

## 소형 터보과급기 로터의 관성모멘트 측정

정진은\*, 전세훈<sup>2</sup>, 이상운<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국기술교육대학교 기계공학부, <sup>2</sup>한국기술교육대학교 대학원 기계공학과

### Measurement of Moment of Inertia of a Small Turbocharger Rotor

Jin-Eun Chung<sup>1\*</sup>, Se-Hun Jeon<sup>2</sup>, Sang-Woon Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ. of Technology and Education

<sup>2</sup>Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Korea Univ. of Technology and Education

**요약** 본 논문은 엔진 다운사이징의 관점에서 널리 사용되는 터보과급기 로터의 관성모멘트 측정에 관한 연구이다. Trifilar 방법을 이용하여 관성모멘트를 측정하기 위한 장치를 설계 제작한 후, 장치를 검증하기 위하여 교정로터의 관성모멘트를 측정하였다. 측정의 변동계수는 0.43%, CAD 도면의 관성모멘트와 비교하여 0.75% 오차를 보여 개발된 측정장치가 로터의 관성모멘트 측정에 적합함을 확인하였다. 소형 터보과급기의 터빈 로터와 압축기 휠 각 2개에 대한 관성모멘트 측정을 수행하여 1.0% 미만의 변동계수를 보여 정밀한 측정이 가능함을 보였다. 그러나 CAD 도면의 관성모멘트와 비교한 오차는 터빈 로터는 2.76%와 1.30%로 양호하였으나, 압축기 휠의 경우 27.6%와 24.4%로 상당히 크게 나타났다. 연구에 사용된 압축기 휠은 질량이 소형으로 상대적으로 공기저항이 크고 정확한 주기 측정의 어려움으로 큰 오차를 보였다. 따라서 터빈 로터와 압축기 휠을 결합한 상태에서 측정한 값에서 터빈 로터의 관성모멘트를 빼는 간접 방법으로 측정을 수행하였다. 이때 압축기 휠의 관성모멘트 측정에서 1.2% 미만의 변동계수를 보이고 오차는 5.68%, 7.88%의 값을 보였다.

**Abstract** Measurements of the moment of inertia of a small turbocharger rotor were studied. A measuring device was manufactured using the trifilar method and the moment of inertia of the calibration rotor was measured to verify the device. The coefficient of variation was 0.43% and the error was 0.75%. The results showed that the device is suitable for measuring the moment of inertia of a turbocharger rotor. Next, the moment of inertia for two turbine rotors and compressor wheels was measured. Those for the turbine rotors showed precise and accurate results in that the coefficients were under 1.0% and the errors were under 3.0%. On the other hand, those for the compressor wheel were precise but inaccurate in that the coefficients were under 1.0% and the errors were over 24.4%. Therefore an indirect method for the compressor wheel was suggested. The results showed that the coefficients were under 1.2% and the errors were under 7.88%.

**Keywords** : Compressor wheel, Moment of inertia, Small turbocharger, Trifilar method, Turbine rotor

### 1. 서론

수송 및 발전 분야에서 광범위하게 사용되는 있는 내연기관에 대하여 대기환경오염과 연비에 대한 규제가 강화되고 있다. 이러한 강화된 규제를 만족하기 위한 효과적인 방법 중 하나가 터보과급기를 이용한 다운사이징이

다[1]. 대형 디젤엔진에 주로 사용되는 터보과급기는 소형 가솔린엔진까지 적용되고 있다[2]. 엔진의 다운사이징은 터보과급기와 결합되어 유해 배기가스 배출량을 줄이고, 엔진출력 당 배기량을 감소시켜 연비향상 효과를 나타내고 있다.

이러한 터보과급기 로터의 관성모멘트는 엔진의 가속

\*Corresponding Author : Jin-Eun Chung(Korea Univ. of Technology and Education)

Tel: +82-41-560-1152 email: jechung@koreatech.ac.kr

Received January 24, 2017

Revised (1st February 9, 2017, 2nd February 15, 2017)

Accepted March 10, 2017

Published March 31, 2017

성능에 직접적인 영향을 미치는 주요 인자[3]이므로 터보과급기의 성능평가를 위한 제원으로 관리되며, 터보과급기를 설계하고 성능을 예측하기 위한 기준이 된다. 관성모멘트는 CAD 도면으로부터 계산 될 수 있지만, 기하학적 구조가 복잡하고, 정확한 세부정보가 없을 경우에는 실험을 통해 관성모멘트를 측정해야 한다.

