

냉장고 낙하시 하힌지 동적변형 해석

홍석무* · 최용찬* · 엄성욱* · 김홍래** · 현홍철*†

*삼성전자 글로벌기술센터, **KOSTECH

Finite Element Analysis of Dynamic Deformation of Refrigerator's Lower Hinge during Drop Test

Seokmoo Hong^{*}, Yong Chan Choi^{*}, Seong-Uk Eom^{*}, Hong Lae Kim^{**} and Hong Chul Hyun^{*†}

^{*} Global Technology Center, Samsung Electronics Co. Ltd.

^{**} Korea Simulation Technology Co. Ltd.

(Received August 5, 2014; Revised September 30, 2014; Accepted October 6, 2014)

Key Words: Drop/Impact Test(낙하/충격실험), Refrigerator(냉장고), Finite Element Method(유한요소해석), Reverse Engineering(역공학), Low Hinge(하힌지)

초록: 본 연구에서는 유한요소해석으로 냉장고 낙하충격에 대한 하힌지의 변형거동을 분석했다. 우선 하힌지 및 하부포장재 동적물성 확보를 위해 각각 속도 별 굽힘시험과 압축시험을 수행했다. 이어 시험에서 얻은 하중-변위곡선과 유사한 거동을 나타내는 하힌지 및 하부 포장재의 유동응력식을 역공학으로 얻었다. 확보한 물성데이터를 이용해 LS-DYNA로 낙하해석을 수행해, 낙하시 냉장고 자체 및 하힌지 변형거동을 분석했다. 최종적으로 3D 측정으로 분석한 실 냉장고 낙하시험으로, 낙하해석 모델의 유효성을 검증했다. 본 연구에서 제시한 해석모델은 추후 하힌지 및 포장재의 내 충격설계 등에 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

Abstract: In this paper dynamic deformation of lower hinge of refrigerator is simulated using dynamic finite element analysis while refrigerator is being dropped. The flow stress curves considering velocity dependency of hinge and lower packing material are determined through bending test and compression test at several dropping speeds. The determined material properties and flow stress from reverse engineering were used as input data for refrigerator's drop test using a dynamic finite element analysis software LS-DYNA. Additionally the result between CAE and 3D deformation measurement from real refrigerator drop test are compared and the result shows that the proposed analysis model is very useful to design lower hinge and lower packing durable to the impulsive drop impact.

1. 서 론

최근 소비자들의 가전제품에 대한 높아진 요구를 수용하기 위해 다양한 형태의 전자제품들이 생산되고 있다. 따라서 제품 자체의 기능적 성능향상은 물론, 제품 신뢰성 측면에서 제품 운송간에 발생할 수 있는 다양한 문제점 분석 및 해결에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 예를 들어 제품 운송간의 급격한 환경변화(온도, 습도, 염분)로 표면이 부식되거나, 외부 충격(낙하)으로 인해 구조물 자체에 변형이 발생할 수 있다.

충격(낙하) 변형문제는 TV, 냉장고, 전자레인지 등 대형 전자제품들의 크기가 더 커지는 추세에 있어 중요성이 더 증대되고 있다. 이에 낙하 시 제품들의 동적거동을 분석해 제품의 구조나 포장재를 개선해 내 충격성을 향상 시키는 많은 연구들이 진행되고 있다.^(1~6) 특히, 냉장고의 경우 이중 도어 등을 적용해

† Corresponding Author, E-mail: hc79.hyun@samsung.com, TEL: 031-200-2521

도어부의 하중이 크게 증가하고 있어서, 운송 중 낙하에 의한 하한지 변형이 빈번히 발생하고 있다. 제품개발 단계에서 하한지 설계 후 실 낙하 충격시험으로 하한지 변형양상을 평가하고 있으나, 실물 냉장고를 이용한 낙하시험은 상당한 비용상승을 초래한다. 해석적인 측면에서는 냉장고 전체 부품 모델링의 난해함과 동적 낙하해석의 어려움으로 인해 정적인 해석으로 정성적 예측 및 검증에 그치고 있다. 그러나, 정적인 변형 예측만으로는 충격하중에 의해 가중되는 냉장고 하한지 변형과 파손을 예측하기에는 부족한 면이 있다. 냉장고 완제품 세트의 동적해석을 위해서는 캐비닛, 발포 및 구조 보강재, 도어부, 냉장고 내부 구조재인 내상, 힌지 그리고 각종 체결물 등이 고려되어야 한다. 그리고 낙하해석 시 충격하중을 계산하기 위한 동적 유한요소해석 모델링기법이 필요하다. 그러나 동적물성은 일반적인 인장시험이나 압축시험으로 확보하기 어렵고, 각종 부품들이 조립된 복잡한 구조물의 낙하해석은 시간 적인 측면과 해의 수렴에도 어려움이 있는 것이 현실이다.

