

승용차용 터보과급기의 저속 영역 마찰 손실 측정 장치 개발

정진은^{1*}, 이상운², 전세훈²

¹한국기술교육대학교 기계공학과, ²한국기술교육대학교 대학원 기계공학과

Development of Friction Loss Measurement Device at Low Speed of Turbocharger in a Passenger Vehicle

Jin Eun Chung^{1*}, Sang Woon Lee², Se Hun Jeon²

¹Department of Mechanical Engineering, Korea Univ. of Technology and Education

²Department of Mechanical Engineering, Graduate School,

Univ. of Technology and Education

요약 본 연구에서는 터보과급기의 성능을 저해하는 주요 인자 중 하나인 마찰손실에 대한 연구를 수행하였다. 실제 엔진에서 빈번하게 사용되는 저속 구간에서의 승용차용 터보과급기의 마찰손실 측정 장치를 개발하고, 30,000~90,000rpm의 저속 영역에서 작동하는 터보과급기의 마찰손실을 측정하였다. 플로팅 베어링 타입의 승용차용 터보과급기를 실험 대상으로 선정하였으며, 마찰손실 측정 장치는 구동 모터, 오일 공급 시스템, 커플링으로 구성되었다. 실제 차량의 저속 운전 상황을 모사할 수 있도록 설계, 제작되었고, 회전속도, 오일 온도 및 압력을 실험 변수로 선정하였다. 또한, 마찰손실 측정 장치는 로드셀을 사용하여 발생하는 마찰 토크를 직접 측정하여 마찰손실을 산출하였으며, 마그네틱 커플링을 통해 구동 모터의 동력을 터보과급기 축에 전달하고, 오일 공급 시스템을 오일 온도 및 압력을 조절하였다. 온도 60°C와 90°C, 압력 4bar의 오일을 공급하는 상태에서 터보과급기가 회전수 30,000~90,000rpm으로 작동할 때 터보과급기 회전속도 증가할 때 마찰손실은 증가하며, 대략적으로 과급기 회전속도의 1.4~1.8 지수승에 비례함을 보이고 있다. 또한 오일온도가 60°C에서 90°C로 증가할 때 마찰손실은 최소 41%, 최대 63% 감소하였다.

Abstract Turbocharging is widely used in diesel and gasoline engines as an effective way to reduce fuel consumption. But turbochargers have turbo-lag due to mechanical friction losses. Bearing friction losses are a major cause of mechanical friction losses and are particularly intensified in the lower speed range of the engine. Current turbochargers mostly use oil bearings (two journal bearings and one thrust bearing). In this study, we focus on the bearing friction in the lower speed range. Experimental equipment was made using a drive motor, load cell, magnetic coupling, and oil control system. We measured the friction losses of the turbocharger while considering the influence of the rotation speed, oil temperature, and pressure. The friction power losses increased exponentially when the turbocharger speed increased.

Keywords : Friction loss, Journal bearing, Load cell, Thrust bearing, Turbocharger, Turbo lag

1. 서론

최근 강화되고 있는 배기가스 규제와 석유자원의 고갈로 인한 사회적 분위기의 영향으로 자동차 분야에서 터보과급기의 역할 비중이 높아지고 있다[1]. 터보과급

기는 내연기관의 다운사이징을 실현하여 유해 배기가스 배출량과 연료소비량을 효과적으로 감소시키며, 엔진의 저속부터 전 부하까지 높은 토크를 발생시켜 운전성능을 향상시키고 있다. 현재 대부분의 디젤 엔진은 터보 과급기 시스템이 적용되어 있으며, 최근 가솔린 엔진까지 적

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

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

Received October 4, 2016

Revised (1st November 9, 2016, 2nd November 24, 2016)

Accepted January 6, 2017

Published January 31, 2017

용이 확산되고 있다[2].

터보과급기는 특성상 가속 상황에서 ‘터보 래그 (Turbo lag)’ 이라는 반응 지연 현상이 나타난다. 이러한 터보 래그 현상은 과급기 회전부의 관성모멘트[3]의 크기와 축계 베어링 마찰손실에 큰 영향을 받는다. 본 연구에서는 저속 운전영역에서 터보과급기 센터하우징 회전부(Center housing rotating assembly, CHRA)의 베어링 마찰손실 측정에 대한 연구를 진행하였다.