또한, 터보과급기 로터의 관성모멘트가 감소하면 터보과급기의 응답속도는 향상되며 터보과급기 신제품 개발을 위해 기존의 제품과 관성모멘트에 대한 비교 검토가 필요하다. 따라서 터보과급기 로터의 구성품인 터빈 로터와 압축기 휠의 각각의 관성모멘트 측정을 통해 응답 성능을 평가해야 한다.

이러한 관성모멘트의 실험적 측정을 위해서 줄의 진동운동을 이용하여 진동 주기를 측정하여 관성모멘트를 산출하는 Filar Method가 널리 사용되고 있다. Genta와 Delprete[4]는 진동과 가속도가 결과에 미치는 영향에 대해 분석하였다. Schwartz 등[5]은 비틀림을 활용한 Multifilar Method를 연구하였고, Lyons[6]는 회전관의 비틀림 각도가 결과에 미치는 오차를 연구하였다.

위의 연구에서는 특정한 측정 대상이 아닌 이론과 실험 방법에 초점을 두고 있다. 하지만 국내 터보과급기 생산업체의 신제품 성능 측정을 위해 자동차용 터보과급기의 관성모멘트 측정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 3개의 줄을 사용한 Trifilar Method[7,8]를 바탕으로 한 측정 장치[9]를 제작하였다. 실험장치의 타당성을 검증하기 위하여 교정 로터(calibration rotor)를 사용하여 측정값을 비교 검토하였다. 그리고 제작된 측정 장치를 사용하여, 경차용 가솔린엔진에 사용되는 소형 터보과급기의 터빈 로터와 압축기 휠의 관성모멘트를 측정할 수 있는 방안을 제시하였다.

## 2. 관성모멘트 측정

### 2.1 Trifilar Method

Trifilar Method는 3개의 줄에 연결된 디스크에 터보과급기 로터를 매달아 비틀림에 의한 진동 주기를 측정하여 관성모멘트를 계산한다. 이론식의 성립을 위해 터보과급기 로터의 질량중심 축과 비틀림 회전축이 동일하여야 한다. 이때 진동 주기는 일정하며, 진동 폭과 진동 주기는 독립적인 관계이다.

$\varphi$ 는 디스크의 비틀림 각이며,  $r$ 은 디스크 질량중심에서 줄의 중심까지의 거리,  $l$ 은 줄의 길이 그리고  $\theta$ 는 줄의 비틀림 각도를 나타낸다.

초기상태의 위치부터 디스크를  $\varphi$ 각도만큼 비틀어 주었을 때, 줄은 수직방향 성분과 수평 방향 성분의 힘을 받게 되며, 이때 수평방향의 힘은 다시 정지위치부터 디스크를 이동시키려고 하는 토크를 발생시킨다. 이때의 토크  $\tau$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\tau = 3rF_{\varphi} = -3r \frac{mg}{3} \tan \theta = -mgr \tan \theta \quad (1)$$

여기서  $g$ 는 중력가속도,  $m$ 은 줄과 디스크를 포함한 매달린 장치의 질량을 나타낸다.

