

<기술논문>

차량 전장 부품 특성이 MDPS 조타 토크에 미치는 영향

조현석 · 이병림* · 장세현 · 박영대 · 김민준

현대자동차 연구개발본부

Effects of Vehicle Electric Components on the Steering Input Torque

Hyunseok Cho · Byungrim Lee* · Sehyun Chang · Youngdae Park · Minjun Kim

Suspension & Steering Research Lab, Hyundai Motor Group, 150 Hyundaiyeonguso-ro, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-706, Korea

(Received 14 March 2014 / Revised 13 May 2014 / Accepted 13 May 2014)

Abstract : For the robust design of Motor Driven Power Steering (MDPS) systems, it is important to consider energy efficiency from every aspect such as system configuration and current flow, etc. If design optimization is not considered, it has many problems on a vehicle. For example, when evaluating steering test, particularly the Catch-up test which turning the steering wheel left or right quickly, steering effort should be increased rapidly. Also a vehicle might have poor fuel efficiency. In this study, it is calculated energy consumption for each component of the steering system and analyzed factors of energy consumption. As a result, this paper redefines a method to estimate steering input torque using characteristics of vehicle electric components and then conducts an analysis of contribution for the Catch-up.

Key words : Catch-up(캐치업), Rack force(랙추력), Energy consumption(소비에너지), Motor driven power steering(전동식 파워 스티어링), Robust design(강건설계)

Nomenclature

Subscripts

P : power consumption [W]
V : voltage [V]
I : current [A]
R : resistance [Ω]
F : rack force [N]
 ω : angular velocity [rad/s]
T : torque [Nm]
C : gear ratio [m/rev]
L : ball screw lead [m/rev]
l : wire length [m]
K : motor torque constant
 η : efficiency
r : reduction ratio

B : battery
E : ECU
M : motor
BS : ball screw
RP : rack & pinion gear
BE : battery ~ ECU
H : handle
tot : total
u : resistance per unit length

1. 서론

차량에서 파워 스티어링 시스템은 운전자가 스티어링 휠을 보다 적은 힘으로 조작할 수 있도록 힘을 보태는 배력 장치가 포함된 스티어링 시스템을 의

*Corresponding author, E-mail: brlee@hyundai.com

미한다. 과거 유압식 파워 스티어링(Hydraulic Power Steering, 이하 HPS)이 널리 사용되었지만 최근에는 구조가 단순하고 가벼우며 조향 기능 외 안전, 편의 등의 각종 부가 기능 구현까지 가능한 전동식 파워 스티어링(Motor Driven Power Steering, 이하 MDPS)으로 추세가 바뀌었다. 두 방식의 가장 큰 차이점은 동력원이라고 볼 수 있는데 HPS의 경우 엔진을 동력원으로 하여 유압 펌프를 구동시키고 이때 만들어진 유압의 힘으로 스티어링 기구를 조작하는 반면 MDPS는 배터리에서 전력을 공급받아 모터를 구동시키고, 그로 인해 발생한 토크가 더해져 스티어링 기구를 조작하는 방식으로써 차량 배터리를 동력원으로 볼 수 있다. 전기 에너지를 사용하면서 전체 시스템의 부피나 중량은 줄고, 엔진에 부담을 주지 않아 성능 및 연비 개선 효과를 기대할 수 있다는 장점 때문에 최근에는 중·대형차에도 MDPS가 점차 확대 적용되고 있다.¹⁾ 이러한 기술적 추세와 친환경성에 대한 시대적 요구에 따라 MDPS는 친환경 차량 등 에너지 소비를 줄일 수 있는 차량의 조향시스템으로 HPS를 대체하고 있으며 에너지 소비 효율화 관점에서 더욱 활발한 검토가 진행되고 있다.^{2,5)} 본 연구에서는 에너지 소비 효율화를 통한 핸들 무게 문제를 개선하고자 차량의 전장 부품 특성이 조타 토크에 미치는 영향 및 급조타시 핸들무게 문제 발생 조건을 검토하고자 한다. 이를 위하여 필요 랙추력이 과대한 대형 차종을 대상으로 대형 차종에 적용 가능한 랙 구동형 파워 스티어링 시스템의 전장 부품 최적화 방안을 제안하였다.

