

트윈 스크롤 터보과급기에서 정상유동의 터빈 효율 분석

정진은^{1*}, 전세훈²

¹한국기술교육대학교 기계공학부, ²한국기술교육대학교 대학원 기계공학과

Turbine Efficiency Analysis of Steady Flow in a Twin Scroll Turbocharger

Jin-Eun Chung^{1*}, Se-Hun Jeon²

¹Department of Mechanical Engineering, Korea University of Education and Technology

²Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Korea University of Education and Technology

요약 터보과급기는 엔진에 장착하여 연비를 개선하는 효과적인 장치로 디젤엔진과 가솔린엔진 모두에서 광범위하게 사용되고 있다. 본 연구에서는 승용차용 가솔린엔진에 장착되는 트윈 스크롤 터빈 터보과급기에서 정상유동의 등엔트로피 터빈 효율을 분석하였다. 자체 설계 제작한 저온 테스트 벤치를 사용하여 정상상태의 압력과 온도, 질량유량을 측정하였다. 테스트 벤치는 공기 압축기, 트윈 스크롤 터빈, 온도 및 압력 측정장치 등으로 구성되었다. 실제 승용차용 엔진에서 주로 사용되는 중저속 엔진 작동 영역에 해당하는 터보과급기 회전속도 60,000 rpm에서 100,000 rpm의 범위에서 측정을 수행하였다. 이 회전속도 범위에서 등엔트로피 터빈 효율은 0.53에서 0.57의 값을 보였다. 이때 블레이드 속도비는 0.71에서 0.84까지, 팽창비는 1.24에서 1.72의 범위에서 변화하였다. 효율은 블레이드 속도비와 팽창비가 증가하면서 감소하는 경향을 보였다. 그리고 트윈 스크롤 중 스크롤 A 또는 B 만 작동하는 경우에 대한 실험을 수행하여 결과를 스크롤 A와 B 모두 작동할 때와 비교하였다. 60,000 rpm에서는 스크롤 B를 사용한 경우, 그리고 100,000 rpm에서는 스크롤 A를 사용한 경우 높은 효율을 보였다. 따라서 본 연구에 사용한 트윈 스크롤 터빈은 효율적으로 작동하고 있음을 보였다.

Abstract The turbochargers used widely in diesel and gasoline engines are effective devices to reduce fuel consumption and emissions. In this study, the isentropic turbine efficiency of the steady flow in a twin-scroll turbocharger for the passenger vehicle gasoline engine was analyzed. The cold gas test bench was designed and made. The pressure and temperature of the inlet and exit of the turbine were measured at 60,000, 70,000, 90,000, and 100,000rpm under the steady-state flow. The isentropic turbine efficiency was calculated. The efficiency was the range of 0.53 to 0.57. The BSR and expansion ratio were changed from 0.71 to 0.84 and from 1.24 to 1.72, respectively. The isentropic turbine efficiency decreased with increasing BSR and expansion ratio. The operation of only scroll A or B was compared with that of the twin-scroll turbine. The isentropic efficiency of using only scroll B was higher than those of only scroll A at 60,000rpm. The isentropic efficiency of using only scroll A was higher than those of only scroll B at 100,000rpm. Therefore, the twin-scroll turbine used in this study is operating effectively in the wide speed range.

Keywords : Cold Gas Test Bench, Steady Flow, Turbine Efficiency, Turbocharger, Twin Scroll

본 논문은 2019년 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Jin-Eun Chung(Korea University of Education and Technology)

email: jechung@koreatech.ac.kr

Received August 27, 2020

Revised October 16, 2020

Accepted November 6, 2020

Published November 30, 2020

1. 서론

자동차의 구동장치 관련하여 큰 변화가 진행되고 있는 가운데 내연기관에 대하여 강화되고 있는 배기가스 규제 의 영향으로 자동차 분야에서 터보과급기 적용 비율이 높아지고 있다[1]. 터보과급기는 내연기관의 다운사이징을 실현하여 유해 배기가스 배출량과 연료소비량을 효과적으로 감소시키며, 엔진의 저속부터 전 부하까지 높은 토크를 발생시켜 운전성능을 향상시키고 있다. 현재 많은 디젤 엔진은 터보과급기가 장착된 시스템을 사용하고 있으며, 최근 가솔린 엔진에도 터보과급기 적용이 확산되고 있다[2,3].

