

## 보조동력장치 회전자 유동 및 출력특성에 관한 연구

이중섭\*, 정인국<sup>+</sup>, 윤지훈<sup>+</sup>, 서정세<sup>++</sup>, 이태의<sup>+++</sup>

(논문접수일 2011. 07. 20, 수정일 2011. 09. 05, 심사완료일 2011. 09. 07)

### A Study on the Flow and Power Characteristics of Rotor in the APU

Chung Seob Yi\*, In Guk Jeong<sup>+</sup>, Ji Hun Yun<sup>+</sup>, Jeong Se Suh<sup>++</sup>, Tae Eui Lee<sup>+++</sup>

#### Abstract

Recently, Use of Auxiliary power unit(APU) is increasing by growing demand for improvement of insufficient electric power and installation of emergency generation devices in military tracked vehicles and civil markets. And the trend is that the units are demanded for smaller size, lighter weight and higher output power, etc to suit consumer demands. To achieve these, it is essential to develop high performance system. Therefore, in this study, it was conducted in numerical analysis to investigate flow characteristics of rotor in APU generator. Also output performance of APU applied on the rotor is analyzed by experimental method. As the result, higher rotating speed of rotor caused high air flow rate at suction and it leads to linear increase of discharging flow rate. The maximum theoretical power was achieved at 12 m<sup>3</sup>/min of flow rate and, at that time, output power of generator was about 7.825 kW. Also, it can be confirmed the stabilization of output performance is achieved in about 2 seconds by experiment.

**Key Words :** APU(보조동력장치), Generator(발전기), Rotor(회전자), Stator(고정자), CFD(전산유체역학)

## 1. 서론

최근 급격한 기후변화에 따라 중장거리 대형트럭 및 방위산업의 궤도차량에서는 쾌적한 실내 환경 제공을 위해서 사용되는 냉·난방 시스템 운용과 각종 첨단 전자시스템의 응용확대로 인해 부족한 전기적 출력문제와 비상발전을 위한 전력공급장치가 필요하다. 이러한 장치로는 보조동력장치(Auxiliary power unit : APU)가 있으며, 보조동력장치는 군용 궤도차량 및 일반산업용 중장거리 대형트럭 등에서 차량의 주 엔진이 정

지되었거나 운행 중일 때 필요한 비상용 전원을 공급하는 역할을 한다.

보조동력장치의 적용분야를 구체적으로 살펴보면, 민수분야인 일반 산업용에서는 대형건물의 전력발전용, 낙도, 건설현장의 비상발전, 중장거리 대형 상용 트럭에서는 트럭 후방에 장착되어 실내 냉·난방장치 구동 및 요리에 필요한 전력공급, 한겨울철의 차량의 고압세척, 해상 선박의 비상전력 공급, 선박이 조난하였을 때에 인명을 구하기 위하여 갖춘 설비인 구명정(life boat), 철도차량에서는 열차의 견인력을 얻는 주 전력 변

\* 경상대학교 BK21(첨단기계항공) (cs\_yi@hotmail.com)

주소: 경상남도 진주시 가좌동 900번지

+ 경상대학교 대학원

++ 경상대학교 기계공학부, 공학연구원(ERI)

+++ (주)성곡나노텍 기술연구소

환장치와는 별도로 각종 제어장치 및 승객 서비스 장치에 전원을 공급하는 역할 등으로 사용되고 있으며, 그 용도가 점차 증가되고 있는 실정이다<sup>(1~2)</sup>.

현재 보조동력장치는 고객수요에 맞게 소형·경량화 및 고출력의 요구 성능을 만족시킬 필요성이 있다. 이러한 측면에 있어서 야기될 수 있는 문제점으로는 엔진 룸 내부 온도상승 문제를 들 수 있다. 엔진룸 내부의 온도상승을 적절하게 제어·유지하는 것은 혼합기의 정상 연소상태를 유지하는 동시에 엔진 유회유의 소모 및 변질, 엔진수명의 단축 등을 방지하기 위하여 중요한 핵심 설계기술이다.

