \times GR$$

$$\omega_{out} = \frac{\omega_{in}}{GR}$$

※ Example : $T_{in} = 100 \text{ Nm}$, $\omega_{in} = 3000 \text{ RPM}$

1) $GR = 2$ (reduction)

$$T_{out} = 100 \times 2 = 200 \text{ Nm}$$

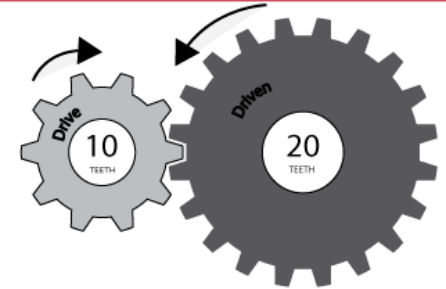
$$\omega_{out} = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ RPM}$$

2) $GR = 0.75$ (overdrive)

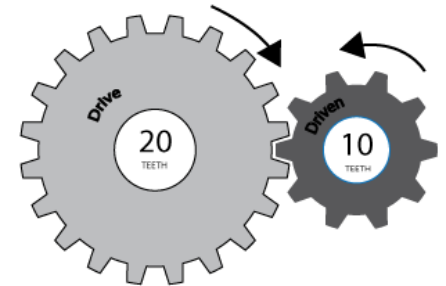
$$T_{out} = 100 \times 0.75 = 75 \text{ Nm}$$

$$\omega_{out} = \frac{3000}{0.75} = 4000 \text{ RPM}$$

Gear reduction occurs when the drive gear is smaller or has fewer teeth than the driven gear.



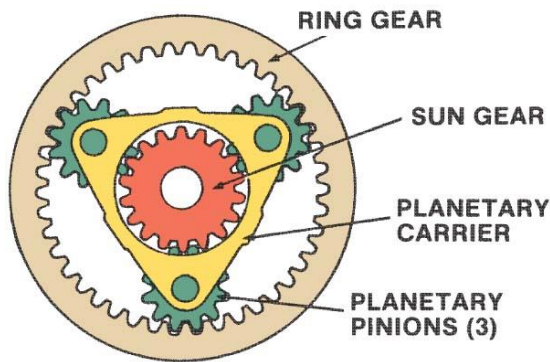
Overdrive occurs when the drive gear is larger or has more teeth than the driven gear.



© FreeASEStudyGuides.com

Coaxial Gear Model (AT)

- Input : input torque/speed
- Output : output torque/speed



Ring	Carrier	Sun	Gear Ratio
driven	drive	fixed	$Z_r / (Z_s + Z_r)$
drive	driven	fixed	$(Z_s + Z_r) / Z_r$
fixed	drive	driven	$Z_s / (Z_s + Z_r)$
fixed	driven	drive	$(Z_s + Z_r) / Z_s$
driven	fixed	drive	$-Z_r / Z_s$

reverse

1. Motion equation

$$\omega_s + \frac{Z_r}{Z_s} \omega_r - \frac{Z_s + Z_r}{Z_s} \omega_c = 0$$

Z_r : # of ring gear teeth

Z_s : # of sun gear teeth

$Z_s + Z_r$: # of carrier equivalent teeth

2. Output torque & speed

$$T_{out} = T_{in} \times GR$$

$$\omega_{out} = \frac{\omega_{in}}{GR}$$

※ Example : $T_{in} = 100 \text{ Nm}$, $\omega_{in} = 3000 \text{ RPM}$, $Z_r = 80$, $Z_s = 40$
ring(fixed), sun(drive)

$$GR = \frac{Z_s + Z_r}{Z_s} = \frac{40 + 80}{40} = 3$$

$$T_{out} = 100 \times 3 = 300 \text{ Nm}$$

$$\omega_{out} = \frac{3000}{3} = 1000 \text{ RPM}$$

Coaxial Gear Model (AT)

- Motion equation

각 기어 별 접촉점에서의 속도는

$$V_s = \omega_s r_s \quad V_r = \omega_r r_r \quad V_c = \omega_c r_c$$

여기서 캐리어의 속도와 반지름은

$$V_c = \frac{V_s + V_r}{2} = \omega_c r_c = \omega_c \frac{r_s + r_r}{2}$$

$$V_s = \omega_s r_s \quad \text{이고,} \quad V_r = \omega_r r_r \quad \text{이므로}$$

