

반응표면법을 사용한 고 중량물 낙하시험기의 충격에너지 흡수량 예측 연구

강훈*, 장진석*, 김다혜*, 강지현**, 유완석**, 이재욱*[#]

*한국생산기술연구원 극한제조기술그룹, **부산대학교 기계공학부

Prediction of Impact Energy Absorption in a High Weight Drop Tester by Response Surface Methodology

Hoon Kang*, Jin-Seok Jang*, Da-Hye Kim*, Ji-Heon Kang**, Wan-Seok Yoo**, Jae-Wook Lee*[#]

*Ultimate Manufacturing R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology,

**School of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received 14 February 2016; received in revised form 15 March 2016; accepted 29 March 2016)

ABSTRACT

This paper presents the characteristics of the energy absorption in an expansion tube type impact absorber that is applied to a high weight drop tester and the use of a response surface methodology to predict the impact energy absorption. In order to identify the characteristics of the energy absorption, a set of finite element analysis was conducted with Abaqus Explicit. Moreover, the ISCD-II sampling method and a first order polynomial were used to build a response surface. As a result, we demonstrated that the impact energy could be controlled by four main design variables, namely an expansion pipe's thickness, inner radius, pressing die's expansion angle and expansion ratio. Additionally, we observed the relationship between the four main design variables and the impact energy absorbing time, displacement, and maximum impact force.

Key Words : Response Surface Method(반응표면법), High Weight Drop Tester(고 중량물 낙하시험기), Impact Energy(충격에너지), Expansion Tube Type Impact Absorber(확관형 충격흡수장치)

1. 서 론

고 중량물 낙하시험기는 대형 구조물의 외부 충격에 대한 안정성을 평가하기 위한 장치이며, 높은 충격하중과 같은 극한 환경에서 구조물의 신뢰성을 확인하기 위해 사용되는 장치이다.

고 중량물 낙하시험기는 대형 구조물을 특정 높에서 떨어뜨려 충격을 가하는 방식으로 시험을 수행하는 장치이므로, 시험기는 필수적으로 대형 구조물이 낙하하면서 발생된 대량의 운동에너지를 안정적으로 흡수하여 소산(dissipation)할 수 있어야 한다. 이를 위해서, 본 연구에서는 에너지 흡수부재로 확관형(expansion tube type) 충격 흡수장치를 고 중량물 낙하시험기에 적용하였다. 확관형 충격 흡수장치는 주로 고속전철의 경충돌 안전장치에 적용되어 열차사고 시 발생하는 충돌에너지가 열차 내

Corresponding Author: jaewk@kitech.re.kr
Tel: +82-53-580-0186, Fax: +82-53-580-0150

승객과 주요부재에 전달되는 것을 막는 용도로 사용되어 왔으며^[1-3], 최근에는 자동차의 정면충돌 에너지 흡수부재로 연구되기도 하였다^[4]. 하지만 아직까지 확관형 충격흡수 장치가 고 중량물 낙하시험기의 충격 흡수부재로 사용된 기록은 없으며, 관련 연구를 찾아볼 수 없다. 따라서 본 논문에서는 확관형 충격흡수 장치를 고 중량물 낙하시험기의 충격흡수 부재로 사용하였을 때의 충격에너지 흡수성을 분석하고, 최종적으로 반응표면법(response surface methodology)^[5,6]을 적용하여 확관형 충격흡수 장치의 주요 설계변수에 따른 충격에너지 흡수량을 예측하고자 한다.

