<응용논문> DOI:10.3795/KSME-A.2011.35.8.971 ISSN 1226-4873

발사형 정찰로봇을 위한 보호체 설계 및 충격해석

강 봉 수*† · 박 문 식*
* 한남대학교 기계공학과

Protector Design and Shock Analysis for a Launch-Reconnaissance Robot

Bong Soo Kang*† and Moon Sik Park*
* Dept. of Mechanical Engineering, Hannam Univ.

(Received February 9, 2011 ; Revised May 24, 2011 ; Accepted June 1, 2011)

Key Words : Protector(보호체), Reconnaissance Robot(정찰로봇), Shock Analysis(충격해석), Unlocking Mechanism(해제기구), Drop Test(낙하시험)

초록: 본 논문은 원거리에 떨어진 작전지역으로 정찰로봇을 발사하여 투하하기 위해서 필요한 보호체의 설계개념에 대해서 서술한다. 개발된 보호체는 발사, 비행, 착지과정에서 발생하는 외부의 충격으로부터 내부에 위치한 정찰로봇을 보호하며 목표지점에 도달하게 되면 해제기구에 의해 자동으로 보호체 외피가 분리·개방되어 내부의 정찰로봇이 용이하게 보호체를 이탈하여 정찰임무를 수행하도록 한다. 보호체와 정찰로봇의 유한요소 모델링을 통해서 지면과의 낙하충돌에 의한 충격해석을 수행하였으며 실제 실험결과와도 비교하여 모델링의 유효성을 분석하였다. 낙하테이블을 이용한 충격시험을 통해서 실리콘 재질로 충전된 보호체가 외부의 충격을 효과적으로 완화하여 내부의 정찰로봇을 보호하고 있음을 관찰하였다.

Abstract: This paper presents the design concepts of a protector for a launch-reconnaissance robot that is to be deployed for data-collection in hazardous regions. The protector protects the reconnaissance robot inside from shock induced during the process of launch, flight, and landing. Since the outer shells of the protector are automatically opened wide by the unlocking mechanism during the landing stage, the reconnaissance robot can easily exit the protector and move around to carry out its mission. We carefully simulated a finite-element model of the protector with the robot and compared the results with the actual dynamic behavior of the system. Shock- response tests using a drop-table showed that the proposed protector filled with silicon material successfully attenuated external shock.

1. 서 론

지능로봇기술의 발전으로 이를 이용한 응용분야가 생산활동에서 서비스활동 전반으로 확대되어 가고 있다. 특히 카메라, 마이크 등 소형 센서장치와 바퀴, 트랙 등 이동기구를 이용하여 자율적으로 혹은 원격조정을 통해서 위험지역을 탐사하거나 경계활동을 수행하는 로봇응용분야가 활발하게 연구되고 있다.[1~3] 정찰하려는 지역이 근거리 접근이 어려운 군사 대치지역이거나 혹은 지형이 험난한 장소인 경우 바퀴형태나[1,2] 보행형태[4]의 로봇으로는 원하는 목표지점에 이동하여 접근하기 어렵기 때문에 정찰로봇을 소형화하여 투척이나 발사방식으로 접근성 문제를 해결하려는 연구가 수행되고 있다. 덧붙여 여러 소형 로봇을 산개하여 목표지역에 투입함으로써 로봇간의 협동작업을 가능하게 하고 일부 로봇의 기능상실로 인한 전체 임무의 실패 확률을 줄일 수 있는 장점이 있다.[5]

국제적으로 지속적으로 발생하는 지역적 분쟁과 테러 등으로 인하여 이미 소형 정찰로봇에 대한 수요가 크게 증가하여 미네소타 대학의 Scout,[6] 이스라엘 ODF 사의 Eyeball 등[7]은 카메라를 탑재한 1 kg 정도의 질량으로 투척이 가능한 저가의 소형로봇으로 개발되어 시판되고 있다. 투척형 정찰로봇의 경우 인간의 힘으로 투척을 하며 로봇

† Corresponding Author, bskang@hnu.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

