

# 시스템 에어컨 실외기 포장품의 낙하충격해석 및 시험적 검증

김형석, 이부윤, 이상훈\*  
계명대학교 기계자동차공학부

## Drop Impact Analysis of Outside Cooling Unit Package of System Air-Conditioner and Experimental Verification

Hyung-Seok Kim, Boo-Yoon Lee, Sanghoon Lee\*

Division of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University

**요약** 본 논문은 시스템 에어컨 실외기 포장품의 낙하충격해석 및 시험검증을 수행한 내용을 다룬다. 포장은 낙하충격으로부터 제품을 보호할 수 있도록 충격에너지를 흡수할 수 있는 완충재질과 이를 제품에 고정하기 위한 부재로 구성되는데 작은 부피로 충분한 완충성능을 발휘하는 포장 설계를 위해서는 충격 시 제품에 가해지는 충격가속도 등을 정확히 평가하는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 외연적 시간적분을 활용하는 유한요소해석 기법을 활용하여 실외기 포장품의 낙하충격해석을 수행하였다. 정확한 해석을 위한 해석모델 구축, 재료 시험을 통한 데이터 획득 및 재료 모델의 선정, 신뢰성 있는 해석 데이터 확보를 위한 계측 센서의 모델링 등이 수행되었으며 이렇게 구해진 해석데이터와 시험으로 구해진 가속도 및 변형률 시간 이력을 비교하였다. 해석모델에 반영된 감쇄계수 등의 오차로 인하여 대체로 해석결과가 시험 결과에 비해 충격 가속도 및 변형률을 크게 예측하고 있으나 전체적인 데이터의 경향과 낙하 방향의 충격가속도는 정확하게 계산되었다. 이에 본 연구에 사용된 모델 및 해석기법을 에어컨 실외기 포장 설계에 활용할 수 있음을 확인하였다.

**Abstract** This research examines the drop impact of an external cooling unit package of an air conditioner system. The packaging is composed of a shock-absorbing material, which protects the package contents by absorbing the impact energy and other parts for fixture. Accurate quantification of the impact acceleration experienced by the package contents is necessary to design an effective packaging with minimal volume and sufficient shock absorbing capacity. Explicit time integration was used for the drop impact analyses. A finite element model of the package was constructed, material testing and material model selection were carried out, and sensors for data acquisition were modeled to obtain accurate simulation results. The results were compared with real physical test data. Due to imprecise modeling of the damping, the acceleration and strain values predicted by the simulation were larger than those from physical test. However, the trend of the history data and the peak deceleration value in the direction of impact showed good agreements. Thus, the analysis model and scheme are suitable for the design of an air conditioner cooling unit package.

**Keywords** : drop impact analysis, explicit time integration, finite element analysis, package design, validation and verification

### 1. 서론

효과적인 포장은 제품에 가해질 수 있는 충격하중을 감소시켜 제품을 보호할 수 있어야 하며 가급적 부피가

작고 가격이 저렴해야 한다. 적절한 포장 설계를 위해서는 낙하충격에 대한 포장품의 거동을 정확히 평가하는 것이 필수적이며 이를 위해서는 정밀한 해석모델의 구축, 재료의 소성변형 및 파손까지 고려한 물성데이터 및

본 연구는 LG전자 에어솔루션연구소의 산학연구과제로 수행되었음.

\*Corresponding Author : Sanghoon Lee (Keimyung Univ.)

Tel: +82-53-580-5264 email: shlee1222@kmu.ac.kr

Received January 15, 2018

Revised (1st March 9, 2018, 2nd March 15, 2018)

