

건전도 감시용 자립형 계측유닛을 위한 진동발전시스템

Vibration Powered Generator System for Stand-Alone Health Monitoring Sensor Unit

최 남 섭* 김 재 민**
Choi, Nam Sup Kim, Jae Min

국문요약

본 논문에서는 교량의 건전도 감시용 자립형 계측유닛을 위한 교량의 상시진동을 이용한 진동발전시스템을 제시하였다. 본 연구에서는 전기자 반작용의 영향을 최소화한 새로운 구조의 진동발전기를 제안하고, 기계적 및 전기적인 설계식을 유도한 다음, 시험용 진동발전기를 제작하였다. 또한, 매우 작은 발전 전류의 축전시스템에 대하여 고찰하고 개선점을 도출하였다. 축전시스템에 대한 고찰 결과, 정류기에 사용된 다이오드 특성이 충전과정에서 지배적임을 밝혔다. 마지막으로, 진동발전시스템 모델에 실측 남해대교 가속도 데이터를 적용한 시뮬레이션과 실내 실험을 수행하였고, 제작된 시험용 진동발전기의 적용성과 효율성을 확인할 수 있었다.

주요어 : 발전기, 충전시스템, 구조물건전도감시, 자립형 계측유닛, 교량

ABSTRACT

This paper presents an electric power generating system for stand-alone health monitoring sensor unit of bridge structure based on ambient vibration of bridge. In this paper, a novel electric power generator which has minimum effect of armature reaction is proposed. The related mechanical and electrical design equations are obtained, and a pilot generator has been implemented. In addition, the charging system for extremely low generator current is discussed, and some improvements are identified for the system. This investigation reveals that diode characteristics of rectifier is dominant factor in the charging process. Finally, both the simulation, which uses real measurement data of the Namhae bridge as input of the pilot generator, and indoor test are carried out. The results showed the applicability and effectiveness of the stand-alone vibration powered generator.

Key words : electric power generator, charging system, structural health monitoring, stand-alone sensor unit, bridge

1. 서 론

대형 교량은 지진이나 태풍과 같은 큰 규모의 동하중 뿐만 아니라 계속되는 차량하중에 노출되어 있어 피로 손상 등 다양한 손상이 발생한다. 이러한 손상은 지속적으로 점검되어 적시에 보수, 보강되지 않으면 예상치 못한 경제적, 사회적 피해와 인명피해까지 수반할 수 있다. 그러므로 지속적인 교량의 유지관리는 필수적이다.^{(1),(2)}

장대교량과 같은 구조물의 지속적인 관리를 위해서는 계측지점에 주기적인 접근이 쉽지 않으므로 대부분 원격기능을 갖춘 건전도 감시 시스템이 바람직하다. 이러한 시스템을 통해 교량의 정적 거동 및 동적 거동 자료를 계측, 수집하고 분석함으로써 건전도 감시 및 조기 경보가 가능하다.

모니터링시스템은 센서, 통신장비, 자료저장시설, 자료분석시스템으로 구성되어있다. 그 가운데 센서와 통신장비는 교량에 산재하여 직접 설치되는데, 지속적인 운영을 위하여 이들 장치에 항상 전원이 공급되어야 한다.

이 전원 공급은 직접적인 배선 또는 배터리에 의하여 이루어지는데, 이들은 방대한 배선시설을 필요로 하고 또한 외

부 악조건 하에 노출되어 있으므로 지속적인 유지 보수가 필요하다. 이 외에도 계측관심 위치이지만 구조물의 공간적 제약으로 배선상의 어려움이나 접근성의 확보가 어려워 전원을 공급하지 못하여 계측기를 설치하지 못하는 경우도 있다. 이러한 전원공급장치의 경제적, 공간적 제약은 실제 교량의 모니터링 시스템 구축시 계측점의 수를 늘리지 못하는 주요원인으로 지적되고 있다. 따라서, 교량의 모니터링시스템 시설비용과 유지관리비를 대폭 줄이기 위하여 자급형 전력공급시스템이 요구된다. 일반적으로 무동력 자가발전시스템은 풍력이나 태양열을 이용한 방법도 있으나, 교량에서 풍력발전의 경우 설치 위치에 제한을 받고 풍향이나 풍량에 따라 발전량의 변동성이 매우 크며, 태양열발전 또한 태양지향성에 의해 교각 하부에 설치할 수 없는 등 설치 위치에 제한을 받고, 외부환경의 먼지나 이물질에 의해 솔라셀(solar cell)이 오염시 발전 효율이 급격히 저하되고 역시 일기의 변화에 민감하다는 단점이 있다.

본 논문에서는 전력자급형 계측시스템이 가능하도록 교량에서 상시적으로 발생하는 상하미소진동을 이용한 무인 무동력 자가 발전시스템을 제안한다. 제안된 진동발전기는 교량의 임의의 위치에 독립적으로 설치할 수 있고 외부적 환경인 일기의 변화에 거의 무관하게 항상 일정한 발전량을 가지며, 또한 구조적으로 밀폐형으로 제작할 수 있어서 외부의 충격이나 간섭에서 보호될 수 있고, 반영구적인 수명을

* 여수대학교 전자통신·전기공학부, 부교수(대표저자 : nschoi@yosu.ac.kr)

** 정회원·여수대학교 건설환경공학부, 조교수

본 논문에 대한 토의를 2003년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2003. 2. 25 / 심사종료일 : 2003. 3. 20)

갖는다는 장점이 있다. 이와 관련된 연구는 90년대 후반부터 마이크로 전자기계시스템(MEMS) 개발의 일환으로 점차 활발해지고 있으며^{(3),(4)}, 본 연구와 같이 토목구조물의 진동 모니터링을 위한 목적으로 진동발전기의 실현가능성에 대한 기초적인 연구결과⁽⁵⁾가 발표된 바 있다.