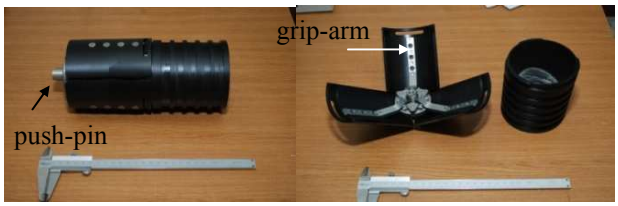
자체의 내충격 한계로 인하여 20m 이상 투척이 어렵다. 그러나 군사적 분쟁의 대치 상황에서 안전한 거리에서 정찰로봇을 작전지역으로 투입하기 위해서는 원거리 접근성이 필요하며 이를 위해 본 논문에서 소개하는 정찰로봇은 국내·외에서 처음으로 보호체와 발사체[8]를 이용하여 탐지로봇을 100m 이상의 원거리 목표지점까지 투하할 수 있다.

정찰로봇의 원거리 투하를 위해서 보호체에 요구되는 설계조건은 다음과 같다. (1) 정찰로봇을 탑재한 후 발사, 비행, 착지 과정에서 발생하는 급격한 속도변화와 외부물체와의 충돌로 인한 충격으로부터 내부에 탑재한 정찰로봇을 보호하며, (2) 목표지점에 도착 후 보호체의 외피가 개방되거나 분리되어 내부에 위치한 정찰로봇이 외부환경으로 이탈하여 임무를 수행할 수 있으며, (3) 가급적 소형, 경량으로 제작되어 비행거리를 증가시켜야 한다. 본 연구에서 개발된 보호체는 슬라이더- 크랭크(slider-crank) 메커니즘을 기본으로 설계되어 부가적 동력원을 사용하지 않고 도착 시의 충돌을 이용하여 보호체 외피를 분리한다. 또한 점탄성 특성을 가지는 실린콘 재질을 충전하여 보호체 안의 정찰로봇에 전달되는 외부충격을 줄여 목표지점에 강하게 부딪힌 후에도 정찰로봇 안에 탑재된 통신장치, 카메라 등이 올바르게 작동하도록 보호한다.

개발된 정찰로봇과 보호체가 원거리 비행 후 목표지점의 바닥 혹은 벽면에 충돌한 후 기계적 손상 여부를 분석하기 위해 전산해석도구인 Abaqus를 이용하여 유한요소 모델링과 충돌 시뮬레이션을 수행하였다. 핸드폰, LDC 기판 등 가전제품에 대한 낙하충돌 시 충돌 시뮬레이션에 대한 연구[9,10]는 이루어지고 있으나 아직 정찰로봇에 대한 충격해석 연구는 매우 미비한 실정이다. 제안된 유한요소모델의 충격해석 유효성을 검증하기 위해서 실제 제작된 정찰로봇 및 보호체의 시작품을 가지고 낙하 충돌실험을 수행하여 관측된 파손된 형태와 충격가속도를 전산모의실험 결과와 비교하였다. 그리고 개발된 보호체의 내충격성을 분석하기 위해서 낙하테이블시험기를 이용하여 보호체에 가해지는 충격에서 정찰로봇로 전달되는 충격을 측정분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장은 정찰로봇의 원거리 투척을 위해서 설계된 보호체의 설계개념이 제시되고 3 장은 정찰로봇과 보호체의 유한요소 모델링과정과 실제 낙하충돌 결과와의 비교·분석이 제시된다. 4 장은 실제 제작된 보호체의 내충격성을 분석하기 위하여 낙하테이블을 이용한 충격시험결과가 제시되며 마지막 5 장에서 결론이 제시된다.

Fig. 1 Photograph of reconnaissance robots developed



(a) Assembled (b) Opened

Fig. 2 Photograph of the protector

2. 보호체 설계

개발된 정찰로봇과 보호체는 각각 Fig. 1 과 Fig. 2 와 같다. 정찰로봇은 저가의 소형으로 개발하기 위해 원통형 두 바퀴 차동 주행방식으로 직경은 9cm 이고 무게는 약 700g 이다. 적용환경에 따라 현재 다양한 형태와 재질로 설계하고 있다. 보호체는 개발된 정찰로봇을 용이하게 탑재할 수 있도록 전방부와 후방부 2 개로 분리되는 원통형 형태이다. 정찰로봇을 탑재하고 조립하였을 시 길이는 24cm, 직경은 10 cm, 그리고 무게는 0.7 kg 이다.

