

왕복동형 압축기의 낙하충격 시뮬레이션 및 실험적 검증 Drop/Impact Simulation and Experimental Verification of a Reciprocating Compressor Body

김 태 종† · 김 문 생* · 구 자 함**

Tae-Jong Kim, Moon-Saeng Kim and Ja-Ham Koo

(2007년 1월 8일 접수 ; 2007년 5월 23일 심사완료)

Key Words : Reciprocating Compressor(왕복동형 압축기), Drop/Impact Simulation(낙하충격시뮬레이션), Acceleration(가속도), FEM(유한요소법), LS-DYNA, HyperMesh

ABSTRACT

A reciprocating compressor used in domestic refrigerators can be subjected to many different forms of shock. These shocks are usually experienced during transporting the products from a manufacturer to customers. The hermetic structure of this kind of compressor makes it difficult to conduct drop tests for identifying the failure mechanism and their drop behaviors. The drop/impact simulation for a reciprocating compressor has been carried out with the explicit code LS-DYNA and its validation has been experimentally verified. Simulation results are in good agreement with those of drop test. The present method of drop/impact simulation provides an efficient and powerful solution to improve the design quality and reduce the design period.

1. 서 론

가전제품은 다양한 경로를 통해 운송되므로 부품의 파손을 초래할 수 있는 낙하충격과 같은 위험에 쉽게 노출될 수 있다. 충격손상을 방지하기 위한 가전제품의 내충격 설계는 대부분 설계자의 경험에 의해 반복적 방법으로 적용되므로 낙하/충격 시뮬레이션을 이용한 공학적 설계방법의 필요성은 더욱 커지고 있다⁽¹⁻²⁾. 컴퓨터의 급속한 성능향상과 해석 소프트웨어의 발달은 시뮬레이션에 의한 가전제품의 내충격설계를 가능하게 한다⁽³⁻⁴⁾. 하지만, 다른 분야와는 달리 아직까지 왕복동형 압축기와 같은 부품의 특성을 고려한 신뢰성 있는 모델링 기법 및 해석결

과의 검증에 대한 연구는 미흡하다고 할 수 있다.

이 논문의 왕복동형 압축기는 대량으로 생산되며, 비용절감을 위한 소형 경량화 구조변경 설계가 많이 이루어지고 있다. 소형 경량화 개발의 마지막 단계에서 시작품을 충격시험의 방법으로 구조 안전성에 관한 신뢰성을 검증하고 있다. 이 과정에서 크랭크축에 열박음된 전동기 회전자의 빠짐, 압축기의 내부 파이프(루프 파이프)와 스프링의 마모, 파손 등의 불량현상이 빈번하게 발생된다. 압축기 설계에 있어서 기존의 설계 후 낙하충격실험을 통해 수정을 반복하는 방법에서 벗어나, 설계단계에서 시뮬레이션으로 문제점을 개선 할 수 있는 방법을 개발하고자 하였다.

수송 중 발생하는 가진 충격에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 수직방향의 일정간격 조건에서 반복적인 자유낙하 충격시험이 적용되고 있다. 이 논문에서는 수송 중 받게 되는 가진 충격의 시험조건을 기준으로, LS-DYNATM를 이용한 낙하/충격 시뮬레이션을 수행

† 교신저자 : 정희원, 부산대학교 기계기술연구소
E-mail : tjong@pusan.ac.kr
Tel : (051) 510-2474, Fax : (051) 514-7640

* 부산대학교 기계공학부

** 부산대학교 대학원 기계설계공학과

하고 해석결과를 실험결과와 비교함으로써 신뢰성 있는 충격시뮬레이션기법을 개발하고자 하였다. 즉, 충격실험으로부터 구한 압축기 특정위치에서의 가속도와 시뮬레이션으로부터 구한 값을 비교하였다.