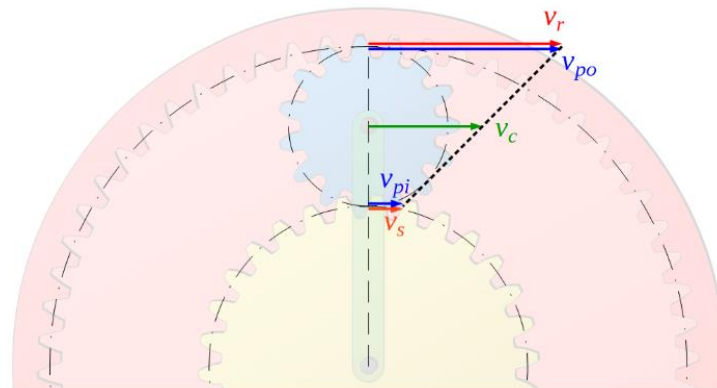
$$\frac{\omega_s r_s + \omega_r r_r}{2} = \omega_c \frac{r_s + r_r}{2}$$

정리하면

$$\omega_s r_s + \omega_r r_r - \omega_c (r_s + r_r) = 0$$

각 기어의 반지름은 잇수에 비례하므로

$$\omega_s Z_s + \omega_r Z_r - \omega_c (Z_s + Z_r) = 0$$



선기어 잇수로 나눠주면

$$\therefore \omega_s + \omega_r \frac{Z_r}{Z_s} - \omega_c \frac{Z_s + Z_r}{Z_s} = 0$$

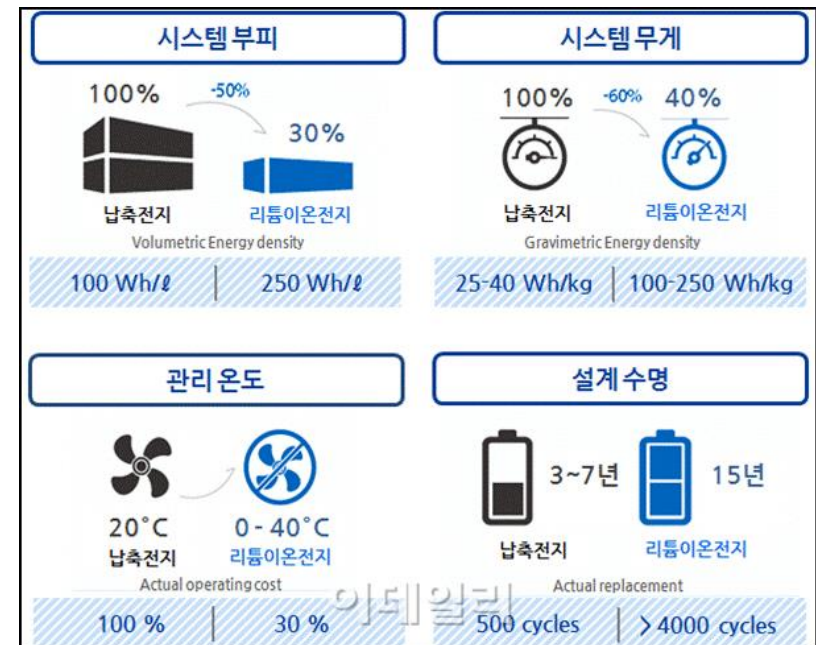
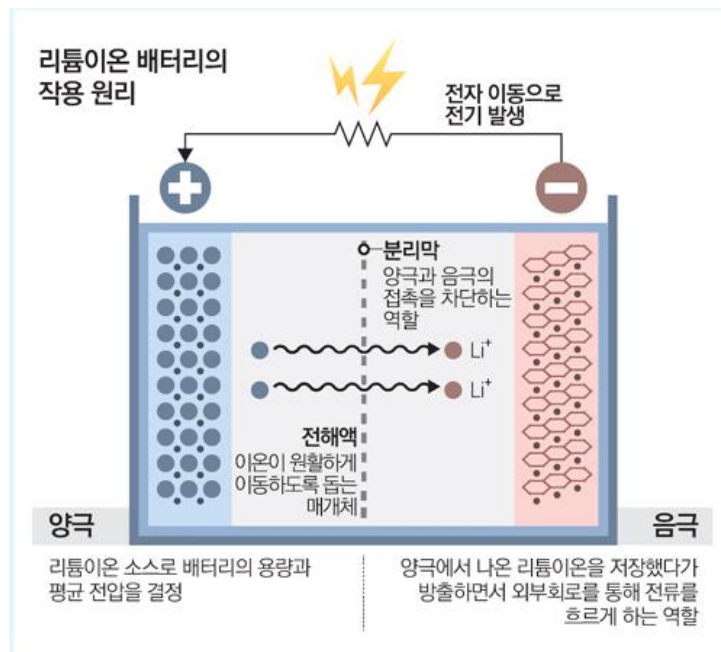
Example: Ring(driven), Carrier(drive), Sun(fixed)

