

# 영구동토 급속안정화를 위한 롤타입강재매트의 모델링과 해석(I) - 해석모델의 수립 -

## Modelling and Analysis of Roll-Type Steel Mats for Rapid Stabilization of Permafrost (I) - Modeling -

문도영<sup>1</sup>, 강재모<sup>2\*</sup>, 이장근<sup>3</sup>, 이상윤<sup>4</sup>, 지광섭<sup>5</sup>

Do Young Moon<sup>1</sup>, Jae Mo Kang<sup>2\*</sup>, Janggeun Lee<sup>3</sup>, Sang Yoon Lee<sup>4</sup>, Goangseuo Zi<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Nonmember, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyungsoo Univ., 309, Suyong-Ro, Nam-gu, Pusan, 608-736, Republic of Korea

<sup>2</sup>Member, Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

<sup>3</sup>Member, Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

<sup>4</sup>Nonmember, Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

<sup>5</sup>Nonmember, Professor, Dept. of Civil Environmental & Architectural Engineering, Korea Univ., 145, Anam-Ro Sungbuk-Gu, Seoul, 136-701, Republic of Korea

### ABSTRACT

Finite element modelling and analysis were conducted for the roll-type steel mats which were placed on loose sand and subjected to a standard truck wheel load in this study. The roll-type steel mats mean that the steel mats can be folded as a circle shape for the carrying to fields in cold regions where workability is limited and are developed for a rapid rehabilitation method for roadway across soft ground which is caused by thawing during the summer season in cold regions. The model is composed of link elements to simulate nonlinear behavior of connections between steel mats, thick shell elements to have flexural stiffness of the steel mats, and springs to simulate characteristics of foundation soils. The structural behaviors of the shell, link elements, and springs were verified at each modelling step through experiment and analysis. Beam and shell analysis without the link elements were conducted and compared to results obtained from the model presented in this study. Significant vertical displacement is shown in the shell model with hinge connections. Therefore, the results demonstrate that the analysis model for the roll-type steel mats on loose sand needs further detail parametric studies.

### 요 지

가

가

**Keywords** : Permafrost, Rapid stabilization, Steel mat, Finite element analysis, Modelling

Received 29 Aug. 2014, Revised 19 Nov. 2014, Accepted 4 Dec. 2014

\*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0556; Fax: +82-31-910-0211

E-mail address: [jmkang@kict.re.kr](mailto:jmkang@kict.re.kr) (J. M. Kang)

## 1. 서론

최근 알래스카, 시베리아 등 극한지 자원개발이 증가하고, 국내 기업의 진출이 확대되면서 건설관련 기술수요가 증가하고 있다. 특히 극한지 자원개발을 위해서는 건설공사를 위한 장비와 자재의 운반을 위한 운송로 확보가 우선되어야 하며, 저온의 환경조건과 동결과 융해에 따라 다양하게 변화하는 지반 조건에 대응하면서 저인력 급속시공이 가능한 운송로 확보 기술이 요구되고 있다.

동토지역의 지반은 기후조건에 따라 동결에 따른 융기(frost heave)와 해빙에 따른 융해(thaw settlement)가 반복되며, 건설 활동에 따른 동결지반 온도 불균형으로 연약지반이 형성되어 차량 운행을 위한 지속적인 지지력을 확보할 수 없는 문제점이 발생한다. 지반이 연약한 상태에서 중차량 하중이 운행하게 되면 지반의 강도 저하로 영구변형과 파괴가 발생하여 차량 운행에 어려움 발생으로 자원 개발에 중대한 장애가 된다.

동토지역 운송로 확보를 위한 기술은 매우 다양하다. 연약지반에서 차량의 주행성 확보를 위한 강판가도 공법이 개발되었으며(Lee, 2003), 유가급등으로 인한 오일샌드 개발이 한창인 캐나다 유전개발현장에서는 복합소재인 리그매트가 적용된 바 있다(Lee et al., 2007). 또한 포격에 의하여 파손된 비행기 활주로의 복구에도 폴리머 콘크리트, 유리섬유 매트 또는 경량 알루미늄 매트를 적용하고자 하는 시도가 있었다. 유리섬유나 경량 알루미늄 매트 등은 동토 급속안정화공법으로도 적용될 수 있으나 경제적으로 비효율적이다.

Lee et al., 등(2012)은 2010년부터 동토지역에서 융해로 인한 지반 연약화에 대응하면서 신속하게 지지력을 확보할 수 있는 롤타입강재매트 공법을 제안하였다. 롤타입 강재매트 공법은 강재의 매트를 원형 롤 형태로 시공 현장에 운반하고, 적용 지반에 포설하여 지반의 표층에 중차량 통행을 위한 강성을 급속으로 부여하는 공법이다. 강재 매트는 여러개의 모듈이 하나로 연결되며, 한 개의 모듈 단면은 Fig. 1a와 같이 경제성과 시공성을 감안하여 설계되었다. 즉, 1개 모듈의 길이와 단면형상은 롤 상태로 감았을 때, 최대한 원형이 되도록 강재의 두께와 강성, 연결부의 형상 등을 종합적으로 고려하여 결정되었다(Fig. 1b 참조).

롤타입강재매트의 강축은 Fig. 2와 같이 차량진행방향에 대하여 수직으로 놓이게 된다. 연약지반위에 놓인 강재매트는 차량하중에 대하여 매우 복잡한 구조적 거동을 나

타낸다. 이는 강재매트의 직교이방성의 단면특성에도 기인하겠지만 강재매트의 모듈간 연결부가 6자유도에 대하여 복잡한 비선형 거동을 나타내기 때문이다. 연결부는 Fig. 1b와 같이 강축에 대하여 28°까지는 자유롭게 회전변위(Fig. 2의  $R_y$ )를 허용하지만 이후에는 매트간의 접촉에 의하여 회전이 불가능하기 때문에 극단적인 불연속적 거동특성을 가지고 있다. 한편, 3개의 수직변위(Fig. 2의  $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$ ) 자유도와 나머지 두 개의 회전변위(Fig. 2의  $R_x$ ,  $R_z$ )에 대해서는 강판의 접촉에 의하여 차륜에 의한 힘을 그대로 전달하기 때문에 무한강성으로 간주할 수 있다. 또한 연약지반과 강재매트의 구속은 일반적으로 스프링으로 모사하는데, 압축의 경우 지반탄성계수에 해당하는 선형 스프링이 되지만, 인장의 경우 매트와 지반간에 이격이 발생하기 때문에 인장력이 발생하지 않는 압축 전용 스프링이 된다.

