

〈논 문〉 SAE NO. 98370008

휠 차량의 내구 시험장 조성을 위한 매개변수 연구

A Parametric Study for the Construction of Durability Test Track of a Wheel Type Vehicle

송 세 철*, 김 형 근***, 박 태 건**, 김 동 준*
S. C. Song, H. K. Kim, T. G. Park, D. J. Kim

ABSTRACT

For the design and development of the wheel type excavator, the dynamic effects of travelling on the performance of the equipment should be first analyzed and considered in the initial design stage. In order to test the durability of the equipment in a short period, the travelling test should be performed over accelerated durability test tracks, which is more severe than general field roads such as city road, paved road, unpaved road and rough road. In this paper, a parametric study is performed in order to determine important design parameters of durability test track of a wheel type excavator. A rigid body model is developed using DADS and dynamic analysis is performed for the equipment travelling over several test roads with different severity. A comparison of test and analysis results is also presented.

주요기술용어 : Dynamic Effects(동적 효과), Wheel Type Excavator(휠 굴삭기), Equipment Durability(장비 내구성), Road Severity(도로 가혹도), Rigid Body Model(강체 모델), Test Track(시험 주행로), Dynamic Analysis(동적 해석)

1. 서 론

일반적으로 굴삭작업과 평탄작업 및 덤프작업을 주로 수행하는 굴삭기는 이동을 거의 하지않

고 험한 지형에서 작업을 수행하는 무한궤도식과 도심지나 험하지 않은 지형에서 이동을 하면서 작업을 수행하는 타이어식의 2가지로 구분된다. 주로 험지에서 작업을 하는 무한궤도식에 비해서 타이어식의 굴삭기는 주행이 장비의 동적효과에 미치는 영향이 크므로 이러한 주행이 장비에 미치는 영향을 분석하여 장비 개발시 반영해야 한다.

* 삼성중공업
** 삼성자동차
*** 정회원, 특허청

짧은 기간내에 주행시 장비에 나타나는 모든 현상을 재현하기 위하여는 실 주행조건보다 수십 내지 수백배의 가속도를 가지는 내구 시험로를 조성하여 내구시험을 실시하게 된다. 이와같은 내구 시험로를 조성하기 위해서는 휠 장비가 실제 도로에서 주행시 받는 충격량과 내구시험로에서 받는 충격량의 상관관계를 정확히 규명하는 것이 무엇보다도 중요하다. 이런 상관관계를 규명하기 위해서는 실 장비를 이용하여 포장로, 일반 토양 및 험지(자갈밭, 비포장로) 등 여러 도로(작업장)에서 시험을 수행하고 이 결과를 내구 시험로의 시험결과와 비교하여 가속도를 평가해야 한다. 따라서 적절한 내구시험로(주행시험장)를 만들기 위해서는 많은 시험과 분석이 필요하며 이에 따른 시간과 경비가 많이 소요된다.

본 연구에서는 장비가 주행시 받게 되는 하중 및 충격 등을 DADS를 이용하여 해석하므로써 도로형태에 따른 가속도를 분석하여 내구시험로를 조성하고자 한다. 이를 위해 먼저 단순한 형상의 도로에서 실차시험을 하여 시간에 따른 가속도를 측정하고, 이와 동일한 조건에서 해석한 결과와의 비교, 검증을 통하여 해석에 필요한 매개변수를 결정하여 해석모델의 신뢰성을 확보한

다. 검증된 해석 모델을 요철 크기, 간격 및 배치 등의 설계변수와 주행속도, 견인력 등의 해석변수를 변화시키면서 해석을 수행하고 이 결과를 실차시험과 비교하여 가속도를 평가하고 내구시험로 조성을 위한 설계변수를 도출한다.

2. 본 론

2.1 3차원 DADS 모델

2.1.1 강체 모델링(Rigid Body Modeling)

굴삭기의 강체모델링시, 상/하부프레임, 작업장치, 액슬하우징, 엔진, 유압탱크, 연료탱크, 카운터웨이트 등은 도면을 기준으로 3차원 CAD 소프트웨어인 I-DEAS 를 사용하여 3차원 모델링한 후 실제 측정된 무게와의 차이를 보정하여 각 단품의 무게중심과 질량 관성모멘트를 구하였다. 동적 모델링에 고려된 부품은 질량과 기구학적 중요도를 기준으로 선정하였으며 고려되지 않은 부품의 질량은 고려된 부품중에 연관성이 있는 것에 부가하여 모델링시의 전체 질량과 실제 장비의 전체 질량을 일치시켰다. 전체 좌표계의 원점 위치는 Fig.1과 같이 상부프레임과 하부프레임의 회전중심과 지면이 만나는 점으로 선정하