전방부는 크게 도착지점과 충돌하는 푸쉬핀(push-pin), 힌지 조인트에 대해 회전운동이 가능한 3 개의 그립암(grip-arm), 그리고 각 그립암에 부착된 외피조각으로 구성된다. 각 외피의 하단에는 후방부 외피와의 체결을 위한 구멍이 있다. 반대로 후방부는 전방부의 구멍에 맞는 돌출산이 있어 Fig. 2(a)와 같이 조립이 이루어지며 초기에 압축된 내부 스프링에 의한 탄성력으로 원통 길이방향으로 전방부와 후방부는 서로 미는 힘이 존재하므로 외부충격에도 조립상태는 견고하게 유지된다. 후방부에는 정찰로봇과 외피 사이에 스프링과 실리콘(silicion)으로 제작된 충격완화재질로 충전되어 발사, 비행, 도착 시 보호체에 가해지는 충격으로

부터 정찰로봇을 보호하게 된다. 보호체 외피의 재질은 경량의 폴리카보나이트(polycarbonate) 재질로 제작된다.

정찰로봇을 탑재한 보호체가 발사체를 통해서 발사 후 100m 정도의 거리를 비행하여 목표지점의 딱딱한 지면이나 벽과 충돌하게 되면 보호체 전방부의 푸쉬핀에 충격이 가해지고 이로 인한 푸쉬핀의 상대변위가 슬라이더-크랭크(slider-crank) 기구에 의해 힌지를 중심으로 그립암의 회전운동을 일으켜 후방부의 돌출산이 전방부 외피구멍으로부터 분리되는 순간 내부스프링에 의한 복원력으로 전방부와 후방부는 서로 이탈되어 Fig. 2(b)와 같이 보호체의 내부가 자연스럽게 외부로 노출된다. 지면과의 충돌 시 낮은 각도로 착지하여 푸쉬핀이 아니 전방부 외피에 충돌하는 경우에도 외피의 상대변위로 인하여 그립암의 회전모멘트가 생겨 두 부분으로 분리되어 로봇이 탈출하게 됨을 실제 환경실험을 통해서도 확인하였다.

3. 유한요소모델을 이용한 충격해석

보호체설계의 핵심사항은 다음과 같다. 첫째 외부물체와 충돌 시 보호체의 전개기구가 작동하여 탑재된 정찰로봇이 탈출해야 하며 두 번째 보호체 외피 혹은 구조가 파손되더라도 충격에너지를 적절히 흡수해서 내부의 로봇을 보호해야 한다. 이 두 가지 설계조건을 만족하기 위해 설계치수를 달리하며 시작품을 제작하여 실험하기에는 비용과 기간이 많이 소요된다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 범용 전산해석 도구인 Abaqus 를 이용하여 정찰로봇과 보호체의 유한 요소 모델링 및 충격해석을 수행하였다.

정찰로봇의 유한요소 모델링은 축대칭 모델로 4 절점 감차적분 요소를 보호체는 삼차원으로 사면체 요소를 사용하여 모델링을 수행하였다. 제작된 부품은 주로 알루미늄(Al 6061)과 수지계통의 재료로서 Table1 과 같이 이에 맞는 물성치를 입력하였으며 부품간 접촉환경에 맞는 조건을 부과하였다. 동특성 해석을 위해 구조감쇠계수는 금속의 경우 0.01 로, 수지재료들의 경우 0.05 로 설정하였으며, 해석의 복잡도를 줄이고 충격에 대한 보호체 구조의 직접적 영향을 분석하기 위해 보호체에 삽입된 겔(Gel)형 실리콘 재질은 모델링에서 제외하였다. Table 2 은 사용된 유한요소의 요약이다. 일정한 높이에서 바닥면에 수직으로 충돌하였을 때 각 부품에 전달되는 충격과 변형을 계산하기 위해서 충격

Table1 Materials and their properties[11]

Material	Density [g/cm^3]	Elastic modulus [GPa]	Poisson ratio	Yield stress [MPa]	Ultimate stress [MPa]
Al 6061	2.70	68.9	0.33	55.2	124
PC	1.20	2.21	0.4	43.9	54.9
POM	1.41	3.2	0.4	52.0	65.0
Teflon	2.17	0.496	0.4	29.2	36.5
Steel	7.85	205	0.29	395	470

Table 2 Number of finite-element mesh[12]

Model	Element	Node	Variable	Contact Element
Robot	19,144	21,462	40,965	980
Protector	45,981	19,702	46,545	4,188