승용 엔진의 주된 운전 영역인 중,저속 구간(엔진 회전수 1,500~2,500rpm)에서 터보과급기 회전속도는 120,000rpm 이하이며 이 구간에서의 마찰손실은 급격한 효율 저하를 초래한다[4]. 따라서 Otobe 등[5]과 Scharf 등[6]은 저속구간에서의 터보과급기 성능 평가 연구를 수행하였고, Schorn[7]은 주행 사이클을 바탕으로 터보과급기 성능 평가 연구를 수행하였다.

터보과급기의 효율 평가를 위한 간접 마찰손실 측정 방법인 ‘열량 측정법’은 터보과급기 내부에서 열전달이 없으며, 모든 손실이 오일로 흡수된다는 가정을 따른다. ‘기체 엔탈피 측정법’은 터보과급기 내부 단열 상태를 가정하여 터빈과 컴프레서를 통과하는 기체의 온도와 유량 등으로 동력을 산출하고 차이를 마찰손실로 계산한다[8]. 또한, ‘토크 미터를 사용한 마찰 토크 측정법’은 직접 마찰 토크를 측정하며 토크 미터의 정밀성에 따라 마찰손실 측정의 정확도가 결정된다[9].

본 연구에서는 실제 엔진에서 빈번하게 사용되는 중,저속 작동 영역(엔진 회전수 1,500 ~ 2,500rpm)에서 사용되는 부하를 고려하여 터보과급기 회전수 30,000 ~ 90,000rpm에서 터보과급기의 마찰손실을 측정하였다. 플로팅 베어링 타입의 승용차용 터보과급기를 실험 대상으로 선정하였으며, 마찰손실 측정 장치는 구동 모터, 오일 공급 시스템, 커플링으로 구성되어 실제 저속 운전 상황을 모사할 수 있도록 설계, 제작되었고, 회전속도, 오일 온도 및 압력을 실험 변수로 선정하였다. 또한, 마찰손실 측정 장치는 로드셀을 사용하여 발생하는 마찰 토크를 직접 측정하여 마찰손실을 산출하였다.

2. 터보과급기 플로팅 베어링

2.1 저널, 스러스트 베어링

본 연구에 사용된 풀-플로팅(Full floating) 저널 베어

링은 현재 승용차용 터보과급기에 보편적으로 적용되고 있으며, Fig. 1와 같이 shaft hole과 oil inlet으로 구성되어 있다. 저널 베어링은 축과 베어링의 안쪽 표면 사이의 inner oil film과 베어링 하우징과 베어링 바깥쪽 표면 사이의 outer oil film에 의해 댐핑과 탄성 효과가 작용하여 플로팅 베어링의 역할을 수행한다.



Fig. 1. Journal bearing of Full-floating type

스러스트 베어링은 컴프레서 휠과 터빈에서의 발생하는 압력의 불균형에 의한 축력에 대응하기 위한 목적을 가지며, 이러한 불균형은 과도 구간에서 두드러지게 나타난다[10]. 스러스트 베어링은 Fig. 2의 모습과 같이 평평한 디스크 형상이며 shaft hole과 oil inlet으로 구성되어 있다.

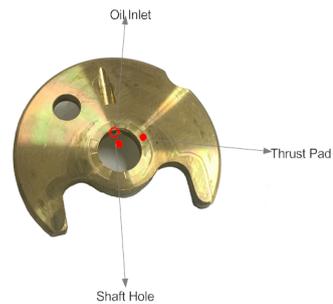


Fig. 2. Thrust bearing

3. 측정 장치 및 실험 조건

3.1 측정 장치

본 연구를 위해 개발한 마찰손실 측정 장치는 Fig. 3의 개략도와 같이 구동 모터, 오일 공급 시스템, 스러스트 로드 조절장치, 커플링(Coupling)으로 구성되어 회전속도, 오일 온도 및 압력, 스러스트 로드를 실험 변수로 선정하여 실제 차량의 저속 운전 상황을 모사할 수 있도록 설계, 제작되었다.