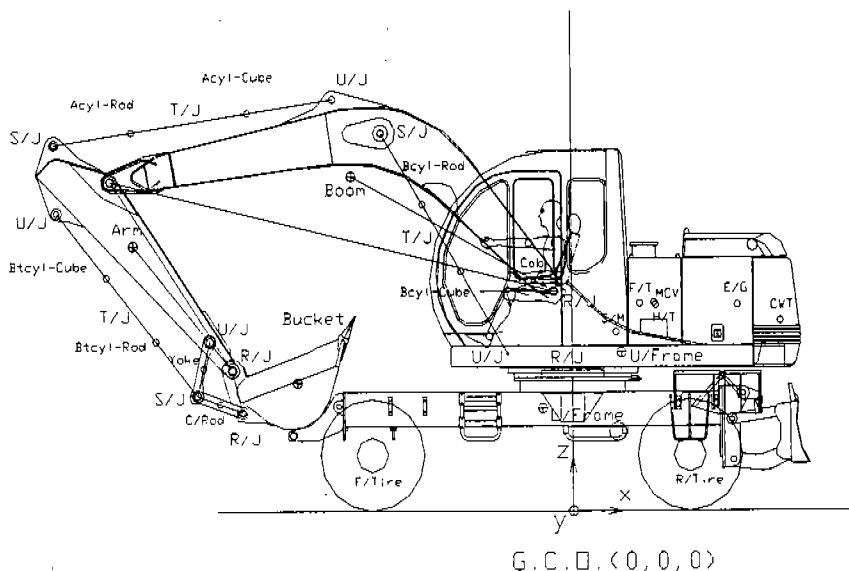


Fig.1 Components and Joints used for DADS Model of a Wheel Type Excavator

였고, 좌표계의 X방향은 주행의 반대방향, Y방향은 운전석을 기준으로 왼쪽방향, Z방향은 수직방향으로 정하였다.

2.1.2 연결부의 정의(조인트의 선정)

굴삭기의 전체 구조는 크게 작업장치, 상부프레임 및 하부프레임으로 나눌 수 있다. Fig.1은 굴삭기의 동역학적 모델에 사용된 부품 및 조인트를 나타낸 것으로 각 연결부의 조인트는 실제 장비가 움직이는 형태에 부합되는 조인트를 사용하였다.

작업장치를 움직이는 실제 조인트의 연결 형태는 매우 복잡하게 중복되어 있으며 움직이는 형태와 동일한 조인트로 모델링하게 되면 실제 작업장치가 움직일 수 있는 자유도 보다 많은 부분을 구속하게 되어 잉여구속(Redundancy)을 유발하게 되고 이에 따라 동역학 해석시 문제를 발생시키게 된다. 이런 문제를 해결하기 위하여 실제 조인트와는 다르나 실제 작업장치의 움직임과 동일하도록 Fig.1과 같이 여러 종류의 조인트를 이용하여 잉여구속을 제거할 수 있도록 하였다. Fig.1에서 U/J, S/J, T/J, R/J는 각각 유니버설 조인트, 스페리컬 조인트, 병진운동 조인트 및 레볼루트조인트를 의미한다.

캡과 상부프레임은 고무마운트로 체결되므로 세 방향의 힘을 고려할 수 있는 부싱 요소를 이용하여 모델링하여 해석을 수행하였다.

2.1.3 구동부 모델링

일반적으로 장비를 구동시키는 방법은 크게 2가지로 나눌 수 있다. 일정한 견인력으로 장비를 끌어 당겨서 주행시키는 방법과 일정한 토크를 타이어에 가하여 주행시키는 방법이다. 일정한 토크로 장비를 구동시키는 방법은 주행시 발생하는 저항을 고려하지만 토크가 타이어에 직접 가해짐으로 장비가 가속되거나 감속되게 되어 주행시 평형상태를 이루기 어렵고, 주행조건에 따라 토크가 변화하게 되어 정확한 값으로 구동시키기가 어렵다.

