

벨트 연결형 기동 발전기를 사용한 승용차 엔진 토크 맥동 감소

이동훈*, 권태석*, 설승기*, 김종대**

* 서울 대학교, ** 현대 자동차

Suppression of Engine Torque Ripple of a passenger vehicle with a belt driven Integrated Starter Generator

Dong-Hoon Lee*, Tae-Suk Kwon*, Seung-Ki Sul*, Jong-Dae Kim**

* Seoul National University, ** Hyundai Motor Co.

ABSTRACT

본 논문에서는, 벨트 연결형 기동발전기(Integrated Starter Generators)를 이용하여 승용자동차에서 엔진 기동 시 발생하는 토크 맥동을 억제하는 방법을 제안하였다. 기동발전기의 빠른 토크 응답성을 통하여 내연기관의 기동 시 발생하는 저 주파수의 진동을 억제하여 승용차의 승차감을 개선하고자 한다. 특히 벨트를 통하여 구동되는(또는 구동하는) 벨트 연결형 기동발전기에 있어 벨트의 특성 분석과 모델링을 통하여 효과적인 맥동토크 억제 법을 제시하였다.

1. 서 론

운전 안전성 향상 및 탑승자에 대한 편의 제공을 위해 승용차량(Passenger Vehicle)에서의 전기기기 사용이 급격히 늘어나고 있다. 이러한 급증하는 전력 수요를 충족시키기 위해서는 발전기의 출력을 증가 시킬 필요가 있다. 이 경우 발전기의 토크가 엔진 기동 시 필요한 토크에 근접하게 되어 발전기를 엔진 시동 시 기동기로 활용하는 기동발전기(Integrated Starter and Generator, ISG)에 대한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다^[1]. 기동발전기(ISG)는 차량의 크랭크축(Crankshaft)에 직결되는 직결형과 크랭크축과 2~3:1 비율의 벨트로 연결되는 벨트형의 두 가지로 크게 나눌 수 있다. 전자의 경우 토크 전달 특성이나 신뢰성, 효율은 우수하나 엔진과 직결되어 있으므로 진동, 고온 등에 대한 고려가 필요하고, 엔진을 직접 기동해야 하므로 기동 시 큰 토크를 발생 시켜야한다. 이러한 이유로 직결형은 우수한 제어 특성에도 불구하고 경제적인 이유로 인하여 그 적용이 미루어지고 있다. 반면에 후자는 벨트의 변속 비만큼 기동 토크를 감소시킬 수 있고 엔진과 벨트를 통하여 연결

되므로 엔진으로부터의 진동 및 엔진 발열로부터 어느 정도 자유로울 수 있다. 특히 벨트형의 경우 기존 엔진룸의 구조를 크게 변경하지 않고 적용할 수 있어 매우 경제적이다. 이러한 기동발전기를 구비한 차량에서는 기동발전기의 순간 기동 특성을 이용하여 일정시간 이상 정차할 경우 자동적으로 엔진이 꺼지고 재주행시 다시 기동하는 '기동-정지(Go and Stop)' 형태의 운전이 가능하고 이를 통하여 연비(Fuel Efficiency)를 개선할 수 있다. 그러나 이 경우 빈번한 엔진 기동이 불가피하다. 내연기관은 흡입, 압축, 폭발, 배기의 4 행정과정을 통하여 토크를 발생하는데 이때 큰 맥동토크가 수반된다. 특히 기동 시 낮은 속도에서 발생하는 토크는 엔진 및 크랭크축의 관성에 의해 억제되기 힘들어 기동발전기의 빈번한 작동이 승용차의 승차감을 나쁘게 할 우려가 있다.

최근 전동기 제어기술의 발달에 의해 전동기의 토크 제어 대역폭은 수백 Hz 이상에 이르고 있다. 이러한 전기기기의 우수한 토크 응답성을 이용하여 엔진에서 발생하는 토크 맥동을 능동적(Active)으로 억제하려는 연구가 널리 진행되고 있다^{[2][3]}. 그러나 기존의 연구는 엔진에 전동기가 직결될 경우에 한정 되었으며, 벨트 연결형의 경우에는 벨트의 특성으로 인하여 이러한 제어가 매우 어려운 것으로 판단되어 졌다.

본 논문에서는 4행정에 의해 크랭크축에 전달되는 토크를 분석하여 토크 맥동을 추정하고 벨트 연결형 기동발전기 제어 시 벨트의 특성을 보상하여 차량의 진동을 억제하는 방법에 대해 논한다.