평면에서 비틀림 각  $\varphi$  와 정면에서 비틀림 각  $\theta$  사이의 관계는 다음과 같다.

$$\theta = \arcsin\left(\frac{2r}{l} \sin \frac{\varphi}{2}\right) \quad (2)$$

따라서 발생한 토크는  $\varphi$  방향으로 회전 진자 운동의 각가속도를 만들어 주며, 운동방정식은 다음과 같다. 여기서  $J$ 는 장치의 관성모멘트를 나타낸다.

$$J\ddot{\varphi} = -mgr \tan\left(\arcsin\left[\frac{2r}{l} \sin \frac{\varphi}{2}\right]\right) \quad (3)$$

이때,  $\varphi$ 가 충분히 작고,  $r \ll l$ 의 조건을 적용하면, 다음과 같이 근사적으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \sin \frac{\varphi}{2} &\approx \frac{\varphi}{2} \\ \arcsin \frac{2r}{l} \frac{\varphi}{2} &\approx \frac{2r}{l} \frac{\varphi}{2} \\ \tan \frac{2r}{l} \frac{\varphi}{2} &\approx \frac{r\varphi}{l} \end{aligned} \quad (4)$$

이러한 근사식을 식 (3)에 적용하면 다음과 같이 간략화 된다.

$$\ddot{\varphi} + \frac{mgr^2}{Jl} \varphi = 0 \quad (5)$$

이와 같은 진자 운동방정식의 해는 다음과 같이 표현된다. 여기서  $T$ 는 진동 주기이다.

$$J = \frac{mgr^2}{l} \left( \frac{T}{2\pi} \right)^2 \quad (6)$$

이 관계식을 사용하면 장치의 질량  $m$ , 줄의 길이  $l$ , 줄의 중심까지 거리  $r$ 이 결정된 장치에서 진동주기  $T$ 를 측정하면 측정 대상 물체의 관성모멘트  $J$ 를 산출할 수 있다.

### 2.2 측정 장치

측정 장치는 측정 대상 물체를 매달 수 있는 디스크와 3개의 줄, 이 줄들의 길이를 조절하며 수직/수평 정렬을 유지하는 스탠드, 진동 운동의 주기를 측정하는 광학 장치 등으로 구성된다. 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

측정 장치를 설계 및 제작하는 과정에서 측정의 정확도를 향상시키기 위해 몇 가지 부품을 추가하였다. 상황에 따라 줄 길이를 조절하여 정렬상태를 유지할 수 있도록 줄 길이 조절 장치를 부착하였으며, 정교하고 정확한 비틀림 각을 제공하기 위해 소켓을 사용한 비틀림 조절 장치를 적용하였다.

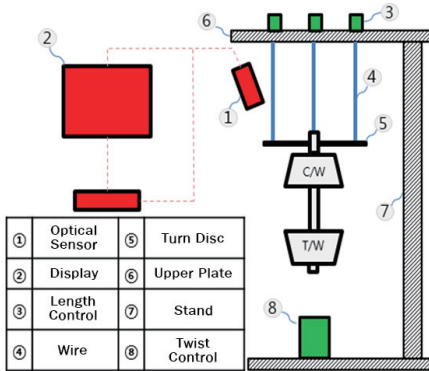


Fig. 1. Schematic of experimental device

Table 1. Moment of inertia and mass of the components of the experimental equipment

Components	Moment of inertia [kg.m <sup>2</sup> ]	Mass [kg]
Turn Disc(60*2mm)	6.690E-06	0.01480
Piano wire(0.20mm) 3ea	4.504E-07	0.00072
Spacer	1.424E-08	0.00154
Nut for calibration rotor	5.220E-09	0.00066
Left nut	2.056E-08	0.00139

실험 결과에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단되는 진동 주기를 정확하게 측정하기 위해 광학 포토 센서와 카운터, 타이머 장치를 사용하여 진동주기 측정 시스템을 구성하였다. 이때 포토 센서에서 나오는 광원에 볼록 렌즈를 장착하여 광원의 직경을 줄여서 미세한 비틀림 진자 운동에서의 주기 측정을 가능하게 하였다.

또한 터보과급기 로터의 관성모멘트 측정 장치의 구성품의 기본 자료를 Table 1에 나타내었다. 여기서 관성모멘트는 CAD 도면으로부터 계산하였고 질량은 측정된 결과이다.

## 3. 측정결과 및 분석

### 3.1 측정 대상

터보과급기는 다음 Fig.2과 같이 터빈 하우징, 압축기 하우징 및 센터 하우징 회전체(CHRA)으로 구성된다. 또한 센터 하우징 회전체는 로터와 베어링 하우징으로 나누어진다.