2. 고 중량물 낙하 시험기

2.1 구조 및 충격에너지 흡수 원리

고 중량물 낙하 시험기는 Fig. 1과 같이 스트라이커(striker) 위에 시험대상 물체를 놓고 특정 높이에서 자유낙하 시켜 충격을 가하도록 설계되어 있다. 스트라이커는 모서리 부분이 4개의 기둥으로부터 구속되어 있기 때문에 중력방향의 상하운동만 할 수 있으며, 시험대상 물체와 함께 낙하하여 베이스(base)에 고정된 확관형 충격흡수장치와 충돌하면서 1차적으로 탄성 및 소성변형을 통해 충격에너지를 흡수한다. 확관형 충격흡수 장치는 Fig. 2-(a)와 같이 프레스싱 다이(pressing die)와 확관 파이프(expansion pipe)로 구성되어 있으며, 프레스싱 다이가 스트라이커에서 흡수되고 남은 충격에너지를 전달받아 확관 파이프를 소성변형 시키면서 충격에너지를 흡수한다(Fig. 2-(b)). 즉, 확관형 충격흡수장치는 충격에너지를 확관 파이프를 소성변형 시키는데 사용하는 동시에 프레스싱 다이와 확관 파이프 접촉면 사이의 마찰에너지로 소산(dissipation)시켜 2차적으로 충격에너지를 흡수한다.

2.2 주요 설계 변수

고 중량물 낙하시험기는 앞서 언급했듯이 스트라이커와 확관형 충격흡수장치를 함께 사용하여 충격에너지를 흡수하지만, 확관형 충격흡수장치가 스트라이커에 비해 구조가 간단하기 때문에 설계변경이

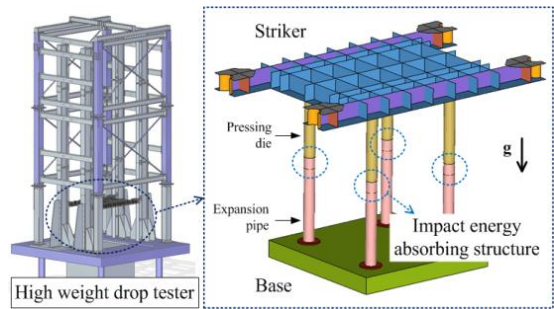


Fig. 1 Structure of the high weight drop tester

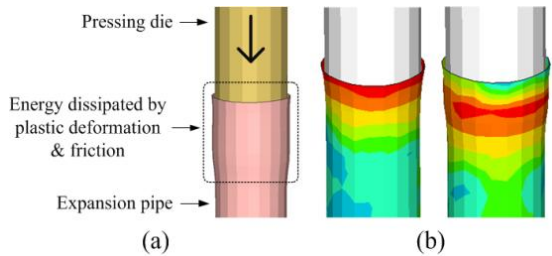


Fig. 2 Description of the expansion tube type impact energy absorbing structure:
(a) principle of the energy absorption;
(b) plastic deformation after absorbing energy

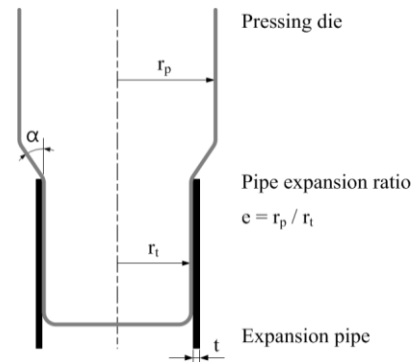


Fig. 3 Design variables the expansion tube type impact energy absorbing structure^[2,7,8]

간편하다. 따라서 본 연구에서는 확관형 충격흡수 장치의 설계변경에 따른 충격에너지 흡수성을 중점적으로 연구하였다.

확관형 충격흡수장치의 에너지 흡수성에 영향

을 미치는 주요 설계변수는 기존의 연구들^[1-6]에 의해 Fig. 3에 표현된 것과 같이 확관 파이프의 두께 (t) 및 내부 반경(r_i), 프레스 다이의 확관 각도(α) 및 반경(r_p), 확관 파이프와 프레스 다이 사이의 마찰계수(μ)로 알려져 있다. 특히, 프레스 다이의 반경(r_p)은 Fig. 3에 표현된 것과 같이 확관 파이프의 확관 전후의 반경비율인 확관비(e)로 표현될 수 있다. 또한, 마찰계수는 프레스 다이와 확관 파이프의 재질 및 표면처리 상태에 따라 일정한 값을 가지며, 약 0.05~0.30 정도의 값을 가지는 것으로 알려져 있다^[2,4,5].

