

# 스프레더용 충격흡수기의 시스템 변화에 따른 최적설계

홍도관\* · 김동영\* · 한동섭\*\* · 안찬우\*\*\* · 한근조\*\*\*

\*동아대학교 생산기술연구소 특별연구원, \*\*동아대학교 대학원, \*\*\*동아대학교 기계산업시스템공학부 교수

## The Optimum Design of Impact Absorbing System for Spreader in System Variations

Do-Kwan Hong\* · Dong-Young Kim\* · Dong-Seop Han\*\* · Chan-Woo Ahn\*\*\* · Geun-Jo Han\*\*\*

\*Industrial Technology Research Center, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

\*\*Graduated School of Mechanical Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

\*\*\*Division of Mechanical & Industrial Systems Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

**요 약 :** 본 연구에서는 항만하역장비인 스프레더용 충격흡수기의 개발을 위해 스프링과 오일댐퍼로 구성된 세 가지 형태의 모델에 대한 동적응답을 유한요소해석에 의해 수행하였다. 또한, 세 가지 모델의 충격흡수기에서 피스톤의 제한된 행정을 정적변수로 하고 목적함수인 충격에 대한 반력이 최소가 되도록 최적설계를 수행하였다. 본 연구의 결과로는 직렬식 2자유도계 모델의 반력이 가장 작게 나타났으며 그 다음으로는 1자유도계 모델, 병렬식 2자유도계 모델의 순으로 나타났다. 스프링상수와 감쇠계수의 변화가 반력에 미치는 영향을 확인하였으며, 최적설계 결과 각 모델에 대한 반력이 최소가 되는 스프링상수와 감쇠계수를 구하였다.

**핵심용어 :** 충격흡수기, 스프레더, 진동해석, 반력, 최적설계

**Abstract :** On this study, to develop the impact absorbing system for spreader, we operated the dynamic response for models of three types consisting of spring and oil damper by the finite element analysis. Also, in the three types of impact absorbing system, we set the restricted stroke of piston to the static variables and the optimum design was operated to have the minimum value of the reaction force for the impact. As the result, the direct model of two degree of freedom system has lowest value, the model of one degree of freedom system has higher value than that and the parallel model of two degree of freedom system has the highest value. And we studied the effect that the change of spring constant and damping coefficient affect to the reaction force and as the result of the optimum design, we found that reaction force has the lowest value in the each of models.

**Key words :** Impact absorbing system, Spreader, Vibration analysis, Reaction force, Optimum design

## 1. 서 론

현재 항만을 통한 수출입 물동량은 거의 대부분 컨테이너를 사용하여 처리하고 있으며, 매년 컨테이너 물동량이 꾸준히 증가함에 따라 항만시설확충이 요구되어 진다.<sup>(1)</sup> 이에 따라 항만하역 장비인 스프레더의 수요가 증대할 것으로 기대되는데, 스프레더가 컨테이너와 체결시에 트루스트 락과 컨테이너 코너캐스팅부에 충격이 발생하게 된다. 이로 인해 트루스트 락, 단자의 핀, 플리퍼 등 여러 부품들의 손상으로 인한 스프레더의 수리와 충격으로 인한 소음으로 작업자의 작업능률을 떨어뜨려 하역생산성 저하와 자동항만화를 저해하게 된다. 따라서 항만하역 효율의 증대를 위해 스프레더의 취약부분인 트루스트 락에 대한

보호 및 효과적인 충격흡수기 개발의 필요성이 요구되어진다.

이론적으로는 동흡진기의 충격응답에 관한 기초 연구<sup>(2)</sup>가 수행되었고, 항만의 스프레더에 대한 충격흡수기에 대한 실제적인 연구는 주로 제작회사에서 수행되고 있다. 대표적으로 R社에서는 충격흡수기로 고무완충기를 이용하고 최대반력의 변화를 진동가속도를 이용한 연구를 수행하였으나 최대반력을 일정하게 할 수 없으며, B社에서는 유압댐퍼를 이용한 충격반력으로 평가하는 등의 연구가 수행되어 왔다.