따라서 본 해석에서는 일정한 견인력을 이용하여 장비를 주행시키는 방법을 사용하였다. 장비가 지면을 따라 움직이게 되면 지면저항이 발생하고 이에 따라 속도가 감소하게 되고, 장애물

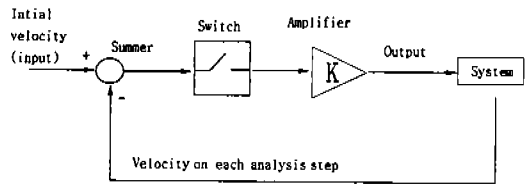


Fig.2 Control Logic for the Velocity Correction in DADS

(요철)을 통과하게 되면 속도가 급격히 변화하게 된다. 그러나 실제 장비 주행시에는 운전자가 적절히 가·감속하여 어느 정도 일정한 속도를 유지함으로써 해석과 차이가 발생하게 된다. 해석에서 장비가 지면마찰과 요철 등에 의해서 속도가 변화되는 것을 보정하기 위하여 DADS에서는 제어 회로를 이용하였다. 속도를 보정하기 위해서 초기속도와 각 해석단계에서의 속도와의 차이를 감지하고 이 차이에 비례하는 견인력으로 주행방향으로 끌어 당겼다. 견인력의 크기는 속도차이와 게인(Gain)의 곱으로 여러번의 시행착오를 걸쳐서 적절한 값으로 선정하였다. Fig.2는 이를 위한 제어회로를 나타낸 것이다.

2.2 타이어 모델

차량의 거동은 구동부, 노면으로부터 타이어에 가해지는 외력 및 공기 저항력의 영향을 받으나 엔진구동에 의한 가·감속력 및 조향에 필요한 힘들이 모두 타이어와 노면의 접촉을 통하여 차체에 전달되므로 노면입력이 가장 큰 영향을 미친다. 타이어에 필요한 3가지 기본기능으로는 도로에서 들어오는 충격에 대한 완충 및 수직하중의 지지, 가·감속시 종축력 발생, 선회시 횡력 등이 있다. 또한 각 축에 대한 모멘트인 Self-Aligning Moment, Overturning Moment, Rolling Resistance Moment가 있으며, 차량의 동적 거동에 상대적으로 작은 영향을 미치는 Overturning Moment와 Rolling Resistance Moment는 무시한다. 본 해석에서는 상용 S/W인 DADS을 사용하였으며 타이어는 DADS내의 타이어 요소를 이용하여 모델링하였다.

타이어에 대한 시험결과 수직방향 강성계수는

100kgf/mm, 좌후방향의 강성계수는 35.7kgf/mm이며, 기타 감쇠계수, 구름저항, 마찰계수 등 해석에 필요한 나머지 변수들은 일반적인 타이어 자료에 근거하여 해석과 시험 결과가 유사하도록 조정하여 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 해석모델 검증

해석 모델의 신뢰성을 확보하기 위해서 간단한 측정으로 도로의 형상을 파악할 수 있고 해석에서도 쉽게 구현할 수 있는 단순한 형상의 도로에서 시험을 수행하였고 이 시험로의 형상은 Fig.3과 같다.

지면에서 장비로 충격이 직접적으로 전달되는 하부프레임과 액슬하우징에 스트레인 게이지식 가속도계를 부착하여 시간에 대한 가속도를 측정하였다.

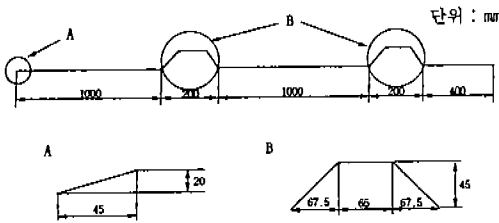


Fig.3 Simple Road Profile for the Verification of Test and Analysis Results

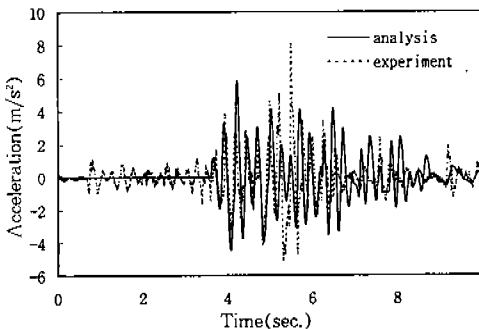


Fig.4 Acceleration Responses of Experiment and Analysis on a Single Bump

해석과 시험결과를 시간영역에서는 가속도의 크기와 경향을 기준으로 비교하였고, 주파수영역에서는 고유진동수와 파워스펙트럼(Power Spectrum)의 크기를 기준으로 비교하였다. Fig.4는 해석과 시험결과를 시간영역에서의 가속도를 비교한 것으로 그 크기 및 전체적인 경향이 서로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. Fig.5는 주파수영역에서 비교한 것으로 고유진동수는 전체 장비중량과 타이어 수직방향의 스프링계수에 의해 결정되는 약 4Hz 정도임을 알 수 있다.