루프 파이프에 작용하는 충격 가진력을 측정 또는 산출하기가 곤란하므로 충격에 의해 발생하는 파이프의 응력을 이론적으로 해석하기가 어렵다. 하지만 충격시뮬레이션 모델을 개발하고, 이를 이용한 시뮬레이션에서 충격에 의해 발생하는 파이프의 응력을 실제 가진 조건이 적용되므로 해석의 신뢰성이 확보된다. 또, 충격 시 전동기 회전자의 빠짐 현상을 규명하기 위하여 측정실험으로부터 얻은 정적 받거리력과 충격시뮬레이션으로부터 구한 동적 충격력을 비교하여 안전계수를 산출하였다. 스토퍼의 재질 변경에 따른 시뮬레이션을 통하여 전동기 회전자 및 스토퍼에 작용하는 충격력이 줄어드는 현상을 시뮬레이션적으로 구하고자 하였다.

2. 압축기의 유한요소 모델링

냉장고용 왕복동형 압축기의 주요 부품은 밀폐용기(chamber), 본체(frame), 크랭크축(crankshaft), 전동기 회전자(rotor), 전동기 고정자(stator), 파이프(loop-pipe), 피스톤(piston) 조립체 등으로 구성된다. 압축기의 내부는 본체를 중심으로 크랭크축과 피스톤 조립체가 연결되어 있으며, 크랭크축 하단에는 전동기의 회전자가 열박음 공정으로 조립된다. 압축기의 밀폐용기는 상단과 하단으로 나누어지고 본체는 밀폐용기 내부에서 스프링 4개에 의해 지지된다. 이 논문의 시뮬레이션 대상 압축기는 전동기 고정자(stator)의 적층이 45 mm이고 전체 질량은 냉동기유를 포함하여 9.5 kg이다.

2.1 유한요소 모델의 생성

왕복동형 압축기의 부품별 3차원 형상은 Unigraphics™ CAD 데이터를 IGES 파일로 변환하여 사용하였다. 또한 유한요소 모델(finite element model)의 생성과 시뮬레이션 결과의 확인을 위해 HyperMesh™를 전·후 처리기(pre/post processor)로, 충격시뮬레이션을 위한 CAE 프로그램으로 LS-DYNA™ Ver. 970⁽⁵⁻⁶⁾을 사용하였다. 모델링에서 고려된 주요 부품들은 밀폐용기, 본체, 크랭크축,

전동기 회전자, 전동기 고정자, 내부 파이프, 피스톤 조립체 등이며, Fig. 1과 같이 압축기의 실제 형상으로 유한요소 모델을 생성하였다. 압축기의 형상을 보다 정확하게 표현하고 유한요소 모델링에 의한 수치적 오류를 최소화하기 위하여, 밀폐용기와 머플러의 경우는 두께가 얇고 일정하므로 쉘 요소로, 크랭크축, 전동기 회전자, 전동기 고정자, 내부 파이프 등의 부품들은 솔리드 요소로 모델링하였다. 시뮬레이션 결과에 큰 영향을 미치지 못하는 부품들은 형상을 단순화하고 집중질량으로 처리함으로써 시뮬레이션시간을 단축하고자 하였다.

또, 각각의 부품에 대한 무게를 실측하고 이를 유한요소모델에 적용하여 동일한 무게를 갖는 형상 모델을 구성하였다.

Table 1과 같이 압축기를 구성하고 있는 각각의

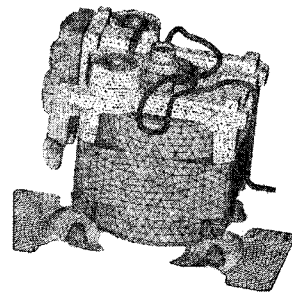


Fig. 1 Finite element modeling of a compressor

Table 1 Analysis model of mechanical parts in a reciprocating compressor

Classification Parts	Element type	Number of elements	Number of nodes
Frame	Solid	39,016	10,086
Shaft	Solid	14,037	3,853
Rotor	Solid	23,392	5,328
Stator	Solid	18,813	3,564
Head cover	Solid	6,411	1,568
Piston	Solid	3,344	1,201
Upper chamber	Shell	5,974	5,964
Lower chamber	Shell	7,638	7,551
Muffler	Shell	1,416	1,389
Piece	Shell	350	364
Total		120,391	40,868