2. 조타 토크 추정

2.1 조타 토크 추정식

Fig. 1은 전동식 파워 스티어링 시스템 가운데 한 종류인 랙 구동형 전동식 파워스티어링(R-MDPS) 시스템의 구성도이다. 조향 시스템은 스티어링 휠, 토크센서, ECU 및 감속기, 모터, 랙피니언 기어로 구성되어 있으며, 운전자의 조향 입력 신호를 받아 모터가 배력을 발생시키고, 그 힘으로 스티어링 기어를 구동시켜 차량의 방향을 바꾸는 일련의 구조로 되어 있다.

조향 시스템이 정상적으로 작동하기 위해서는 차

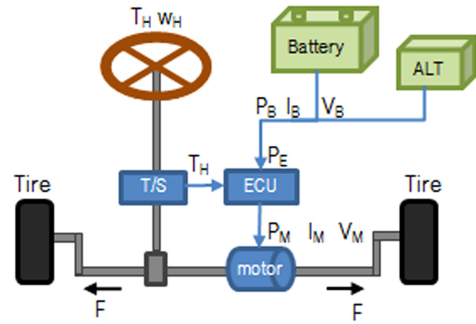


Fig. 1 Energy flow of R-MDPS system

량이 필요로 하는 랙추력보다 더 큰 랙추력을 시스템에 공급해주어야 하며 만일 공급 랙추력이 필요 랙추력보다 작을 경우 핸들 무게 문제 발생할 수 있다. 따라서 MDPS의 경우 기어, 감속기, 모터 등 스티어링 부품뿐만 아니라 배터리나 그 외 MDPS와 직결되는 전장 부품까지 고려하여 적정 랙추력이 공급되도록 설계하여야 한다. 전장 부품 설계 시 핸들 무게 문제를 확인하기 위하여 본 논문은 다음과 같은 단계를 거쳐서 조타 토크를 추정할 후 이를 기준으로 핸들 무게를 판단하였다.

첫 번째 단계는 차량에 필요한 랙추력을 산정하는 단계이다. 필요 랙추력은 전륜축중량을 기준으로 일반적인 추정이 가능하지만 차량의 지오메트리 조건 및 컴플라이언스 등의 영향에 의해 실제 값이 차이가 발생하는 경우가 있어 여기서는 실차타이로드 하중 계측을 통하여 필요한 랙추력을 추정하였다.

두 번째는 스티어링 공급 랙추력을 계산하는 단계이다. 첫 번째 단계에서 계산한 차량의 필요 랙추력보다 스티어링 시스템이 공급하는 랙추력 값이 더 커야 적정 수준의 조타 토크를 유지할 수 있기 때문에 식 (1)과 같이 MDPS가 어시스트해주는 부분과 운전자가 직접 전달하는 힘의 합력으로 스티어링 공급 랙추력을 계산한다.

$$F = \frac{2\pi\eta_{BS}r_{BS}T_M}{L} \times \frac{2\pi\eta_{RP}T_H}{C} \quad (1)$$

식 (1)을 다시 조타 토크에 대하여 정리하면 조타 토크는 다음 식과 같다.

$$T_H = \left(F - \frac{2\pi\eta_{BS}r_{BS}T_M}{L} \right) \times \frac{C}{2\pi\eta_{RP}} \quad (2)$$

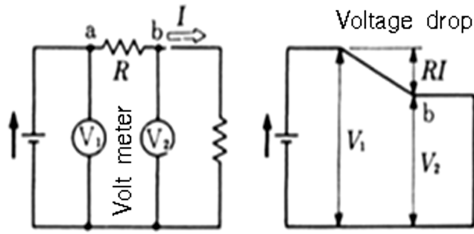


Fig. 2 Kirchhoff's voltage law

위 식으로부터 조타 토크를 계산하기 위해서는 먼저 모터 토크 T_M 값을 알아야 한다. 일반적으로 모터 토크는 조타 속도를 모터 회전 속도로 환산하여 해당 속도에 대한 모터 토크값을 모터 특성 그래프에서 찾아서 사용한다. 그러나 본 논문에서는 차량 배터리 및 전선에 대한 조타 토크 영향도를 확인하기 위하여 식 (3)과 같이 모터 토크를 모터 출력에 관한 식으로 치환하고, Fig. 2의 키르히호프 법칙으로부터 배터리 전압과 전선 저항에 관한 식으로 나타내었다.