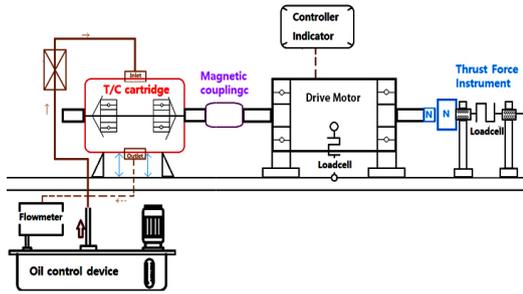


Fig. 3. Schematic of turbocharger CHRA friction loss measuring device

3.1.1 마찰손실 측정방법

모터하우징에서 발생하는 반력의 수직 하중을 로드 셀(Load cell)로 측정하고, 다음 식(1)~(3)을 통해 마찰 손실을 산출한다.

$$P_{friction} = \tau \cdot \omega \quad (1)$$

$$\tau = F \cdot L \quad (2)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot N \quad (3)$$

$P_{friction}$ 는 마찰손실, F 는 로드 셀에서 측정되는 수직 하중, N 은 회전수, L 은 회전축 중심에서 로드 셀까지 거리를 의미한다.

본 실험 장치의 마찰손실을 측정하는 로드 셀은 모터 하우징과 결합 되어 있으며, 모터 샤프트는 커플링을 통해 측정 대상인 터보과급기 카트리지의 샤프트와 연결되어 기계적으로 동력을 전달하는 구조를 가지고 있다. 따라서, 측정 대상에서 발생하는 마찰손실 값을 측정하기 위해서 구동모터의 마찰손실 값을 제외해야 하며, 다음 식(4), (5)에 측정대상의 마찰손실 산출식을 나타내었다.

$$P_{Totalfriction} = P_{CHRA} + P_{motor} \quad (4)$$

$$P_{CHRA} = P_{Totalf.} - P_{motor} \quad (5)$$

$P_{Totalfriction}$ 는 측정 장치 전체 마찰손실, P_{CHRA} 는 측정대상 카트리지의 마찰 손실, P_{motor} 는 구동모터의 마찰손실을 의미한다.

3.1.2 구동 모터 및 로드 셀 장치

본 연구의 목적은 저속 구간에서의 마찰손실 측정으로 구동모터는 용량 1,000W, 최대 범위는 30,000rpm~

120,000rpm의 제원을 갖도록 설계되었다. 또한, 에어 동압 베어링을 적용하여 일정 회전수 이상에서 마찰손실을 최소화하고 시스템 효율을 극대화하였다. 아래 Fig. 4에 구동모터와 하우징에 결합된 로드 셀을 보이고 있다.

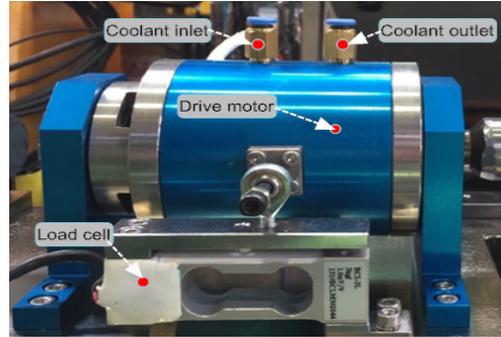


Fig. 4. Drive motor with load cell device

아래 Table 1에 구동 모터의 제원을 나타내었다.

Table 1. Specification of high speed motor

	Max speed [rpm]	Range of Torque [N.m]	Output [W]	Bearing system
Drive motor	120,000	0.005 ~ 0.4	1,000	Air dynamic pressure bearing

모터 하우징은 회전축을 중심으로 자유 회전운동을 하며, 로드 셀은 하우징과 결합되어 모터 구동 반력의 하중을 측정한다. 측정된 하중 값은 중심축에서 로드 셀의 거리 값을 통해 토크로 계산되며, 최종적으로 마찰손실이 산출된다. 이때, 로드 셀의 측정 범위는 최대 2.0kg, 최소 0.001kg이다.

Table 2. Specification of load cell

	Max. capacity [kg]	Min. measuring unit [kg]
Load cell	2.0	0.001

3.1.3 마그네틱 커플링

마그네틱 커플링(Magnetic coupling)을 사용하여 모터의 동력을 터보과급기 센터하우징 회전부의 축에 전달한다. 영구자석의 자기력을 이용하여 물리적 접촉이 없이 동력을 전달하기 때문에 작동 시 발생하는 진동과 회

전체의 밸런싱 및 얼라이먼트 불균형을 흡수하여 시스템의 안정성과 내구성을 향상시킨다. 아래 Fig. 5에 마그네틱 커플링 장착모습을 나타내었다.