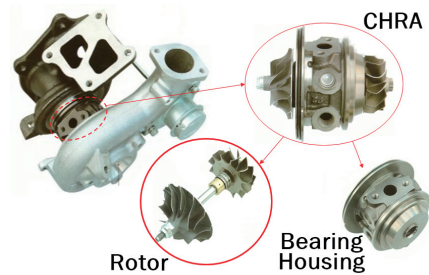


Fig. 2. Components of turbocharger

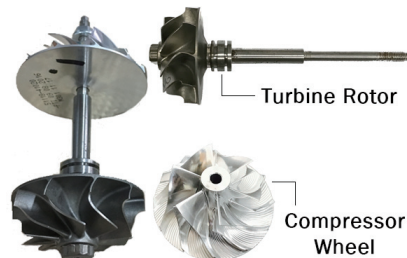


Fig. 3. Small turbocharger rotors

측정 대상인 터보과급기 로터는 터빈 로터와 압축기 휠로 구성된다. 여기서 터빈 로터는 터빈 휠과 축으로 연결체이다. Fig. 3에서 조립된 형상과 분리된 형상 각각을

보여주고 있으며 기본 자료를 Table 2에 나타내었다. 여기서 관성모멘트는 CAD 도면으로부터 계산하였고 질량은 측정된 값이다.

Table 2. Specifications of the turbocharger rotor

Component	Exducer diameter [mm]	Trim [%]	Mass [g]	Moment of inertia [kg·m <sup>2</sup> ]
Turbine rotor(#1)	29.0	62.78	62.90	4.00E-06
Turbine rotor(#2)	29.1	61.86	62.55	4.00E-06
Compressor wheel(#1)	44.0	52.89	18.53	2.36E-06
Compressor wheel(#2)	43.6	52.53	18.54	2.36E-06

### 3.2 교정 로터

본 연구를 위해 설계 제작된 관성측정 장비의 타당성을 검증하기 위해 교정 로터를 제작하였다. 교정 로터는 Fig. 4와 같이 축과 디스크 형태의 로터로 구성되며, Table 3에 상세 제원을 나타내었다.



Fig. 4. Calibration rotor

Table 3. Specifications of the calibration rotor

Turn Disc Radius	0.03m
Wire Length	1m
Twisting Angle	15 degree
Calibration Rotor Mass [kg]	0.06214
Components Mass [kg]	0.0169
Moment of inertia from CAD [kg·m <sup>2</sup> ]	8.086E-06

교정 로터의 기하학적 형상은 측정할 터빈 로터를 기반으로 하되 최대한 단순화하였고, 재질은 알루미늄 합금 단일재질로 제작하였다.

2.2절에서 설명한 측정 장치에 Fig. 5와 같이 교정 로터를 장착하고 디스크를 각 15° 비틀어 회전 진자 운동 발생시켜 진동 주기를 측정하여 관성모멘트를 산출하였다. 측정 과정에서 초기 10 cycle은 무시하였으며, 100 cycle에서의 주기 값을 측정하였다. 이를 5회 반복하고

측정값들의 평균값을 사용하였다. 실험을 수행하여 측정된 결과를 Table 4에서 결과를 보여주고 있다.

제작된 장치를 이용하여 측정된 교정 로터의 평균 관성모멘트는  $8.025 \times 10^{-06} \text{kg}\cdot\text{m}^2$  이다. 표준편차와 평균 관성모멘트의 비로 정의되는 변동계수는 0.43%이고 CAD 도면에서 구한 관성모멘트와 비교하여 0.75%의 오차를 보이고 있다.

그러므로 개발된 측정 장치는 로터 형태의 관성모멘트 측정에 적절하다고 판단된다.

