

자동차 부품에 대한 다축 진동내구 시험방법

Multi-axial Vibration Testing Methodology of Vehicle Component

김찬중†·배철용*·이동원*·권성진*·이봉현*·나병철*

Chan-Jung Kim, Chul-Yong Bae, Dong-Won Lee, Seong-Jin Kwon,
Bong-Hyun Lee and Byung-Chul Na

Key Words : Multi-axial Simulation Table(다축 가진 시뮬레이터), Optimal Algorithm(최적화 알고리즘) Normalized Damage Isoclines(정규화된 피로도 등고선), Energy Method(에너지 방법)

ABSTRACT

Vibrating test of vehicle component can be possible in lab-based simulators instead of field testing owing to the development of technology in control algorithm as well as computational process. Currently, Multi-Axial Simulation Table(MAST) is recommended as a vibrating equipment, which excites a target component for 3-directional translation and rotation motion simultaneously and hence, vibrational condition can be fully approximated to that of real road test. But, the vibration-free performance of target component is not guaranteed with MAST system, which is only simulator subjective to the operator. Rather, the reliability of multi-axial vibration test is dependent on the quality of input profile which should cover the required severity of vibrating condition on target component. In this paper, multi-axial vibration testing methodology of vehicle component is presented here, from data acquisition of vehicle accelerations to the obtaining the input profile of MAST using severe data at proving ground. To compare the severity of vibration condition, between real road test and proving ground one, energy principle of equivalent damage is proposed to calculate energy matrices of acceleration data and then, it is determined the optimal combination of special events on proving ground which is equivalent to real road test at the aspects of vibration fatigue using sequential searching optimal algorithm. To explain the vibration methodology clearly, seat and door component of vehicle are selected as a example.

1. 서론

국내에서 양산되고 있는 차량들이 초기 품질이 매우 우수한 반면 내구성 면에서 기술 선진국의 동급 차량에 미치지 못하고 있기 때문에 진동에 대한 내구성을 충분히 고려하여야 한다. 또한 국내 운전자들의 진동/소음에 대한 민감도가 매우 크기 때문에 수출의 관점에서뿐만 아니라 내수 측면에서도 진동내구에 대한 신뢰성 있는 평가 방법이 절실히 요구된다. 자동차 부품에 대한 진동의 내구성을 평가하기 위해서는 실제 차량의 거동 조건에서 해당 국가의 도로 성향

과 운전자의 특성을 고려하여 주행 모드를 선정한 다음 보증하고자 하는 부품의 수명에 해당하는 주행시험을 수행하는 것이 가장 정확하다. 그러나 보증하고자 하는 주행거리나 시간을 만족하고, 주행 모드의 가혹도를 실차와 유사하게 설정한 경우에는 시간 및 비용에 대한 부담이 매우 크다. 특히 신차의 개발 기간이 18개월 미만으로 줄어들고 있는 자동차 산업의 현실을 감안하면, 진동의 내구성만을 평가하기 위해 앞서 언급한 진동시험 조건을 선정하는 것은 현실성이 없다.

자동차 부품에 대한 진동내구 시험은 크게 단축 및 다축 시험으로 나눌 수 있으며, 좀 더 세부적으로 각각의 시험이 일정 진폭인 가장 이상적인 경우에서부터 측정된 가속도 데이터틀 이용한 시험까지 매우 다양화되어 있다⁽¹⁻⁴⁾. 단축 시험의 경우 많은 표준 규격들이 정의되어 있고, 오랜 기간 동안 시험을 수행하였기 때문에 각각의 부품에 특성화된 시험 방법이 규정되어 있다. 그러나 단축 진동시험을 만족한

† 자동차부품연구원 에너지부품연구센터
E-mail : cjkim@katech.re.kr
Tel : (041) 559-3124, Fax : (041) 559-3070

* 자동차부품연구원 에너지부품연구센터

부품들이 양산화 단계에서 다른 부품들과 조립된 경우에 문제를 발생하는 경우나, 혹은 진동내구 측면에서 과도한 설계 사양을 도출할 가능성이 크기 때문에 실측 데이터를 이용하여 다축 진동시험을 수행하는 방법이 대안으로 제시되었다⁽⁵⁻⁸⁾. 이 경우 Multi-Axial Vibration Table(MAST) 장비와 같은 고가의 장비를 활용하여야 하는 비용적인 측면과 가속도가 높은 실측 데이터의 조합 방법론에 대한 기술적인 한계를 극복해야 한다.

