

# 차량 동력 전달계의 비틀림 가진원에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Torsional Excitation Source of the Vehicle Driveline

장 일 도\* · 김 병 삼†

Il-Do Chang and Byoung-Sam Kim

(2005년 5월 10일 접수 : 2005년 7월 14일 심사완료)

**Key Words** : Driveline(동력전달계), Engine(엔진), Propeller Shaft(추진축), Torsional Vibration(비틀림 진동), Harmonic Excitation(조화가진)

### ABSTRACT

Torque fluctuation of the engine and angular velocity variation of propeller shaft is the main excitation source for torsional vibration in the vehicle driveline. Experimental model for engine system is constructed with 4 cylinder 4 cycle diesel engine including Motor-Propeller Shaft-Axle-Wheel system. The angular velocity is measured by magnetic pickup and FV converter at the engine flywheel and propeller shaft. This paper presents the theoretical mechanism of these excitation sources and it is identified by the experimental methods.

### 1. 서 론

차량의 진동과 소음 문제에 있어서 가진원을 정량화하는 것은 이를 해석하기 위해 먼저 수행되어야 할 과제이다. 차량에 대한 가진원은 엔진의 내부적인 요소와 지면의 영향에 의해 발생하는 외부적인 요소들 들 수 있다. 내부적인 요소로는 동력 전달계에서 발생하는 가진력을 들 수 있다. 동력 전달계에서 발생하는 주요 가진 효과는 엔진의 폭발에 따른 토크 변동<sup>(1,2,3,7)</sup>과 교각을 포함한 추진축의 기구학적 특성에 기인한 속도 변동<sup>(1,5,6,7)</sup>을 들 수 있다.

엔진의 가진력은 실린더 내부의 폭발에 따른 압력 변동에 의한 가진력과 피스톤 및 회전 부품의 관성에 의한 영향을 함께 포함하고 있으며 엔진의 행정 수와 실린더의 수 및 회전수에 따라 주 진동 주파수가 결

정이 된다. 추진축은 유니버설 조인트의 교각에 따른 피동축이 구동축의 회전 속도에 대해 2차 조화 주파수 가진을 갖게 된다. 이 연구에서는 엔진과 추진축의 가진 효과를 실험적으로 해석하므로 동력 전달계에서의 비틀림 가진 효과를 확인하고 이론적인 해석의 검증을 수행하고자 한다. 엔진의 가진 효과를 파악하기 위하여 4 실린더 4행정 디젤 엔진을 실험 대상으로 선정하였으며 또한 추진축의 가진 효과를 파악하기 위하여 추진축을 포함하는 실험장치를 구성하였다. 추진축의 가진 효과를 파악하기 위한 실험 장치는 모터-추진축-액슬-휠로 이루어졌다. 엔진은 플라이휠과 추진축의 각속도를 측정하였으며 결과를 각각 이론식과 비교하였다. 그리고 여기서 얻어진 실험 결과는 동력전달계에서 발생하는 비틀림 진동을 해석하기 위한 가진력으로 사용하고자 한다.

### 2. 이론적 배경

#### 2.1 엔진의 가진력

엔진 가진력의 주 원인은 실린더 내부에서의 폭발 압력이다. 크랭크 축의 회전에 따라 각각의 실린더는

† 책임저자: 정희원, 순천제일대학 자동차기계과

E-mail : anvkbs@suncheon.ac.kr

Tel : (061)740-1309, Fax : (061)740-1312

\* 정희원, 전북대학교 공과대학 정밀기계공학과

일정한 위상을 가지고 폭발하게 된다. 엔진의 폭발력에 기인한 가진력은 각 실린더의 행정 수, 엔진의 실린더 수 및 회전수의 함수로 작용한다. 식 (1)은 동력 전달계에 있어서 주로 작용하게 되는 가진력의 성분을 엔진 회전수에 대한 조화 차수로 나타 낸 것이다.  $N_{cylinder}$ 와  $N_{cycle}$ 은 각각 실린더 수와 행정수를 나타낸다. 식 (1)로 부터 4행정 4실린더 엔진은 크랭크축 회전수의 2, 4, 6…… 차가 주성분임을 알 수 있다.