$$\omega_s + \omega_r \frac{Z_r}{Z_s} - \omega_c \frac{Z_s + Z_r}{Z_s} = 0$$

$$GR = \frac{\omega_{in}}{\omega_{out}} = \frac{\omega_c}{\omega_r} = \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} \frac{Z_r}{Z_s} = \frac{Z_r}{Z_s + Z_r}$$

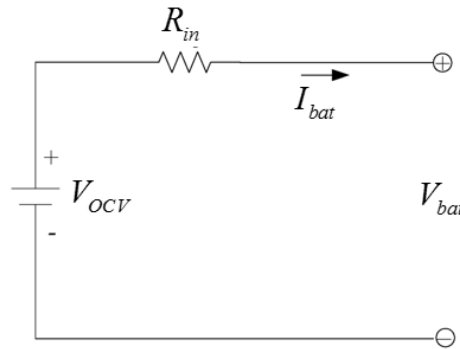
Battery

- Providing the current to generate the mechanical torque from a motor
- Operating principle
 - Conversion of the electric energy in a capacitor to the current by the battery voltage and resistance



Equivalent Circuit Model

- Input : motor power (torque and speed)
- Output : state of charge (SOC)



1. Equivalent circuit equation

$$V_{bat} = V_{OCV} - R_{in} I_{bat}$$

V_{bat} : battery volatage [V]

V_{OCV} : open circuit voltage [V]

R_{in} : equivalent internal resistance [Ω]

I_{bat} : battery current [A]

2. SOC calculation

Mechanical Power = Electrical Power

$$T_{mot} \omega_{mot} = \eta V_{bat} I_{bat} \quad (\text{discharging})$$

$$\eta T_{mot} \omega_{mot} = V_{bat} I_{bat} \quad (\text{charging})$$

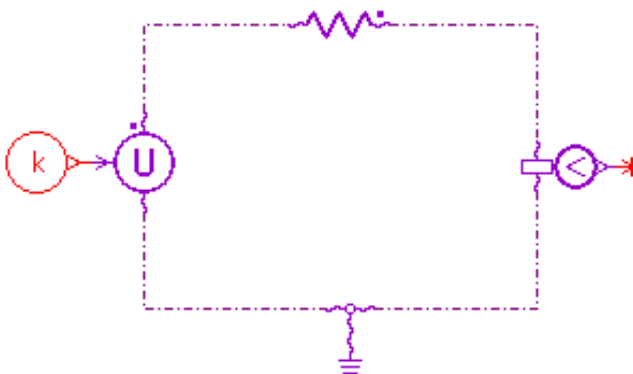
$$\frac{dSOC}{dt} = -I_{bat} \frac{100}{C_{nom}}$$

η : motor efficiency

SOC_{ini} : initial SOC [%]

C_{nom} : rated capacity [As]

$$SOC = SOC_{ini} - \frac{100}{C_{nom}} \int I_{bat} dt$$



Equivalent Circuit Model

※ Example : when $T_{mot} = 100 \text{ Nm}$, $\omega_{mot} = 955 \text{ RPM}$ (100 rad/s) during 2 min, final SOC?