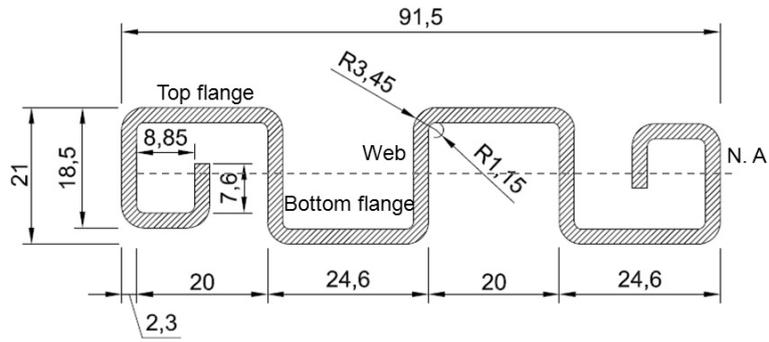
이상과 같이 연약지반상에 놓인 연결부를 갖는 강재매트의 거동특성은 매우 복잡하기 때문에 기술 및 시제품의 개발을 위해서는 정밀해석을 위한 구조해석모델의 수립과 검증이 무엇보다 중요하다. 강재매트의 사용성과 안전성의 검토와 성능검증을 위해서는 지반강도 특성, 연결부의 특성 및 강재매트의 강성과 구속조건 등 다양한 인자에 대한 거동의 해석이 필요하기 때문이다.

본 논문에서는 연약지반에 놓인 롤타입강재매트의 거동을 해석할 수 있는 정밀해석모델을 수립하고 연결부가 없는 빔과 쉘해석 결과와 비교하였으며, 다양한 영향인자에 대한 변수해석을 통해 차량하중에 대한 거동특성을 연구하였다. 이와 같은 내용을 두 편의 논문으로 정리하였다. 첫 번째 논문은 정밀해석의 수립에 대하여 집중적으로 다루고 있으며, 매트간 연결부의 비선형적 거동특성을 모사할 수 있는 요소의 적용과 제시된 모델의 비교, 검증 내용을 중점적으로 제시하였다. 두 번째 논문은 첫 번째 논문에 제시된 정밀해석모델을 이용하여 차량하중의 재하상태에서 구조적 거동에 영향을 미치는 다양한 인자에 대한 변수해석을 수행, 고찰하였다.

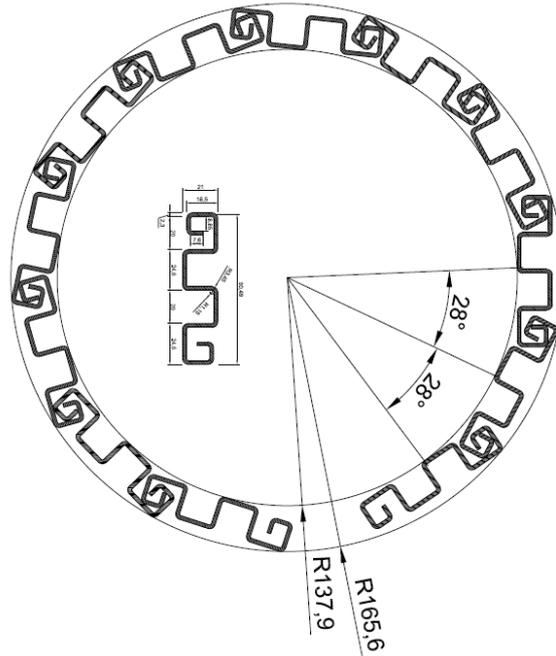
## 2. 강재매트 연결부 모델링

### 2.1 시제품 연결부 회전변위 확인

강재매트 모듈이 서로 연결된 상태에서 하중에 의해 발생할 수 있는 최대회전변위를 확인하기 위하여 시제품의



(a) Sectional dimension of one module



(b) Folded steel mat

Fig. 1. Details of the steel mat

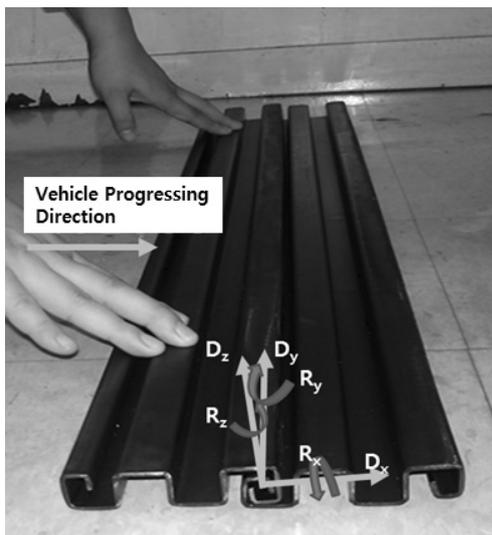


Fig. 2. Degree of freedom of the link element for modelling of the connections

회전변위(Fig. 2의  $R_y$ )에 대한 검측을 수행하였다. Fig. 3과 같이 두 개의 강재매트 모듈을 연결하고 평평한 바닥에 놓은 후, 1개의 강재매트를 더 이상 움직이지 않을 때까지 회전시킨 상태에서 상대회전변위를 각도계를 이용하여 측정하였다. 수개의 측정결과, 최대회전변위는  $12^\circ$ 에서  $28^\circ$ 까지 매우 다양하게 나타났으며, 평균적으로  $25^\circ \sim 28^\circ$ 인 것으로 나타났다. 이론상의 회전각도와 다르게 다양한 회전변위가 나타난 원인은 본 시제품의 제작이 수작업을 통해 제작되었기 때문이다. 이와 같은 최대회전각도 측정결과에 근거하여 연결부 요소의 검증해석에서 허용회전변위 ( $R_y$ )는 최대치이며 이론치에 해당하는  $28$  ( $0.49\text{rad}$ )로 하였다.

