

국내 연구 동향 분석을 통한 포장분야에서 유한요소해석의 적용 방향에 관한 고찰

이학래 · 전규배 · 고의석 · 심원철 · 강욱건 · 김재능*

연세대학교 패키징학과

A Study on the Application Direction of Finite Element Analysis in the Field of Packaging through Research Trend Analysis in Korea

Hakrae Lee, Kyubae Jeon, Euisuk Ko, Woncheol Shim, Wookgun Kang, and Jaieung Kim*

Department of Packaging, Yonsei University, Wonju 220-710, Korea

Abstract Proper packaging design can meet both the environmental and economic aspects of packaging materials by reducing the use of packaging materials, waste generation, material costs, and logistics costs. Finite element analysis(FEM) is used as a useful tool in various fields such as structural analysis, heat transfer, fluid motion, and electromagnetic field, but its application in the field of packaging is still insufficient. Therefore, the application of FEM to the field of packaging can save the cost and time in the future research because it is possible to design the package by computer simulation, and it is possible to reduce the packaging waste and logistics cost through proper packaging design. Therefore, this study investigated the FEM papers published in Korea for the purpose of helping research design using FEM program in the field of packaging in the future. In this paper, we analyzed the 29 papers that were directly related to the analysis of FEM papers published in domestic journals from 1991 to 2017. As a result, we analyzed the research topic, FEM program, and analysis method using each paper, and presented the direction that can be applied in future packaging field. When the FEM is applied to the packaging field, it is possible to change the structure and reduce the thickness through the stress and vibration analysis applied to the packaging material, thereby reducing the cost by improving the mechanical strength and reducing the amount of the packaging material. Therefore, in the field of packaging research in the future, if the FEM is performed together, economical and reasonable packaging design will be possible.

Keywords Finite element method, Container production, Pressure vessel, Material characterization, Drop impact and vibration analysis

서 론

포장은 생산단계에서 유통단계까지 제품의 파손이나 손상을 방지하기 위한 수단이며 포장표준화를 통한 물류비 감소 등으로 판매자의 이윤 증가에 큰 영향을 미친다¹⁾. 이에 따라 현재 제품의 유통 과정에서 안전성과 관련하여 많은 포장 재료 및 포장 방법들이 개발되고 있고, 물류비 절감 및 물류

합리화, 자원절약 등의 측면에서 포장 설계가 이루어지고 있다²⁾. 하지만 포장재로 발생한 폐기물은 재활용 및 재사용 이용량이 증가함에도 불구하고 주요 폐기물로 취급받고 있으며³⁾, 환경보호에 대한 필요성이 커지면서 완충 포장재 또한 사용에 규제를 받고 있는 실정이다⁴⁾. 이러한 문제 해결을 위한 적정포장설계는 포장 원자재 사용량 및 폐기물 발생량뿐만 아니라 재료비 및 물류비 절감이 가능하여 포장재의 환경성과 경제성을 모두 충족시킬 수 있다⁵⁾.

유한요소법(FEM: Finite Element Method)은 무한의 자유도를 지닌 물체를 유한의 자유도를 지닌 요소(Element)들의 집합체로 근사시켜 이 집합체에 대하여 성립하는 방정식의 근사 해를 구하는 방법이다. 일반적으로 컴퓨터 시뮬레이션을

*Corresponding Author : Jai Neung Kim
Department of Packaging, Yonsei University, Wonju 220-710, Korea
Tel : +82-33-760-2781, Fax : +82-33-760-2760
E-mail : kimjn@yonsei.ac.kr

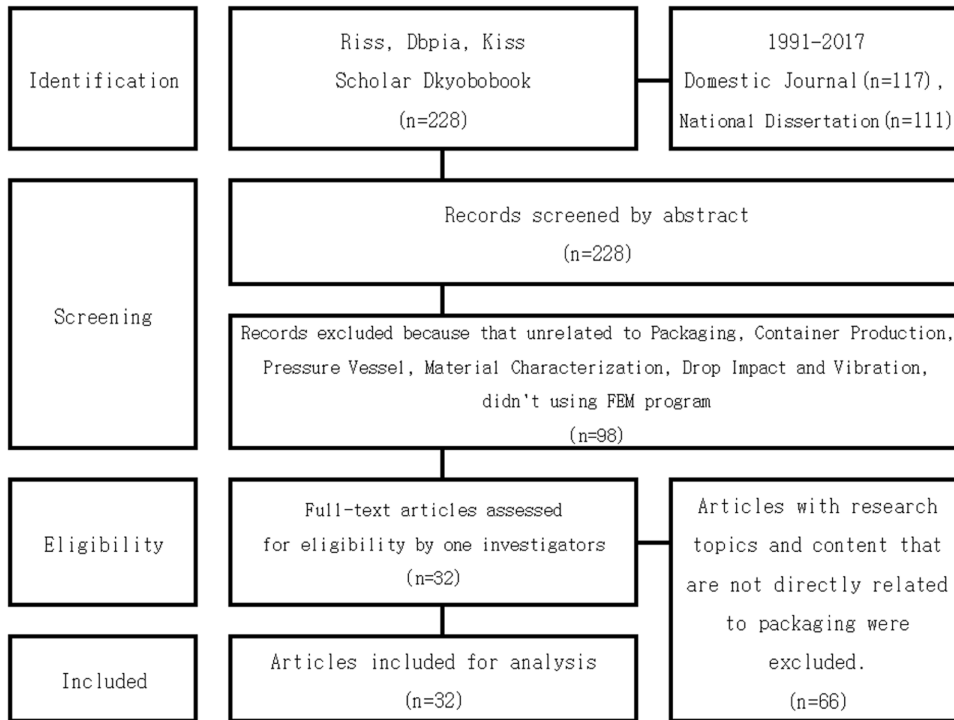


Fig. 1. Flow Chart of Study Selection Process.

수행하여 구조해석, 열전달, 유체운동, 전자기 등 다양한 분야에 적용되고 있지만, 포장분야에서는 그 적용이 미비하다.

