

이산요소법을 이용한 회전체의 크기에 따른 Washboarding 현상에 대한 영향 분석

이승준^{*,**}, 박준영^{*,**,#}

^{*}금오공과대학교 기계설계공학과, ^{**}금오공과대학교 항공기계전사용합전공

Effects on the Washboarding Phenomenon Based on the Size of the Rotating Body Using a Discrete Element Method

Seoungjun Lee^{*,**}, Junyoung Park^{*,**,#}

^{*}Dept. Mech. Dsgn. Eng., Kumoh Nat. Inst. Tech., ^{**}Aero. Mech. Elect. Conv. Eng., Kumoh Nat. Inst. Tech.

(Received 24 May 2021; received in revised form 06 July 2021; accepted 23 July 2021)

ABSTRACT

Washboarding is a crucial problem occurring on unpaved roads. This phenomenon involves the formation of ripples on the surface of the unpaved road and causes a critical problem to vehicles and riders. The phenomenon is affected by several parameters, but we focused on the velocity and the size of the rotating body. In the precedent research, we observed that a critical velocity existed for the occurrence of the phenomenon, and the phenomenon's grade was related to the velocity. Therefore, this study, using a discrete element method, aimed to analyze the relation between the velocity and the size of the rotating body for the occurrence of the phenomenon and perform a fast Fourier transform (FFT) analysis to determine the correlation between the phenomenon and the period. The study observed that the critical velocity could vary from the velocity and the size of the rotating body, and there was a certain range of frequency for the occurrence of the Washboarding phenomenon.

Key Words : Washboarding(빨래판 현상), Critical Velocity(임계속도), Rotating Body(회전체), Discrete Element Method(이산요소법)

1. 서 론

Washboarding 현상은 Washboard road 또는 Corrugation road라고 불리며, 비포장도로에서 발생하는 주요 문제점들 가운데 하나이다. 이 현상은

흙이나 자갈, 모래 등 입자로 이루어진 도로에서 주로 발생하며, Fig. 1에서 볼 수 있듯이 도로 표면에 물결 모양의 파동이 나타나는 현상이다^[1]. 일반적인 예상과 달리 교통기관의 충격 흡수장치에 의해서 발생하는 것이 아니라, 비포장도로의 매끈한 표면에서도 주기적으로 교통기관이 지나가면 자연적으로 발생한다고 알려져있다^[1]. Washboarding 현상은 비포장도로를 주행하는 차량의 승객들에게 불

Corresponding Author : pcello@kumoh.ac.kr

Tel: +82-54-478-7377, Fax: +82-54-478-7377



Fig. 1 Washboarding road

편함을 주고, 차량의 주도권을 잃게 하여 사고 발생의 가능성을 증가시킬 수도 있다^[2]. 이러한 Washboarding 문제는 국가적 기간산업이 부족한 개발도상국에 국한되지 않고, 전 세계적으로 발생한다. 예로 개발도상국인 나이지리아에서는 포장도로가 19%, 비포장도로가 81%로 비포장도로의 비율이 더 높아 이러한 문제에 많이 직면하게 되지만, 미국도 포장도로가 65%, 비포장도로가 35%로 적지 않은 비율로 비포장도로를 차지하고 있다^[3,4].

Washboarding 현상은 도로의 표면 형상이 빨래판의 형상을 비슷하여 붙여진 이름이다^[1]. 현상의 주요한 발생 원인은 선행 연구에서 개략적으로 밝혀져 있다. 가장 주된 원인은 비포장도로 위를 지나가는 잦은 교통량에 의한 것으로, 일정 속도 이상의 차량이 지속해서 지나가면, 비포장도로의 구성 요소의 응집 또는 도로 표면의 불완전성에 의해서 바퀴가 접촉 면적을 잃게 되어 파동이 형성되는 것으로 알려져있다^[2,5]. 또한, 현상의 발현 조건에서 입자와 접촉하는 물체의 형상이 타이어와 같은 원형뿐만 아니라 농업에서 사용되는 쟁기와 같은 형태인 네모난 판의 형태에서도 나타난다고 알려져 있다^[5].