$$T_M = \frac{P_M}{\omega_M} = \frac{V_M \times I_M \times \eta_M}{\omega_M} = \frac{(V_B - I_B R_{BE}) \times I_M \times \eta_M}{\omega_M} \quad (3)$$

$$T_H = \left(F - \frac{2\pi\eta_{BS} r_{BS} (V_B - I_B R_{BE}) \times I_M \times \eta_M}{L \times \omega_M} \right) \times \frac{C}{2\pi\eta_{RP}} \quad (4)$$

배터리에서 MDPS까지의 전선을 저항체로 가정하면 모터의 입력 전압 V_M 은 배터리 전압 V_B 에서 전압 강하량 $R_{BE} I_M$ 만큼을 뺀 값으로 치환할 수 있고, 최종적으로 조타토크는 다음과 같이 구할 수 있다.

2.2 캐치업

일반적인 캐치업 성능 검토 방법은 스티어링 시스템에만 국한되어 있어 실제 주행시 캐치업 성능 추정이 부정확하다는 한계를 가지고 있었다. 본 논문은 이러한 한계를 극복하고자 배터리, 전장 와이어의 영향까지 함께 검토함으로써 캐치업 성능 예측의 정확도를 향상시키고, 효율적인 부품 설계를 통하여 캐치업 문제를 해결하는 방안을 제시하고자 한다.

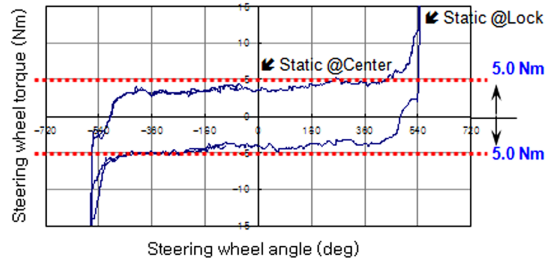


Fig. 3 High effort judgement

MDPS 시스템의 캐치업은 HPS 시스템에서 급전 회시 유량 부족으로 인한 걸림감과 동일한 현상으로 모터 출력이 순간적으로 부족하여 걸림 현상이 발생하는 것을 말한다. 일반적으로 조타 각속도에 대한 모터 특성을 기준으로 응답속도를 구하고, 구해진 모터 토크로부터 발생가능한 랙추력을 계산하여 필요랙추력과 비교함으로써 캐치업 만족 여부를 판단한다.

본 논문은 동일한 의미이지만 운전자 입장에서 랙추력이 아닌 조타 토크를 캐치업 판단 기준으로 설정하였다. 조타 토크 기준은 운전자가 통상적으로 자연스럽게 조향할 수 있는 조향력을 기준으로 설정하는데 매뉴얼 토크 차이로 인한 전체 어시스트력 차이가 크지 않고 기존 유압 시스템 전체를 고려하여 전 구간에서 5Nm 로 동일하게 적용하는 것이 무방하다고 판단하여 캐치업 판단 조건을 Fig. 3과 같이 조타 토크 5Nm를 기준으로 정하였다.

이때 조타 각속도는 540 deg/sec의 일정한 각속도를 유지하고 완전 조타 조건에서 5Nm 이상의 조타 토크가 발생할 경우를 캐치업으로 판단할 수 있다.

3. 전장 부품별 조타 토크 영향도

앞에서 캐치업 발생을 판단하기 위해 사용한 추정식의 항들로부터 조타 토크에 영향을 미치는 몇 가지 인자들을 추론하고, 인자값들을 변화시킴에 따라 조타 토크가 어떻게 달라지는지 전장 부품별 조타 토크 영향도를 검토하였다.

3.1 배터리 전압 강하

앞에서 정의한 식 (4)로부터 배터리 전압이 조타 토크에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 배터리 전

압은 정상적인 상태에서는 일정한 전압을 유지하지만 어느 특정한 조건에서 전압 강하가 발생하며 공급 불안정을 야기한다. 배터리 전압이 감소하면 차량 전기 공급량이 감소하고, 이는 MDPS에서의 출력에 직접적으로 영향을 미친다. 배터리 전압 강하의 발생 원인은 여러 가지가 있는데 주로 다음과 같은 이유로 전압 강하가 발생한다.