본 연구에서는 MAST 장비를 활용하여 다축 진동내구 시험을 수행하는 과정에서 핵심이 되는 가진 프로파일의 조합 방법론에 대해 기술하고자 한다⁽⁹⁻¹⁰⁾. 대상 부품의 진동환경을 예측하기 위해 일반적인 운전자의 성향이 고려된 도로조건으로 주행모드를 선정 한 다음 대상 부품의 가속도를 측정하였다. 또한 실제 MAST 장비의 입력 신호로 사용하기 위한 가속도 주행시험장의 특수 노면들로부터 측정하였다. 후자의 다수 신호들은 본 논문에서 제시한 최적화 알고리즘을 통해 전자의 가속도를 만족하는 조합 신호를 얻어내었으며, 이 신호 조합은 대상 부품을 MAST 장비를 이용하여 진동내구 시험을 수행하기 위한 입력 프로파일이다.

2. 신호처리 과정

2.1 진동내구 시험방법

진동내구 시험방법은 대상 부품이 작은 진폭이지만 높은 주파수 대역을 가진 진동 환경에 주로 노출되는 경우에 적합한 방법으로써, 시스템의 동특성이 피로 손상도의 발생 과정에 영향을 주기 때문에 일반적인 내구 방법론과 차이가 있다. 일반적인 내구 관점에서는 진폭이 크고 주파수 대역이 시스템의 동특성과 연관되지 않는 낮은 대역에 국한되며, 하중이 주요한 경계 조건이 된다. 손상도를 계산하는 방법론도 시간 영역의 카운팅 방법을 활용하기 때문에, 주파수 영역에서 PSD 선도를 이용하는 진동내구의 경우와 분명히 차별화된다.

기존의 진동내구 관련 신호처리는 시간 영역의 카운팅 방법으로 손상도를 계산하는데 어려움이 있는 진동 신호들에 적용하기 위해 개발된 방법론들으로써, 주파수 영역으로 측정 신호를 변환한 다음 손상도를 예측하도록 하였다⁽¹¹⁻¹²⁾. 하지만 이러한 방법들은 단순히 손상도를 알아내기 위한 중간 단계로써 활용할 수는 있으나 MAST 장비와 같은 다축 진동시험 장비의 활용에 대한 단서는 제공하지 못한다. 본 논문에서 제시하고 있는 방법론은 실제 도로에서 측정한 가속도 신호들을 목적 값으로 선정한 후, 주행시험장에서 측정한 특수로의 신호들을 조합하여 등가의 가속도를 가지는 진동 프로파일을 생성하는 방법론이기 때문에 MAST 장비에 적용하기에 적합하다.

2.2 에너지 방법을 통한 피로 내구 계산

측정된 시간 영역의 신호를 주파수 영역에서 에너지 값으로 변환하는 함수가 Power Spectral Density (PSD) 이다. 측정된 시간영역의 데이터를 $x(t)$ 라고 가정할 때, PSD 함수인 $S(f)$ 는 식 (1)의 관계식으로 표현된다⁽¹³⁻¹⁴⁾.

$$\int_{-\infty}^{\infty} S(f)df = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |a_n|^2 = \frac{1}{T} \int_0^T |x^2(t)|dt \quad (1)$$

진동내구 측면에서의 입력 진동 성분은 비록 진폭이 작다고 하더라도 주파수 대역이 높기 때문에 대상 부품의 고유한 특성인 공진 현상과 연관되어 대상 부품의 피로 손상도를 가속화한다. 시스템의 동특성은 입력 가진과 관심 부품 사이의 주파수 응답 함수를 통해 표현이 가능하다. 다양한 주파수 성분들에 대해 피로 손상도를 효율적으로 계산하기 위하여 주파수 응답 함수를 이용한 피로도 등고선(damage isoclines)을 이용하도록 한다. 아래 식 (2)는 정규화된 피로도 등고선(normalized damage isoclines)의 관계식이다⁽¹⁵⁾.