$$V_{OCV} = 300 \text{ V}, R_{in} = 0.1 \Omega, \eta = 1, C_{nom} = 40,000 \text{ As}, SOC_{ini} = 50 \%$$

$$V_{bat} = V_{OCV} - R_{in} I_{bat} = 300 - 0.1 \times I_{bat}$$

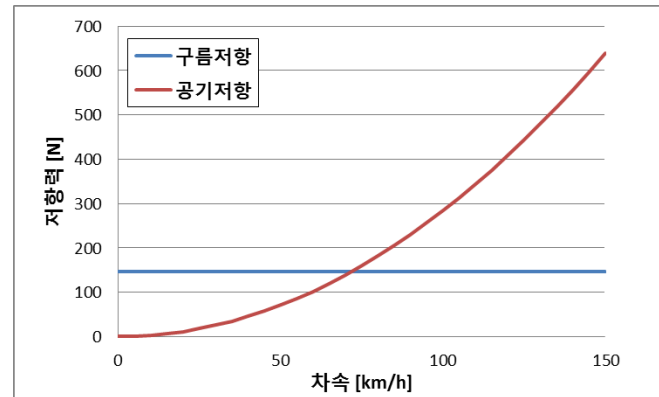
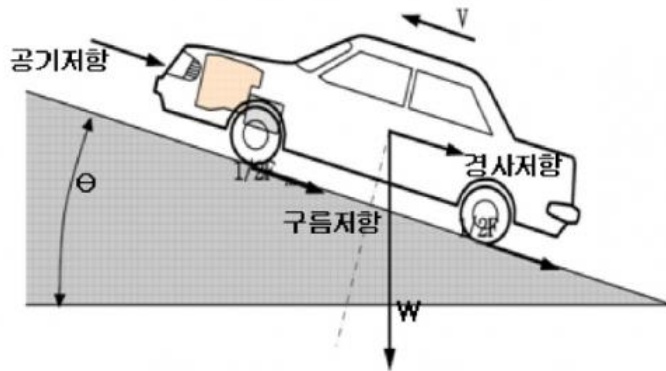
$$T_{mot} \omega_{mot} = \eta V_{bat} I_{bat} \longrightarrow 0.1 I_{bat}^2 - 300 I_{bat} + 10,000 = 0$$

$$I_{bat} = 2966 \text{ or } 33.7 \text{ A}$$

$$SOC = SOC_{ini} - \frac{100}{C_{nom}} \int I_{bat} dt = 50 - 0.084 \times 120 = 39.9 \%$$

Driving resistances

- Drag forces during the driving from the various conditions
- Air, rolling, climbing, and acceleration resistance



< Air resistance >



< Rolling resistance >



< Climbing resistance >



Resistance Calculation Model

- Input : vehicle speed, gradient
- Output : drag force

1. Air resistance

$$F_{air} = \frac{1}{2} C_d A_{fr} \rho_{air} V_{veh}^2$$

C_d : air drag coefficient

A_{fr} : frontal area [m²]

ρ_{air} : air density [kg/m³]

V_{veh} : vehicle speed [m/s²]

2. Rolling resistance

$$F_{roll} = \mu_r m_b g$$

μ_r : rolling friction coefficient

m_b : body mass[kg]

3. Climbing resistance

$$F_c = m_b g \sin \theta_{grad}$$

θ_{grad} : gradient [rad]