엔진 회전 불안정으로 인한 전압 변동, 과도한 전기장치를 추가로 설치할 경우, 에어컨, 라이트 등 전기장치의 과도한 전력 소모시, 누전, 접지 불량 등으로 인한 과방전 그리고 내구 열화에 따른 배터리 성능 저하 등이 그 원인이다. 공급 전류가 일정한 상태에서 전압강하가 일어나게 되면 공급 전력이 감소하고 결과적으로 모터의 출력에도 영향을 미친다. 따라서 배터리는 MDPS 소모 전력 이상의 전력 공급이 가능하도록 전압강하에 강건한 사양을 설정하여야 한다.

그러나 예상치 못한 이유로 배터리 저전압이 발생할 경우를 대비하여 일반적으로 MDPS 차량은 배터리 저전압에 따른 고장 진단 모드를 설정하고 있다. 배터리 전압이 낮게 들어올 경우 MDPS의 공급 랙추력을 조정하여 운전자로 하여금 고장을 인식시키는 방법이다. 캐치업 성능 검토 시 공급 랙추력이 인위적으로 변하게 되면 정확한 조타 토크 추정이 불가능하므로 본 논문에서는 전류 제한 필터가 동작하는 배터리 전압의 하한치를 확인하고 그 이상의 전압에 대해서만 캐치업 발생 유무를 검토하였다.

3.2 배선 저항

일반적인 전력 공급 계통에서 전력 손실은 공급 용량에 영향을 주는 전원계의 전압 변동뿐만 아니라 전달 과정에서 전선 저항에 의한 전압 강하 및 전압 변동과도 관련이 있다. 이를 랙 구동형 전동식 파워 스티어링의 전력 공급 계통에 적용해 보면 Fig. 4와 같이 배터리에서 MDPS ECU까지의 전류 송수신 담당하는 전선에 대한 영향으로 볼 수 있다. 전선은 길이와 굵기를 가지는 저항체이므로 전달 효율이 100%가 될 수 없고 따라서 전선에 의한 전압 강하가 발생할 수밖에 없다. 전선 저항이 커질수록 전압 강하량도 커지고 운전자가 스티어링 휠을 조작하는 조타 토크도 역시 커지게 된다.

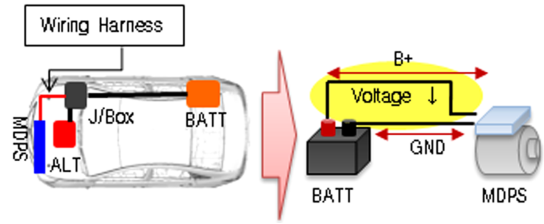


Fig. 4 Power supply circuit of MDPS

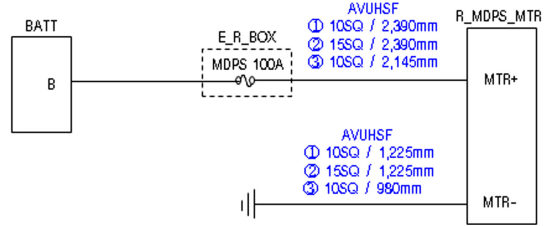


Fig. 5 MDPS wiring harness

이를 확인하기 위하여 전선 저항에 영향을 미치는 인자를 선정하고, 그 인자값을 변경하였을 때 조타 토크 값이 어떻게 변하는지를 검토하였다. 전선 저항은 전선의 굵기를 나타내는 단면적과 전선의 길이가 주요 설계 인자이므로 길이와 단면적을 달리하여 전선 저항값을 설정해 줄 수 있고, 그 값은 다음과 같이 계산한다.

$$R_{tot} = R_u \times l \tag{5}$$

단위 길이당 전선 저항 R_u 는 전선 재질과 전선 굵기에 의해 결정되며 자동차용 전선 통합 규격에서 이 값을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 Fig. 5와 같이 사양 변경이 용이한 MDPS ECU에서 엔진룸 정션박스까지의 전선에 대하여 굵기와 길이를 변경해 가며 전선 저항을 조정하였다.