본 연구에서는 자속의 방향과 권선이 발생하는 자속이 항상 수직인 배치를 갖는 새로운 구조의 상하진동형 영구자석 발전기를 제안하고, 발전된 전력을 직류로 변환하는 정류기와 축전시스템에 대하여 논한다. 제안된 상하진동발전기는 전기자반작용이 거의 없는 구조를 갖기 때문에 에너지 변환 효율이 매우 크다. 또한, 본 논문에서는 발전된 교류전력을 직류전력으로 변환하는 정류기를 포함한 진동발전시스템을 설계하고 관련된 수식을 유도하며 고려해야 할 점들을 논하고, 실제 pilot 진동발전기를 설계 및 제작, 테스트 실험을 수행하며 그 결과를 남해대교 실측 데이터로부터 얻어진 시뮬레이션 결과와 비교함으로써, 제안된 진동발전시스템이 실제 교량의 전력자급형 계측유닛의 독립전원으로 사용될 수 있다는 타당성을 보인다.

2. 진동발전기 설계 가능성

전력자급형 계측유닛을 설계하려면 실제 계측유닛이 교량의 건전도감시를 위해 사용될 때, 가속도계의 진동발전기에 입력되는 진동에너지의 수준을 산정할 필요가 있으며, 이에 따라 발전기의 동특성을 결정해야한다. 이러한 목적하에 준비단계로, 모니터링이 실시되고 있는 대표적인 교량중의 하나인 남해대교의 계측자료를 확보하여 분석하였다.^{(6),(7)}

진동발전시스템은 상시진동을 사용하여 발전하므로 남해대교의 상시진동자료를 분석할 필요가 있다. 남해대교의 동적계측시스템은 지정된 trigger level을 초과한 event data를 저장하게 되어 있다. 그 중에서 2000년 9월 14일 13:05 시각의 14호 태풍 사오마이가 영향을 미칠 때의 계측 자료 중, 가장 진동이 크게 예상되는 중앙경간 중앙에 대한 가속도 자료와 FFT자료를 그림 1과 그림 2에 정리하였다.

진동발전기는 교량의 진동을 이용하므로 진동발전기 설계시 고려되어야 할 내용은 교량의 진동이 우세하게 이루어지는 주파수대를 파악하는 것이다. 진동발전기는 1 Hz 미만의 저주파 진동보다는 그 이상의 진동이 있을 때 설계가 용이해진다. 그림 1과 그림 2를 관찰할 때, 0.28, 0.38, 0.54Hz 등의 저차 모드뿐만 아니라, 그 이상의 진동수에서도 상당한

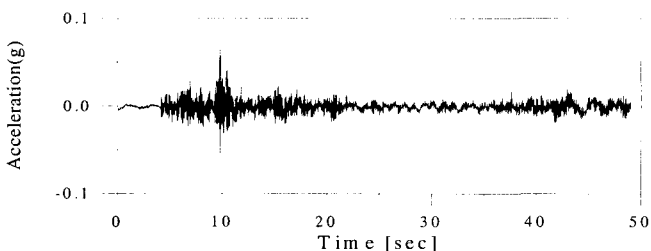


그림 1 남해대교 가속도계 계측자료(2000년 사오마이 태풍시, 중앙경간 중앙)

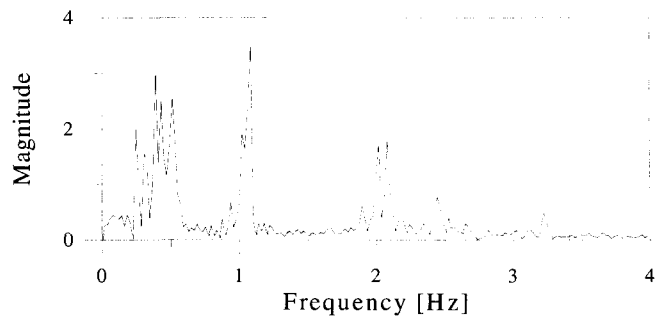


그림 2 남해대교 가속도계 계측자료의 FFT(2000년 사오마이 태풍시, 중앙경간 중앙)

진동이 이루어지는 것을 알 수 있다. 따라서 장대교량의 상시진동을 이용한 진동발전기의 설계 가능성을 확인할 수 있다.

3. 진동발전기 기계적 특성

그림 3은 진동발전기의 기본적 구성의 개념도와 스프링 상수 k 인 스프링과 질량 m 인 질량체, 감쇠계수 c 인 점성 감쇠기로 이루어진 간단한 기계적 진동모델을 나타낸다. 그림 3(b)에서 바닥판의 절대변위를 u , 코일이 감겨져 있는 질량체의 절대변위를 x 라 하면 힘의 평형식은 다음과 같다.

$$m\ddot{x}(t) + c(\dot{x}(t) - \dot{u}(t)) + k(x(t) - u(t)) = 0 \quad (1)$$

바닥판에 대한 진자의 상대 변위 z 를 $z = x - u$ 로 정의하면 식 (1)은 다음과 같다.

$$m\ddot{z}(t) + c\dot{z}(t) + kz(t) = m\ddot{u}(t) \quad (2)$$

본 연구에서는 진동발전기의 기본적인 특성파악과 진동발전기의 주요 설계인자를 도출하기 위하여 그림 4와 같은 Pilot-1 진동발전기를 제작하였다.

그림 4는 고정된 평면사자 Nd-Fe-B 영구자석을 코일이 권선된 가동전기자 양단에 배치한 구조를 가지며 기계적 시스템은 스프링과 전기자 질량체로 구성된다. 발전기 진자의 역학적 특성은 간단한 정적시험 및 자유진동시험을 통해 얻을 수 있다. 그림 5는 자유진동시 가동전기자의 출력전압이고 그림 6은 자유진동시 자연감쇠되는 일부분을 확대하여 진동발전기의 고유진동수를 측정하기 위한 전기자 출력전압의 파형이다.

