

동특성을 고려한 스프레더용 충격흡수기의 시스템 변화에 따른 최적설계

홍도관*, 김동영*, 안찬우#, 한근조**

The Optimum Design according to System Variation of Impact Absorbing System for Spreader Considering Dynamic Characteristic

Do-Kwan Hong*, Dong-Young Kim*, Chan-Woo Ahn#, Geun-Jo Han**

ABSTRACT

On this study, we operated the dynamic response for impact load of impact absorbing system for spreader by the finite element analysis and showed respectively the spring constant and the damping coefficient which the reaction force by impact was the lowest value for three types impact absorbing system according to the change of system, also we presented the change of impact reaction force according to the spring constant and the damping coefficient. Additionally, among the three types impact absorbing system according to the change of system, the reaction force of model II was the lowest value and the next model which has higher value than model II was model I and model III has the highest value in the three types.

Key Words : Impact absorbing system(충격흡수기), Spreader(스프레더), Vibration analysis(진동해석)
Reaction force(반력), Optimum design(최적설계)

1. 서론

현재 항만을 통한 수출입 물동량은 거의 대부분 컨테이너를 사용하여 처리하고 있으며, 매년 컨테이너 물동량이 꾸준히 증가함에 따라 항만시설확충이 요구되어 진다.¹ 이에 따라 항만하역 장비인 스프레더의 수요가 증대할 것으로 기대되는데, 스프레더가 컨테이너와 체결시에 트윈스트 락과 컨테이너 코너캐스팅부에 충격이 발생하게 된다. 이로 인해 트윈스트 락, 단자의 핀, 플리퍼 등 여러 부품들

의 손상과 그에 따른 스프레더의 수리와 충격으로 인한 소음으로 작업자의 작업능률을 떨어뜨려 하역 생산성 저하와 자동항만화를 저해하게 된다. 따라서 항만하역 효율의 증대를 위해 스프레더의 취약부분인 트윈스트 락에 대한 보호 및 효과적인 충격흡수기 개발의 필요성이 요구되어진다.

동흡진기의 충격응답에 관한 기초 연구²가 수행되었으며, 이러한 동흡진기에 대한 실제적인 적용은 다음과 같이 수행되고 있다.³ 대표적으로 R社에서는 고무완충기를 이용하여 측정된 충격가속도 값

2002년 7월 29일 접수
* 동아대학교 생산기술연구소
교신저자, 동아대학교 기계산업시스템공학부
Email : cwahn@daunet.donga.ac.kr, Tel : (051) 200-7643
** 동아대학교 기계산업시스템공학부

으로 최대충격반력에 대한 연구를 수행하였고, B社에서는 유압댐퍼를 이용하여 충격반력을 평가하는 연구 등이 수행되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 스프링과 오일댐퍼로 구성된 세 가지 형태의 크레인 스프레더용 충격흡수기 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 최적설계⁴를 수행하였으며, 세 가지 형태의 충격흡수기⁵ 모델에 대하여 최적의 스프링상수와 감쇠계수 및 반력의 크기를 제시하였다.

2. 충격흡수기

2.1 충격흡수기의 세 가지 모델

충격흡수기는 총 세 가지의 모델이며, 1자유도계 충격흡수기인 모델 I과 2자유도계인 모델 II, 그리고 모델 II를 변형시킨 2자유도계 충격흡수기를 모델 III으로 나타내었다.

2.1.1 충격흡수기 모델 I

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

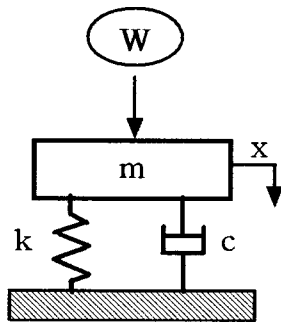


Fig. 1 Model I of impact absorber

Fig. 1의 1자유도의 운동방정식은 다음과 같다.

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

2.1.2 충격흡수기 모델 II

Fig. 2는 질량(=피스톤), 스프링, 감쇠를 각각 2개씩 가지고 있는 2자유도계의 충격흡수기이다. Fig. 2의 2자유도 운동방정식은 다음과 같다.

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

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

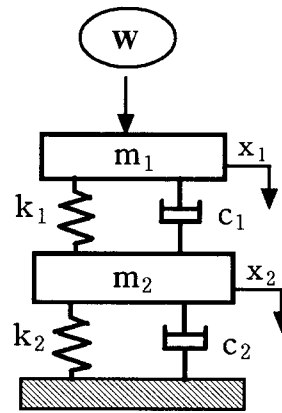


Fig. 2 Model II of impact absorber

2.1.3 충격흡수기 모델 III

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 구조로 되어있다.