3. 충격에너지 흡수량 예측방법

3.1 충격에너지 흡수 특성

설계변수에 따른 고 중량물 낙하시험기의 충격 에너지 흡수특성을 알아보기 위하여 Fig. 4와 같이 유한요소 모델을 구성하였다. 유한요소 모델에서 스트라이커는 모서리 부분이 “Cylindrical joint”로 구속되어 있어, 상하방향으로만 움직일 수 있다. 또한, 확관형 충격흡수장치의 프레스 다이와 확관 파이프의 접촉부분은 일정한 마찰계수를 가지는 “General contact”으로 지정하였으며, 하단의 베이스는 6축방향의 움직임이 고정된 “Rigid body”로 설정하였다. 시험기에 스트라이커와 시험 대상 물체의 자유낙하에 의한 충격력을 부여하기

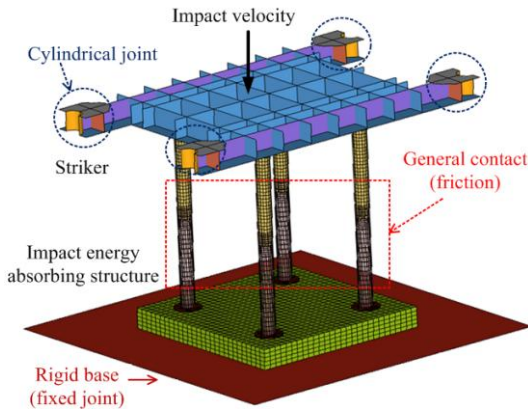


Fig. 4 FEM model of the high weight drop tester

Table 1 Main parameters for FEM analysis

Description of parameters	Values
Thickness of the expansion pipe (t)	6mm
Inner radius of the expansion pipe (r_p)	92mm
Expansion angle of the pressing die (α)	6.24°
Expansion ratio (e)	1.06
[Radius of the pressing die (r_p)]	[104mm]
coefficient of friction (μ)	0.05
Weight of the striker and the target object	5,175kg
Impact velocity	10.77m/s

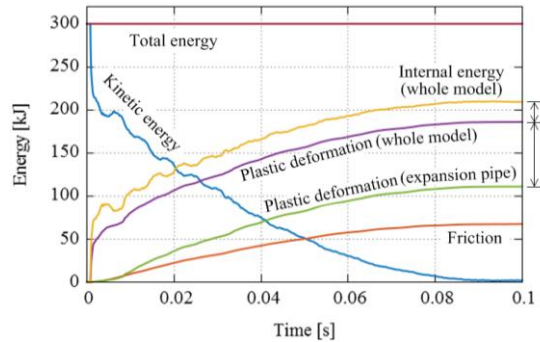


Fig. 5 Energy conversion and dissipation kinetic energy into other energies

위해 스트라이커에 중력방향으로 충격속도 (impact velocity)를 설정하였다.

충격에너지 흡수 특성을 분석하기 위하여 유한 요소 모델에 설정된 주요 파라미터 값은 Table 1과 같다. 여기서, 마찰계수는 기존의 연구^[2,7]에서 실험값과 가장 유사하다고 알려진 0.05를 사용하였으며, 스트라이커와 대상물체의 무게 및 충격속도는 고 중량물 충격시험기의 설계 기준사양을 참고하여 설정하였다. 충격속도(10.77m/s)는 스트라이커가 시험 대상물체와 함께 5.91m에서 자유낙하 한다고 가정하였을 때의 속도이다. 확관형 충격흡수장치(프레스 다이 및 확관 파이프)의 재질은 SS400으로 설정하였고, Abaqus Explicit을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다.