Accepted April 6, 2018

Published April 30, 2018

재료모델의 확보, 수렴성이 확보되는 적절한 시간적분(time integration)을 이용한 동적해석이 필요하다. 포장의 설계에 대한 연구는 가전제품 분야를 비롯한 다양한 분야에서 이루어졌으며[1-4] 대부분의 연구가 외연적 시간적분(explicit time integration)을 이용한 유한요소해석 기법을 활용하여 포장품의 충격 거동을 평가하고 있다. 본 논문에서는 상용 소프트웨어 LS-DYNA[5]를 이용하여 시스템 에어컨 실외기 포장품의 낙하충격해석을 수행하고 이를 시험적으로 검증한 내용을 다룬다. 상용 유한요소 전처리기인 HyperMesh[6]를 이용하여 제품의 유한요소모델을 구축하였으며 모든 재료의 물성 데이터는 시험을 통하여 구하였다. 해석조건과 동일하게 실제 낙하시험을 수행하여 해석결과를 비교 검증하기 위한 데이터를 취득하였고 이를 활용하여 구축된 유한요소모델 및 해석기법의 타당성을 논하고자 한다.

## 2. 실외기 포장품의 유한요소해석

### 2.1 대상제품 및 시험조건

본 논문의 연구대상은 Fig. 1과 같은 시스템 에어컨 실외기의 포장품이다. 실외기는 두께가 얇은 냉연강판을 프레스 가공한 판재부품, 강제부품, 플라스틱 사출물, 컴프레서(compressor), 각종 전자부품으로 구성되어 있으며 운송 중 가해지는 충격 등으로부터 실외기를 보호하기 위하여 발포폴리스티렌(EPS : expandable polystyrene), 나무패널 및 골판지로 만들어진 포장재가 실외기 상, 하에 부착된 후 폴리프로필렌 재질의 노끈으로 결박된다. 낙하충격 시 EPS가 충격에너지를 흡수하고 충격력을 감소시키는 역할을 하며 골판지와 나무패널, 노끈은 EPS가 실외기에서 탈락하지 않도록 고정시키는 기능을 한다.

실외기 포장품의 내충격성능 평가를 위한 낙하충격 시험은 제조사 자체 기준으로 정해진 시험절차 및 방법에 제시되어 있는 낙하높이 및 낙하방향(orientation)으로 수행된다. 본 연구에서는 해석모델의 타당성 검증을 위하여 바닥면에 수직인 방향으로 40 cm 높이에서 자유낙하하는 시험을 수행하였으며 해석조건도 이와 동일하게 부여하였다. 시험모델에서 측정되는 충격가속도와 특정 위치에서의 변형률을 해석결과와 시험결과의 일치도 평가를 위한 척도로 활용하였으며 이를 위하여 Fig. 1-2와 같이 가속도계와 변형률계가 설치되었다. 가속도계

1, 2는 철판에 수직인 방향으로, 가속도 3은 낙하방향으로 계측이 이루어졌다. 변형률계의 계측 방향은 낙하방향과 일치하도록 하였으며 쿼터 브리지(quarter bridge)의 변형률계가 설치되었다. 제품과 충돌이 이루어지는 바닥면은 콘크리트에 설치된 단단한 철판으로 구성되어 있다.