엔진 룸에 차폐 시스템을 설치하면 강제대류를 방해하기 때문에 공기와 열원과의 열전달률이 낮아져 냉각성능 효율이 낮아지며 엔진룸 내부의 온도가 상승하는 역효과를 초래하기도 한다. 또한 엔진룸의 발열원인인 엔진 방사열, 소음기, 엔진오일 탱크 등으로 방사열의 체계적인 분석 없이는 엔진룸 내부에 장착된 각종고무, 플라스틱 및 전자장치 등이 손상을 일으킬 수도 있다. 따라서 엔진룸에서 냉각계통에 대한 성능은 더욱 중요하며, 냉각성능을 유지하면서 소음저감 효과를 구현할 수 있는 적절한 차폐시스템 구성을 위한 최적화된 설계가 요구되고 있다<sup>(4~6)</sup>.

따라서 본 연구는 보조동력장치 발전기 회전자의 유동을 수치 해석적 방법으로 분석하고, 이러한 회전자를 적용한 보조동력장치의 출력특성을 실험적 방법으로 파악해 보았다.

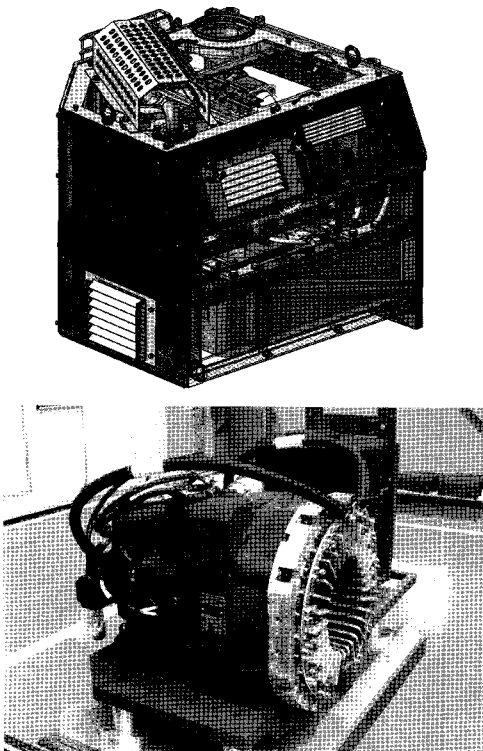


Fig. 1 APU generator assembly

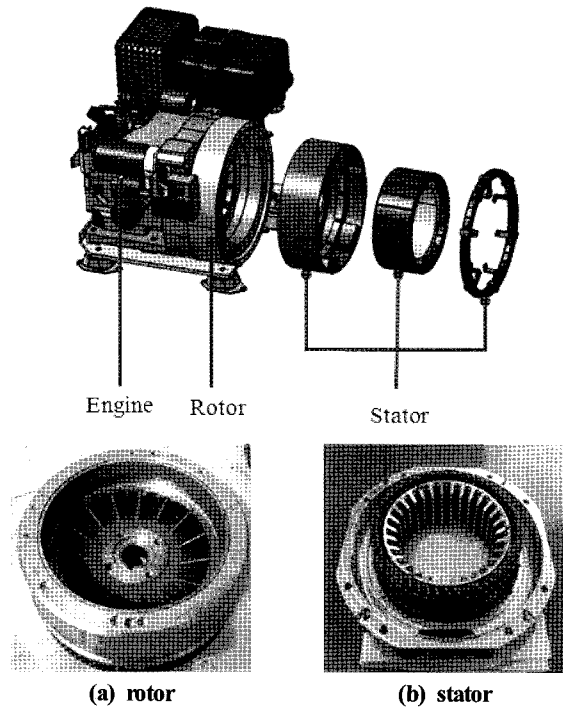


Fig. 2 Rotor and stator parts in the APU

## 2. 수치해석방법

### 2.1 수치해석기법

수치해석 기법으로는 지배방정식에서 압력과 속도의 연결은 SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equations)에 따른 Segregate Flow 알고리즘을 사용하였으며, 해석결과를 취득하기 위한 수치해석의 환경은 정상상태에서 반복 계산시 종속변수들의 수렴 판정은 출구 유량이 변하지 않고 안정적인 값으로 고정된 계산결과가 나타날 때를 수렴 판정의 기준으로 삼았다.