본 연구에서는 냉장고 운송 중 낙하충격 시 도어와 캐비닛을 연결하는 하한지의 변형을 예측할 수 있는 실용적인 해석방법을 제시하고자 한다. 우선 동적변형 시 필요한 소재 물성확보를 위해서 다양한 속도에서 하한지와 하부 포장재의 동적물성 데이터를 실험 및 역공학으로 확보했다. 그리고, 역공학으로 얻어진 비선형 물성데이터를 기반으로 낙하해석을 수행했다. 해석시간과 수렴성 등을 고려한 실용적인 해석을 수행하기 위해 힌지 및 포장재를 제외한 냉장고 캐비닛, 도어 등은 강체 (Rigid Body)로 가정했다. 최종적으로 본 연구의 검증을 위해, 해석으로 구해진 변형거동과 실제 제품의 낙하 실험결과를 비교 분석했다.

2. 재료모델 및 특성평가

2.1 재료 구성방정식

본 연구에서는 충격 시 속도에 민감한 힌지변형을 모사하기 위해 식 (1)과 같은 Cowper-Symonds 재료 모델을 적용하였다.⁽⁷⁾ Cowper-Symonds는 준정적 변형률 속도부터 높은 변형률속도를 겪는 재료의 거동을 모사하는데 적합한 모델이다.⁽⁷⁾

$$\sigma_{\text{dynamic}} = \sigma_{\text{static}} \left\{ 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^P \right\} \quad (1)$$

여기서, σ_{static} 과 σ_{dynamic} 는 각각 준정적 및 동적거동 재료의 유동응력, $\dot{\epsilon}$ 는 변형률속도를 의미한다. 아울러 D 와 P 는 Cowper-Symonds 재료상수이다. 한편 준정적 유동응력의 경우 강도상수인 K , 변형경화 지수 n , 초기 변형률 ϵ_0 을 이용해, 식 (2)와 같은 Swift 재료모델로 표현할 수 있다.

$$\sigma_{\text{static}} = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 조합하면, 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$\sigma_{\text{dynamic}} = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n \left\{ 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^P \right\} \quad (3)$$

한편 포장재의 동적 거동은 Fu-Chang Foam 모델을 이용해 모사했다. Fu-Chang foam 모델은 저밀도와 중밀도의 폼 재료의 변형률 속도효과를 고려할 수 있다. 특히, LS-DYNA⁽⁸⁾에서 제공하는 MAT83의 경우 단축시험 데이터를 직접 입력하여 사용할 수 있어서, 복잡한 재료상수를 입력할 필요가 없다. 변형률 속도 별로 입력된 응력변형률 값은 선형 보간해 계산에 사용된다.

2.2 재료시험 및 역공학 기반 재료물성 획득

동적 재료물성을 확보하기 위해, 하한지에 대한 속도 별 굽힘시험으로 하중-변위 곡선을 얻었다. 시험에 사용된 하한지의 소재는 열간 압연강판 (SPHC-PO)이며, 두께 6 mm, 폭은 약 80 mm의 크기를 갖는다. Fig. 1에 펀치와 하한지 고정지그 등으로 구성된 시험장치를 나타냈다. Fig. 1에서 보여지는 바와

같이 하힌지는 지그에 고정되고, 펀치로 냉장고 도어 무게가 집중되는 지점 (도어-힌지 체결 부)에 집중 하중을 부가했다. 이와 같은 굽힘시험은 만능시험기 (Zwick 250 kN, Germany)를 활용하여 수행하였으며, 시험 펀치 속도는 $v = 0.1, 1.0, 10, 20 \text{ mm/s}$ 이다. 시험은 각 속도당 5회씩 수행하였으며, 반복 시험에 대한 편차는 거의 보이지 않았다. Fig. 2에 속도에 따른 하중-변위 곡선을 나타냈다. 속도가 증가함에 따라 최대 변형 하중도 커지고 있음을 확인할 수 있다.

역공학기법으로 재료물성으로 얻기 위해 굽힘해석을 수행했다. 해석 시 하힌지 (셀 요소)를 제외한 펀치 및 고정지그는 강체로 가정했다. 굽힘해석은 상용프로그램인 LS-DYNA으로. 굽힘시험으로 얻은 하중-변위곡선 데이터와 최적화 프로그램 LS-OPT⁽⁸⁾를 이용해 식 (3)의 계수 K, n, ϵ_0, D 와 P 를 얻었다 (Table 1). Fig. 3에 굽힘속도 따른 대한 하중-변위 실험곡선과 역공학으로 구한 유동응력으로 얻은 하중-변위 해석곡선을 비교해 나타냈다. 해석 및 실험 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있다.

