

도로용 발전장치 최적화 설계를 위한 수치해석

이석영

인하공업전문대학 기계과

(2014년 8월 7일 접수, 2014년 9월 10일 수정, 2014년 9월 12일 채택)

A Numerical Analysis for Optimal Design of Road Generator System

Suk Young Lee

Department of Mechanical Engineering, Inha Technical College

(Received 7 August 2014, Revised 10 September 2014, Accepted 12 September 2014)

요약

본 연구에서는 도로용 발전장치 최적화 설계를 위해 실험과 수치해석을 다루었으며, 도로용 발전장치는 패드, 축, 토셔널 댐퍼, 일방향 클러치, 기어, 발전기 등의 여러 가지 기계요소를 포함한다. 본 수치해석은 도로용 발전장치의 성능을 평가하기 위하여 개발되었으며 소프트웨어에 의하여 이론적으로 계산된 결과값을 사용하여 최적화 설계의 변수인자를 결정하게 된다. 이러한 변수는 장치의 용량, 길이, 각도 등이며, 차량의 운전상태에 따라서 토오크, 출력 및 생성된 에너지값 등의 결과값을 비교하여, 도로용 발전장치를 설계하기 전 수치해석을 통해 제안된 개념과 시스템이 효율성과 신뢰성을 갖도록 한다.

주요어 : 도로용 발전 시스템, 에너지 발생기구, 도로용 패드

Abstract - In this study, a modeling method is based on representing a road generation system with several rigid bodies, i.e, pad, shaft, torsional damper, oneway-clutch, gear system, and electricity generator. The simulation software is developed to evaluate the performance of a road generation system. It is used to determine parametric dimension for optimal design with the theoretically calculated results from the simulation software. The parametric dimensions are included as capacity, length, and angle of equipment. The transient responses at the conditions of low and high vehicle speed are compared with the calculated results as torque, power, out energy etc. Consequently, before manufacturing system, the analysis of simulation results shows that the proposed concept and system has efficiency and confidence.

Key words : Road Generator System, Energy Mechanism, Road Pad

1. 서 론

신재생에너지원이 점차적으로 확대되는 추세이고, 의무사용이 2022년에는 전체발전량의 10%까지 확대되며, 도입비용도 정부재원이 아닌 전기요금에 전가시키는 등 신재생에너지원 사이에서 효율 및 제작단가 경쟁으로 발전사업자로부터 선택되어지는 실정에서 비추어 볼 때, 도로용 발전장치는 비용절감 및 기

술개발 측면에서 저탄소 녹색성장에 적극적으로 호응되어 진다고 할 수 있다.⁽¹⁾ 국내의 경우 기업이나 연구소에서도 다양한 연구와 개발이 진행 중이나, 도로용 발전장치의 에너지 회수 효율성 및 재생에너지에 대한 기술력 부족으로 현장 적용까지는 수 년 이상의 소요가 예측되고 있다. 또한 해외의 경우에는 발전전력량 5~10kW 정도의 유사한 시험장치가 개발되어 시험가동 중으로, 상용화는 2015년 이후로 예상되고 있으며, 전기의 회수량이 부족할 때는 기존 전력 공급라인과 연계하여 공급하는 기술도 추가로 연구되고 있다. 따라서 본 연구과제 대상인 도로용 발전시스템

[†]To whom corresponding should be addressed.

Department of Mechanical Engineering, Inha Technical College
100 Inha-ro Nam-gu Incheon 402-752 South Korea
Tel : 02-870-2131 E-mail : sylee@inhac.ac.kr

은 개발 후 유망한 기술이 될 것이다.

노면에서 전기를 회수하는 장치는 차량바퀴에서 소모되는 충격에너지를 전기에너지로 전환시키는 것이 중점적인 기술인데, 동력학적인 기계 시스템 뿐만 아니라 전기분야인 전기에너지 생산 시스템도 중요하게 연구되고 있다.^{(2),(3),(4)} 따라서, 이러한 기술력을 확보하기 위한 중요한 점으로 노면에서의 발전 원동력이 자동차 주행에 의한 운동에너지라는 것을 고려하여 차량의 속도가 저속에서 고속까지도 견딜 수 있는 내구성 측면을 고려하여 설계가 이루어져야 하며, 주행 자동차에 의해 왕복운동을 하는 패드시스템의 안정성에도 초점을 맞추어 설계가 되어야 한다.^{(5),(6)} 그리고 제품 개발과정에서는 시스템의 에너지 변환 효율분석, 차량속도와 질량에 따른 에너지 발생량 분석 및 개발장치의 내구성 시험 시스템이 구축되어 진행되는 것이 바람직하다.^{(7),(8)}

따라서, 상기 제시된 기술을 반영하여 도로용 발전시스템을 제작하기 위해서는 우선 관련된 설계가 이루어져야 하는데, 이러한 설계의 최적화를 위해 선행되어야 하는 과정이 수치해석이다. 본 연구에서는 1차 실험을 통해 수치해석의 신뢰성을 확인하였고 도로용 발전시스템을 구성하는 기계요소의 치수값을 변수로 하는 수치해석을 수행하여 전기 발전량을 추정하고자 하였다.

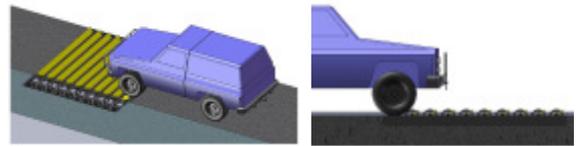
2. 도로용 발전시스템의 소개

2-1. 개요

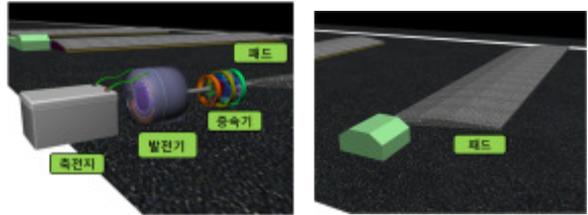
도로용 발전시스템이란 차량이 도로 위를 운행할 때 안전을 목적으로 하는 감속유도 턱이나 미끄럼 방지(rumble strip) 등을 통과하면서 불가피하게 소모되는 운동에너지와 하중에너지를 기구 장치를 통해 전기에너지로 회수하여 재활용 할 수 있도록 하는 시스템으로서, 현장 적용이 즉시 가능한 시스템이다.