부품은 대부분 솔리드(solid) 요소로 모델링하였으며, 주요 부품에 대한 유한요소 모델의 전체 요소의 수는 120,391개, 전체 노드 수는 40,868개 이다. 요소의 수가 많을수록 시뮬레이션 시간이 길어지기 때문에, 시뮬레이션에 큰 영향을 미치지 않는 부분에서는 요소를 제거하였다. 또한, 체결강화를 위해 패이거나 돌출된 부위에 대해서는 평면으로 가정하여 모델을 단순화하였으며 시뮬레이션시에는 해당 부분을 구속함으로써 실제 조건을 반영하였다. 실제 압축기의 충격특성을 갖는 유한요소 모델을 생성하기 위해 요소의 크기를 3(HyperMesh meshing의 설정치)으로 동일하게 하여 절점의 질(mesh quality)을 향상시켰다.

2.2 각 부품의 물성치와 전처리 과정

일반적인 CAE 프로그램의 시뮬레이션과정에서 부품의 정확한 물성값을 적용하는 것이 중요하며, Table 2는 충격시뮬레이션에 사용된 각 부품별 물성치이다.

부품별 유한요소 모델의 구성과 부품을 조립하여 전체 모델로 완성하는 과정에서 고려해야 하는 부품 사이의 연결 및 접촉문제는 실제의 접촉조건 및 체결 방식을 최대한 반영하였다. 즉, 밀폐용기의 상부와 하부는 측면이 서로 맞물려 있으며, 외부충격에 의해 밀폐용기가 손상이나 맞물림 이탈 현상을 발생시키지 않으므로 상하부 용기가 만나는 절점을 모두

융합(merge)시키는 방법을 택하였다. 내부의 전동기 고정자, 본체, 헤드커버 부품은 볼트체결로 이루어져 충격에 의해 손상이나 이탈 현상이 발생하지 않으므로 체결이 된 부분을 점용접(spot welding)으로 가정하였다. 그리고 하부 밀폐용기와 전동기 고정자는 4개의 스프링으로 연결되므로 LS/DYNA의 Damper/Spring 옵션을 사용하여 스프링을 모델링 하였다. 접촉이 발생하는 나머지 부분은 LS/DYNA의 접촉조건 CONTACT_SURFACE_TO_SURFACE

CE를 적용하였다. 또한, 충격이 가해지는 base 지지고무의 물성치는 E=4 Mpa, v=0.5로 설정하였다. 하중은 강체벽(rigid wall)을 제외한 압축기의 부품에 자유낙하 방향으로 중력가속도(9.8m/s²)가 시뮬레이션 시간 0.2초 동안 작용하는 것으로 가정하였으며, 시간 증분은 0.001초로 설정하였고, 낙하높이는 65 mm, 200 mm, 400 mm, 600 mm로 설정하였다.

3. 압축기의 자유낙하 충격실험

일반적으로 압축기의 충격시험은 제품의 운송 도중에 발생할 수 있는 자유낙하의 조건에서 이루어진다. 이 논문에서는 압축기가 65 mm의 수직방향 높이에서 자유낙하 시험조건에서, 제조업체에서 사용 중인 충격시험기를 이용하여 실험하였으며 낙하충격 실험의 개요는 Fig. 2에 나타내었다. 압축기의 상부 밀폐용기와 본체에 가속도 측정 센서를 각각 부착하여 이 위치에서 발생하는 충격가속도를 500 Hz의 주파수로 샘플링하였으며, 실제 낙하충격 실험에서 압축기 내부에 장착된 가속도계의 위치를 Fig. 3에 나타내었다. 수직방향 자유낙하 조건의 충격실험에