$$ORDER_{dominant} = \frac{N_{cylinder}}{N_{cycle}/2} \quad (1)$$

단, 실린더에 의해 크랭크축에 가해지는 토크는 식 (2)와 같다.

$$T(t) = T_g(t) + T_{rec}(t) \quad (2)$$

이때,  $T_g(t)$ ,  $T_{rec}(t)$ 는 각각 가스의 폭발에 의해 발생하는 토크와 피스톤과 커넥팅 로드 부품의 관성에 의해 발생하는 토크이다. 이들 항은 각각 삼각 함수의 급수 형태로 나타낼 수 있으며 식 (3)과 같이 정리 할 수 있다.

$$\begin{aligned} T(t) &= \sum_{k=0.5}^{h_0} s_k \sin(k\omega t) + \sum_{k=0.5}^{h_0} c_k \cos(k\omega t) \\ &= \sum_{k=0.5}^{h_0} T_k \sin(k\omega t + \gamma_k) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $k$ 는 조화진동 차수이고  $\omega$ 는 크랭크 축의 각속도이다.  $T_k$ 와  $\gamma_k$ 는 각각  $k$ 번 째 차수의 가진 토크와 위상각이 이 논문에서 모델로 선정된 4 실린더 엔진은 각 실린더마다  $\pi$  rad 씩의 위상차와 순서를 가지고 폭발하게 된다. 따라서 각 실린더에서 발생하는 토크는 동일하고 위상차만 고려하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T_q(t) &= \sum_{k=0.5}^{h_0} T_k \sin\{k\omega(t - \Delta t) + \gamma_k\} \\ \Delta t &= \pi(q-1) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $q$ 는 폭발 순서이다.

플라이휠에 가해지는 토크는 4개의 실린더의 폭발 압력을 합산한 결과로 식 (5)와 같다.

$$T_{Flywheel} = \sum_{q=1}^4 T_q \quad (5)$$

## 2.2 추진축의 가진력

추진축은 상하교각( $\beta$ )과 좌우교각( $\alpha$ )을 갖는 유니버설 조인트를 포함하고 있다. 이로 인하여 구동 회전각  $\theta_{11}$ 과 피동 회전각  $\theta_{12}$ 는 식 (6)과 같은 관계를 갖는다.

$$\tan \theta_{12} = \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \tan \theta_{11} + \tan \alpha \sin \beta \quad (6)$$

식 (6)은 측면 및 평면 교각을 고려한 경우이고 측면 교각만을 고려하고, 0°위상차의 유니버설 조인트를 갖는 경우 식 (7)과 같다.

$$\theta_{12} = \arctan\left(\frac{1}{\cos \alpha} \tan \theta_{11}\right) \quad (7)$$

식 (7)을 급수 전개 한 후 고차 항을 무시하면 식 (8)~(10)을 구할 수 있다. 이를 이용하여 각각 피동축의 각변위, 각속도, 각가속도를 구동축의 각변위로 나타낼 수 있다.

$$\theta_{12} = \theta_{11} + \epsilon \sin 2\omega t \quad (8)$$

$$\dot{\theta}_{12} = \omega(1 + 2\epsilon \cos 2\theta_{11}) \quad (9)$$

$$\ddot{\theta}_{12} = -4\omega^2 \epsilon \sin 2\theta_{11} \quad (10)$$

이때,  $\epsilon = \tan^2(\frac{\alpha}{2})$ 이다.