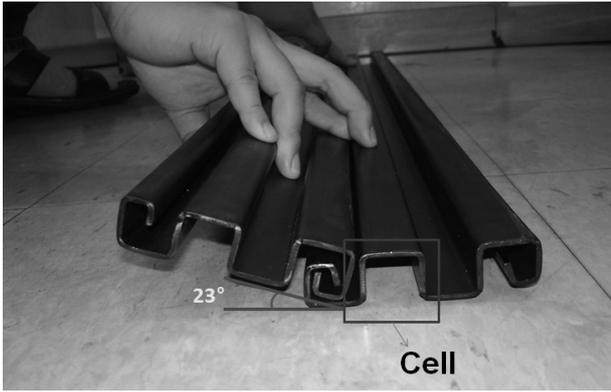


Fig. 3. Visual investigation for Rz

## 2.2 요소선정

본 연구에서는 범용구조해석 프로그램인 ABAQUS Ver. 6.4(ABAQUS, 2003)를 사용하였다. ABAQUS에서는 Fig. 4a와 같이 두절점간의 연결상태를 모사하기 위한 6자유도를 갖는 Flexible joint element(JointC element)를 제공하고 있다. 본 연결요소의 국부좌표계는 Fig. 4b와 같다. 또한 연결요소의 거동은 선형거동 뿐 아니라 비선형 거동

을 정의할 수 있으며, 힘과 변위의 관계로 Fig. 4c와 같이 정의할 수 있다. JointC 요소는 철도레일과 침목간의 체결장치, 토목 및 건축부재의 연결부의 모델링을 위하여 빈번히 사용된다(Chen, et al., 2007; Lee, 2004; Hammons, 1998; Yen, et al., 2007)

## 2.3 연결부요소 검증해석

Flexible joint요소를 이용하여 강재매트의 연결부 모델링이 가능한지를 검증하기 위하여 비선형 거동에 대한 검증해석을 수행하였다. Fig. 5a와 같이 요소 검증을 위한 모델은 1개의 셸요소(4개의 절점)와 두 개의 JointC 연결요소로 구성하였다. 요소의 크기는 단위크기로 하였다. 요소의 6 자유도( $D_x, D_y, D_z, R_x, R_y, R_z$ )에 대한 거동 정의는 하중-변위관계로 정의하게 되는데,  $R_y$ 를 제외한 5개 자유도에 대해서는 선형탄성으로 강성은  $1.0 \times 10^9 \text{N/radian}$ 을 입력하였다.  $R_y$ 는 비선형으로 Fig. 5b와 같이 입력하였다. 그림과 같이  $-28^\circ(-0.49\text{rad}) \sim +28^\circ(0.49\text{rad})$  범위에서는 힘을 전달하지 않다가 이후에는  $1.0 \times 10^9 \text{N/radian}$ 의 강성

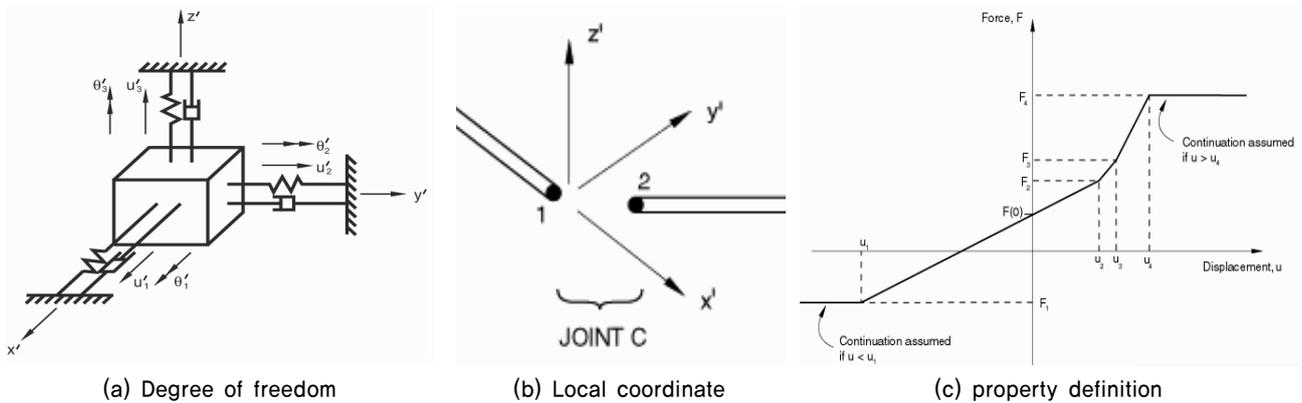


Fig. 4. Flexible joint element (ABAQUS, 2003)

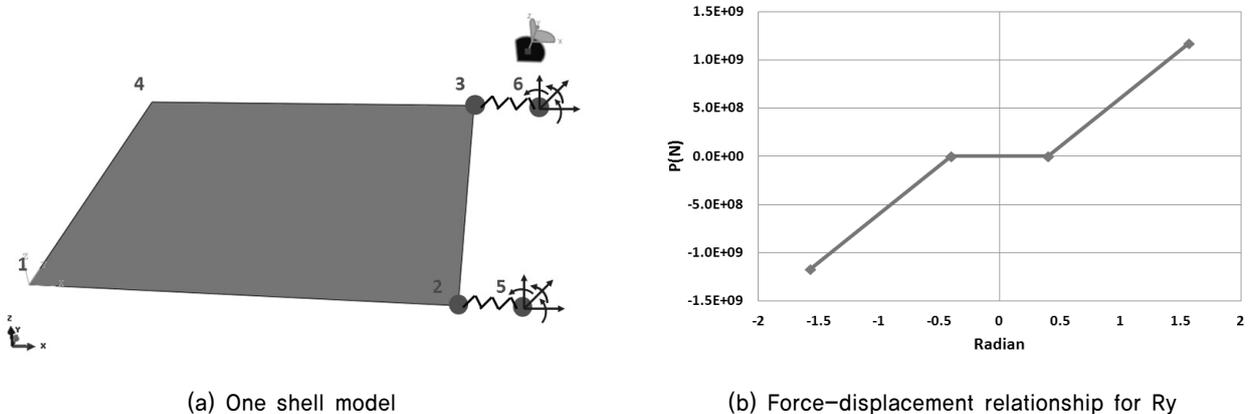
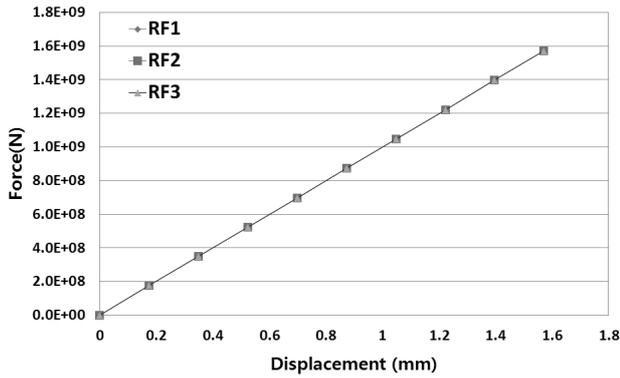
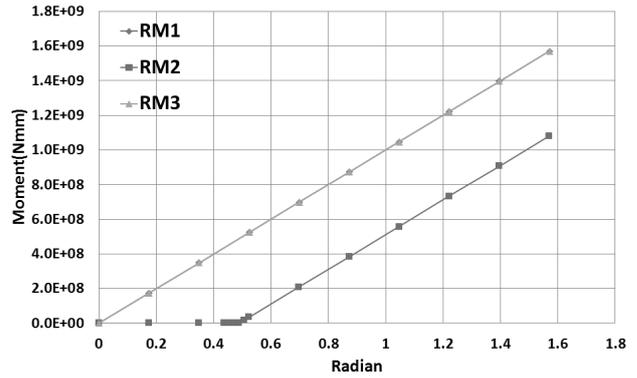