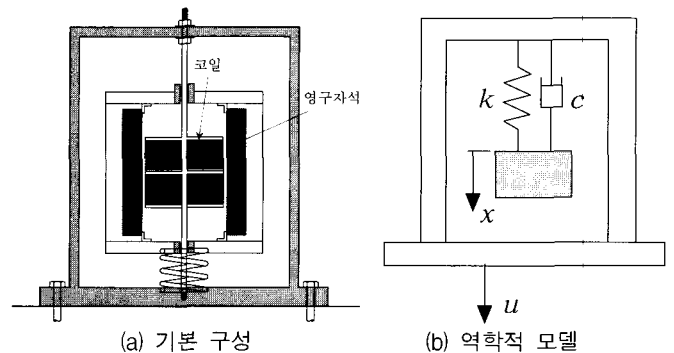


그림 3 진동발전기

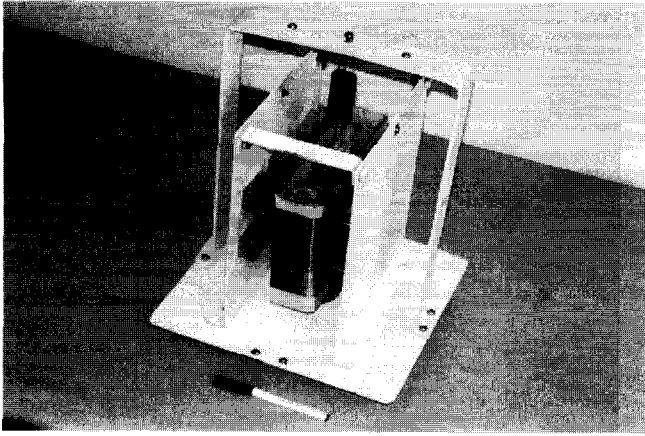


그림 4 실내시험을 위한 Pilot-1 진동발전기

발전기 진자의 역학적 특성은 간단한 정적시험과 그림 5와 6에서 보이는 자유진동시험을 통하여 표 1과 같이 추정하였다. 즉, 시험용 발전기의 고유진동수는 약 1.0Hz이고 감쇠비가 0.14%로서 장주기이고 감쇠가 매우 작은 시스템이

표 1 단자유도 Pilot-1 진동발전기의 역학적 특성 및 전자기적 특성 계수

질량(kg)	0.670
스프링 상수(N/m)	31.04
고유진동수(Hz)	1.08
감쇠비(%)	0.14
유효 자속밀도, B (Tesla)	0.034
코일의 유효길이, L_{coil} (m)	92.40
Inductance, L (Henry)	8.20×10^{-3}
Capacitance, C_o (Farad)	4.70×10^{-4}
코일의 저항, r (Ω)	40.0

다. 시스템의 감쇠는 기계적 손실과 전기적 손실로부터 발생하는데, 제안된 진동발전기는 전기자 반작용이 거의 영향을 미치지 않으므로 전기적 손실을 최소화 할 수 있다.

4. 진동발전시스템의 전자기적 특성

자계 $B \text{ wb/m}^2$ 에 놓여진 길이 L_{coil} 의 도체를 $\dot{z}(t) \text{ m/sec}$ 의 속도로 자계와 직각으로 움직일 때 도체에 유기되는 기전력 $e(t)$ 는 패러데이의 법칙에 의해 식 (3)과 같으며, 방향은 플레밍의 오른손법칙을 따른다.⁽⁸⁾

$$e(t) = B L_{coil} \dot{z}(t) [V] \quad (3)$$

그림 7은 진동발전기의 영구자석 주위의 자계시스템과 코일의 배치를 나타낸다. 그림 7에서 (a)는 진동발전기의 상단에서, (b)는 정면에서 영구자석과 코일의 배치를 본 모양으로, a-b-c-d는 가동코일권선이며 코일권선을 향하여 두 개의 N극이 마주보도록 사각형 영구자석이 배열된다. 여기서 자속과 채교하는 코일의 유효길이 L_{coil} 은 자속의 방향 ϕ_m 과 직각인 권선의 총길이, 즉,

$$L_{coil} = \text{감은권선수} \times (\overline{ab} \text{ 길이} + \overline{cd} \text{ 길이}) \quad (4)$$

로 볼 수 있다. \overline{bc} 와 \overline{da} 부분은 지속과 직각의 방향을 이루지 않으므로 기전력의 생성에 기여하지 못하는 권선성분이다.⁽⁹⁾

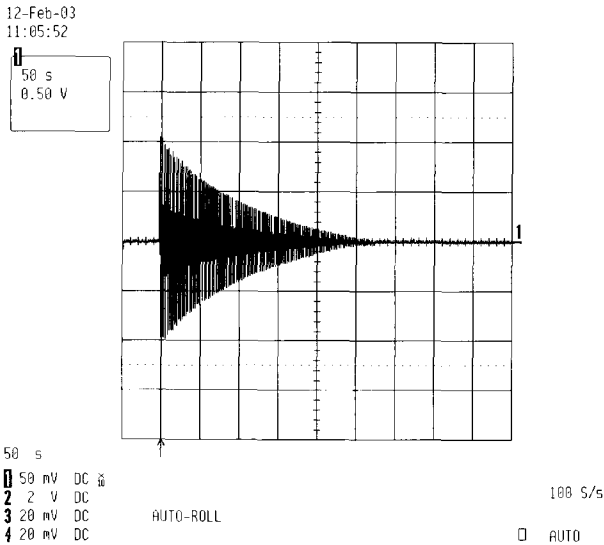


그림 5 Pilot-1 발전기의 자유진동시 전기자 출력전압(0.5V/div, 50sec/div)

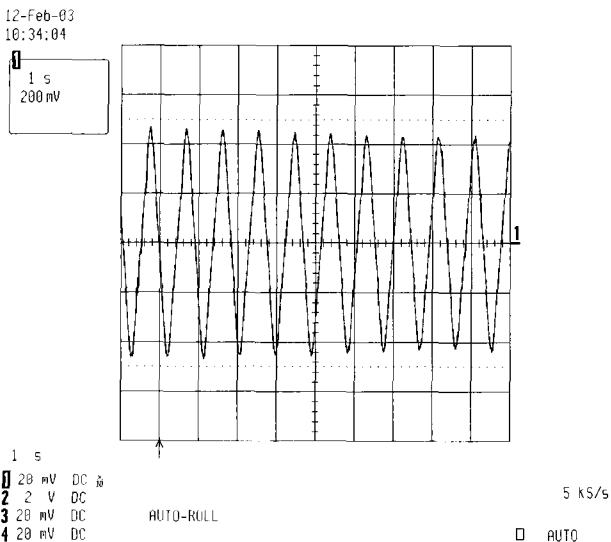


그림 6 Pilot-1 발전기의 고유진동수를 나타내는 전기자 출력전압 (0.2V/div, 1sec/div)