이와 같이 터보과급기의 활용이 확대됨에 따라, 넓은 운전 영역에서 출력 증대, 연비 개선 및 유해 배출물 저감을 위한 다양한 기술이 개발되고 있다. 이러한 기술 중 트윈 스크롤(twin scroll) 터빈[4,5]을 사용한 터보과급기는 실린더 별 행정순서를 고려하여 배기간섭을 피하기 위해 배기 매니폴드부터 터빈 로터에 도달할 때 까지 관로를 두 개로 분리한다. 그러므로 싱글 스크롤(single scroll) 터보과급기에 비해 터보 래그(turbo lag) 현상이 감소하며, 관로의 단면적을 축소하여 엔진의 저속 영역에서 배기 가스의 유속을 증가시켜 반응성이 좋다. 따라서 응답 성능을 개선하여 저속에서 고속까지 넓은 운전 영역에서 토크 증대를 실현하므로 연비가 개선되고 유해배출물이 저감되는 결과를 보이고 있다.

본 연구에서는 실제 차량의 주로 사용되는 중저속 엔진 작동 구간에 해당하는, 터보과급기 회전속도 60,000 rpm에서 100,000 rpm의 범위에서 트윈 스크롤 터보과급기의 성능을 평가하기 위한 테스트 벤치를 제작하였다. 이를 이용하여 정상 상태에서 터빈의 등엔트로피 효율을 측정하고 분석하였다.

2. 트윈스크롤 터보과급기

Fig. 1.은 4기통 엔진에 적용된 트윈 스크롤 터보과급기의 터빈의 구조와 배기 시스템과의 연결을 보여주고 있다. 터빈 로터 블레이드로 들어가는 터빈 입구의 유로가 전면구(front inlet of scroll)과 후면구(rear inlet of scroll)로 나누어져 있다. 2번과 3번 실린더의 배기가스는 전면구로, 1번과 4번 실린더의 배기가스는 후면구로 들어온다.

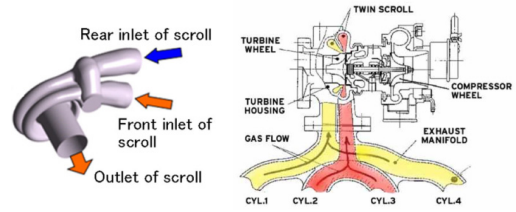


Fig. 1. Twin scroll turbocharger

3. 터보과급기 성능 측정

3.1 터빈 성능 측정 장치

터보과급기 성능 측정에 관하여 일반적으로 SAE J1826에서 고온 가스 벤치(hot gas bench)를 사용하여 기술하고 있다[6].

여기서 터빈 입구 온도는 873 K(600 °C)로, 이것은 엔진에 적용하는 터보과급기의 실제 작동온도를 나타내는 좋은 평균값이다. 그러나 이러한 온도 조건은 터빈에서 과도한 열전달이 각 측정 부분의 온도를 왜곡시키고, 압축기 작동 영역 한계에 따라 터빈 성능 측정 범위를 제한한다. 그러므로 일반적으로 터보과급기의 열적 왜곡을 피하기 위해 최고 회전속도의 약 50%인 90,000 rpm 이상의 구간에 대한 성능 평가를 수행한다. 따라서 저속 구간에서의 터빈 한계 성능 및 마찰 성능에 대한 평가가 불가능하다[7,8]. 이러한 관점에서 본 연구에서는 터빈 한계 성능 및 마찰 성능 관점에서 중요한 저속 구간에 대하여 저온 가스 실험(cold gas test) 방법을 활용하여 열전달의 영향을 최소화하면서 실험을 진행하였다.

이를 위하여 구성한 테스트 벤치는 다음 Fig. 2.와 같이 공기 압축기(air compressor), 터빈 A 스크롤과 B 스크롤, 터빈부 측정 장치, 압축기 부 측정 장치로 구성되며 각각의 입구와 출구에 압력, 온도 센서들을 장착하였다. Table 1.은 측정에 사용된 압력 센서와 온도 센서의 제원을 보여준다.