따라서 포장분야에 유한요소해석 적용은 컴퓨터 시뮬레이션으로 포장 설계가 가능하기 때문에 향후 연구에 있어 비용과 시간 절약이 가능하며 적정포장설계를 통해 포장 폐기물과 물류비 절감이 가능할 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 향후 포장 영역에서 유한요소해석(FEM) 프로그램을 활용한 연구 설계에 도움이 되고자 하는 목적으로 국내에서 발표된 유한요소해석 관련 논문을 조사하였다. 수집된 논문을 포장 영역과 연관된 네 가지 주제로 분류 및 분석하였으며, 각 선행연구에서 사용한 유한요소해석 프로그램과 연구주제, 해석방법 등을 중심으로 분석하고 향후 포장 영역에 활용할 수 있는 방향에 대하여 제시하고자 하였다.

연구 방법

1. 문헌 검색 방법

본 연구는 2017년 6월 31일까지 국내에서 수행된 유한요소해석과 관련된 논문을 포함하였다. 문헌은 온라인에서 검색이 가능한 국내학술지논문, 학위논문을 대상으로 하였다. 학술연구정보서비스(www.riss.kr), DBpia(www.dbpia.co.kr), 한국학술정보(www.kiss.kstudy.com), 교보문고 스콜라(www.scholar.dkyobobook.co.kr) 등의 온라인 데이터베이스를 활용

하여 유한요소해석과 관련연구라고 한다면 연구 방법, 학문 분야 등에 관계없이 모두 포함하였다. 검색은 유한요소해석, FEM, Finite Element Method의 총 3가지 용어로 실시하였다.

2. 문헌 선정 절차

1차적으로 데이터베이스를 통해 검색된 논문에 대하여 제목과 초록을 검토하여 국내학술지논문 117편, 학위논문 111편을 포함하여 총 228편을 선정하였다. 2차적으로 원문을 모두 검토하여 연구 내용이 ①포장(Packaging)영역과 무관한 경우, ②금형 설계 및 제품 성형, 압력용기, 금속 및 복합재, 낙하 충격 및 진동 시험 등과 무관한 경우, ③유한요소해석 프로그램을 사용하지 않은 경우, ④연구내용이 중복되는 경우를 배제하고 포장영역과 간접적 연관성이 있는 총 98편을 선정하였다. 마지막으로 연구 주제 및 내용, 해석 방법, 유한요소해석 프로그램, 해석도구, 해석 차수, 연구대상의 재질 등을 기준으로 분류하여 최종적으로 포장영역과 직접적인 연관성이 있는 총 32편의 논문에 대한 분석을 실시하였다. 재질 및 대상 변경 시 포장 영역에 적용이 가능한 연구내용일 경우에 직접적인 연관성이 있다고 판단하였다. 이상의 절차를 통해 본 연구의 분석 과정에 포함된 논문 목록은 결과 및 고찰의 각 영역에 제시하였으며, 참고문헌에 저자 및 논문 제목 등을 자세히 기재하였다(Fig. 1).

Table 1. Analysis Method

Area	Analysis
Year	1991-2000, 2001-2010, 2011-2017(-6.31)
Type	Domestic Journal, National Dissertation
Journal	Korean Society for Precision Engineering, Korean Institute of Gas, Composites Research, Korean Society of Mechanical Technology, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Korean Society of Machine Tool Engineers, Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Transactions of Materials Processing, Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Korean Society for Aeronautical and Space Sciences et al.
FEM Program	ANSYS, ABAQUS, MSC/MARC, LS-DYNA, SHARP-RE, NASTRAN et al.
Subject	Container production process, Pressure vessel, Material characterization

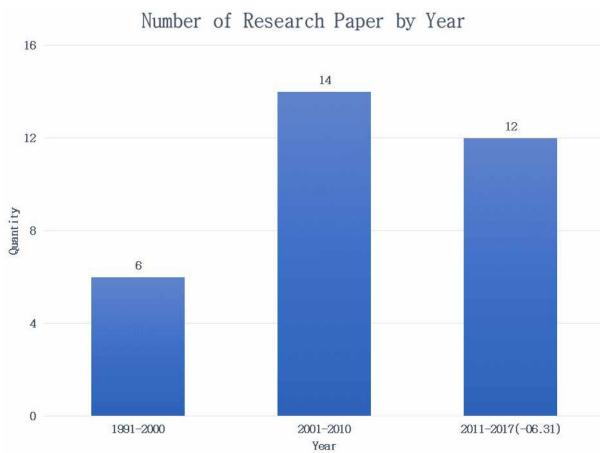


Fig. 2. Number of Research Paper by Year.

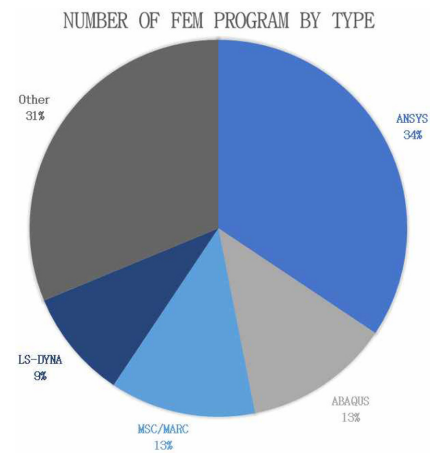


Fig. 3. Number of FEM Program by Type.

3. 자료 분석

자료 분석은 최종적으로 선정한 32편의 논문에 대하여 원문을 검토한 후 Table 1과 같이 핵심 정보를 추출하여 분석하였다. 선정된 논문들을 연구 분야에 따라 용기 생산 공정, 압력용기, 재질 특성 분석, 낙하충격해석 및 진동해석 등에 관한 4가지 주제로 분류하였다. 각 문헌들은 Excel 소프트웨어(Microsoft, USA)를 사용하여 병합 후 연도, 논문유형, 학회지, 유한요소해석 프로그램, 주제, 해석 차원, 해석 도구, 연구 재질, 연구 내용 등으로 각 변인별 분류와 백분율 산출 등을 실시하였다.

결과 및 고찰

1. 국내 유한요소해석 연구 동향 분석

1) 연구 논문 연도 동향

유한요소해석 관련 국내 논문의 출판연도를 살펴보면 1991년부터 2000년까지 출판된 논문이 6편, 2001년부터 2010년까지 출판된 논문이 14편, 2011년부터 2017년까지 출판된 논문이 12편으로 포장과 직·간접적 연관성이 있는 유한요소해석에 대한 학문적 관심이 증가하고 있는 추세이다(Fig. 2).