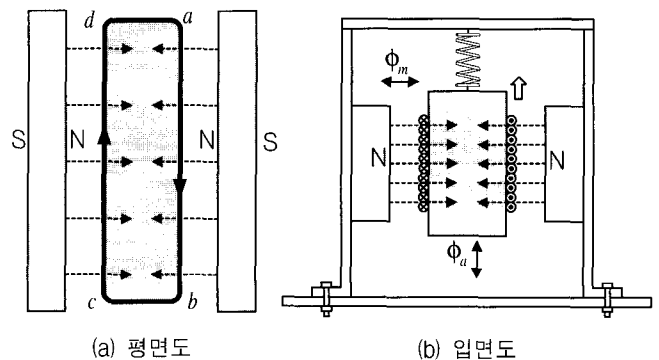


그림 7 Pilot-1 진동발전기의 자계시스템과 코일의 배치

그림 7(b)에는 상하운동을 하는 전기자가 상방향으로 움직일 때 코일에 유기되는 유도전류의 방향이 도시되어 있는데, ⊙는 전류가 지면쪽을 향하여 흐르고, ⊙는 반대로 지면으로부터 나오고 있는 방향을 의미한다. 일반적으로 직류 및 교류의 회전기 발전기에는 기전력에 의하여 전기자 권선에 전류가 흐르면 기자력이 발생되고 이 기자력이 계자의 기자력에 작용하여 자속의 분포를 변화시키는 전기자 반작용 현상이 존재한다. 이러한 전기자 반작용은 고정자 자속을 감하시켜 자기적 중성점을 이동시킴으로써 발전기의 출력을 저하시키게 된다.⁽⁹⁾ 그러나, 그림 7의 영구자석과 코일의 기하학적 배치는 영구자석의 자속 ϕ_m 의 방향과 가동코일권선에 유기된 전류에 의하여 발생하는 기자력 ϕ_a 의 방향이 서로 항상 수직이므로 상호 감작용이 발생하지 않는 구조이다. 즉, 제안된 진동발전기는 가동 코일에 의한 자속과 고정자 자속이 항상 직각으로 쇄교하므로, 고정자 자속을 거의 100% 활용 가능한 구조이다.

그림 8은 진동발전기에서 발생한 전력을 계측 유닛에서 활용하기 위한 축전시스템의 구성도이다. 진동발전기에서 발전된 전력은 교류전류이므로 정류기를 통하여 직류전력으로 변환되고 일단 직류 커패시터에 충전된다. 교량진동에 의한 발전량이 항상 일정하다면, 커패시터전압은 시간에 정비례하여 증가할 것이다. 교량의 계측유닛이 동작할 때는 진동발전기에서 공급되는 전력보다 큰 전력소비가 발생하므로, 이러한 불균형을 해소하기 위하여 평소 발전된 전력을 배터리에 충전해 두며, 계측유닛에는 배터리로부터 직접 에너지가 공급된다.

그림 8에서 정류된 커패시터 전압 $V(t)$ 가 V_{peak} 보다 크게 되면 승압형 DC-DC 컨버터가 동작되어 배터리를 충전하며, 이러한 배터리 충전의 결과 커패시터 전압이 줄어들어 V_{offset} 에 이르면 배터리 충전동작을 멈춘다. 그림 9는 커패시터 전압 충전과 배터리 전압 V_B 충전의 두 가지 동작 모드에 대한 타이밍도를 보인다. 그림 9에서 $T_{capacitor}$ 는 커패시터 전압 충전시간을 나타내며 발전기의 발전량, V_{peak} 와 V_{offset} 의 레벨차 및 커패시터의 커패시턴스에 따라 정해지고 보통 수십 분 또는 수 시간에 이르며, $T_{battery}$ 는 배터리 전압 충전시간을 나타내고 승압형 DC-DC 컨버터의 용량에 따라 정해지며 일반적으로 수 초 이내이다. 또한, 그림 8에서 저항 R_B 와 스위치 S는 배터리의 과충전을 막기 위한 에너지 소모저항이다.

그림 10은 진동발전기의 전기적 등가회로와 다이오드 정류회로도도를 보인다. 그림 10에서 보듯이 전기적으로, 진동발전기는 식 (3)으로 표현된 기전력을 나타내는 전압원 $e(t)$ 와

