

휠에 의한 전자펌프 관성보완 특성 실험

Experimental Study on the Inertia Characteristic of EM Pump Supplied by a Flywheel

남호윤, 김종만, 김희령, 이길용

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

액체금속로에서 외부전원 상실시, 플라이휠로 전자펌프의 관성력을 보완하는 개념을 검증하기 위하여 정상운전시에는 모터의 역할을 하다가 비상시에는 발전기의 역할을 하는 휠을 부착한 소형 motor-generator를 설계, 제작하였고, 이를 소듐 루프에 설치된 전자펌프에 적용하여 외부전원 상실 후의 전기적, 유체적 특성들을 측정하였다. 특성들의 감쇠율은 전자펌프의 초기부하의 전류에 비례하고, flywheel의 관성에너지에 반비례하였다. 또한 특성들을 초기 값으로 무차원화하였을 때 회전주파수에 따라 같은 경향을 보였다. 실험치를 기초로 전기적 및 유체적 특성들의 감쇠율을 나타내는 무차원 시간을 제안하였고, 이 무차원 시간으로 특성들의 감쇠율을 $\pm 10\%$ 오차범위 이내로 기술할 수 있었다. 무차원 시간으로 회전주파수를 예측하는 것이 가장 중요하며, 다른 측정인자들은 무차원 시간이나 회전주파수로 감쇠현상을 예측할 수 있을 것으로 예상된다.

Abstract

In order to confirm the concept that the inertia of EM pump is supplied by flywheel at loss of electric power in a liquid metal reactor, a small motor-generator which operates as a motor in the normal operation but as a generator at the emergency condition is designed and is applied to the EM pump installed in the sodium loop. The electric and fluidic characteristics after loss of external electric power are investigated. The decay rate of those characteristics is proportional to the initial electric current of EM pump and is inversely proportional to the inertial force of flywheel. Those characteristics nondimensionized by their initial values have shown the same tendency following the frequency of flywheel. In the present study the dimensionless time which can explain the decay rate of those characteristics is proposed based on the measured experimental data. It is shown that the decay rate of electric and fluidic characteristics can be described by this dimensionless time within $\pm 10\%$ error. The most important thing is shown to predict the frequency of flywheel by the dimensionless time and it is expected that the decay rate of other parameters can be predicted by the dimensionless time or frequency of flywheel.

1. 서론

신개념 액체금속로에서는 1차측 냉각재인 소듐 구동펌프로 전자펌프를 채용하고 있다. 전자펌프는 여러 장점에도 불구하고 휠이 있는 기계식 펌프와는 달리 펌프의 관성력이 없어 외부전원 상실시 노심외 열을 제거하는데 문제점이 있다. 관성력에 의한 노심 냉각능력은 안전성 면에서 주요한 역할을 하므로 이 단점을 보완하고자 전자펌프를 1차측의 구동펌프로 채용하는 액체금속로에서는 별도로 관성보완 장치를 설치할 필요성이 있다. 비상시에 에너지를 공급하는 방법으로는 여러 가지가 있지만, 피동형으로 전자펌프의 관성력을 보완하는 개념들 중에는 플라이휠의 관성 에너지를 이용하는 방법이 있다. 이 방법은 정상가동시에는 무부하로 운전되는 휠의 관성력으로 외부전원 상실시에 전력을 생산하여 전자펌프를 구동하는 개념으로 KALIMER에서는 이 방법을 채용코자 하므로 이 개념의 검증과 분석용 기초자료 생산이 필요하다. 플라이휠에 의한 에너지 저장기술은 국내에서도 연구된 바 있다[1].

이 실험의 목적은 외부전원 상실시에 작동되는 관성보완장치의 전기적 특성과 소듐 루프에서의 열수력적 특성을 측정하여 관성보완장치의 성능을 분석하고, 이를 액체금속로의 설계에 반영코자 하는데 목적이 있다. 이를 위하여 정상시에는 모터의 역할을 하나 외부전원 차단시에는 발전기의 역할을 하는 소규모 관성보완장치인 휠을 부착한 모터발전기(motor-generator)를 설계, 제작하였다. 기존의 MHD 소듐 실험장치에 설치된 소형 전자펌프에 외부전력 차단시에는 관성보완장치에서 발생된 전력을 공급하는 구조로 실험장치를 구성하여 이 장치의 특성을 실험하였다. 전자펌프에 60Hz, 최대 15kW의 전력을 정상적으로 공급하다가 외부전원 상실시에 시간에 따른 관성보완장치의 회전수, 전압, 전류, 역률 및 소듐 계통에서의 유량, 압력강하 등의 변화를 측정하여 관성보완장치의 성능을 평가하였다. 휠의 특성을 조사하기 위하여 규격이 다른 두 종류의 휠을 사용하여 실험하였고, 외부전원 상실 후 비상전원 공급에서 전자펌프 제어기의 역할을 조사하기 위하여 전자펌프 제어기를 사용한 실험과 사용하지 않는 실험 두 가지 종류를 실험하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

2.1.1 관성보완 실험장치의 구성

이 실험장치는 관성보완장치와 소듐 루프로 구성되어 있다. 정상적으로 운전되고 있는 소듐 루프에서 외부전원이 상실될 때 관성보완장치에서 발생하는 전력을 소듐 루프의 구동 펌프인 전자펌프에 공급하는 개념이다. 정상적으로 작동되고 있는 전자펌프에서 외부전력(한전전력)을 차단하면, 한전전력에 의해 휠을 1800rpm으로 구동시키며 모터 역할을 하고 있던 모터발전기(motor-generator)가 발전기로서의 기능을 하면서 무접점으로 전자펌프에 전력을 공급하게 된다. 이 절환시점에서는 발전기에서 생성되는 전력은 한전전력과 전압, 주파수 및 위상이 동기화 되어 있다.

