

# 모바일 하버 컨테이너 적재 유도 시스템에서 롤러 가이드 적용 및 해석

오 태 오, 박 정 홍, 김 광 훈\*, 손 권†  
부산대학교 기계공학부, \*부산대학교 기계기술연구원

## Analysis of a Roller Guide Container Stacking System Applicable to the Mobile Harbor

Tae-Oh Oh, Jung-Hong Park, Kwang-Hoon Kim\*, Kwon Son†

School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

\*Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received June 2, 2011; revision received August 18, 2011)

**ABSTRACT:** The purpose of this study is to evaluate a simulation model of a stacking guidance system (SGS) with a roller guide applicable to the mobile harbor. The study used a small-scale model (1/20) made of wood with rollers in order to compare the dynamic analysis with experiment results. The law of similarity was applied for the validation of the scaled model. In order to construct a more realistic simulation model, the damping coefficient of the dynamic model was adjusted to 0.5 Ns/mm for the wood-to-wood contact condition based on the experimental results. Using this validated model, dynamic simulations were also carried out for containers of 20, 30, and 40 tons. The results showed that the reaction force of the roller guide was increased from 74.7 kN to 91.2 kN as the weight of container increased. For the design of a roller guide for SGS, the results obtained in this study can be used to reduce the reaction force by employing a rubber roller or a highly damped rotational joint.

**Key words:** Dynamic analysis(동역학 해석), Mobile harbor(모바일 하버), Stacking guidance system(적재 유도 시스템), Law of similarity(상사법칙)

### 기 호 설 명

$g$  : 중력가속도 [ $m/s^2$ ]  
 $l$  : 컨테이너의 길이 [ $m$ ]  
 $m$  : 컨테이너의 질량 [ $kg$ ]  
 $v$  : 컨테이너의 낙하속도 [ $m/s$ ]

$\psi$  : 적재 유도가이드와 수직축사이의 각 [ $^\circ$ ]

### 하첨자

$c$  : 실제 컨테이너  
 $e$  : 상사된 컨테이너

### 그리스 문자

$\rho$  : 컨테이너의 밀도 [ $kg/m^3$ ]

### 1. 서 론

† Corresponding author

Tel.: +82-51-510-2308; fax: +82-51-512-9835

E-mail address: kson@pusan.ac.kr

물류 수송의 효율성 향상을 위해 1만 TEU(Twenty Equivalent Unit)급 이상으로 선박이 대형화되고 있다.<sup>(1)</sup> 하지만 기존의 중·소 항만의 경우 알은 수

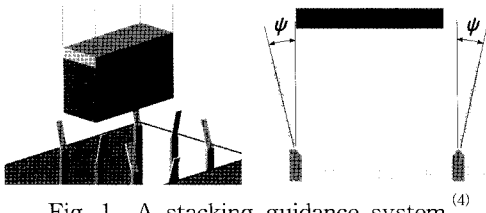


Fig. 1 A stacking guidance system.

심과 낮은 물류 처리속도로 인해 선박들이 해상에 대기하는 등의 손실을 초래하고 있다.

이에 따라 국내에서는 근해에서 항만을 대체하는 모바일 하버(Mobile Harbor, MH) 개발 사업이 진행 중이다. 모바일 하버는 선박이 항만에 접안하지 않고 작은 항만이 직접 선박으로 이동해 선적 및 하적을 하는 새로운 해상 운송수단이며, 기존 항만의 중설과 준설 작업 없이 선적 및 하적을 할 수 있어 항만의 효율성을 증대시킬 수 있다.<sup>(2)</sup>

해상에서 모바일 하버는 각각 세 가지의 병진운동(surging, swaying, heaving)과 회전운동(rolling, pitching, yawing)을 한다.<sup>(3)</sup> 이 운동에 의해 모바일 하버는 지상에서와는 달리 기울어지거나 상·하 운동을 하므로 컨테이너 선·하적 작업시 안전상의 문제와 크레인 작업의 효율에 문제가 발생하게 되고 이를 해결하기 위해 Fig. 1과 같은 적재 유도 시스템이 제안되었다.<sup>(4)</sup> 적재 유도 시스템은 Fig. 1과 같이 풍랑 등에 의해 컨테이너가 정확히 적재 셀 안으로 들어오지 못하더라도 유도 가이드를 이용하여 컨테이너가 적재 셀 안에 안착되도록 돕는 역할을 한다. 이로 인해 해상 조건에 의해 움직이는 모바일 하버에서의 선·하적 작업을 안전하고 효율적으로 할 수 있도록 고안되었다.