Fig. 5. One shell model for the verification of the link element



(a) Normal reaction forces



(b) Moment reaction results

Fig. 6. Reaction results at node 5

Table 1. Calculation of moment of inertia for a cell in one module

1 Cell	$b$ (mm)	$h$ (mm)	$y$ (mm)	$A$ (mm <sup>2</sup> )	$d: (y - N.A^*)$ (mm <sup>2</sup> )	$Ad^2$ (mm <sup>3</sup> )	$I$ (mm <sup>4</sup> )	$I + Ad^2$ (mm <sup>4</sup> )
web	2,3	21	10,5	48,3	0	0	1775,025	1775,025
Top flange	10	2,3	19,85	23	9,35	2010,718	10,13917	2020,857
bottom flange	10	2,3	1,15	23	-9,35	2010,718	10,13917	2020,857
$\Sigma$	* N.A : Neutral axis of a steel mat module							5816,738/cell = 252/mm

을 발휘하도록 모델링하였다. 모델의 구속조건은 5번과 6번 절점의 6방향 자유도에 대하여 모두 구속하였다. 하중은 변위제어 하였으며,  $R_y$ 에 대하여  $-90^\circ(-1.57\text{rad}) \sim 90^\circ(1.57\text{rad})$  범위까지  $10^\circ(0.17\text{rad})$  간격으로 회전시켰다.

Fig. 6a는 절점 5에 발생하는 자유도  $D_x, D_y, D_z$ 에 해당하는 수직반력 RF1, RF2, RF3를, Fig. 6b는 자유도  $R_x, R_y, R_z$ 에 해당하는 모멘트 반력 RM1, RM2, RM3를 나타내고 있다. RM2를 제외한 모든 반력은 변위가 증가함에 따라 반력이 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있으나, RM2 반력의 변화는 입력된 비선형 스프링의 거동을 정확하게 따라가고 있음을 보여준다.

### 3. 강재매트의 구조강성 모델링

#### 3.1 등가두께

강재매트의 구조강성을 정확하게 결정하는 것이 매우 중요하지만, 단면형상이 매우 복잡하다. 강축 단면의 강성의 근사치를 결정하기 위하여 단면특성이론(평행축의 원리)에 근거하여 강성을 계산하였다. 강재매트 1개 모듈을 구성하는 4개의 셀 중 1개 셀의 단면 2차 모멘트는 Table 1과

같이 계산하였다. 셀의 의미는 Fig. 3에 제시하였다. 강성의 계산은 Fig. 1a에 제시한 바와 같이 1개의 셀을 상부, 하부플랜지 및 웹으로 구분하고 각각의 폭은  $b(\text{mm})$ , 높이는  $h(\text{mm})$ , 상단에서 도심까지의 거리를  $y(\text{mm})$ , 각 부분의 단면적을  $A(\text{mm}^2)$ 로 하였다.  $d$ 는 모듈전체의 도심으로부터 각부까지의 거리(mm)를,  $I$ 는 각 부분의 단면2차모멘트를 나타낸다. 4개의 셀을 겹쳐 놓았을 때 1개의 셀은 중복됨으로 3개 셀의 단위폭당 단면 2차모멘트는 전체의 합을 3개셀의 폭으로 나누어 계산하였으며,  $252\text{mm}^4/\text{mm}$ 로 계산되었다. 사각단면의 단면2차모멘트 식( $I = bh_c^3/12$ )을 이용하여 등가높이를 구하였으며, 단면방향의 이론적인 등가높이( $h_c$ )는  $14.5\text{mm}$ 로 계산되었다.

#### 3.2 실험과 구조해석을 통한 검증과 보정

3.1절에서 근사계산된 강재매트의 등가높이를 구조실험과 선형탄성해석을 통해 검증하고 등가높이를 변수로 역해석을 통해 보정하였다.

강재매트 1개 모듈에 대한 휨실험을 실시하였다. 실험은 폭  $90\text{mm}$ , 길이  $1\text{m}$ 의 강재매트를 지간  $0.4\text{m}$ 의 지지부에 올려놓고 중앙에서 하중을 재하하는 3점 재하방식으로

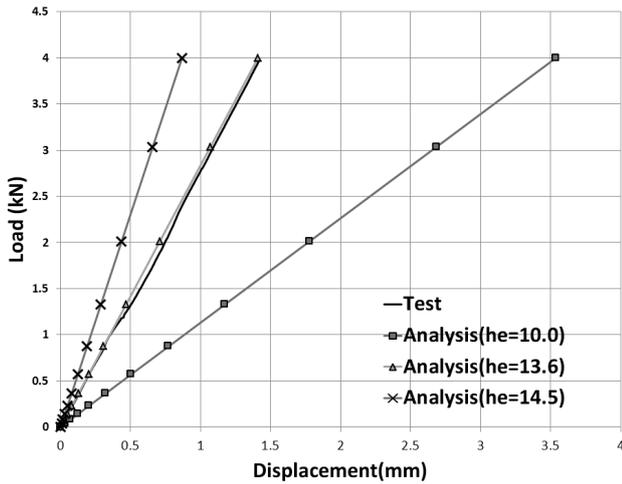


Fig. 7. Test and linear elastic analysis results for one model of steel mat

하였다. 실험결과는 Fig. 7과 같으며, 4kN의 하중에서 처짐은 1.41mm가 발생하는 것으로 나타났다.

실험과의 비교를 위하여 1개의 강재매트 모듈에 대한 선형탄성해석을 수행하였다. 3.1절에서 계산된 이론적인 등가높이 14.5mm를 포함하여 다양한 높이(10.0mm, 13.6mm)를 등가높이를 갖는 1개의 강재매트에 대한 모델링과 해석을 수행하였다. 구속조건과 하중조건은 실험과 동일하게 하였으며, 탄성계수는 200GPa로 하였다. 해석결과는 Fig. 7에 실험결과와 비교하여 나타내었다.