2) 학회지 동향

Table 1과 같이 유한요소해석 관련 논문을 발표한 학회지를 살펴보면 한국가스학회(Korean Institute of Gas), 한국기계기술학회(Korean Society of Mechanical Technology), 대한기계학회(Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers), 한국정밀공학학회(Korean Society for Precision Engineering), 한국공작기계학회(Korean Society of Machine Tool Engineers), 한국소성가공학학회(Transactions of Materials Processing), 한국소음진동공학학회(Korean Society for Noise and Vibration Engineering), 한국항공우주학회(Korean Society for Aeronautical and Space Sciences) 등 총 12개 이상의 학회에서 논문을 확인하였다. 이는 현재 포장 분야의 유한요소해석은 매우 미흡한 실정이며, 일부 분야에만 국한되어 있음을 시사한다.

3) 유한요소해석 프로그램 사용 동향

주제별 유한요소해석을 하는데 있어 ANSYS, ABAQUS, MSC/MARC, LS-DYNA, SHARP-RE, NASTRAN 등의 순으로 7가지 이상의 프로그램을 사용하였다. 32개의 논문 중 ANSYS가 11건(34%), ABAQUS가 4건(13%), MSC/

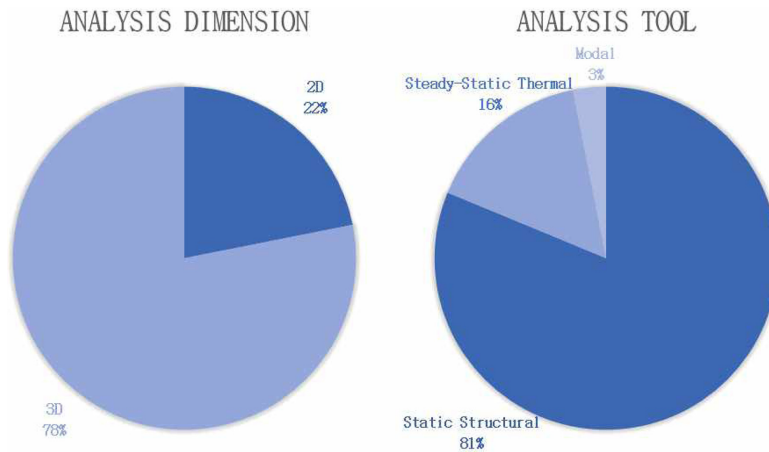


Fig. 4. Number of Analysis Dimension and Analysis Tool by Type.

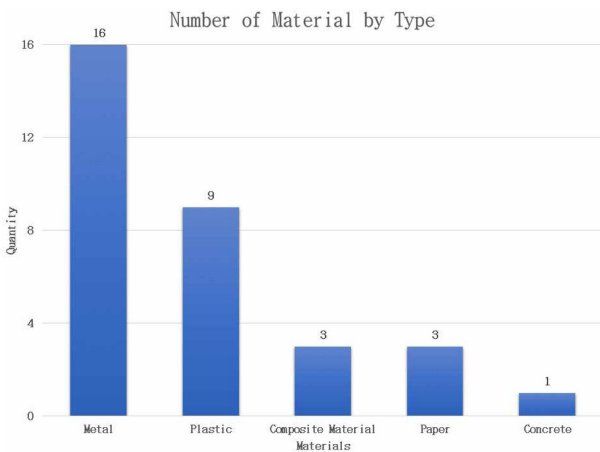


Fig. 5. Number of Material by Type.

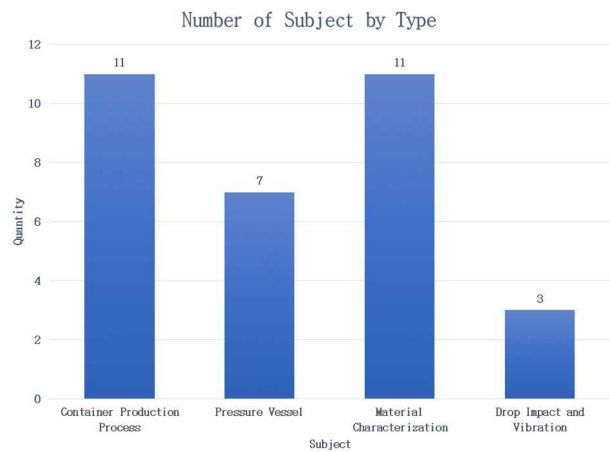


Fig. 6. Number of Subject by Type.

MARC가 4건(13%), LS-DYNA가 3건(9%)으로 ANSYS의 사용 빈도가 가장 높았다(Fig. 3). 해석 차원으로는 3D해석이 25건(78%), 2D해석이 7건(22%)으로 3D해석 빈도가 더 높았다(Fig. 4). 또한 해석 도구로 구조해석 도구(Static Structural Tool) 26건(81%), 열 해석 도구(Steady-Static Thermal Tool) 5건(16%), 진동 해석 도구(Modal Tool) 1건(3%)으로 구조해석 도구 사용 빈도가 가장 높았다(Fig. 4).

4) 연구 주제별 재질 동향

선행 연구된 각 주제의 재질을 살펴보면 알루미늄, 강판 등의 금속 재질이 16건(50%), ABS, PET 등의 플라스틱 재질이 9건(28%), 복합재질이 3건(9%) 종이 재질이 3건(9%) 콘크리트 1건(3%)으로 선행연구의 50%가 금속재질을 대상으로 수행하였다(Fig. 5).

2. 포장분야에서 유한요소해석 적용 방향

제시한 32건의 문헌 분석 결과, 용기 생산 공정, 압력용기, 재질 특성 분석, 낙하 충격 해석 및 진동 특성 분석 등의 4가지 주제로 논문의 분류가 가능하였다(Fig. 6). 이에 따라 포장분야에서 유한요소해석을 적용하기 위하여 주제별로 분류한 후 연구 방향을 제시하였다.