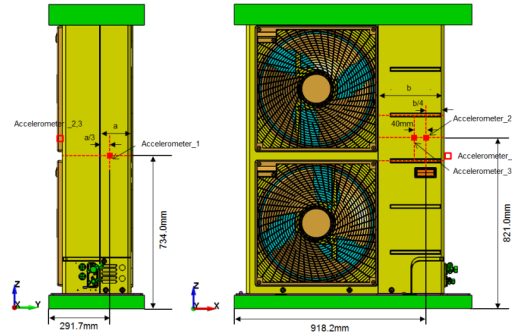


Fig. 1. Mounting position of accelerometers

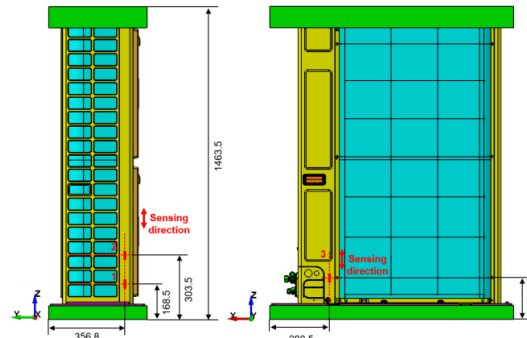


Fig. 2. Mounting position of strain gauges

### 2.2 유한요소 모델링

#### 2.2.1 실외기 포장품의 유한요소모델

실외기 포장품은 3차원 CAD 모델링 후 유한요소 전처리 소프트웨어를 활용하여 단순화 및 유한요소 모델링 되었다. 부품의 대다수를 이루는 각종 판재부품, 강제부품과 플라스틱 사출물, 그리고 포장결박용 노끈은 LS-DYNA의 Belytschko-Tsay 쉘요소로, 냉매 순환용 구리 관은 Hughes-Liu 빔요소로, 강성이 높고 체적이 큰 컴프레서와 방열판, EPS는 저감적분을 이용하는 솔리드 요소로 모델링되었다. 해석모델은 Fig. 3과 같이 절점 375,369개, 빔요소 2,901개, 쉘요소 101,447개, 솔리드 요소 216,244개로 구성된다.

제품을 구성하는 부품의 기계적 물성치를 파악하기 위해 모든 재질에 대하여 인장 및 압축시험을 실시하였다. 특히 강재 및 EPS는 응력-변형률 관계의 변형률속도 의존성을 해석에 반영하고자  $10^{-3}/s$ 에서  $10^2/s$ 의 구간의 다양한 변형률속도로 시험을 수행하였다. 모든 재질들은 시험데이터를 기반으로 *piecewise linear plasticity model*로 모델링되었으며 변형률속도 별로 정리된 테이블 형식으로 해석을 위하여 입력되었다. 포장재 구속용 노끈은 인장력만 지지할 수 있는 특성을 반영하기 위하여 LS-Dyna의 *discrete beam* 요소로 모델링되었다. Fig. 4는 해석에 사용된 강재의 변형률 속도 별로 구해진 진응력-진변형률 곡선이다.

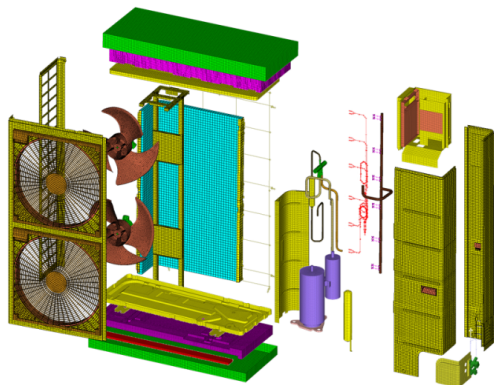


Fig. 3. Finite element model

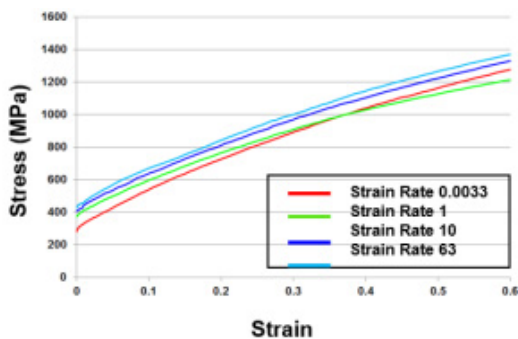


Fig. 4. Rate dependent stress-strain curves of steel

실외기 포장품의 실제 무게는 96.06 kg인데 유한요소 모델의 무게는 96.03 kg으로 계산되었다. 부품별로 형상을 단순화 하는 과정에서 발생하는 무게 오차는 밀도를 조절하여 보정하였다.

실외기의 부품 간 체결은 대부분 볼트로 이루어져 있

어 LS-DYNA에서 제공하는 *spot weld* 기능을 사용하여 볼트로 체결되는 두 부품의 체결부에 위치한 절점들의 자유도를 공유하는 방식으로 모델링 하였다. 실외기 부품 간의 접촉은 *CONTACT\_AUTOMATIC\_GENERAL* 카드로, 실외기와 포장재 간의 접촉은 *CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE* 카드를 적용하였다. 초기 침투(*initial penetration*)를 제거하기 위해 접촉 표면에서의 침투여부를 점검하여 침투가 발생되어 있는 부분을 수정하고 침투가 없는 상태에서 해석이 진행되도록 하였다.