이 실험에 사용된 소듐 실험장치는 MHD 압력강하 실험장치로 그림.1과 같이 구성되어 있다. 최대 유량은 3.3 l/sec이고, 최대 운전온도는 550℃, 설계압력은 10기압이다. 이 실험장치는 여러 개의 루프로 구성되어 있는데 이 실험에서는 소듐 공급탱크, 전자펌프, 자장-압력강하 실험부, 전자유량계로 구성되는 루프를 사용하였다. 이 실험에 사용된 전자펌프는 Novatome 사의 제품인 model IA124로 MHD 실험장치에 설치하여 5년 이상 실험에 사용하던 것이다. 이 전자펌프의 정격운전 조건은 600℃ 소듐에서 유량은 3.3 l/sec, 수두는 3기압이다. 이 전자펌프는 입력전압을 0V에서 최고 380V까지 변화시켜 유량을 제어할 수 있는 전자펌프 제어기가 설치되어 있다. 전자펌프 양단의 차압은 전자펌프 입구와 출구 사이의 차압을 측정하여야 하지만 그림.1에서 보는바와 같이 전자펌프의 유출구에 있는 자장-압력강하 실험부의 입구와 소듐 공급탱크 상부의 커버가스의 압력차를 측정하였으므로 전

자펌프 양단의 압력차와는 다소 다르다. 그러므로 정밀한 전자펌프 양단의 압력차를 구하기 위해서 측정된 이외의 부분의 압력강하는 이론적으로 계산하여 보상하였다.

외부전력 차단 후, 관성보완장치는 시간이 지남에 따라 전자펌프에 공급되는 부하에 의해 관성력을 소실하게 되므로 이 실험에서 측정하는 모든 인자는 천이상태(transient state)로 감쇠하게 된다.

2.1.2 관성보완장치

관성보완장치로는 휠(wheel)의 관성력으로 전기를 발생시키는 방법을 채택하였다. 정상 운전시에는 모터로서 휠을 회전시키다가 비상시에 전기를 발전시키는 모터발전기(motor-generator, M-G)로서의 역할을 한다. 휠은 모터발전기의 축에 연결되어 있고, 휠을 교체할 수 있게 설계되어 있다. 이 실험에서는 2개의 휠을 비중이 7.801인 철판으로 만들었다. 소형 휠의 규격은 $\varnothing 649.8 \times t50.82$ 이고, 대형 휠의 규격은 $\varnothing 720 \times t100\text{mm}$ 이다. 모터발전기에 들어 있는 회전자는 코일로 이루어졌으며 외부전원이 상실되면 이 회전자도 관성력을 갖는다. 회전자는 질량이 52kg 이고, 직경이 320mm 이다. 이 회전자는 코일로 구성되어 있어 질량이 균일하지는 않지만 질량분포가 균일한 것으로 가정하여 관성력을 계산하였고, 관성력은 소형 휠의 1/10 정도이었다.

이 실험장치에서의 제어회로는 그림.2와 같다. 이 그림에서 관성보완장치의 작동순서를 보면 다음과 같다. 최초의 한전측 전원인 R.S.T. 입력전원의 출력에 의하여 부하(전자펌프)에 전원이 투입되어 가동되면 입력전원 센서에 의하여 M-G controller가 동작하여 모터발전기 축에 연결되어 있는 소형 시동용 동기전동기는 서서히 가속한다. 이 때 발전기의 무점점 절환회로는 Off 상태이며 동기전동기는 설정시간 후 동기속도의 약 102-103 % 부근에서 속도센서(③)의 신호를 받아서 한전의 위상과 같아지면 M-G 절환회로에 의해 M-G controller와 분리되고 동시에 무점점 절환회로에 의하여 한전전력에 의한 운전이 시작된다. 이 때의 동기전동기의 무부하 전기손실은 수십 watt 이내이며, 동기전동기의 회전각은 한전 위상에 자동 동기화 되어 운전되다가 정전시에는 그대로 발전기로 동작함으로써 한전의 위상각이 그대로 유지되는 발전기로 동작한다.

실험용 입력차단 스위치(⑨)의 버튼을 눌러 분리시키면 전자펌프에 공급되는 한전전력이 차단되고 모터발전기가 전력원이 되어 차단하기 전의 한전전원과 동일한 위상과 전압으로 전자펌프에 전력이 공급된다. 전자펌프(⑩)는 최종적인 부하이다. 신호변환기(⑪)는 계측기(⑫)의 입력신호가 -16~16 DVC 범위이므로 다양한 종류의 신호를 한 대의 계측기에서 동시에 측정하기 위하여 0~10 DVC로 바꾸는 장치이다.

모터발전기의 내부구성은 그림.3과 같다. 이 그림에서 보면 상부에는 휠(①)이 부착되고, 하부에는 기동용 동기전동기(⑦)가 설치되며, 중심에는 가장 주요한 부분인 모터와 발전기를 겸용으로 사용하는 발전기가 설치되어 있다. 정지되어 있는 최초에는 휠의 무게 때문에 발전기 고정자 코일(④)에 한전전원을 투입시켜도 운전이 불가능하므로 발전기 고정자 코일(④)에 전원을 인가하지 않는 상태에서 기동용 동기전동기(⑦)를 운전하여 무부하 상태에서 60Hz인 1800rpm 보다 약 2~3% 높은 회전수로 가속시킨 다음 하부의 코일(⑥)을 여자시키면 ⑤의 코일에 전압이 유기된다. 여기에서 유기된 전압은 회전자 코일(③)에 다시 연결되어 발전기의 특성을 갖는 동기전동기가 된다. 이때 ④번의 출력 라인에 역으로 한전전원을 투입하면 발전기 전체가 동기전동기화 되어 한전전원에 동기화 되어 운전되고 기동용 동기전동기는 전원이 차단되어 완전히 전기적으로 분리된다. 이 상태에서 한전전원을 정전시키면 ④번 코일은 출력코일이 되어 발전 전압이 출력된다.

2.2 측정방법

2.2.1 소뿔 루프에서의 계측장비

소뿔 유량계는 Novatome사 모델인 전자유량계로 소형 유량계와 대형 유량계를 병렬로 설치하여 유량에 따라 선택적으로 측정에 사용할 수 있게 설계되어 있으나 이 실험에서는 대형 유량계만 사용

하였다. 이 유량계의 최대유량이 3.3 l/sec 이다. 이 유량계들은 0~20mV 출력을 발생하므로 외부의 노이즈에 매우 민감하다. 이 유량계는 최대 ±5%의 오차를 갖고 있다. 소듐 차압계는 소듐보다 무겁고 또한 소듐과 150℃ 이하에서 반응하지 않는 오일을 차압계에 채워 오일과 소듐이 직접 접촉하여 압력을 transducer에 전달하는 방법을 사용하고 있다. 이 실험에 사용된 유량계의 최대차압은 630 kPa 이다. 수차례 천이상태에서 차압을 측정한 결과를 분석한 바에 의하면 최대 ±10% 정도의 오차와 1kPa 정도의 고정오차를 갖는 것으로 예측된다.