3.3 모터 입력 전류

앞서 공급 랙추력은 MDPS에서 어시스트해주는 힘과 사람이 전달하는 힘의 합력과 같다고 정의하였다. 여기서 MDPS의 어시스트력은 모터의 출력 성능, 즉 모터의 회전 속도와 모터 토크에 의해 결정된다. 앞의 식 (3)을 통해 모터 토크는 모터 전류에 비례하므로 Fig. 6과 같이 모터 전류 개선을 통하여 모터 토크를 증대함으로써 모터 동작 영역을 확대할 수 있다.

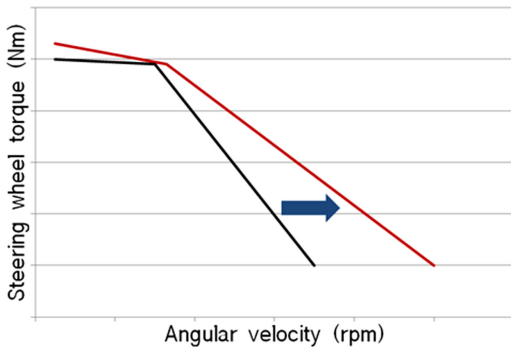


Fig. 6 Angular velocity vs steering wheel torque

모터에 인가할 수 있는 전압은 제한이 있기 때문에 고속 영역에서는 전기자 전류를 흘리기에 필요한 여유 전압이 부족해진다. 모터 동작 영역을 확대하여 고속 영역에서도 모터 운전을 가능하게 하기 위해서는 약계자 제어가 필요하다. 약계자 제어란 속도 증가에 따라 커지는 역기전력을 적절히 제한하여 필요로 하는 지령 전류/토크를 잘 제어할 수 있도록 전압 여유분을 확보하는 기법이다.⁶⁾ 약계자 제어를 수행하면 속도가 증가하더라도 역기전력은 일정해지므로 여유 전압이 확보되어 제어 가능한 전류를 높일 수 있으므로 더 높은 출력 토크를 발생시킬 수 있다. 모터 전류 제어를 통해 MDPS 출력이 증가하면 결과적으로 조타 토크는 감소할 것이다. 따라서 MDPS 차량에서 캐치업이 발생할 경우 모터 전류 제어를 통한 출력 개선이 가능하다.

4. 결과 및 고찰

캐치업 검토 방법을 이용하면 차량 개발 초기 단계에서 핸들 걸림감 문제가 발생하는지 여부를 미리 예측하고 검토할 수 있다. 여기서는 대상 차량을 선정하여 조타 토크를 구하고 앞에서 서술한 세 가지 영향 인자에 대한 기여도 분석 및 결과 고찰을 수행하였다. 조타 토크 추정식의 입력값인 스티어링 기어비, 기어 효율, 볼스크류 리드, 감속비, 감속기 효율은 차량의 주요 제원으로써 상수값으로 입력되고 나머지 필요랙추력과 공급랙추력, 모터 토크 값을 추정하여 전장 특성을 바꿔가면서 조타 토크를 계산하였으며 그 결과는 Table 1과 같다. 전장 특성을 바꾸지 않은 대상 차량의 기본 사양은 13.5V의

Table 1 Influence of variables on steering torque

	Battery voltage	Wire area	Motor current	Input torque
Base car	13.5V	10sq	95A	10.7Nm
Car A	10.0V	10sq	95A	48.3Nm
Car B	13.5V	15sq	95A	9.0Nm
Car C	13.5V	10sq	105A	3.5Nm

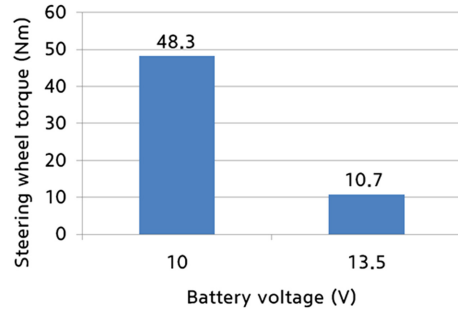


Fig. 7 Battery voltage vs steering wheel torque

배터리 전압, 10sq의 전선 굵기(MDPS ~ 정선박스), 95A의 모터 전류값을 가진다.