2. 본 론

2.1 엔진 맥동토크 추정

그림2는 크랭크축과 피스톤의 단순화된 구조를 보여주

고 있다. 그리고 4행정에 의해 크랭크축에 전달되는 토크는 크랭크축 각의 함수로 식(1)과 같이 표현된다^[4]. 식(1)에서 CYL은 실린더의 수, A_p 는 피스톤의 표면적, α 는 크랭크축의 각, s_j 는 j번째 실린더의 TC(Top - Center)로부터 피스톤 행정, p_j 는 j번째 실린더 압력, 그리고 p_0 는 흡입기관의 평균압력이다.

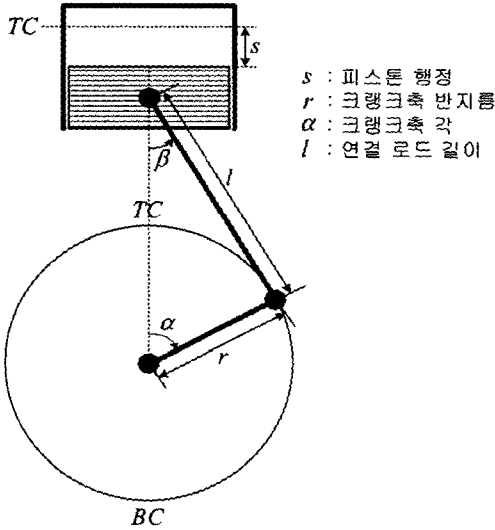


그림 1 피스톤과 크랭크축 구조

$$T_{engine}(\alpha) = \sum_{j=1}^{CYL} (p_j(\alpha) - p_0) A_p \frac{ds_j}{d\alpha} \quad (1)$$

실린더 압력 p_j 는 연료의 연소에 의한 연소 압력과 엔진이 회전함에 따른 부피 변화에 의한 모터링 압력으로 구성된다. 아이들 정지(Idle Stop) 후 엔진을 다시 기동(Idle Go) 할 경우에는, 기동발전기를 구동하여 엔진속도를 아이들 속도까지 증가시킨 후 연료를 주입하고 점화를 하게 된다. 따라서 연소 압력이 없으므로 엔진의 모터링 압력만을 고려하면 된다. 이러한 모터링 압력은, 등온 과정(Isothermal Process)임을 가정하면, 크랭크가 회전함에 따른 실린더 볼륨의 변화를 고려하여 식(2)와 같이 쉽게 구할 수 있다^[3]. 식(2)에서 $V(\alpha)$ 는 실린더의 압력, V_d 는 크랭크 위치가 BC(Bottom - Center)에 있을 때 실린더의 볼륨, 그리고 V_c 는 크랭크 위치가 TC(Top - Center)에 있을 때 실린더의 볼륨이다.

$$V(\alpha) = V_c + A_p \left(r + l - r \cos \alpha - \sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \alpha} \right)$$

$$P(\alpha) = \frac{P_0}{\left(\frac{V(\alpha)}{V_d + V_c} \right)} \quad (2)$$

2.2 벨트 풀리 시스템 모델

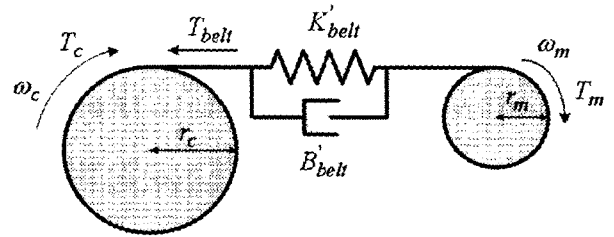


그림 2 벨트와 풀리 모델

$$\omega_m = \frac{1}{J_m S} (T_m - T_{belt})$$

$$\omega_c = \frac{1}{J_c S} (BR \cdot T_{belt} - T_c)$$

$$T_{belt} = \left(\frac{K'_{belt}}{S} + B'_{belt} \right) (r_m^2 \omega_m - r_m r_c \omega_c)$$

$$= \left(\frac{K_{belt}}{S} + B_{belt} \right) (\omega_m - BR \cdot \omega_c) \quad (3)$$

벨트와 풀리는 그림2와 같이 선형 스프링과 댐퍼로 모델링 하였다. 이때, 벨트와 풀리 사이에 미끄럼이 없다고 가정한다^[5]. 그림2에서 K'_{belt} 는 벨트의 탄성계수이고, B'_{belt} 는 벨트와 풀리의 댐핑계수이다. 그리고 모델의 상태 방정식은 식(3)과 같이 구할 수 있고 시스템 블록도는 그림3과 같다. 식(3)에서 BR 은 벨트비, 그리고 J_c 와 J_m 은 엔진과 기동발전기의 관성이다.