Table 2 Mechanical Properties of parts in a reciprocating compressor

Parameters Parts	Young's modulus (kgf/mm ²)	Poisson's ratio	Mass density (kg/mm ³)
Frame	11,530	0.25	7.01×10 ⁻⁶
Shaft	14,081	0.27	7.01×10 ⁻⁶
Rotor	9,846	0.22	6.08×10 ⁻⁶
Stator	9,846	0.22	6.08×10 ⁻⁶
Head cover	7,176	0.33	2.52×10 ⁻⁶
Piston	9,846	0.22	6.08×10 ⁻⁶
Upper chamber	20,408	0.29	7.67×10 ⁻⁶
Lower chamber	20,408	0.29	7.67×10 ⁻⁶
Piece	20,408	0.29	7.71×10 ⁻⁶
Coil spring	20,918	0.256	7.69×10 ⁻⁶

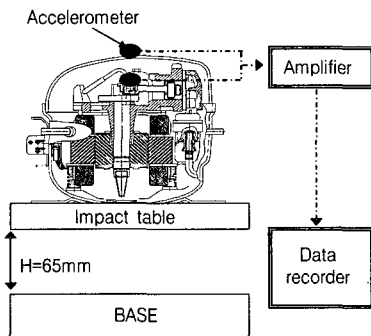


Fig. 2 Impact measurement for drop test of a reciprocating compressor

서 충격테이블과 강철판(base)의 사이에서 1차 충돌, 연쇄적으로 밀폐용기 밀면과 압축기 본체 사이에서 2차 충돌이 발생되는 것으로 측정되었다.

시뮬레이션 결과의 신뢰성을 검증하기 위해, 낙하 충격시 압축기의 밀폐용기와 본체에서 발생하는 충

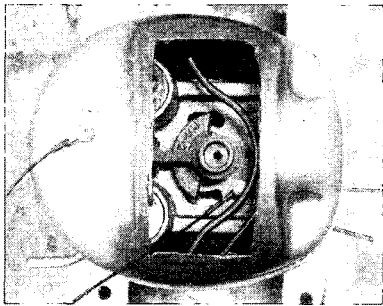


Fig. 3 Accelerometer locations for drop test of a reciprocating compressor

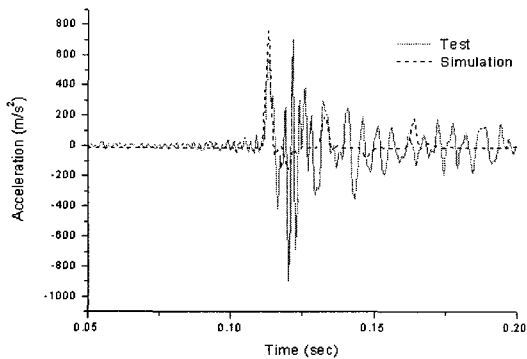


Fig. 4 Comparison of acceleration at upper chamber position from simulation and drop test(drop height=65 mm)

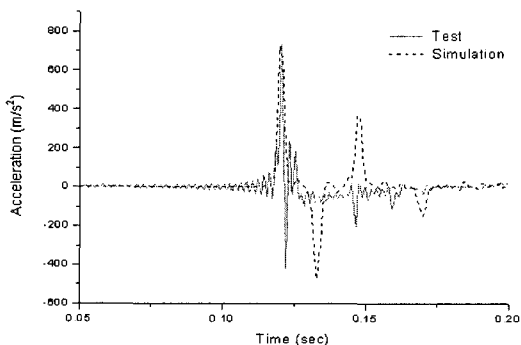


Fig. 5 Comparison of acceleration at frame position from simulation and drop test(drop height =65 mm)

격가속도를 측정하여 시뮬레이션결과와 비교하였다. Fig.4는 밀폐용기 상단부의 가속도 파형을 나타내며, 최대가속도의 측정값은 706 m/s^2 , 시뮬레이션결과는 757 m/s^2 이다. Fig.5는 본체의 가속도 파형을 나타내고 있으며, 최대가속도의 측정값은 721 m/s^2 , 시뮬레이션결과는 732 m/s^2 이다. 측정위치에 따라 시뮬레이션결과와 측정결과의 차이는 최소 1.5%에서 최대 7.2%까지 발생하였다. 시뮬레이션과 충격실험의 측정결과와의 차이는 압축기의 자유낙하 충격테이블과 지지고무 사이의 이론적 구속조건과 실제 조건과의 차이로 인해 발생하는 것으로 생각할 수 있다.