$$I(\omega_i) = \frac{\omega_i^{1/2-\alpha} \times \|H_m(\omega_i)\|^{2-\alpha}}{\left(\sum_{i=0}^{\infty} \left(\omega_i^{1/2-\alpha} \times \|H_m(\omega_i)\|^{2-\alpha} \right)^p \right)^{1/p}} \quad (2)$$

여기서, α 는 대상 재료에 대한 S-N 선도의 기울기이며, p 는 정규화된 피로도 등고선의 정규화에 관련된 상수이다. H_m 은 측정된 가속도 신호와 기준 신호 사이의 주파수 응답 함수로써 설치주행 시험 후 데이터 변환을 통해 얻어진다. 식 (2)의 식은 측정된 가속도 신호를 손상도와 등가인 값으로 변환하는 과정에 활용되는데, 가진 원에서의 에너지를 PSD 선도로 측정한다 음 정규화된 피로도 등고선을 이용하여 식 (3)을 도출하였다.

$$\mathfrak{J} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} P(f)df \right\} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{P(\omega_i)}{I(\omega_i)} \quad (3)$$

여기서, \mathfrak{J} 는 에너지 변환, $P(f)$ 는 주파수 f 에서의 PSD 그리고 I 는 식 (2)의 정규화된 피로도 등고선이다.

3. 대상 부품에 대한 가속도 신호 계측

3.1 국내도로 주행 시험

(1) 주행모드의 선정

국내도로 주행 시험은 대상 부품이 실제 작동 환경에서 노출된 진동 환경을 계측하는 과정으로 대상 부품이 목적하고자 하

는 품질 보증 기간과 운전자의 운전 조건이 신뢰성을 가져야 한다. 국내도로 시험모드를 결정하기 위해 국내 운전자의 도로주행 특성에 관련된 유사 보고서⁽¹⁶⁾를 참고로 도로조건을 선정하였으며, 품질 보증 기간은 시험모드의 선정 과정에서 충분한 시간을 고려하거나 혹은 일정 구간의 데이터를 이용하여 가진 프로파일을 생성한 다음 목표 기간과의 내구 손상도 관계를 규명하여 후처리로 보상을 할 수도 있다.

아래 Table 1 본 연구원에서 자동차 부품의 진동내구 시험을 위해 구성한 약 800km에 해당하는 국내도로 주행 시험모드를 보여준다⁽¹⁰⁾.

Table 1 Field road test mode

Road	Specific information	Distance
Expressway (Kyungbu)	Chonan - Kungang SA	104(km)
	Kungang SA - Kimchon IC	
	Kimchon IC - Kunchon SA	
National read (No. 7)	Kyungju IC - Hogeja	278(km)
	Hogeja - Kyungju IC	
	Kyungju IC - Pohang city	
	Pohang city - Na. raod En.	
	Pohang - Younghae	
National read (No. 38)	Yonghae - Wonduk	150(km)
	Wonduk - Samchuck	
	Samchuck - Teabeak	
Country(No.421)	Teabeak - Sabuk	150(km)
Country(No.424)	Sabuk - Molwoon	
Natioal (No.59)	Molwoon - Jungsun town	
National(No.42)	Jungsun town - Jungsun dis.	4.6(km)
	Jungsun dis. - Pyeongchang	
Non-pavement	Myonon - Gumdang Valley	21(km)
	Gumdang Valley - Road end	
City road (seoul)	Road end - Myonon	40(km)
	Yangjae - Gangnam	
Non-pavement	Banpo - Hannam Bridge	4.6(km)
	Gwangduk Tem. - Road end	
Total Distance		739.6(km)

사용자의 운전 습관에 근거하여 Table 1의 주행 조건을 선정하였으나, 실제로 대상 부품이 처해있는 진동 특성이 서로 다르기 때문에 각각의 부품에 따라 도로 구별이 달라질 수 있다. 하지만 본 논문에서는 일반적인 차량 부품에 대한 진동내구 시험 방법을 다루고 있기 때문에 부품 고유의 특성치는 반영하지 않았다.