### 2.2.2 계측센서의 모델링

Fig. 1-2에 제시된 가속도계와 변형률계의 계측데이터와 비교를 위한 가속도와 변형률 시간 이력을 취득하기 위하여 계측 센서를 별도로 모델링하였다. (Figs. 5-6) 가속도 데이터는 절점 해석결과에서 직접 추출할 수도 있으나 이런 경우 응력파의 확산오차(*dispersion error*) 등으로 정확도가 떨어질 수 있어 강체 빔에 연결된 집중 질량으로 가속도계를 모델링 한 후 이 집중질량이 부여된 절점에서 가속도를 추출하였다. 집중질량에 부여된 질량 값은 변형률 게이지 및 부착을 위한 마운트, 그리고 케이블의 무게를 종합적으로 고려하여 부여하였다. 또한 변형률계가 부착된 철판이 중간면(*mid surface*) 기준의 셀요소로 모델링되었기 때문에 철판 외부표면의 변형률 데이터 추출을 위하여 변형률계가 부착되는 위치의 요소에 철판 두께의 절반만큼 이격된 위치에 고정된 0.0001 mm 두께의 얇은 박판으로 변형률계를 모델링 하였다.

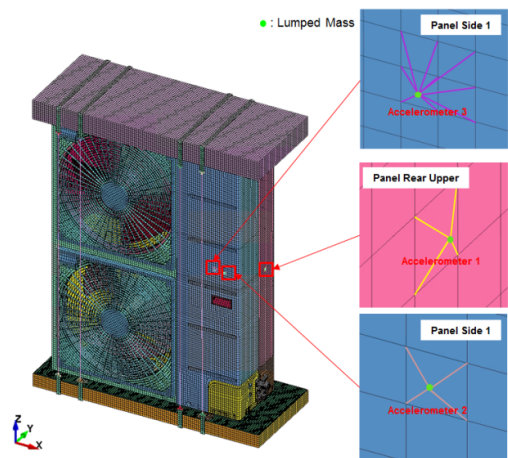


Fig. 5. Modeling position of accelerometer

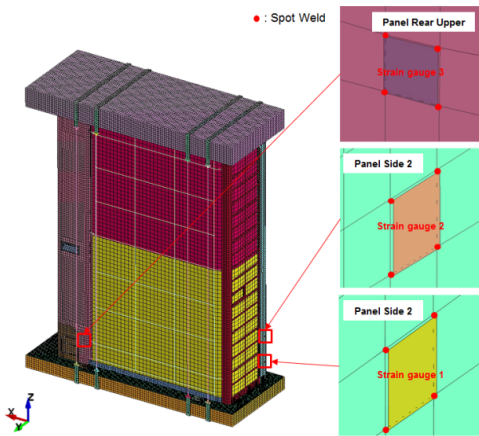


Fig. 6. Modeling position of strain gauge

### 2.3 해석조건 및 해석방법

실외기 포장품이 자유낙하하여 충돌하게 되는 바닥판은 해석 시 강체로 모델링 되었으며 해석시간을 줄이기 위하여 포장품이 바닥판에 충돌하기 직전 상태에 초기속도를 부여하는 방식으로 해석을 수행하였다. 자유낙하시 충돌속도는 포장품의 위치에너지와 운동에너지의 합이 일정하게 유지된다는 조건으로부터 아래와 같이 계산된다.

$$v = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

여기서  $v$ 는 충돌속도,  $g$ ,  $h$ 는 각각 중력가속도와 낙하 높이이다.

낙하시험 시 충격완충재인 EPS가 충돌에너지를 완전히 흡수하지 못하는 경우 반발(rebound)에 의한 2차 충격이 발생할 수 있으나 본 연구에서는 1차 충격의 효과만을 관찰하도록 하여 해석시간은 충돌 직전으로부터 30 ms까지로 설정하였다.