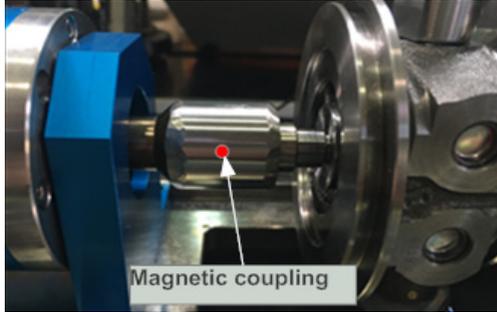


Fig. 5. Magnetic coupling

3.2 센터하우징 로터 어셈블리 가공

터보과급기의 센터하우징 회전부에서 발생하는 마찰손실 측정 목적에 맞추어 부가적인 저항을 발생시키는 컴프레서 휠을 분리하였으며, 터빈 블레이드는 정밀가공을 통해 절단하였고, 그 모습을 Fig. 6에 보이고 있다.



Fig. 6. Turbine blade cutting surface

3.3 실험조건

터보과급기의 마찰손실 측정을 위한 실험은 저속 구간에서의 운전 상황을 반영할 수 있도록 회전속도, 오일 온도 및 압력 조건을 설정하여 실험을 진행하였다. 터보과급기가 부착된 엔진(2,000cc, GDI) 동력 실험 데이터를 바탕으로 엔진의 저속 구간(1,500~2,500rpm)에서의 엔진 회전수, 부하 등에 따른 터보과급기 회전수, 오일 공급 압력 및 온도의 평균값과 최대, 최소값을 분석하여 선정된 결과를 Table 3에 표로 나타내었다.

Table 3. Measuring point for the turbocharger friction loss test

Speed [rpm]	Oil Pressure [bar]	Oil Temp. [°C]
30,000	4	60, 90
40,000		
50,000		
60,000		
70,000		
80,000		
90,000		

터보과급기 원활과 냉각을 위하여 SAE 5W30 엔진 오일을 사용하였다. 터보과급기 회전속도는 30,000~90,000 rpm까지 10,000 rpm 씩 측정하였으며, 공급 오일 온도는 60°C와 90°C 그리고 오일 압력은 절대압력 4 bar로 설정하였다.

4. 실험결과

4.1 구동 모터 마찰손실 측정

우선적으로 구동 모터에서 발생하는 마찰손실 측정을 위하여 회전수에 따른 마찰 손실 측정 실험을 진행하였으며, Table 4에 결과를 나타내었다.

Table 4. The result of drive motor friction power loss

Speed [rpm]	Load cell [kg]	Torque [N.m]	Power [W]
30,000	0.003	0.00171	5.36
40,000	0.004	0.00227	9.53
50,000	0.004	0.00227	11.90
60,000	0.0	0.0	0.0
70,000	0.0	0.0	0.0
80,000	0.0	0.0	0.0
90,000	0.0	0.0	0.0

에어 동압 베어링 작동 구간인 30,000rpm에서 90,000rpm까지 10,000rpm 단위로 측정하였으며, 60,000rpm에서 부터 에어 동압 베어링의 특성으로 인해 마찰 손실은 발생하지 않았다.

4.2 센터하우징 회전부 마찰손실 측정

플로팅 베어링 타입 센터하우징 회전부의 마찰손실 측정은 선정된 실험 조건에 따라 진행되었으며, 측정 시 장치 모습을 Fig. 7에 나타내었다.

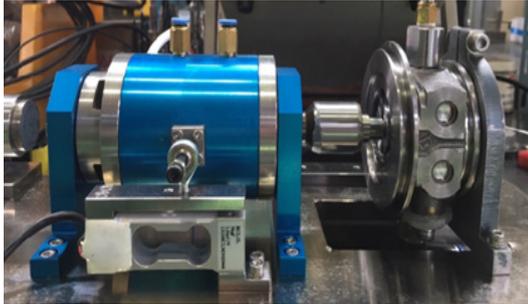


Fig. 7. Turbocharger CHRA friction loss measuring device

Table 5에서는 오일온도 60°C와 오일압력 4 bar에서 측정된 마찰손실 값을 보이고 있으며, Table 6에서는 오일 온도 90°C와 오일압력 4 bar에서 측정된 마찰손실 값을 보이고 있다. 같은 조건에서 3회 측정하여 평균을 취하였다. 변동계수(Coefficient of variation)는 평균값에 대한 표준편차의 비로 정의하였다. 본 실험의 측정범위에서 변동계수가 5.8% 미만으로 90,000rpm까지 고속에서 각 부품의 불균형(Unbalancing), 모터와 측정 대상 부품 사이의 정렬 불량(Mis alignment) 등을 고려할 때 실험 장치를 통한 마찰손실 측정 결과는 적절한 신뢰성을 확보하였다.