(2) 측정 위치의 선정

기본적으로 MAST 장비에서 진동내구 시험을 수행하는 과정에서 활용하는 데이터는 대상 부품에 다수의 가속도 센서를 부착하여 진동 신호를 계측하게 된다. 진동 센서의 부착 위치는

진동전달 경로의 측면과 MAST 장비 측면으로 나누어 생각할 수 있는데, 전자의 경우에 진동전달 경로가 대상 부품이 주변 부품과 연결되는 부분에서 전달 경로를 형성하기 때문에 접촉 부분에 센서를 부착하게 되며, 후자의 경우에는 MAST 장비가 목표 응답 신호를 활용하여 각축의 작동기 신호를 계산하기 때문에 가진 신호의 생성에 유리한 조건으로 응답 신호를 얻어야 한다.

아래 Fig. 1 및 Fig. 2는 중형 승용차의 도어 및 시트의 진동내구 시험을 위해 가속도 신호를 검출한 위치를 보여준다⁽¹⁰⁾. 대상 부품에 대해 서로 다른 3곳에서 가속도 신호를 측정하였으며, 기준 위치를 선정하여 향후 내구 손상도 계산에 활용하였다.

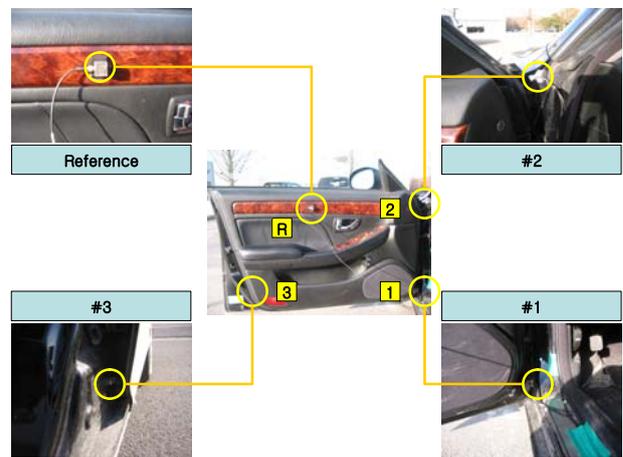


Fig. 1 Measuring point of door module

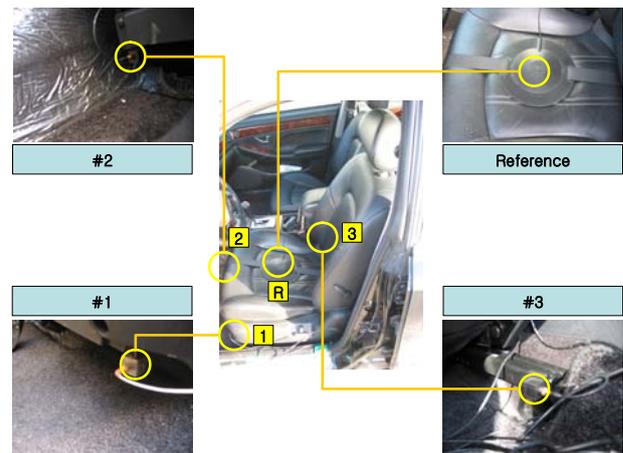


Fig. 2 Measuring point of seat module

3.2 주행시험장 주행 시험

(1) 주행모드의 선정

주행시험장에서 계측된 진동 신호는 특수 노면에서 얻어진 가속도 신호로써 국내도로 주행 시험의 경우와 비교하여 매우 가

혹한 조건의 데이터이다. 그러므로 실차 주행 시험을 통해 얻어진 가속도 데이터와 등가인 가진 조합을 선정할 때 데이터의 크기가 매우 작음에도 불구하고 등가의 손상도를 얻어내는 것이 가능하다. 모든 측정 채널에 대해 손상도가 동일해야 하기 때문에 주행시험장에서 제공하는 모든 특수로를 이용하여 진동 신호를 얻어내었으며, 실제 도로의 주행 조건 중 예측되는 선회주행이나 제동 신호도 포함시켜 실제의 주행 조건에 가까운 진동 조합이 이루어질 수 있도록 하였다. 아래 Table 2는 주행시험장에서 가속도 신호를 계측하기 위한 일반적인 시험 모드 모드로써 등속 주행을 기준으로 하여 동일한 특수로에 대해서도 서로 다른 주파수를 가진 원으로 사용할 수 있다⁽¹⁰⁾.