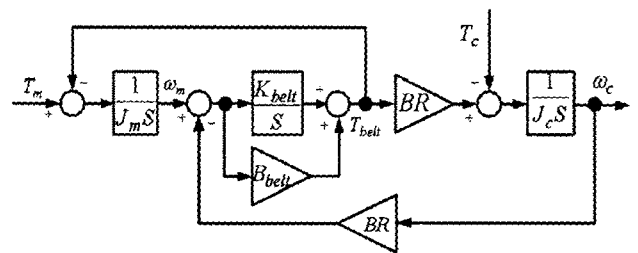


그림 3 벨트 풀리 시스템의 블록도

2.3 제어방법

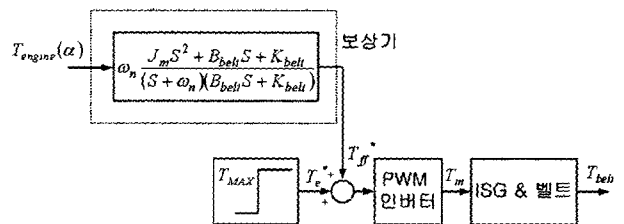


그림 4 제안된 방법의 제어 블록도

그림 4는 제안된 방법의 단순화된 제어 블록도이다. 크랭크축 맥동토크는 2.1에서 언급한 추정토크의 반대되는 값을 크랭크축에 직접 인가함으로써 감소시킬 수 있다. 그러나 기동발전기의 토크는 벨트를 경유하여 크랭크축으로 전달됨으로 원하는 토크가 크랭크축에 인가되지 않는다. 따라서 벨트와 풀리 시스템의 토크 전달 특성을 고려하여야 한다. 그림3으로부터 기동발전기에서 크랭크축의 토크 전달함수는 식(4)와 같이 구할 수 있다. 식(4)에서 엔진 축으로 환산된 기동발전기 관성은 엔진관성에 비해 무시할 수 있을 만큼 작다고 가정하였다.

$$\frac{T_{belt}}{T_m} = \frac{J_c B_{belt} S + K_{belt} J_c}{J_c J_m S^2 + B_{belt} (J_m BR^2 + J_c) S + K_{belt} (J_m BR^2 + J_c)}$$

$$\approx \frac{B_{belt} S + K_{belt}}{J_m S^2 + B_{belt} S + K_{belt}} \quad (4)$$

그림 5는 식(4)의 보드 선도를 보여주고 있다. 그림5를 기본으로 하여 벨트 풀리 시스템의 영향이 최소가 되도록 보상기를 설계하였다. 기동 시 엔진 맥동토크의 주파수는 20~30Hz에 달한다. 따라서 보상기는 그 주파수에서의 이득 감소와 위상 지연을 보상하여야 한다. 제어 목적을 만족하기 위하여 2차 보상기는 식(5)와 같이 설계하였다. 식(5)의 극점과 영점은 벨트 풀리 시스템의 극점과 영점을 상쇄시켜 벨트의 영향을 최소화 하고 원하는 토크가 크랭크축에 인가되도록 한다. 설계된 보상기의 보드 선도를 그림6에서 보여주고 있다.

$$C(S) = \omega_n \frac{J_c J_m S^2 + B_{belt} (J_m BR^2 + J_c) S + K_{belt} (J_m BR^2 + J_c)}{J_c (S + \omega_n) (B_{belt} S + K_{belt})}$$

$$\approx \omega_n \frac{J_m S^2 + B_{belt} S + K_{belt}}{(S + \omega_n) (B_{belt} S + K_{belt})} \quad (5)$$