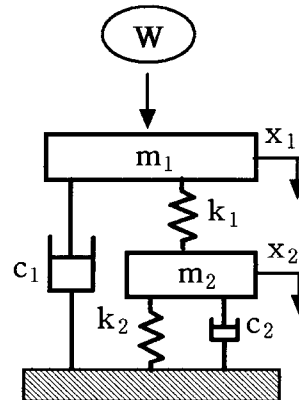


Fig. 3 Model III of impact absorber

Fig. 3은 모델 II를 변형시킨 2자유도 모델로서 운동방정식은 다음과 같다.

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

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 = k_1(x_1 - x_2) \quad (5)$$

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 x (piston)의 허용변위를 나타내며, 스프레더의 구조를 고려하여 충격흡수기 변위를 0.05 m로 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 최대변위이며 위의 허용변위는 실제 시제품 제작 시 고려할 치수이다.

3.2 최적설계 알고리즘

목적함수와 제약조건을 가진 제약 최적화 문제

는 비제약 문제를 논리적으로 확장한 것으로 볼 수 있다. 최속강하법은 목적함수의 경사도를 계산하여 탐색방향을 구하는데 사용하며, 이 경사도 벡터는 점 x^* 에서 함수 $f(x)$ 의 최대 증가율 방향을 나타낸다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

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

여기서,

i : 설계변수의 수

k : 벡터의 계산단계

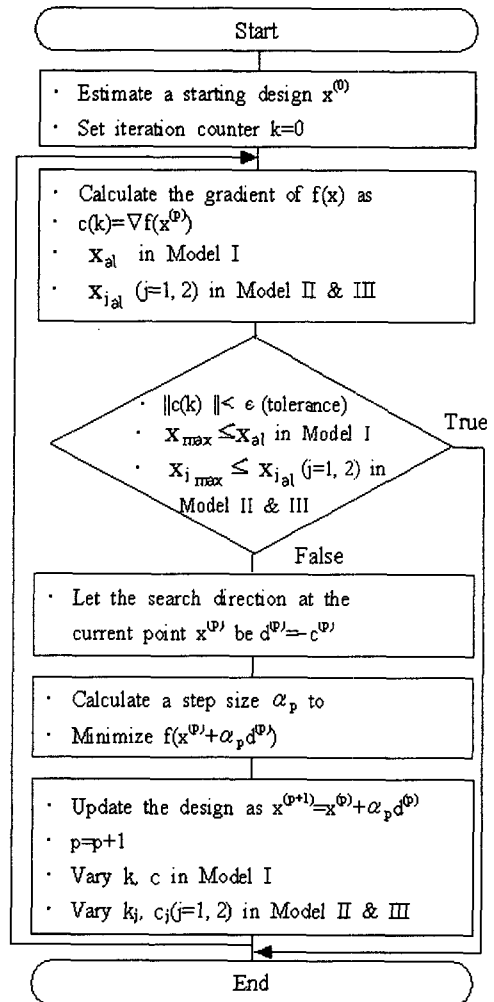


Fig. 4 Flow chart

이와 같은 경사도 벡터의 성질을 이용하여 제약 최적화 문제에 대해서 반복적 알고리즘을 Flow chart로 Fig. 4에 나타내었다.

4. 유한요소해석

4.1 유한요소 모델링

모든 모델링과 해석은 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS 6.1^{6,7}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 충격하중과 낙하높이를 실제 조건을 적용하여 시간에 따른 충격반력응답을 구하기 위한 과도 해석(Transient analysis)을 수행하였다.

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 ₁)(m)	0.05	0.05
Maximum stroke (x ₂)(m)	0.015	0.015

4.2 경계조건 및 하중조건

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

충격흡수기의 경계조건은 스프레더 부분과 체결되는 부분을 완전고정으로 하였으며, 모델 I의 경우에는 하부 부분과 피스톤의 연결부위를 스프링과 점성감쇠를 사용하였다. 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.

5. 결과 및 고찰

5.1 모델에 따른 충격흡수기의 최적충격반력

5.1.1 모델 I의 최적충격반력

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

Table 3에 충격흡수기와 스프레더가 결합되는 부분의 반력을 최소화하는 최적의 스프링상수와 감쇠계수를 나타내었으며, 또한 최적의 조건일때의 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 value	Optimum
k(kN/m)	1468
c(kN·s/m)	182.78
State value	Optimum
x(m)	0.049
Objective function	
Reaction force(kN)	369.99

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 스프링상수가 커질수록 뒷부분의 반력이 작게 발생하였다. 최적의 조건일 때 앞부분의 반력과 뒷부분의

반력이 동일하게 발생하였다.