## 3. 실험 장치 및 구성

엔진의 가진력은 플라이휠 후미에 설치된 동력을 전달 및 차단 기능을 갖는 클러치를 통하여 동력 전달계로 전달된다. 따라서 엔진에서 발생한 비틀림 가진력의 합은 플라이휠에서의 토크 변동이라고 볼 수

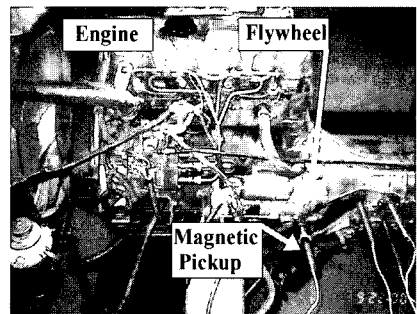


Fig. 1 Photograph of the flywheel torque fluctuation measuring apparatus

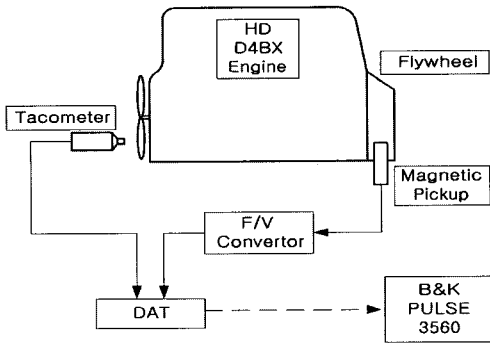


Fig. 2 Schematic diagram of flywheel fluctuation measuring system

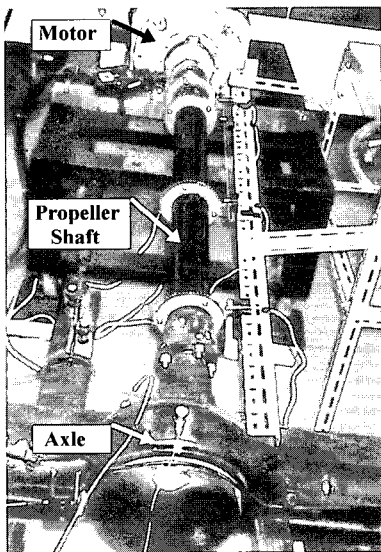


Fig. 3 Experimental setup for propeller shaft effect

Table 1 Elements of the experimental apparatus

Elements	Specification
Engine	HD D4BX
Motor	SDT-0374, 3.7kW
Propeller shaft	701×76.2×1.6
Axle	PCD 183
Wheel & tire	4J×13/5.00×13

Table 2 List of equipment and sensor

Equipments & Sensors	Specification
Tacho probe	GWI Ltd. Model PI 231
Magnetic pickup	Electro Co. Model 58423
F/V converter	Onosoki FV-5304
Digital tape recorder	Sony PC 208Ax
FFT analyzer	B&K 3560 Pulse

있다. 플라이휠에서의 각속도를 측정하기 위하여 해석 대상인 엔진의 플라이휠 위치에 구멍을 뚫어 마그네틱 픽업을 삽입한 후 각속도를 측정하였다. 마그네틱 픽업에서 발생한 신호는 펄스 신호이며, 이 신호를 바로 각속도 신호로 변환하는데는 어려움이 있어 F/V 변환기(frequency voltage converter)를 이용하였다. 그리고 F/V 변환기를 통한 연속 신호를 디지털 테이프 레코더에 저장하여 주파수 분석기로 분석하였다. Fig. 1은 이 연구에서 수행한 엔진 실험 장치이며 센서의 설치 위치를 보여준다. Fig. 2는 센서와 계측기의 설치 위치를 개략적으로 보여준다. 여기서 F/V 변환기 신호는 각속도 신호이다. 따라서, 플라이휠에서의 토크는 여기서 얻어진 각속도 신호를 한번 미분하여 각속도를 구하고 이 값에 플라이휠의 관성을 곱하면 토크를 구할 수 있다. 플라이휠의 관성은 실험에 사용된 엔진의 플라이휠을 실측한 자료를 이용하였다.