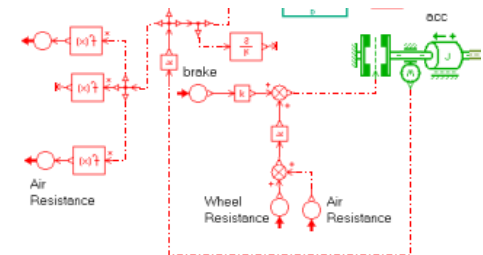
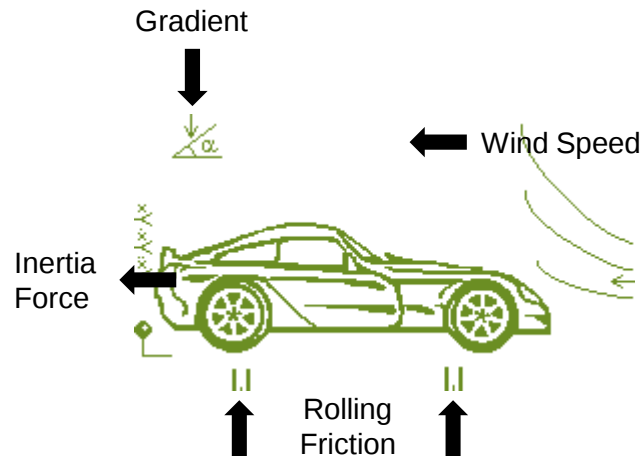
4. Acceleration resistance

$$F_{acc} = ma = \frac{J_{eq} \alpha_{whl}}{R_{tire}}$$

J_{eq} : vehicle equivalent inertia at wheel [kgm²]

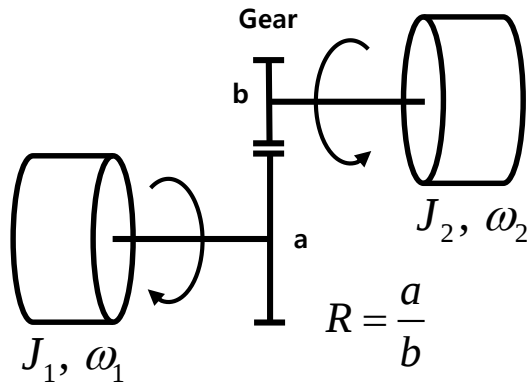
α_{whl} : wheel rotational acceleration [rad/s²]

R_{tire} : effective tire radius [m]



Equivalent Inertia

- Calculation of an equivalent inertia from each inertias



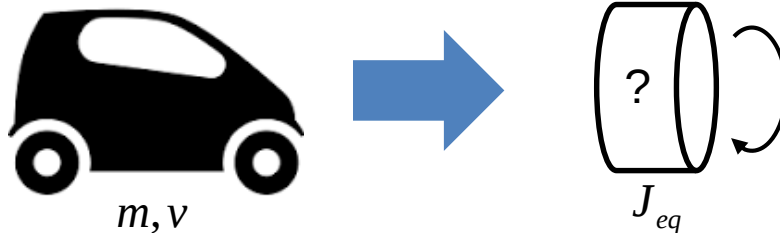
$$E_1 + E_2 = E_{eq} \quad (\text{energy conservation})$$

$$\frac{1}{2} J_1 \omega_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \omega_2^2 = \frac{1}{2} J_{eq,1} \omega_1^2$$

$$J_1 \omega_1^2 + J_2 R^2 \omega_1^2 = J_{eq,1} \omega_1^2 \quad (\omega_2 = R \omega_1)$$

$$J_{eq,1} = J_1 + J_2 R^2 \leftrightarrow J_{eq,2} = \frac{J_1}{R^2} + J_2$$

Equivalent inertia at wheel w.r.t vehicle mass



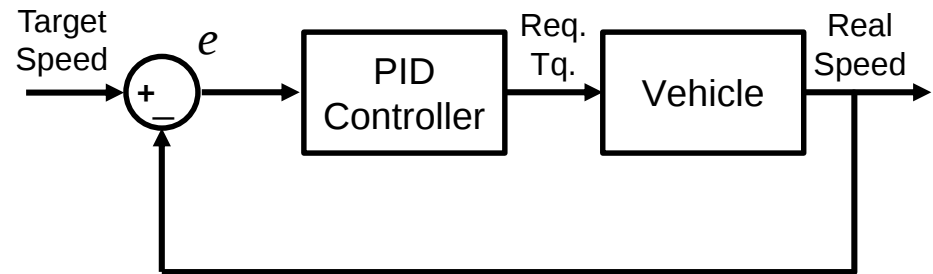
$$E_v = E_w$$

$$\frac{1}{2} m_b V_{veh}^2 = \frac{1}{2} J_{eq} \omega_{whl}^2 \quad (V_{veh} = R_{tire} \omega_{whl})$$

$$J_{eq} = m_b R_{tire}^2$$

Driver Controller

- Torque control to match a target vehicle speed from the driver request
- Operating principle
 - Reducing an error between the target speed and the real speed



$$T_{req} = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad \begin{cases} e(t) \geq 0 : \text{accelation} \\ e(t) < 0 : \text{braking} \end{cases}$$