등가높이가 14.5mm일 때 처짐은 0.8mm로 실험결과보다 강성이 큰 것으로 나타났다. 또한, 10mm의 경우 강성이 크게 저하되는 것을 확인하였다. 다양한 등가높이에 대한 시행착오를 통해 13.6mm의 등가높이 일 때, 실험결과와 동일한 1.41mm의 처짐이 발생하는 것을 확인하였다. 그러므로 강재매트 시제품의 등가높이( $h_e$ )는 13.6mm로, 이론적인 해석결과와는 다소 차이가 있는 것으로 나타났다.

#### 4. 롤타입강재매트의 차륜하중에 의한 거동해석

##### 4.1 해석모델

본 연구를 통해 수립된 유한요소해석 모델, 즉 힌지연결부를 갖는 쉘해석 모델의 적정성을 검토하고자 하였다. 이를 위하여 느슨한 모래위에 놓인 강재매트에 DB24 표준 트럭하중의 한 개 차륜이 하중으로 가해질 때 강재매트의 거동을 해석하였다.

강재매트는 ABAQUS의 4절점을 갖는 thick shell 요소

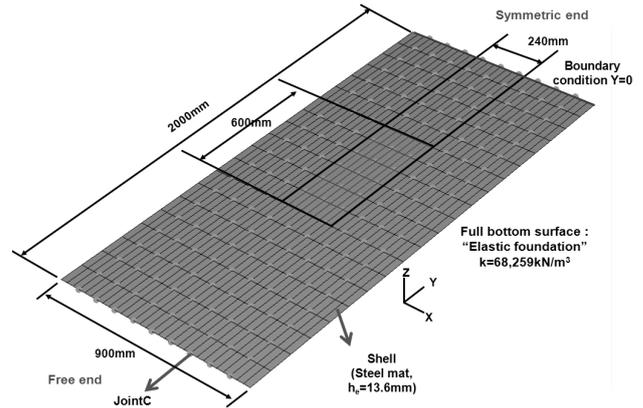


Fig. 8. FE mesh model for steel mats on loose sand subjected to a truck wheel load

(S4)를 사용하여 모델링하였다. ABAQUS에서 제공하는 S4요소는 일반적인 thick shell 이론에 근거하며 전단변형을 고려한다(Zhan, 2012). 강재매트 한 개 모듈을 구성하는 쉘 요소 크기는 차량진행방향 길이 0.03m, 횡방향길이 0.1m이며, 등가두께는 3.2절의 고찰결과에 따라 13.6mm로 설정하였다. 따라서, 강재매트 한 개 모듈은 차량진행방향 3개의 요소, 횡방향 20개요소로, 총 60개로 구성된다. Fig. 8과 같이 강재매트 전체모델은 폭 2m, 길이 0.9m로 하였다.

강재매트간의 연결요소는 JointC요소를 사용하였으며, 모듈의 연결을 위하여 20개/모듈의 요소가 사용되었다. 전체 모델은 차륜하중의 크기를 고려하여 Fig. 8과 같이 10개의 모듈을 연결하여 구성하였다. 따라서, 전체모델은 600개의 쉘요소와 180개의 JointC요소로 구성된다.

요소의 크기를 고려하여 차륜의 접지면은 0.60m×0.24m로 하였다(Table 2 참조). Fig. 8에 제시된 바와 같이 대칭을 고려하여 Y방향(차량진행 직각방향)의 변위에 대하여 구속조건을 부여하였다.

JointC 요소의 6자유도에 대한 거동 모델은 Fig. 9에 나타내었다. 그림과 같이 차량진행방향 변위( $D_x$ ), 횡방향변위( $D_y$ ), 수직변위( $D_z$ ), 차량진행축에 대한 회전( $R_x$ ), 수직축에 대한 회전( $R_z$ )은 모두 선형스프링으로 모델링하였으며, 스프링계수는 109N/mm과 109N/rad로 하였다. 횡축에 대한 회전변위( $R_y$ )에 대해서는  $-28^\circ \sim +28^\circ$  범위에서는 강성이 없으며, 이외의 범위에서는 선형스프링으로 모델링하고, 계수는 109N/rad를 사용하였다.

Table 2. Summary for a model of steel mats on loose sand subjected to a truck wheel load

Part	Element	Property
Steel mats	Shell (S4)	$E = 200\text{ GPa}$ $h_e = 13.6\text{ mm}$
Link elements	JointC	$D_x = 10^6\text{ kN/m}$ $D_y = 10^6\text{ kN/m}$ $D_z = 10^6\text{ kN/m}$ $R_x = 10^6\text{ kN/rad}$ $R_y = 10^6\text{ kN/rad} (-90^\circ \sim -28^\circ, 28^\circ \sim 90^\circ)$ $R_y = 0\text{ kN/rad} (-28^\circ \sim 28^\circ)$ $R_z = 10^6\text{ kN/rad}$
Foundations	Elastic foundation	$k = 68,259\text{ kN/m}^3$ ( $E_f = 20\text{ MPa}$ )
Wheel load	Pressure	$96\text{ kN}/(0.60 \times 0.24) = 667\text{ kN/m}^2$

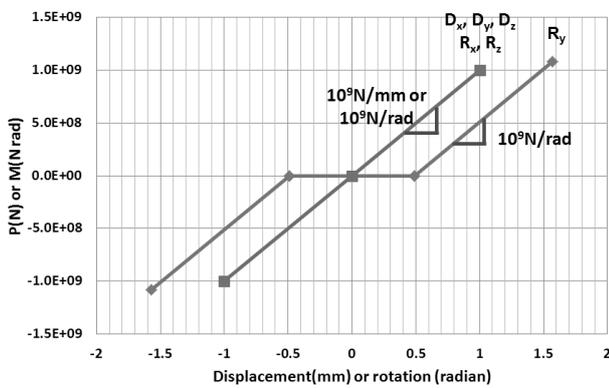


Fig. 9. Inputted load-displacement curves for link elements between steel mat modules