Washboarding 현상에 의한 피해를 방지하고자 여러 선행 연구에서 현상을 여러 방법으로 진행해왔다. 과거에는 실험적인 방법으로 현상을 구현하고 분석하는데 초점이 맞춰졌으나, 최근에는 이산요소법(Discrete Element Method, DEM)을 이용한 수치 해석적 방법을 이용한 분석도 많이 시도되고 있다.

Taberlet은 실험과 2D DEM 해석을 통해 분말 위로 지나가는 물체의 속도가 어느 임계속도(Critical Velocity, V_c) 이상이 되면, 표면에 물결 모양의 현상이 나타난다고 하였다^[6]. Srimahachota는 실험적인 연구를 통해 현상과 주파수에 대하여 분석하였는데, 속도가 파동, 진폭과 파장에 영향을 주며, 수분이 많은 진흙과 눈 위에서도 현상이 발생한다는 것을 발견하였다^[7]. Bitbol의 연구에 의하면 지면 입자의 밀도와 지면을 지나는 회전체의 무게가 현상 발생에 큰 영향을 주며, 지면 입자의 형태와 크기는 영향을 주지 않는다^[8]. 또한, Ikeda는 바퀴뿐만 아니라 농업에 사용되는 쟁기와 팽이 등의 원형이 아닌 형태의 물체에 의해서도 유사한 현상이 발현되며, 속도가 증가하면 현상이 발현되고, 그 정도가 커지기 쉽다고 발표하였다^[9]. Yun은 차량의 바퀴와 지면을 구현하기 위해 이산요소법(Discrete Element Method, DEM)과 다물체동역학(Multibody Dynamics, MBD)을 이용한 연성 해석을 진행하여, corrugation 현상에는 긴 파장과 짧은 파장이 둘 다 존재하고 파장은 어느 정도 발생한 후엔 더 커지거나 발생하지 않고 차륜의 진행 방향으로 이동하기만 한다는 점을 발견하였다^[10]. 또한, 본 연구자들에 의해서 연구된 결과에서도 속도에 따른 현상의 의존성이 발견되었다. 즉, 속도가 증가할수록 현상의 정도도 증가하고, 입자 평균 높이의 표준 편차도 증가하였다^[11]. 하지만 앞선 연구들에서는 차륜의 크기와 속도에 의한 현상의 상관관계 등을 분석하지 않았기 때문에 본 연구에서는 선행 연구에서의 속도와 관계성과 더불어 동일 하중에서 반지름이 다른 회전체를 통해 현상의 정도와 발생에 의존성에 관한 연구를 이산요소법 상용 소프트웨어인 EDEM 2020ver를 통해서 해석적으로 진행하였다.

2. 시뮬레이션 모델 및 분석 방법

본 연구에서는 비포장도로에서의 환경과 지속적인 교통량이 지나가는 환경을 재현하기 위해 Fig. 2와 같이 외경 2,000mm, 폭 200mm, 높이 500mm의 환형 구조물, 차륜을 표현하기 위한 붉은 색으로 표현된 환형 회전체, 차륜(환형 회전체)에 지속적인 구동력을 가하기 위한 박스형 구조물, 환형 구조물을

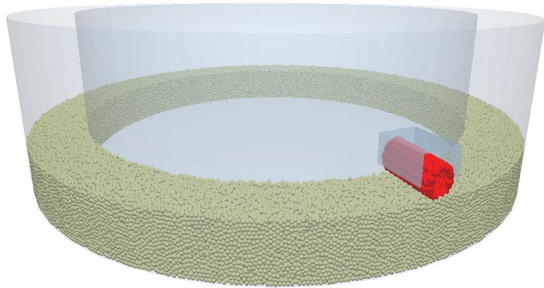


Fig. 2 Simulation set up for R1 model

Table 1 Properties of materials used in simulation

	Rubber	Sand	Steel
Poisson's Ratio	0.47	0.25	0.25
Solids Density (kg/m ³)	1300	2500	7850
Shear Modulus(Pa)	1e+06	1e+08	1e+10