유한요소해석 결과, Fig. 5와 같이 약 0.1초 동안 충격에 의해 스트라이커와 대상물체의 운동에너지(kinetic energy)가 다른 형태의 에너지로 전환

또는 소산되는 것을 알 수 있다. 운동에너지는 대부분 내부에너지(internal energy)로 전환 또는 소산되는데, 여기서 내부에너지는 탄성에너지로 전환되는 에너지(A in Fig. 5)와 소성변형으로 소산되는 에너지를 합한 양이다. 내부에너지 중 소성변형으로 소산되는 에너지가 85% 이상이므로 고중량물 충격시험기에서 대부분의 충격에너지가 소성변형에 의해 소산된다고 할 수 있다. 특히, 소성변형으로 소산되는 에너지 중 약 60%는 확관형 충격흡수장치에서 소산되고, 나머지(B in Fig. 5)는 스트라이커에서 소산된다. 또한, 마찰에 의해서도 에너지가 소산되므로, 마찰에너지도 충격에너지 흡수에 중요한 역할을 한다고 볼 수 있다.

스트라이커의 초기 속도에 의한 운동(충격)에너지를 100%로 표현 하였을 때의 에너지 전환 및 소산을 도식화하면 Fig. 6과 같으며, 확관형 충격흡수장치에서 소성변형 및 마찰에 의해 소산되는 에너지양이 전체 충격에너지의 약 60% (=22.4%+37%)인 것을 알 수 있다. 즉, 확관형 충격흡수장치가 낙하시험기의 충격에너지 흡수성능에 있어서 핵심적인 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

추가적으로, 고 중량물 충격시험기에서는 충격에너지가 탄성 및 소성변형, 마찰 등의 복합적인 작용에 의해 전환 및 소산되므로 Fig. 7과 같이 시간에 따라 충격력의 변동(fluctuation)이 상당히 크다.

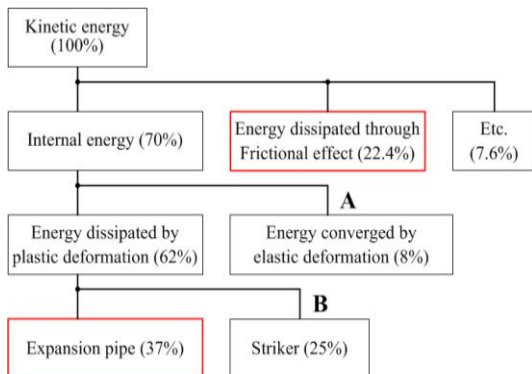


Fig. 6 Energy conversion and dissipation diagram (A, B are energy quantities as marked in Fig. 5)

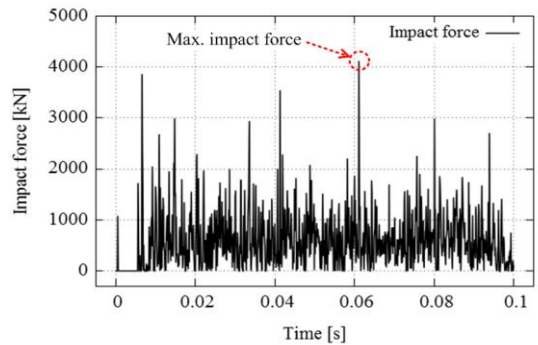


Fig. 7 Variation of the impact force measured at the rigid base

충격력은 Fig. 4의 시험기 하단의 베이스에서 측정된 충격속도 반대방향 반력(reaction force)으로, 충격 시 고 중량물 낙하시험기의 지면이 받는 힘을 의미한다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 충격력은 평균적으로 약 1000kN 정도지만, 충격을 받는 동안 평균 충격력보다 약 4배 이상 큰 최대충격력(maximum impact force)이 발생한다.