Table 2 Test mode in proving ground

#	road	content
1	belgian	constant velocity 20-60(km/h)
2	country	constant velocity 20-60(km/h)
3	washboard	constant velocity 20-60(km/h)
4	noise-gen.	constant velocity 20-60(km/h)
5	cobblestone	constant velocity 20-30(km/h)
6	chuckhole	constant velocity 20-60(km/h)
7	impact bar	constant velocity 20-60(km/h)
8	long-wave	constant velocity 20-60(km/h)
9	slow brake	constant velocity 20,40,60(km/h)
10	panic brake	constant velocity 20,40,60(km/h)
11	circle	constant velocity 30, 40(km/h) radius:30(m)

(2) 측정 위치의 선정

도로주행 신호를 기준으로 MAST 장비의 가진 프로파일이 결정되고, 실제 가진 신호는 도로주행의 데이터를 이용하기 때문에 주행시험장의 시험조건은 도로주행의 경우와 동일해야 한다.

4. MAST 장비용 가진 프로파일 생성

4.1 가진 프로파일 생성용 최적화 알고리즘

드라이브 프로파일을 생성하는 전략은, 국내도로를 주행하면서 획득한 가속도 데이터를 대상 값으로 두고 주행시험장에서 획득한 특수 노면들의 가속도 데이터들을 적당히 조합하여 동일한 피로 손상도를 갖도록 하는 것이다. 에너지 값으로 변환된 국내도로 주행 및 주행시험장 가속도 데이터는 스칼라 값이기 때문에 선형성이 보장되며, 다수의 채널로 구성되어 행렬간의 수식으로 표현이 가능하다. 그러므로 대상 부품에 대해 실차주행 시험 결과로 만들어진 에너지 행렬을 구성한 다음, 주행시험

장 시험으로부터 도출된 다수의 에너지 행렬 값들을 조합하여 전자의 행렬과의 차이가 최소화도록 하는 최적의 조합 조건을 도출해내는 것이다.

최적화 알고리즘을 설명하기 위해 아래 식 (4)의 에너지 행렬 A 를 도입한다.

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdot & \cdot & A_{1N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ A_{M1} & \cdot & \cdot & A_{MN} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, A 는 주행시험장 시험으로부터 획득한 가속도 데이터를 바탕으로 구성된 에너지 행렬로써, 각각의 '행'은 측정 채널이며 '열'은 특수도로 조건을 각각 나타낸다. 만약 주행시험장으로부터 획득된 에너지 행렬을 B 라고 가정하고 아래 식 (6)으로 표현된다면, 정규화된 행렬 B_{norm} 는 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$B = [B_1 \quad \cdot \quad \cdot \quad B_N] \quad (6)$$

$$B_{norm} = [B_{norm,1} \quad \cdot \quad \cdot \quad B_{norm,N}] \quad (7)$$

행렬 A 를 구성하는 각각의 특수노면 요소의 조합 조건을 상수비로 표현한다면, 아래 식 (8)의 행렬 T_s 로 표현이 가능하며 식 (5),(6) 그리고 (7)의 식들과 관련하여 식 (9)의 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$T_s = [T_{s,1} \quad \cdot \quad \cdot \quad T_{s,M}] \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} T_{s,1} \\ \cdot \\ \cdot \\ T_{s,M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdot & \cdot & A_{1N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ A_{M1} & \cdot & \cdot & A_{MN} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} B_{norm,1} \\ \cdot \\ \cdot \\ B_{norm,N} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서, '+'는 Moor-Penrose 역행렬을 나타낸다. 물리적으로 T_s 는 모든 요소가 음수의 값을 가질 수 없는데, 식 (9)에서는 이것을 고려할 수 없기 때문에 좌변의 T_s 값은 물리적으로 맞지 않는 결과를 도출할 수 있다. 그러므로 새로운 변수들을 요소로 가지는 식 (10)의 β 행렬을 도입하여 T_s 의 변수 조건을 고려하도록 한다.