가득 채운 모래 입자를 사용하였다. 직선형 구조물을 통해 직선 도로 환경을 만드는 것도 가능하나, 주기 경계 조건과 같은 인위적인 효과가 필요하고, 선행 연구와의 비교 가능성 등을 고려하여 상대적으로 해석이 간단한 환형 구조물을 사용하였다. 회전체는 타이어와 같은 원통형 형태를 재현하기 위하여 여러 개의 입자를 하나의 형태로 구속하여 해석하는 Multi-sphere 방식을 이용하여 구성하였다. 회전체를 지속적으로 밀어주는 박스형 구조물은 모래 입자들과의 상호 작용과 회전체와는 마찰은 없고, 충돌만을 고려하도록 하여 회전체의 구름과 상하 운동이 구속되지 않고 구동력만을 부여하도록 하였다^[10]. 환형 구조물과 회전체를 움직이는 박스형 구조물은 steel, 비포장도로의 모래 입자는 sand, 회전체는 rubber로 물성값을 부여하였다. 각 요소에 적용된 재료의 물성은 Table 1과 같다.

본 연구에서는 지면을 지나는 회전체의 반지름의 크기와 속도에 대한 Washboarding 현상과의 관련성을 비교하기 위하여, 반지름 50mm, 폭 190mm 인 R1 모델을 기준으로 하고, 반지름을 50mm(R1), 75mm(R1.5), 100mm(R2), 150mm(R3)로 변경한 4개의 비교 모델을 사용하였다. 선행된 논문에서의 결과 값과의 비교를 용이하게 하고, 반지름 50mm의

Table 2 Model size of rotating body

Model	R1 (Baseline)	R1.5	R2	R3
Radius (mm)	50	75	100	150
Width (mm)	190	190	190	190

R1은 가상 도로의 폭 200mm보다 작은 크기의 회전체를 사용하고, 지름 100mm, 반지름 50mm의 회전체를 채택하였다.^[10] 회전체 비교 모델의 크기는 Table 2와 같다. 회전체의 무게에 의한 효과를 배제한 회전체의 크기만의 효과를 파악하기 위하여 각각의 비교 모델에서 회전체의 무게는 1.62kg으로 통일시켰다. 또한 무게를 1.62kg으로 고정하기 위하여, rubber의 밀도를 R1부터 R3까지 각각 2500, 1100, 967, 357(kg/m³)로 조정하였다. 또한, 회전체의 속도에 의한 영향을 확인하기 위하여, N. Taberlet의 논문에서 언급된 임계속도 1.5m/s를 기준으로 환형 회전체를 0.5m/s (31.83 deg/s), 1.5m/s (95.491 deg/s), 2.5m/s (159.151 deg/s), 3.5m/s (222.812 deg/s)의 속도로 60s간 등속 회전시켜주었다.^[6] 추가로 모델에 따라서는 회전체 속도의 영향을 명확하게 분석하기 위하여 8.5m/s (541.114 deg/s)까지 속도를 증가시켜가면서 분석하였다. 회전체의 속도를 Fr수로 치환하여 표현하는 것도 가능하며, 이를 이용한 이전연구도 존재한다.^[6]

환형 구조물에 모래 입자를 충전하여 비포장도로를 생성할 때는 전체적인 구조물의 크기와 바퀴의 크기를 고려하여 상대적으로 작게 설정한 모래를 반지름 5mm의 입자를 생성시켜 중력을 이용해 가라앉혀준다. 입자들을 생성시켜서 바로 해석을 진행하게 되면, 초기에 입자 간의 공극이 지나치게 커서, 해석 중에 입자들이 지속적으로 가라앉게 되어 정확한 입자들의 높이 측정이 힘들어진다.

따라서, 입자 간의 초기 공극이 줄어들어, 입자들의 높이가 저절로 줄어드는 것을 최소화하기 위해 환형 구조물을 좌우로 100mm/s의 속도로 약 10초 동안 좌우로 흔들어 주었다. 도로에 사용된 모래 입자는 약 18만 개 정도이고, 충전된 모래 입자들로 구성된 편평한 도로의 높이는 약 150mm이다. 이후에 환형 회전체를 모래 입자들 표면에 생성시켜준다.