3.2 반응표면법

확관형 충격흡수장치의 주요 설계 변수에 따른 충격에너지 흡수량을 예측하기 위하여 본 연구에서는 반응표면법을 사용하였다. 반응표면법은 사용방법과 이론이 단순하고, 비선형성이 강한 문제가 아니라면 비교적 높은 정확도를 가지기 때문에 성능예측, 최적설계와 같은 분야에서 많이 사용되는 방법이다^[7,9-11]. 반응표면법에서 반응면(response surface)은 입력변수에 대한 출력 데이터를 최소자승법(least square method)으로 근사하여 다항식 형태로 만들어 진다. 반응면을 생성하는데 있어서 본 연구에서는 1차 및 2차 다항식을 선택하였으며, 반응면을 생성한 이후에 반응면의 정확성을 비교하여 더 높은 정확성을 가지는 차수의 다항식을 선택하였다. 반응면을 생성하기 위한 1차 및 2차 다항식의 일반식은 아래의 식 (1), (2)와 같다. 여기서, β_i , β_{ii} , β_{ij} 는 해당 다항식에 대한 회귀계수(regression coefficient)이고, x_i 와 y 는 각각 입력변수와 출력을 의미한다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i \quad (1)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum_{j=1}^n \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

반응표면을 생성하기 위해서는 입력변수(확관형 충격흡수장치의 주요 설계 변수)에 대한 출력 데이터(확관형 충격흡수장치의 충격에너지 흡수량)가 필요하며, 이러한 출력데이터는 3장에서 설명한 유한요소해석을 통해 얻을 수 있다.

더불어, 효과적으로 반응표면법을 사용하기 위해서는 최소한의 데이터를 사용하여 반응면을 생성하는 것이 중요하며, 이를 위해 본 연구에서는 ISCD-II(Incomplete Small Composite Design-II)라는 데이터 샘플링 기법(실험계획법)을 사용하였다. ISCD-II는 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 반응면을 생성하기 위해 최소한의 데이터만을 사용하며, 선형성이 높은 반응면을 생성할 때 효과적인 방법이다^[13]. 반응면을 생성한 이후에 1차 및 2차 다항식으로 표현된 반응면의 정확성을 판단하기 위하여 결정계수(R^2 , coefficient of multiple determination)와 수정된 결정계수(R_{adj}^2 , adjusted R^2)를 사용하였다^[8,12].

4. 충격에너지 흡수량 예측 결과

충격에너지 흡수량을 예측하기 위한 반응표면을 생성하기 위하여 Table 2와 같이 변수범위를 설정하였다. 확관형 충격흡수장치의 경우 주요 설계 변수에 대한 범위를 넓게 설정하면 확관 시 컬링(curling), 플레어링(flaring), 국부좌굴(local buckling)과 같은 현상이 발생할 수 있으므로^[2,7], 신중하게 변수범위를 설정해야 한다. Table 2에 표현된 4개의 설계변수에 대해 반응표면을 생성하기 위해서는 ISCD-II 샘플링 방법에 의해 Table 3과 같이 9개 케이스(case)의 입력변수에 대한 출력 값 데이터가 필요하다. 따라서 9번의 유한요소해석을 통해 입력변수에 대한 출력 데이터를 확보하여 1차 및 2차 다항식으로 반응표면을 생성하였다. 유한요소 모델은 3.1절에서 사용한 모델과 동일하며 단지 확관형 충

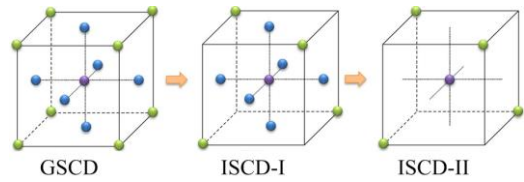


Fig. 8 Comparison of the data sampling method to build a response surface^[13]

Table 2 Design variables of the expansion type impact absorber to build a response surface

Variables	Lower bound	Current	Upper bound
t [mm]	4.00	6.00	8.00
r _t [mm]	92.00	98.00	104.00
α [°]	3.24	6.24	9.24
e	1.02	1.06	1.10
(r _p)	(93.84)	(103.88)	(114.40)