Table 1 Material properties of low hinge

$D (/s)$	P	$K \text{ (MPa)}$	ϵ_0	n
0.116	17.2	363.0	0.008	0.062

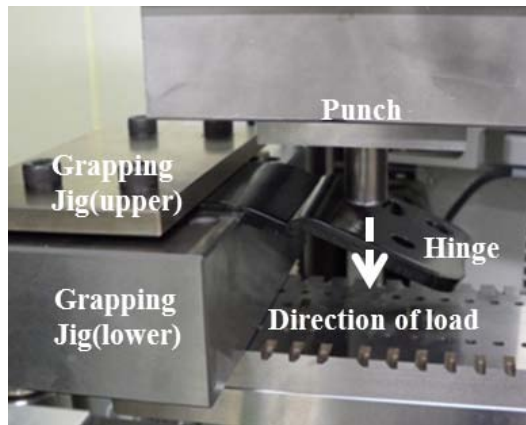


Fig. 1 Bending test system for low hinge

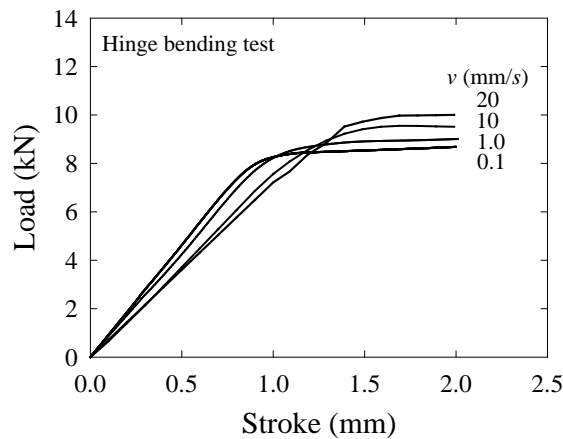


Fig. 2 Variation of load-stroke curves under different punch velocities

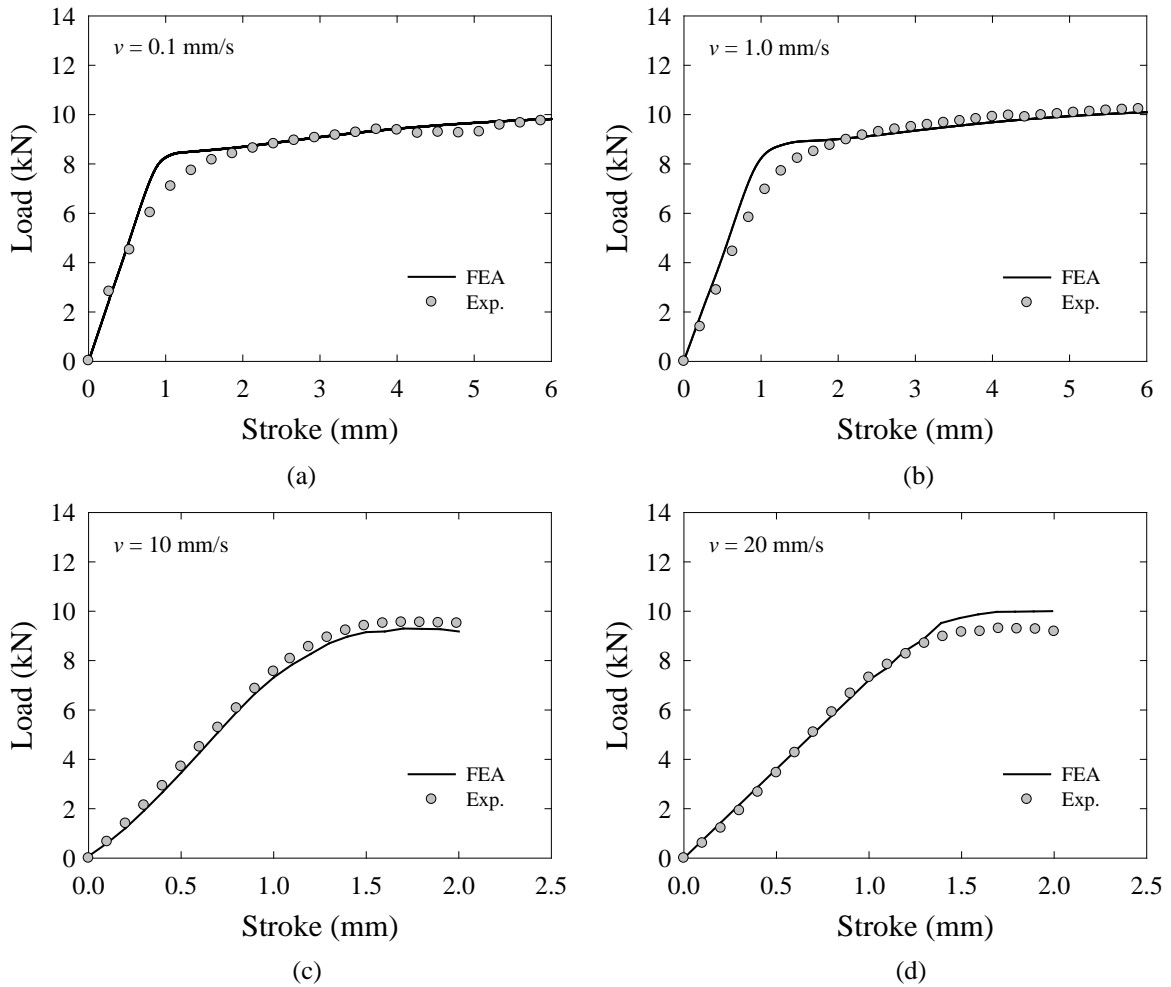


Fig. 3 Comparison between calculated load-stroke curve by optimization and experimental curve at (a) $v = 0.1$, (b) 1.0, (c) 10 and (d) 20 mm/s