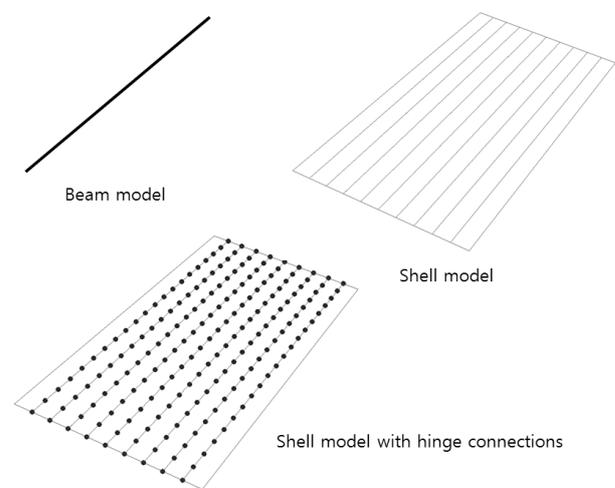


Fig. 10. Three different models considered in this study

#### 4.2 지반 모델링 방법과 지반반력계수

지반은 ABAQUS에서 지반모델링에 범용적으로 제고하고 있는 “Elastic foundation” 모델링 기법을 사용하여 모델링하였다. 지반반력계수는 Eisenmann(2000)의 방법에 근거한 식 (1)을 통해 계산하였다. 포장재는 강재이므로 강재의 탄성계수(=200GPa)를 사용하였으며, “느슨한 모래”지반의 지반탄성계수는 DAS(2003)의 문헌을 참고하여  $20\text{ N/mm}^3$ 을 사용하였다. 지지판의 등가높이는  $13.6\text{ mm}$ 를 사용하였다. 계산결과 지반의 지반반력계수는  $68,259\text{ kN/m}^3$ 이고 셸요소의 전바닥면에 적용하였다(Fig. 8 참조).

$$k = \frac{E_f}{h_e^3 \sqrt{\frac{E_s}{E_f}}} \quad (1)$$

여기서,  $E_f$ : 지반의 탄성계수(MPa),  $E_s$ : 포장층의 탄성

계수(MPa),  $h_e$ : 포장층의 등가 두께(mm)이다.

#### 4.3 거동비교를 위한 연결부가 없는 보와 셸해석모델

본 연구에서 제안한 모델의 특징은 힌지연결부를 갖는 강재매트이다. 따라서, 힌지 연결부가 없는 보와 셸 모델의 해석결과는 본 제안 모델의 거동특징을 파악하는데 중요한 비교자료가 된다. 힌지 연결부를 고려하지 않은 보 해석모델(Beam model)과 셸해석모델(shell model)을 구축하였으며, 힌지연결부를 제외한 모든 입력조건, 즉 하중, 크기 및 지반반력계수 등은 모두 본 논문의 4.1~4.2과 동일하게 하였다. Fig. 10은 본 연구에서 제시하고 있는 연결부가 있는 셸해석모델과 연결부가 없는 보와 셸해석 모델을 나타내고 있다.

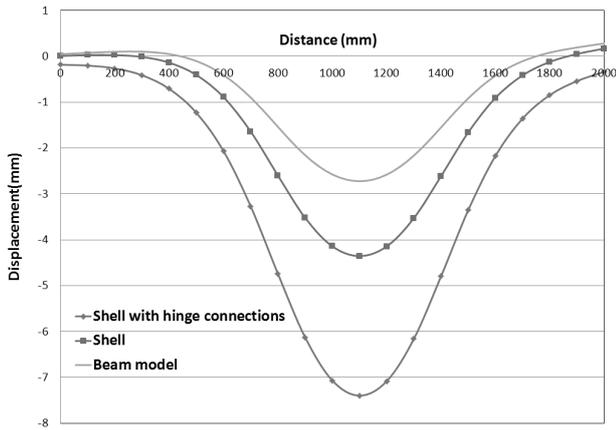


Fig. 11. Vertical displacement comparisons

## 5. 해석결과 고찰

### 5.1 해석모델에 따른 결과 비교

Fig. 11에는 각 모델로부터 획득한 수직처짐의 결과를 비교하여 나타내고 있다. 제시된 처짐은 모델 Y축의 중심라인(Fig. 13의 Transversal path)의 결과로서, 거리 0는 자유단(free end)을 2000mm는 대칭끝단(Symmetric end)을 의미한다.

해석결과와 같이 힌지연결부의 유무에 따라 거동의 차이가 상당히 크다는 것을 확인할 수 있다. 우선, 보 모델의 해석결과와 연결부가 고려되지 않은 쉘모델의 결과를 비교할 때, 보의 중앙부(차륜하중 재하부) 최대 처짐이 -2.8mm에 불과한 반면, 쉘에서는 -4.4mm로 상당한 차이가 있으며, 자유단과 대칭끝단의 결과는 상호 유사한 것으로 나타났다. 두 모델 모두 힌지 연결부가 고려되지 않았기 때문에 이와 같은 차이는 보의 거동과 판의 거동차이에 기인하는 것으로 이해할 수 있다. 느슨한 지반위에 놓여있기 때문에 상당한 수직처짐이 발생할 수 있음을 감안할 때, 쉘모델의 해석결과가 실제 느슨한 모래 위에 포설된 강재매트의 거동을 보다 정확하게 묘사할 수 있다고 판단된다.

한편, 동일한 쉘모델일지라도 연결부의 힌지모델링 유무에 따라 거동이 크게 달라지는 것을 확인할 수 있다. 힌지 연결부가 있는 모델의 해석결과에서는 대칭끝단과 자유단에서 하향 처짐이 발생하는 것으로 나타났으나, 연결부가 없는 쉘해석 결과에서는 자유단에서는 처짐이 0이며, 대칭끝단에서는 상향처짐이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 강재매트 모듈간의 하중전달이 연결부로 인해 원활

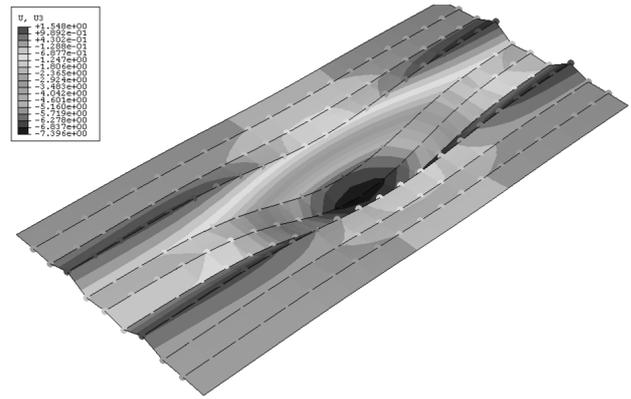


Fig. 12. Vertical deformation contour with deformed shape (U3 : Vertical displacement)

하지 않기 때문에 하중이 직접 재하되는 강재매트 모듈의 하향 처짐이 큰 것으로 이해된다. 하중재하부의 최대처짐도 상당히 큰 차이가 있다. 중앙부의 하향 처짐이 연결부가 없는 쉘모델 해석결과와의 170%에 달하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과를 종합적으로 판단할 때, 연약한 지반위에 놓은 강재매트의 해석은 쉘요소를 사용하여야 하며, 연결부의 회전거동을 정확히 묘사할 수 있어야만 실제적인 거동의 예측이 가능하다.