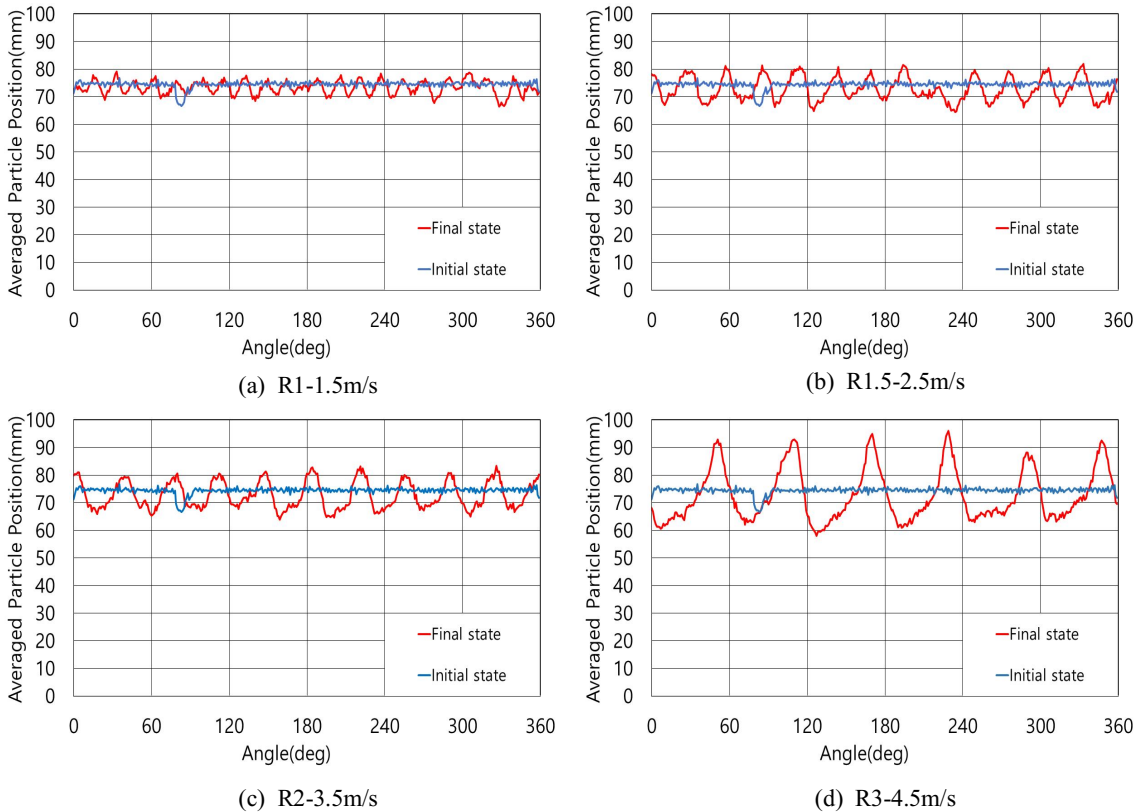


Fig. 3 Averaged particle position according to size of rotating body

시뮬레이션 결과의 해석은 모래 입자들의 위치 좌표를 추출하고, 그 후 입자들의 좌표를 기반으로 환형 구조물의 360°를 1°씩 나눠 각각의 각도에 해당하는 입자들의 평균 z축 높이를 구해서 도로 표면의 모양을 그래프화 했다. 이렇게 얻어진 평균 높이 데이터의 주기를 파악하기 위해 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 통해 물결 모양 현상의 주파수를 분석하였다.

3. 해석 결과

회전체의 크기와 속도에 따라서 Washboarding 현상이 명확하게 나타나는 경우도 있지만, 불분명한 경우도 다수 발생한다. 따라서, Washboarding 현상이 명확하게 발생하는 속도를 임계속도로 정의하고, 이 임계속도가 회전체의 지름에 따라 어떻게