회전자에 회전력을 부여하여 마치 회전하는 것과 같은 효과를 부여하는 이동좌표계(MRF: Moving reference frame)를 적용하여 계산을 수행하였다. 일반적으로 일정하게 설정하는 것이 보통이나 고속회전시 작동유체간의 마찰과 압축성에 의해 작동유체의 온도가 상승하기 때문에 이를 고려하기 위해 Ideal Gas로 가정하여 계산을 수행하였다.

난류모델은 레이놀즈 평균 나비에-스토크스(Reynolds-averaged Navier-Stokes)방정식에서 표준 k-ε모델의 정확성을 추가한 Realizable k-ε모델을 적용하여 해석의 정확도를 높이고자 하였다. 이때 중요한 것이 벽면에서의 계산정확도를 높이는 것이 관건이다. 따라서 벽면에는 전체 Two-layer 모델을 적용하여 벽면에서의 계산 정확도를 증가시켰으며, 계산에 사용된 CFD 코드는 STAR-CCM+를 사용하였다.

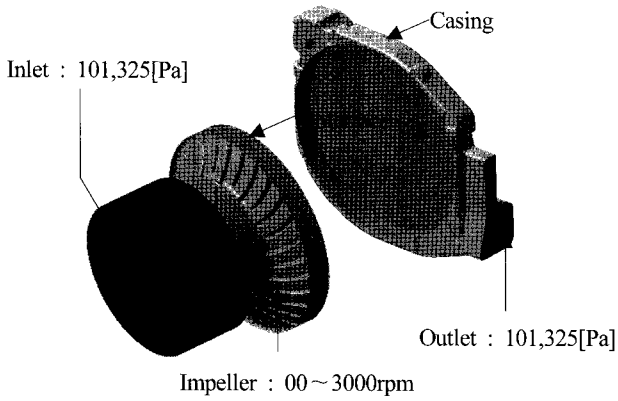


Fig. 3 APU cooling fan and boundary conditions

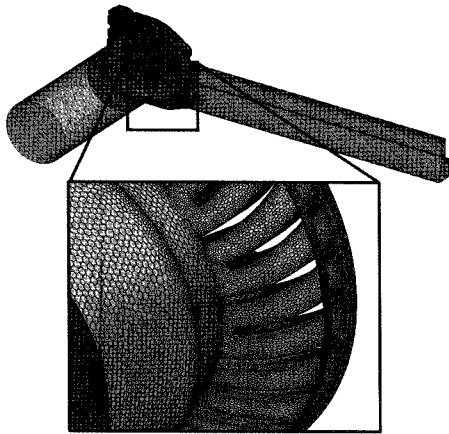


Fig. 4 Computational grid system

## 2.2 경계조건

입구 측에서의 경계조건은 대기압이 작용하고 있는 것으로 가정하고, 출구는 수력반경의 6배를 확장하고, 입구는 4배 확장하여 유동의 안정성을 확보하였다. 또한 입구와 출구에서의 경계조건은 대기압을 부여하였다. 임펠러의 회전속도는 엔진의 회전속도와 동일하기 때문에 500rpm~3000rpm까지 500rpm 단위로 증가시켜 토출유량과 압력을 확인하였다.

## 3. 수치해석 결과 및 분석

Fig. 5는 입-출구가 대기압 상태일 때 회전자의 회전속도 변화에 따른 출구 토출유량을 나타낸 것이다. 해석결과 회전자의 회전속도가 빨라질수록 흡입되는 공기량이 많아지고, 결국 출구유량이 증가하였다. 또한 회전속도에 따른 토출유량의 증가는 선형적인 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 6은 회전자의 회전속도가 3,000rpm일 때 출구 유량을 변화시켜 회전자 케이스 출구에서 발생하는 압력분포를 나타낸 것이다. 유량이 증가함에 따라 토출압력이 송풍기 압력분포의 전형적인 형태로 나타내면서 감소함을 확인할 수 있었다.