1) 용기 생산 공정

용기 생산 공정에 관한 논문은 Table 2와 같이 총 11건을 제시하였다. Ye(2003)에 따르면 포장에서 흔히 사용하는 소재인 플라스틱의 가공법에는 압출, 사출, 블로우(Blow molding) 성형 및 압축성형 등이 있다. 선행연구에서는 스크루 압출 공정에 대한 구조 해석을 통하여 회전에 따른 최고 압력 값과 스크루의 위치, 압출기 내의 속도 및 스크루의 형상을 확인하였고 폴리머의 혼합정도를 파악하였다⁶⁾. 또한 Kim

Table 2. Summary of Studies about Container Production Process

Subject	FEM Program	Analysis Dimension	Analysis Tool	Material
A Study on the Strains in the Flange in a Square Cup Drawing ¹²⁾	PAM-STAMP	3D	Static Structural	Metal
Stress Analysis of the Prestressed Dies by Using FEM ⁸⁾	ANSYS	2D	Static Structural	Metal
Thermal Analysis of Continuous Casting Mold ¹⁰⁾	ANSYS	2D	Steady-Static Thermal	Metal
Structural Analysis of Continuous Casting Mold ¹¹⁾	ANSYS	2D	Steady-Static Thermal	Metal
Analysis of Forming Processes of PET Bottle using a Finite Element Method ¹⁴⁾	ABAQUS	3D	Static Structural	Plastic
A Study on Analysis of Polymer Extruder Process using Finite Element Method ⁶⁾	SHAPE-RF	3D	Static Structural	Plastic
Development of the In-Mold Coating Process for Injection Molding Parts of Thermoplastics ¹⁶⁾	MOLDFLOW	3D	Static Structural	Plastic
A Study on the Optimized Blister Method using LS-DYNA ¹⁵⁾	LS-DYNA	3D	Static Structural	Plastic
Prediction of the Film Thickness and Pattern Variation through Film Insert Thermoforming ⁷⁾	PAM-FORM	3D	Steady-Static Thermal	Plastic
Finite Element Analysis on the Stress and Deformation Behaviors of a Safety Helmet ¹³⁾	MARC	3D	Static Structural	Plastic
Optimal Design of Mold using DRI Injection Technology ⁹⁾	MOLDFLOW	3D	Steady-Static Thermal	Plastic

(2008)에서는 인서트 열 성형 공정에 대한 유한요소해석을 통하여 필름의 두께변화 및 패턴변화 양상을 분석하여 실제 성형품을 예측하였다⁷⁾. 따라서 두 선행연구에서 제시한 연구모델은 서로 상이한 특성을 갖는 물질 간의 혼합(Blending)을 예측하여 기능성 포장 소재 설계의 기초 자료 제공과 실제 성형품에 대한 예측에 확대 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

플라스틱의 압출 및 사출 후에는 금형에서 제품 성형이 진행된다. Yeو등(1999)은 예압된 금형을 효과적으로 해석하는 방법을 제시하였고, 제안한 방법이 금형의 응력분포를 비교적 정확하게 해석할 수 있음을 보였다⁸⁾. 또한 Lee(2011)은 FEM 해석을 통하여 금형을 설계하였고 사출 기술을 적용한 실제 금형을 제작하여 효율성을 평가하였다⁹⁾. 두 선행연구의 연구방법은 현재 용기 성형 공정에 대한 구조해석을 통해 문제점을 개선하고 새로운 금형 설계와 그 효율성 평가에 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 한편 Lee와 Cho(1999)는 연속주조몰드의 열 해석을 통한 온도분포를 이용하여 온도분포하중에 의한 응력 특성을 확인하였고¹⁰⁾, Won등(2001)은 금형의 온도분포를 이용하여 성형된 제품의 온도 변화를 확인하였다¹¹⁾. 이에 따라 구조해석과 열 해석의 병행은 제품의 열 변형량을 고려한 금형 설계를 가능하게 하여 작업성 향상, 용기의 치수 정밀화 그리고 금형의 수명 연장 등이 가능할 것으로 사료된다. 일부 선행연구에서는 성형된 제품에 대하여 구조해석을 실시하여 연구를 진행하였다. 첫째 Kim

(1998)은 정사각형 용기와 원형 용기의 변형률을 FEM 해석과 성형시험을 통하여 확인하였고 그 결과 정사각형 용기에 변형률 완화가 발생함을 확인하였다¹²⁾. 둘째 Kim(2009)은 FEM 해석을 이용하여 두께에 따른 제품의 강도안전성과 충격에너지 흡수효과의 관계성을 확인하였다¹³⁾. 셋째 Joo등(2001)은 PET병 성형 공정에 대한 해석을 바탕으로 급격한 두께변화 없이 비교적 균일한 두께분포의 새로운 공정을 제시하였다¹⁴⁾. 넷째 Lee(2005)는 유한요소 해석을 이용하여 고분자 수지를 이용한 진공 성형 공정에서 발생하는 문제점을 파악하여 개선모델을 제시하였다¹⁵⁾. 제시된 4가지 선행연구 연구모델은 용기에 대한 구조해석을 통하여 성형 및 강도 특성에 대한 예측과 그 결과를 문제점 개선, 포장 용기의 정밀도 향상, 비용 절감 등에 적용 가능할 것으로 판단된다.

마지막으로 용기 성형 후 공정에서는 라벨링이나 코팅 등의 표면처리를 실시한다. Kim(2004)은 인몰드 코팅에 관한 수학적 모델을 통해 인몰드 코팅 분사 압력에 대한 수치적 계산을 수행하였고, 이를 통해 적정 코팅 두께를 파악하였다¹⁶⁾. 이는 포장재의 접착제 및 표면처리제 등의 설계를 개선하여 개봉용이성(Easy open) 포장 및 기능성 포장 등 경제·환경적 측면에서 유용한 적용 가능할 것으로 사료된다.

결과적으로 포장 용기 생산 공정에 유한요소해석 적용 시 공정 변수에 대한 영향과 생산된 용기의 강도 특성에 대한 재평가 및 재설계가 가능할 것이며, 이는 공정의 경제적 이윤으로 이어질 것으로 판단된다.