4. 자유낙하 충격의 시뮬레이션

4.1 충격거동

충격시험과정에서는 압축기 밀폐용기의 외관적 거

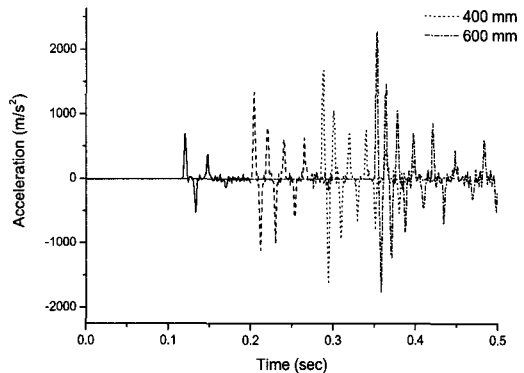


Fig. 6 Comparison of acceleration at frame position at various drop heights(h=65 mm, 200 mm, 400 mm, 600 mm)

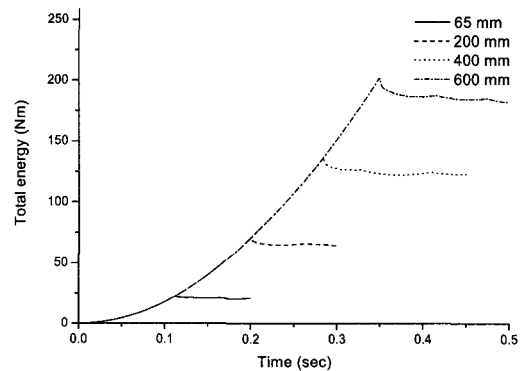


Fig. 7 Comparison of total energy at various drop heights(h=65 mm, 200 mm, 400 mm, 600 mm)

동만 볼 수 있지만, 충격시뮬레이션으로 밀폐용기 내부 본체의 충격거동을 가시화하여 관찰할 수 있다. 이 논문에서 개발된 시뮬레이션 모델은 실제 실험결과와 매우 근접하는 충돌과정의 동적거동을 나타내었다.

Fig. 6은 압축기의 자유낙하 높이 65 mm, 200 mm, 400 mm, 600 mm의 조건에서, 본체에서 발생하는 가속도를 나타내었으며, 낙하높이에 따라 충격가속도는 비례적으로 증가되었다. Fig. 7은 압축기의 자유낙하 높이가 65 mm, 200 mm, 400 mm, 600 mm의 조건에서, 충격과정에서 발생하는 총 에너지의 크기를 나타내었다. 여기서, 총 에너지는 자유낙하 충격의 운동에너지, 내부 에너지, 손실 에너지의 합으로 이루어진다.

4.2 루프 파이프의 응력시뮬레이션

루프 파이프는 본체 상부에 설치되어 하부 밀폐용기와 용접에 의해 지지되고, 본체의 진동을 흡수하여 감소시키는 역할을 하므로 파손이 자주 발생하는 취약한 부품이다. LS-DYNA를 사용하여 압축기가 낙하충격 할 때, Fig. 8에 표시된 루프 파이프 취약부분(Point 1 ~ Point 5)에서의 등가응력을 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션결과에서, 루프 파이프의 가장 취약한 부분은 Point 1로 나타났으며, 충격 후 0.122초에서 최대응력이 270.9 MPa로 계산되었다. 충격 후 시간경과에 따른 각 Point의 응력값을 Fig. 9에 나타내었다. 실험에서 루프파이프에는 손상이 없었으며, 모든 응력값들은 항복응력(318.5 MPa) 미만으로 나타나므로 타당하게 시뮬레이션된 것으로 판단할 수 있다.