2-2. 원리

주행중인 자동차가 감속하여 도로 위에 설치한 압력패드를 밟고 지나가면, 자동차의 하중과 운동량에 의해 압력패드가 아래방향으로 움직이면서 회전기어가 작동한다. 하강되는 압력패드는 연결되는 회전기어와 댄퍼, 유성기어, 일방향 클러치 순으로 속도를 증속한다. 이 때, 일방향 클러치와 연결된 축의 증속에 의해 발전기가 작동되며, 발전기에서 생성된 교류



가. 차량진입 상상도



나. 주요 구성 부품

Fig. 1. 도로용 발전 시스템 개요도

의 불규칙한 전압의 전원을 인버터를 통해 직류로 전환하여 축전지에 저장하고, 필요 시 전압 조정을 거쳐 수요처에 AC 220V로 공급한다.

3. 연구내용 및 범위

도로용 발전시스템의 제작을 위하여 설계변수를 입력값으로 수치해석을 수행하였다. 수치해석 검증을 위해 실험장치로 실시한 실험값과 비교하였으며 여러 가지 설계의 변수값을 변화시키면서 전기생산량 등의 출력값을 비교 검토하여 최적화 설계가 되도록 하였다.

4. 실험

4-1. 제원

실험장치는 Fig. 2와 3에서 보는 바와 같이 플레이트와 발전기 모듈로 구성되며 Fig. 4에서의 플레이트에서는 자동차 바퀴의 하중을 발전기 축으로 전달하는 역할을 하고 Fig. 5의 발전기 모듈에서는 플레이트에서 전달된 토오크를 증속기를 통해 증속시키며 발전기에 전달하여 전기를 생산하는 역할을 한다.

4-2. 실험조건 및 결과

실험조건은 Table 1에서 제시하는 바와 같으며, 이러한 조건은 실차에 적용하기 위한 조건에 알맞게 설정한 것이며, Fig. 6과 같이 실차 실험을 거친 실험 결과를 Fig. 7에서 발전기에 의해 생성된 전압을 실

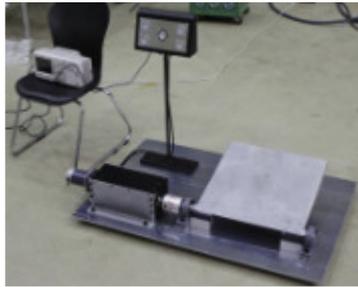


Fig. 2. 실험장치 사진

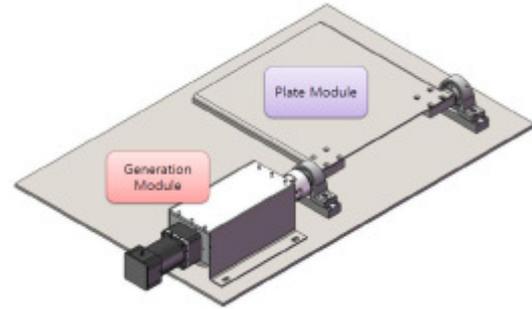


Fig. 3. Module의 조립도

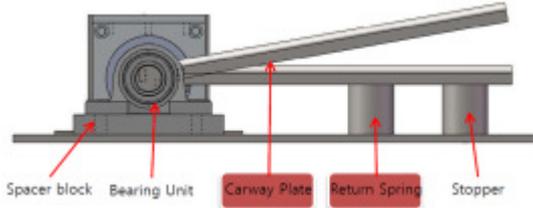


Fig. 4. Plate module 조립도

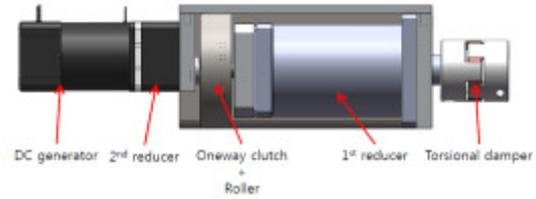


Fig. 5. Generator module 조립도



Fig. 6. Plate module 조립도

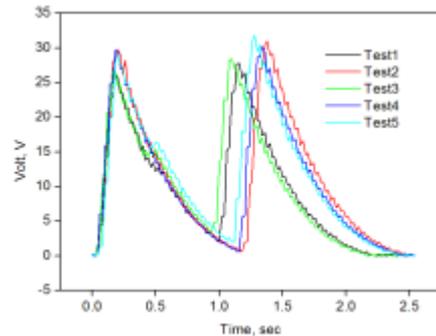


Fig. 7. Generator module 조립도

Table 1. 실험조건

Item	Dimensions
Pad length (m)	0.22
Initial pad slope angle (deg.)	30
Inertial mass (kg)	7.68
Car weight (kg)	1,100
Car speed (km/h)	10

시간으로 보여주고 있다. 여기서 5개의 선도는 측정 한 횟수이며 파형이 2개로 나타난 것은 차량이 패드를 지날 때 전륜과 후륜 모두 접촉하였기 때문이다.

5. 수치해석 방법

본 연구에서는 도로용 발전장치의 최적화 설계를 위해 여러 가지 변수를 입력값으로 하여 계산된 에너지값 등의 결과를 비교하여 최적화 설계를 하고자 한

다. 이를 위해, 동력학적 원리를 기본으로 차량의 거동에 따라 Newton의 제 2법칙을 적용한 지배방정식을 도출하여 노면 발전시스템의 운동방정식을 세우고 비주얼 C언어를 사용하여 Fig. 8의 순서도에 따라 수치해석을 수행하였다.