### 5.2 느슨한 모래지반위에 놓인 롤타입강재매트의 거동분석

힌지연결부가 있는 쉘모델을 통한 3차원거동 해석결과 획득한 수직변위결과는 Fig. 12와 같다. 강재매트의 4모서리는 미소한 상향변위(들림)가 발생하는 반면, 차륜하중이 실린 중앙부위는 상당한 하향처짐이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 종방향의 변위(Longitudinal path)는 힌지연결부의 불연속 거동 특징에 따라 변형의 형상이 불연속적인 반면, 횡방향(Transversal path)은 연속적인 휨변형 양상을 나타낸다. 차륜하중이 재하되는 부분의 수직처짐은 -7.4mm에 달하는 것으로 예측되었다.

3차원변위거동을 명확히 살펴보기 위하여 종방향과 횡방향의 모니터링 path를 설정하여 단면의 수직변위를 Fig. 13에 거리에 대하여 나타내었다. 종방향 변위결과에서는 연결부가 있는 90mm 마다 불연속적인 변위 변화를 나타낸다. 특히 차륜하중이 재하되는 전과후의 연결부에서는 급작스런 큰 수직변위의 변화가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 한편, 횡방향 변위결과에서는 연결부가 없기 때문에 연속적인 처짐변화를 나타낸다.

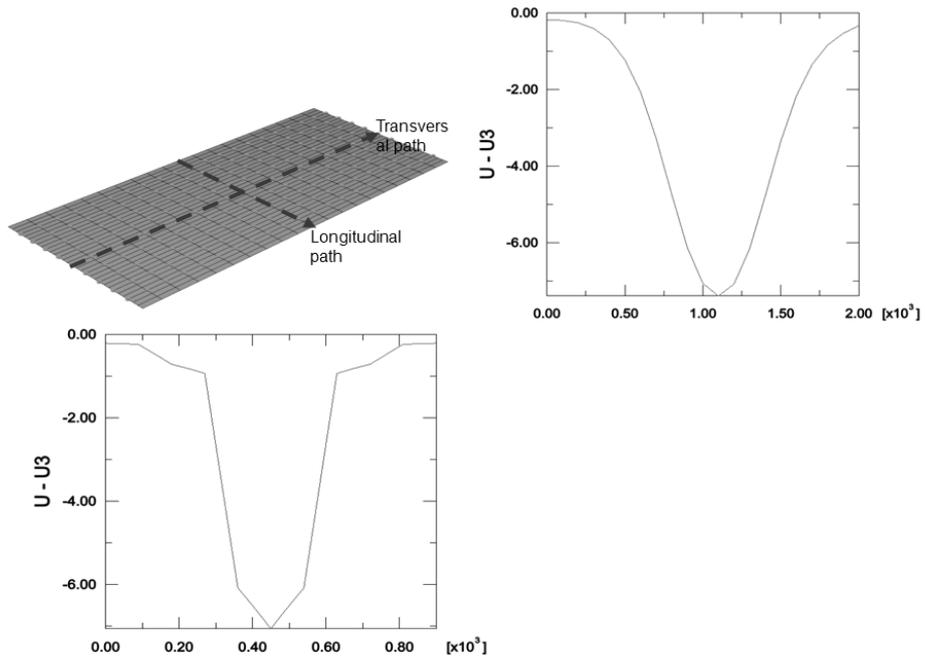


Fig. 13. Distance Vs. displacement curves (unit : mm, U3 : Vertical displacement)

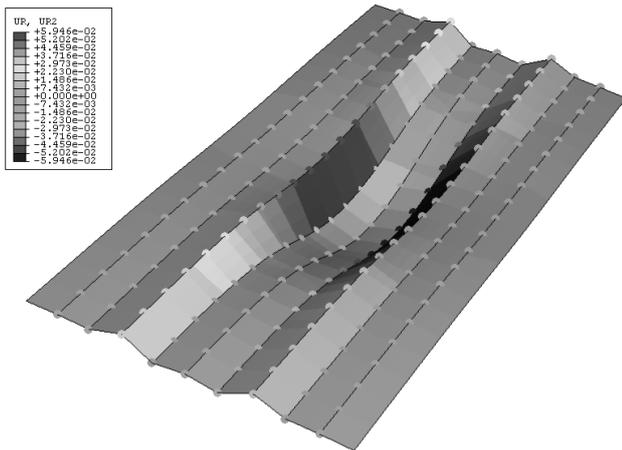


Fig. 14. Rotational displacement contour results

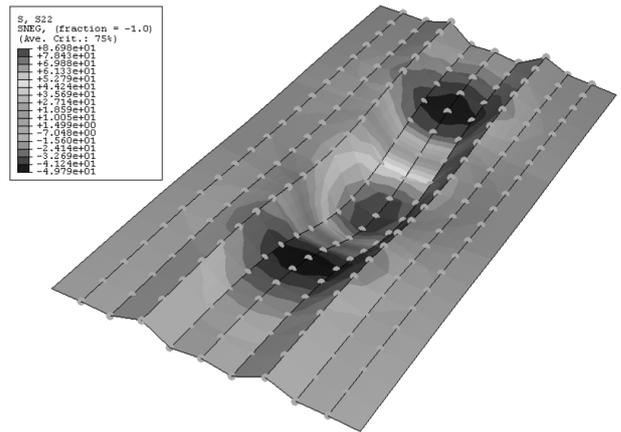


Fig. 16. Normal stress contour result (unit : MPa)

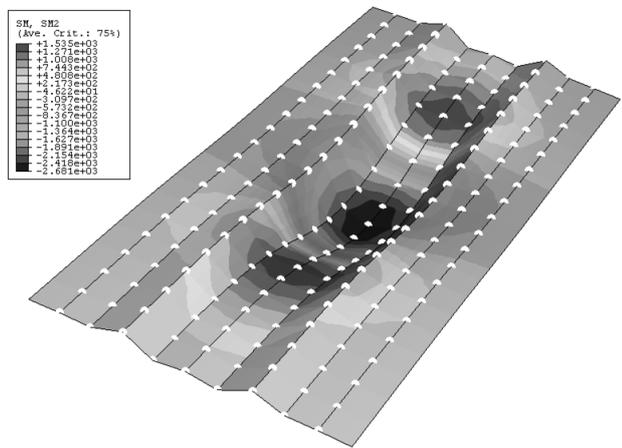


Fig. 15. Sectional moment contour result (unit : Nmm/mm)