Table 3. Summary of Studies about Pressure Vessel

Subject	FEM Program	Analysis Dimension	Analysis Tool	Material
A Study on the Design Optimization of Corner Protection for LNG Storage Tank ²²⁾	ANSYS	2D	Static Structural	Composite Material
FEM Analysis on the Strength Safety of a LPG Cylinder ¹⁷⁾	MARC	2D	Static Structural	Metal
Strength Safety Study on the Stress Characteristics of a Composite Pressure Cylinder for 35 MPa Hydrogen Gas Vehicle ¹⁸⁾	MARC	2D	Static Structural	Composite Material
Stability Analysis of Hazmat Tank Foundation to Prevent Leakage Accident ¹⁹⁾	Pentagon 3D	3D	Static Structural	Concrete
Finite Element Stress Analysis of Large Sized Rectangular Water Tank Structures Made of Stainless Steel Materials ²³⁾	ANSYS	3D	Static Structural	Metal
Effects of Corner Radius on the Stress Strength Safety of LPG Steel Cylinder ²¹⁾	MARC	3D	Static Structural	Metal
A Study on the Structural Integrity of the Transport Cask for the Radioactive Material under Oblique Impact ²⁰⁾	LS-DYNA	3D	Static Structural	Composite Material

2) 압력 용기

압력용기의 유한요소해석에 관한 논문은 Table 3과 같이 총 7건을 제시하였다. 이는 압력용기의 강도안전성, 압력 용기 설계 등에 관한 연구이며, 가스 위험물이나 중량물과 연관성이 있다. 위험물은 다음 선행연구와 같은 수출 전 용기에 대한 검증이 필요하다. Kim과 Jeong(2007)은 압력용기에 작용하는 4가지 압력의 응력분포를 해석하여 강도안전성을 고찰하였고¹⁷⁾, Kim과 Kim(2012)은 각각 다른 재질의 압력 용기에 대한 응력 안전성에 관하여 연구하였고 이를 미국과 한국 인증 기준과 비교하여 평가하였다¹⁸⁾. 또한 Lim과 Park(2013)은 위험물 저장탱크 누출사고를 미연에 방지하기 위해 4가지 재질에 대한 구조해석을 실시하여 재질별 특성에 적합한 설계 가이드라인을 제시하였고¹⁹⁾, Yang등(2016)은 구조해석을 통해 방사성 물질 운반용기의 설계를 단순화하고 낙하 충격 해석을 통해 구조 안전성을 검토하였다²⁰⁾. 따라서 제시된 선행연구를 통해 유한요소해석은 내용물과 용기 재질에 관계없이 위험물 용기의 사전 검증과 개선을 가능하게 하며, 그 결과 연구개발 비용 및 시간의 절약을 가능하게 할 것으로 판단된다. 즉 위험물이나 중량물 용기에 대하여 응력 분포를 분석하여 사전에 위험을 방지하고 돌발 상황에 대한 구조 건전성의 확보가 가능할 것으로 사료된다.

한편 압력용기는 내압과 외부의 충격에 의해 응력집중현상이 발생한다. Kim(2015)에 따르면 용기의 두께보다 상·하단의 코너 반경이 응력강도안전성에 더 큰 영향을 미친다. 이에 따라 선행연구에서는 용기의 두께와 코너(Corner) 반경의 최적화 설계방향을 제시하였다²¹⁾. 그리고 코너 부분에 작용하는 외력에 의한 응력집중현상을 방지하기 위해 Kim등(2004)은 다양한 설계조건에 대한 코너프로텍션의 응력분석을 통하여 합리적인 설계지침을 제시하였다²²⁾. 이를 통해 2가지 선행연구에서 제시한 연구 모델은 위험물 포장의 구조

를 예측하여 두께를 최소화하고 응력집중현상을 방지하는 최적 설계 기초자료 제공에 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 Son과 Lee(2015)에 따르면 용기의 구조해석은 단순화하고 최적화할 필요가 있으며 지진, 폭설, 태풍 등 안전성에 위험이 될 수 있는 다양한 변수에 대해 합리적 설계 기준이 필요하다²³⁾.

결과적으로 위험물 포장에 대한 유한요소해석은 내용물의 종류나 용기의 크기에 관계없이 위험물 및 중량물 포장용기에 관한 강도안전성을 사전에 확보함으로써 발생할 수 있는 인명사고 감소와 물류비 절감이 가능하고 실제로 발생하는 진동, 압력 등에 대하여 용기 개선 등이 가능할 것으로 판단된다.

3) 재질 특성 분석

재질 특성의 유한요소해석에 관한 논문은 Table 4와 같이 총 11건을 제시하였다. 이는 금속 재질, 복합 재질 등의 기계적 강도, 성형 특성, 파괴 특성, 변형거동 등에 관하여 진동 및 피로해석, 좌굴해석, 응력해석 등을 통하여 파악하였고, 완충재, 골판지, 팔레트, 컨테이너 등의 수송용 포장용기 설계와 직접적인 연관성이 있다. 먼저 수송용기는 설계 시 유통과정에서 발생하는 진동 및 피로조건을 고려해야 한다. Kim(2013)은 사다리꼴 주름판에서 주름의 높이, 각, 개수 등에 따라 진동 및 피로 특성의 차이가 발생함을 확인하였고²⁴⁾, Lee(1994)는 움직임에 따른 강성도를 설정할 때, 어느 부분이 가장 중요한지를 나타내는 설계 지표로서 민감도를 이용하여 분석하였고 실제 경험과 일치함을 확인하였다²⁵⁾. 제시한 두 선행연구의 연구모델은 수송용 골판지 상자 설계 시 골의 높이, 개수 등에 따른 진동 특성을 예측하고 수송과정에서 발생하는 진동에 대한 민감도 분석을 통해 용기에 발생하는 문제점을 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4. Summary of Studies about Material Characterization