Table 5. The average result of full-floating bearing CHRA friction losses at oil temperature 60°C, pressure 4bar

Speed (rpm)	Load cell (kg)	Torque (Nm)	Friction (W)	Coefficient of variation (%)
30,000	0.021	0.0119	35.10	5.1
40,000	0.025	0.0142	55.28	4.3
50,000	0.027	0.0155	75.98	2.3
60,000	0.029	0.0162	102.38	5.3
70,000	0.030	0.0170	125.03	5.8
80,000	0.031	0.0178	149.17	3.7
90,000	0.033	0.0185	175.00	4.7

Table 6. The average result of full-floating bearing CHRA friction losses at oil temperature 90°C, pressure 4bar

Speed (rpm)	Load cell (kg)	Torque (Nm)	Friction (W)	Coefficient of variation (%)
30,000	0.010	0.00568	15.46	0.0
40,000	0.013	0.00738	26.70	0.0
50,000	0.015	0.00871	40.28	4.3
60,000	0.017	0.00985	61.90	3.3
70,000	0.019	0.01061	77.80	3.1
80,000	0.020	0.01136	95.21	5.0
90,000	0.021	0.01193	112.50	4.8

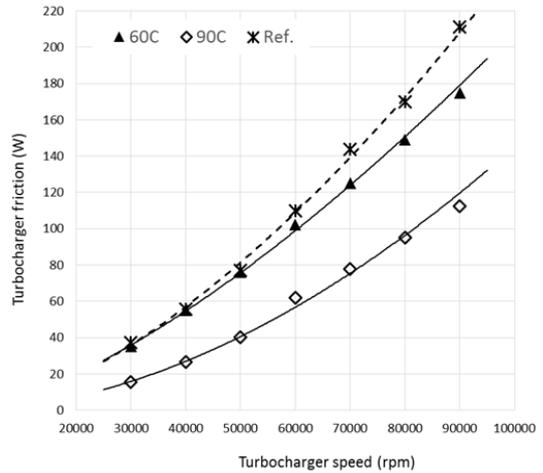


Fig. 8. The friction losses as a function of turbocharger speed at oil temperature 60°C and 90°C and oil pressure 4 bar

Fig. 8은 터보과급기 마찰손실 측정결과를 보여주고 있다. 터보과급기에서의 마찰손실은 터보과급기 회전수 증가에 따라 증가함을 보이고 있다. 일반적으로 마찰손실은 속도의 제곱에 비례하여 증가하는 것으로 알려져 있으며 본 실험에서 측정된 과급기의 마찰손실은 대략적으로 과급기 회전속도의 1.4~1.8 지수승에 비례함을 보이고 있다. 회전수에 따라 윤활막의 형성 등 다양한 조건이 변함에 따라 이와 같은 결과를 보이고 있는 것으로 판단된다.

공급되는 오일의 온도 증가에 따라 터보과급기의 마찰손실은 감소한다. 온도가 60°C에서 90°C로 증가할 때

마찰손실은 최소 41%, 최대 63% 감소함을 보이고 있다. 오일 온도가 증가함에 따라 오일의 점성계수가 낮아져 마찰손실이 감소하는 것을 알 수 있다.

또한 Ford Motor Co.[11]에서 측정한 결과(Fig. 8에서 Ref.로 표현되었으며 실험조건은 오일 온도 90°C, 오일 압력 4 bar)와 비교하면 절대값에서 상당한 차이를 보이고 있으나 전체적인 경향은 잘 일치하고 있어 실험이 적절하게 수행되었음을 알 수 있다.

5. 결론

저속 주행 작동 환경을 모사한 터보과급기 마찰손실 측정 장치를 설계 제작하여, 승용차용 플로팅 베어링 터보과급기의 마찰손실 측정 실험을 진행하였으며, 다음과 같은 결론은 얻었다.