A 차량은 배터리 전압을 변경한 경우이다. 배터리 전압은 저전압이 발생할 경우를 대비하여 고장 진단 모드를 설정하는데 검토 차량의 경우 10V 이하 영역에서 MDPS의 전류 제한 필터가 동작하도록 설정되어 있었다. 따라서 전압은 최악 조건인 10V로 설정하여 검토하였고, 그 때의 조타 토크는 Fig. 7과 같이 약 37.6Nm 증가하였다. 이는 앞서 배터리 전압 강하가 공급 전력을 감소시켜 모터의 출력을 감소시킨다는 예상과 부합하는 결과로써 모든 검토 항목 중에서 가장 기여도가 크게 나타났다. B 차량은 전선 저항값 변경에 따른 조타 토크 변화를 검토하기 위하여 전선 사양을 달리한 경우이다. 전선 저항은 전선의 굵기와 길이로 조절이 가능하고 굵기와 길이를 변경하였을 때 전체 저항값은 앞에서 서술한 식 (5)로부터 계산할 수 있다.

Table 2에서와 같이 대상차량 대비 전선 굵기를 5sq 증대시킨 경우(Case 1)와 전선의 길이를 245mm 감소시킨 경우(Case 2)에 대하여 각각의 저항값은 17.7mΩ과 18.7mΩ이다. 본 논문에서는 저항값 변화량이 더 큰 전선 굵기에 대해서만 조타 토크 변화를 검토하였다.

Table 2 Calculating the resistance of a wire

NO		Resistance (mΩ)		
		Base	Case1	Case2
		10sq	15sq	10sq
1	R/TML contact resistance	1	1	1
2	Wire resistance	1.6	1.6	1.6
3	R/TML contact resistance	1	1	1
4	FUSE resistance	0.45	0.45	0.45
5	R/TML contact resistance	1	1	1
6	Wire resistance	4.2	3.0	3.8
7	TML contact resistance	3.6	3.6	3.6
8	TML contact resistance	3.6	3.6	3.6
9	Wire resistance	2.2	1.5	1.7
10	TML contact resistance	1	1	1
Total resistance		19.5	17.7	18.7

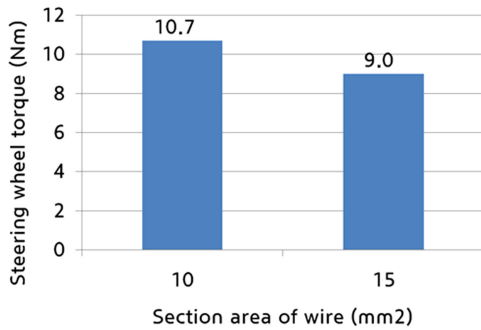


Fig. 8 Section area of wire vs steering wheel torque

조타 토크 추정식으로부터 전선 저항 변화에 따른 조타 토크 변화를 확인한 결과 Fig. 8에서와 같이 저항 1mΩ 당 조타 토크는 0.94Nm 감소하는 것을 알 수 있다. 결국 전선의 전체 저항값은 전선 단면적이 클수록 전선 길이가 짧을수록 작아지고, 전선 저항이 작아지면 전선에서의 전압 강하량 역시 작아지므로 조타 토크 또한 감소하게 된다. 따라서 캐치업에 대해 강건하기 위해서는 배터리와 MDPS ECU까지의 전선 길이는 짧게, 선경은 크게 설계하는 것이 유리하다.

마지막으로 차량 C는 모터 전류에 대한 조타 토크 변화를 검토하기 위하여 모터 전류값을 변경시킨 경우이다. 대상 차량의 모터 최대 전류는 95A로 약계자 제어를 통해 최대 전류를 105A까지 증대시킨 후 조타 토크를 계산하였다. 그 결과 Fig. 9와 같이 모터 전류가 1A 증가할수록 조타 토크는 약

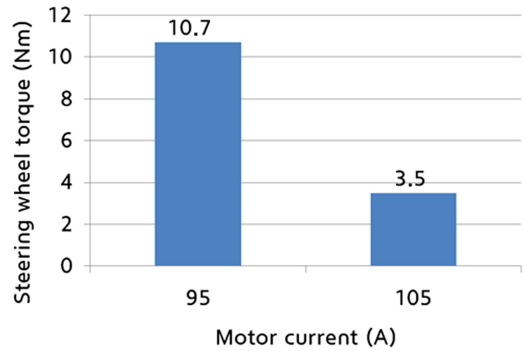


Fig. 9 Motor current vs steering wheel torque

0.72Nm 감소하는 것을 알 수 있다.