따라서 본 연구에서는 스프링과 오일댐퍼로 구성된 세 가지 형태의 크레인 스프레더용 충격흡수기를 모델에 대하여 충격이 가해졌을 때의 동적응답을 수행하였다. 또한 각 충격흡수기 모델에 대해 피스톤의 제한된 stroke를 정적변수로 하고, 설계변수를 스프링상수와 감쇠계수로 하여 충격흡수기와 스프레더가 결합되는 부분의 반력을 목적함수로 최적설계<sup>(3)-(5)</sup>를 수행하였으며, 세 가지 형태의 충격흡수기 모델에 대하여 최적의 스프링상수와 감쇠계수 및 반력의 크기를 구하였다.

\* 정회원, vibhong@empal.com, 051)200-6716

the\_lion@hanmail.net, 051)200-6716

\*\* 정회원, dshan@donga.ac.kr, 051)200-6853

\*\*\* cwahn@daunet.donga.ac.kr, 051)200-7643

\*\*\* 정회원, gihan@daunet.donga.ac.kr, 051)200-7650

## 2. 충격흡수기

### 2.1 충격흡수기의 세 가지 모델

충격흡수기는 총 세 가지의 모델이며, 1자유도계 충격흡수기인 모델 I과 직렬식 2자유도계인 모델 II, 그리고 병렬식 2자유도계인 모델 III으로 나타내었다.

#### 2.1.1 충격흡수기 모델 I

Fig. 1은 질량(=피스톤), 스프링, 감쇠를 각각 1개씩 가지고 있는 1자유도계 충격흡수기의 모델을 나타낸다.

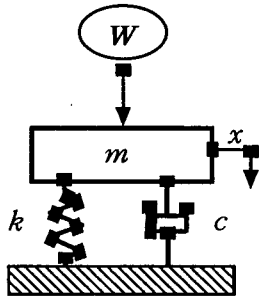


Fig. 1 Model I of impact absorbing system

Fig. 1의 1자유도계 모델의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = W \quad (1)$$

#### 2.1.2 충격흡수기 모델 II(직렬식)

Fig. 2는 질량(=피스톤), 스프링, 감쇠가 각각 2개가 직렬구조인 2자유도계의 충격흡수기이다. Fig. 2의 직렬식 2자유도계 모델의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m_1\ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) = W \quad (2)$$

$$m_2\ddot{x}_2 + c_2\dot{x}_2 + k_2x_2 - c_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_1(x_2 - x_1) = 0 \quad (3)$$

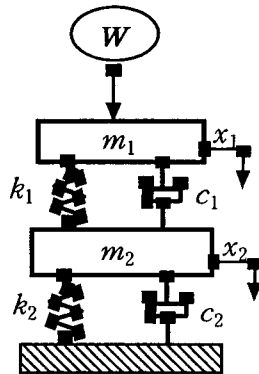


Fig. 2 Model II of impact absorbing system

#### 2.1.3 충격흡수기 모델 III(병렬식)

Fig. 3은 각각 2개의 질량(=피스톤)과 스프링, 그리고 감쇠를 가지는 2자유도계 모델이지만 모델 II와는 달리 감쇠를 고려해 볼 때 두 질량이 서로 영향을 주지 않는 병렬구조로 되어있다.

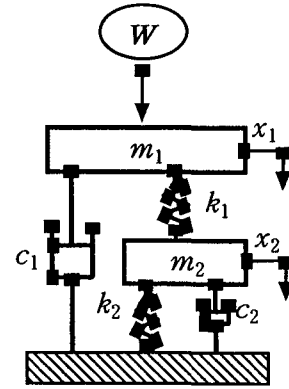


Fig. 3 Model III of impact absorbing system

Fig. 3은 병렬식 2자유도계 모델의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m_1\ddot{x}_1 + c_1\dot{x}_1 + k_1(x_1 - x_2) = W \quad (4)$$

$$m_2\ddot{x}_2 + c_2\dot{x}_2 + k_2x_2 = k_1(x_1 - x_2) \quad (5)$$

## 3. 치수최적설계

### 3.1 최적화의 정식화

Minimize :

$$f(x) = \text{Reaction force} \quad (6)$$

Subject to :