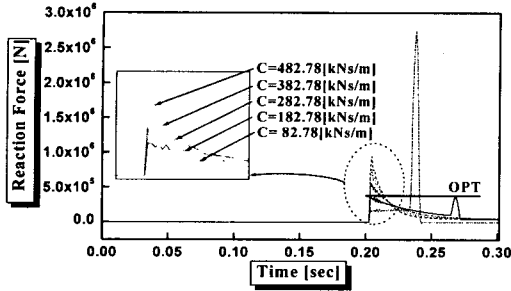


Fig. 5 Reaction force for the change of damping coefficient (c)

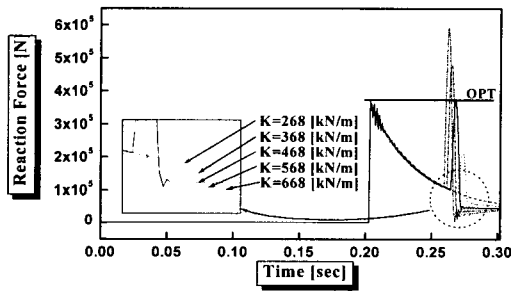


Fig. 6 Reaction force for the change of spring constant (k)

5.1.2 모델 II의 최적충격반력

충격흡수기 모델 II는 Table 2에서와 같이 초기 조건을 주고 첫 번째 피스톤(m_1)에 충격하중을 가하여 해석을 수행하였다. 그리고, Table 4에는 충격 흡수기와 스프레더가 결합되는 부분의 반력을 최소화하는 설계변수인 최적의 스프링상수와 감쇠계수를 나타내었으며, 또한 최적의 조건일때의 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_2)과 실린더 부분이 부딪히면서 발생하는 뒷부분의 반력이 다소 크게 발생하였다.

Fig. 8은 감쇠계수(c_2)가 커짐에 따라서 앞부분의 반력이 크게 발생하였으며 뒷부분의 반력은 작게 발생하였다. Fig. 9는 스프링상수(k_1)가 커짐에 따라서 앞부분의 반력이 크게 발생하였으며 뒷부분의 반력은 거의 일정하였다.

Table 4 The optimum result of model II

Design value	Optimum
k_1 (kN/m)	360.47
c_1 (kN·s/m)	1466
k_2 (kN/m)	465.61
c_2 (kN·s/m)	245.87
State value	Optimum
x_1 (m)	0.0476
x_2 (m)	0.0102
Objective function	
Reaction force(kN)	484.32

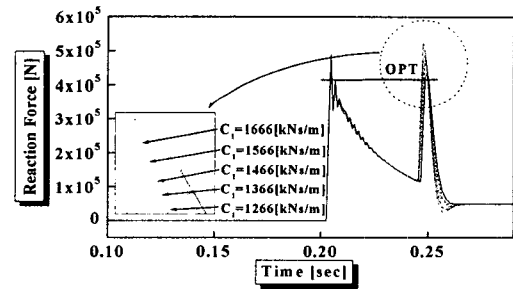


Fig. 7 Reaction force for the change of damping coefficient (c_1)

Fig. 10은 스프링상수(k_2)가 커짐에 따라서 앞부분의 반력은 일정하였으며 뒷부분의 반력이 다소 작게 발생하였다. 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.

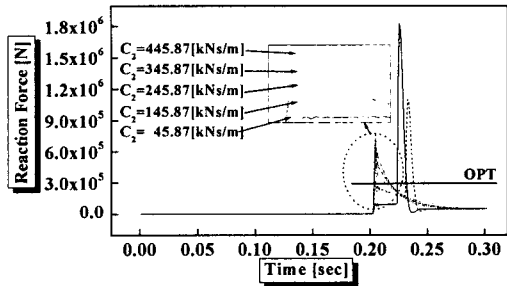


Fig. 8 Reaction force for the change of damping coefficient (c_2)

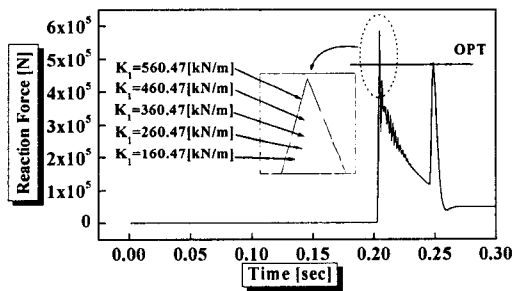


Fig. 9 Reaction force for the change of spring constant (k_1)