Subject	FEM Program	Analysis Dimension	Analysis Tool	Material
Design Sensitivity Analysis for the Vibration Characteristics of Vehicle Structure ²⁵⁾	NASTRAN	3D	Static Structural	Metal
The Vibration and Stress Analysis of Stiffened Box Structures ²⁶⁾	ANSYS	3D	Static Structural	Metal
Analysis for Bending Strength of Corrugated Web Girder ²⁹⁾	ABAQUS	3D	Static Structural	Metal
Finite Element Simulation of Interface Bonding in Kinetic Sprayed Coatings ³³⁾	ABAQUS	3D	Steady-Static Thermal	Metal
Evaluation of Material Mechanics of Corrugated Board Structure by Finite Element Analysis ²⁸⁾	ANSYS	3D	Static Structural	Paper
Prediction to Shock Absorption Energy of an Aluminum Honeycomb ²⁷⁾	LS-DYNA	3D	Static Structural	Metal
Effects of Varied Skins on Low Velocity Impact Behaviors of Sandwich Panels Containing Aluminum Honeycomb Core ³²⁾	ANSYS	3D	Static Structural	Metal
Seismic Capacity Improvement of Building Structures with Honeycomb Shaped Steel Hysteretic Damper ³¹⁾	ABAQUS	3D	Static Structural	Metal
Vibration Analysis of Trapezoidally Corrugated Plates ²⁴⁾	ANSYS	3D	Static Structural	Metal
A Finite Element Analysis on Compression of Aluminum Foam Bonded with Adhesive ³⁴⁾	ANSYS	2D	Static Structural	Metal
Corrugated Packaging Simulation by Finite Element Structural Analysis – Bending and Flat Crush Behavior ³⁰⁾	ANSYS	3D	Static Structural	Paper

이는 운송 중 발생하는 진동에 대하여 제품 파손 방지를 위한 완충재에 대해서도 동일하다. Lee등(1996)은 박스 보강재 구조물에 대한 진동 및 구조 응력해석을 수행하여 모양 및 두께에 따른 진동특성을 파악하였고²⁶⁾, Kim등(2011)은 충격흡수용 알루미늄 허니콤(Honeycomb)에 대한 구조해석을 통해 형태에 따른 에너지 흡수특성을 파악하였다²⁷⁾. 따라서 진동 해석을 이용한 용기 설계는 에너지흡수 특성을 분석하여 과대 포장을 줄임과 동시에 완충재의 압축강도 개선이 가능할 것이며 운송 중 발생하는 진동에 의한 강도 열화를 방지하고 제품에 적합한 완충재 설계가 가능할 것으로 사료된다.

한편 Lee(2009)에 따르면 유통과정에서 발생하는 진동은 지속적으로 용기의 강도 열화와 좌굴 현상이 발생하며, 특히 골판지 상자는 수분에 의한 강도열화로 좌굴 발생이 빈번하여 제품의 파손을 야기한다²⁸⁾. 골판지의 이러한 특성은 좌굴 해석을 통하여 그 강도를 파악할 수 있다. 선행연구에서 좌굴해석의 경우 전단, 휨 등에 따른 재료의 강도 해석에서 사용하였다. Nam(2008)은 비선형 해석을 통하여 파형 복부 판 거동의 기하학적 특성과 함께 탄성 휨 비틀림 좌굴강도와 소성 모멘트, 압축강도 등을 확인하였고²⁹⁾, Shim(2015)은 골의 종류나 골의 방향, 압축방향에 따라 휨 거동과 평면압축 거동이 다를 수 있음을 시뮬레이션과 실제 실험을 비교하여 일치함을 확인하였다³⁰⁾. 따라서 제시된 선행연구의 해석방법은 수송용 골판지상자의 구조 역학적인 특성 파악이 가능하고, 수분이

나 응력에 의한 변수에 대하여 안전율을 확보하여 설계가 가능할 것으로 판단된다. 위에서 언급한 것처럼 쉽게 강도열화가 발생하는 골판지의 강도향상을 위하여 일부 팔레트와 중량물 용기는 골의 형태를 변형한 허니콤 골판지를 사용한다. 다음 제시한 선행연구에서는 그 특성을 파악하였는데, Lee(2013)는 구조해석을 통하여 허니콤 구조의 단위 셀의 전단 탄성계수 및 강도를 파악하였고³¹⁾, Kim(2012)은 허니콤 구조가 낮은 중량을 유지하면서 높은 강성과 강도를 갖고 있음을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다³²⁾. 이처럼 유한요소해석은 용기의 재료와 구조적 특성을 파악하여 구조적 재설계, 안전을 향상 등을 통한 강도 개선에 적용 가능할 것으로 판단된다.

마지막으로 재질 간 접합 특성 또한 유한요소해석을 이용하여 평가한다. 선행연구에서는 금속에 관한 접합 특성을 연구하였다. Bae등(2008)은 물성과 열-기계적 특성이 서로 다른 4가지 금속 재료를 선택하여 입자와 모재의 동종 재료 간 고속충돌에 의한 고 변형을 변형 현상을 시뮬레이션하였고, 재료의 단일 소성 불안정 양상이 코팅의 형태와 특성을 결정함을 파악하였다³³⁾. 또한 Gao와 Cho(2014)는 접착제의 사용 여부에 따른 알루미늄 폼의 압축거동을 분석하였고 접착제를 사용하였을 때 구조적 내구성이 가장 양호함을 확인하였다³⁴⁾. Jung과 Ryu(2001)에 따르면, 포장에서 사용하는 금속 재질 중 알루미늄은 플라스틱과 적층(laminate)하여 연포장으로 사용한다. 하지만 일부 고분자 필름의 비극성 표면

Table 5. Summary of Studies about Drop Impact and Vibration

Subject	FEM Program	Analysis Dimension	Analysis Tool	Material
A Study on the Cushion Package Design of a Monitor using Finite Element Method ³⁶⁾	PAM-CRASH	3D	Static Structural	Plastic
Optimal Design for Cushioning Package of a Heavy Electronic Product Using Mechanical Drop Analysis ³⁷⁾	PAM-CRASH	3D	Static Structural	Plastic
Vibration Analysis of Pear in Packaged Freight Using Finite Element Method ³⁸⁾	IntuitiveFEM	3D	Modal Analysis	Paper

특성 때문에 알루미늄과의 접착 문제가 발생한다³⁵⁾. 따라서 제시된 선행연구의 연구모델은 상이한 재질 간 접합 특성의 파악을 가능하게 하여 접합된 포장재 표면의 크랙(Crack)문제나 박리 문제 등의 해결이나 포장재 표면에 개봉용이성(Easy open)과 같은 편의성 부여에 적용 가능할 것으로 사료된다.