In case of model I

$$\frac{x_{\max}}{x_{al}} - 1 \leq 0 \quad (7)$$

In case of model II & model III

$$\frac{x_{1\max}}{x_{1al}} - 1 \leq 0 \quad (8)$$

$$\frac{x_{2\max}}{x_{2al}} - 1 \leq 0 \quad (9)$$

식 (6)의  $f(x)$ 는 목적함수로 최소화 기준이 되는 반력을 나타내고, 식 (7)에서  $x_{al}$ 는 모델 I의 상태변수인 피스톤의 허용변위를 나타내며, 스프레더의 구조를 고려하여 충격흡수기 변위를 0.05m로 제한하였다. 식 (8)~(9)의  $x_{1al}$ ,  $x_{2al}$ 은 모델 II, III의 상태변수인 피스톤 1과 피스톤 2의 허용변위를 나타내며 각각 0.05 m, 0.0125 m로 제약조건을 설정하였다. 이때  $x_{\max}$ ,  $x_{1\max}$ ,  $x_{2\max}$ 는 매 반복회의 피스톤의 최대변위이다.

### 3.2 최적설계 알고리즘

목적함수와 제약조건을 가진 제약 최적화 문제는 비제약 문제를 논리적으로 확장한 것으로 볼 수 있다. 최급강하법은 목적함수의 경사도를 계산하여 탐색방향을 구하는데 사용하며,

이 경사도 벡터는 점  $x^*$ 에서 함수  $f(x)$ 의 최대 증가를 방향을 나타낸다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\nabla f(x) = \left[ \frac{\partial f(x^p)}{\partial x_i} \right] = c^{(p)} \quad (10)$$

여기서,

$i$  : 설계변수의 수

$p$  : 설계변수가 바뀔 때마다 벡터의 계산단계

$x^p$  : 설계변수 값

$c^p$  : 설계변수 값이 설정되었을 때 목적함수의 미분 값

이와 같은 경사도 벡터의 성질을 이용하여 제약 최적화 문제에 대해서 First order method를 이용하여 최적이 되는 각 설계변수를 구하였으며 Fig. 4와 같이 나타내어진다.

### 4. 유한요소해석

#### 4.1 유한요소 모델링

모든 모델링과 해석은 상용 유한요소해석 소프트웨어인 Ansys

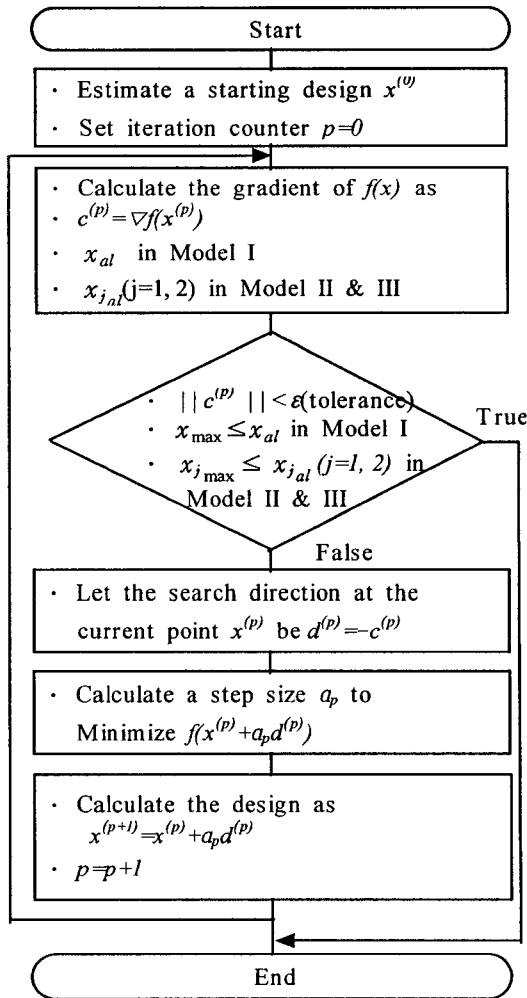


Fig. 4 Flow chart

Table 1 Initial condition of model I, II, III

Item list	Description( model I )	
Weight(ton)	5	
Drop height(m)	0.2	
Maximum stroke (x)(m)	0.05	
Item list	Description	
	Model II	Model III
Weight(ton)	5	5
Drop height(m)	0.2	0.2
Maximum stroke (x <sub>1</sub> )(m)	0.05	0.05
Maximum stroke (x <sub>2</sub> )(m)	0.015	0.015