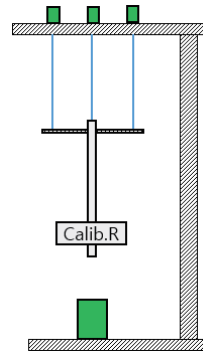


Fig. 5. Schematic of measurement for calibration rotor

Table 4. Measured values of the calibration rotor

	Moment of inertia [kg·m <sup>2</sup> ]
1	8.075E-06
2	8.039E-06
3	7.987E-06
4	8.026E-06
5	8.000E-06
Average Moment of inertia [kg·m <sup>2</sup> ]	8.025E-06
Standard deviation [kg·m <sup>2</sup> ]	3.472E-08
Coefficient of variation [%]	0.43
Error(Moment of inertia)	0.75%

### 3.3 터빈 로터와 압축기 휠의 관성모멘트 측정 결과분석

터보과급기 개발 과정에서 터보과급기 로터를 구성하는 터빈 로터(터빈 휠과 축의 연결체)와 압축기 휠, 각각의 관성모멘트를 측정하여야 한다.

측정 장치를 이용하여 동일한 터보과급기 로터를 임의로 두 개 선택하여 Fig. 6 (a), (b)처럼 터빈 로터와 압축기 휠을 매달아 디스크를 각 15° 비틀어 회전 진자 운

동 발생시켜 진동 주기를 측정하여 관성모멘트를 산출하였다.

Table 5에서 보여주는 바와 같이 두 개의 터빈 로터의 측정된 관성모멘트 평균값을 각각  $4.110 \times 10^{-06} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 과  $4.053 \times 10^{-06} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 이며, 표준편차와 평균값의 비로 정의되는 변동계수는 각각 0.368%와 0.643%이다. 두 개의 압축기 휠의 측정된 관성모멘트 평균값은 각각  $1.696 \times 10^{-06} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 과  $1.783 \times 10^{-06} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 이며, 변동계수는 각각 0.991%와 0.915%이다. 따라서 터빈 로터와 압축기 휠에 대하여 측정된 관성모멘트 값의 변동계수가 1% 미만으로 충분히 작아 제작된 장비를 이용하여 터빈 로터와 압축기 휠의 정밀한 관성모멘트 측정이 가능함을 보였다.

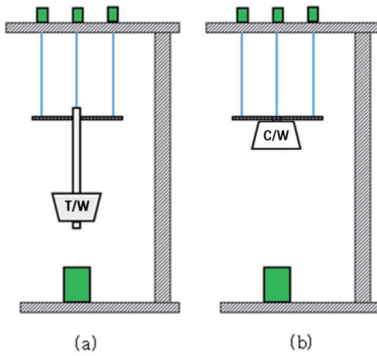


Fig. 6. Schematic of measurement for turbine rotor and compressor wheel  
(a) Turbine rotor (b) Compressor wheel

Table 5. Measured values of turbine rotor and compressor wheel

	Turbine rotor		Compressor wheel	
	#1	#2	#1	#2
Moment of inertia [kg·m <sup>2</sup> ]	4.110 E-06	4.053 E-06	1.708 E-06	1.783 E-06
Standard deviation [kg·m <sup>2</sup> ]	1.514 E-08	2.607 E-08	1.692 E-08	1.631 E-08
Coefficient of variation [%]	0.368	0.643	0.991	0.915
Error [%]	2.68	1.30	27.6	24.4

그러나 CAD 도면에서 산출된 관성모멘트(터빈 로터  $4.000 \times 10^{-06} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ , 압축기 휠  $2.360 \times 10^{-06} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ )를 기준으로 한 오차는 터빈 로터의 경우 각각 2.68%,

1.30%를 보이고 있으나, 압축기 휠의 경우 각각 27.6%, 24.4%를 보이고 있다.

Westin[10]는 비틀림 각도 19°미만에서 시스템 오차가 최대 2% 미만이라고 밝히고 있으며, 이는 시스템 전체 구성 요소 및 실험환경을 모두 포함하고 있다. 따라서 공기저항에 의한 영향을 무시 가능하다 판단할 수 있지만, 본 실험에서 터빈 로터와 다르게 알루미늄으로 제작된 압축기 휠은 질량이 작아서 공기 저항의 영향을 크게 받아 주기의 측정에 어려움이 있다고 추정하였다. 따라서 실험 장치에 부스(booth)를 설치하여 공기저항에 의한 영향을 최소화하는 실험 환경을 조성하였다.