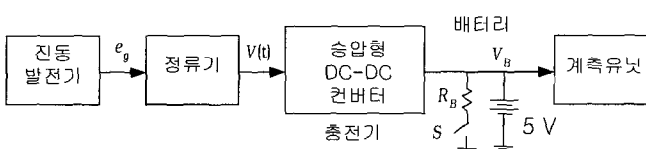


그림 8 축전시스템의 구성도

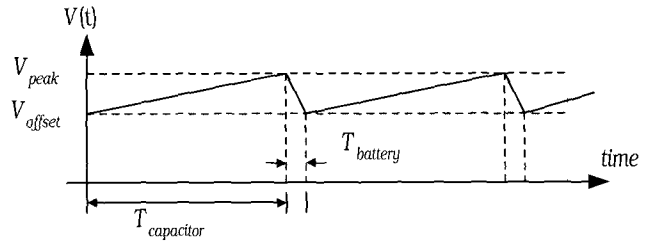


그림 9 축전시스템의 동작

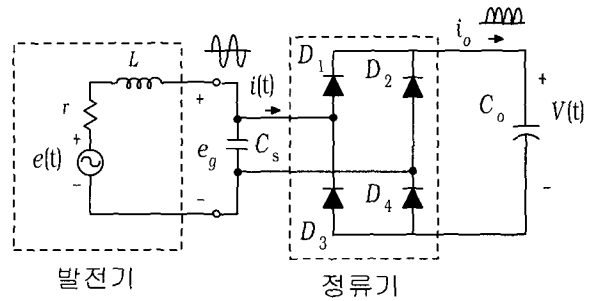


그림 10 진동발전기와 다이오드 정류회로

코일의 등가 인덕턴스 L 및 코일의 저항 r 의 직렬연결로 볼 수 있으며, 외부에서 계측되는 진동발전기의 전압은 $e_g(t)$ 가 된다. 그림 10에서 C_s 는 코일의 인덕턴스 L 과 정류 다이오드의 접합 커패시턴스 때문에 발생하는 기생 공진을 막기 위한 필터역할을 하는 커패시터이며, 발전기와 정류기의 기본적인 동작에 영향을 미치지 않는 것으로 회로의 동작을 고려할 때 무시할 만하다. 여기서 사용된 C_s 는 $0.01 \mu F$ 이다. 그림 10의 다이오드 정류기의 동작을 간단히 설명하면 다음과 같다. 즉, 전류 $i(t)$ 의 방향에 따라, $i(t) > 0$ 이면, D_1 과 D_4 가 도통하고 D_2 와 D_3 는 전류가 흐르지 못하며, 반대로 $i(t) < 0$ 이면, D_2 와 D_3 이 도통하고 D_1 과 D_4 는 차단된다. 그 결과 커패시터 충전전류 i_o 의 방향은 항상 그림 10에 나타난 방향과 일치하는 직류가 되며, 발전되는 전압의 극성에 관계없이 항상 충전동작을 수행한다.

한편, p-n접합을 갖는 다이오드의 전압 V_D 와 전류 I_D 의 일반적인 관계식은 다음과 같다.

$$I_D = I_s \left\{ \exp\left(\frac{V_D}{V_{th}}\right) - 1 \right\} \quad (5)$$

여기서 I_s 는 다이오드의 역포화 전류로서 본 연구에서 사용한 다이오드에서는 $0.1 \mu A$ 이며, V_{th} 는 반도체의 열전압(thermal voltage)으로서 27° 실온을 기준으로 할 때 $26mV$ 이다.⁽¹⁰⁾

다이오드의 소신호 저항 r_D 를 구하기 위하여 식 (5)를 V_D 로 미분하여 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$r_D \equiv \frac{\partial V_D}{\partial I_D} = \frac{V_{th}}{I_D + I_s} \quad (6)$$

식 (6)이 의미하는 바는 다이오드에 흐르는 전류가 미소 전류일 때, 다이오드는 매우 큰 등가저항으로 작용한다는 사실이다.

다이오드에 의한 정류 특성을 개선하는 방법은 두 가지로 정리할 수 있다. 첫째는 다이오드의 등가저항을 줄이는 방법으로 p-n접합보다 에너지 장벽이 낮은 Schottky 다이오드를 사용하는 것이 가능하다. 둘째는 다이오드의 동적특성에서 역회복전류를 줄이거나 제거하는 방법이다. 역회복 전류를 감소시키기 위해서는 고속 역회복(fast reverse-recovery) 다이오드를 사용하고, 다수캐리어에 의해 동작하는 Schottky 다이오드를 사용하면 역회복 전류가 존재하지 않는다.⁽¹⁰⁾ 그러나 다이오드의 선정이 본 논문의 실험에 결정적인 영향을 미치는 요인은 아니므로 본 연구의 실험에서는 일반 정류 다이오드를 사용하였다.

본 연구의 Pilot-1 진동발전기에 대한 전자기적 특성은 간단한 시험과 공학적 판단에 의해 표 1과 같이 측정 및 추정하였다.

5. 진동발전기의 성능 실험 및 특성 시뮬레이션

그림 11은 Pilot-1 발전기의 자유진동시 발생한 그림 5와 같은 기전력에 의한 커패시터 충전기에 충전되는 전압의 실험결과를 보인다. 그림 11에서 자유진동 초기에 충전전압은 급격히 상승하고, 이후 일정한 기울기를 갖고 점차 증가하는 파형을 나타낸다. 이것은 다이오드의 특성에 따라 충전특성이 지배됨을 보여주는 결과이다. 즉, 그림 5에서 보듯이, 자유진동의 초기에 발전하는 전압의 크기가 1V에 이르고, 이 경우 다이오드는 약 0.7V의 threshold 전압보다 큰 전압이 인가되므로 완전 도통하는 상태가 되며, 식 (6)에 주어진 다이오드 등가저항은 매우 작은 값이 된다. 그러나, 자유진동에 의한 발전전압이 0.7V 보다 작아지면, 다이오드 전류는 급속히 감소하고, 등가저항은 전류에 반비례하여 증가한다. 그 결과, 발전전압 0.7V는 그림 11의 파형에서 변곡점을 만든다.

그림 12는 강제진동에 의해 교량의 미소진동과 유사한 수

준의 진동(진폭이 약 1mm정도)을 인가했을 때 실험결과를 보이고 있다. 그림 12에서 약 1000sec에 걸쳐 충전 커패시터에 0.5V의 전압이 충전됨을 볼 수 있고 따라서 충전전류의 크기는 0.24 μ A이다. 이 실험에 의하면 DC-DC 컨버터가 동작할 수 있는 약 3V 까지 충전하는데 약 6000sec, 즉 1시간 40분 정도가 소요되며 1년에 계측기가 동작하는 시간이 수 회로 제한적임을 감안할 때 이러한 충전속도는 충분할 실용성을 갖는다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 식 (2)에 주어진 운동방정식의 해를 Newmark 방법에 의한 직접적분법을 사용하여 수치적으로 구하였다. 이때 진동발전기의 질량은 구조물에 비해 대단히 작으므로 구조물과의 상호작용을 무시할 수 있다. 따라서 식 (2)에서 진자의 운동을 유발하는 발전기 바닥의 운동은 구조물의 가속도응답이 된다.