해석은 LS-DYNA의 외연적 시간적분(explicit time integration) 솔버를 활용하여 수행되었으며 시간 증분은 최소 격자크기와 물성치를 고려하여 최적의 증분을 결정하도록 하였다. 저감적분을 이용하는 요소에서 모래시계 모드(hourglass mode) 발생을 방지하기 위하여 모래시계 모드 제어기능을 사용하였다. 시험 결과와 비교를 위한 가속도 및 변형률의 시간이력은 시험 데이터의 취득 빈도수와 일치하도록 100 kHz의 주파수로 취득하였다.

## 3. 실외기 포장품 낙하해석결과 및 검증

### 3.1 낙하해석 결과

Fig. 7은 낙하충격 해석이 이루어진 시간 구간에서의 에너지 평형을 도시한 그래프이다. 전체 에너지(total energy)는 내부 에너지(internal energy)와 운동 에너지, 그리고 충돌 이후 접촉면에서의 마찰로 소산되는 미끄럼 에너지(sliding energy), 모래시계 모드 방지를 위하여 인위적으로 산입되는 모래시계 모드 에너지 (hourglass energy)의 합으로 표현된다. 충돌 직전 전체에너지를 구성하는 운동에너지의 대부분이 충돌해석이 진행되는 동안 내부에너지로 변환되고 미끄럼 에너지와 모래시계 모드 에너지의 크기가 상대적으로 매우 작게 계산되어 접촉면에서의 거동을 포함하여 전체적으로 해석이 수치적인 문제없이 수행되었음을 알 수 있다. 해석에서 1차 충격만 고려하였기 때문에 해석 종료 시점에서도 잔류 운동 에너지가 존재한다.

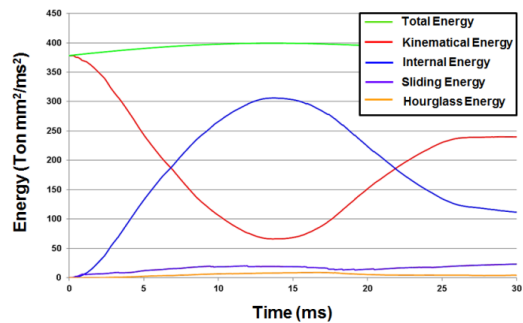


Fig. 7. Time history of energy during bottom side drop-impact analysis

Fig. 8-9는 낙하 후의 실험과 해석 결과로 나타나는 Base plate와 Barrier의 파손 및 변형 형상이며 시험결과와 해석결과가 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 10은 가속도 계측데이터와 해석데이터를 비교한 그래프이며 Fig. 11은 변형률 데이터를 비교한 것이다. 100 kHz의 빈도로 구해진 데이터에 60 Hz의 저역필터(low pass filter)를 적용하여 응력과 및 고주파 진동에 의한 신호는 배제하였다.

가속도 데이터 비교 결과를 보면 전체적으로 양상이 잘 일치하고 있으며 특히 충돌방향으로 계측이 이루어진 3번 가속도계 데이터는 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 최대충격가속도가 해석에서는 34 g, 시험 결과가 32 g로 구해졌다.