3.2 실 주행도로에서의 시험

휠 굴삭기가 일반 포장로(콘크리트, 아스팔트), 일반 토양로(비포장로) 및 험지(요철이 심한 지형) 등 다양한 도로 위를 주행할 때 시간에

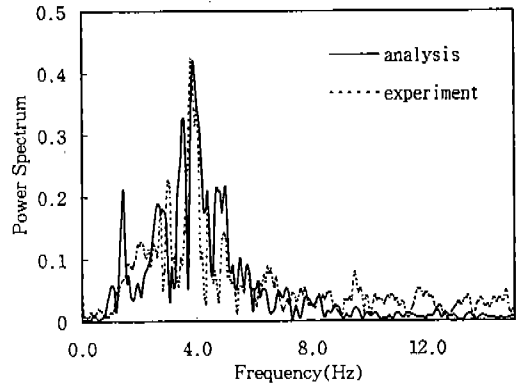


Fig.5 Power Spectra of the Acceleration Responses

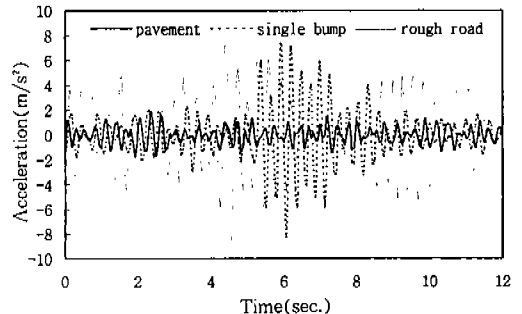


Fig.6 Acceleration on Various Field Roads

다른 가속도의 이력을 측정하였다. 다른 조건의 도로에 비해 장비가 경사지를 주행하거나 코너링을 하는 경우 가속도는 상대적으로 적으며 일반 도로에 있는 요철을 지나는 경우와 요철이 심한 비포장로를 주행하는 경우에 가속도의 크기와 변화가 가장 큰 것으로 나타났다. Fig.6은 일반 포장로 주행시와 하나의 요철을 지나는 경우 및 비포장로에서 요철이 심한 지형을 통과시 시간에 따른 가속도를 나타낸 것이다.

여러 가지 도로형태 중에서 일반적인 도로인 포장로를 주행할 때를 기준으로 하여 요철을 통과하는 경우와 요철이 심한 비포장로를 주행하는 경우에 가속도를 분석하였다. 도로의 가속도를 평가하는 방법은 장비의 각 관심부위에 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정하여 평가하는 방법과 진동가속도를 측정하여 평가하는 방법이 있는데 여기서는 지면에서 장비로 들어오는 충격을 직접적으로 받게 되는 부위(하부프레임과 액슬하우징)에서 진동가속도를 측정하여 가속도를 평가하였다. 가속도를 평가하는데 있어 가장 중요한 인자는 가속도의 크기와 반복횟수이며 이와 같은 정보를 포함하는 대표적인 값인 RMS (Root Mean Square)를 이용하였고 일반 포장로에서 RMS 값을 기준으로 하여 다른 도로의 가속도를 아래와 같이 정의하여 평가하였다.

$$\text{Road Severity} = \frac{RMS_{rr}}{RMS_{flat}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a_i)_{rr}^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a_i)_{flat}^2}} \quad (1)$$

- N = 가속도 데이터의 총 개수
- (a_i)_{flat} = 일반포장로에서 가속도
- (a_i)_{rr} = 기타 도로에서 가속도

여러 가지 도로에서 주행시험을 하여 얻어진 가속도에 대한 RMS를 구한 결과, 일반 포장로 주행시의 RMS를 1로 할 경우 각 도로별 가속도를 구하면, 요철을 통과시는 약 1.86, 험지에서는 약 3 정도이다.