5-1. 가정

- 가. 패드의 모든 구조물은 강체(rigid)이다.
- 나. 패드를 지나는 동안 자동차 속도는 일정하다.

5-2. 사용된 식

자동차가 도로용 발전장치에 접근하여 패드의 전체길이 l_{total} 에서 최초로 접촉 시에 Fig. 9과 같이 미접촉되는 패드길이 $l(t_0)$ 를 제외한 나머지 길이를 차량이 지나는 것을 가정하였고 자동차 바퀴가 패드에 접촉하면서 바퀴의 무게와 접촉된 패드길이에 의

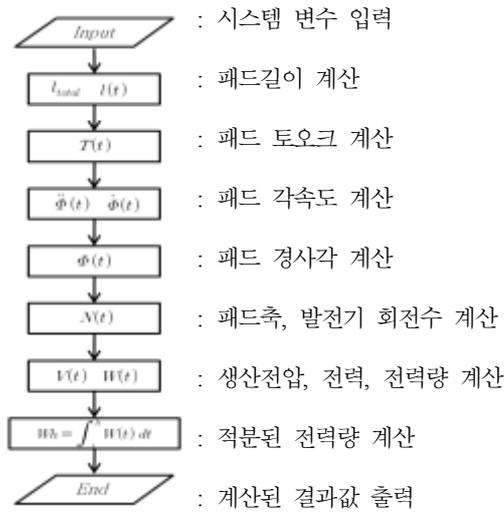


Fig. 8. 전산해석 순서도 (Flow chart)

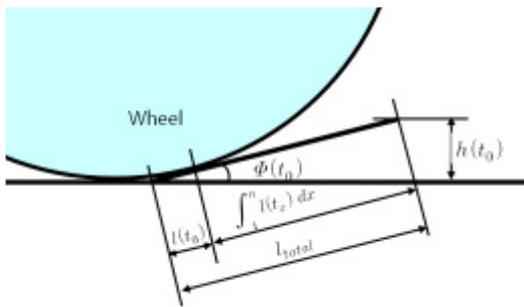


Fig. 9. 자동차 바퀴와 패드의 동작도

하여 패드축에 토크가 시간의 함수로서 발생하고 자동차의 진입속도에 의한 충격력도 식 (1)과 같이 동시에 발생하게 된다.

$$T(t) = W \cdot \cos \Phi(t) \cdot l(t) + F_V(t) \cdot \sin \Phi(t) \cdot l(t) \quad (1)$$

이 식에서 오른쪽 첫 번째 항은 자동차 무게에 의한 위치에너지를 나타내고 두 번째 항은 자동차 진입 속도에 의한 충격에너지를 나타내며 다시 정리하면 다음 (2)식과 같다.

$$\begin{aligned} T(t) &= W \cdot \cos \Phi(t) \cdot l(t) + F_V(t) \cdot \sin \Phi(t) \cdot l(t) \\ &= Mg \cdot \cos \Phi(t) \cdot l(t) + \frac{M \Delta V(t)}{t} \cdot \sin \Phi(t) \cdot l(t) \end{aligned} \quad (2)$$

그런데 가정에서 차량이 진입하여 패드를 지나갈 때 속도는 일정하다고 가정하였으므로 식 (2)의 오른쪽 두 번째 항에서 $\Delta V(t)$ 가 0이 되므로 식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

$$T(t) = Mg \cdot \cos \Phi(t) \cdot l(t) \quad (3)$$

한편, 식 (3)에 의하여 발생된 토크는 이러한 동력전달 장치를 통하여 결국 발전기를 구동하게 되는 에너지로 사용된다. 이를 표현하면 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T(t) = I_{zz} \ddot{\Phi}(t) + q \frac{\dot{\Phi} H}{2} B \sin \theta + \eta_{mech} + kx \quad (4)$$

이 식에서 오른쪽 첫 번째 항은 동력전달장치에서 축, 증속기어, 클러치, 플라이휠 등에서 발생하는 관성을 나타내는 것으로 질량관성 모멘트 I_{zz} 은 다음 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$I_{zz} = \frac{1}{2} mr^2 \quad (5)$$

여기서, m 은 관성과 관련되는 물체 질량의 합이고 r 은 관성을 유발시키는 물체를 원통형으로 가정하였을 때 원통의 반지름을 나타낸다. 오른쪽 두 번째 항은 발전기 부하로서 q 는 전하(electrical charge), h 는 코일의 높이, B 는 자기장(magnetic field), θ 는 로타가 회전할 때 이루는 각도를 말한다. 또한, 오른쪽 세 번째 항 η_{mech} 은 기계효율로서 패드 시스템을 이루는 기계요소 사이에서 생성되는 기계적 마찰 손실을 나타낸 것이다. 오른쪽 네 번째 항 kx 는 자동차 바퀴가 패드를 지난 후에 패드를 원위치 시키기 위한 스프링 탄성계수와 변위를 말하는 것이다.

오른쪽 두 번째 항부터 네 번째 항까지는 각속도 $\dot{\Phi}$ 에 비례하여 증가되는 부하에 해당되는 항으로서 이를 단순화시켜 나타내면 식 (6)으로 표현할 수 있다.

$$q \frac{\dot{\Phi} H}{2} B \sin \theta + \eta_{mech} + kx \approx L \dot{\Phi} \quad (6)$$

따라서 식(1)에서부터 식(6)을 정리하면 다음 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$T(t) = W \cdot \cos \Phi(t) \cdot l(t) = I_{zz} \ddot{\Phi}(t) + L \dot{\Phi} \quad (7)$$

식 (7)은 본 수치해석에 사용된 가장 중요한 식으로서 왼쪽 항은 자동차 바퀴가 패드를 누르는 에너지이며, 오른쪽 항은 이렇게 생성된 에너지가 관성과 발전기 등의 부하에 사용되는 것을 나타낸다. 이렇게 계산된 식으로부터 패드 축의 각속도와 발전기에서 로터의 회전속도는 다음 식 (8)과 (9)와 같이 나타낸다.