Fig. 14는 횡축에 대한 회전변위결과를 Contour로 나타내고 있다. +회전변위는 시계방향의 회전변위를 나타내며, -회전변위를 반시계방향의 회전변위를 나타낸다. 그림과 같이 회전변위는 차륜하중의 전과 후에서 집중적으로 발생하며, 불연속적인 거동을 나타내고 있다. 회전변위량은 약 3.4°로, 연결부 접촉에 의하여 힘이 전달되는 회전변위에 해당하는 28°에 아직 미치지 못하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 15는 단위폭당의 횡방향에 대한 모멘트 Contour를 나타내고 있다. 최대모멘트의 크기는 2.68kNm/m로 차륜하중 하부에서 발생하는 것으로 확인할 수 있다. 또한, 이와 같은 외력모멘트에 의하여 강재매트에 발생하는 응력 결과는 Fig. 16과 같다. 횡방향응력(S22)의 크기는 87MPa

에 달하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과를 종합할 때, 느슨한 모래지반 위에 힌지연결부를 갖는 강재매트가 DB24 표준트럭의 차륜하중을 받게 되면 차륜재하 위치 하부에 상당한 처짐과 응력이 발생하는 것으로 예측할 수 있다.

## 6. 결론

본 논문에서는 극지 지반의 급속개량 공법으로 개발된 롤타입강재매트공법의 설계와 해석을 위한 유한요소해석 모델의 수립과 해석을 수행하였다. 해석 모델은 강재매트 연결부의 비선형 거동특성, 지반구속조건의 비선형거동특성, 복잡한 강재 매트의 형상특성 등을 고려할 수 있도록 하였으며, 각 거동 특성을 요소수준에서 해석적, 실험적으로 검증하였다. 또한, 느슨한 모래지반위에 놓인 롤타입강재매트가 DB24 표준트럭의 차륜하중을 받을 때 3차원 거동을 해석하였으며, 힌지 연결부가 없는 보모델과 셸모델의 해석결과와 상호 비교하였다. 이와 같은 고찰을 통해 획득한 결론은 다음과 같다.

- (1) 롤타입 강재매트의 모듈간 연결은 L형으로 되어 있어 원형으로 쉽게 감겨지도록 설계되어 있기 때문에 지반위에 놓인 강재매트의 거동은 연결부의 거동특성에 지배된다. 연결부의 거동특성을 적절하게 모사하기 위하여 ABAQUS에서 제공하고 있는 6자유도를 갖는 연결요소를 적용하였으며, 요소수준에서 비선형적인 거동 특성을 검증하였다.
- (2) 복잡한 굴곡부를 갖는 강재매트의 강축에 대한 휨강성을 해석적, 실험적 방법을 통하여 결정하였다. 강관의 모델링에서는 강재매트의 셸요소의 등가높이로 고려하였다. 이때, 강재매트간의 연결부가 대부분의 변형을 수용하기 때문에 약축에 대한 휨강성을 고려하지 않았으나, 두번째 논문에서 약축에 대한 강성모델링이 전체적인 거동에 미치는 영향을 분석하였다.
- (3) 이상과 같이 구축된 해석모델(힌지연결부를 갖는 셸 해석모델)의 비교검증을 위하여 보모델과 셸모델의 해석결과를 상호 비교한 결과, 보 모델은 강재매트의 2차원적인 거동을 정확하게 예측하는데 한계가 있는 것으로 나타났으며, 동일한 셸 모델이라 할지라도 힌지연결부가 있는 경우 처짐이 약 70% 이상 증가하는 것으로 확인되었다.

- (4) 상기 비교 검증된 요소와 모델링 기법(힌지연결부가 있는 셸모델)을 사용하여 느슨한 모래지반위에 놓인 강재매트가 DB24 표준트럭 차륜하중을 받을 때 3차원거동해석을 수행하였다. 차륜하중에 의한 수직최대 변위는 7.4mm에 달하며, 모듈간 연결부에서는 약 3.4°의 불연속적인 회전변형이 발생하는 것으로 확인되었다. 차륜하중에 의해 발생하는 모멘트는 약 2.7kNm/m이며, 강축방향의 응력은 87MPa로 나타났다. 구축된 해석모델링 기법은 하중을 받는 강재매트의 3차원적인 거동을 적절하게 모사하는 것으로 확인되지만 추가적인 검증이 필요하다. 또한, 거동에 영향을 미칠 수 있는 다양한 영향인자에 대한 변수해석이 수행되어야 하며, 다음 논문에서 이를 제시하였다.

## Acknowledgement

This research was supported by a grant from a Strategic Research Project “Development of Extreme Cold Region Ground Stabilization Technology” funded by the Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology.

## References

1. Lee, Y. (2003), “Design and Manufacturing of Composite Rigmat for Temporary Road in Development of Oil Fields”, *Geotechnical Engineering*, Vol.19, No.8, pp.31-37.
2. Lee, S., Hong, G., Jo, S. and Sim, Y. (2007), “Design and Manufacturing of Composite Rigmat for Temporary Road in Development of Oil Fields”, *Proceedings of KSCE*, KSCE, pp.667.
3. Lee, J. and Bag, Y., Kim, Y., Han, J., Kang, J., Oh, M. and Kwon, H. (2012), *Development of Extreme Cold Region Stabilization Technology(III)*, KICT Research Report, pp.96-97.
4. ABAQUS (2003), *Analysis User's Manua(Version 6.4)*, ABAQUS Inc., USA, 17.4.2-1.
5. Chen, S., Aref, J., Chiewanichakorn, M. and Ahn, I. S. (2007), “Proposed Effective Width Criteria for Composite Bridge Girder”, *Journal of Bridge Engineering*, Vol.12, No.3, pp.325-338.
6. Lee, N. H. (2004), “Thermal Buckling Behavior of continuous Welded Rail Track”, *Steel Structures*, Vol.4, pp.111-119.
7. Hammons, M. I. (1998), *Advanced Pavement Design : Finite Element Modeling for Rigid Pavement Joints, Report II : Model Development*, Washington Department of Transportation,

- 8-2.
8. Yen, S. T. and Lee, Y. H. (2007), "Mechanistic analysis of a slab track system and its applications", The Third International Conference on Structural Engineering, *Mechanics and Computation*, Capetown, pp.1-6.
  9. Zhan, Y. G. (2012), "Modeling Beams on Elastic Foundations Using Plate Elements in finite Element Method", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.17, pp.2063-2068.
  10. Eisenmann, G. L. (2000), *Feste Fahrbahn für Schienenbahnen, Sonderdruck aus Benton Kalender*, Ernst & Sohn.
  11. Das, Braja M. (2003), *Principles of Foundation Engineering (Fifth Edition)*, Thomson, pp.223.