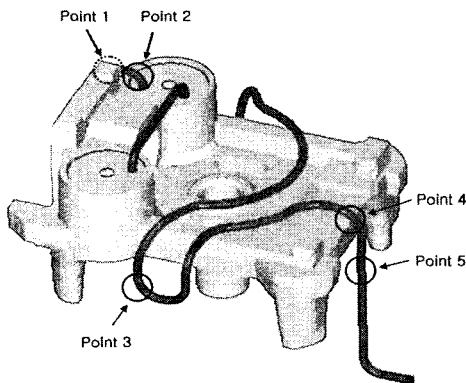


Fig. 8 Fragile points of a loop pipe

4.3 전동기 회전자의 빠짐 불량 시뮬레이션

압축기 본체의 자유낙하 충격시험에서, 크랭크축과 전동기 회전자 사이에서 작용하는 전단방향의 충격력에 의해 회전자가 빠지는 불량이 발생하는 경우가 있다. 충격시험 과정에서 축과 회전자 사이에 작용하는 충격력은 Fig. 10과 같이 설명될 수 있다. 충격시험의 자유낙하 과정에서 중력가속도와 관성에 의한 자유낙하력이 축과 회전자에 같은 방향으로 작용하므로, 접합부에는 상대운동의 전단력이 작용하지 않는다. 하지만, 충격의 순간에는 전동기 회전자에는 자유낙하의 관성력이 같은 방향으로 작용하지만, 본체와 연결된 크랭크축은 회전자 운동과 반대방향의 충격력이 작용하게 된다. 그러므로, 충격 순간의 짧은 시간 동안 크랭크축과 전동기 회전자에 작용하는 힘은 방향이 서로 반대가 되어 충격력이 접합면에 작용하게 되므로 전동기 회전자가 빠지는 불량이 발생하게 된다. 따라서, 전동기 회전자와 크랭크축 사이에 작용하는 동적 충격력은 크랭크축에 작용하는 힘과 전동기 회전자에 작용하는 힘의 상대적 값이 된다.

크랭크축을 포함하는 압축기 본체의 무게는 5.098 kg이며, 시뮬레이션결과로 구한 충격 시 가속도는 759 m/s²이다. 전동기 회전자의 무게는 0.802 kg, 가속도는 9.8 m/s²이다. 한편, 크랭크축에서 전동기 회전자를 빼는 데 필요한 정적 발거력의 측정 실험결과는 Table 3과 같다. 결과적으로, 전동기 회전자에 작용하는 시뮬레이션에 의한 동적 충격력은 396 kgf이며, 실험으로부터 얻은 정적 발거력(압입대: 24 μm, 압입길이: 24 mm)은 1,897 kgf이므로, 약 4.8배의 차이가 난다. 그러므로, 크랭크축과 전동기 회전자 사이에 작용하는 동적 충격력과 정적 발거력의 상관성을 나타내는 안전계수를 4.8로 산출하였으며, 이는

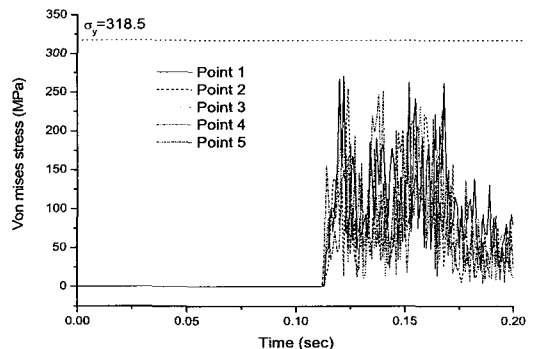


Fig. 9 Von-Mises stress of a loop pipe

Table 3 Measured static forces for extraction of motor rotor

Band of indentation (μm)	Length of indentation (mm)	Static force for extraction (kgf)
24	15	916
24	20	1,461
24	24	1,897
24	28	2,333
31	15	1,226
31	20	1,771
31	24	2,207
31	28	2,643

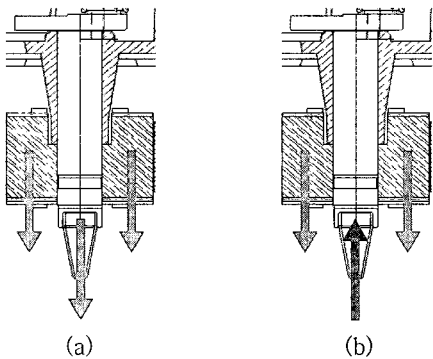


Fig. 10 The moving direction of rotor and crankshaft (a) during falling of the rotor (b) at impact

향후 전동기 회전자의 빠짐 불량을 고려하는 설계과정에서 활용될 수 있다.