- 1) 터보과급기의 저속 및 과도 성능에 주요한 영향을 미치는 인자는 마찰손실이며, 실험적 방법을 통해 실제 주행 작동 환경을 모사한 터보과급기 마찰손실 측정 장치를 설계 제작하였다.
- 2) 구동 모터, 오일 공급 시스템을 통하여 실제 주행 작동 환경을 재현하였고, 회전수, 오일 온도 및 압력에 따른 마찰손실 측정하였다.
- 3) 마찰 토크는 모터 하우징과 결합된 로드 셀을 통해 구동 시 발생하는 반력의 수직 하중을 직접 측정하므로 안정적인 측정을 수행하였다.
- 4) 마그네틱 커플링을 사용하여 기계적인 접촉 없이 구동모터와 터보과급기 센터하우징 회전부를 연결하여 동력을 전달하였으며, 구동 시 발생하는 진동, 회전체의 불균형 및 정렬 불량 등을 흡수하여 시스템의 안정성을 확보하였다.
- 5) 터보과급기 회전속도가 30,000rpm에서 90,000rpm으로 증가할 때 마찰손실은 과급기 회전속도의 1.4 ~ 1.8 지수승에 비례하여 증가함을 보였으며, 오일 온도가 60°C에서 90°C로 증가할 때 최소 41%, 최대 63% 감소함을 보였다.
- 6) 본 연구를 통해 개발된 장치는 터보과급기 저속영역에서의 마찰손실을 정확히 측정하여 볼 베어링을 적용한 새로운 축계 시스템의 평가에 사용될 것이다.

References

- [1] Namho Kim, Jaewoo Chung, Jungho Kang, Jubong Seo, Suyoung Kang, "Development of turbocharger performance test method using the turbocharger model", Conference of KSAE, pp. 274-282, 2011.
- [2] E.G. Giakoumis, A.M. Dimaratos, C.D. Rakopoulos, "Experimental study of combustion noise radiation during transient turbocharged diesel engine operation", Energy, pp. 4983 - 4995, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.05.043>
- [3] Jin Eun Chung, Sangwoon Lee, "Measurement of Inertia of Turbocharger Rotor in a Passenger Vehicle", Transactions of KSAE, vol. 24, no. 1, pp. 33-38, 2016.
- [4] Deligant M, Podevin P, Lamquin T, Vidal F, Marchal A, "Experimental study of turbocharger's performances at low speeds", In: Proceedings of the ASME 2010 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, pp. 1 - 8, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1115/ICEF2010-35071>
- [5] Otobe T, "Method of performance measurement for low turbocharger speeds", In: 15th Supercharging Conference, Dresden Germany, pp. 409 - 19, 2010.
- [6] Scharf J, Schorn N, Smiljanowski V, Uhlmann T, Aymanns R, "Method for extended turbocharger mapping and turbocharger assessment", In: 15th Supercharging Conference. Dresden, Germany.
- [7] Schorn N, Smiljanowski V, Späder U, Stalman R, Kindl H, "Turbocharger turbines in engine cycle simulation", In: 13th Supercharging Conference, Dresden Germany.
- [8] P. Podevin, A. Clenci, G. Descombes, "Influence of the lubricating oil pressure and temperature on the performance at low speeds of a centrifugal compressor for an automotive engine", Thermal Engineering, 31 (2 - 3), pp. 194 - 201, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.08.033>
- [9] Deligant M., Podevin P., Descombes G., "Experimental identification of turbocharger mechanical friction losses", Energy, vol. 39, no. 1, pp. 388-394, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.12.049>
- [10] Lamquin T., Gjika K., "Power Losses Identification On Turbocharger Hydrodynamic Bearing System", Test and Prediction: Proceedings of ASME Turbo Expo 2009.
- [11] Norbert A. Schorn, "The Radial Turbine for Small Turbocharger Applications: Evolution and Analytical Methods for Twin-Entry Turbine Turbochargers", SAE Int. J. Engines, vol. 7, no. 3, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.4271/2014-01-1647>

정 진 은(Jin Eun Chung)

[정회원]



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

<관심분야>

열유체 시스템, 동력장치, 시스템 신뢰성

이 상 운(Sang Woon Lee)

[준회원]



- 2009년 3월 ~ 2015년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학부 (공학사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 일반대학원 기계공학과 (석사과정)

<관심분야>

열유체 시스템, 터보과급기, 동력장치

전 세 훈(Se Hun Jeon)

[준회원]



- 2009년 3월 ~ 2016년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학부 (공학사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 일반대학원 기계공학과 (석사과정)

<관심분야>

열유체 시스템, 터보과급기, 동력장치