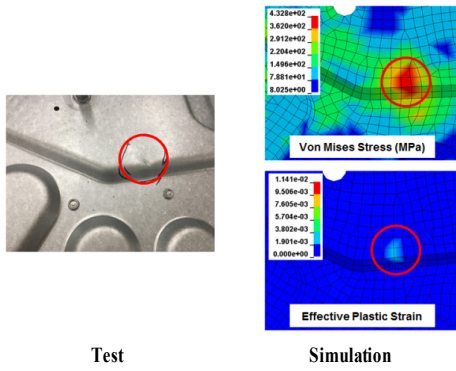


Fig. 8. Deformed shape of base plate

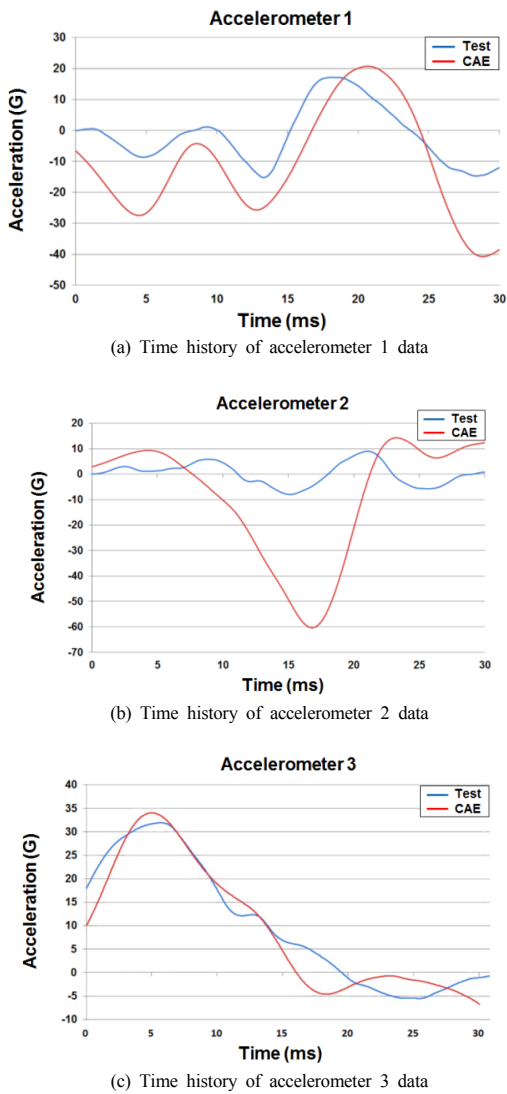


Fig. 10. Comparison of acceleration history data

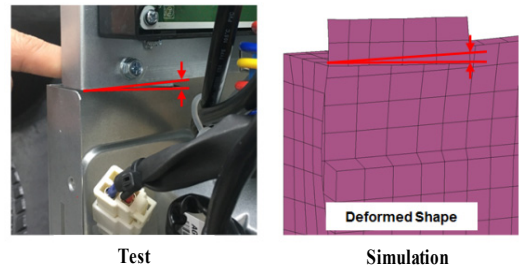


Fig. 9. Deformed shape of barrier

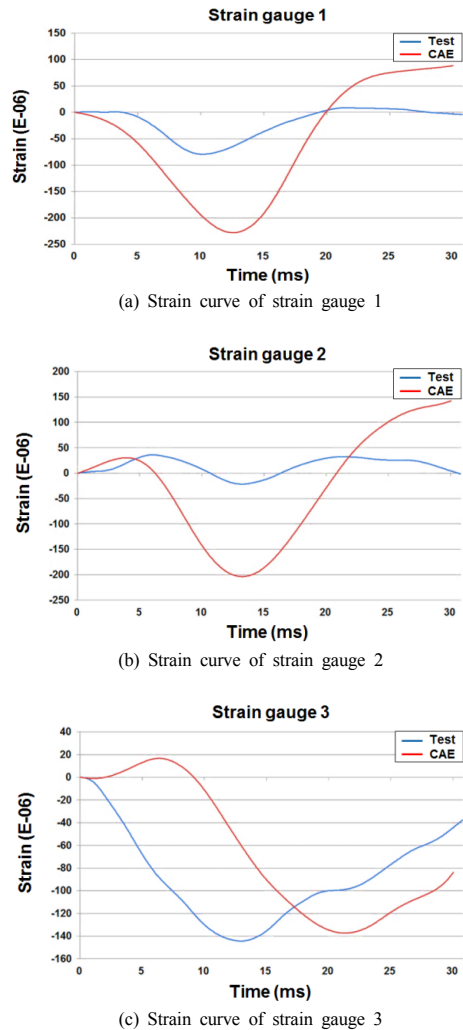


Fig. 11. Comparison of strain history data

충돌에 의해 발생하는 진동 신호를 계측하게 되는 1, 2번 가속도계의 데이터는 대체적으로 해석 데이터가 좀 더 큰 가속도를 예측하고 있는데 이는 철판 등의 물성에