Fig. 3은 추진축의 각속도 변동을 측정하기 위한 실험 장치이다. 여기서 엔진의 가진 효과를 없애기 위하여 모터로 구동하였고, 유니버설 조인트의 교각에 의한 2차 성분의 가진력이 발생하였다. 추진축의 각속도 변동을 측정하기 위하여 관성을 무시할 정도의 작은 질량을 갖는 톱니를 제작하여 설치하고 센서를 톱니에 근접하게 설치하여 각속도를 측정하였다.

Table 1은 Fig. 1과 Fig. 3의 실험 장치에 사용된 명세표이다.

#### 4. 실험 결과 및 분석

Fig. 4는 엔진의 회전속도가 850 rpm일 때 플라이휠에서의 속도 변동을 측정한 결과이다. 수평축은 시간을 나타낸다. 수평축의 범위는 0.14초로 850 rpm일 때의 한 사이클(4 행정)에 해당하는 시간이다. 850 rpm을 중심으로 속도 변동이 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5는 플라이휠에서의 토크 변동을 보여준다. Fig. 6은 이 연구에서 사용되어진 실험대상의 데이터 값을 사용하여 식 (5)를 수치 해석한 결과이다. 엔진계는 전체적으로 6자유도계로 모델링하였다. 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하여 보았을 때 전체적인 크기나 경향은 일치하나 실험 결과에 고주파 성분이 실려 있음을 알 수 있었다. 이는 이상적이고 간략화된 수치 해석 결과에 비해 실제 엔진의 작동과

측정에 따른 외란의 영향일 것으로 생각한다. 또한, 이들은 식 (5)에 대응되는 결과로 각각의 실린더에서 발생한 폭발 압력과 관성력에 의한 토크가 크랭크축을 통하여 중첩되어 나타난 결과이다. Fig. 7과 Fig. 8은 각각 Fig. 5와 Fig. 6을 주파수 분석한 결과다. Fig. 8의 가로축은 차수 좌표로 나타나 있다. 따라서, 2차는 850 rpm(14.17 Hz)의 2차 성분인 28.3 Hz에 해당한다.

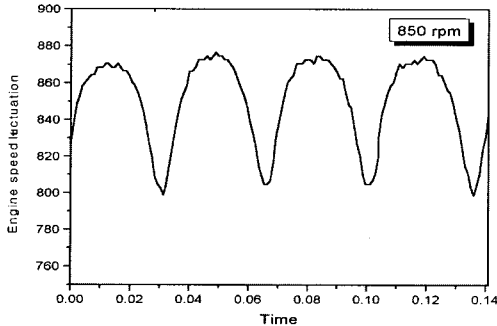


Fig. 4 Engine speed fluctuation of flywheel(850 rpm, experiments)

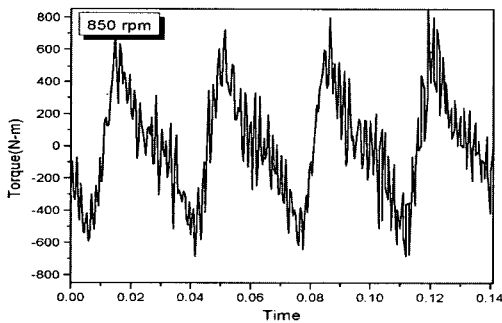


Fig. 5 Torque fluctuation of flywheel (850 rpm, experiments)