Table 3 Maximum shock acceleration of the robot placed inside the protector after free falling

Height [m]	0.7	2	10
FE Model [g]	1360	1850	5130
Experiment [g]	936	1870	-

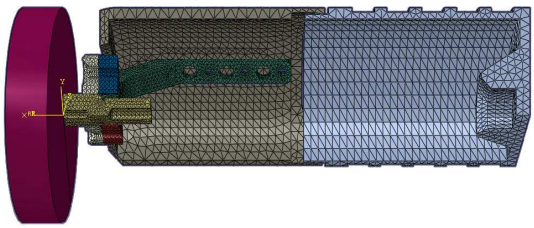


Fig. 3 Finite-element meshing of the protector[12]

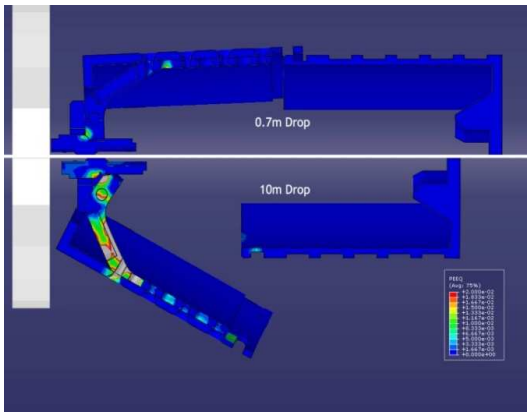


Fig. 4 Deformation of the protector

Table 4 Measurement specification

Accelerometer	Range: 10,000 g Sensitivity: 0.5mV/g
Dynamic Signal Acquisition	Range : 114 db Sampling : 204.8 kS/s
Software	LabVIEW Sound & Vibration Toolkit

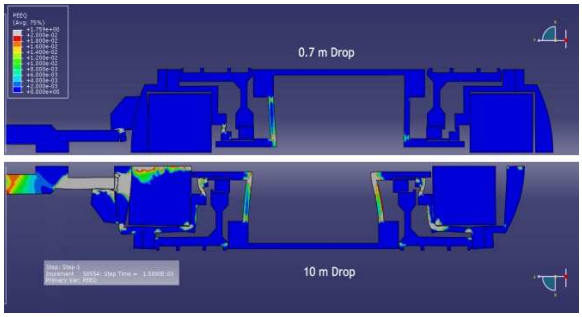


Fig. 5 Deformation of the robot[12]

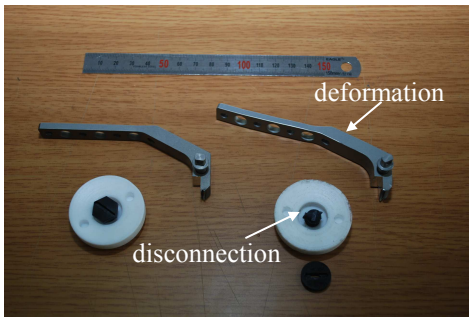


Fig. 6 Damages on components of the protector after shock

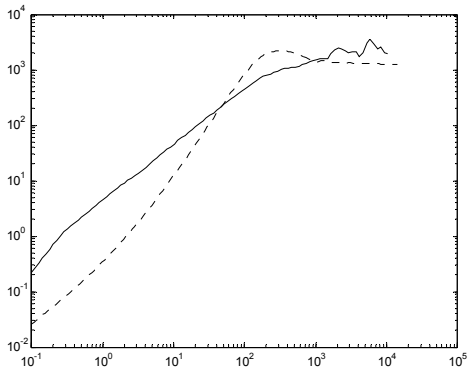


Fig. 7 Shock Response Spectrum of the robot placed inside the protector after free 2m-falling solid: experiment, dotted: FE model

하중은 초기속도 가진방법을 통해서 부과되며 초기속도는 낙하높이를 이용해서 계산된다.

Fig. 4 은 충돌 2ms 후 보호체 부품의 손상정도를 유효소성변형률(equivalent plastic strain)로 나타낸 그림이다. 명도가 높아 밝은 부분일수록 응력이 커서 소성변형이 많이 일어나는 부분이다. 왼편 사각블럭이 지면 혹은 벽을 나타내는 해석적 강체이며 이를 보호체의 전방부가 정면 충돌하게 된다. 상단의 0.7 m 낙하 시에는 보호체 대부분의 부품은 손상이 없으나 하단의 10m 낙하 시 힌지와 그립암에 큰 소성변형이 나타났다.