이와 같은 진동해석을 통하여 진자의 속도응답 $\dot{z}(t)$ 을 얻을 수 있으며, 따라서 식 (3)에 의해 진동발전기에 발생하는 기전력 $e(t)$ 를 구할 수 있다. 그림 10에 보인 발전기 회로에서 전압의 평형식과 직류 커패시터에서의 전압과 전류사이의 관계는 각각 다음과 같다.

$$L \frac{di(t)}{dt} + ri(t) + e_g(t) = e(t) \tag{7}$$

$$C_o \frac{dV(t)}{dt} = |i(t)| \tag{8}$$

한편, 전류 $i(t)$ 의 방향에 따른, 두 회로사이의 전압에 대한 연결 조건은 다음과 같다.

$$e_g(t) = \begin{cases} V(t) + V_D(t), & \text{for } i(t) > 0 \\ -(V(t) + V_D(t)), & \text{for } i(t) < 0 \end{cases} \tag{9}$$

여기서 $V_D(t)$ 는 다이오드의 전압으로서 양의 값이며 다음과 같다.

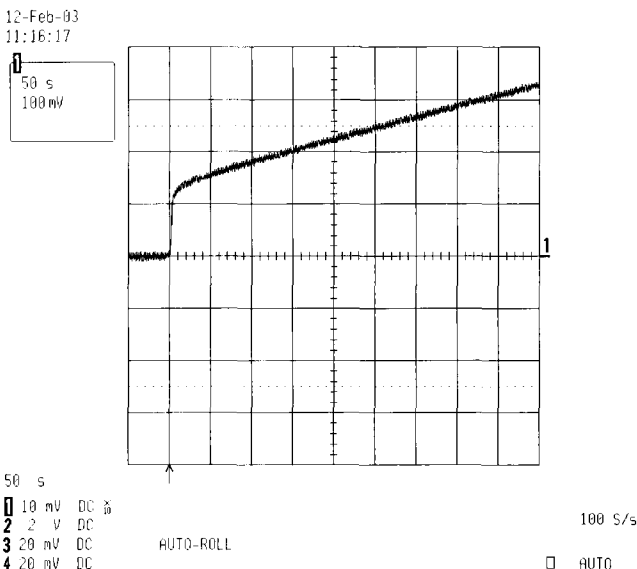


그림 11 자유진동시 Pilot-1 진동발전기의 충전 커패시터 전압파형 (0.1V/div, 50sec/div)

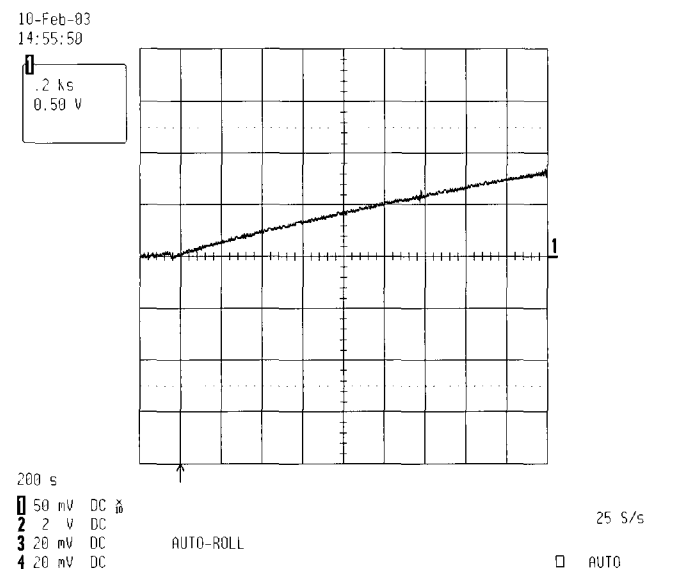


그림 12 가진에 의한 미소진동시 Pilot-1 발전기의 충전전압 파형 (0.5V/div, 200sec/div)

$$V_D(t) = V_{th} \ln\left(\frac{|i(t)|}{I_s} + 1\right) \quad (10)$$

따라서 식 (3), (7), (8), (9) 및 (10)을 정리하면 다음과 같이 전류에 대한 미분방정식이 얻어진다.

$$L \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + \left(r + \frac{V_{th}}{|i(t)| + I_s}\right) \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C_o} i(t) = B L_{coil} \ddot{z}(t) \quad (11)$$

식 (11)의 미분방정식으로부터 전류를 구하게 되면 축전기에 충전되는 전압은 식 (8)로부터 쉽게 구할 수 있다.

$$V(t) = \frac{1}{C_o} \int_0^t |i(\tau)| d\tau \quad (12)$$

그리고 축전 커패시터에 충전되는 에너지 $E_n(t)$ 는 다음과 같이 충전전압으로부터 구할 수 있다.

$$E_n(t) = \frac{1}{2} C_o \{V(t)\}^2 \quad (\text{단위 : J}) \quad (13)$$

본 연구에서는 남해대교에서 계측된 구조물의 진동을 입력으로 그림 4에 보인 실제 제작된 Pilot-1 진동발전기의 발전성능을 시뮬레이션하여 제안된 진동발전기의 실현가능성을 검토하였다. 그림 13은 남해대교 측정간 보강형의 수직진

동을 이용한 결과이며, 그림 14는 중앙경간 보강형의 수직진동을 이용한 결과이다. 이들 진동기록은 1999년 11월 24일 계측된 것으로서 당시 남해대교의 유지관리를 담당했던 현대건설에 의해 계측되었다.⁽⁷⁾

측정간 중앙의 수직진동에 의한 그림 13의 경우, 20초 동안 커패시터 전압이 0.015V로 충전되며 평균 발전용량은 약 20nW로서 발전량이 대단히 작아 실용적이지 않다고 할 수 있다. 그러나, 보다 큰 진동에너지가 입력되는 중앙경간 중앙의 수직진동에 의한 발전기의 성능은 그림 14에서 알 수 있듯이 20초 동안 52.86V로 충전되어 평균 32.85mW의 발전 성능을 나타낸다. 이는 약 118Wh의 용량의 발전기에 해당하므로 충분한 실용성을 갖는다.