감쇠(damping)가 실제보다 작게 입력되었기 때문으로 보인다. 또한 콘크리트 재질의 바닥면을 강체로 모델링한 것도 영향이 있을 것으로 판단된다. 변형률계 데이터 역시 해석 결과가 다소 보수적으로 예측을 하고 있는데 같은 이유로 발생하는 차이로 보인다. 전반적으로 해석 및 시험으로 구해진 데이터가 잘 일치하고 있으며 특히 충돌방향의 최대 충격가속도 값이 정확히 예측이 되고 있어 본 해석모델 및 기법을 에어컨 실외기의 포장 설계에 활용할 수 있음을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 시스템 에어컨 실외기에 운송 중 발생할 수 있는 외부하중인 낙하충격을 고려한 유한요소해석 모델링 및 해석 방법을 제시하였다. 높이 40 cm에서 바닥면에 수직으로 자유낙하 하는 경우를 고려하여 해석 및 시험을 수행하여 해석 모델의 타당성을 검증하였다. 셸 요소 및 절점에서 직접 변형률 및 가속도의 데이터를 추출하지 않고 별도로 계측 센서를 모델링하였으며 이를 통하여 실제 시험데이터와 일치도가 높은 해석 결과를 얻을 수 있었다. 계측 센서의 모델링 및 조정(calibration)에 관한 내용은 별도의 논문에 보다 상세히 논할 예정이다.

시험에 사용된 모든 재료 물성은 시험 데이터를 가공하여 만들어진 적절한 재료 모델로 입력되었으며 다양한 변형률 속도에서의 응력-변형률 관계를 고려하였다.

결론적으로 제품에 가해지는 최대 충격가속도 및 소성 변형 양상이 정확히 예측되어 본 논문에 소개된 해석 기법으로 신뢰성 있는 포장설계가 가능할 것으로 판단된다.

#### References

- [1] P. A. Pfeiffer, J. M. Kennedy, "Free drop impact analysis of shipping cask," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 114, no. 1, pp. 33-52, 1989.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(89\)90124-6](https://doi.org/10.1016/0029-5493(89)90124-6)
- [2] W. J. Kim, B. S. Son and B. Y. Lee, "Drop Impact Analysis and Design of a Package of a Microwave Oven", *The Korean Society of Mechanical Engineers, A*, vol. 33, no. 5, pp. 536-543, 2009.
- [3] K. H. Low, "Drop-impact cushioning effect of electronics products formed by plate", *Advanced in Engineering Software*, vol. 34, pp. 31-50, 2003.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(02\)00040-6](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(02)00040-6)

- [4] J. S. Ha, S. J. Lee, "Three-Dimensional Modeling for Impact Behavior Analysis", *Korean Society for Precision Engineering, Spring Conference*, pp. 353-356, 2002.
- [5] "LS-DYNA User's Manual," Livermore Software Technology Corporation, 2014.
- [6] "Altair HyperMesh 11 User's Guide," Altair Engineering, 2015.

#### 김 형 석(Hyung-Seok Kim)

[정회원]



- 2015년 2월 : 계명대학교 기계자동차공학과 (공학사)
- 2017년 8월 : 계명대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2017년 9월 ~ 현재 : 자동차부품연구원

<관심분야>  
전산해석, 구조설계

#### 이 부 윤(Boo-Youn Lee)

[정회원]



- 1984년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 1991년 8월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 1984년 3월 ~ 1998년 2월 : 두산중공업 기술연구원 구도강도연구팀장
- 1998년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 기계자동차공학전공 교수

<관심분야>  
최적설계, 구조설계, 전산응력해석 등

#### 이 상 훈(Sanghoon Lee)

[정회원]



- 1999년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 2006년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 2008년 12월 ~ 2015년 8월 : 한국원자력연구원 선임연구원
- 2015년 9월 ~ 현재 : 계명대학교 기계자동차공학부 조교수

<관심분야>  
전산해석, 구조설계, 최적설계, 강건설계, 구조신뢰성공학