Fig. 5 는 충돌 1.5ms 이후 정찰로봇의 유효소성변형률로서 하단 10m 낙하 시 그림 좌측 푸시핀과 연결되어 정찰로봇을 고정하는 수지 계열의 어댑터(adapter), 그림 중앙의 정찰로봇에서 좌우 대칭으로 세로로 긴 빔(beam) 부분에 해당하는 바퀴 지지대에 소성변형이 발생하였다. 반면에 그림 중앙의 가로로 긴 빔에 해당하는 전장부 베이스는 큰 손상이 없어 여기에 위치할 통신기기, 제어기기, 카메라 등 기기에는 충격의 영향이 작을 것으로 분석된다. Fig. 6 은 실제 보호체를 가지고 낙하실험을 수행한 후 변형 전과 변형 후의 보호체 부품 사진이다. Fig.4 의 전산모의실험 예측과 유사하게 보호체의 개방을 담당하는 그립암(알루미늄합금)에 큰 변형이 일어났으며 로봇을 지지하는 어댑터에도 큰 응력이 가해져서 어댑터를 고정하는 나사(합성수지)가 절단된 것을 확인할 수 있다.

Table3 는 0.7m, 2m 자유낙하 시 정찰로봇에 작용하는 길이방향으로의 최대 충격가속도를 유한요소모델 그리고 실제 실험을 통해서 각각 계산하고 측정한 결과이다. 실제실험에서 10m 의 경우 가속도센서와 측정장치간의 선길이의 한계로 측정하지 못하였다. 두 결과 모두 정찰로봇에 가해지는 충격가속도는 근사적으로 낙하높이의 제곱근에 비례하여 커지므로 충격의 영향이 초기 위치에너지 혹은 충돌 시 운동에너지에 비례한 것으로 분석된다. 충격가속도 예측에서 0.7m 에서는 두 결과가 차이가 있으나 2m 에서는 전산모의결과와 실제 실험결과가 유사한 결과를 보였다.

낙하높이가 2m 일 때의 데이터를 이용하여 충격반응 스펙트럼(Shock Response Spectrum)[13]을 계산하면 Fig. 7 과 같다. 전산모의실험이나 실제실험 모두 저주파영역에서는 선형의 임펄스입력 응답특성이 나타나고 고주파에서는 일정한 계단입력 응답특성이 나타나므로 지면과의 충격은 반정현(half-sine)파에 가까운 하중이 작용한 것으로 분석

Table 5 Performance on shock attenuation

Height [m]	0.3	0.5	0.7
Protector [g]	1561	1880	2080
Robot [g]	473	598	657

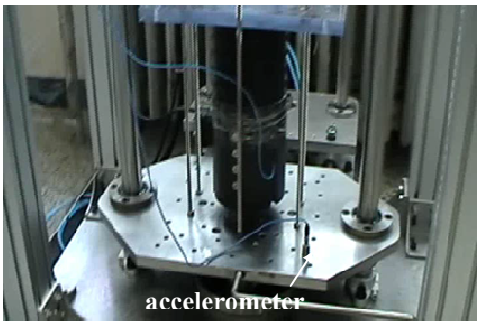
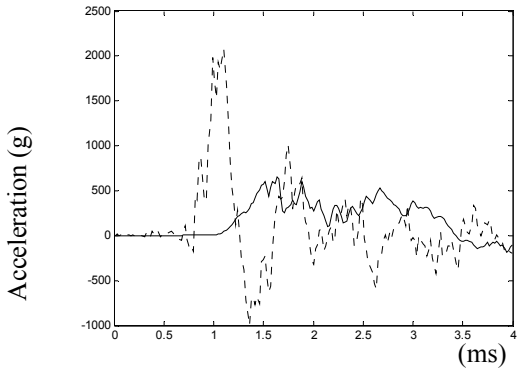
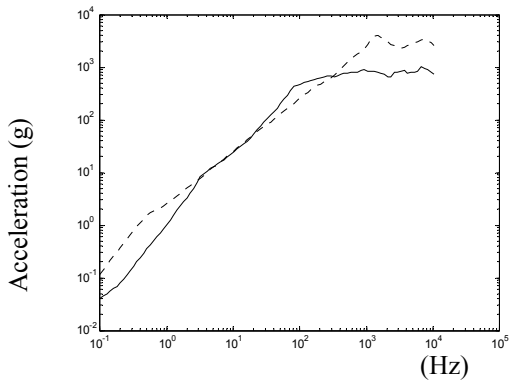