달라지는지를 확인하고자, Fig. 3에 Washboarding 현상이 명확하게 나타난 경우에 대해 각 회전체 크기별 입자들의 평균 높이를 나타냈다. 입자들의 평균 높이는 Y축, 환형 구조물에서의 위치는 X축으로 나타내었다. 그림에서 푸른색 선은 초기 상태에서의 입자들의 평균 위치이고, 붉은색 선은 최종상태에서의 입자들의 평균 위치이다. 그림에서 보이는 것처럼, 모든 경우에, 최종상태에서는 명확한 주기성을 확인할 수 있고, 초기 상태보다 최종상태에서 입자의 위치가 진폭이 커진 것을 볼 수 있다. 즉, Washboarding 현상이 명확하게 발생한 것을 확인할 수 있다. 또한, 회전체의 반지름이 커질수록 임계속도가 증가하고, 입자 평균 위치의 진폭과 파장도 증가한다. 즉, 반지름이 커지면, Washboarding 현상의 임계속도와 진폭이 커지고 파장이 길어지는 것을 볼 수 있다.

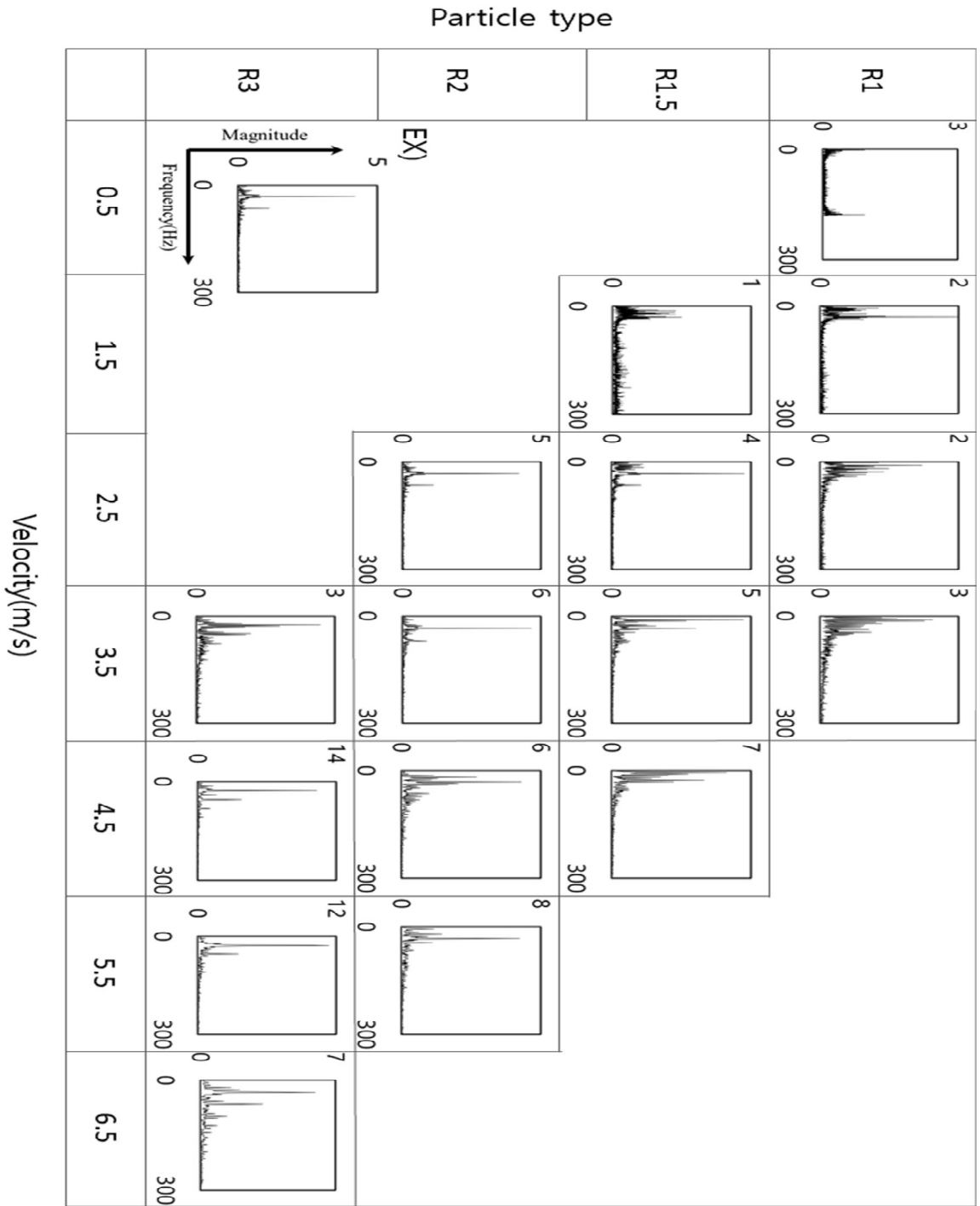


Fig. 4 FFT results for averaged particle position according to velocity and size of rotating body