5.7<sup>(6),(7)</sup>에서 이루어졌으며, 해석에는 Combination, Contact 요소를 사용하였다. 해석에 고려된 모든 모델의 초기조건을 Table 1에 나타내었으며, 모델 II와 모델 III의 경우는 초기조건을 동일하게 적용하였고, 스프레더의 한쪽부분이 받는 5 ton의 충격 하중과 낙하높이를 실제 조건을 적용하여 시간에 따른 충격반력응답을 구하기 위한 과도해석(Transient analysis)을 수행하였다.

#### 4.2 경계조건 및 하중조건

충격흡수기의 경계조건은 스프레더 부분과 체결되는 부분을 완전고정으로 하였으며, 모델 I의 경우에는 하부 부분과 피스톤의 연결부위를 스프링과 점성감쇠를 사용하였다. 또한 모델 II와 III의 경우에는 피스톤과 피스톤, 피스톤과 하부 부분을 각각 스프링과 점성감쇠를 사용하였다. 하중조건으로는 모든 모델의 상부 피스톤 부분에 수직방향의 충격하중을 가하였으며, Table 2에는 충격흡수기의 세 가지 모델에 대한 설계변수인 스프링상수, 감쇠계수와 상태변수인 제한변위의 초기값과 하한값, 상한값을 나타내었다.

Table 2 Range of design & state variables

Item list		Initial	Lower	Upper	
Model I	$m$ (kg)	13.5	-	-	
	S.V. $x$ (m)	-	-	0.05	
	D.V. $k$ (kN/m)	300	100	10,000	
		$c$ (kN·s/m)	250	10	10,000
Model II & III	$m_1$ (kg)	9	-	-	
	$m_2$ (kg)	4.5	-	-	
	S.V. $x_1$ (m)	-	-	0.05	
		$x_2$ (m)	-	-	0.015
	D.V. $k_1$ (kN/m)	300	100	10,000	
		$k_2$ (kN/m)	450	100	10,000
		$c_1$ (kN·s/m)	250	10	10,000
		$c_2$ (kN·s/m)	50	10	10,000

### 5. 결과 및 고찰

#### 5.1 모델에 따른 충격흡수기의 최적충격반력

##### 5.1.1 충격흡수기 모델 I의 최적충격반력

충격흡수기 모델 I은 Table 1~2의 초기조건을 주고 피스톤에 충격하중을 가하여 해석을 수행하였다.

Table 3에는 충격흡수기와 스프레더가 결합되는 부분의 반력을 최소화하는 최적의 스프링상수와 감쇠계수를 나타내었으며, 최적의 조건일 때의 최적 반력값을 나타내었다. Fig. 5~6은 충격하중이 가해질 때 감쇠계수와 스프링상수의 변화에 대한 충격흡수기 모델 I의 반력을 시간-하중 그래프로 나타내었다.

Table 3 The optimum result of model I

Design variables	Optimum
$k(\text{kN/m})$	665.01
$c(\text{kN}\cdot\text{s/m})$	217.66
State variable	Optimum
$x(\text{m})$	0.049
Objective function	
Reaction force(kN)	418.32