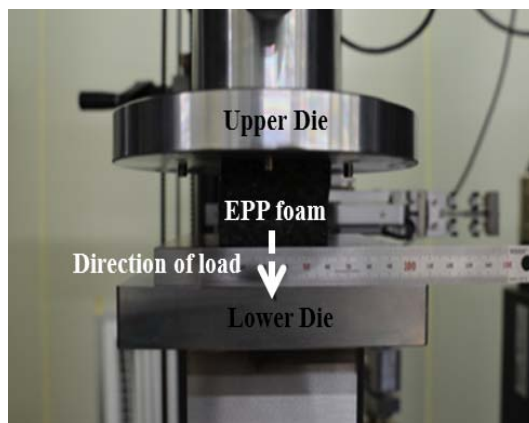


Fig. 4 Compression test system for EPP foam

낙하 시 냉장고 하부포장재의 특성은 냉장고가 받는 충격량 크기에 큰 영향을 미친다. 이에 하부포장재의 동적 물성확보를 위한 압축시험을 수행해 EPP-foam(Extended Polypropylene)의 물성을 얻었다. 압축시험에서 사용한 포장재 재료는 EPP-24로 폴리프로필렌을 24배 부피로 발포, 팽창시킨 것이다. 압축시험은 Zwick 250kN 만능 시험기를 이용해 50mm×50mm×50mm 크기의 EPP-24 시편을 속도 $v = 1$,

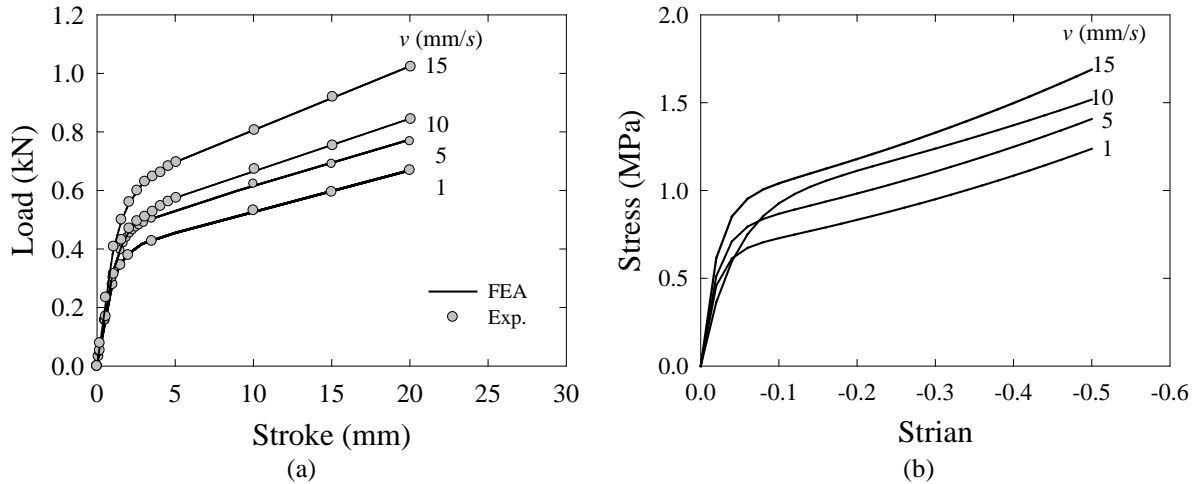


Fig. 5 (a) Variation of load-stroke curves and (b) stress-strain curves of EPP foam with compression velocity.