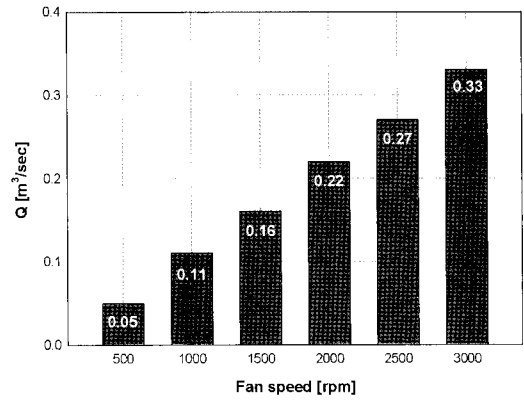


Fig. 5 Outlet flow rate according to rotor speed

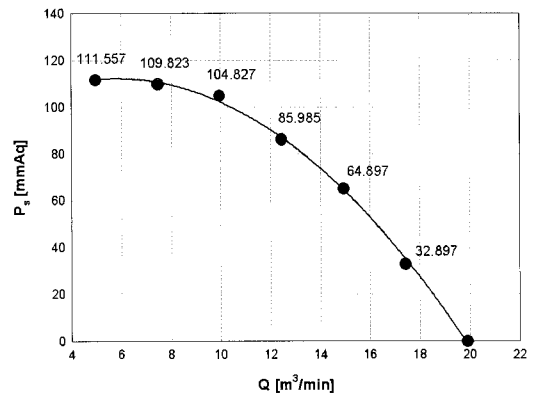


Fig. 6 Outlet pressure according to flow rate

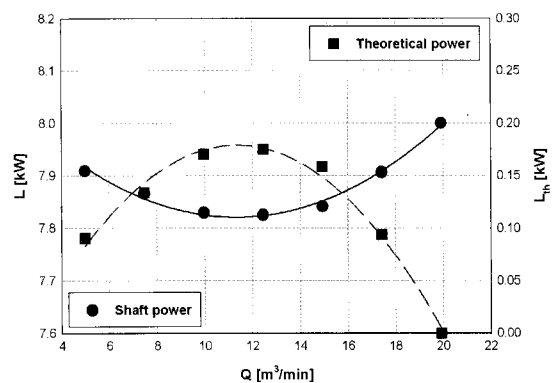


Fig. 7 Motor power according to flow rate

특히 낮은 유량에서 높은 압력이 발생하다가 유량이 높아질수록 급격하게 압력이 줄어드는 경향성을 확인 할 수 있었다.

Fig. 7은 유량에 따른 이론출력(Theoretical power)과 발전기출력(Shaft power)을 나타내는 것이다. 이론출력은 유량 20m³/min을 기준으로 유량이 감소할 때 발전기의 출력변화를 Fig. 6의 압력 값을 기준으로 식 (1)을 통해 동력으로 환산한 값이다.

이론동력결과 유량 10~12 m³/min 부근 이론동력이 가장

높게 나타났으며, 이 구간에서 회전자는 압력에 의한 부하를 가장 많이 받는 것으로 판단된다. 따라서 발전기 출력결과 유량 12 m<sup>3</sup>/min 부근에서 약 7.825 kW로 가장 낮은 값을 나타낸 후 다시 증가하는 경향성을 보였다. 따라서 유량 12 m<sup>3</sup>/min으로 회전자를 구동시킬 경우 가장 손실이 높은 것을 확인 할 수 있었다. 결국 이론동력이 높으면 회전자에서 작동유체에 의한 동력손실이 커지게 됨을 확인할 수 있었다.

$$L_{th} = \frac{Q[m^3/min] \times P[mmAq]}{6120} \quad (1)$$

#### 4. 실험방법 및 결과분석

Fig. 8은 보조동력장치 출력을 측정하기 위한 실험장치를 나타내고 있으며, 시스템 구성은 Table 1과 같이 선진 독일 Farymann Diesel사의 4행정, 공냉식 디젤엔진과 28 VDC 발전기가 조립된 보조동력장치, 정상상태의 보조동력장치 정격 출력 상태 확인을 위한 입력전압 및 전류변화 측정을 위해 보조동력장치 입력단과 연결된 전압계와 전류계, 엔진측의 발전기 출력단과 연결된 100AH 용량의 축전지, 엔진 회전속도 조절 및 부하증감을 제어 및 표시하는 로드뱅크(load bank)로 구성되어 있다. 또한 과전압 방지 및 회로보호를 위한 콘택트 컨트롤러(Contact controller)와 입력전압, 전류변화 및 엔진회전수 변화를 실시간으로 모니터링하는 성능시험기(Performance