2.2.2 전기특성 측정인자 및 주요변수

주요변수의 특성, 측정오차, 기호 및 단위는 표.1에 기술하였다. 측정한 값들은 계측기 뿐만 아니라 판넬상에서 디지털 지시계에 의해 표시되므로 계측시에 두 값을 서로 비교함으로써 측정값의 정확도를 관찰하였다. 측정한 변수들의 측정방법과 다른 실험치로부터 도출한 인자들을 아래에 기술하였다. 모터의 극수가 4극인 모터전동기를 사용하였으므로 초기의 60Hz 전원주파수에서는 1800rpm으로 운전되고 있다. 실험부에 공급되는 한전전력은 위상에 따른 전압차를 줄이기 위하여 전압조정기를 거쳐 실험장치에 공급하였으나 R.S.T. 위상에 따라 220V일 때 0~2V 정도의 오차를 보였다. 이 실험에서는 모든 센서를 R 위상에 고정시키고 측정하였다. 전류도 위상에 따라 ±1% 정도의 차이를 보였다.

역율이란 전압과 전류의 위상차 즉, 전압과 전류의 파형 차이의 크기를 나타내는 계수이다[2]. 역율은 다르게 표현하면 유효전력을 전체전력으로 나눈 값으로 기술된다. 유효전력은 전압과 전류 및 역율을 사용하여 계산하였다. 일반적으로 발전기의 효율(E_w)은 생산되는 전체전력을 발전기의 출력으로 나눈 것이지만, 이 실험에서는 천이상태에서 발전기의 출력이 분명하게 정의되지 않으므로 발전기에서 생산되는 전체전력을 관성체의 운동에너지가 시간에 따라 변하는 변화율로 나눈 것으로 정의하였다. 이를 백분율로 나타내면 다음과 같다.

$$E_w = 100 \cdot \frac{\sqrt{3} V_1 \cdot A_1}{4\pi^2 I f \frac{df}{dt}} \quad (1)$$

여기에서 시간에 따른 주파수의 변화율은 주파수를 시간의 함수로 fitting하여 구하였다. I 는 관성모멘트이고, 실험에서 사용한 휠의 관성모멘트는 휠의 무게 M 과 휠의 반경 r 로 다음과 같이 주어진다.

$$I = \frac{M \cdot r^2}{2} \quad (2)$$

관성모멘트는 휠의 관성력뿐만 아니라 내부에 있는 코일 회전자의 관성율도 동시에 고려하여 계산하였다. 전자펌프의 효율(E_p)은 전자펌프가 외부에 하는 일의 양을 입력되는 일의 양으로 나눈 값으로 백분율로 표시하면 다음과 같다.

$$E_p = 100 \cdot \frac{Q \cdot \delta P}{P_1} \quad (3)$$

여기에서 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ 는 유량을 나타내며, $\delta P(\text{Pa})$ 는 펌프양단의 압력차를 나타낸다.

2.2.3 측정변수 및 실험자료

수행한 실험의 종류와 회수는 표.2에 기술하였다. 실험은 휠의 크기와 전자펌프 제어기의 사용

여부에 따라 4종류로 분류 될 수 있으며, 총 30set의 실험자료를 생산하였다. 전자펌프 제어기를 전자펌프 입력전원에 설치하는 경우에는 제어기를 전후로 발전기와 제어기 사이를 1차측이라 분류하였으며 기호에는 첨자 1를 사용하여 표기하였고, 제어기와 전자펌프 사이의 배선을 2차측이라 분류하였으며 첨자 2로 표기하였다. 전자펌프 제어기를 사용하지 않을 때에는 전자펌프에 공급되는 전력을 제어하지 못하기 때문에 초기 정상상태에서는 한전전력의 특성과 같은 전력이 공급된다. 측정된 값들은 관성보완장치의 회전수 및 1차측과 2차측의 전압, 전류, 역율 등 전기적 특성들이고, 소듐 루프에서는 소듐 온도, 유량 및 전자펌프 유출구와 소듐 공급탱크 사이의 차압을 측정하였다. 이 측정치를 이용하여 유효전력, 발전기의 효율, 제어기의 효율 및 전자펌프의 효율을 계산하였다.

제어패널에는 관성보완장치의 제어기 및 표시기(display indicator)가 설치되어 있다. 이와 아울러 센서의 계측신호를 0~10 DVC로 변환시키는 신호변환기도 내부에 설치되어 있다. 이 신호변환기와 측정센서는 수 차례 보정하였다. 보정시에 발생하는 오차는 센서 자체오차의 10% 이하이었고, 이 오차도 전체오차에 포함되어 있다.

측정방법으로는 모터발전기가 한전전력과 동기화되어 있는 상태에서 소듐 루프가 정상상태로 운전될 때 측정을 시작하였고, 한전전력을 차단하여 휠이 정지할 때까지 데이터를 수집하였다. 두 종류의 휠 각각에 대해 3번씩 측정하였다. 제어패널에서 변환된 신호와 소듐 루프에 설치된 유량계, 차압계 및 열전대에 의한 온도신호를 workstation으로 제어되는 HP745B 계측기를 사용하여 수집하였다. 측정에 사용한 소프트웨어는 HPVee 이다. 측정에는 0~10 DVC 변환되는 신호 값과 변환한 실제 값이 기록되며, 측정시에는 모든 값들이 그래프로 화면에 나타난다. 이와 동시에 실험분석에 보조적으로 사용하기 위하여 패널에 외부전원을 차단하기 전의 상태인 초기상태에서 지시되는 표시기의 데이터를 별도로 기록하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 실험결과 정리 및 오차분석

실험결과에 대한 오차해석을 ASME 규격에 따라 수행하였다. 본 실험은 계측기의 측정범위가 최대값 근방에서 영으로까지 감쇠하는 천이상태에서의 실험이다. 센서의 오차는 대개 reading error에 고정된 error인 어떤 값의 함으로 주어지거나 또는 full scaling error로 주어진다. 그러므로 측정할 수 있는 최대값의 낮은 범위에 갈수록 오차가 높아지고 아주 낮은 범위에서는 측정된 값이 오차범위 내에 포함되는 현상이 발생하였다. 본 실험에서는 관성력이 적어질수록 역율을 제외한 모든 측정값들이 기하급수적으로 감소하여 최대값의 10% 미만에서 장시간 계측되는 형태이다. 그러므로 이 실험에서는 낮은 범위에서의 계측기의 보정이 정밀히 요구되어 정상상태에서 사용하는 1차식 보정방법 대신 다차원 함수로 보정하여 전 구간에서 최대한 잘 맞게 보정하였고, 휠이 정지한 후에 미세한 영점의 변화를 다시 보정하였다.