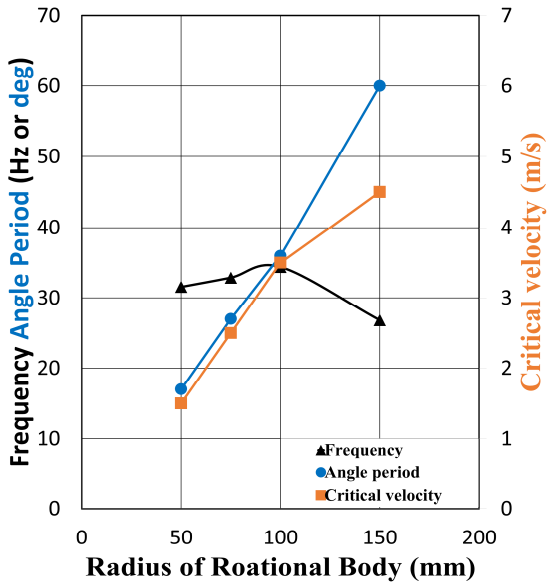


Fig. 5 Relationship between radius and Frequency/ Angle period

3.1 FFT 분석 결과

Fig. 3에서 보이는 것처럼 임계속도에서의 파장의 크기와 길이가 회전체의 크기에 따라서 변하는 특성과 주기성이 확인되기 때문에 주파수를 측정할 필요성이 있다. 따라서 회전체의 크기와 속도를 변경시켜서 얻어진 입자들의 평균 위치 그래프에 대해서 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 진행하였다. 각도를 대상으로 주파수 분석을 했기 때문에, 주기(Period)가 각도로 표현된다.

분석 결과는 수평 방향으로의 회전체 크기에 따라서, 수직 방향으로의 속도에 따라서 정리하여 Fig. 4에 나타내었다. 각 그래프에서 X축은 주파수를 나타내고 Y축은 강도를 나타낸다.

먼저, 회전체 R1의 경우 현상이 1.5m/s에서 발현됐으며, 현상이 발현되기 전인 0.5m/s에서는 주파수의 분포가 평평한 표면을 가지고 있어 명확한 주파수를 찾을 수 없을 정도로 크기가 작고 균일하다. 반면에, 1.5m/s 이후에 2.5m/s, 3.5m/s로 속도가 증가할수록 입자 평균 위치의 진폭은 증가하지만, 특정한 주기가 발생하지 않아서 명확하게 규칙적인 Washboarding 현상이 나타난 것을 확인할

수 없다. 즉, R1의 경우 1.5m/s에서 가장 뚜렷하게 Washboarding이 발생하고 그 이후의 속도에서는 파장의 모양이 무너지면서 특정한 주기가 없어지는 것을 볼 수 있다. 가장 명확하게 나타난 1.5m/s에서의 주파수는 31.5681Hz, 각도 주기는 17°로 나타났다.

두 번째로, 회전체 R1.5의 경우엔 R1의 임계속도인 1.5m/s까지는 Washboarding 현상이 보이지 않고 2.5m/s에서 현상이 뚜렷하게 발생하고 FFT 분석도 뚜렷하게 나타난다. 2.5m/s에서 현상이 뚜렷하게 나타난 후, 속도가 증가할수록 파의 모양은 무너지고, FFT 분석에서도 뚜렷한 주기를 찾기 어려워진다. 모델 R1과 비교하면 현상이 발현하는 임계속도가 증가하였다. Washboarding 현상이 뚜렷한 2.5m/s에서 FFT 분석을 통한 주파수는 32.8834Hz, 각도 주기는 27°로 나타났다.