Kim et al.<sup>(4)</sup>은 바다의 풍랑 상태인 해상조건 3에서 모바일 하버의 운동 중 가장 큰 영향을 미치는 롤링(rollong)과 히빙(heaving)<sup>(5-7)</sup>만을 고려하여 동역학 해석 모델을 구축하였다. 이를 이용하여 컨테이너 적재 유도 가이드의 회전각에 따른 진입 여유 공간과 최대 반력을 계산하여 수직축을 기준으로 20° 내외의 유도각이 적절함을 제시 하였다.

그러나 판 형태의 유도 가이드 암(arm)에 20~40 ton의 컨테이너 하중이 점 접촉이나 선 접촉으로 가해질 경우 내구성과 변형, 파단 등의 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 적재 유도 시스템(stacking guidance system, SGS)에 일반 셀 가이드와 롤러를 적용한 셀 가이드 적재 유도 시스템에 대한 설계 및 해석을 수

행하고자 하였다.

롤러를 적용한 셀 가이드의 동역학적 시뮬레이션과 상사 모델을 이용한 실험을 통해 두 모델을 비교 검증하는 방법으로 연구를 수행하였으며, 향후 적재 유도 시스템 개발 시 적용 가능성과 동역학적 평가 시뮬레이션 모델을 제시 하는 것이 본 연구의 목적이다.

## 2. 연구 방법

본 연구에서는 컨테이너가 일정한 속도로 하강했을 때 적재 유도 가이드에 미치는 반력을 실험을 통해 검증하고자 함이다. 해상의 선박은 롤링과 히빙의 영향으로 인한 관성력이 작용한다. 하지만 선체와는 달리 크레인에 의해 제어되는 스프레더(spreader)는 이러한 외력으로 부터 영향을 받지 않고, 항상 수직운동만을 하도록 구속된다고 가정하였다. 따라서 ADAMS(MSC.Software, ver. 2005R, USA) 모델에서는 실험과 동일한 조건을 부여하기 위해 운동하는 부유체는 고려대상에서 제외하였다.

유도 가이드의 동역학적 해석 모델링과 모델의 검증을 위해 실제 크기보다 1/20로 축소된 상사 모델을 사용하여 실험을 수행하였다. 동역학적 해석 모델은 ADAMS를 사용하여 모델을 구현하고 시뮬레이션을 수행하였다. 유도 가이드는 롤러가 부착된 롤러형태와 롤러가 없는 형태 두 가지 타입에 대해 유도 가이드를 설계하고 해석 결과를 비교하였다. 그리고 기하학적으로 축소한 모델이 역학적으로도 상사하게 하기 위해 상사 식을 적용하였다. 이를 컨테이너 낙하 속도 결정 및 상사모델 해석에 적용하였다. 그리고 축소된 ADAMS 모델을 바탕으로 실제 축소 모델을 제작하고 모델 검증을 위한 실험을 수행하였다.

### 2.1 유도 가이드 모델링

적재 유도 시스템에서 유도 가이드는 적재 시 모바일 하버 선체의 요동에 의하여 컨테이너가 적재되는 위치에서 벗어나지 않도록 적재 셀 네 곳에 보조 암(arm)을 부착한 형태이다. 유도 가이드는 Fig. 2와 같이 롤러 부착 타입과 롤러가 없는 타입 2가지에 대해 ADAMS로 모델링하여 해석 결과를 비교하였다. 해석에서 유도 가이드와 컨테이너와의 충돌이 많이 발생하기 때문에 본 연구에서는 유도 가