실험을 시작하기 전에 유량과 전자펌프 양단에서 측정된 압력강하 값을 검증하기 위하여 전자펌프 특성곡선이 주어진 300V 입력전압에서 유량과 압력강하를 측정하였다. 이 때 유량 3.3 l/sec에서 350kPa의 압력강하를 보였다. 소듐 온도 250°C에서 이와 같은 유량이면 펌프 특성곡선에서는 전자펌프의 헤더가 355kPa 정도이므로 큰 오차는 없음을 확인하였다.

3.2 시간과 주파수에 따른 실험인자들의 변화

실험에서 측정된 각 인자들의 변화를 나타내는 다음의 그래프들에서 휠을 구분하는 기호에서 S는 소형 휠에 대한 실험을 의미하며 L은 대형 휠을 의미한다. 그래프들에 나타나는 Load는 전자펌프에 입력되는 전체전력을 나타낸다.

그림.4는 전자펌프 제어기와 대형 휠을 사용한 대표적인 실험으로 시간에 따른 각 인자들의 변화를 보이고 있다. 여기에서 외부전력을 차단한 시간은 0이다. 그림.5는 전자펌프 제어기를 사용하지 않는 실험인 경우이다. 제어기를 사용하지 않았기 때문에 2차측은 측정을 하지 않았다. 이 두 그림에서 보면 역율과 효율을 제외한 실험인자들의 값은 지수함수로 감쇠하는 형태를 보이고 있으며, 이들 중에서 주파수를 제외한 다른 인자들은 외부전원 차단시(time=0)에 짧은 시간내에 급격히 떨어졌다가 서서히 지수함수로 감쇠함을 볼 수 있다. 측정치를 초기 값으로 무차원하였을 때, 초기에 떨어지는 비율은 펌프에 공급되는 초기의 부하가 높을수록 떨어지는 비율이 높았다.

그림.6은 시간에 따른 회전주파수를 보이고 있다. 휠이 클수록 또한 초기부하가 낮을수록 천천히 감쇠함을 볼 수 있다. 그림.7은 시간에 따라 유량율이 감쇠하는 경향을 보이고 있다. 전압과 전류의 시간에 따른 감쇠현상도 유량에서와 같은 현상을 보이고 있고, 이들 외에 다른 실험인자들도 같은 현상을 보였다. 모터발전기의 효율은 4kW 정도의 초기부하에서 대략 20% 정도이었고, 초기 부하가 높을수록 증가하는 경향을 보였다.

그림.8과 그림.9는 휠의 회전진동수에 따른 전압과 전류의 변화를 각각 보이고 있다. 초기의 전력이 유사할 때, 휠의 크기에 관계없이 진동수가 같으면 전압이 같음을 볼 수 있다. 다른 실험인자들도 이와 같은 현상을 보였다. 전압은 무차원 회전진동수가 0.1(6Hz)이 될 때까지 1차함수로 휠의 회전진동수에 비례함을 볼 수 있었다.

역율은 시스템에 공급되는 전압과 전류의 위상차에 따라 달라지기 때문에 초기 공급되는 전력의 질 및 공급받는 부하의 전기적 특성에 따라 변하므로 시스템의 고유 특성이다. 또한 많은 전기용량이 필요한 기기의 배선에 일반적으로 설치하는 역율보상장치에도 관계되므로 역율은 전자펌프에 실제적으로 공급되는 유효전력에 많은 영향을 미치지만 객관화하기는 어렵다.

전자펌프의 효율을 측정한 값과 전자펌프 특성곡선을 이용하여 계산한 값을 대략적으로 비교하였다. 실험에서 보면, 소듐 온도 246°C에서 195V를 공급하여 2.52 l/sec의 유량일 때 10% 정도의 효율을 보인다. 소형전자펌프 설계용 전산코드 EMPAD로 계산한 값은 200°C 온도에서 220V의 전압을 공급하여 2.5 l/sec 유량이면 효율이 9.6%이므로 어느 정도 일치함을 알 수 있었다.

3.3 시간의 무차원화

앞에서 기술한 바와 같이 휠의 크기에 따라 특정 실험인자가 같은 값에 도달하는 시간이 달라짐을 볼 수 있었다. 이를 분석한 결과, 초기부하가 같으면 특정 실험인자가 같은 값에 도달하는 시간이 관성체 초기의 운동에너지에 비례함을 알 수 있었다. 즉,

$$t_e \sim \frac{1}{2} I \omega^2 \tag{4}$$

여기에서 t_e 는 특정 인자가 감쇠시에 같은 값에 도달하는 시간이고, ω 는 각속도 이다. I 는 관성체의 관성모멘트이다. 전자펌프 제어기를 사용한 실험에서 t_e 는 전자펌프에 공급되는 초기전류 (A_p)에 대략적으로 반비례함을 알 수 있었고 이를 실험치로 나타내면 그림.10과 같다. 즉,

$$t_e \sim \frac{1}{A_p} \sim \frac{1}{P_T} \cdot V_p \tag{5}$$

여기에서 P_T 는 전자펌프에 공급되는 초기의 전체전력을 나타내고, V_p 는 전자펌프에 공급되는 초기전압을 나타낸다. 식(4)와 식(5)에서 관계식을 구하고, 전압의 단위를 갖는 어떤 값 V_g 를 나누면 다음과 같다.