Fig. 9는 모터-추진축-액슬 계에 대하여 교각의 효과를 실험한 결과이다. 1000 rpm으로 일정하게 회전시키고 교각을 3°, 6°, 9°로 변화시켰을 때의 추진축의 교각 후방에서의 각속도 변동을 보여준다. 교각이 증가함에 따라 진폭이 커짐을 알 수 있다. 이는 식 (9)에서 교각이 증가할수록  $\epsilon$  값이 증가함에 따라 각속도의 변동 성분의 진폭이 증가하는 것과 일치한다. 3°~6°로 증가했을 때보다 6°~9°로 변화했을 때의 진폭의 변화가 더 큰 것은  $\epsilon$  값이  $\tan^2$ 의 함수로 비례하기 때문이다. 교각의 효과만을 보기 위하여 1000 rpm으로 모터를 회전시켰으므로 1000 rpm(16.67 Hz)의 2차에 해당하는 각속도 변동이 나타나야 한다. 따라서, 가로축의 시간인 0.5초 안에는 16.7개 정도의 각속도 변동 주기가 확인되어야 한다. 3°의 경우 8.5개 정도의 큰 변동이 보이는데 각각의 큰 변동 사이에 작은 변동이 관찰되어진다. 이는 3°의 교각에 따른 각속도 변동의 크기가 두드러지게 크지 않음과, 장치로 구성된 회전축의 불균형 등이 영향을 미치는 것으로 보인다. 유니버설 조인트의 교각이 커질수록

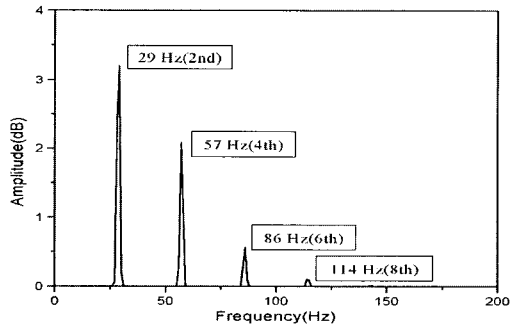


Fig. 7 Frequency spectrum of excitation torque on flywheel(850 rpm, experiments)

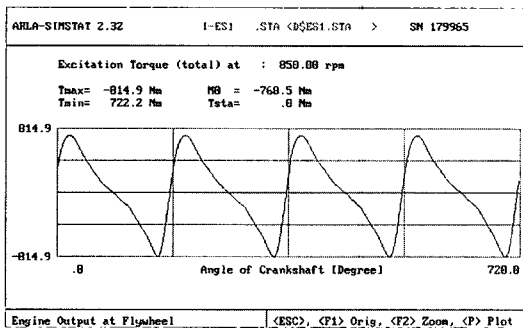


Fig. 6 Torque fluctuation of flywheel (850 rpm, simulation)

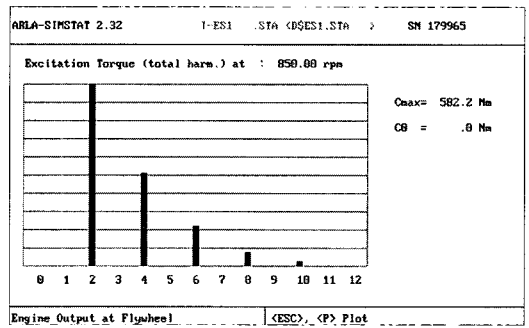


Fig. 8 Frequency spectrum of excitation torque on flywheel(850 rpm, simulation)

불균형에 의해 구별되지 않았던 각속도의 변동이 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 교각을 6°로 고정시킨 상태에서 입력축의 회전수만 500, 1000, 1500 rpm으로 증가시킨 경우에 대한 실험 결과이다. 역시 회전수가 증가함에 따라 진폭이 커지면서 각속도 진동 횟수도 증가한다. 회전 속도가 500 rpm의 경우 교각에 따른 각속도 불균형이 크게 두드러지게 나타나지는 않지만 회전속도가 1500 rpm인 경우 1500 rpm(25 Hz)의 2차 성분의 각속도 변동이 현저하게 증가하였음을 알 수 있다. 여기서, 진폭에 있어서 상당한 불규칙성이 보이는데 이는 실험 장치에서 발생한 외란 등의 영향으로 생각된다.