5, 10, 15 mm/s로 가중-제하를 반복했다(Fig. 4). 일반적인 초탄성 재료에서 발생하는 Mullins softening 효과를 제거하기 위해 3회 가중-제하 반복 후의 압축 하중-변위 데이터를 확보했다. Fig. 5(a)에 다양한 속도에 따라 얻은 EPP-foam의 하중-변위곡선을 나타냈다.

한편 최적화 프로그램 LS_OPT의 Meta model-based optimization 방법을 이용해 실험과 유사한 하중-변위 곡선을 주는 EPP-foam의 재료물성을 획득하였다. 해석과 실험의 하중-변위 곡선의 상대오차의 최소화를 목적함수로 설정하였다. Fig. 5(b)는 최적화 결과로 얻어진 응력-변형률 곡선이며, Fig. 5(a)에 실험과 해석으로 획득한 하중-변위곡선을 비교해 나타냈다

2.3 냉장고 낙하해석 모델

2.2절에서 확보한 하한지 및 EPP 포장재의 유동 응력으로, 냉장고 낙하충격 변형해석을 수행했다. 동적변형 거동모사를 위한 유한요소해석 프로그램은 LS-dyna를 사용했다.⁽⁸⁾ 해석시간 단축과 해석 수렴성 향상을 위해서 초기 모델에서 하한지 부분과 하부 포장재만 변형체로 모델링하고, 나머지 부분에 대해서는 강체로 가정하여 해석을 단순화했다(Fig. 6). 변형체인 상하부 힌지는 Shell 요소, 하부 포장재는 3차원 Solid 요소로 구성했으며, 총 요소수는 약 76,000 개이다. 해석시 상하단 힌지와 캐비닛 체결 부는 완전 구속되어 있다고 가정했으며, 나머지 Part간에는 접촉조건을 설정 (마찰계수는 0.1로 가정)했다. 또한 해석의 정확도를 높이기 위해 실 포장조건과 같이 포장 cable을 모사했다. Cable 모델링 시 EPP-form과 닿은 부위는 쉘요소로, 나머지 부분은 탄성 Beam 요소로 모델링했다. 동적 하중에서 필요한 각각의 무게는 실측을 통해 입력하였다. 본 연구에 사용한 냉장고 낙하모델에 사용된 총 중량은 약 140kg이다. 냉장고 낙하 테스트에 정해진 규정에 따라 높이 60cm에서 낙하 해석 후 얻은 하한지 및 EPP 포장재 변형을 Fig. 7에 나타냈다. 낙하는 1차 낙하 후 반발력에 의해 냉장고 자체가 상승하고, 다시 2차 낙하가 발생한다. 대부분의 하한지의 소성변형은 1차 낙하충격에 의해 발생한다.

2.4 냉장고 낙하시험 및 낙하모델 유효성 검증

실제 낙하 테스트를 수행하여 낙하해석모델과 비교하여 유효성을 검증하였다. 낙하 냉장고 제품은 해석모델과 동일하다. 낙하시 실제 냉장고 제품의 유통과정과 동일하게 하부포장재 위에 올려놓고 고정된 상태로 약 60cm 높이에서 자유 낙하를 수행했다. 충격량에 의한 하한지의 변형을 극대화하기 위해 하한지 하단부의 포장재를 제거한 후 냉장고를 낙하시켰다.

냉장고 낙하 변형을 3차원적으로 측정하기 위해서 냉장고 하부에는 변위측정을 위한 마커가 부착되었다(Fig. 8). 냉장고가 자유낙하 하는 동안 초고속 스테레오 카메라를 통해 측정된 이미지에서 마커들의 3차원 변위를 계산하였으며, 동적변형 측정시스템인 PONTOS(GOM mbH, Germany)를 활용하였다. 변위(변형)는 힌지부 4 지점(A~D), 도어부 (E~G) 및 캐비닛 부(H~J)는 각 3 지점씩 총 10개 지점에서 측정됐다. 낙하실험에서 총 2차에 걸친 낙하충격이 하한지 및 하부 포장재에 가해짐을 확인할