3.3 도로형상에 의한 영향 분석

내구시험로를 결정하기 위하여 여러 가지 종류의 도로형태에 따라 해석을 수행하여 노면의 형상과 크기에 따른 영향을 분석하였다. 실차 시험을 기준으로 각 도로별 가속도를 구하기 위하여, 해석에서는 시험에서 가속도를 측정할 부위와 동일한 위치에서 가속도를 구하였으며 이를 기준으로 실차 시험과 해석 결과를 상호비교하여 각 도로별 가속도를 평가하였다. 일반적으로 내구시험로는 일반 포장로 보다 도로의 조건이 가혹해야 되므로 여러개의 요철이 존재하는 도로를 내구시험로로 가정하고 이에 대한 해석을 수행하였다. 요철의 간격, 크기 및 형상 등에 따라 장비가 받게 되는 충격이 다르므로 요철을 나타내기 위한 변수로는 Fig.7과 같이 정의하였고 이들을 변화시키면서 해석을 수행하여 각 노면조건에 의한 영향을 분석하였다.

Table 1은 여러 가지 경우에 대해서 해석을 수행하여 가속도를 구한 후 특정부위의 가속도에 대한 제곱평균, RMS 및 실차 일반 포장로의 가속도를 기준으로 한 상대 가속도를 나타낸 것이다. 요철의 형상에 대한 변수를 제작 가능한 범위에서 선정하여 여러 가지 시험로중에서 요철 간격이 1m, 높이 5cm, 각도 30°, 윗면 폭이 10cm인 시험로를 기준 시험로로 선정하여 평가하였다. 이 결과와 실차시험에서 측정된 가속도에 대한 RMS값을 비교하면 이 기준 시험로는 일반 포장로에 대해 약 10.9배의 가속도를 갖고 험지

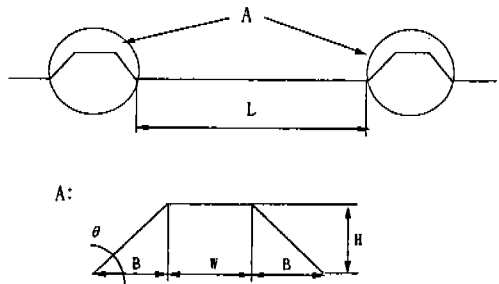


Fig.7 Design Parameters of a Test Road Profile

Table 1 Road Severity of Various Road Profiles Compared with the Pavement

	Mean Square	RMS	Severity
Base Test Road	80.0	8.95	1.0
Angle(θ) 15°	24.77	4.98	0.56
Angle(θ) 60°	77.47	8.8	0.98
Height(H) 3cm	10.14	3.18	0.36
Height(H) 10cm	108.16	10.4	1.16
Interval(L) 5m	7.49	2.74	0.31
Speed 3km/h	2.01	1.42	0.16
Width(W) 5cm	56.78	7.53	0.84
Zigzag	21.27	4.61	0.52

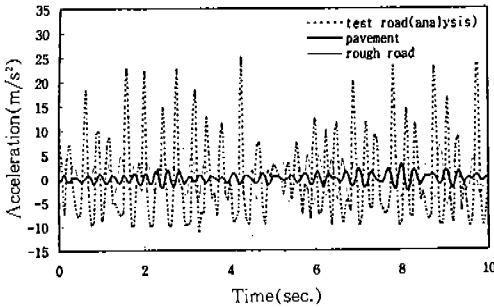


Fig.8 Acceleration Responses of the Field Test and Analysis

주행시 보다는 약 3.6배 정도의 가속도를 갖는다. Fig.8은 일반 포장로와 요철이 많은 험지의 실차 시험데이터 및 기준 내구시험로에 대한 해석결과를 비교한 것이다.

요철의 높이에 따른 가속도를 평가하면 5cm에서 3cm로 변경된 경우는 약 1/2.8배 정도 감소하고, 5cm에서 10cm로 증가하는 경우는 약 1.2