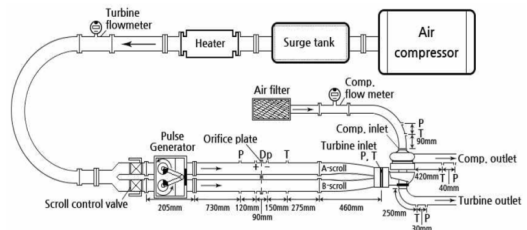


Fig. 2. Schematic of experimental apparatus

Table 1. Specifications of sensors

Sensor	Specification			Location
	Range	Accuracy	Type	
Pressure	1 psid	± 0.1% FS	Differential	Inlet
Pressure	0~5 bar	± 1.0% FS	Absolute	
Temperature	-73~ 260 oC	100Ω ± 0.12%	RTD PT100	
Pressure	0~2 bar	± 1.0% FS	Absolute	Outlet
Temperature	-73~ 260 oC	100Ω ± 0.12%	RTD PT100	

3.2 터빈과급기 효율 분석

본 연구에 사용된 트윈 스크롤 터보과급기에 대하여 터빈 스크롤 A와 B의 입구 압력, 온도, 질량 유량률을 측정한다.

터빈 입구 압력($p_{3,t}$)과 온도(T_3)의 경우 아래의 식과 같이 스크롤 A와 B에 대한 평균값을 사용한다.

$$p_{3,t} = \frac{(p_{3,t})_{A scroll} + (p_{3,t})_{B scroll}}{2} \quad (1)$$

$$T_3 = \frac{(T_3)_{A scroll} + (T_3)_{B scroll}}{2} \quad (2)$$

질량 유량률은 터빈으로 유입되는 유체의 양이 나누어 지므로 양쪽 스크롤 A와 B에 대한 질량 유량률의 합을 사용한다.

$$\dot{m}_t = \dot{m}_{t, A scroll} + \dot{m}_{t, B scroll} \quad (3)$$

그리고 고정 터빈 회전속도 N_t 는 다음과 같이 정의된다[1].

$$N_t = \frac{N_{tc}}{\sqrt{T_{3,t}}} \quad (4)$$

여기서 N_{tc} 는 터보과급기 회전속도(rps)이다.

또한 블레이드 속도비(Blade speed ratio) BSR 은 다음과 같이 정의된다[1].

$$BSR = \frac{U_t}{C_{is}} = \frac{\pi \cdot N_{tc} \cdot d_t}{\sqrt{2 \Delta h_{t,is}}} \quad (5)$$

여기서 U_t 는 터빈 블레이드 속도(m/s), C_{is} 는 등엔트로피 팽창 속도(m/s), d_t 는 터빈 블레이드 직경(m), $\Delta h_{t,is}$ 는 등엔트로피 터빈 비일(specific work)(J/kg)이다.

그리고 터빈의 등엔트로피(isentropic) 터빈 효율 $\eta_{t,is}$ 은 실제 터빈 출력과 등엔트로피 터빈 출력의 비로 정의한다[1].

$$\eta_{t,is} = \frac{P_t}{P_{t,is}} \quad (6)$$

이때 실제 터빈 출력과 등엔트로피 터빈 출력은 다음과 같다.

$$P_t = \dot{m}_t c_p (T_3 - T_4) \quad (7)$$

$$P_{t,is} = \dot{m}_t c_p T_3 \left[1 - \left(\frac{p_{4,s}}{p_{3,t}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (8)$$

여기서 T_3 는 터빈 입구 온도(K), T_4 는 터빈 출구 온도(K), $p_{3,t}$ 는 터빈 입구 전압(kPa)이고 $p_{4,s}$ 는 터빈 출구 정압(kPa)이다.

3.3 실험 조건

본 연구에서는 볼 베어링이 적용된 2.0 L 가솔린 엔진용 트윈 스크롤 터보과급기를 대상으로 Waste-gate는 완전히 닫힌 상태에서 냉각수는 사용하는 않고 실험을 진행하였다. 실험 조건은 다음 Table 2.와 같다.

실험은 저속 영역을 대표하는 60,000 rpm과 70,000 rpm을 선정하였고, 저속에서 중속으로 넘어가는 영역을 고려하여 90,000 rpm과 100,000 rpm을 선정하였다. Table 3.와 같이 각각 터보과급기의 회전수를 고정하고 목표로 잡은 압축기 압력비의 최소, 최대 범위 내에서 압력비를 변경하며 실험을 수행하였다.

Table 2. Experimental conditions

Sensors	Conditions
Oil temperature	40oC(± 1oC)
Oil Pressure	3.5 bar g (± 0.05bar g)
Turbine inlet temperature	40oC(± 1oC)

Table 3. Turbocharger speeds and compressor pressure ratio

Turbocharger speed (rpm)	Compressor pressure ratio	
	min.	max.
60,000	1.088	1.195
70,000	1.116	1.269
90,000	1.170	1.450
100,000	1.250	1.600

제어를 통해 목표 압축기 회전수를 도달하도록 터빈 공급 유량을 조절하였다. 이때 압축 배압 밸브를 조절하여 압축기의 압축비를 변화시켰다. 압축비가 작은 오차

내에서 고정될 때 터빈과 압축기에 대한 데이터를 수집 하였다.