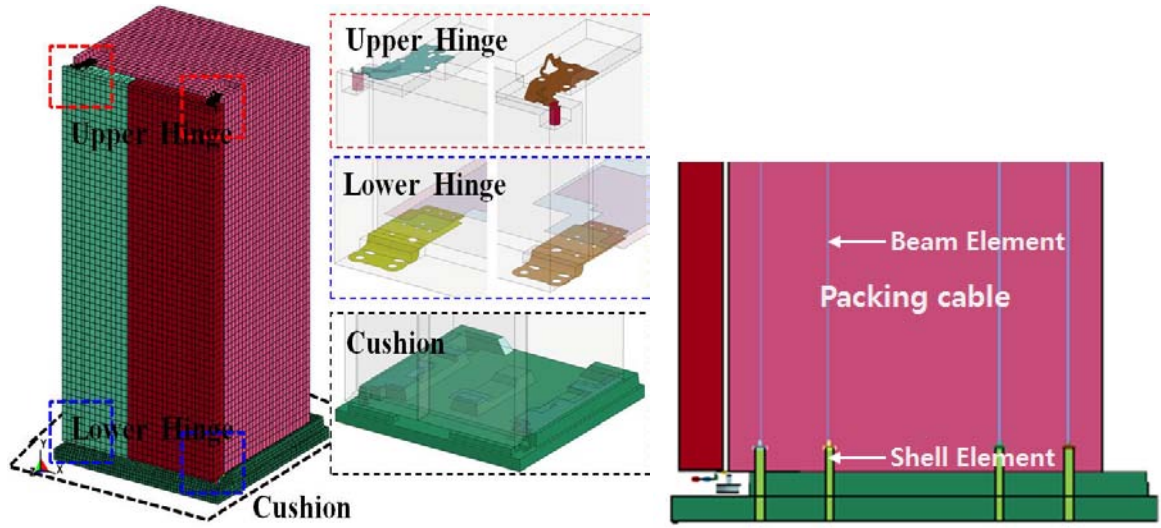


Fig. 6 FE model for refrigerator drop analysis

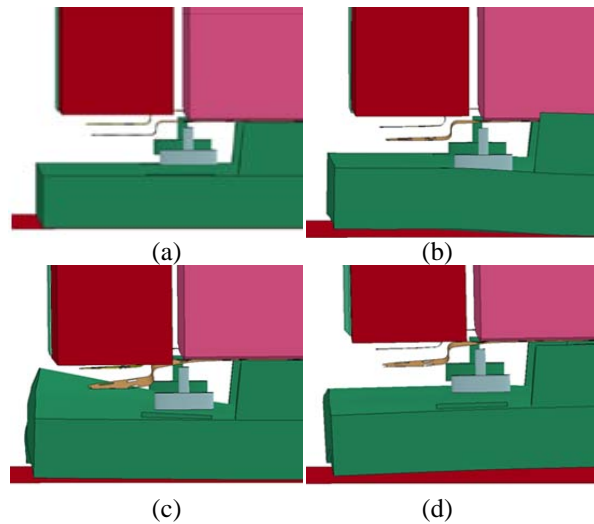


Fig. 7 Deformation results of lower hinge & EPP foam at four different analysis time (a) 0.0 (b) 0.003 (c) 0.009 and (d) 0.016 second

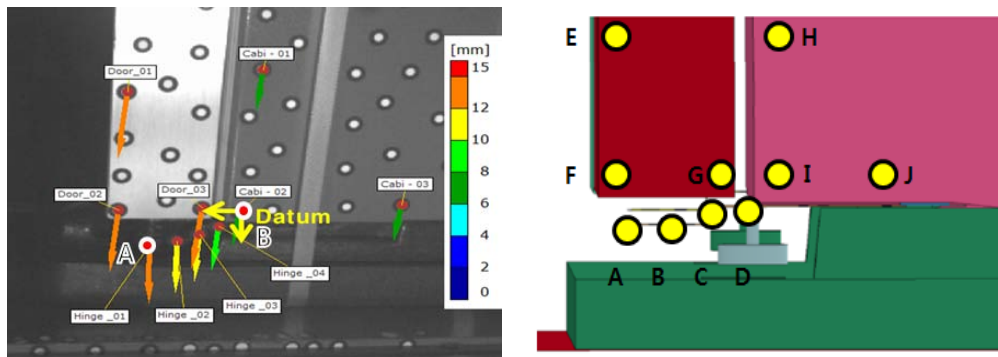


Fig. 8 3D measurement of displacement during refrigerator drop test

수 있었다. Fig. 8은 1차 충격시 충격량의 최대가 되는 지점에서의 변형상태(변위 벡터)를 보여준다. 주요변형은 수직하중에 의해 발생하며, 도어부 중량에 의해 냉장고 자체가 앞으로 기울면서 도어부(하힌지부)에서 가장 큰 변위가 발생한다.