세 번째로, 회전체 R2는 회전체 R1과 비교하면 반지름이 2배나 늘어나 도로와 회전체의 접촉면이 늘어나 회전체의 회전이 안정적으로 된다. 회전체 R2에서는 R1.5와 마찬가지로 2.5m/s에서 Washboarding 현상이 발현했다. 하지만 R1.5와 다른 점은 속도가 증가하면서 현상이 바로 불분명해지지 않고 오히려 3.5m/s에서 현상이 더욱 분명해진 후 그 이상의 속도에서 현상이 불분명해져 주기 분석이 어려워졌다. 따라서, R2에 대해서는 임계속도를 2.5m/s가 아니라 3.5m/s로 설정하였다. 또한, 3.5m/s의 이후에서도 현상이 계속 불분명해지는가를 확인하기 위하여 속도를 5.5m/s까지 진행하여 분석하였다. FFT 분석을 통한 주파수는 3.5m/s에서 주파수가 34.398Hz, 각도 주기는 36°로 나타났다.

마지막으로, 회전체 R3는 앞선 크기가 작은 회전체에 비해서 임계속도가 확연히 증가하였다. 회전체의 반지름이 R1보다 3배 증가하고, 동일 시간 이동 거리 및 큰 사이즈로 인한 도로의 불완전성 유발이 감소하여 임계속도가 증가한 것으로 보인다. 2.5m/s 이하에서는 표면에 현상이 발현되지 않아 거의 평평한 상태를 유지하고 있고, 3.5m/s에서는 아주 미세한 정도의 현상이 발현되지만 뚜렷하진 않다. 4.5m/s에서부터 현상이 뚜렷하게 발현하여 5.5m/s까지 뚜렷한 모양의 현상이 유지되었다.

하지만, 4.5m/s에서 5.5m/s보다 조금 더 뚜렷하게 현상이 발생되기 때문에(즉, 주파수 magnitude의 크기가 더 크기 때문에), 임계속도를 4.5m/s로 설정하였다. 다시 6.5m/s부터는 현상이 무너지기 시작하여 주기의 정확한 분석이 어려워졌다. 임계속도에서의 FFT 분석 결과는 주파수와 각도 주기가 각각 26.8329Hz와 60°이다.

전체적으로 보면 회전체의 크기가 비교적 작은 R1(50mm)과 R1.5(75mm)의 경우에는 현상이 명확하게 발생했다가 현상이 다시 무너지지 않고 유지되는 속도의 구간이 비교적 짧다. 즉, R1과 R1.5에서는 각각 1.5m/s와 2.5m/s로 한 개의 속도 구간에서만 명확하다. 반면에 회전체의 크기가 큰 R2(100mm)와 R3(150mm)는 회전체의 크기가 작은 모델에 비해 현상이 발생되기 시작하는 속도가 크고, 현상이 유지되는 속도의 구간이 길다.

4. 결 과

회전체의 크기별로 R1부터 R3까지 회전체의 크기가 증가할수록 Washboarding 현상이 발생하는 임계속도가 증가하는 것을 Fig. 5에 나타내었다. 앞선 연구들에서 회전체의 속도가 특정 임계속도 이상이 되면 현상이 항상 발생된다는 결과와도 일치한다^[6]. 다만 회전체의 크기가 증가할수록 현상이 발생하는 임계속도의 값은 거의 선형적으로 증가하다가 150mm에서 약간 포화되는 것을 확인할 수 있다. 이 이상의 속도에 대해서 분석을 더 진행하면 포화 여부를 확실하게 알 수 있으나, 회전체의 속도가 빨라지면 진폭도 증가하여 회전체가 회전체를 밀어주는 박스형 구조물의 범위에서 벗어나게 되어 회전체가 안정적으로 이동하는 것이 불가능하여 시뮬레이션 공간을 벗어나는 문제 등이 발생하여 더 이상의 해석은 불가능하였다.

이러한 임계속도에서의 주파수를 분석하면, Fig. 5에 보인 바와 같이 회전체의 크기에 따른 주파수는 불분명한 형태를 보여주게 된다. 전체적으로 보면 회전체의 크기에 의존하지 않고 비슷한 값을 보여주고 있다. 즉, 모든 주파수가 30Hz 전후로 ±5Hz 이내에서 발생하고 있다. 이러한 현상은 임계속도가 아닌 속도에서 측정한 주파수에서도 대

체로 비슷한 현상을 보여주는 것으로 미루어보아, 회전체의 크기에 상관없이 비슷한 값을 보여주고 있다.