Fig. 3.과 같이 트윈 스크롤의 경우 밸브를 모두 개방 하고 터빈 양측으로 압축 공기를 공급하면서 실험을 진행하였고, 싱글 스크롤의 경우 한쪽의 관을 순차적으로 닫고 각각 스크롤에 대한 실험을 수행하였다.

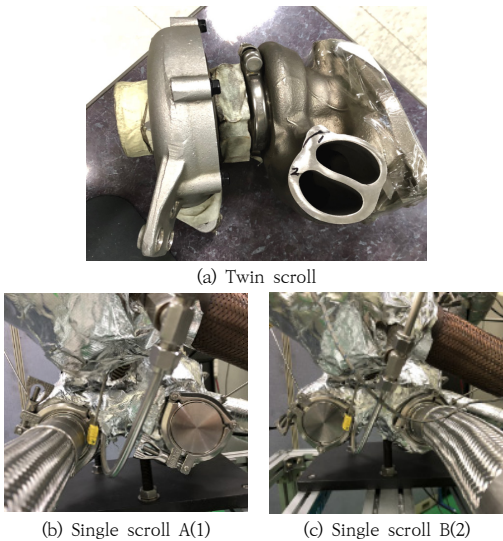


Fig. 3. Photos of twin scroll and single scroll

4. 실험 결과

Fig. 4.는 터빈의 스크롤 A와 B를 모두 개방한 트윈 스크롤에 대하여, 압축기 회전수를 유지하면서 압축비를 변화시키면서 터빈과 압축기의 온도, 압력, 질량을 측정하여 산출한 터빈의 등엔트로피 효율을 블레이드 속도비 함수로 보이고 있다. 터빈을 통과하는 질량 유량이 증가함에 따라 회전속도가 60,000 rpm에서 100,000 rpm으로 증가하면서 블레이드 속도비가 0.69에서 0.84까지 증가한다. 이때 등엔트로피 터빈 효율은 0.58에서 0.52로 감소한다. 이러한 결과는 블레이드 속도비가 증가함에 따라 질량 유량과 터빈 출력은 증가하나 기준이 되는 등엔트로피 터빈 출력이 더 크게 증가하기 때문에 효율은 감소한다. 또한 회전속도와 관계없이 동일한 블레이드 속도비에서 유사한 터빈 효율을 보이고 있다[9]. 그리고 블레이드 속도비의 증가에 따라 미세한 효율의 증가를 보이다가 점차 효율이 감소하는 경향을 보인다. 이것은 본 실험 조건에서 팽창비 형성 구간이 제한적이므로 뚜렷한

결과를 볼 수 없지만, 블레이드 속도비 0.7 근처에서 효율이 최대값을 보이며 속도비가 이보다 작거나 커지면 효율이 낮아지는 기존의 연구 결과와 일치하고 있다[10].

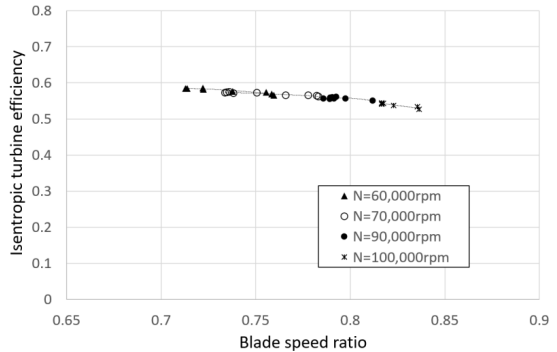


Fig. 4. Isentropic efficiency of twin scroll turbine according to the blade speed ratio

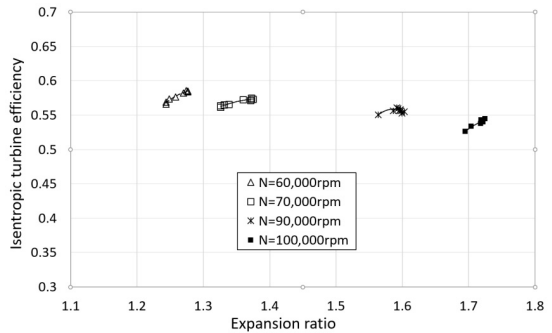


Fig. 5. Isentropic efficiency of twin scroll turbine according to expansion ratio