약계자 제어를 통해 모터 속도가 증가하더라도 제어 가능한 전류를 높일 수 있으므로 더 높은 출력 토크를 발생시킬 수 있고, 그 결과 MDPS의 출력이 증가하여 운전자의 조타 토크를 감소시킨 것이다. 이상과 같이 전장 부품의 조타 토크 영향도에 대한 검토 내용을 분석해보면 배터리전압 0.1V당 조타 토크 약 1.1Nm, 전선 저항 1mΩ당 조타 토크 약 0.9Nm, 모터 전류 1A당 조타 토크 약 0.7Nm의 변동 값을 가지는 것을 확인하였다. 단순 비교는 어려우나 위 결과만으로 조타 토크 기여도는 배터리 전압이 가장 크고 두 번째로는 모터 전류, 그리고 마지막으로 배선 저항에 의한 기여도가 가장 낮은 것을 알 수 있었다.

따라서 차량 설계 시 캐치업 문제를 미연에 방지하기 위해서는 개발 초기 단계에서 배터리의 용량, 내구 열화, 온도 등에 따른 배터리 전압 강하 발생을 최소화할 수 있도록 사양을 결정하고, 필요시 모터 약계자 제어를 통해 전류를 증가시켜 조타 토크를 저감하는 방법도 생각해야 한다. 전선 단면적 증대로 인한 조타 토크 영향도는 미비하기 때문에 만일 전선 저항을 개선하려고 한다면 전체 부품의 배치를 고려하여 단면적과 길이를 동시에 변경하는 것이 필요하다. 물론 이 외에도 입력값으로 설정해준 랙추력이나 기어비, 볼스크류 리드, 감속비를 조정하여 조타토크를 감소시킬 수는 있지만 이와 같은 설계 인자들은 스티어링 필을 결정하는 주요 인자들이기 때문에 신중히 검토하여 값을 설정할 필요가 있다.

5. 결 론

랙 구동형 전동식 파워 스티어링을 장착한 차량의 전장 부품 특성이 조타 토크에 끼치는 영향을 상세하게 검토함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 전장 부품 특성이 포함된 조타 토크 추정식을 재검립함으로써 차량 개발 초기 단계에서 적용가능한 검토 기준을 제시하였다.
- 2) 전장부품별 특성값 변경에 의한 조타 토크 영향도를 검토함으로써 MDPS 시스템의 조타력 개선을 위한 구체적인 방향을 제시하였다.

References

- 1) M. H. Lee, H. M. Lee, K. S. Lee, S. K. Ha, J. I. Bae, J. H. Park, H. G. Park, H. J. Choi and H. H. Chun, "Development of a Hardware in the Loop Simulation System for Electric Power Steering in Vehicles," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.12, No.5, pp.733-744, 2011.
- 2) M. J. Kim, B. R. Lee, S. H. Chang, Y. D. Park and H. S. Cho, "MDPS Systems Optimization Based on Steering Rack Force Reduction," *KSAE Annual Conference Proceedings*, pp.483-484, 2013.
- 3) T. Goto, M. Yamashita, T. Saito, Y. Fujinori and H. Somada, "Efficiency Improvement Study of High-power Electric Power Steering System," *Toyota Technical Review*, Vol.57, No.1, pp.63-68, 2010.
- 4) M. Yamashita, T. Goto, K. Izutani and Y. Shimizu, "Efficiency Improvement Study of High-power Electric Power Steering System," *JSAE Spring Conference Proceedings*, pp.11-14, 2008.
- 5) T. Takahashi, H. Suzuki, T. Nakayama, K. Fujiyama, S. Yamaguchi, M. Yamashita, T. Goto and T. Saito, "Practical Use Technology of High-power Electric Power Steering System," *JSAE Spring Conference Proceedings*, pp.15-18, 2008.
- 6) Y. Hwang, J. Kim, J. Jang and I. Joo, "A Study on High Speed Drive for Outer Rotor Type High Torque Motor through Field Weakening Control," *KSAE Spring Conference Proceedings*, pp.11-15, 2012.