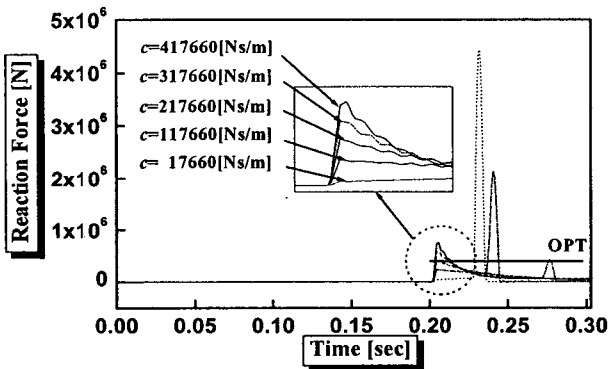


Fig. 5 Reaction force for change of damping coefficient

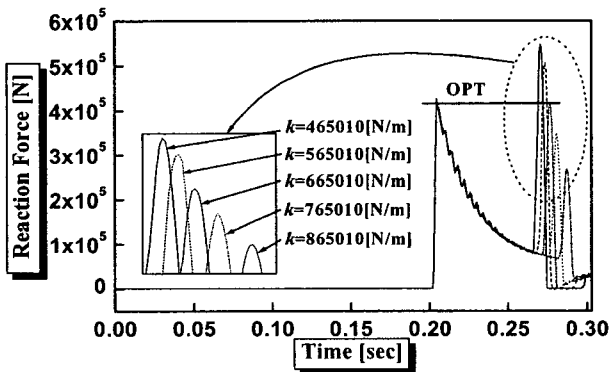


Fig. 6 Reaction force for change of spring constant

Fig. 5는 충격하중이 처음에 가해질 때 약 0.2 sec에 피스톤과 부딪히면서 반력이 발생하였으며 감쇠계수가 작아질수록 충격하중과 피스톤이 부딪히면서 발생하는 앞부분의 반력이 작아지고 피스톤이 실린더 바닥에 부딪힐 때 발생하는 뒷부분의 반력이 크게 발생하였다. Fig. 6은 스프링상수 변화에 따른 앞부분의 반력은 큰 영향이 없었으며 스프링 상수가 커질수록 뒷부분의 반력이 작게 발생하였다. 최적의 조건일 때 앞부분의 반력과 뒷부분의 반력이 같아지게 발생하였다.

##### 5.1.2 충격흡수기 모델 II(직렬식)의 최적충격반력

충격흡수기 모델 II는 Table 1~2에서와 같이 초기조건을 주고 첫 번째 피스톤( $m_1$ )에 충격하중을 가하여 해석을 수행하였다. 그리고, Table 4에는 충격흡수기와 스프레더가 결합되는 부분의 반력을 최소화하는 설계변수인 최적의 스프링상수와 감쇠계수를 나타내었으며, 최적의 조건일 때의 목적함수인 최적 반력값을 나타내었다.

Fig. 7~10은 충격하중이 가해질 때 충격흡수기 모델 II의 반력을 시간-하중 그래프로 나타내었으며, 최적조건일 때 0.2~0.3 sec 사이의 반력이 모두 비슷하게 발생하였다. Fig. 7에서 감쇠계수( $c_1$ )가 커짐에 따라서 충격하중과 피스톤( $m_1$ )이 부딪히면서 발생하는 앞부분의 반력과 피스톤( $m_1$ )과 피스톤( $m_2$ )이 부딪히면서 발생하는 중간 부분의 반력이 작게 발생하였고 피

Table 4 The optimum result of model II

Design variables	Optimum
$k_1(\text{kN/m})$	315.03
$c_1(\text{kN}\cdot\text{s/m})$	353.69
$k_2(\text{kN/m})$	447.35
$c_2(\text{kN}\cdot\text{s/m})$	302.5
State variables	Optimum
$x_1(\text{m})$	0.049
$x_2(\text{m})$	0.0149
Objective function	
Reaction force(kN)	390.38

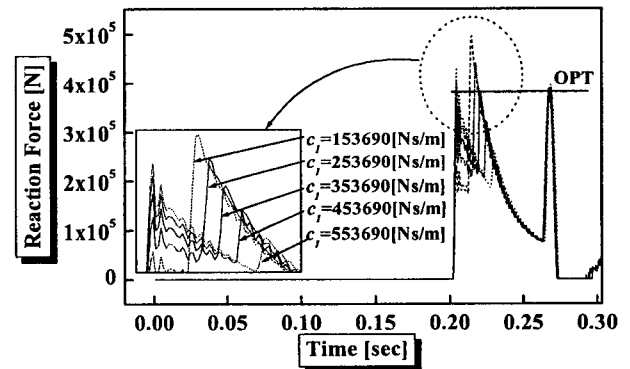


Fig. 7 Reaction force for change of damping coefficient( $c_1$ )

스톤( $m_2$ )과 실린더 부분이 부딪히면서 발생하는 뒷부분의 반력은 거의 일정하였다. Fig. 8은 감쇠계수( $c_2$ )가 커짐에 따라서 앞부분의 반력과 중간 부분의 반력이 크게 발생하였으며 뒷부분의 반력은 감소하였다. Fig. 9는 스프링상수( $k_1$ )가 커짐에 따라서 앞부분의 반력과 중간 부분의 반력이 작게 발생하였으며 뒷부분의 반력은 거의 일정하였다.