여기서 사용한 측정 방법은 터빈 로터의 관성모멘트는 충분히 정확한 측정이 가능하나, 소형 압축기 휠의 관성모멘트 측정에는 적합하지 않다.

### 3.4 압축기 휠의 관성모멘트 측정방법 개선

앞 절에서 소형 터보과급기의 터빈 로터와 압축기 휠의 관성모멘트를 측정하고 분석한 결과 압축기 휠의 경우 정확한 측정이 어려움을 보였다.

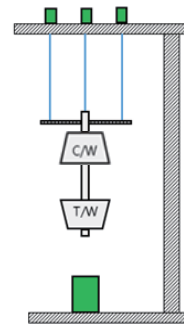


Fig. 7. Schematic of measurement for turbocharger rotor

Table 6. Comparison measured values for measurement methods

	Direct measurement		Indirect measurement	
	#1	#2	#1	#2
Compressor wheel				
Moment of inertia [kg·m <sup>2</sup> ]	1.708E-06	1.783E-06	2.494E-06	2.546E-06
Standard deviation [kg·m <sup>2</sup> ]	1.692E-08	1.631E-08	2.856E-08	2.721E-08
Coefficient of variation [%]	0.991	0.915	1.145	1.069
Error [%]	27.6	24.4	5.68	7.88

이를 개선하기 위하여 압축기 휠에 간접 측정방식을 적용하였다. 이 때 압축기 휠의 관성모멘트는 Fig. 7과 같이 터빈 로터와 압축기 휠을 모두 결합시킨 상태, 즉 터빈과급기 로터에 대하여 주기를 측정하여 산출된 관성모멘트 값에서 터빈 로터의 관성모멘트 값을 빼고 산출한다. 이렇게 간접 측정하여 산출된 관성모멘트 측정값을 3.3절의 직접 측정방법의 결과 값과 Table 6에서 비교하였다.

간접 측정방식은 터빈 로터와 압축기 휠을 결합 시킨 상태로 산출된 관성모멘트에서 터빈 로터의 관성모멘트 값을 빼는 과정에서 변동계수가 증가함을 보이지만, 변동계수가 1.2% 미만을 유지하므로 정밀한 측정이 가능함을 보이고 있다.

CAD 도면에서 산출된 관성모멘트 값을 기준으로 오차를 구하면 각각 5.68%와 7.88%를 보이고 있다. 산출 과정에서 오차가 중복되어 터빈 로터의 오차에 비하여 큰 오차를 보이고 있으나 직접 측정방식을 사용하여 측정된 값에 비하여 상당히 개선된 결과를 보이고 있다.

#### 4. 결론

터보과급기 로터의 관성모멘트를 측정하기 위하여 장치를 제작하고, 교정 로터를 사용하여 관성모멘트를 측정하여 제작된 장치를 검증하였다. 그리고 소형 터빈 로터와 압축기 휠의 관성모멘트를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Trifilar Method를 적용하여 터보과급기 로터의 정밀한 관성모멘트 측정을 위한 장치를 설계하고 제작하였다.
- 2) 터보과급기 로터와 비슷한 형상의 교정 로터에 대하여 측정된 관성모멘트는 변동계수 0.43%, CAD 도면에서 계산된 값을 기준으로 할 때 오차 0.75%를 보이고 있다. 따라서 제작한 측정 장치는 터보과급기 로터의 관성모멘트 측정에 적합함을 보였다.
- 3) 소형 터보과급기의 터빈 로터와 압축기 휠의 관성모멘트를 측정한 결과, 터빈 로터의 경우, 1% 미만의 변동계수와 3% 미만의 오차를 보여 정밀하고 정확한 측정이 가능함을 보였다.
- 4) 압축기 휠의 경우 1% 미만의 변동계수를 보이고, 오차는 평균 26%를 보이고 있어 부정확한 결과를 보였다.