$$N_{pad}(t) = \frac{\dot{\Phi}(t)}{2\pi} \quad (8)$$

$$N_{\geq n}(t) = N_{pad}(t) \cdot i \quad (9)$$

여기서, $N_{pad}(t)$ 는 패드 축의 각속도로 단위는 rad/s이다. 또한 $N_{\geq n}(t)$ 는 발전기에서 로터의 속도로서 식 (9)의 오른쪽 항에서 기호 i 는 패드축과 발전기 로타 사이의 증속비로서 본 실험장치의 증속비는 300이다. 발전기에서 생산되는 전압과 전력은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$v(t) = CL\dot{\Phi} \quad (10)$$

$$W(t) = \frac{v^2(t)}{R} \quad (11)$$

여기서, C 는 보정상수로서 1.6을 사용하였으며, R 은 저항의 값으로 실험에서 측정한 5Ω 의 값을 적용하였다. 식(12)는 패드위로 바퀴가 지나가면서 생성되어 누적되는 에너지를 계산하기 위한 식으로 전력값을 시간으로 적분한 것이다.

$$Wh = \int_1^h W(t) dt \quad (12)$$

6. 수치해석 결과분석

6-1. 수치해석적 검증

본 연구에 사용된 프로그램은 Microsoft Visual C++ 6.0으로 앞 장에서 제시한 수식을 기본으로 유한 차분법을 적용하여 프로그램을 작성하였다. Table 1에서 제시된 실험장치와 동일한 제원과 실험조건으로 수치해석을 수행하였다. Fig. 10은 실험에 의해 측정된 전압값을 수치해석에 의하여 계산한 전압값과

비교한 것으로 서로 유사한 경향을 보여줌으로서 수치해석에 대한 검증을 확인하였다. 이러한 검증은 차량에서 전륜쪽만 고려하였다. 전압값은 패드축의 각속도와 비례하므로 전압의 크기는 비례상수 $C=1.6$ 을 사용하였고 시간의 함수로 나타나는 전압 그래프 형태는 식 (7)에서 부하상수인 $L=1.3$ 을 사용하였다. 여기서 부하상수 L 값은 실제로 정밀하게 측정되기 어려운 값으로 전압의 실험치와 계산치를 매칭시키면서 얻어질 수 있는 것이다.

6-2. 입력변수의 선정

도로용 발전장치의 수치해석을 수행하기 위한 입력변수와 변수에 따르는 치수값은 Table 2과 같으며 값의 선정은 외부 도로환경과 장치 제작을 고려하여 결정하였다.

6-3. 조건별 결과 분석

실험을 통해 수치해석 검증하였고 이러한 수치해석을 적용하여 최적화 설계변수를 도출하기 위한 해당되는 변수를 Table 2와 같이 선정하였다. 따라서, 기준조건과 다르게 변수를 변화시키면서 나타나는 결

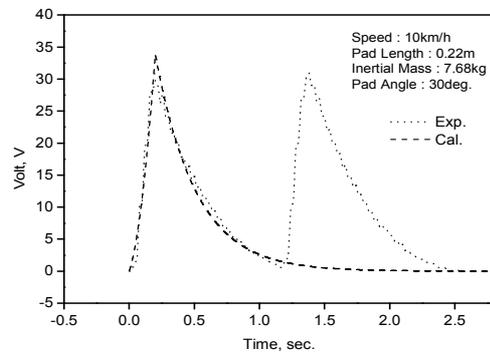


Fig. 10. Comparison of experimental and calculated electrical volt versus time at the standard condition.

Table 2. 시뮬레이션 입력 변수 및 치수값

Parameter	Relevant dimensions
Pad length (m)	0.14, 0.18, 0.22 , 0.26, 0.30
Initial pad slope angle (deg.)	10, 20, 30 , 40, 50
Inertial mass (kg)	0.51, 4.09, 7.68 , 11.26, 14.85
Load factor	0.54, 0.78, 1.00 , 1.23, 1.46
Car speed (km/h)	10 , 20, 30, 40, 50

※ 밑줄은 실험조건에 해당되는 기준조건

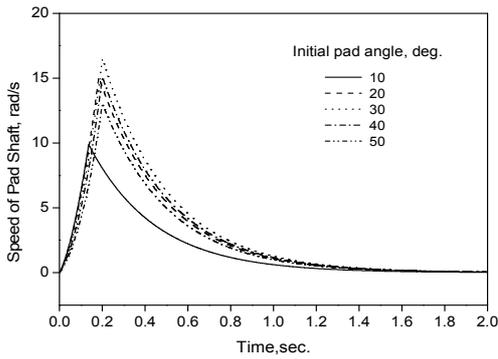


Fig. 11. Comparison of the speed of pad shaft versus time for variable initial pad angle at the standard condition.

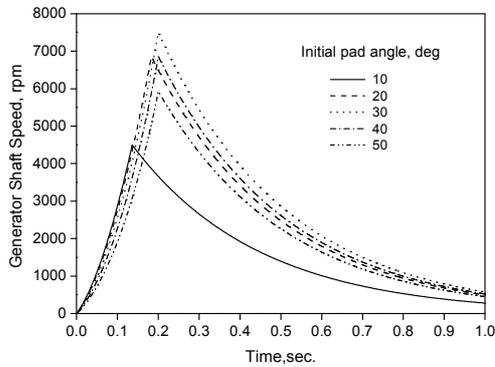


Fig. 12. Comparison of generator shaft speed versus time for variable initial pad angle at the standard condition.