그리고 Fig. 5.는 앞의 Fig. 4.와 같은 조건에서 산출한 등엔트로피 터빈 효율을 팽창비(Expansion Ratio)의 함수로 보이고 있다. 터빈을 통과하는 질량 유량이 증가함에 따라 회전속도가 60,000 rpm에서 100,000 rpm으로 증가하면서 팽창비가 1.24에서 1.72까지 증가한다. 이때 등엔트로피 터빈 효율은 0.58에서 0.52로 감소한다. 동일한 회전수 조건에서 팽창비가 크면 터빈 출력이 커짐에 따라 효율이 높아진다. 그러나 터보과급기 회전수가 증가하면 터빈 출력이 증가하나 기준이 되는 등엔트로피 터빈 출력이 더 크게 증가하므로 등엔트로피 터빈 효율은 낮아진다.

Fig. 6.과 7.에서는 스크롤 A 또는 B만을 사용한 결과를 보이고 있다. 트윈 스크롤에서 스크롤 A와 스크롤 B가 기하학적 형상이 다소 다르므로 각각에 대하여 실험한 결과를 사용하였다.

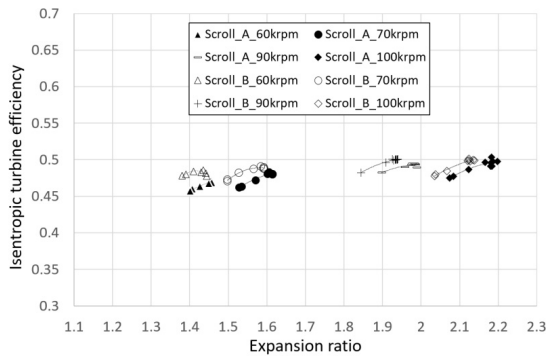


Fig. 6. Comparison of isentropic efficiencies of twin scroll and single scroll turbine according to the blade speed ratio

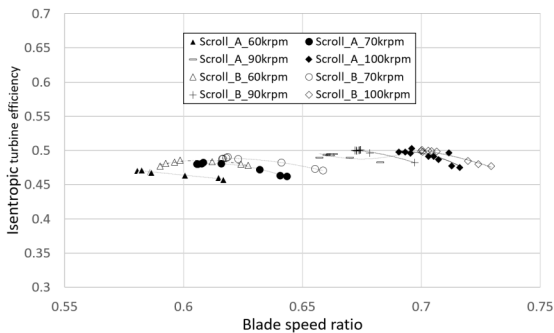


Fig. 7. Comparison of isentropic efficiencies of twin scroll and single scroll turbine according to expansion ratio

Fig. 6.은 스크롤 A 또는 B 만을 사용한 터보 과급기의 터빈 등엔트로피 효율을 블레이드 속도비의 함수의 나타내었고, Fig. 7.은 팽창비의 함수로 나타내었다.

스크롤 A 또는 B 터빈을 사용하면 터빈의 유로 면적이 작아져 공기 질량 유량이 작아지고 동일한 압축기 출력을 발생하기 위하여 터빈 팽창비가 커져야 한다. 따라서 터빈 등엔트로피 일량을 증가시키므로 블레이드 속도비가 감소된다. 이러한 결과는 터빈의 등엔트로피 효율 감소와도 연계된다. 60,000 rpm에서 스크롤 B를 사용한 과급기의 효율이 스크롤 A를 사용한 효율에 비해 4.6%까지 높은 값을 보이나, 회전수가 증가함에 따라 이 값은 감소하다가 100,000 rpm에서는 스크롤 A를 사용한 과급기의 효율이 스크롤 B를 사용한 경우 효율과 비교하여 1.4%까지 높아지는 결과를 보이고 있다. 이것은 터빈 하우징 내부의 볼류트(volute) 형상의 차이와 이에 따른 유체의 터빈 블레이드 진입 각도 및 위치 차이 등으로 인해 스크롤 A와 B의 팽창비 및 효율의 차이가 발생

하기 때문이다. 따라서 스크롤 A는 고속 회전에서 높은 효율을, 스크롤 B는 저속 회전에서 높은 효율을 갖도록 설계되어, 스크롤 A와 B를 동시에 사용하는 트윈 스크롤 터빈을 사용하는 터보과급기는 높은 효율을 얻을 수 있음을 보이고 있다.