$$t_e \sim \frac{\frac{1}{2}I\omega^2}{P_T} \cdot \frac{V_b}{V_g} \quad (6)$$

이 식에서 앞 부분은 energy를 power로 나누어서 시간의 단위이므로 뒤 부분 V_b 를 V_g 로 나누어 무차원화하면 t_e 는 시간의 단위가 된다. V_b 를 무차원으로 만들기 위해서 본 실험에서는 변하지 않는 전압 즉, 모터발전기에서 나오는 초기전압(V_g)로 나누었다. 그러므로 무차원 시간 t^* 는 다음과 같이 정의되었다.

$$t^* = \frac{t}{t_e} = \frac{P_T t}{\frac{1}{2}I\omega^2} \cdot \frac{V_g}{V_b} \quad (7)$$

다시 정리하면, 여기에서 t 는 실제시간이고, P_T 는 전자펌프에 공급되는 초기의 전체전력이며, $\frac{1}{2}I\omega^2$ 는 휠의 초기 운동에너지이다. V_g 는 모터발전기에서 발생하는 초기전압이고, V_b 는 전자펌프에 공급되는 초기전압이므로 전자펌프 제어기를 사용하지 않을 경우에는 V_g 와 V_b 가 같고 또한 앞에서 정의한 V_1 의 초기 값과 동일하다.

측정한 다른 실험인자는 초기의 값 즉, 외부전력을 상실하기 직전의 값으로 나누어 무차원 수로 나타내었다. 그림.11은 무차원화한 시간으로 회전진동수를 나타낸 것이다. 무차원 회전진동수가 0.2(12Hz)까지 감소하면 소듐 루프에서의 유동이 거의 정지되는데 이때까지는 실험치들이 잘 모이고 있는 형상이다. 이 그림에서 무차원 회전진동수(Hz^*)를 무차원 시간(t^*)으로 나타내면 다음과 같다.

$$Hz^* = \text{Exp}\left(-\frac{t^*}{0.45}\right) \quad (8)$$

그림.12는 무차원 시간으로 무차원 전압(V^*)을 나타낸 것이다. 무차원 전류(A^*)도 무차원 시간으로 도시할 수 있으며, 이들을 관계식으로 나타내면 다음과 같다.

$$V^* = 0.956 \text{Exp}\left(-\frac{t^*}{0.319}\right) \quad (9)$$

$$A^* = -0.2283 + 1.1455 \text{Exp}\left(-\frac{t^*}{1.1}\right) \quad (10)$$

그림.8과 그림.9에서 무차원 회전진동수로 무차원 전압(V^*)과 무차원 전류(A^*)를 기술하면 다음과 같이 나타난다.

$$V^* = 0.1293 + 1.019 Hz^* \quad (11)$$

$$A^* = -0.580 + 1.492 Hz^{*0.3} \quad (12)$$

무차원 시간으로 회전진동수의 변화를 예측하는 것이 가장 중요하며, 다른 변수들은 무차원 시간이나 무차원 회전진동수로 구할 수 있다.

4. 결 론

- (1) 외부전원 초기에 주파수를 제외한 측정인자는 급격한 감쇠현상을 보이는데 그 무차원 값은 전자펌프의 초기출력이 높을수록 감쇄하는 율이 많고, 전자펌프 제어기의 효율에 관계이었다.
- (2) 외부전력 차단후 관성보완장치가 나타내는 전기적, 유체적 측정인자를 초기 값으로 무차원화하였을 때 회전주파수에 따라 같은 경향을 보였다.
- (3) 무차원 특정 측정인자가 같은 값에 도달하는 시간은 관성체의 초기 운동에너지에 비례하고, 무차원 특정 측정인자가 같은 값에 도달하는 시간은 전자펌프에 입력되는 초기 전류에 반비례하였다.
- (4) 측정인자들을 가장 잘 기술하는 무차원 시간을 제안하였다.
- (5) 무차원 시간으로 회전주파수를 예측하는 것이 가장 중요하며, 다른 측정인자는 시스템의 특성이 정해지면 무차원 시간이나 회전주파수로 결정할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 지원에 의하여 수행되었다.

참고문헌

1. 최상규 등, "플라이휠 에너지 저장기술 개발," 산업자원부, 1994-E-EL02-P-44, 1999.
2. Aram Budak, "Circuit Theory Fundamentals and Application," Second Edition, Prentice Hall Inc, 1987.

표.1 측정변수의 특성 및 오차

Parameter	Symbol	Unit	Steady state Error	Method	Remark
시간	t	sec	0.01 sec	측정	
발전기 주파수	f	Hz	0.5 %	측정	t=0 이전은 한전전력
발전기 전압	V ₁	volt	1%±0.1	측정	“
발전기 전류	A ₁	ampere	1%±0.01	측정	“
발전기 역율	F ₁	%	1%	측정	“
발전기 전력	P ₁	kW	1.73%±0.1	계산	$\sqrt{3} V_1 \cdot A_1 \cdot F_1$
발전기 효율	E _w	%		계산	$\frac{100 \times \sqrt{3} V_1 A_1}{4\pi^2 I f} \frac{df}{dt}$
전자펌프 제어기 효율	E _T	%	3.3%	계산	$\frac{100 \times \sqrt{3} V_2 \cdot A_2}{P_1}$
전자펌프 입력전압	V ₂	volt	2%±0.1	측정	
전자펌프 입력전류	A ₂	ampere	2%±0.01	측정	
전자펌프 역율	F ₂	%	1%	측정	
전자펌프 입력전력	P ₂	kW	3%±0.1	계산	$\sqrt{3} V_2 \cdot A_2 \cdot F_2$
소듐 유량	Q	m ³ /s	5%±10 ⁻³	측정	
펌프 양단 압력차	dP	kPa	10%±1	측정	
전자펌프 효율	E _P	%	6%	계산	$\frac{100 \times Q \cdot dP}{P_2}$
소형 wheel	S	-	±1mm	-	Φ649.8×t50.82 mm
중형 wheel	L	-	±0.5mm	-	Φ720.0×t100 mm