결과적으로 포장분야에서 유한요소해석은 수송용기에 적용하는 환경조건에 대하여 시뮬레이션을 통해 용기의 강도 및 열화 특성 등의 분석과 상이한 특성을 갖는 재질 간 접합이나 코팅 등의 분석에 적용함으로써 실험비용 및 시간을 줄여주고 새로운 용기나 복합 재질의 개발을 가능하게 할 것으로 판단된다.

4) 낙하 충격 해석 및 진동 특성 분석

낙하충격해석 및 진동특성 분석에 관한 유한요소해석 논문은 Table 5과 같이 총 3건을 제시하였다. 이는 물류 유통 환경에 대한 동적 시뮬레이션 분야로서 유통환경 중 발생할 수 있는 다양한 충격 에너지에 의한 제품 파손을 방지하기 위하여 필요한 분야이다. Kim 등(2000)은 유한요소법을 이용하여 모니터의 완충 포장재 설계에 관한 연구를 진행하였고³⁶⁾, Kum 등(2004)은 낙하충격해석을 통하여 대형 전자제품의 완충포장재 최적 설계에 관한 연구를 진행하였다³⁷⁾. 두 선행연구 모두 전자제품을 대상으로 자유낙하 충격시험을 실시하여 파손을 일으키는 낙하조건과 파손 위치 등을 찾아내고 동일한 조건으로 완충 포장재를 포함한 제품의 낙하 충격 해석을 통하여 완충 포장재의 최적 설계를 실시하였다. 또한 Kim 등(2004)등은 배 포장화물용 골판지 상자를 분석하기 위한 기초연구로 골판지 상자 단위로 포장된 상태의 배에 대하여 유한요소해석 기법을 적용하여 진동특성을 분석하였으며 트레이캡과 골판지의 완충재에 대한 성능을 분석하기 위하여 유한요소해석을 적용하였다³⁸⁾. 따라서 제시된 선행연구의 연구 모델은 포장뿐 아니라 제품에 대한 실제 실험과 유한요소해석을 병행함으로써 유통과정 중 발생하는 충격과 진동 등에 관하여 그 특성 파악을 가능하게 하여 골판지 상자나 완충포장재의 적정포장설계 등의 연구에 적용 가능할 것으로 사료된다. 결과적으로 포장분야에 유한요소해석

적용이 과대포장으로 발생하는 포장 폐기물이나 물류비용 증가 등의 문제점을 극복하고 새로운 형태의 물류 포장재 개발을 가능하게 하여 포장의 보호성과 더불어 환경성과 경제성을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

결 론

본 연구는 1991년부터 2017년까지의 국내 학술지 및 학위논문에 게재된 유한요소해석 관련 논문 중 포장과 직접적인 연관성이 있다고 판단된 32편의 논문을 분석하여 연구의 동향을 살펴보았다. 선행연구 분석을 통하여 현재 포장 분야의 유한요소해석은 매우 미흡한 실정이며, 일부 분야에만 국한되어 있는 것을 파악하였고 본 연구에서는 이를 바탕으로 향후 포장 분야에 유한요소 적용 방향에 대하여 논하였다. 유한요소해석의 적용은 포장재에 가해지는 응력해석을 통해 구조변형 및 두께 감량을 가능하게 하고, 기계적 강도 향상 및 포장소재 사용량 감소를 통해 원가 절감이 가능하며, 결과적으로 향후 포장 분야의 연구에 있어 효율적으로 적정 포장설계를 할 수 있을 것으로 판단된다.

요 약

적정포장설계는 포장 원자재 사용량 및 폐기물 발생량뿐만 아니라 재료비 및 물류비 절감이 가능하여 포장재의 환경성과 경제성을 모두 충족시킨다. 유한요소해석은 구조해석, 열전달, 유체운동, 전자기 등 다양한 분야에 유용한 도구로 적용되고 있지만, 포장분야에서는 그 적용이 미비하다. 이에 따라 포장분야에 유한요소해석 적용은 컴퓨터 시뮬레이션으로 포장 설계가 가능하기 때문에 향후 연구에 있어 비용과 시간 절약이 가능하며 적정포장설계를 통해 포장 폐기물과 물류비 절감이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 향후 포장분야에서 유한요소해석(FEM) 프로그램을 활용한 연구 설계에 도움이 되고자 하는 목적으로 국내에서 발표된 유한요소해석 관련 논문을 조사하였다. 1991년부터 2017년까지의 국내 학술지 및 학위논문에 게재된 유한요소해석 관련 논문 중 포장과 직접적인 연관성이 있다고 판단된 32