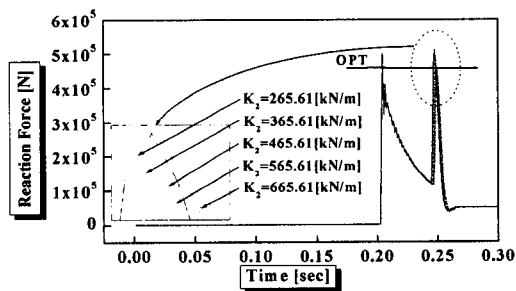


Fig. 10 Reaction force for the change of spring constant (k_2)

5.1.3 모델 III의 최적충격반력

충격흡수기 모델 III는 Table 1~2에서와 같이 초

기조건을 주고 피스톤(m_1)에 충격하중을 가하여 해석을 수행하였다. 그리고, Table 5에 충격흡수기와 스프레더가 결합되는 부분의 반력을 최소화하는 설계변수인 최적의 스프링상수와 감쇠계수를 나타내었으며 또한 최적의 조건일때의 목적함수인 최적반력값을 나타내었다. 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.

Table 5 The optimum result of model III

Design value	Optimum
k_1 (kN/m)	180.8
c_1 (kN·s/m)	230.13
k_2 (kN/m)	626.26
c_2 (kN·s/m)	1093.9
State value	Optimum
x_1 (m)	0.0047
x_2 (m)	0.0149
Objective function	
Reaction force(kN)	584.46

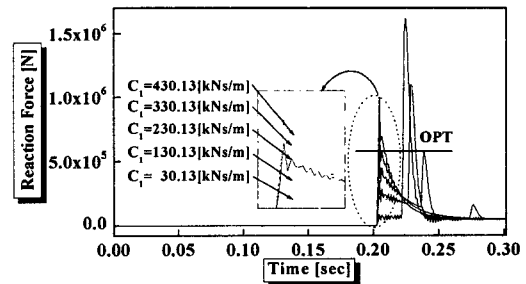


Fig. 11 Reaction force for the change of damping coefficient (c_1)

Fig. 11은 감쇠계수(c_1)가 커짐에 따라서 충격하중과 피스톤(m_1)이 부딪히면서 발생하는 앞부분의 반력이 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. Fig. 13은 스프링상수(k_1)가 커짐에 따라서 앞부분의 반력은 일정하였으며 뒷부분의 반력이 다소 작게 발생하였다.

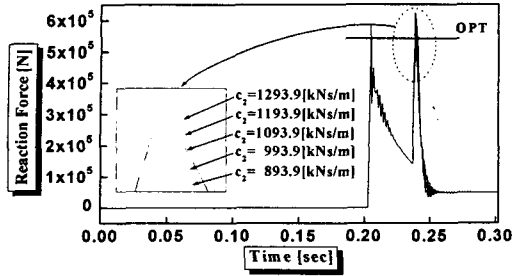


Fig. 12 Reaction force for the change of damping coefficient (c_2)

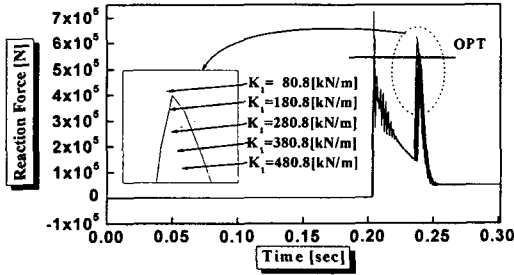


Fig. 13 Reaction force for change of spring constant (k_1)

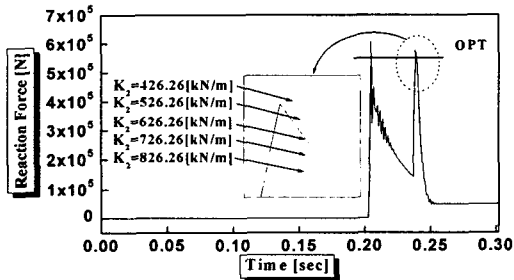


Fig. 14 Reaction force for change of spring constant (k_2)

Fig. 14는 스프링상수(k_2)가 커짐에 따라서 앞부분의 반력이 감소하였으며 뒷부분의 반력은 아주 미소하게 감소하였다. 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 발생하는 반력의 크기가 크게 발생하였다.