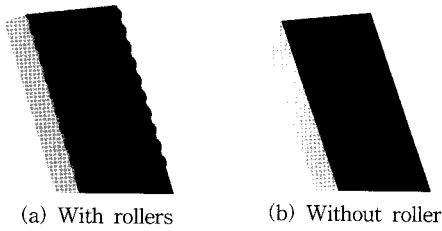
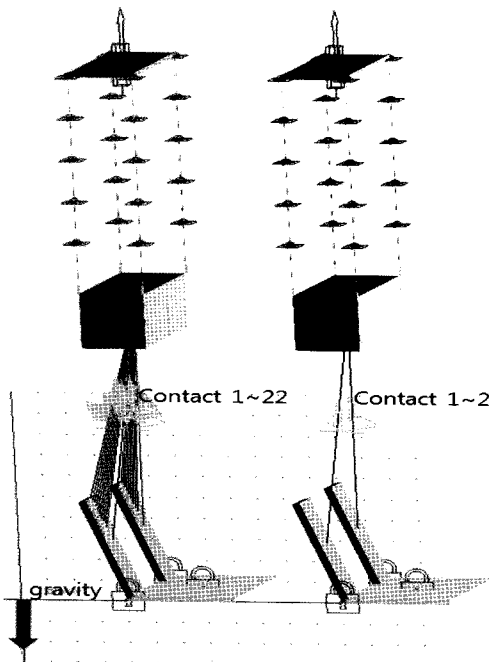


Fig. 2 Guidance system with/without rollers.



(a) With rollers view (b) Without roller view

Fig. 3 Loading simulation model(ADAMS).

이드가 받는 반력을 주요 측정 변수로 설정하였다. ADAMS 모델에서 유도 가이드가 받는 힘은 가이드와 컨테이너 고정 셀을 연결하는 조인트에 작용하는 반력이다.

컨테이너 모델링 작업은 한국산업표준(KS TISO 1496-1, 2003)<sup>(8)</sup>의 컨테이너 사양을 기준으로 하였다. 그리고 상사 실험을 위해 실제 컨테이너 폭 2.45 m, 길이 6 m, 높이 2.65 m, 그리고 총중량 24 ton TEU 모델을, 폭 0.12 m, 길이 0.3 m, 높이 0.13 m, 총중량 0.66 kg의 모델로 1/20로 축소하였다. 유도 가이드 역시 축소된 컨테이너에 맞도록 폭 0.014 m, 길이 0.077 m, 높이 0.25 m로 수직축에 20° 기울어진 상태로 모델링하였다. 롤러 타입의 경우 반경 0.0045 m, 길이

Table 1 Impact force and Coulomb friction parameters

Impact force parameters	
Stiffness(N/mm)	100.0
Damping coefficient(Ns/mm)	1.5
Penetration depth(mm)	0.1
Coulomb friction parameters	
Static coefficient	0.3
Dynamic coefficient	0.1

0.077 m인 롤러를 유도 가이드 상단부에 좌·우 10개씩 모델링하였다.

Fig. 3은 ADAMS를 이용하여 구축된 해석 모델이다. 모델에서 컨테이너와 스프레더 사이에는 실제 와이어와 같은 거동을 구현하기 위해서 다분절 와이어로 모델링하였고 다분절 와이어는 질량이 미미한 실린더와 회전 조인트로 구현하였다. 그리고 ADAMS 모델에서는 강체(rigid body)만을 사용했기 때문에 스프레더에 의해 낙하되는 컨테이너가 다른 물체에 충돌했을 때 발생할 수 있는 작용력을 상쇄시키기 위해 컨테이너와 접촉하는 가장 말단의 실린더에는 스프링 요소를 사용하여 신뢰성 있는 결과를 얻고자 하였다.

컨테이너의 낙하운동은 조인트 모션을 이용하여 구현하였다. 컨테이너와 와이어로 연결되어 컨테이너를 지탱하고 있는 스프레더에 낙하 방향의 병진 조인트를 설치하고 낙하 방향으로 조인트 모션을 주어 원하는 속도로 낙하할 수 있도록 하였다. 다음으로 컨테이너와 적재 유도 가이드 사이의 접촉 조건을 Table 1과 같이 설정하였고 시뮬레이션 해석 시간 간격(step size)은  $10^{-4}$ 초이며 1초 동안의 운동을 해석하였다.