4.4 스톱퍼의 재질 변경에 따른 동적 충격 시뮬레이션

전동기 회전자의 빠짐 불량은 본체의 질량, 압축기 내부 코일 스프링 및 스프링 사이의 거리 등에 영향을 받는다. 또한, 충격시에 본체에 작용하는 가진 충격력을 완화시켜주는 스톱퍼의 재질도 많은 영향을 미친다. 스톱퍼가 기존의 강철 재료(steel)일 때와 플라스틱 재질(polyamides 수지)일 때의 전동기 회전자에 작용하는 동적 충격력을 시뮬레이션으로 비교하였다. 시뮬레이션에 적용된 강철과 플라스틱의 물성치는 Table 4와 같다.

Fig. 11은 스톱퍼 위치에서의 가속도를 나타내며, 스톱퍼의 재질이 강철일 때 656 m/s^2 , 플라스틱의 경우는 538 m/s^2 의 최대가속도로 나타났다. Fig. 12는 전동기 회전자의 충격 가속도를 나타내며, 스톱

Table 4 Mechanical properties of the steel and polyamides

	Young's modulus (kgf/mm^2)	Poisson's ratio	Mass density (kg/mm^3)
Steel	20,408	0.3	7.80×10^{-6}
Polyamides	193.9	0.4	1.14×10^{-6}

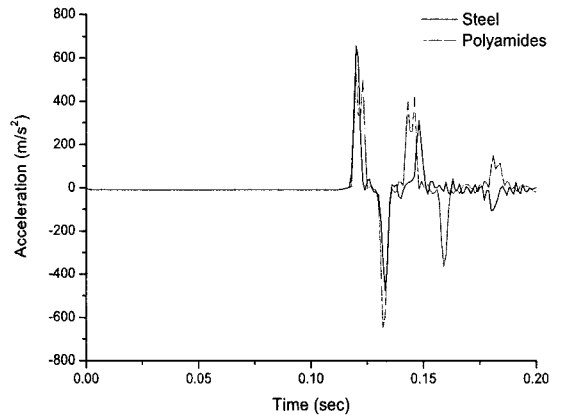


Fig. 11 Comparison of acceleration at stopper

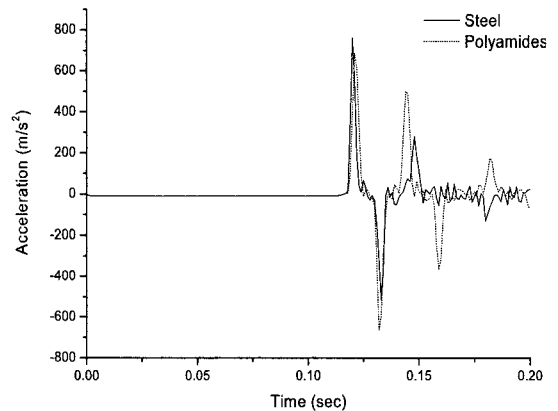


Fig. 12 Comparison of acceleration at rotor position

퍼의 재질이 강철일 때 759 m/s^2 , 플라스틱의 경우는 687 m/s^2 으로 최대가속도의 값이 나타났다. 이와 같은 시뮬레이션 결과들을 이용하여 전동기 회전자와 스톱퍼(코일 스프링)에 작용하는 최대 충격력을 Table 5에 나타내었다.

스톱퍼의 재질을 플라스틱으로 사용하면 기존의 강철 재료와 비교하여 전동기 회전자에 작용하는 충격력은 10% 감소하였다. 압축기 본체를 지지하는 코일 스프링(seat spring)의 경우에도 스톱퍼의 재질

Table 5 Impact forces and accelerations of rotor and seat spring

Position	Stopper's material	Acceleration (m/s ²)	Impact force (N)
Rotor	Steel	759	60.9
	Polyamides	687	55.0
Seat spring (stopper)	Steel	656	160.9
	Polyamides	538	131.9

을 플라스틱으로 대체하면 강철재료와 비교하여 스프링에 작용하는 충격력은 20 % 감소하였다.