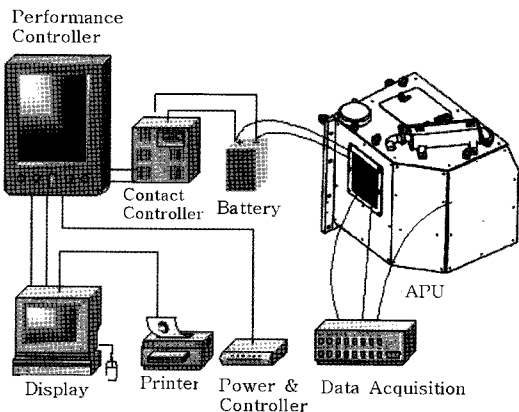
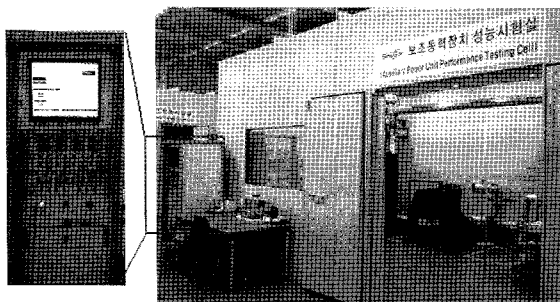


Fig. 8 Experimental setup of the auxiliary power unit

controller), 데이터획득 장치, 엔진의 부하변동에 따른 출구부의 온도분포를 확인할 수 있는 디스플레이, 전체적인 시스템 운용 및 제어기능을 담당하는 컨트롤러 등으로 크게 구성되어 있다. 또한 정밀한 측정을 위하여 모든 실험 구성 장비 및 보조동력장치를 반무향실(Semi-anechoic room)에 설치하여 실험을 진행하였다.

Fig. 9는 보조동력장치의 입력전류(Input current) 및 입력전압(Input voltage) 변화에 따른 보조동력장치 엔진의 회전수 특성을 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 보조동력장치엔진 회전수는 초기 작동 후 0초에서부터 약 5초 부근까지는 회전수가 2,800rpm에서 2,300rpm으로 감소하고 있는 것은 입력전압(V) 값이 보조동력장치 엔진 출력 성능특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 초기 29.6V에서 25.4V로 입력전압을 낮게 공급하였기 때문에 나타난 현상이다. 반면 약 5초 이후부터는 다시 보조동력장치 회전속도가 상승하는 경향을 나타내는 것은 입력전압이 다시 증가하면서 나타나는 특성이다. 그

Table 1 Specification of diesel engine for auxiliary power unit

Technical items	Specification
Engine model	43F diesel engine(Germany)
Configuration	Horizontal Position
Cylinder	1EA
Cooling type	Forced air
Max. output	9.9kW
Max. speed	3,000rpm
Max. torque	40.6Nm @2,300rpm
Stroke	100mm
Displacement	708cm <sup>3</sup>
Compression ratio	1:19
Oil consumption	1g/kWh
Dry weight	92kg
Dimensions(L×W×H)	430×580×410mm