해석 시간은 적재 공간 하부로부터 일정한 높이에서 낙하하여 적재가 완료되는 시점까지로 해석하지만 실험과 비교하기 위한 과정이기 때문에 중점적으로 고려하는 접촉반력은 전체 해석 시간에 비해 매우 작으므로 나머지 시간은 배제하여 해석하는 것으로 가정하였다.

## 2.2 상사 실험

실제 컨테이너와 축소 모델에 대한 상사를 위해 식(1)과 같은 상사 식을 적용하였다.<sup>(9)</sup>

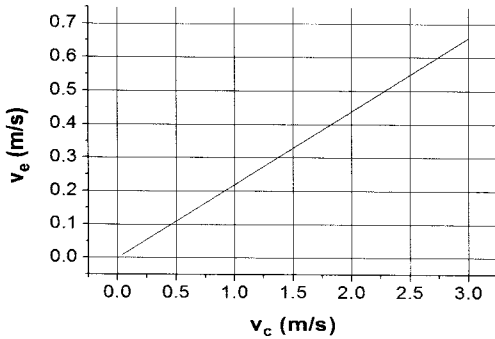


Fig. 4 Velocity conversion graph applied by similarity law.

$$\frac{m_c g}{\rho_c v_c^2 l_c^2} = \frac{m_e g}{\rho_e v_e^2 l_e^2} \quad (1)$$

여기서  $m$ 은 질량,  $g$ 는 중력가속도,  $\rho$ 는 밀도,  $v$ 는 낙하속도,  $l$ 은 컨테이너의 길이, 그리고 하첨자  $c$ 와  $e$ 는 각각 실제 컨테이너와 축소된 상사컨테이너를 뜻한다.

식(1)을 이용하여 축소된 모델의 낙하속도를 구해보면 Fig. 4와 같이 실제 낙하속도에 대응하는 상사속도를 계산할 수 있다.

상사 실험을 위한 컨테이너와 적재 유도 가이드 상사모델은 목재로 ADAMS 모델과 같이 1/20로 축소된 크기로 제작하였다.

실험에서 상사모델의 경우 실제 컨테이너 모델에 비해 탄성계수, 밀도 그리고 인장강도가 현저하게 낮기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다. 실험에 사용된 목재는 미송계열로 인장강도가 130 MPa, 압축강도는 51 MPa 그리고 비중은 0.7으로 목재의 규격 중 가장 단단한 것이다. 그리고 적재 유도 가이드는 수직축에 20° 기울여 컨테이너의 양 끝에 부딪히게 설치하였다. 그리고 롤러 부착 타입의 경우 반경 0.0045 m, 길이 0.077 m인 롤러를 유도 가이드 상단부에 좌·우 10개씩 설치하였다.

실험을 위한 장치는 Fig. 5와 같이 구성하였다. 컨테이너는 수평을 유지하도록 와이어로 고정하고 반대편에는 균형추를 설치하였다. 컨테이너 하역 시 동력원은 소형 모터를 이용하였다. 유도 가이드는 힘판 윗면에 미끄럼이 없이 고정하였고 하역 시 걸리는 힘은 힘판(KISTLER 9285)을 이용하여 측정하였다. 힘판에서 나온 신호는 8채널 전용 앰프(KISTLER