Fig. 9에 낙하시험 및 해석으로 얻은 A, D, F, I지점의 거동을 비교해 나타냈다. 1차 충격 시점까지 각

Table 2 Comparison of hinge deformations obtained by drop test and FEA

	Hinge				Door			Cabinet			Avg.
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	G	
Exp. (mm)	23.72	24.02	20.72	17.04	28.56	28.56	28.41	9.54	8.83	9.71	-
FEA (mm)	21.62	20.88	17.10	14.42	21.82	21.84	21.35	11.11	11.11	11.05	-
Error (mm)	2.10	3.14	3.62	2.62	6.74	6.73	7.06	1.57	2.28	1.34	3.72
Error (%)	8.85	13.06	17.48	15.36	23.60	23.55	8.85	16.46	25.87	13.81	18.29

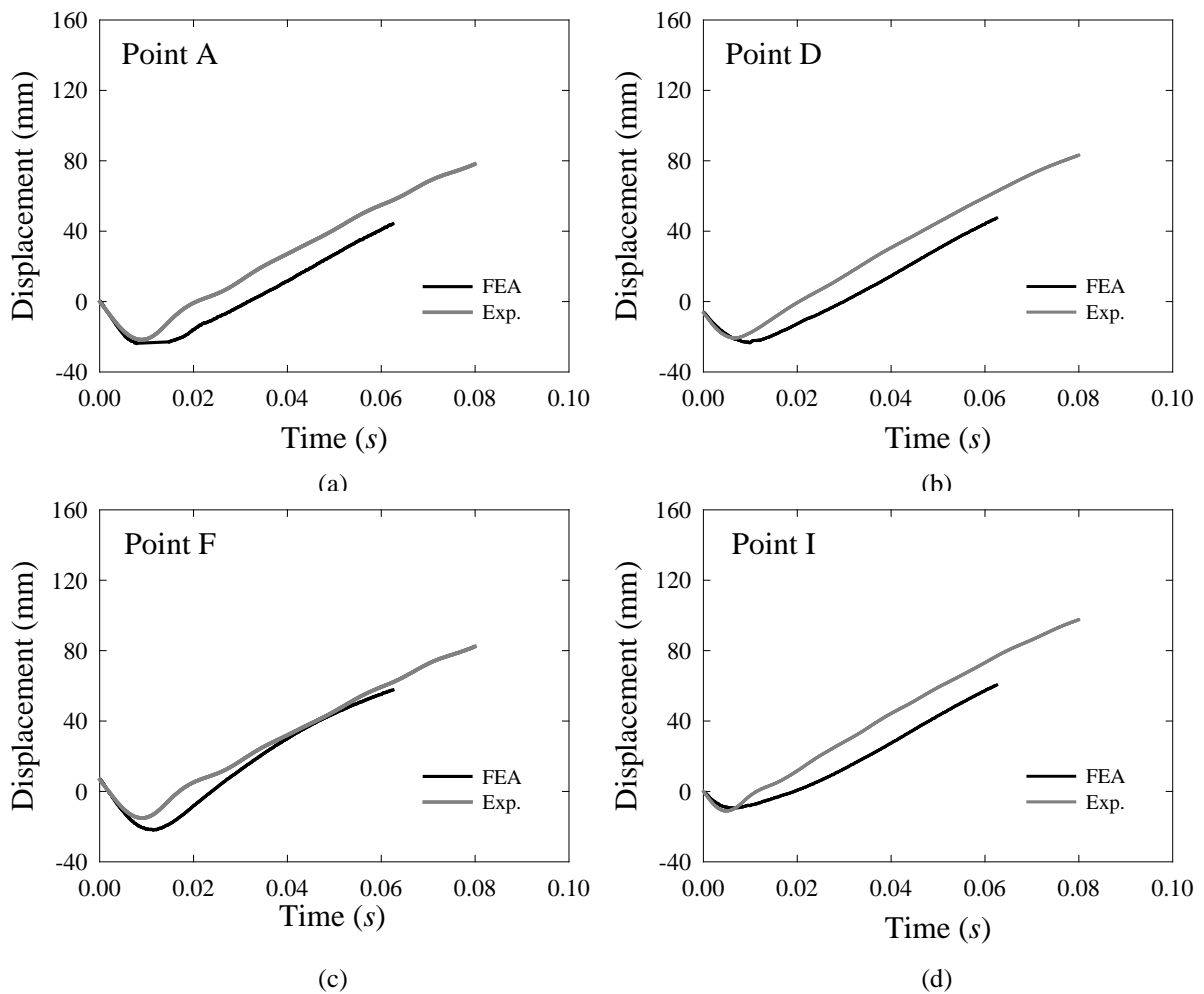


Fig. 9 Comparison of displacements from FEA with measurement at (a) point A (b) D (c) F and (d) I during drop test