5. 결론

트윈 스크롤 터보과급기의 성능을 측정하기 위한 테스트 벤치를 설계 제작하고 정상 유동에서 터빈에 들어가는 압력과 온도, 질량유량을 측정하고 등엔트로피 터빈 효율을 산출하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 트윈 스크롤 터보과급기의 성능을 측정할 수 있는 테스트 벤치를 설계 제작하였다.
- 2) 승용차용 엔진에서 주로 사용되는 터보과급기 회전 속도 60,000 rpm에서 100,000 rpm 까지의 영역에서 트윈 스크롤 터보과급기의 등엔트로피 터빈 효율을 산출하였다.
- 3) 트윈 스크롤 터보과급기의 효율은 0.53에서 0.57의 값을 보였다. 이때 블레이드 속도비가 0.71에서 0.84, 팽창비는 1.24에서 1.72의 범위에서 변화하였으며 효율은 블레이드 속도비와 팽창비가 증가하면서 약간 감소하는 경향을 보였다.
- 4) 트윈 스크롤 중 하나의 스크롤 만을 사용하여 실험을 진행하여 등엔트로피 터빈 효율을 산출하고 트윈 스크롤을 사용하는 터보과급기의 결과와 비교하였다. 스크롤 A는 100,000 rpm에서 높은 효율을 보였고, 스크롤 B는 60,000 rpm에서 높은 효율을 보여 트윈 스크롤 터보과급기에서는 넓은 회전 속도 영역에서 좋은 효율을 보이고 있다.
- 5) 본 연구를 통해 개발된 장치는 트윈 스크롤 터보과급기 성능 평가 시스템에 사용될 것이다.

References

- [1] N. Watson and M. S. Janota, "Turbocharging the Internal Combustion Engine," The Mcmillian Press Ltd., pp.29-286, 1982.
- [2] P. Leduc, B. Dubar, G. Monnier, "Downsizing of Gasoline Engine : an Efficient Way to Reduce CO2 Emission", *Oil & Gas Science and Technology*, vol. 58, no. 1, pp.115-127, 2003
DOI:<http://dx.doi.org/10.2516/ogst:2003008>

- [3] Q. Zhang, C. Brace, S. Akehurst, R. Burke, G. Capon, L. Smith, K. Zhang, "Simulation of the Series Sequential Turbocharging for Engine Downsizing and Fuel Efficiency," *SAE Technical Paper*, no. 2013-01-0935, 2013
DOI:<https://dx.doi.org/10.4271/2013-01-0935>
- [4] M. Mueller, T. Streule, S. Sumser, G. Hertweck, A. Nolte, W. Schmid, "The Asymmetric Twin Scroll Turbine for Exhaust Gas Turbochargers", *ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air*, GT2008-50614, pp.1547-1554, 2008.
DOI:<https://doi.org/10.1115/GT2008-50614>
- [5] M. Capobianco, A. Gambarotta, "Performance of a Twin-entry Automotive Turbocharger Turbine," *Energy-Sources Technology Conference & Exhibition, ASME*, 1993.
- [6] *SAE J1826*, Turbocharger Gas Stand Test Code, 1995.
- [7] 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," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 2-3, pp.194-201, 2011.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.08.033>
- [8] J. Chung, N. Kim, W. Kang, S. Lee, J. Chung, S. Jang, G. Kim, "An Experimental Investigation on the Performance of Twin-scroll WGT with Ball Bearing of Gasoline Engine", *Transaction of KSAE*, vol. 25, no. 5, pp.641-651, 2017.
DOI:<http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2017.25.5.642>
- [9] R. Zimmermann, R. Baar, C. Biet, "Determination of the isentropic turbine efficiency due to adiabatic measurements and the validation of the conditions via a new criterion," *J. Mechanical Engineering Science*, 2016.
DOI:<http://dx.doi.org/10.1177/0954406216670683>
- [10] T. Otobe, P. Grigoriadis, M. Sens, R. Berndt, "Method of performance measurement for low turbocharger speeds," *Int. Conference on Turbocharging and Turbochargers*, pp.409-419, 2010

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, 터보과급기, 시스템 신뢰성

전 세 훈(Se-Hun Jeon)

[준회원]



- 2009년 3월 ~ 2016년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학부 (공학사)
- 2016년 3월 ~ 2018년 8월 : 한국기술교육대학교 일반대학원 기계공학과 (석사)

<관심분야>

열유체 시스템, 터보과급기, 측정 및 분석