Table 3 Analysis cases to build a response surface

Case	t [mm]	r _t [mm]	α [°]	e
1	8.00	92.00	9.24	1.02
2	4.00	104.00	9.24	1.10
3	4.00	104.00	3.24	1.02
4	8.00	104.00	3.24	1.10
5	4.00	92.00	9.24	1.10
6	8.00	92.00	3.24	1.10
7	8.00	104.00	9.24	1.02
8	4.00	92.00	3.24	1.02
9	6.00	98.00	6.24	1.06

Table 4 Comparison of the accuracy of the response surface polynomials

Polynomial	R ²	R _{adj} ²
1 st order	0.999974	0.999948
2 nd order	0.997765	0.995531

격흡수장치의 주요 설계변수(Table 2)만 변경하여 사용하였다.

다항식으로 생성된 반응표면의 정확성을 확인하기 위하여 결정계수(R^2)와 수정된 결정계수(R_{adj}^2)를 계산하였으며, 계산결과는 Table 4와 같다. 계산결과 1, 2차 다항식 모두 높은 정확도로 반응표면을 생성하였지만, 2차 다항식 보다 1차 다항식이 더 정확하게 반응표면을 생성하였다. 즉, 확관형 충격 흡수장치의 주요 설계 변수(입력변수)와 충격에너지 흡수량(출력변수)은 높은 선형성을 가지고 있음을 알 수 있다.

1차 다항식으로 표현된 반응표면은 다음의 식 (3)과 같다. 여기서, y 는 확관형 충격흡수장치가 흡수하는 충격에너지(소성변형 및 마찰)를 의미하며, x_1 은 확관 파이프의 두께(t), x_2 는 확관 파이프의 내부 반경(r_i), x_3 는 프레싱 다이의 확관 각도(α), x_4 는 프레싱 다이의 반경(r_p)을 각각 의미한다.

$$y = 400.054059 - 0.273688x_1 - 0.463454x_2 - 0.170883x_3 - 163.536250x_4 \quad (3)$$

회귀계수 값으로부터 알 수 있듯이 확관형 충격 흡수장치가 흡수하는 충격에너지(y)는 주요 설계 변수($x_1 \sim x_4$)에 반비례한다. 이는 흡수해야 할 충격에너지가 일정한 상태에서 스트라이커와 확관형 충격흡수장치가 충격에너지를 나눠서 흡수하기 때문이다. 즉, 주요 설계변수 값이 작을수록 확관형 충격흡수장치가 구조적으로 취약하여 더 쉽게 변형하기 때문에 스트라이커보다 상대적으로 많은 충격에너지를 흡수할 수 있다.

식 (3)으로부터 주요 설계 변수에 따른 충격에너지 흡수량 반응표면을 그래프로 표현하면 Fig. 9와 같다. 반응표면으로부터 주어진 주요 설계 변수 범위에 대해서 확관 파이프의 두께(t)와 내부 반경(r_i) 보다 프레싱 다이의 확관 각도(α)와 반경(r_p)이 확관형 충격흡수장치의 충격에너지 흡수량에 더 많은 영향을 주는 것을 알 수 있다. Table 2에 설정된 변수범위로부터 확관형 충격흡수장치가 흡수할 수 있는 최소 및 최대 충격흡수에너지를 계산하면 각각 168.19kJ, 188.96kJ이다. 다시 말해서, 4개의 주요 설계변수를 변경함으로써 약 21kJ의 충격에너지 흡수량을 제어할 수 있다.