편의 논문을 분석하여 연구의 동향을 살펴보았다. 그 결과 각 논문을 사용한 연구주제 및 내용, 유한요소해석 프로그램, 해석방법 등으로 분석하고 향후 포장분야에 활용할 수 있는 방향에 대하여 제시하였다. 포장 영역에 유한요소해석의 적용은 포장재에 가해지는 응력 및 진동해석을 통해 구조변경 및 두께 감량을 가능하게 하고 이에 따라 기계적 강도 향상 및 포장소재 사용량 감소를 통해 적정포장설계로 원가 절감이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 향후 포장 분야의 연구에 있어, 유한요소해석을 함께 병행한다면 경제적이고 합리적인 포장 설계를 할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- Jung, H. M. 2013. Cushioning efficiency evaluation by using the new determination of cushioning curve in cushioning packaging material design for agricultural products. Korea J. Packag. Sci. Tech. 19: 51-56.
- Oh, J. Y. 2009. Cushioning performance analysis of cushioning materials for vibration and impact condition. Korea J. Packag. Sci. Tech. 15: 1-6.
- Kim, S. J., Jang, S. H., Kim, K. T., Lee, Y. S., and Park, S. I. 2013. Analysis of glass bottle using glass bottle lightness index. Korea J. Packag. Sci. Tech. 19: 109-115.
- Choi, S. R., Jung, H., and Choi, D. S. 2013. The development of pulp mold tray for melon packaging. Korea J. Packag. Sci. Tech. 19: 125-131.
- Kim, S. J., Song, J. Y., Yu, M. J., and Park, S. I. 2013. Cosmetic packaging design using cosmetic container's volume index. Korea J. Packag. Sci. Tech. 19: 133-138.
- Ye, Y. S. 2003. A study on analysis of polymer extruder process using finite element method. M.S. Dissertation, Sogang University, Seoul, Korea.
- Kim, G. Y. 2008. Prediction of the film thickness and pattern variation through film insert thermoforming. M.S. Dissertation, Pusan National University, Busan, Korea.
- Yeo, H. T., Choi, Y., and Hur, K. D. 1999. Stress analysis of the prestressed dies by using FEM. J. Korean Soc. Precis. Eng. 16: 114-122.
- Lee, H. J. 2011. Optimal design of mold using DRI injection technology. M.S. Dissertation, Pusan National University, Busan, Korea.
- Lee, J. S. and Cho, D. H. 1999. Thermal analysis of continuous casting mold. J. Korean Soc. Mach. Tool Engineers 8: 43-49.
- Won, J. J., Lee, J. S., and Hong, S. J. 2001. Structural analysis of continuous casting mold. Trans. Korean Soc. Mach. Tool Engineers 10: 104-110.
- Kim, J. M. 1998. A Study on the strains in the flange in a square cup drawing. J. Korean Soc. Eng. Res. 29: 403-413. Ulsan University, Ulsan, Korea.
- Kim, C. K. 2009. Finite element analysis on the stress and deformation behaviors of a safety helmet. J. Korean Inst. Gas 13: 27-32.
- Joo, S. T., Kim, Y. H., and Lyu, M. Y. 2001. Analysis of forming processes of PET bottle using a finite element method. J. Korean Soc. Trans. Mater. Processing 10: 525-533.
- Lee, M. G. 2005. A study on the optimized blister method using LS-DYNA. M.A. Dissertation, Chonnam National University, Gwang-Ju, Korea.
- Kim, D. S. 2004. Development of the in-mold coating process for injection molding parts of thermoplastics. M.S. Dissertation, Chungang University, Seoul, Korea.
- Kim, C. K. and Jeong, N. I. 2007. FEM analysis on the strength safety of a LPG cylinder. J. Korean Inst. Gas 11: 55-59.
- Kim, C. K. and Kim, D. H. 2012. Strength safety study on the stress characteristics of a composite pressure cylinder for 35MPa hydrogen gas vehicle. J. Korean Inst. Gas 16: 25-30.
- Lim, J. J. and Park, Y. H. 2013. Stability analysis of hazmat tank foundation to prevent leakage accident. J. Korea Soc. Hazardous Mater. 1: 44-48.
- Yang, T. H., Hong, J. T., and Yeon, K. W. 2016. A study on the structural integrity of the transport cask for the radioactive material under oblique impact. J. Korean Soc. Mech. Tech. 18: 64-69.
- Kim, C. K. 2015. Effects of corner radius on the stress strength safety of LPG steel cylinder. J. Korean Inst. Gas 19: 18-22.
- Kim, H. S., Hong, S. H., and Seo, H. S. 2004. A study on the design optimization of corner protection for LNG storage tank. J. Trans. Korean Soc. Mech. Engineers A 28: 1384-1390.
- Son, B. J. and Lee, S. Y. 2015. Finite element stress analysis of large sized rectangular water tank structures made of stainless steel materials. J. Korean Soc. Adv. Comp. Struc. 6: 85-90.
- Kim, Y. W. 2013. Vibration analysis of trapezoidally corrugated plates. J. Trans. Korean Soc. Noise Vibration Eng. 23: 928-934.
- Lee, J. H. 1994. Design sensitivity analysis for the vibration characteristics of vehicle structure. J. Computational Struct. Eng. Inst. Korea 7: 91-98.
- Lee, Y. S., Han J. D., Han, Y. H., and Suh, J. 1996. The vibration and stress analysis of stiffened box structures. J. Korean Soc. Noise Vibration Eng. 6: 147-161.
- Kim, H. D., Lee, H. H., Hwang, D. S., and Park, J. S. 2011. Prediction to shock absorption energy of an aluminum honeycomb. J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 39: 391-399.
- Lee, S. Y. 2009. Evaluation of material mechanics of corrugated board structure by finite element analysis. M.A. Dissertation, Yonsei University, Seoul, Korea.
- Nam, J. Y. 2008. Analysis for bending strength of corrugated web girder. M.S. Dissertation, Korea University, Seoul, Korea.
- Shim, J. M. 2015. Corrugated packaging simulation by finite element structural analysis - Bending and flat crush behavior. M.S. Dissertation, Pusan National University, Busan, Korea.
- Lee, M. H. 2013. Seismic capacity improvement of building

- structures with honeycomb shaped steel hysteretic damper. M.S. Dissertation, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea.
32. Kim, J. W. 2012. Effects of varied skins on low velocity impact behaviors of sandwich panels containing aluminum honeycomb core. M.S. Dissertation, Changwon National University, Gyeong-Nam, Korea.
 33. Bae, G. Y., Kang, K. C., Yoon, S. H., and Lee, C. H. 2008. Finite element simulation of interface bonding in kinetic sprayed coatings. *J. Korea Soc. Welding Joining* 26: 74-80.
 34. Gao, T. and Cho, J. U. 2014. A Finite element analysis on compression of aluminum foam bonded with adhesive. *J. Korean Soc. Mech. Tech.* 16: 2105-2110.
 35. Jung, B. Y. and Ryu, S. H. 2001. Surface modification of low density polyethylene and adhesion characteristics of low density polyethylene/aluminum laminate. *J. Korea Soc. Elastomer* 36: 195-200.
 36. Kim, H. B. L., Park, S. H., and Kim, W. J. 2000. A study on the cushion package design of a monitor using finite element method. *J. Korean Soc. Precis. Eng.* 17: 88-93.
 37. Kum, D. H., Kim, W. J., Kim, S. D., and Park, S. H. 2004. Optimal design for cushioning package of a heavy electronic product using mechanical drop analysis. *J. Korean Soc. Noise Vibration Eng.* 14: 128-135.
 38. Kim, M. S., Jung, H. M., and Kim, K. B. 2004. Vibration analysis of pear in packaged freight using finite element method. *J. Biosyst. Eng.* 29: 501-507.
- 투고: 2017.09.20 / 심사완료: 2017.11.09 / 게재확정: 2017.11.20