Fig. 10은 스프링상수( $k_2$ )가 커짐에 따라서 앞부분의 반력과 중간 부분의 반력이 일정하였으며 뒷부분의 반력이 다소 감소하였다. 스프링상수( $k_1$ )와 감쇠계수( $c_1$ )가 변화함에 따라서 충격하중과 피스톤( $m_1$ )이 부딪히면서 발생하는 앞부분의 반력과 피스톤( $m_1$ )과 피스톤( $m_2$ )이 부딪히면서 발생하는 중간 부분의 반력의 크기가 변화하였으며, 스프링상수( $k_2$ )와 감쇠계수( $c_2$ )가 변화함에 따라서 피스톤( $m_2$ )과 실린더 부분이 부딪히면서 발생하는 뒷부분의 반력의 크기가 변화하였다. 최적의 조건일 때 모델 I에 비해서 최대 발생하는 반력의 크기가 작게 발생하였으며 모델 I보다는 반력을 최소화할 수 있는 모델이다.

5.13 충격흡수기 모델 III(병렬식)의 최적충격반력

충격흡수기 모델 III는 Table 1~2에서와 같이 초기조건을 주고 피스톤( $m_1$ )에 충격하중을 가하여 해석을 수행하였다. 그리고, Table 5에는 충격흡수기와 스프레더가 결합되는 부분의 반력을 최소화하는 설계변수인 최적의 스프링상수와 감쇠계수를 나타내었으며, 최적의 조건일 때의 목적함수인 최적 반력값을 나타내었다.

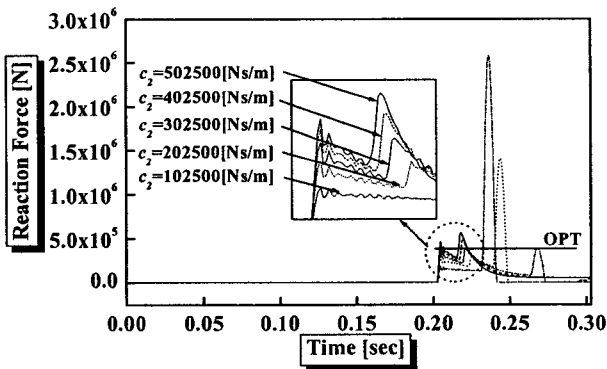


Fig. 8 Reaction force for change of damping coefficient( $c_2$ )

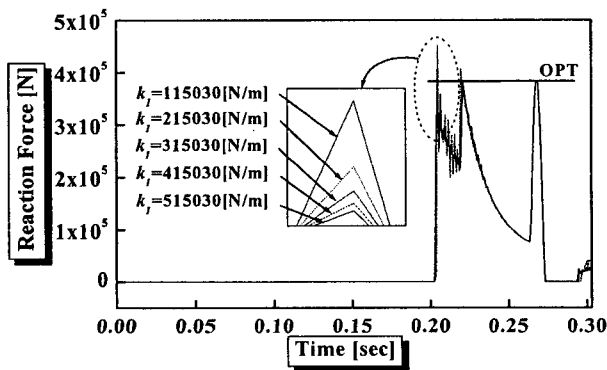


Fig. 9 Reaction force for change of spring constant( $k_1$ )

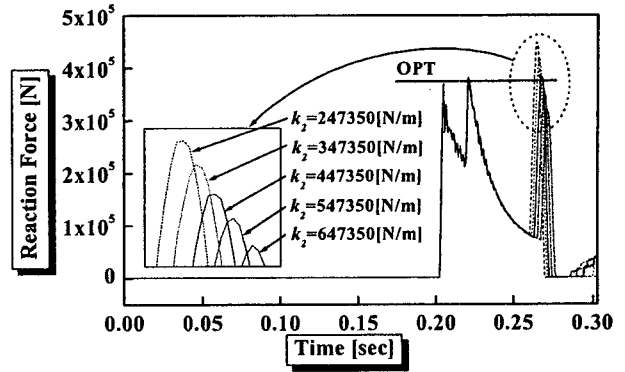


Fig. 10 Reaction force for change of spring constant( $k_2$ )