마지막으로 임계속도에서의 각도 주기의 결과는 거의 완벽한 선형을 보여주고 있다. 즉, 각도 주기는 회전체의 크기가 커지는 것에 따라서 아래 식과 같이 선형적으로 증가하고 있다.

$$Angle\ Period = 0.4297 * Radius - 5.2857 \quad (1)$$

이는 회전체의 크기가 커지면 임계속도가 커지고, 임계속도가 커지면 회전체가 이동할 수 있는 거리가 커짐에 따라서 자연적으로 증가한 것으로 보인다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 동일 하중의 회전체의 크기와 속도를 통해 Washboarding 현상과의 상관관계를 파악하기 위해 이산요소법을 이용하여 환형 구조물에서 회전체의 크기와 속도를 변화시켜가며 시뮬레이션 을 진행하였다.

1. Washboarding 현상이 발생하는 임계속도는 회전체의 크기가 증가함에 따라서 같이 증가한다. 그리고 현상은 임계속도에서 뚜렷하게 발생하고 임계속도의 전후에서는 Washboarding의 형상이 유지되지 못하고 무너진 채로 존재한다.
2. 회전체의 크기가 커질수록 Washboarding 현상의 각도 주기는 거의 선형적으로 증가한다.
3. 회전체의 크기가 커질수록 임계속도 전후로 Washboarding 형상이 무너지지 않고 유지되는 구간이 길다.
4. 주파수의 경우 현상이 발생되면, 속도와 회전체의 반지름 크기에 크게 영향을 받지 않고 일정 주파수의 범위 내에서 나타난다.

후 기

“이 논문은 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음 (2019-104-011).”

REFERENCES

1. Mays, D. C., Faybishenko, B. A., "Washboards in unpaved highways as a complex dynamic system," *Complexity*, Vol. 5, No. 6, pp. 51-60, 2000.
2. Matsuyama, C., Tanaka, Y., Sato, M., Shima, H., "Corrugation of an unpaved road surface under vehicle weight," *Proceedings of the Royal Society A*, Vol. 476, Issue. 2241, 2020.
3. Ubi, P., Udah, E., "Impact of Governance and Road Infrastructure on Industrial Growth in Nigeria," *Nigerian Journal of Economic and Social Studies*, Vol. 61, No. 1, pp. 123-154, 2019.
4. U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration, "Unpaved Roads: Safety Needs and Treatments," Retrieved 26, Jan., 2021 from https://safety.fhwa.dot.gov/local_rural/training/fhwasal4094/.
5. Mather, K. B., "Why do roads corrugate,?" *Scientific American*, Vol. 208, No. 1, pp. 128-137, 1963.
6. Taberlet, N., Morris, S. W., McElwaine, J. N., "Washboard road: the dynamics of granular ripples formed by rolling wheels," *Physical review letters*, Vol. 99, No. 6, pp. 068003, 2007.
7. SRIMAHACHOTA, T., "Experimental Study on the Dynamics of Washboard Road on Various Surface," A Thesis for a Master, Hokkaido University, Japan.
8. Bitbol, A. F., Taberlet, N., Morris, S. W., McElwaine, J. N., "Scaling and dynamics of washboard roads," *Physical Review E*, Vol. 79, No. 6, pp. 061308, 2009.
9. Ikeda, A., Kai, H., "Fundamental study on spontaneous corrugation pattern on dry sand due to moving vehicle," *MATEC Web of Conferences*. Vol. 258. EDP Sciences, 2019.
10. Yun, T. Y., Chung, T., Shin, H. S., "Numerical Analysis of the Initiation and Development of Corrugation on a Gravel Road," *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 20, No. 1, pp. 9~18, 2018.
11. Lee, S. J., Park, J., "A Numerical Analysis for the Washboarding Phenomenon on the Top Surface of Fine Powders Using the Discrete Element Method," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 19, No. 4, pp93~98, 2020.