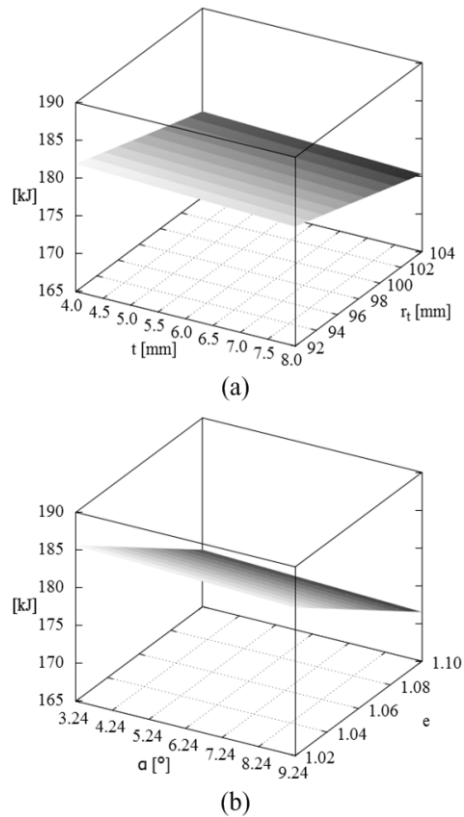


Fig. 9 Response surface model generated from the 1st order polynomial: (a) response surface at $\alpha = 6.24^\circ$ and $e = 1.06$; (b) response surface at $t = 6\text{mm}$ and $r_i = 98\text{mm}$

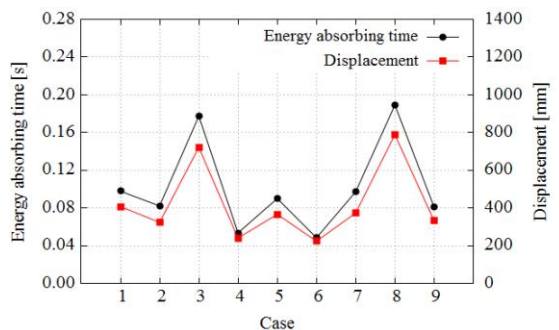


Fig. 10 Similar trend between the impact energy absorbing time and displacement

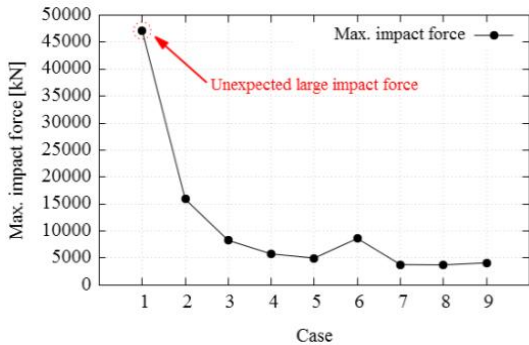


Fig. 11 Maximum impact force by the nine cases

주요 설계 변수에 따른 확관형 충격흡수장치의 충격에너지 흡수량 이외에 설계변수에 따른 충격 흡수시간 및 관입 길이 특성은 다음과 같다. Fig. 10과 같이 9개의 케이스에 대해 충격 흡수시간 (energy absorbing time)과 관입 길이(displacement)가 서로 유사한 경향(trend)을 보였으며, Fig. 11과 같이 특정 설계변수 조건(Case-1)에서 예상치 못한 매우 큰 최대 충격력(Fig. 7 참조)이 나타나기도 하였다.

5. 결론

본 논문에서는 고 중량물 낙하시험기에 적용된 확관형 충격흡수장치의 주요 설계 변수에 대한 충격에너지 흡수 특성을 분석하고, 반응표면법을 사용하여 충격에너지 흡수량을 예측하였다. 그 결과, 주요 설계변수 값이 작을수록 확관형 충격흡수장치가 스트라이커에 비해 상대적으로 많은 충격에너지를 흡수한다는 것을 알 수 있었다. 이는 설계 변수 변경을 통해 스트라이커와 확관형 충격흡수장치에서 흡수하는 충격에너지를 조절(배분)할 수 있다는 것을 의미하며, 이를 통해 확관형 충격흡수장치가 대부분의 에너지를 흡수하게 설계하여 제작 및 교체가 어려운 스트라이커의 사용횟수를 증가시킬 수 있다.