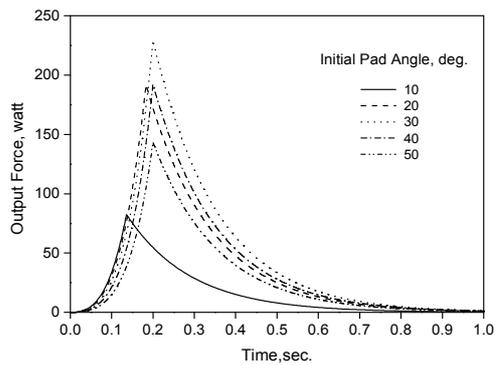


Fig. 13. Comparison of the out force versus time for variable initial pad angle at the standard condition.

과를 분석하였으며, 이러한 결과는 패드축의 각속도, 패드의 경사각, 발전기축 속도, 발전기에서 생산되는

전력 및 전기에너지 생산량 등이다.

6-3-1. 초기 패드 경사각

실험장치를 기준으로 초기 패드 경사각을 변화시키면서 계산한 결과를 Fig. 11에서 13까지 보여주고 있다. Fig. 11은 패드축의 각속도를 시간의 변화에 따라 나타낸 것으로 각속도의 크기가 증가하다가 최대점에서 반대로 감소하는 곡선을 그리는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 차량 바퀴가 패드를 지나면서 각속도가 증가하다가 패드의 끝에 도달하면 차량 바퀴는 이탈하면서 패드에는 더 이상 토크를 전달하지 않게 된다. 그러나 발전 시스템의 동력전달장치의 관성에 의하여 회전은 계속진행이 되다가 발전기 부하에 의하여 점차 감소되는 것으로 사료된다. 패드축의 각속도는 결과적으로 전압 그래프를 형성하게 되므로 각속도 크기가 결국 생산되는 전력량과 비례한다고 볼 수 있다. 따라서, 초기패드의 각도를 10도에서 50도까지 변경시키면서 패드축의 각도를 계산해 본 결과 30도에서 각속도가 최대값을 보여주며, 이러한 결과는 실험장치가 표준조건에서 패드의 초기각도를 30도로 결정한 것이 적절하다고 판단할 수 있다. 패드 각도를 10 또는 20도로 설정하였을 경우는 차량의 바퀴가 패드 끝단까지 도달하기 전에 패드가 바닥에 접촉하게 되어 차량중량과 패드길이에 의해 생성되는 토크를 충분히 전달받지 못하기 때문에 각속도의 최고점의 시점도 앞당겨지고 크기도 감소되는 것으로 판단된다. 반대로, 패드 각도를 40 또는 50도로 설정하였을 경우는 차량의 바퀴가 패드끝단을 이탈할 때까지도 패드가 바닥에 접촉되지 않는 경우라고 볼 수 있다. 이러한 현상은 발전 시스템의 동력전달장치의 관성이 패드 각도 40 또는 50도에서는 상대적으로 크게 작용을 하기 때문인 것으로 사료되며, 만약 40 또는 50도에서 최적화 설계를 하기 위해서는 우선적으로 관성을 감소시켜 차량의 바퀴가 패드끝단을 이탈 시 패드가 바닥에 접촉하도록 해야 한다고 판단된다.

발전기축의 회전속도는 패드 각속도에 비례하는 것으로 발전기에서의 효율과도 관련이 있다. 따라서 가능하다면 회전속도의 변화가 작고 발전기에서 가장 높은 효율을 발생시킬 수 있는 회전수의 분포를 유지시키도록 하는 것이 바람직하다고 판단된다. Fig. 12은 발전기축 회전수를 보여주며 패드 설치 각도의 종류 중에서 발전기 회전수만 비교하여 볼 때 회전수의 변형폭이 가장 작은 10도가 적합하다고 사료된다.

전력은 전압의 제곱을 저항으로 나눈 값으로 패드축의 각속도의 제곱에 비례한다. 따라서 Fig. 13와 같이 패드축의 각속도와 비슷한 경향을 보이며, 생산된 에너지는 가장 최적화 설계에 가까운 패드 설치 각도 30도에서 가장 많은 양을 보여준다. 다른 각도가 30도에 비해 생산된 에너지가 적은 이유는 10, 20도의 경우 차량의 바퀴가 패드 끝단을 이탈하기 이전에 패드가 미리 바닥과 접촉하여 패드에서 생성되는 토크를 충분히 사용하지 못하는 경우이고, 40, 50도의 경우는 반대로 바퀴가 패드끝을 이탈할 때까지도 패드가 바닥과 접촉이 되지 않기 때문인 것이다.

6-3-2. 관성 질량

Fig. 14에서 보면 관성 질량에 따라 패드축의 각속도가 급격하게 증가하다가 감소하다가 이후에 속도의 폭이 완만해지는 결과를 볼 수 있다. 이러한 경향은 결국 생성되는 전압의 곡선을 결정하는 것으로 에너지

생산속도에 큰 영향을 주게되며 Fig. 15에서 나타난 결과에 의하면 관성질량이 4.09kg일 때 가장 많은 전력량이 발생함을 알 수 있다. 이러한 관성질량이 최적화 설계되기 위해서는 차량 바퀴가 패드끝을 이탈할 때 패드의 각도가 0도가 되도록 해야 한다. 이러한 조건에 가장 부합하는 관성질량이 4.09kg이기는 하나 관성질량의 변수를 늘려서 더욱 최적화 설계가 되도록 근접한 값을 찾을 필요가 있다.

6-3-3. 패드길이

패드의 길이가 증가할수록 패드축의 각속도의 증가율은 같지만 최고점은 패드길이에 비례함을 Fig. 16을 통해 알 수 있다. 패드축의 각속도는 패드축에서 생성되는 토크에 비례하는 것이고 이러한 토크는 패드의 길이에 비례하는 현상에서 기인한다. 이러한 패드축의 각속도의 크기는 결국 생성되는 에너지량과 비례하므로 가능하다면 패드의 길이를 증가시

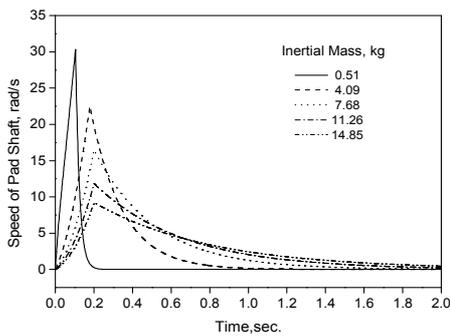


Fig. 14. Comparison of the speed of pad shaft versus time for variable inertial mass angle at the standard condition.