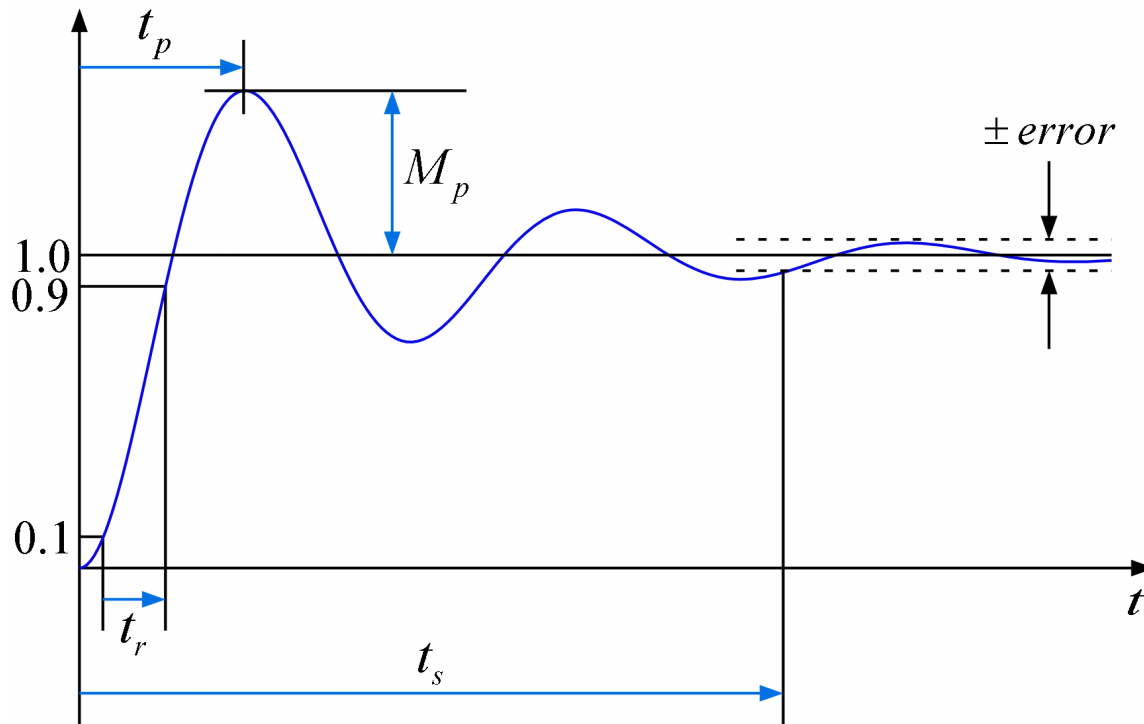
$$(e(t) = V_{\text{target}} - V_{\text{real}})$$