- 5) 소형 압축기 휠의 경우 작은 질량을 가지고 있어 공기저항이 크게 작용하고 정확한 진동주기 측정에 어려움이 있다. 따라서 터빈 로터와 압축기 휠을 결합한 상태에서 측정을 수행하고 터빈 로터의 값을 빼는 간접 측정방법을 제시하였다.
- 6) 간접 측정방법을 사용하여 압축기 휠의 관성모멘트 측정 결과, 1.2% 미만의 변동계수를 유지하면서 8.0% 미만의 오차를 보여 상당히 개선된 결과를 보였다.

#### References

- [1] Q. Zhang, C. Brace, S. Akehurst, R. Burke, G. Capon, L. Smith and K. Zhang, "Simulation Study of the Series Sequential Turbocharging for Engine Downsizing and Fuel Efficiency", SAE Technical Paper, no. 2013-01-0935, 2013.  
DOI: <http://doi.org/10.4271/2013-01-0935>
- [2] J. Navrátil, J. Macek and M. Polásek, "Simulation of a Small Turbocharged Gasoline Engine in Transient Operation", SAE Technical Paper, no. 2004-01-0995, 2004.  
DOI: <http://doi.org/10.4271/2004-01-0995>
- [3] J. Y. Jung, H. C. Oh and C. S. Bae, "Characteristics of turbocharger equipped with TiAl turbine wheel in downsizing GDI engine", KSAE Spring Conference Proceedings, pp. 34-40, 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2013-01-2499>
- [4] G. Genta and C. Delprete, "Some considerations on the experimental determination of moments of inertia", Meccanica, vol. 29, no. 2, pp. 125-141, 1994.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01007497>
- [5] A. B. Schwartz, S. Malick and J. R. Friesen, "Measurement of the moment of inertia of Missile-type bodies: a modified Bifilar Torsion Pendulum formula", Aircraft Engineering and Aerospace Technology, vol. 29, no. 9, pp. 271-274, 1957.  
DOI: <https://doi.org/10.1108/eb032869>
- [6] D. Lyons, "Obtaining optimal results with filar pendulums for moment of inertia measurements", 61<sup>st</sup> Annual Conference, Society of Allied Weight Engineers, no. 3237, 2002.
- [7] J. L. du Bois, N. A. Lieven and S. Adhikari, "Error Analysis in Trifilar Inertia Measurements", Experimental Mechanics, vol. 49, no. 4, pp. 533-540, 2008.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11340-008-9142-4>
- [8] Z. C. Hou, Y. N. Lu, Y. X. Lao and D. Liu, "A new trifilar pendulum approach to identify all inertia parameters of a rigid body or assembly", Mechanism and Machine Theory, vol. 44, no. 6, pp. 1270 - 1280, 2009.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2008.07.004>
- [9] J. E. Chung and S. W. Lee, "Measurement of Inertia of Turbocharger Rotor in a Passenger Vehicle", Transactions of KSAE, vol. 24, no. 1, pp. 33-38, 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.7467/ksae.2016.24.1.033>

- [10] F. Westin, "Simulation of turbocharged SI-engines - with focus on the turbine", Doctoral Thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management, Royal Institute of Technology, pp. 131-150, 2005.

---

**정 진 은**(Jin-Eun Chung)

[정회원]



- 1980년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계공학과(공학사)
- 1982년 2월 : 서울대학교 대학원 기계공학과(공학석사)
- 1990년 8월 : 서울대학교 대학원 기계공학과(공학박사)
- 1982년 3월 ~ 1991년 2월 : 한국과학기술연구원 연구원
- 1992년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

열유체 시스템, 동력장치, 시스템 신뢰성

---

**전 세 훈**(Se-Hun Jeon)

[준회원]



- 2016년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학부(공학사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 대학원 기계공학과(석사과정)

<관심분야>

열유체 시스템, 터보과급기, 동력장치

---

**이 상 운**(Sang-Woon Lee)

[준회원]



- 2015년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학부(공학사)
- 2017년 2월 : 한국기술교육대학교 대학원 기계공학과(공학석사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 자동차부품연구원 연구원

<관심분야>

열유체 시스템, 터보과급기, 동력장치