Fig. 11은 이 실험에서 구성되었던 부품들의 물성치를 근거로 모터에서 액슬까지의 실험장치를 10 자유도 집중 질량계로 등가 모델링하여 수치 해석한 결과이다. 각각 3°, 6°의 교각을 갖으면서 1000 rpm으로 회전되는 경우 출력 축에서의 각속도 변동을 보여준다. 이 결과 역시 식 (9)를 만족시키며 3°의 교각을 갖는 경우 그 변동량도 작으며 각속도의 변동이 상당히 불균일 함을 알 수 있다. 6°로 교각이 커지면서 각속도의 변동량이 거의 균일한 형태로 나타나면서 진폭이 증가함을 알 수 있다. 이 결과는 실험에 의한 결과와 그 경향이 잘 일치하고 있음을 보여준다.

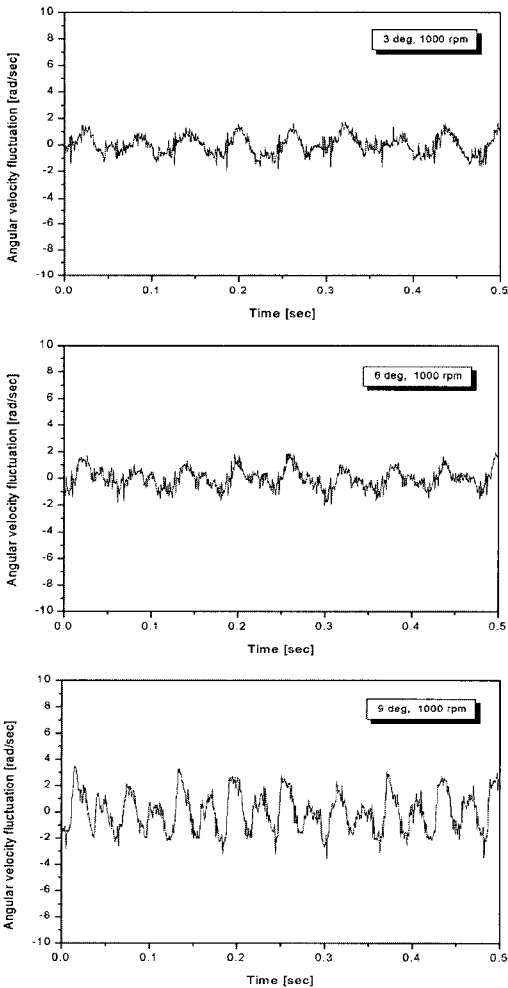


Fig. 9 Angular velocity fluctuation of propeller shaft (3°, 6°, 9°, 1000 rpm)

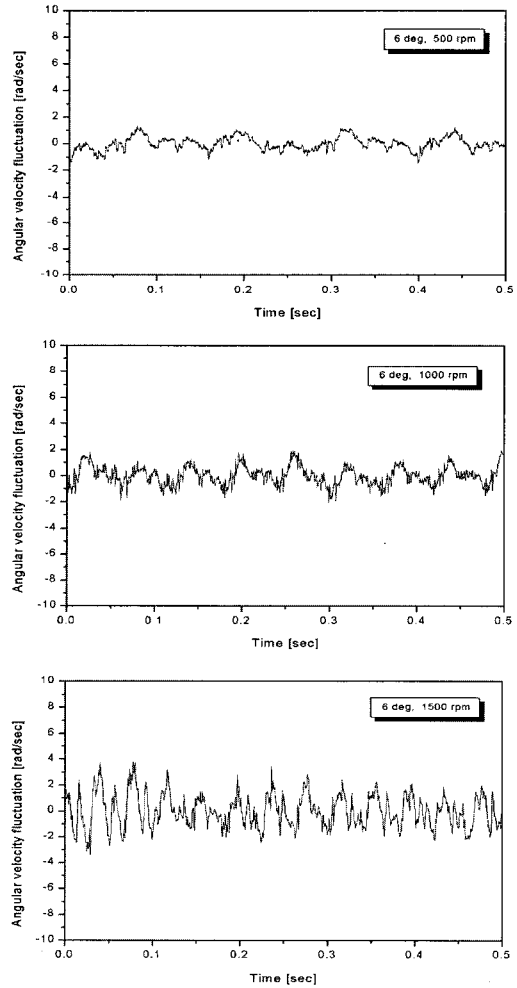


Fig. 10 Angular velocity fluctuation of propeller shaft (6°, 500 rpm, 1000 rpm, 1500 rpm)