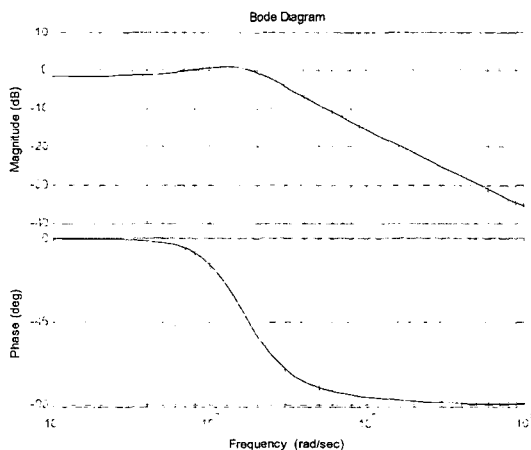


그림 5 식(4)의 보드 선도

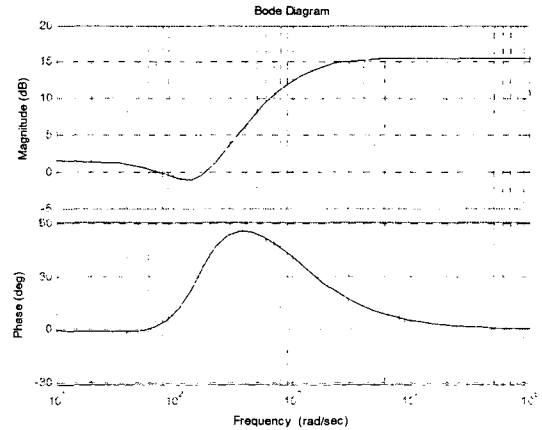


그림 6 보상기의 보드 선도

2.4 시뮬레이션 및 실험 결과

본 절에서는 앞에서 제안한 엔진 맥동토크 억제 제어 방법을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증한다. 표 1은 시뮬레이션과 실험에 쓰인 벨트, 기동발전기, 그리고 엔진의 상수를 나타낸다.

표 1 기동발전기, 엔진 그리고 벨트 상수

기동발전기 관성	J_m	0.006
엔진 관성	J_c	0.2
벨트 탄성 계수	K_{belt}	90000
벨트 댐핑 계수	B_{belt}	700
벨트비	BR	2.5

2.4.1 시뮬레이션 결과

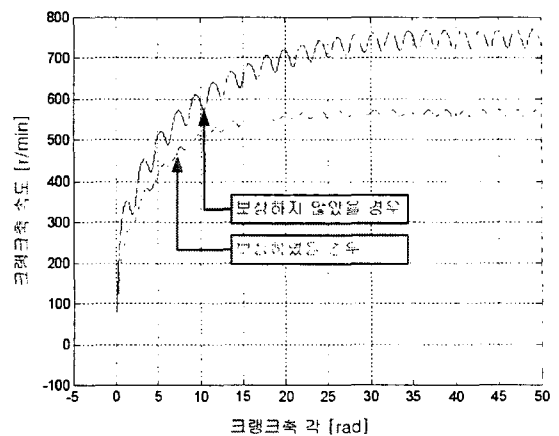
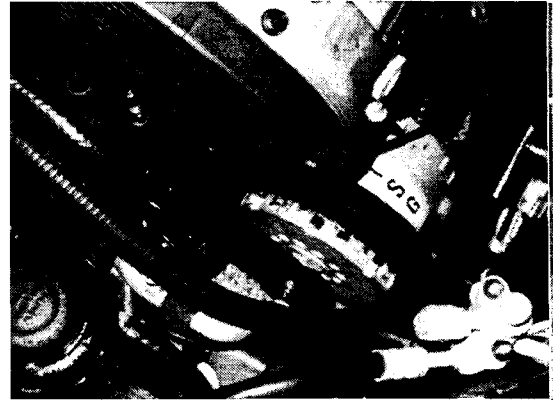


그림 7 보상 하였을 경우와 보상 하지 않았을 경우 크랭크축 속도[시뮬레이션]

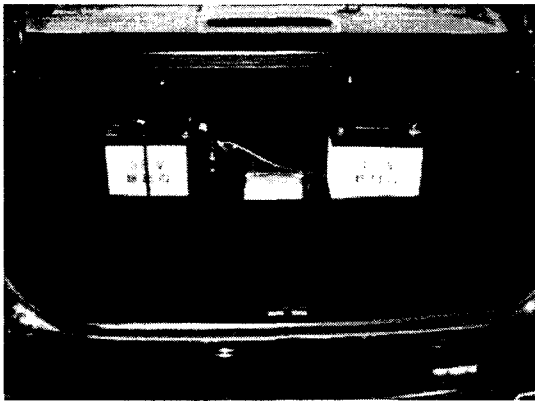
그림7은 제안된 제어방법을 매트랩/시뮬링크(Matlab/Simulink)를 이용하여 시뮬레이션 한 결과이다. x축은 크랭크축 각이고 y축은 크랭크축 속도