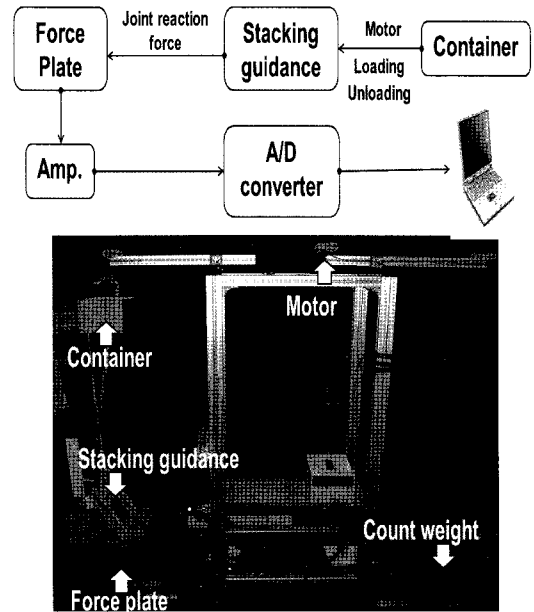


Fig. 5 Experimental set-up.

9865A)와 A/D 변환기(VISOL vsad-101-usb-v2)를 이용하여 이진화 하였다. 데이터 획득 및 처리는 상용 소프트웨어인 KwonGRF(Visol Corp.)을 사용하였다.

실험 조건은 정지 상태에서 정상상태의 낙하 속도를 줄 수 있도록 하기 위해 초기 높이를 0.4 m로 설정하였다. 하역 시 낙하 속도는 상사 된 속도 범위 중 최고속도인 0.657 m/s를 적용하여 실제보다 가혹한 조건에서의 반력을 알아보려고 하였다. 그리고 실험은 각각 롤러 부착 타입과 롤러가 없는 타입에 대하여 15회씩 반복 실험을 하였다.

### 3. 상사 실험 결과 및 모델 파라미터 조정

#### 3.1 상사 실험 결과

획득한 데이터를 정리·분석하여 힘판에 측정된 조인트 반력을 Fig. 6에 그리고 평균값과 표준편차를 시뮬레이션 결과와 함께 Table 2에 제시하였다. Table 2에서 실험과 시뮬레이션 모두

롤러가 있는 경우가 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 실험의 경우 롤러가 있는 경우가 롤러가 없는 경우에 비해 28% 높게 나왔다. 시뮬레이션의 경우 롤러가 있는 경우가 없는 경우에 비해 68% 정도 조인트 반력이 크게 나타났고, 반력 자체가 실험에 비해 롤

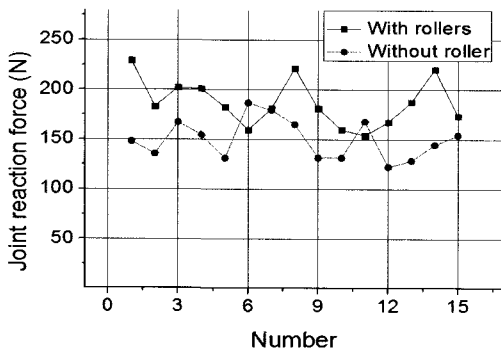


Fig. 6 Results of the experiments.

Table 2 Average and standard deviation obtained from unloading experiments

	Joint reaction force	
	Experiment	Simulation
With rollers	192±35 N	504 N
Without roller	150±20 N	300 N

러가 있는 경우는 2.6배, 롤러가 없는 경우는 2배로 매우 크게 나타났다. 실험에 비해 시뮬레이션에서 반력이 매우 크게 나타나는 것은 ADAMS 모델에서 실험과 유사한 입력값을 주지 못한 것으로 판단된다. 실제 상사 실험 모델이 모두 목재로 만들어졌고, 목재와 목재가 부딪치는 조건에서 반력값이 측정되었다. ADAMS 동역학적 해석 모델에도 동일하게 목재에 해당하는 물성값을 입력하였으나 보다 유사한 값을 위해서 컨테이너와 유도 가이드가 접촉할 때 목재 대 목재 접촉 조건을 보다 실제와 유사하게 수정해야 한다.