충격에너지 흡수량 이외에 본 연구에서는 설계변수에 따른 충격에너지 흡수시간 및 관입 길이가 유사한 경향을 보이는 것을 확인하였으며, 이는 충격 에너지 흡수시간과 관입 길이가 서로 관련 있음을

의미한다. 또한, 특정한 설계변수 조건에서 매우 큰 최대충격력이 나타나는 것을 확인하였다. 이후의 연구에서 설계변수와 충격에너지 흡수시간 및 관입 길이의 관계를 분석하여, 설계 변수 변경을 통해 충격에너지 흡수량뿐만 아니라 흡수시간과 관입 길이도 함께 조절 가능하도록 할 계획이다. 더불어, 특정 설계 변수 조건에서 예상치 못하게 큰 최대 충격력이 발생하는 이유를 규명하고, 이를 확관형 충격흡수장치 설계에 적용할 계획이다.

후 기

본 논문은 한국생산기술연구원 기관고유사업의 R&D 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

1. Heo, S. J., Lee, J. H., Koo, J. S., and Song, D. H., "Design and Analysis of the Frontal Impact Absorber for Highspeed Railway Power Cars," Proceedings of the KSME 1998 Fall Annual Meeting, pp. 628-634, 1998.
2. Ahn, K. H., "Study on the Crash Energy Absorption and Dynamic Local Buckling of the Expansion Tubes," A Thesis for a Master, KAIST, Republic of Korea, 2008.
3. Ahn, K. H., Kim, J. S., and Heo, H., "The Crash Energy Absorption of the Expansion Tubes considering Dynamic Buckling," Proceedings of the KSAE 30th Anniversary Conference 2008, pp. 1049-1054, 2008.
4. Lim, J. H. and Chung, Y. I., "Development of Automotive Crash Box with Tube Expansion Type," Proceedings of the KSAE 2009 Annual Conference, pp. 2427-2434, 2009.
5. Lee, S. H., Choi, S. D., Kim, G. M., and Lee, J. H., "Study on the Bonding Property and Strength Evaluation in Bonding Interface Joints of Dissimilar Material using Response Surface Analysis", Journal of the Korean Society of

- Manufacturing Process Engineers, Vol. 8, No. 2, pp. 76-82, 2009.
6. Song, B. C., Kim, S. R., Kang, Y. G., and Han, M. H., "A Study on the Comparison of Approximation Models for Multi-Objective Design Optimization of a Tire", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 5, pp. 117-124, 2011.
 7. Yang, J., Luo, M., Hua, Y., and Lu, G., "Energy Absorption of Expansion Tubes using a Conical-Cylindrical Die: Experiments and Numerical Simulation," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 52, No. 5, pp. 716-725, 2010.
 8. Almeida, B. P. P., Alves, M. L., Rosa, P. A. R., Brito, A. G., and Martins, P. A. F., "Expansion and Reduction of Thin-Walled Tubes using a Die: Experimental and Theoretical Investigation," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, No. 12, pp. 1643-1652, 2006.
 9. Punuhsingon, S. C. and Oh, S. C., "Application of Response Surface Methodology for Modeling and Optimization of Surface Roughness and Electric Current Consumption in Turning Operation", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 4, pp. 56-68, 2014.
 10. Lee, J. H., Choi, S. D., Kim, K. M., and Lee, J. H., "Study on the Bonding Property and Strength Evaluation in Bonding Interface Joints of Dissimilar Material using Response Surface Methodology", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 8, No. 2, pp. 76-82, 2009.
 11. Ye, S. D., Min, B. H., and Lee, J. K., "Design of Ultra-precision Micro Stage using Response Surface Methodology", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 5, No. 1, pp. 39-44, 2006.
 12. Ka, J. D., "A Study on 2D Airfoil Design Optimization with Metamodels," A Thesis for a Master, KAIST, Republic of Korea, 2003.
 13. EasyDesign, User's Manual for EasyDesign (V3R5), Institute of Design Optimization Inc., pp. 184-194, 2014.