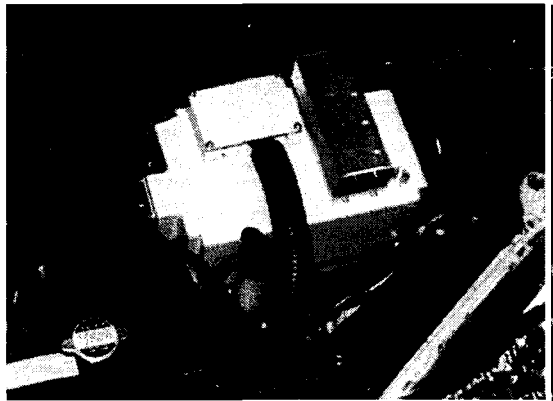
a) 실험 차량의 외관



b) 기동발전기



c) 36V, 12V배터리 와 DC/DC 컨버터



d) 인버터

그림 9 실험 차량

이다. 보상하였을 경우 보상하지 않았을 경우 보다 약 50%이상 속도의 맥동이 감소하였다. 이로부터 보상하였을 경우 기동 시 토크맥동의 감소로 차량의 승차감을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

2.4.2 실험 결과

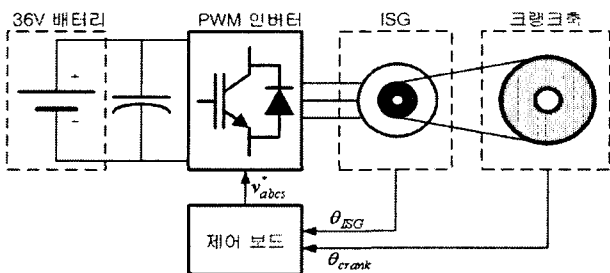


그림 8 전체 시스템 구성

제안된 제어방법을 2.5리터 6기통 가솔린 엔진을 장착한 차량에 적용하였다. 이 차량은 42V 파워네트 구성품을 장착하도록 설계되었고 36V 배터리와 12V 배터리는 DC/DC 컨버터로 연결되어 있다. 그림8은 차량에 장착되어 있는 기동발전기와 이를 제

어할 PWM인버터 및 제어보드의 전체 시스템 구성을 나타낸다. PWM인버터의 DC링크는 36V 배터리로부터 전원을 공급받고 기동발전기는 크랭크축과 벨트로 연결되어 있다. 제어보드는 기동발전기의 위치센서(Resolver)와 일반차량에 장착되어있는 크랭크축 위치센서(Crankshaft Position Sensor, CPS)로부터 각각의 위치정보를 입력으로 받게 된

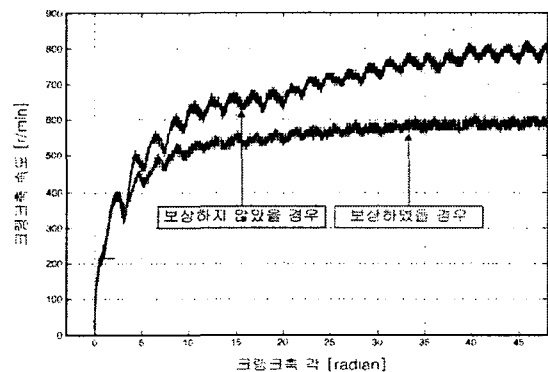


그림 10 보상 하였을 경우와 보상 하지 않았을 경우 크랭크축 속도[실험]

다. 그림9는 실험차량의 내부와 외관을 보여주고 있다. 그림을 통하여 기동발전기, 배터리, 그리고 DC/DC 컨버터를 확인할 수 있다.