표.2 실험의 종류 및 조건

실험종류	Flywheel	전자펌프 제어기 사용여부	입력전압 종류	실험회수
1	S	o	6	2
2	L	o	6	2
3	S	x	1	3
4	L	x	1	3

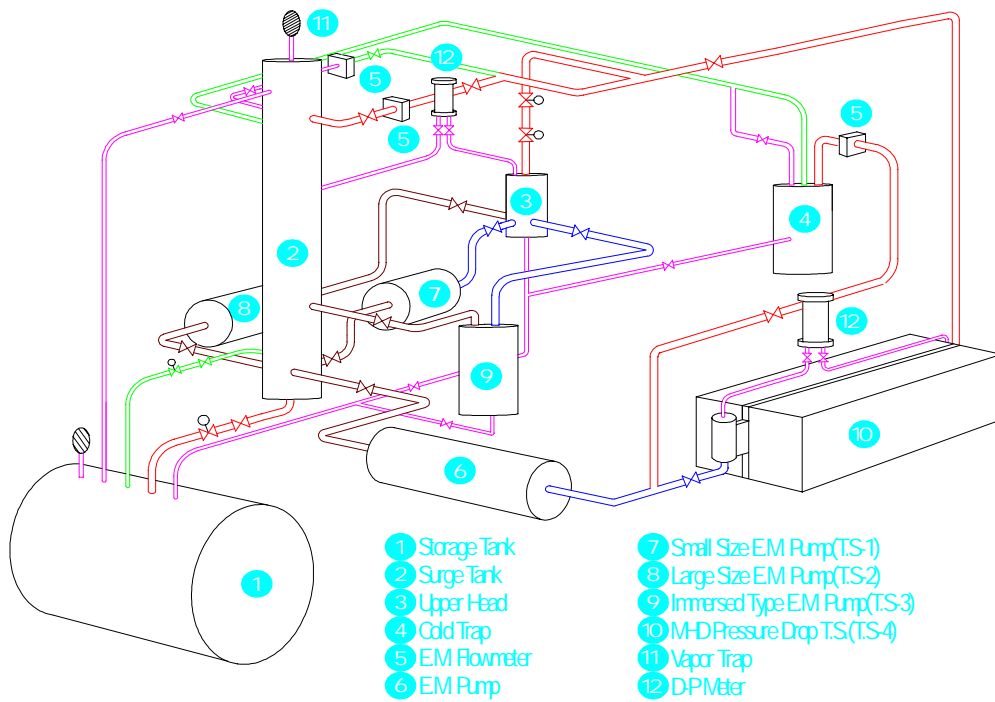


그림.1 실험에 사용한 소규모 실험장치의 구조도

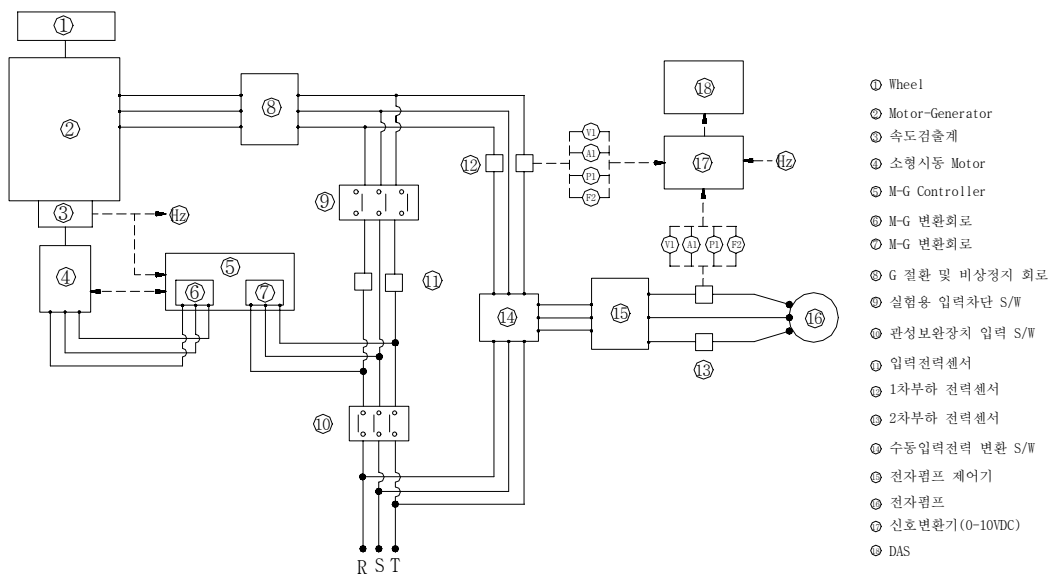


그림.2 관성보완 실험장치 제어 회로도

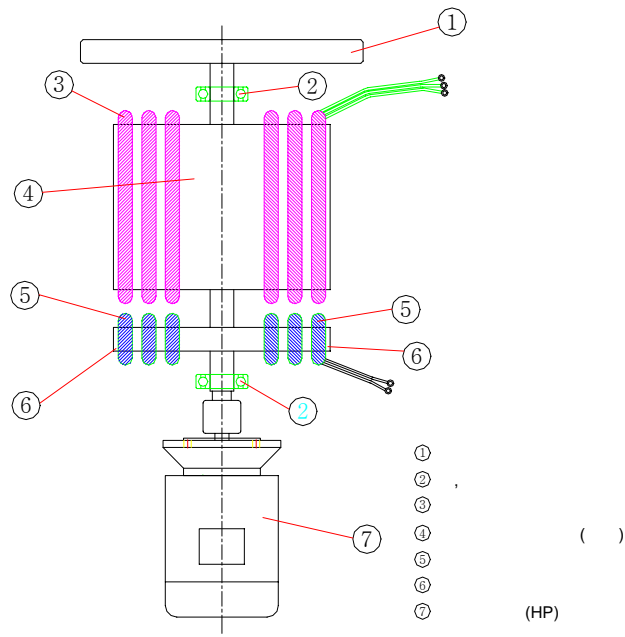


그림.3 Motor-Generator의 구성