또한, 다이오드를 개선하고, 발전기의 기계적 공진주파수를 교량의 고유주파수에 보다 가깝게 튜닝함으로써 충전속도를 개선할 여지도 있으므로, 교량의 미소진동을 이용한 자립형 발전시스템은 실제 적용의 타당성과 실효성을 갖는다고 사료된다. 실용화를 위한 개선의 효과를 보이기 위해 그림 4의 Pilot-1 발전기를 표 2와 같이 고유진동수의 크기가 두 배이고 코일의 길이가 네 배인 Pilot-2 발전기에 대한 성능을 시뮬레이션하였다. 그림 15는 앞의 그림 13과 14에서 사용한 남해대교 계측자료를 Pilot-2 발전기에 입력하여 구한 결과이다. 그림 15에서 알 수 있듯이 이 발전기는 측정간 중앙의 수직진동에 대해 10.0mW, 중앙경간 중앙의 수직진

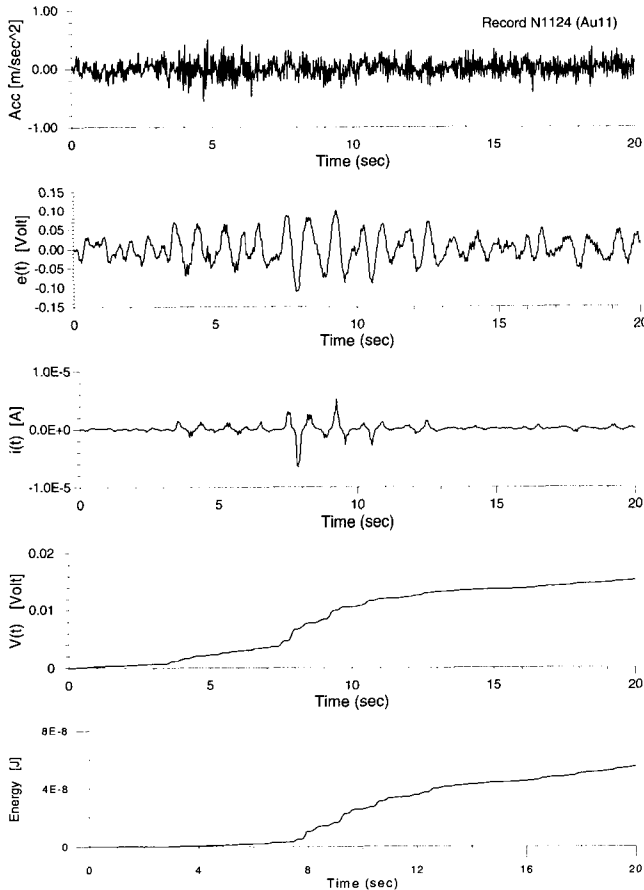


그림 13 남해대교의 측정간 보강형 구간에서 수직진동 입력에 의한 Pilot-1 발전기의 성능

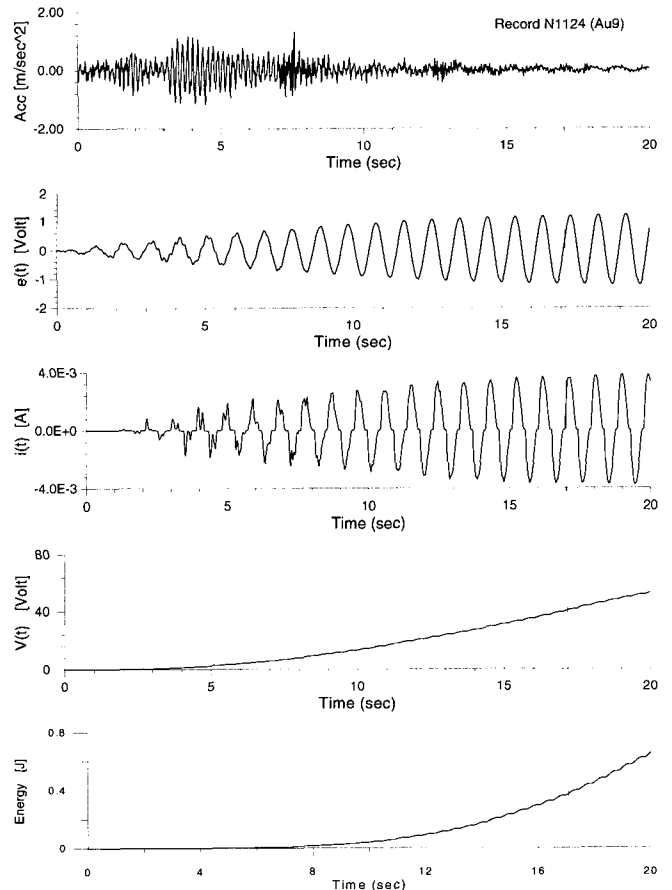
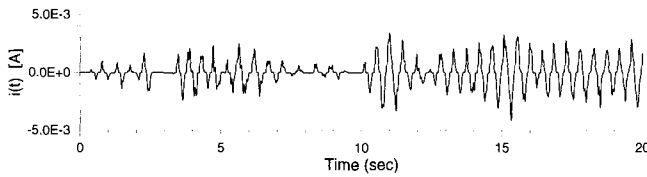


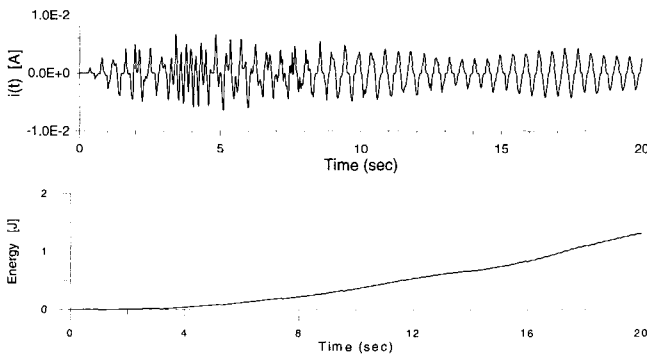
그림 14 남해대교의 중앙경간 보강형 구간에서 수직진동 입력에 의한 Pilot-1 발전기의 성능