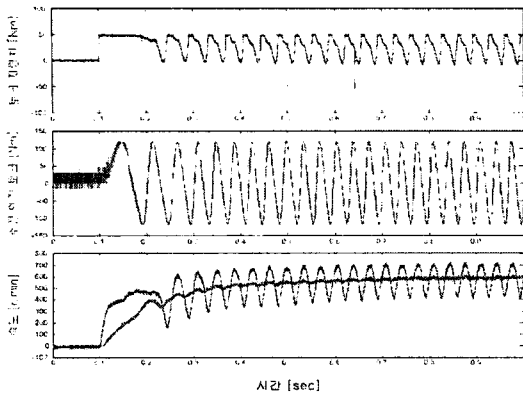


그림 11 토크 지령치, 추정 엔진 토크 그리고 기동발전기와 크랭크축 속도

그림10에서 실제 차량에서 제안된 제어방법을 적용했을 때 기동 시 엔진의 속도를 나타내었다. 보상하였을 경우 보상하지 않았을 때 보다 속도의 맥동이 50%이상 감소함을 알 수 있다. 이 결과는 시뮬레이션 결과와도 일치하며 크랭크축 맥동토크가 감소함을 보여주는 것이다. 그림11은 제안한 방법으로 보상하였을 경우 토크 지령치, 추정 토크, 그리고 기동발전기와 크랭크축 속도를 보여주고 있다. 토크 지령치는 인버터의 최대토크 값으로 제한되고 기동발전기의 속도가 증가함에 따라 약계자 제어를 하게 되어 또 다시 제한된다. 제한된 토크 값으로 인해, 그림10에서처럼 보상하였을 때와 보상하지 않았을 때, 정상상태에서 속도차이가 생기게 된다. 그러나 실제 차량에서는 500 r/min이상에서 점화를 하게 됨으로 큰 영향을 주지 않는다.



그림 12 진동센서 측정 위치

그림12는 실험차량 내부에서의 진동측정을 보여주고 있다. 실험에 사용된 진동센서는 삼축 진동센서로서 진동센서의 위치는 탑승자가 승용차의 진동을 가장 느끼기 쉬운 운전석에 위치하고 있다. 그림13에서 알 수 있듯이 보상을 하였을 경우 보상하지 않았을 경우보다 y축과 z축 약 50%의 진동이 감소함을 알 수 있다.

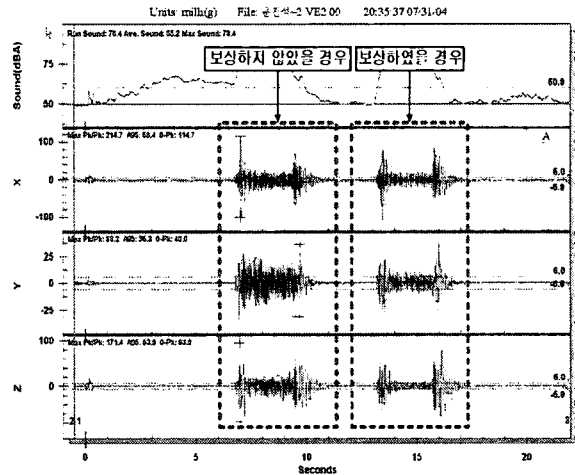


그림 13 보상하지 않았을 경우와 보상하였을 경우 차량 실내의 진동

3. 결 론

본 논문에서는 기동 시 승용차의 승차감을 향상시키기 위해 벨트 연결형 기동발전기를 사용하여 엔진의 맥동토크를 감소시키는 방법을 제안하였다. 그리고 시뮬레이션과 실험을 통해 제안한 방법의 타당성을 검증하였다. 이 실험 결과는 약 50%의 차량실내의 진동감소를 보여주고 있다. 제안한 방법은 크랭크축의 각 정보만을 필요로 하며 이 정보는 부가적인 장치 없이 차량에서 직접 얻을 수 있다. 따라서 벨트 연결형 기동발전기 장착 차량에 쉽게 적용 할 수 있다.

이 논문은 현대자동차의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] Teratani, T.; Kuramochi, K.; Nakao, H.; Tachibana, T.; Yagi, K.; Abou, S., "Development of Toyota Mild Hybrid System (THS-M) with 42V PowerNet", IEEE International on Electric Machines and Drives Conference, vol. 1, 3 - 10, June 2003
- [2] Hyeun-Dong Lee; Seung-Ki Sul, "Diesel Engine Ripple Torque Minimization for Parallel Type Hybrid Electric Vehicle", Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting, Conference Record of the 1999 IEEE vol. 3 - 7, Oct. 1999
- [3] Davis, R.I.; Lorenz, R.D., "Engine torque ripple cancellation with an integrated starter alternator in a hybrid electric vehicle: implementation and control", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, 1765 - 1774, Nov.-Dec. 2003
- [4] U. Kiencke; L.Nielsen, "Automotive Control Systems for Engine, Driveline, and Vehicle", SAE International, 2000
- [5] J. S. Sandhu; M. K. Wehrly; W. F. Resh, "An Investigation of Rotational Response of Accessory Drive Serpentine Belt System", Society of Automotive Engineers, 2001