K_p : proportional gain

K_i : integral gain

K_d : derivative gain

PID control



M_p : overshoot

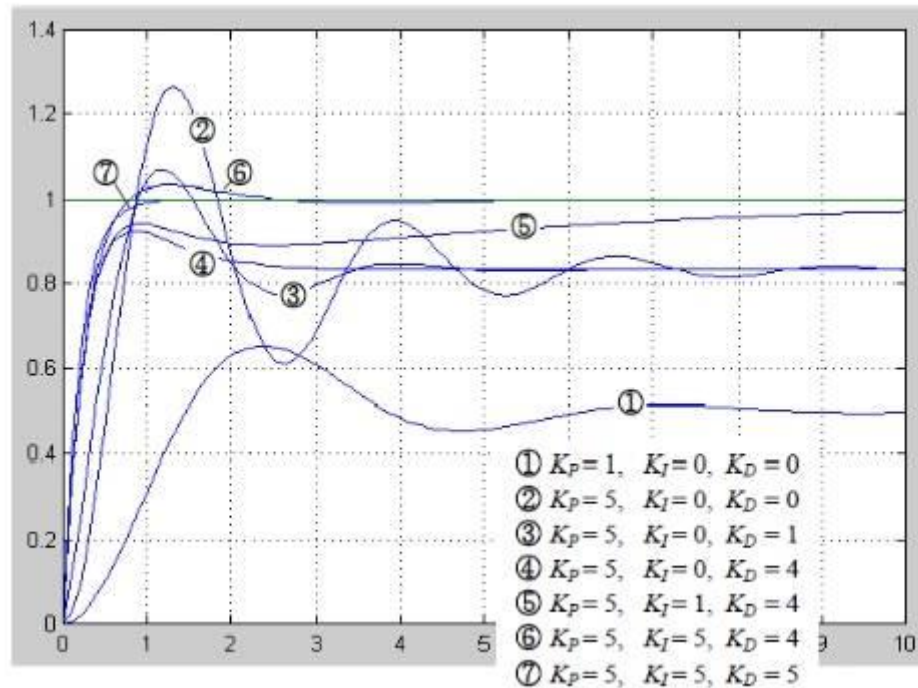
t_p : peak time

t_r : rising time

t_s : settling time

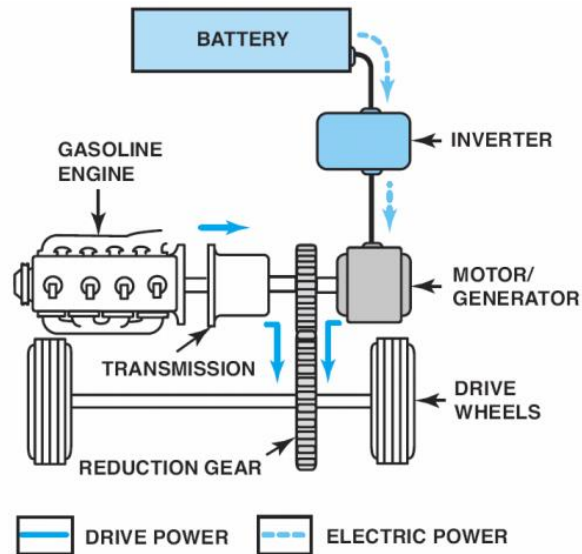
- 비례(Proportional) : 현재 상태에서의 오차 값의 크기에 비례한 출력, 오차 감소
- 적분(Integral) : 정상상태(steady-state) 오차를 감소
- 미분(Derivative) : 출력 값의 급격한 변화를 제어, 안정성(stability)을 향상

PID control



Gain 증가	Overshoot	Peak time	Rising time	Settling time	Error
Kp(비례)	증가	감소	감소	X	감소
Ki(적분)	감소	X	증가	증가	감소(제거)
Kd(미분)	감소	X	X	감소	X

Assignment



Vehicle Parameters

$$J_{eng} = 0.2 \text{ kgm}^2, J_{motor} = 0.05 \text{ kgm}^2$$

$$GR_{TM} = 2, GR_F = 4$$

$$M_{veh} = 1500 \text{ kg}, R_{tire} = 0.3$$

$$T_{eng} = 80 \text{ Nm}, T_{mot} = 50 \text{ Nm}$$

Resistance Parameters

$$A = 2 \text{ m}^2, C_d = 0.3, \rho = 1.2 \text{ kg/m}^3, V = 15 \text{ m/s}$$

$$\mu_{roll} = 0.01, g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Problems

1. Equivalent inertia at wheel
2. Driving torque at wheel
3. Drag torque at wheel (air, rolling)
4. Vehicle acceleration speed

$$(\text{Driving torque} - \text{Drag torque}) = \text{Eq. Inertia} \times \text{Acceleration rotational speed}$$

$$\text{Eq. Inertia} : 148.6 \text{ [kgm}^2\text{]}$$

$$\text{Driving Torque} : 840 \text{ [Nm]}$$

$$\text{Drag Torque} : 68.44 \text{ [Nm]}$$

$$\text{Vehicle Acc.} : 1.558 \text{ [m/s}^2\text{]}$$