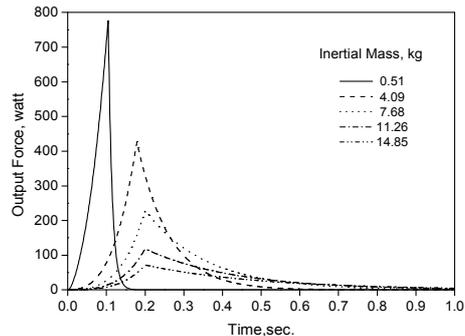


Fig. 15. Comparison of the out force versus time for variable inertial mass at the standard condition.

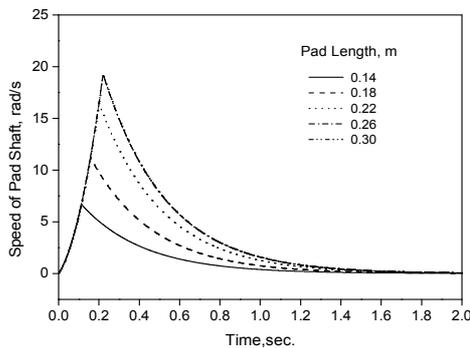


Fig. 16. Comparison of generator shaft speed versus time for variable pad length at the standard condition.

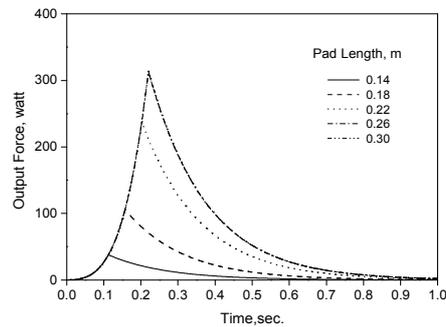


Fig. 17. Comparison of the out force versus time for variable pad length at the standard condition.

키는 것이 바람직하다고 판단된다. 그러나 패드길이의 증가는 패드끝단의 높이를 증가시켜 도로법상 돌출부위가 10cm이하로 제한된 조건에 적합하지 않은 한계가 있다. 이러한 경향은 Fig. 17 나타난 결과에서도 알 수 있는데 패드의 길이는 가능하면 증가시키는 것이 전력량을 증가시키는 것으로 분석되었다.

6-3-4. 부하

최적화 설계를 위해 수치해석에 필요한 입력되는 변수 중에서 부하의 값은 예측하기에 알아야 할 정보의 양은 부족하다. 정보의 종류로는 식 (4)의 오른쪽 2,3,4번째 항이며 오차범위를 감소시키기 위한 방안으로 식 (6)과 같이 단순화시켰다. 결국 부하는 각속도에 비례하며 비례상수 L 의 값을 정하는 것이 필요하다. 이러한 부하 비례상수 L 값은 실험에서 측정된 전압선도와 수치해석에 의해 그려지는 선도를 서로 매칭을 시켜서 나온 값으로 상부값 1.3으로 정하였다. 따라서 비례상수 1.3을 기준값으로 입력하고 부하변동을 고려시에는 기준값으로부터 가감하여 부하값을 정하였다. 이러한 부하값은 향후 제품이 개선되어 실제 현장에 적용시 발전시스템에서 공급되는 부하량에 따라서 달라지므로 부하의 변동이 도로용 발전장치에 어떤 영향이 있는지 살펴본 것이다. 부하가 증가하면 패드축이 회전하는데 저항이 증가되므로 패드축의 각속도는 Fig. 18과 같이 감소하게 된다. 부하 요소(load factor)는 기준조건을 1로 정하여 작계는 절반정도에 해당하는 0.54, 크계는 1.46정도까지 크기를 가감시켰으나, 이러한 부하요소의 변동에 비해 패드의 각속

도의 변화폭은 상대적으로 작았다. 특히, 패드 각속도의 경우에는 부하요소에 따른 영향이 차량바퀴가 패드 끝단을 지난 후에 더욱 크게 나타남을 알 수 있었다. Fig. 19는 부하요소에 따른 전력값으로 주로 차량 바퀴가 패드 끝단을 지날 때 차이가 커짐을 알 수 있다.

6-3-5. 차량 진입속도

자동차의 진입속도가 증가할수록 패드축의 각속도의 최대치가 감소함을 Fig. 20를 통해 알 수 있다. 이러한 경향은 관성이 지배적인 영향을 주는 것으로 차량의 속도가 증가함에 비해 일정한 관성질량을 유지하고 있기 때문이다. 다시 말해, 차량의 속도가 빠르면 차량의 중량에 의하여 패드의 각도를 변화시킬 만한 시간이 상대적으로 부족하다는 것이다. 이러한 결과는 결국 차량이 패드 끝단을 이탈할 때 패드와 도로 바닥 사이에서 이루는 잔여각을 증가시켜 전력 생산량을 감소시키게 된다. 따라서 앞에서 언급한 잔여각을 감소시키려면 관성질량을 감소시키는 방안이 필요하다. 또한, 이러한 잔여각의 증가는 차량의 중량에 의한 위치에너지를 충분히 활용하지 못하게 되어 Fig. 21에서 보는 바와 같이 전력 생산량을 감소시키게 된다.

6-3-6. 변수 상관관계

상기에서 살펴본 여러 가지 변수를 x축에 설정하고 각 변수가 전기에너지 생산량에 미치는 영향을 세부적으로 분석함으로써 최적화 설계 인자를 도출하고자 한다.