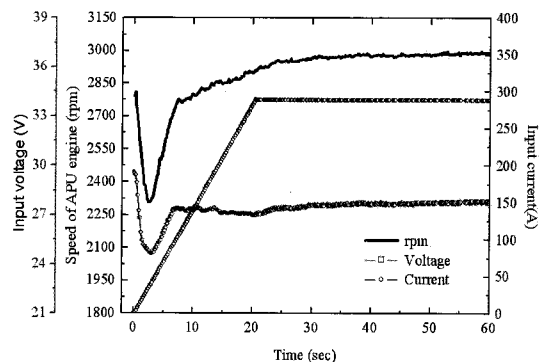


Fig. 9 Output performance of the APU with input current and voltage changes

리고 입력전압 값이 27.4V로 일정하게 공급되고 전류 값도 점차적으로 증가공급 될 때인 20초 이후부터는 안정적인 일정한 출력을 보이고 있다. 따라서 본 보조동력장치의 작동성능 특성은 입력전압 값은  $28.0 \pm 0.7VDC$ 의 전압으로 일정할 때, 입력 전류 값을 점차적으로 높여 부하를 증가시킬 때 보조동력장치 엔진은 부하에 따른 높은 출력을 내기위해 회전수는 증가하게 되고, 그 결과 요구되는 8kW의 출력성능을 나타낸다.

본 보조동력장치는 100% 부하율 일 때 일정전압 공급조건에서는  $2,950 \pm 50rpm$ 의 회전속도를 유지하면서 일정한 발전 출력을 유지하는 회전수를 나타내며 균일한 회전 출력성능을 보였다.

Fig. 10은 보조동력장치의 입력전류의 순간적인 변화인 부하 조건을 10%에서 85%로 순간적으로 변화시켰을 때 본 보조동력장치 엔진의 회전속도 변동을 확인을 통한 발전출력의 안정화 정도를 확인하기 위한 목적으로 본 실험을 실시하였다.

85%의 부하조건에 보조동력장치 엔진 안정화 회전수는  $2,900 \pm 100rpm$ , 10% 부하조건에는  $2,650 \pm 100rpm$ 이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 10%부하인 30A의 전류를 보조동력장

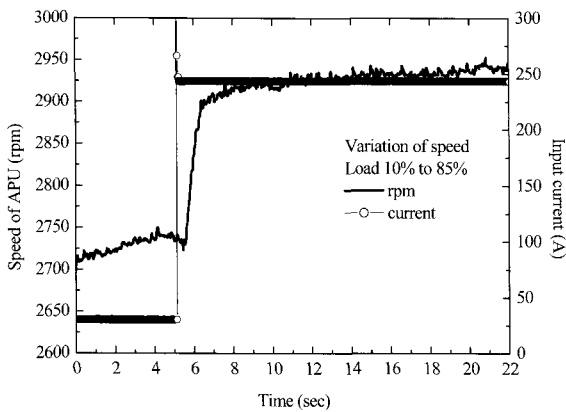


Fig. 10 Variation of rotational speed of APU with load conditions

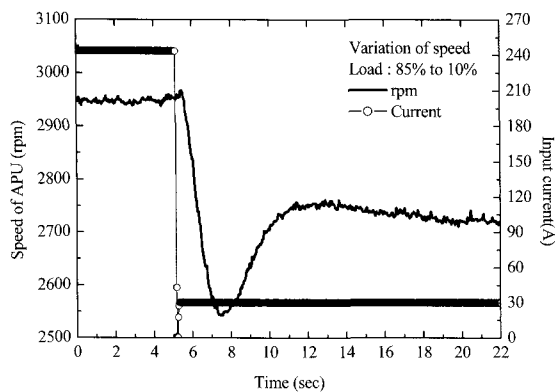


Fig. 11 Variation of rotational speed of auxiliary power unit with load conditions

치에 일정하게 공급하였을 때 약 2,710~2,750rpm의 범위에서 속도변동을 보였으며, 부하를 85%로 급격히 증가시킨 시점인 5초 이후 즉, 243A의 전류를 공급하였을 때에는 회전속도는 약 2,900~2,950rpm의 속도분포를 보였다. 이때 입력 전류 변화에 따른 회전속도 안정화 시간은 약 1.5초 이내에 안정화가 이루어졌다. 따라서 부하변동인 입력전류 변화에 따른 보조동력장치 속도변동률 시험에서는 1.5초 이내에 속도안정화가 이루어지면서 일정회전속도 변동률을 보였다.