Fig. 11~14는 충격하중이 가해질 때 충격흡수기 모델 III의 반력을 시간-하중 그래프로 나타내었으며, 최적조건일 때 0.2~0.3 sec 사이의 반력이 모두 비슷하게 발생하였다. Fig. 11은 감쇠계수( $c_1$ )가 커짐에 따라서 충격하중과 피스톤( $m_1$ )이 부딪히면서 발생하는 앞부분의 반력이 다소 크게 발생하였으며 피스톤( $m_2$ )과 실린더 부분이 부딪히면서 발생하는 뒷부분의 반력은 작게 발생하였다. Fig. 12는 감쇠계수( $c_2$ )가 커짐에 따라서 뒷부분의 반력이 크게 발생하였으며 앞부분의 반력은 거의 일정하였다.

Table 5 The optimum result of model III

Design variables	Optimum
$k_1$ (kN/m)	233.96
$c_1$ (kN·s/m)	222.26
$k_2$ (kN/m)	576.45
$c_2$ (kN·s/m)	742.68
State variables	Optimum
$x_1$ (m)	0.049
$x_2$ (m)	0.0149
Objective function	
Reaction force(kN)	469.7

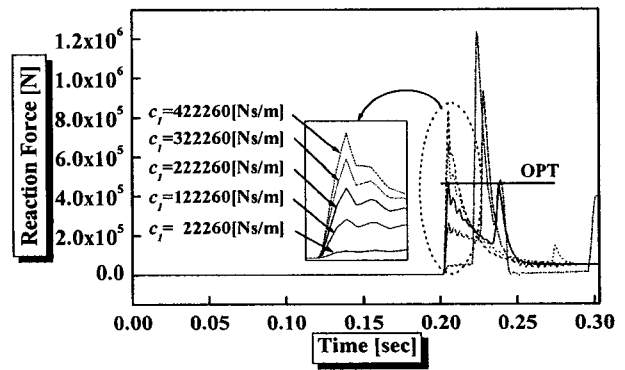


Fig. 11 Reaction force for change of damping coefficient( $c_1$ )

## 6. 결론

본 연구에서는 모델 I, II, III에 대해 스프링상수와 감쇠계수를 설계변수로 하고 반력을 목적함수로 하여 목적함수가 최소가 되는 치수최적설계를 수행하였으며, 그 결과 스프링상수, 감쇠계수, 반력에 대해 각각 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 스프레더용 충격흡수기 모델 I, II, III에 대하여 반력이 최소가 되는 스프링상수와 감쇠계수를 각각 제시하였다.
2. 모델 I, II, III 중에서 직렬식 모델 II의 반력이 가장 작게 나타났으며, 그 다음으로는 모델 I, 모델 III의 순으로 나타났다.
3. 모델 I의 경우에는 스프링상수가 변화함에 따라서 뒷부분의 반력이 변화하였으며, 감쇠계수가 변화함에 따라서 반력이 전체적으로 변화하였다.
4. 직렬식 모델 II의 경우에는 스프링상수( $k_1$ )와 감쇠계수( $c_1$ )가 변화함에 따라서 앞부분의 반력이 변화하였으며, 스프링상수( $k_2$ )와 감쇠계수( $c_2$ )가 변화함에 따라서 뒷부분의 반력이 변화하였다.
5. 병렬식 모델 III의 경우에는 스프링상수( $k_1$ )와 감쇠계수( $c_1$ )가 변화함에 따라서 전체적으로 반력이 변화하였으며, 스프링상수( $k_2$ )와 감쇠계수( $c_2$ )가 변화함에 따라서 각각 앞부분의 반력과 뒷부분의 반력의 크기가 변화하였다.
6. 향후 충격흡수기의 세 가지 모델에 대한 시작품의 시험을 통해 최적설계 해석결과를 검증할 것이다.