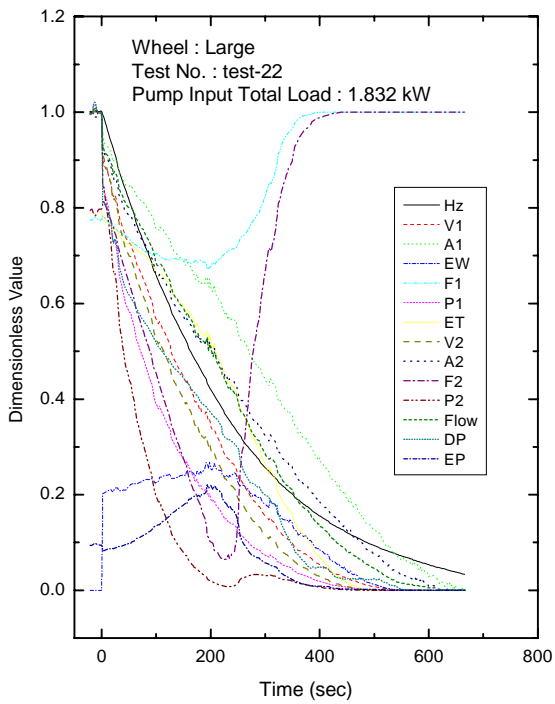


그림.4 전자펌프 제어기를 사용한 실험에서 각 실험인자들의 감쇠 경향

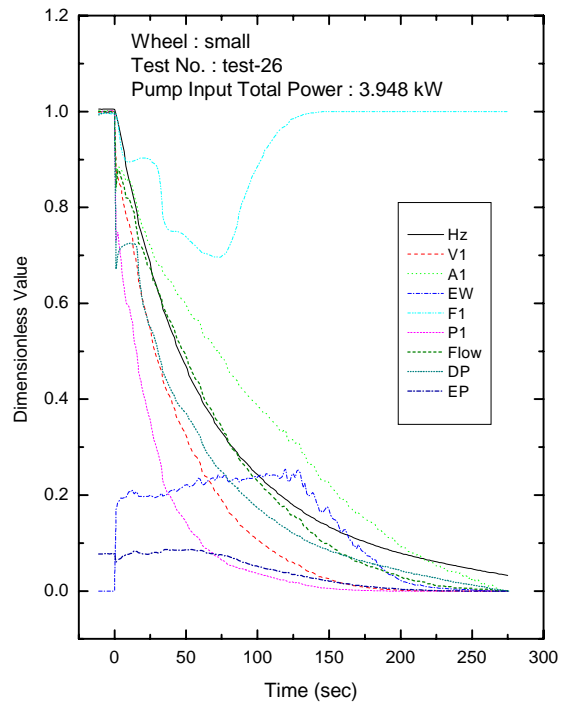


그림.5 전자펌프를 사용하지 않은 실험에서 각 실험인자들의 감쇠 경향

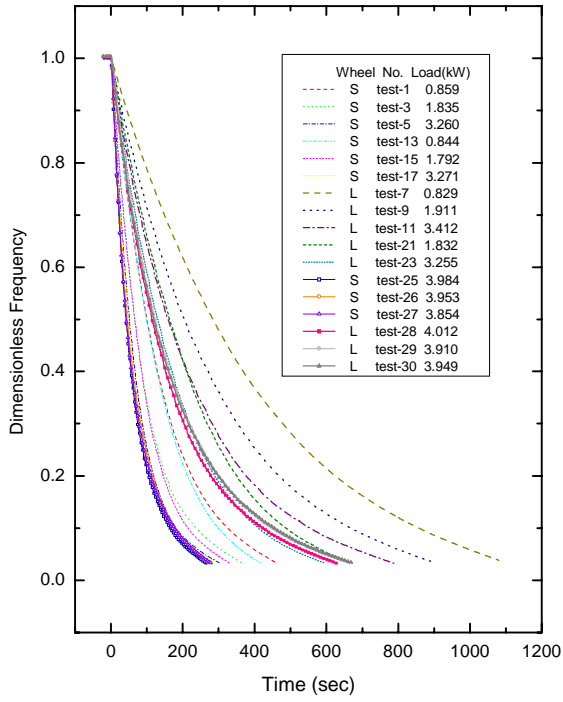


그림.6 시간에 따른 회전주파수의 변화

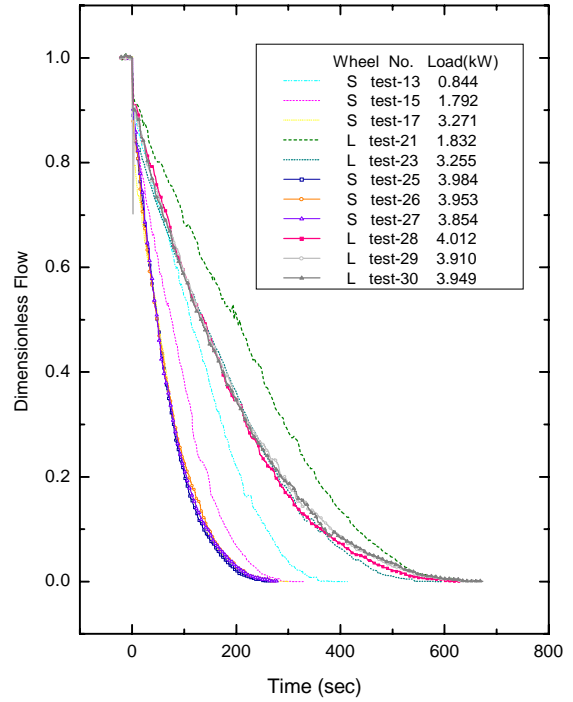


그림.7 시간에 따른 소용 유량의 변화

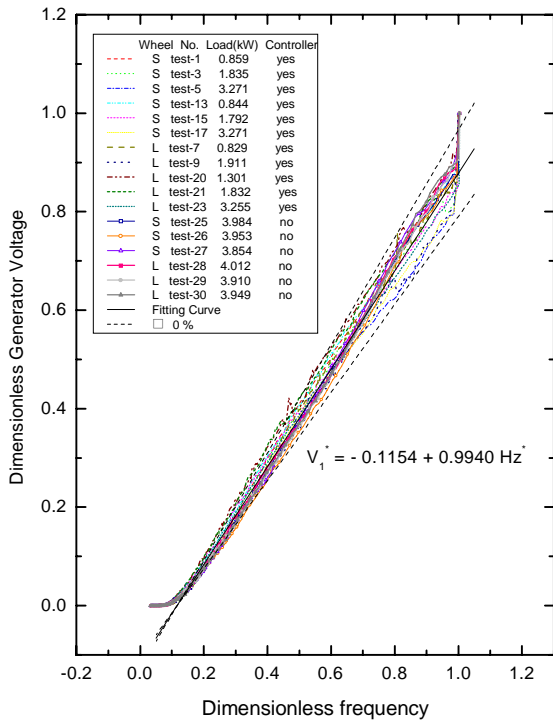