Fig. 11은 보조동력장치의 입력전류의 순간적인 변화 부하조건인 85%에서 10%로 순간적으로 부하율을 낮추었을 때 본 보조동력장치 엔진의 회전속도 변동률 및 안정화 rpm 확인을 위한 실험에서는 그림에서 확인할 수 있듯이, 80% 부하인 243A의 전류를 보조동력장치에 일정하게 공급하였을 때는 약 2,950rpm의 범위에서 안정화된 속도변동률을 보였다.

부하를 10%로 급격히 감소시킨 시점인 5초 이후 회전속도 변동률은 2,900~2,950rpm의 속도분포를 보였다. 이때 입력 전류변화에 따른 회전속도 안정화 시간은 약 2초가 소요되었으며, Fig. 10의 안정화 시간과 비교할 때 다소 0.5초 정도 길어진 시간으로, 이는 속도 급감에 따른 회전축의 관성력에 의한 영향인 것으로 사료된다. 따라서 부하변동인 입력전류 변화 10%에서 85%, 85%에서 10% 부하로 순간적으로 입력 부하를 변화시켰을 때 보조동력장치 엔진 속도변동률 시험에서는 1.5초 이내에 속도안정화가 이루어지면서 설계기준 속도안정화 조건과 비교할 때 범위 내에서 만족하게 나타났다.

## 5. 결론

본 연구는 보조동력장치 발전기 회전자의 유동을 수치 해석적 방법으로 분석하고, 이러한 회전자를 적용한 보조동력장치의 출력특성을 실험적 방법으로 파악하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 회전자의 회전속도 변화에 따른 출구 토출유량을 분석한 결과 회전자의 회전속도가 빨라질수록 흡입되는 공기량이 많아져, 결국 출구유량이 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 회전자로 유입되는 유량이 증가할수록 케이스 출구에서 발생하는 압력분포는 급격하게 줄어드는 것을 확인할 수 있었고, 약  $12m^3/min$ 의 유량에서 이론동력이 최대가 되어 발전기 출력이 약 7.825kW로 가장 낮게 나타났다.
- (3) 보조동력장치의 입력전류(Input current) 및 입력전압(Input voltage) 변화에 따른 보조동력장치 엔진의 회전수 특성을 분석한 결과 약 20초 이후부터 안정적인 회전수를 나타내었다.
- (4) 보조동력장치의 입력전류의 부하조건을 10%에서 85%로

순간적으로 증가시키고, 85%에서 10%로 순간적으로 감소시켰을 때 약 2초 이내에 안정적인 출력특성을 나타내었다.

## 후 기

본 연구는 경상대학교 2단계 BK21 사업과 지식경제부 2010년 지역산업기술개발사업, 경상대학교 산학협력중심대학육성사업 기술개발과제에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Lee, T. E., Suh, J. S., Jeong, S. H., and Park, Y. S., 2009, "A Study on Thermal and Fluid Characteristics inside Engine Room of Auxiliary Powr Unit for Tracked Vehicle," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 26, No.12, pp. 85~93.
- (2) Lee, T. E., Suh, J. S., and Park, Y. S., 2009, "A Study on Temperature Distribution Characteristics inside Engine Room of the Auxiliary Power Unit for Tracked Vehicle," *KSPE 09S451*, pp. 821~822.
- (3) Yi, C. S., Suh, J. S., Song, C. K., and Yun, J. H., 2010, "A Study on Performance of Cooling Fan for Auto Transmission Oil Cooler in the Large-size Diesel Engine," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 13, No. 6, pp.71~76.
- (4) Lee, T. E., Suh, J. S., Yi, C. S., Chung, K. T., Yun, J. H., and Park, C. W., 2010, "Effect of Area Change of Exhaust Hole on Temperature Distribution in Engine Room of Auxiliary Power Unit for Tracked Vehicle," *Proceeding of KSPE 2010 Spring Conference*, pp. 877~878.
- (5) Lee, D. R., 2004, "Study of Flow Analysis of a Mid-size Vehicle in an Engine Room," *Korean Society of Computational Fluids Engineering*, Vol. 9, No. 4, pp. 13~19.
- (6) Hountalas, T. D., 2000, "Prediction of Marine Diesel Engine Performance Under Fault Conditions," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 20, Issue 18, pp. 1753~1783.