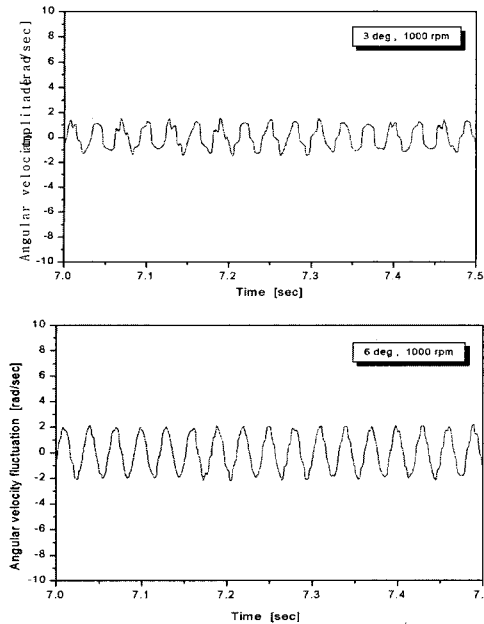


Fig. 11 Angular velocity amplitude of propeller shaft (3°, 6°, 1000 rpm. simulation)

### 5. 결론 및 고찰

이 연구에서는 차량 동력 전달계에서 발생하는 비틀림 진동의 주 가진원인 엔진내부 가진력과 추진축의 교각 효과에 따른 각속도 변동에 대한 가진력의 해석과 실험을 수행하였으며 이를 요약하면 다음과 같다.

(1) 엔진의 가진의 발생 메커니즘의 이론해석과 실험 결과를 비교한 결과 비교적 잘 일치하고 있다. 또한, 추진축의 가진 효과는 유니버설 조인트의 교각과 회전 속도의 제곱에 비례하였고 실험결과도 유사하였다.

(2) 이 연구에서 얻어진 실린더 폭발력에 의한 성

분 값과 추진축의 교각 효과에 의해 발생하는 속도 변동 값은 동력전달계의 비틀림 진동 해석에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 또한, 이 논문에서는 엔진 토크 변동과 추진력의 교각에 의한 가진력을 분리하여 실험하고 검토하였지만 동시에 복합된 상태에서 동력 전달계에 미치는 현상 등을 파악하여야 할 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

- (1) Wilson, W. K., 1971, "Practical Solution of Torsional Vibration Problems," Vol. 1, Chapman & Hall Ltd.
- (2) B. I. C. E. R. A. Research Laboratory, 1958, "A Handbook on Torsional Vibration," Cambridge at the University Press.
- (3) Rizzoni, R., 1989, "Diagnosis of Individual Cylinder Misfires by Signature Analysis of Crankshaft Speed Fluctuation," SAE Paper 890884.
- (4) Taraza, D., 1993, "Estimation of the Mean Indicated Pressure from Measurements of the Crankshafts Angular Speed Variation," SAE Paper 932413.
- (5) Joyner, Robert G., 1976, "The Truck Drive line as a Source of Vibration," SAE Paper 760843.
- (6) Otake, T., et. al, 1992, "Prediction of Torsional Vibration Caused by Hook's Joint in Drive Train," SAE Paper 925068.
- (7) 박보용 "차량역학" 동명사.
- (8) 김병삼, 2005, "자동차 새시 설계를 위한 자동차 타이어 도로소음에 관한 실험적 연구" 한국소음진동공학회논문집, 제 15 권, 제 4 호, pp. 375~381.