5.1.4 민감도해석

ANSYS 6.1의 Sweep tool을 사용하여 정규화된 설계변수인 스프링상수와 감쇠계수의 변화에 따른 목적함수의 민감도 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다. Fig. 15는 충격흡수기 모델 I의 치수 최적화된 최적결과에서 설계변수인 스프링상수와 감쇠계수의 변화에 따른 목적함수의 민감도를 나타내고 있으며, 최적점 전후에 감쇠계수가 스프링상수보다 민감하게 반응하고 있다. 반력을 최소화하는데 기여하는 인자는 감쇠계수임을 알 수 있다. 또한, Fig. 16~17은 충격흡수기 모델 II~III의 치수 최적화된 최적결과에서 설계변수인 스프링상수와 감쇠계수들의 변화에 따른 목적함수의 민감도를 나타내고 있다.

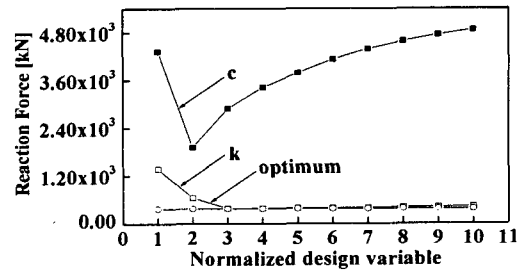


Fig. 15 Sensitivity of reaction force in dimension optimization of model I

Fig. 16은 최적점 전후에 감쇠계수(c_2)가 감쇠계수(c_1)과 스프링 상수(k_1, k_2)보다 민감하게 반응하고 있다. 반력을 최소화하는데 기여하는 인자는 감쇠계수(c_2)임을 알 수 있다. Fig. 17은 최적점 전후에 감쇠계수(c_1)가 감쇠계수(c_2)와 스프링 상수(k_1, k_2)보다 민감하게 반응하고 있다 반력을 최소화하는데 기여하는 인자는 감쇠계수(c_1)임을 알 수 있다. 이와 같이 충격흡수기의 시스템 변화에 따른 모델 I~III의 설계변수를 목적함수인 반력에 대해서

민감도를 파악하여 실제 설계 시에 적용할 수 있다.

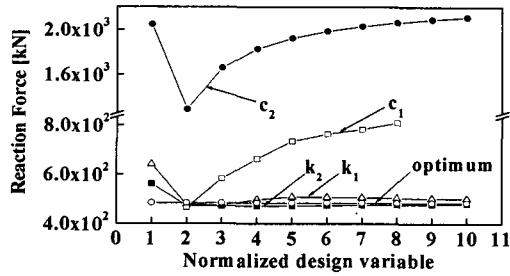


Fig. 16 Sensitivity of reaction force in dimension optimization of model II

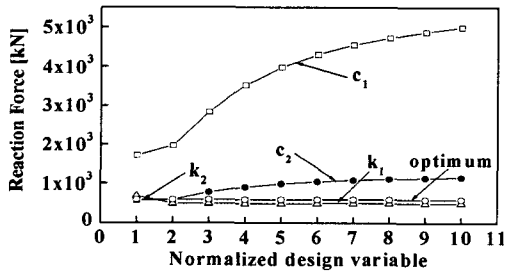


Fig. 17 Sensitivity of reaction force in dimension optimization of model III

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 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. 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. 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. 충격흡수기 모델 I-III에서 반력에 민감한 설계변수는 스프레더 부분과 연결되는 고정단과 연결된 감쇠계수이며, 충격흡수기에서 스프링 상수와 감쇠계수의 설계변수의 변화에 따른 반력의 민감도를 파악하여 실제 설계 시에 적용할 수 있다.

7. 향후 충격흡수기의 세 가지 모델에 대한 시작품의 시험을 통해 최적설계 해석결과를 검증할 것이다.

참고문헌

1. Marine Statistic Survey, Korea Maritime Institute, 2000.
2. Egle, D. M., "An investigation of an impact vibration absorber," MS Thesis, Tulane University New Orleans, LA, 1962.
3. Park, J. W., Shin, S. Y., Lee, S. B., Joo, D. W., "An Investigation into the Effect of Each Parameter on the Damping Forces Using Dynamic Behaviour Analysis P/G of S/A," J. of the KSPE, Vol. 14, No. 12, pp. 44-49, 1997.
4. Jasbir S. Arora, Introduction to Optimum Design, Mc Graw-hill Book Company, 1989.
5. Seo, J., Hong, D. K., Han, K. J., Kim, D. Y., Ahn, C. W., "The optimum design according to system variation of impact absorber for spreader," KSPE 2002 Autumn Annual Meeting, Vol. 2, No. 2, pp. 791-794, 2002.
6. Ansys Element Reference Release 6.1.
7. Ansys Design Optimization Release 6.1.