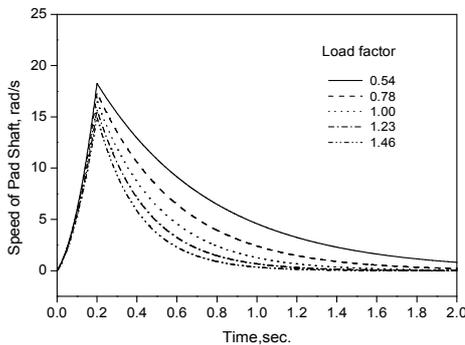


Fig. 18 Comparison of the speed of pad shaft versus time for variable load factor angle at the standard condition.

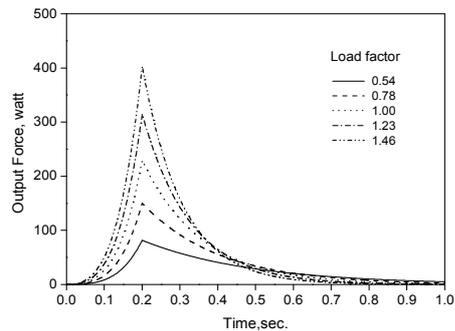


Fig. 19. Comparison of the out force versus time for variable load factor at the standard condition.

- 초기 패드 각도의 영향

제품설계 시 초기 패드 각도를 변경할 수 있다면 Fig. 22에서 보는 바와 같이 기준조건인 30도 보다는 감소시켜 26도로 설계하는 것이 최대 전기에너지량인 0.01377Wh를 생산될 것으로 예측된다. 이러한 조건에서는 발전기 평균 회전수도 최대값도 예상할 수 있다.

- 패드 각도

패드 길이는 기준조건의 경우보다는 증가시켜 0.24m부터는 동일한 최대 전기에너지가 생산됨을 Fig. 23을 통해서 알 수 있다. 이러한 결과는 패드길이 0.22m일 때는 차량이 패드 끝단을 지날 때 패드와 바닥 사이의 잔여각이 5.96도에서 기인한다.

- 관성질량

관성의 질량은 발전시스템의 다른 변수들보다도 시스템의 성능향상을 위해 매우 중요한 변수이다.

Fig. 24에서 살펴본 바와 같이 기준조건인 7.68kg에서 5.63kg로 감소시켰을 때 최대에너지 0.01676Wh가 생성됨을 예측할 수 있다.

- 차량 진입 속도

기준조건에서 차량속도 10km/h에서 증가시키면 차량바퀴가 패드 끝단에서 이탈 시에 패드와 바닥 사이에서 형성되는 각이 커져서 차량의 중량에 의한 위치에너지를 충분하게 얻지 못하게 되어 Fig. 25에서 보는 바와 같이 현격하게 감소한다. 따라서 본 도로용 발전장치를 일반적인 감속 또는 과속방지턱 구간에서 적용하고자 한다면 다른 변수들을 최적화하여 설계하여야 한다.

- 부하 요소

부하의 증가는 출력되는 에너지 생산량과 비례하며 부하를 증가시킴과 동시에 저항으로 작용하여 발전기 평균 회전을 감소시키게 된다.

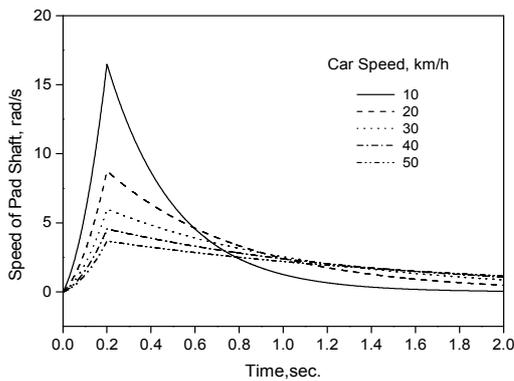


Fig. 20. Comparison of the speed of pad shaft versus time for variable car speed angle at the standard condition.

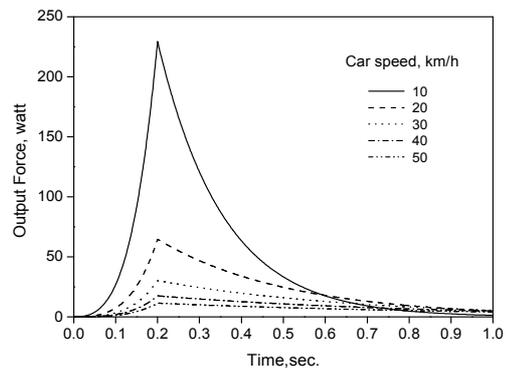


Fig. 21. Comparison of the out force versus time for variable car speed at the standard condition.

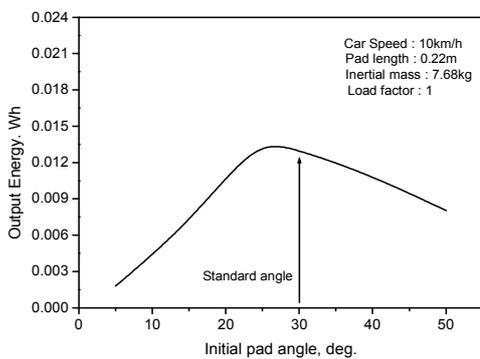


Fig. 22. Output energy versus initial pad angle at the standard condition.

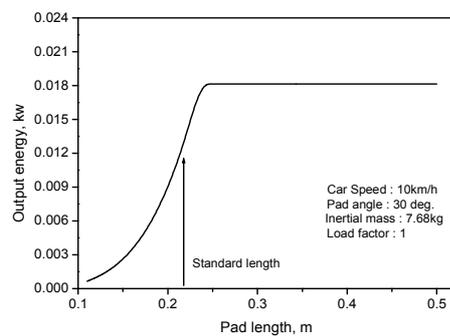


Fig. 23. Output energy versus initial pad length at the standard condition.