지점 모두 실험 및 해석결과가 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다. 하지만 1차 충격 이후 거동에서 차이를 보이는 것은 각 체결부위의 이탈, 도어 및 프레임의 변형 그리고 냉장고 내부의 하중이동 등 복잡한 변형을 해석모델에서 고려하지 않아 발생하는 것으로 판단된다. 하지만 대부분의 하한지 변형은 1차 충격에 의해 발생함을 실험을 통해 확인했다. 이에, 본 해석모델을 적용한 하한지 변형예측은 개발단계에서 빠르고 정확한 예측툴로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. Table 2에는 총 10개 지점에 대해 낙하 해석과 실험으로 얻은 1차 낙하시 최대변위를 나타냈다. 최대변위 기준으로 평균

80% 정도의 해석정확도를 가짐을 확인했다.

3. 결론 및 고찰

본 연구에서는 냉장고 낙하시 생기는 힌지변형거동을 유한요소해석으로 예측하기 위해, 재료물성 시험, 냉장고 낙하시험 및 해석 등을 수행했다.

(1) 우선 냉장고 하힌지 및 하부 포장재 EPP-foam의 유동응력 재료 상수를 구하기 위해 두 소재에 대한 속도별 굽힘시험과 압축시험을 수행했다. Cowper-Symonds와 Fu-Chang foam 모델을 이용해 각각 하힌지와 포장재의 속도 별 재료거동을 모사했다. 시험으로 얻은 하중-변위곡선을 기반으로 역공학을 이용해 재료 상수들을 결정했으며, 실험과 해석 하중-변위곡선이 일치함을 확인했다.

(2) 낙하해석을 수행하기 위해, 도어, 케비넷, 하힌지, EPP-foam으로 구성된 해석모델을 구축했다. 이때 해석시간 단축을 위해 관심부위인 하힌지, EPP-foam을 제외한 도어 및 케비넷은 강체로 모델링했다. 한편 해석의 유효성 검증을 위해 동적 변형 측정 시스템인 PONTOS를 이용해 냉장고 낙하거동을 측정했다. 실험과 해석에서 얻은 낙하거동은 1차 충격까지 비교적 잘 일치함을 확인했다 (정확도 약 80%). 1차 충격 이후 거동에서 차이를 보이는 것은 각 체결부위의 이탈, 도어 및 프레임의 변형 그리고 냉장고 내부의 하중이동 등 복잡한 변형을 해석모델에서 고려하지 않아 발생하는 것으로 판단된다.

(3) 본 연구에서 제시된 단순 낙하 해석 모델은 해석시간 단축하면서도 변형 거동을 거의 유사 하게 예측하므로, 추후 하힌지 내충격 설계 등에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) Chung, W. J., Boo, S. W., Chun, S. P. and Kim, D. C., 1995, "Impact Analysis of Electronics," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 8, pp. 678~690.
- (2) Kim, W. J., Lee, B. Y. and Son, B. S., 2009, "Drop Impact Analysis and Design of a Package of a Microwave Oven," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 33, No. 5, pp. 536~543.
- (3) Yi, J. W., Ha, D. Y., Lee, S.W., Lim, J. M. and Park, G. J., 2003, "Development of Design System for EPS Cushioning Package of Monitor using Axiomatic Design," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 27, No. 9, pp. 1644~1652.
- (4) Kim, C. S., Bae, B. K. and Sung, D. Y., 2010, "Drop Analysis of a Package and Cushion Performance of Drum Washing Machine," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 11, pp. 1733~1740.
- (5) Kim, J. G., Kim, J.Y. and Kim, H. S., 2009, "Design for Improving Impact Resistance of Microwave Oven Using Drop/Impact Analysis," *KSPSE*, Vol. 13, No. 3, pp. 53~58.
- (6) Kum, D. H., Kim, E. J., Kim, S. D. and Park, S. H., 2005, "Optimal Design for Cushioning Package of a Heavy Electronic Product Using Mechanical Drop Analysis," *Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 128~135.
- (7) Cowper, G. R. and Symond, P. S., 1957, "Strain Hardening and Strain Rate Effect in the Impact Loading of Cantilever Beams," Browns University, Division of Application Mathematics Report
- (8) LSTC, "LS/DYNA User's Manual," 1998, ver.950, California.