그림.8 회전주파수에 따른 발전기의 전압 변화

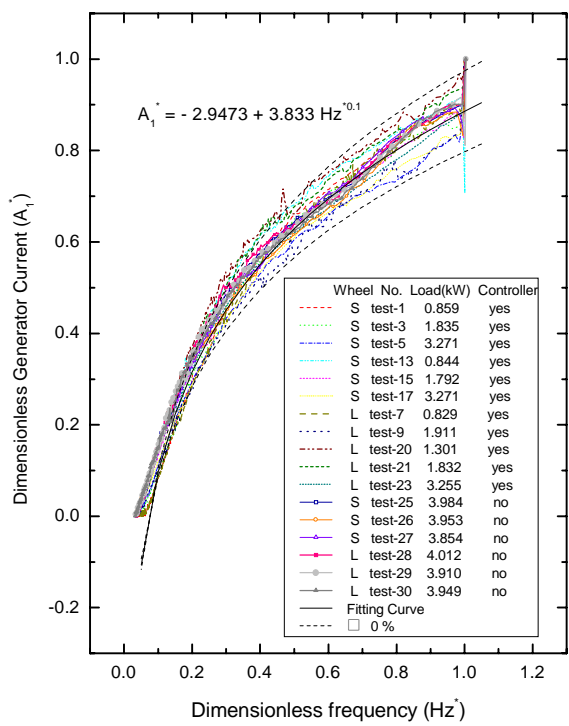


그림.9 회전주파수에 따른 발전기의 전류 변화

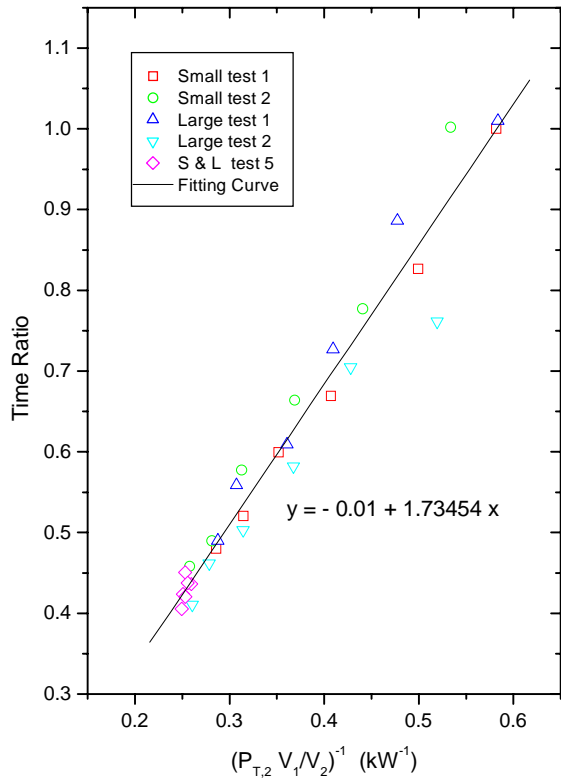


그림.10 전자펌프의 입력전류에 따른 주파수가 같은 값에 도달하는 시간의 비

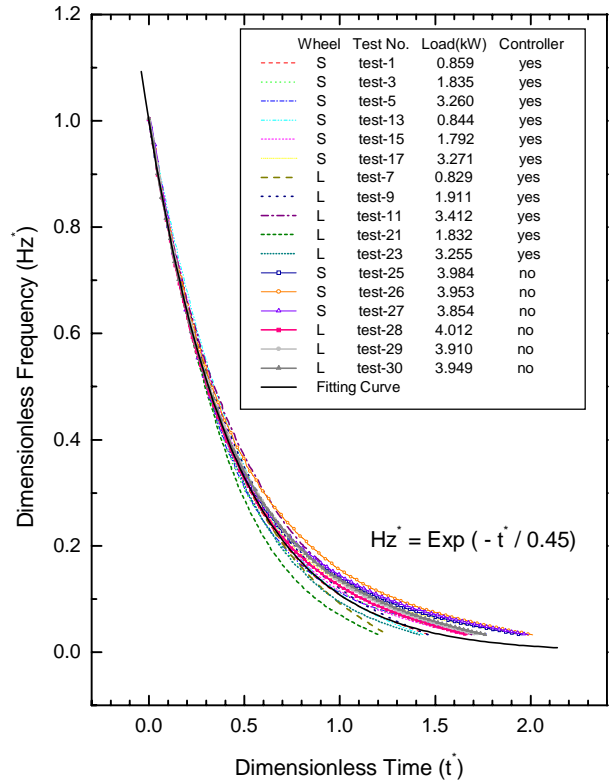


그림.11 무차원 시간에 따른 회전주파수의 변화

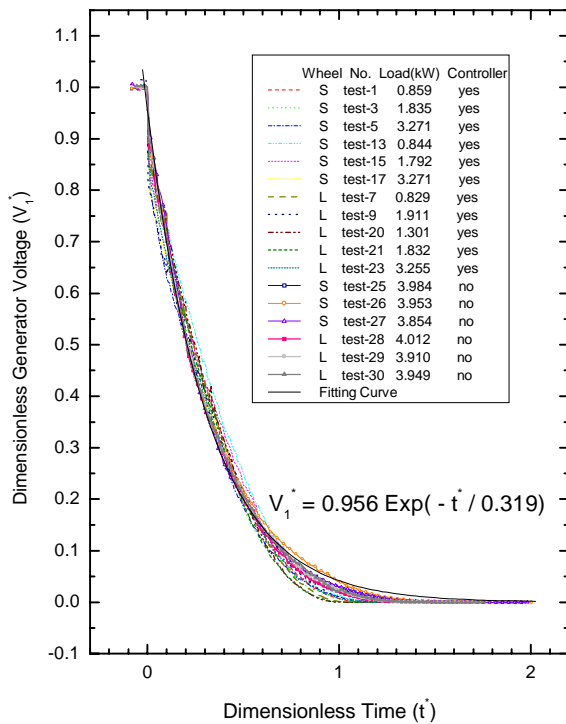


그림.12 무차원 시간에 따른 무차원 전압의 변화