5. 결 론

압축기 설계에 있어서 구조의 안정성을 확보하기 위한 충격실험은 그 비용이 과다하므로 설계단계에서 시뮬레이션으로 문제점을 개선 할 수 있는 방법을 개발하고자 하였다. 또, 충격실험에서는 압축기 밀폐용기의 거동만 관찰할 수 있지만 시뮬레이션 방법으로 충격 시 내부의 동적 거동을 관찰할 수 있었다. 따라서 제품의 상대적 취약부분을 파악할 수 있으므로, 설계 수정 시 기초자료로 활용할 수 있다. 또, 시뮬레이션의 결과에서, 자유낙하 높이의 변경에 따른 충격에너지의 특성을 비교 분석하여 시험조건을 최적으로 결정할 수 있다.

시뮬레이션 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 실험적 방법으로 얻은 압축기의 특정 위치에서의 충격 가속도와 동적 거동을 비교하였다. 루프 파이프의 등가응력 시뮬레이션결과에서, 구조적으로 가장 취약한 부분을 알 수 있었으며, 충격 후의 응력값들은 항복응력 미만이므로 타당하게 시뮬레이션된 것으로 판단할 수 있다. 또, 전동기 회전자의 빠짐 불량을 개선하기 위한 방법으로 스톱퍼 재질을 변경하여 회전자에 작용하는 충격력이 줄어드는 현상을 해석적으로 나타내었다.

실험값과 비교하여, 시뮬레이션 결과로 얻은 임의 위치에서의 충격 가속도는 위치에 따라 1.5 % ~ 7.2 %의 차이로서 거의 근접하게 계산되었다. 이 차이는 강철판 위에서 4개의 압축기를 동시에 자유 낙하시키는 충격시험기의 구조 때문에 발생하는 것으로 생각할 수 있다. 실험에 의한 전동기 회전자의 정적 발거력은 1,897 kg_r이고, 시뮬레이션에 의한 동적 충격력은 396 kg_r로 나타났다. 이들의 상관성을 나타내

는 안전계수를 4.8로 산출하였으며, 이는 전동기 회전자의 빠짐 현상을 고려하는 설계과정에서 활용될 수 있다. 스톱퍼의 재질을 변경한 시뮬레이션에서도 강철 재질일 경우보다 플라스틱의 경우 회전자 위치에서는 10 %의 충격력이 감소하였고 스톱퍼 위치에서는 20 %의 충격력이 감소하였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Chung, W. J., Boo, S. W., Chun, S. P., Kim, D. C., 1995, "Impact Analysis of Electric Products", Transactions of KSME A, Vol. 35, No. 8, pp. 678~690.
- (2) Park, Y.-S., Hong, S.-C., Park, C.-H., Lee, U. S. and Cho, H.-B., 1995, "The Prediction of the Results of Drop test Through Shock Analysis", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 4, No. 3, pp. 345~352.
- (3) Kim, J. G., Lee, J. Y. and Lee, S. Y., 2001, "Drop/Impact Simulation and Experimental Verification of Mobile Phone", Transactions of KSME A, Vol. 25, No. 4, pp. 695~702.
- (4) Youn, Y. H. Rim, K.-H., Kim, J. K. and An, C. H., 2000, "Evaluation of Drop/Impact Performance of Laptop Computer", Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 737~741.
- (5) LS-DYNA User Manual, Ver. 970. 2003, Livermore Software Technology Corporation.
- (6) LS-DYNA Examples Manual, Ver. 970, 2003, Livermore Software Technology Corporation.
- (7) Wu, J., Yeh, C. and Wyatt, K., 1996, "Drop/Impact Simulation of Electronic products", 4th International LS-DYNA3D Users Conference.
- (8) Song, G., Yeh, C and Wyatt, K., 1998, "Phon Drop Simulation and Effect of Small Variations of Drop Angle", 5th International LS-DYNA3D Users Conference.