### 3.2 ADAMS 모델 파라미터 조정

상사 실험 결과를 추종하는 ADAMS 모델을 완성하기 위하여 접촉 조건에 영향을 미치는 파라미터 중 접촉 강성과 감쇠 계수를 변화시켜 보았다. 해석 결과, 두 가지 파라미터 중 결과에 영향을 크게 미치는 변수는 감쇠 계수로 나타났다. 따라서 접촉에 대한 감쇠 계수를 0.3~2.5 Ns/mm의 범위에서 0.1 Ns/mm간격으로 변화시켜 조인트의 반력을 분석하였다. Fig 7는 감쇠 계수에 따른 반력의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 감쇠 계수가 0.5 Ns/mm일 때 조인트 반력이 217 N과 157 N으로 실험 결과 값의 표준편차 범위 안에 들어가는 시뮬레이션 값을 얻

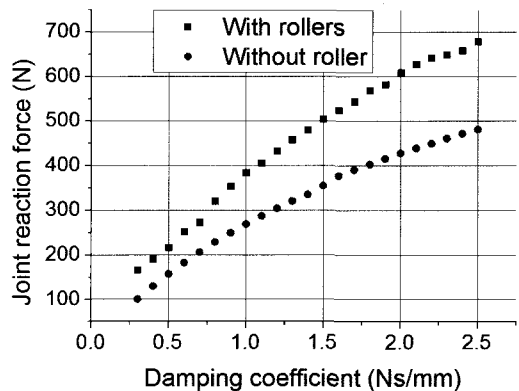


Fig. 7 Joint reaction force according to damping coefficient.

Table 3 Joint reaction forces according to mass

	Joint reaction force		
	0.554 kg (20 ton)	0.831 kg (30 ton)	1.108 kg (40 ton)
With rollers	2.00 N (74.7 kN)	2.23 N (83.6 kN)	2.43 N (91.3 kN)
Without roller	1.21 N	1.25 N	1.28 N

을 수 있었다.

이 과정에서 해석 시간 간격이 충분히 작지 않을 경우에는 변수에 대한 조인트 반력이 불규칙적으로 튀는 현상이 일어날 수 있어, 본 연구에서는 해석 시간 간격을  $10^{-4}$ 초를 기본 설정으로 하였고 경우에 따라서는  $10^{-6}$ 초로 하였다.

## 4. 컨테이너 무게에 따른 유도 가이드 해석

### 4.1 컨테이너 무게에 따른 반력 해석

상사 실험으로부터 얻어진 결과를 이용하여 ADAMS 모델의 파라미터를 조정함으로써 실험과 유사한 결과를 도출해 낼 수 있는 해석 모델을 완성하였다. 이 모델에 실제 컨테이너의 낙하속도(0.04 m/s)를 주고 컨테이너의 무게 변화에 따른 가이드의 반력을 분석해 보았다. 이것은 실제 컨테이너가 적재 유도 장치에 부딪혔을 때 조인트에 걸리는 힘의 크기를 파악함으로써 모바일 하버에 적용될 수 있는 적재 유도 가이드의 설계에 그 결과를 사용하고자 하였다. 컨테이너에 적용할 무게는 화물을 적

제하였을 경우로 가정하여 20, 30, 40 ton에 해석을 수행하였다. 그리고 식(1)을 이용하여 상사법칙에 따른 ADAMS 모델의 질량을 구하였다. 시뮬레이션 해석은 해석 시간 간격을  $10^{-4}$ 초로 하여 10초간 해석하였다.

#### 4.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

컨테이너 무게를 변화시켰을 때 유도 가이드에 걸리는 반력에 대한 해석 결과를 Table 3에 나타내었다. 컨테이너의 무게가 20, 30, 40 ton일 때 상사 모델의 무게는 각각 0.55, 0.83, 1.11 kg이다. 그리고 무게 증가에 따른 롤러 부착 타입에 대한 상사 모델의 유도 가이드 반력은 각각 2.00, 2.23, 2.43 N으로 나왔으며, 상사식을 이용하여 실제 유도 가이드의 반력을 구해보면 각각 74.7, 83.6, 91.3 kN으로 나타났다.