표 2 단자유도 Pilot-2 진동발전기의 역학적 특성 및 전자기적 특성 계수

질량(kg)	0.670
스프링 상수(N/m)	31.04×4
고유진동수(Hz)	1.08×2
감쇠비(%)	0.14
유효 자속밀도, B (Tesla)	0.034
코일의 유효길이, L_{coil} (m)	92.40×4
Inductance, L (Henry)	8.20×10^{-3}
Capacitance, C_o (Farad)	4.70×10^{-4}
코일의 저항, r (Ω)	40.0



(a) 측정간 보강형 중간에서 수직진동 입력(Record N1124(Au11))



(b) 중앙경간 보강형 중간에서 수직진동 입력(Record N1124(Au9))

그림 15 남해대교의 수직진동 입력에 대한 Pilot-2 발전기의 성능

동에 대해 66.0mW의 발전성능을 보이고 있다. 이는 Pilot-1 발전기에 비해 각각 3백 60만배와 2배 향상된 것으로서 미소진동에 대한 발전성능이 획기적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 앞에서 설명했듯이 작은 크기의 전류에 대한 다이오드가 대단히 큰 저항으로 작용되는 반면 일정 크기 이상의 전류에 대해서는 다이오드가 큰 저항으로 작용되지 않기 때문이다.

따라서 그림 4의 Pilot-1 발전기를 교량의 진동특성에 맞게 튜닝하고 발전기의 기전력을 높일 수 있는 노력을 기울일 경우 본 연구에서 제안하는 진동발전기는 교량의 진동모니터링 계측유닛의 전원으로 충분하다고 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 교량의 상시적 상하진동을 이용한 전기에

너지의 발생을 위하여 기본적인 진동발전기의 구조를 제안하였고, 이와 관련된 축전시스템을 연구하였다. 또한, 진동발전기의 기계적 및 전기적 특성식을 유도하였으며 시험용 발전기를 설계 제작하였다. Pilot 발전기에 대한 자유진동시험과 강제진동시험을 수행하여 발전기의 기초적인 특성과 유효성을 확인하였다. 마지막으로, Pilot 진동발전기의 실현가능성을 평가하기 위하여, 남해대교에서 계측된 가속도 데이터를 발전기에 입력하여 Pilot 발전기의 발전성능을 시뮬레이션하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 사각형 자석을 균일하게 배치하고 균일 자계내에서 동작하는 가동 코일을 갖는, 교량의 상시 미소진동을 이용하는 진동발전기의 구조를 제안하였다.
- (2) 제안된 진동발전기는 고정 영구자석의 자속의 방향과 가동 코일 권선에 유기된 전류에 의한 기자력의 방향이 상호 수직으로 쇄교하는 구조이므로, 상호 감자 작용이 발생하지 않는 구조를 갖고, 그 결과 오직 기계적 손실에 의해서만 진동감쇠가 일어나고 매우 작은 감쇠비를 갖는 진동발전기를 제작할 수 있었다.
- (3) 다이오드 정류기를 포함하는 축전시스템에서, 낮은 동작 전류 영역에서 동작하는 다이오드의 큰 동적 저항이 코일의 자체 저항보다 훨씬 커서 가장 지배적으로 축전전류를 크게 제한하고 있음을 실험결과 확인하였다.
- (4) 남해대교에서 실측된 구조진동 데이터를 제작된 시험용 진동발전기에 적용하여 시뮬레이션한 결과, 중앙경간 보강형 중간에서의 수직진동을 이용했을 때 충분한 실용성과 실효성을 가짐을 확인하였다. 또한, 강제진동에 의한 실내 실험에서도 제작된 시험용 진동발전기가 실제로 활용이 가능함을 볼 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단 협동연구과제(2000-042-E00134)의 연구비 지원에 의해 수행된 것으로, 저자는 재단의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Kiremidjian, A. S., Straser, E. G., Meng, T, Law, K, and Soon, H, "Structural damage monitoring for civil structures," *Proceedings of the International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford, CA, 1997, pp. 371-382.
2. Nigbor, R. L. and Diehl, J. G., "Two years' experience using OASIS real-time remote condition monitoring system on two large bridges," *Proceedings of the International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford, CA, 1997, pp. 410-417.

3. Amirtharajah, R. and Chandrakasan, A., "Self-powered signal processing using vibration based power generation," *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol. 33, 1998, pp. 687-695.
4. Ching, N. N. H., Wong, H. Y., Li, W. J., Leong, P. H. W., and Wen, Z., "A laser-micromachined multi-modal resonating power transducer for wireless sensing systems," *Sensors and Actuators*, 2002, pp. 685-690.
5. Williams, C. B., Pavic, A., Crouch, R. S., and Woods, R. C., "Feasibility study of vibration-electric generator for bridge vibration sensors," *Proceedings of the 16th International Modal Analysis Conference(IMAC XVI)*, 1998, pp. 1111-1117.
6. Kim, C. Y., Kim, N. S., Yoon, J. G., and Jung, D. S., "Monitoring system and ambient vibration test on Namhae suspension bridge," *Proceedings of the First Workshop on Structural Health Monitoring and Assessment*, KEERC, Seoul, Korea, 2000, pp. 219-227.
7. 현대건설 기술연구소, 남해대교 계측보고서, 1997, p. 296.
8. 박창옥 역, 전기자기학, 동일출판사, 1996.
9. Slemon, G. R. and Straughen, A., *Electric Machines*, Addison-Wesley Publishing Company, 1980, p. 575.
10. 김원찬, 전자회로의 이해, 대영사, 2000, p. 1015.
11. 최호응, 정상응, 정현교, 최양승, 김규만, "휴대용 기기 충전용 선형 발전기 특성 해석", 2000년도 대한전기학회 추계부문 학술대회 논문집, 2000, pp. 297-299.