$$\beta = [\beta_1 \quad \cdot \quad \cdot \quad \beta_M] \quad (10)$$

6. 결 론

자동차 부품에 대한 진동내구 시험을 수행하기 위해 MAST 장비를 활용하는 방법에 대해 기술하였다. 본 논문에서 제시한 방법은 실차 데이터를 기준으로 얻어진 가속도를 데이터를 활용하고 3방향의 병진 운동과 3방향의 모멘트 운동을 동시에 구현할 수 있는 MAST 장비를 활용하였기 때문에 기존에 수행되었던 어떠한 진동내구 관련 시험보다도 실제에 근접한 신뢰성 있는 시험 방법이다. 대상 부품에 대한 진동내구 시험 방법을 순차적으로 정리하면 다음과 같다.

- (1) 대상 부품의 선정
- (2) 계측 환경 구축
- (3) 실차 도로주행 시험
- (4) 주행시험장 시험
- (5) 가속도 데이터의 에너지 변환 및 에너지 행렬 구성
- (6) 최적화 알고리즘 적용
- (7) 가진 프로파일의 조합 선정
- (8) MAST 장비를 활용한 다축 진동내구 시험
- (9) 대상 부품의 진동내구 성능 평가

일련의 시험 방법은 일반적인 자동차 부품에 적용이 가능하기 때문에 자동차 부품에 대한 진동내구 시험 방법의 표준화 작업에 적합하며, 개별 부품의 다축 진동내구 규격화 과정에 기여할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) JIS D 1601:1995 Vibration Testing Methods for Automobile Parts, 1995
- (2) IEC Publication 68-2-6, "Basic Environmental Testing Procedures. Part 2: Tests", 1982
- (3) ASTM D 3580-95, "Standard Test Method for Vibration (Vehicle Linear motion) Test of Products", 1999
- (4) ISO 10326:2001(E), "Mechanical vibration -Laboratory method for evaluating vehicle seat vibration", 2001
- (5) Joe H. Morrill, Thomas Achatz, Abolhassan Khosrovaneh, 1998, "An Application for Fatigue Damage Analysis Using Power Spectral Density from Road Durability Events", SAE 980689
- (6) D. E. Newland, "An Introduction to Random Vibration and Spectral Analysis", 2nd edition
- (7) Grenier, G. C., 1993, "Fatigue Damage Assessment of Vibration Test Exaggeration Methods", SAE 930402
- (8) Tommy J. George et. Jermy Seidt, M.-H. Herman Shen, Theodore Nicholas, Charles J. Cross, 2004, "Development of a novel vibration-based fatigue testing methodology", International Journal of Fatigue, Vol 26, pp 477-486
- (9) Chan-Jung Kim, Bong-Hyun Lee, 2005, "Generating Method of the Input Profile in the MAST System", Transactions of the KSNVE, Vol. 15, No. 9, pp 1070-1076
- (10) Chan-Jung Kim, Chul-Yong Bae, Bong-Hyun Lee, Seong-Jin Kwon, Byung-Chul Na, "Multi-axial Vibration Test on MAST System with Field Data", Vol. 16, No. 7, pp 704-711
- (11) N. W. M. Bishop and F. Sherratt, "Fatigue Life Prediction from Power Spectral Density DATA", Environmental Engineering, Vol. 2, Nos. 1 and 2, 1989
- (12) P. H. Wirsching and A. Mohsen Shehata, "Fatigue Under Wide Band Random Stresses Using the Rain-Flow Method", Journal of Engineering Materials and Technology, pp 205-211, 1977
- (13) D. E. Newland, "An Introduction to Random Vibration and Spectral Analysis", 2nd Edition
- (14) J. S. Bendat, "Random Data Analysis and Measurement Procedures", Third Edition
- (15) Chan-Jung Kim, Bong-Hyun Lee, Chul-Yong Bae, Byung-Chul Na, Hyun-Chul Kim, "Verification on Damage Calculating Method of Vibration Fatigue Using Uni-axial Vibration Test", FISITA2006-Student Congress, F2006SC18, 2006
- (16) Reports (#11-1500000-001607-14, #2005-574) published by Ministry of Construction and Transportation, Korea Government (Korean version)