## 참고 문헌

- [1] 한국해양수산개발원(2000) : 해운통계요람
- [2] Egle. D. M.(1962) : An investigation of an impact vibration absorber, MS Thesis, Tulane University New Orleans, LA.
- [3] Jasbir S. Arora(1989) : Introduction to optimum design, McGraw-hill Book Company.
- [4] Egle. D. M.(1962) : An investigation of an impact vibration absorber, MS Thesis, Tulane University, New Orleans, LA
- [5] 안찬우, 한근조, 홍도관, 김동영, 서진(2002) : 스프레더용 충격흡수기의 시스템 변화에 따른 최적설계, 한국정밀공학회 춘계학술대회, pp. 791-794
- [6] Ansys element reference release 5.7
- [7] Ansys design optimization release 5.7

원고접수일 : 2002년 04월 29일  
원고채택일 : 2002년 08월 05일

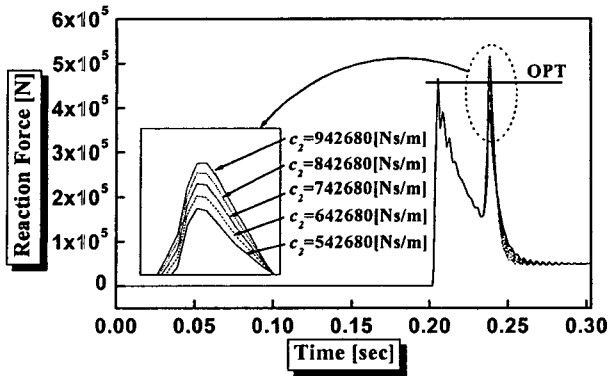


Fig. 12 Reaction force for change of damping coefficient( $c_2$ )

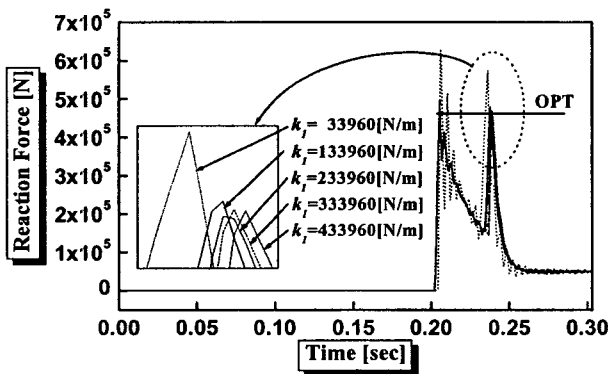


Fig. 13 Reaction force for change of spring constant( $k_1$ )

Fig. 13은 스프링상수( $k_1$ )가 작아짐에 따라서 앞부분의 반력은 감소하였으며 뒷부분의 반력이 크게 발생하였다. Fig. 14는 스프링상수( $k_2$ )가 커짐에 따라서 앞부분의 반력이 미소하게 감소하였으며 뒷부분의 반력은 거의 일정하였다. 스프링상수( $k_1$ )와 감쇠계수( $c_1$ )가 변화함에 따라서 전체적으로 반력이 변화하였으며, 스프링상수( $k_2$ )와 감쇠계수( $c_2$ )가 변화함에 따라서 각각 충격하중과 피스톤( $m_1$ )이 부딪히면서 발생하는 앞부분의 반력과 피스톤( $m_2$ )과 실린더 부분이 부딪히면서 발생하는 뒷부분의 반력의 크기가 변화하였다. 최적의 조건일 때 모델 I과 모델 II에 비해서 최대 발생되는 반력의 크기가 크게 발생하였다.

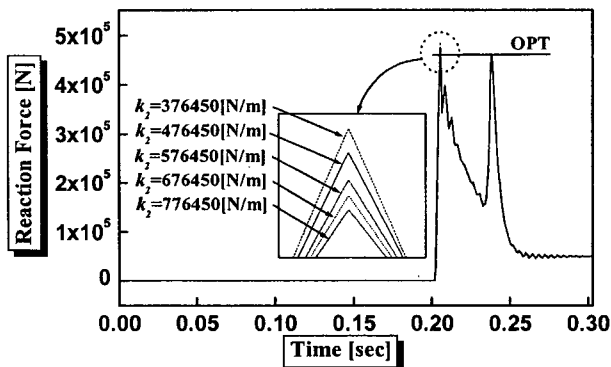


Fig. 14 Reaction force for change of spring constant( $k_2$ )