롤러가 부착된 가이드의 반력이 큰 것은 조인트 자체의 무게 증가와 더불어 돌출된 구형의 롤러와 컨테이너가 충돌 시 생기는 접촉 각도에 따라 값이 달라진 것으로 보인다. 실제 시뮬레이션에서도 낙하위치를 조금씩 조정하여 접촉각을 달리해 본 결과 그 값이 크게 변화하는 것을 알 수 있었다. 향후 실제 적재 유도 시스템의 설계 시에는 조인트의 접촉각에 따른 반력을 최소화하기 위한 노력이 필요할 것으로 생각된다. 또한 유도 가이드에서 롤러가 돌출되는 부분을 최소화하거나 본 논문에서는 고려하지 않은 롤러를 고정하는 베어링을 고려할 수도 있을 것이다. 또한 롤러의 소재를 타이어와 같은 고무 소재의 롤러로 변경하면 조인트에 걸리는 하중을 줄일 수 있을 것으로 예측된다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 모바일 하버가 컨테이너 선·하역 작업을 안전하고 효율적으로 할 수 있도록 고안된 적재 유도 시스템에 대해 알아보았다. 특히 적재 유도 시스템 중 컨테이너를 셀 안에 안착되도록 돕는 역할을 하는 유도 가이드에 초점을 맞추어 가이드의 롤러 부착 유무에 따른 동역학적 해석 결과를 제시하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 롤러가 부착된 가이드가 롤러가 미부착된 가이드 보다 가이드에 걸리는 힘이 28% 크게 나타나 는 것을 확인하였다. 이것은 가이드 자중 증가와 컨테이너와 가이드 롤러 사이의 충돌 각도 때문인 것으로 확인하였다.

둘째, 상사 모델 실험과 ADAMS 모델의 비교·검증과 접촉조건의 조질을 통해 상사 실험 결과를 추종하는 동역학적 해석 모델을 제시하였다. 그리고 이 모델에 실제 충돌 속도를 적용하고 컨테이너 중량 변화에 따른 가이드에 작용하는 힘을 알아보았다. 컨테이너의 중량이 증가할수록 롤러 부착에 따른 영향이 증가하였다.

모바일 하버에서 효율성 증가를 위해 하역속도 증가는 피할 수 없는 사실이다. 따라서 롤러가 없는 경우 즉 판재로만 구성되어 있는 가이드의 경우 하역 속도 가속화에 따른 충돌부분 손상이나 변형에 대비해야 하고 본 연구가 기여할 것으로 기대된다. 그리고 이를 해결하기 위해 향후 가이드 설계 시 충돌 접촉각의 영향을 최소화하고 타이어와 같은 다른 재질의 롤러 등에 대한 다각적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

#### 후 기

본 연구는 부산대학교 자유과제 학술 연구비(2년)의 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Cho, Y. J., 2009, A study on statistical method for the light weight estimation of ultra large container ships, *Journal of the Korean Society of Ocean Engineering*, Vol. 23, No. 3, pp. 14-19.
2. Kwak, B. M., 2009, Development of original technologies for mobile harbor, Reported by mechanical Engineering of KAIST.
3. Lee, S. G., 2008, Introduction of shipping calculation and stability, Pusan National University Press, pp. 11-154.
4. Kim, I. S., Kim, K. H. and Son, K., 2010, A container stacking system for the mobile harbor, *Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 22, No. 10, pp. 672-678.
5. Lee, H. Y., Kwak, Y. K. and Park, J. H., 2006, Wave-induced motion of a floating body in a harbor, *Journal of the Korean Society of Ocean Engineering*, Vol. 20, No. 2, pp. 36-40.
6. Kim, M. H. and Koo, B. J., 2005, Hydrodynamic interactions and relative motions of two

- floating platforms with mooring lines in side-by-side offloading operation, *Applied Ocean Research*, Vol. 27, No. 6, pp. 292-310.
7. Cho, S. H. and Bang, K. S., 2007, Motion of buoyant objects on regular waves, *Journal of the Korea Contents Society*, Vol. 7, No. 4, pp. 170-177.
  8. Korean Standards Association, 2003, KS T ISO 1496-1.
  9. Buckingham, E., 1914, On physically similar systems; Illustrations of the use of dimensional equations, *Physics*, Vol. 4, pp. 345-376.