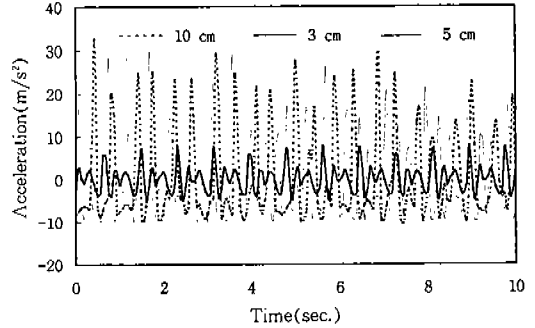


Fig.9 Comparison of Acceleration Responses due to the Change of Profile Height

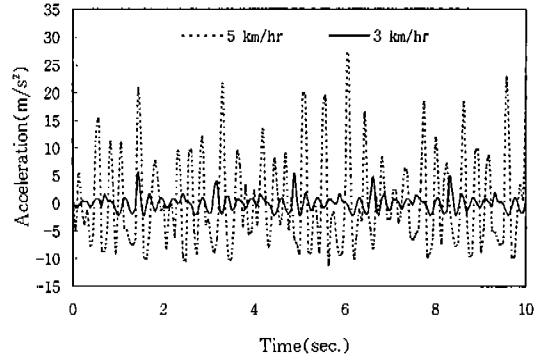


Fig.10 Acceleration Responses at the Speeds of 3 and 5km/h

배 정도 가속해진다. Fig.9는 요철의 높이 변화에 따른 가속도를 나타낸 것이다. 요철의 각도가 30°에서 15°로 변화하면 가속도가 약 1/1.8배 감소하지만 30°에서 60°로 증가하는 경우는 거의 동일하다. 요철간격이 작을수록 장비에 영향을 많이 주고 1m에서 5m로 변경되면 가속도가 약 1/3.3배 정도 감소한다. 폭이 5cm인 경우에 비해 10cm인 경우의 가속도가 약 1.2배 정도이므로 폭에 대한 영향은 다른 형상변수에 비해 작고 이는 타이어의 지름(1m)에 비해 윗면 폭의 크기가 상대적으로 작아서 폭의 변화에 따른 영향이 작은 것으로 생각된다. 좌우바퀴가 동시에 요철을 통과하는 경우가 요철을 50cm 정도 엇갈리게 배치한 경우에 비해서 보다 가속하고 가속도는 약 1.9배 정도이다. 장비의 속도가 5km/h

에서 3km/h로 변화하면 가속도는 상당히 작아지며 가속도는 약 1/6.3배 정도이다. 장비의 동적 특성중에 하나인 가속도는 시간에 따른 속도변화이므로 장비의 주행속도에 직접적으로 영향을 받는다. Fig.10은 속도변화에 따른 가속도의 영향을 나타낸 것이다. 장비의 좌우바퀴가 요철을 동시에 통과함으로 캡에서는 상하방향의 가속도가 상대적으로 크게 나타났으며 요철 배치와 도로의 형태에 따라 다른 방향의 가속도도 크게 나타날 수 있을 것이다.

4. 결 론

휠 굴삭기에 대한 전체 동력학적 해석 모델을 개발하였으며 각종 도로형상이 장비에 미치는 영향을 평가하기 위한 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실제 주행상태를 재현할 수 있는 동력학적 시뮬레이션을 통하여 각 단품의 동적 특성과 각 조인트의 반력을 파악할 수 있었고 이를 설계시 동적 하중조건으로 활용할 수 있었다.
- 2) 단순도로에서의 주행 시험 및 해석결과의 비교, 분석을 통하여 해석모델에 대한 신뢰성을 확보할 수 있었고 이를 이용하여 조성할 내구시험로에 대한 설계변수의 영향평가가 가능하였다.
- 3) 여러 가지 도로형상에 대해서 해석한 결과, 장비의 상하방향의 가속도를 기준으로 가장 큰 영향을 미치는 것은 장비의 주행속

도이다. 요철의 설계변수 중 간격, 높이 및 배치에 의한 영향도 무시할 수 없으며 요철 윗면 폭의 변화에 의한 영향은 다른 변수에 비해 상대적으로 적음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 민병훈, 정원욱, “차량의 가속내구시험을 위한 Test Road Profile 설계방법”, 자동차 공학회논문집, 제2권, 제1호, pp. 128~141, 1994.
2. 정원욱, 강성수, “피로수명 예측법을 이용한 각 도로가 차량의 내구성에 미치는 가속도 평가”, 자동차공학회논문집, 제3권, 제6호, pp. 154~161, 1995.
3. M.Sato, T.Takenaka, T.Kuse, “Development of Vehicle Traveling Simulation Technique” 소송기보, 제24권, 제4호, pp. 14~19, 1984.
4. David G. Knutson, “Test Track Design for Vehicle Noise and Vibration Testing”, SAE 870966, pp. 115~165, 1987.
5. “DADS Revision 7.5 Reference Manual”, Vol. 1, 2, CADSI.
6. E.J.Haug, “Intermediate Dynamics”, Prentice-Hall, 1992.
7. J.Y. Wong, “Theory of Ground Vehicles”, John Willy & Sons, 1978.