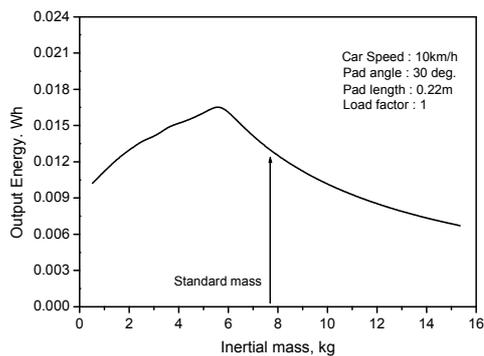


Fig. 24. Output energy versus inertial mass at the standard condition.

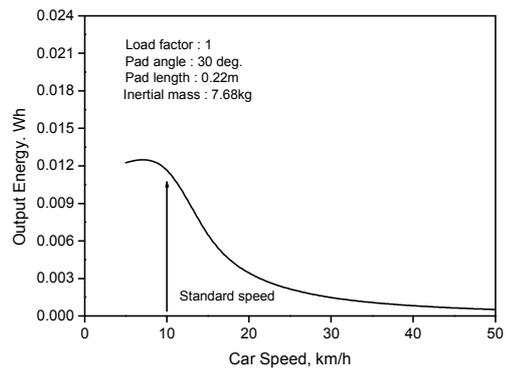


Fig. 25. Output energy versus car speed at the standard condition.

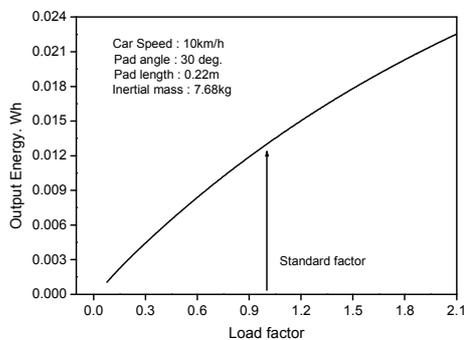


Fig. 26. Output energy versus load factor at the standard condition.

7. 결론

본 연구는 도로용 발전장치의 최적화 설계를 위한 설계인자를 도출하기 위한 수치해석을 진행하였고 실험장치를 제작 후 실험을 통하여 수치해석을 검증하였고 도로용 발전장치 여러 가지 설계 변수값을 수치해석에 입력하여 계산한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 수치해석의 검증을 위해 계산된 결과를 실험을 통해 취득한 전압 곡선과 비교한 결과 거의 유사하다고 판단되었다.

(2) 수치해석 결과, 최대의 전기에너지를 얻기 위해서는 차량바퀴가 패드끝단에서 이탈시 패드 각도가 0도가 되도록 설계해야 한다. 특히, 패드를 지나가는 차량의 속도의 변화가 없다면 생산되는 에너지량은 패드 끝단의 높이에 한정된다.

(3) 상기 (2)를 이행하기 위해서는 관성질량을 변화시키는 것이 가장 좋은 접근방법이며, 관성질량을 기존의 7,68kg에서 5.63kg 만큼 감소시키는 것이 바람직하다고 판단된다.

(4) 최적화 설계를 위해 상기 (3)의 방법 이외에도 패드의 각도와 패드의 길이를 도로법상 패드 끝단의 높이가 10cm 이하가 되는 조건에서 최적화 설계하는 방법 등도 함께 고려되어야 한다.

(5) 실험장치의 실험은 차량 진입속도를 10km/h의 조건에서 수행하였으나 실제 현장의 조건은 차량속도가 증가될 가능성이 크다. 따라서 최대의 전기에너지를 얻기 위해서는 패드각도 및 관성질량의 감소 등의 방안을 강구해야 한다.

기 호 정 의

- 영어문자 -

- B : 자기장
- C : 상수
- F_V : 충격력
- g : 중력가속도
- h : 패드높이
- H : 코일의 높이
- I_{zz} : 질량관성 모멘트
- k : 스프링 상수
- L : 부하 상수
- l : 패드의 길이

- m : 자동차 질량
- N : 회전수
- n : 패드 분할수
- q : 전하
- R : 저항
- r : 관성 반지름
- t : 시간
- T : 패드에 의한 토크
- V : 자동차 속도
- v : 전압
- W : 자동차 무게
- w : 전력
- x : 스프링 변위

- 그리스 문자 -

- θ : 로터 회전 각도
- Φ : 패드의 경사각
- $\dot{\Phi}$: 패드의 각속도
- $\ddot{\Phi}$: 패드의 각가속도
- η : 효율

- 하첨자 -

- 0 : 자동차 바퀴의 패드접촉 최초의 상태
- gen : 발전기
- i : 증속비
- $mech$: 기계
- 1 ~ n : 패드 분할 순서
- pad : 패드
- $total$: 전체
- x : 패드 분할 임의의 위치

References

1. <http://www.armoc.com> 발췌, “국내최초 친환경 신재생에너지 발전시스템 개발”, 2009년 06월 01일 작성.
2. Lingen, C. A. Jun, L. A. Fengrui S. A. and

- Chih W. B., "Performance optimization of a two-stage semiconductor thermoelectric-generator", *Applied Energy*, 2005, Vol. 82, 300-312.
- 3. Jonnalagadda, A. S., " Magnetic Induction Systems to Harvest Energy form Mechanical Vibration", Submitted to the Department of Mechanical Engineering on January 26, 2007, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering.
- 4. Hayashida, J. Y., "Unobtrusive Integration of Magnetic Generator Systems into Common Footwear", Submitted to the Department of Mechanical Engineering in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Science at the Massachusetts Institute of Technology, June 2000.
- 5. <http://www.greendaily.co.kr>
- 6. Hwang, C. Y., "A study on piezoelectric power harvesting for green road system," Science Master Thesis of Hanyang University, 2010.
- 7. Cho, B. W., "A Basic study on Green Road Energy Harvesting Using Pressure of Vehicles," Proceeding of Korean society of civil engineering Conference, 2009, pp. 3051-3054
- 8. <http://www.greendaily.co.kr>