Fig. 8 Shock test by a drop-table



(a) Time-domain



(b) Frequency-domain

Fig. 9 Shock response on the drop-table (0.7 m) solid: robot, dotted: protector

된다. 또한 저주파영역에서 실제실험의 응답결과보다 유한요소모델의 응답 기울기가 크고 선형에서 일정영역으로 전이하는 위치에서 피크가 생기므로 실제 시스템에서 저주파 특성을 보이는 요소의 감쇠비보다 유한요소모델의 해당 요소의 감쇠비가 작게 설정된 것으로 분석된다. 그리고 유한요소모델의 경우 적분을 통한 동적 해를 구하는 과정에서 수렴 안정성을 위해서 평활화(smoothing) 방법을 사용하였기 때문에[12] 고주파성분에서 응답특성 차이가 있을 뿐 제시한 유한요소 모델의 충격해석예측이 비교적 정확한 것으로 분석된다.

4. 충격시험

낙하테이블을 이용한 충격시험은 보호체에 가해지는 충격에서 정찰로봇으로 전달되는 충격량을 분석하여 실리콘 재질로 충전된 보호체의 충격완화성능을 검증하기 위한 시험이다. 3 장에서 서술한 낙하 충돌실험을 포함하여 충격의 크기는 충격용 가속도계(350B03, PCB)를 이용하여 측정하였고 데이터의 수집 및 분석은 LabVIEW™ 환경에서 수행하였다. Table 4 은 측정장비의 사양이다.

낙하테이블은 Fig. 8 과 같이 피측정체에 비해 매우 큰 중량의 정반위에 피측정체를 고정하여 수직으로 낙하시킨 후 아래에 위치한 블럭('프로그래머'로 지칭)과의 충돌로 비교적 큰 충격을 가하는 시험장치로 정반 아래면과 물리적으로 접촉하는 프로그래머블록의 재질을 가변하여 충돌하중의 모양을 반정현, 톱니(saw-tooth) 등으로 조절할 수 있다.

군수 혹은 가전제품의 경우 제품의 운반 및 수송, 취급 시 발생 가능한 환경조건에서 기능적 신뢰성을 검증하기 위해 충격시험의 절차와 충격펄스의 형태 등에 대한 규격(예: MIL-STD-810F[14], IEC 60068-2-27[15] 등)이 제시되나 본 연구에서는 보호체의 충격전달특성을 분석하는 것이 주목적이므로 특정한 충격시험규격을 따르지는 않았다.

Fig. 8 과 같이 낙하테이블의 정반위에 1 축 가속도계를 부착하여 충돌 시 보호체에 가해지는 충격가속도를 측정하며 동시에 보호체안 정찰로봇에도 가속도계를 부착하여 로봇에 전달된 가속도를 측정한다. Table5 은 각기 다른 높이에서 낙하하였을 때 측정된 최대가속도값이다. 보호체 안에 충전된 실리콘겔 재질의 충격완화특성으로 평균적으로 보호체에 가해진 충격가속도가 1/3 로 줄어들어 정찰로봇에 전달되므로 원거리 투입에 필요한 충격완

화성능을 보임을 알 수 있다. Fig. 9(a)은 0.7m 에서 낙하 시 측정된 가속도 신호로 보호체의 피크와 로봇의 피크사이에 0.5ms 가 존재하므로 충격파가 푸시핀에서 로봇으로 전달되는데 걸리는 시간으로 분석된다. Fig. 9(b)는 시간영역의 측정신호를 충격반응 스펙트럼(Shock Response Spectrum)을 통해서 나온 주파수 영역에서의 응답특성으로 고주파영역에서 보호체는 4000g, 로봇은 1000g 의 최대응답 가속도를 보이고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내·외적으로 처음으로 발사, 비행을 통해서 위험지역에 원거리 투입이 가능한 소형 정찰로봇과 보호체를 개발하기 위한 설계개념에 대해서 기술하였다. 개발된 보호체는 목표지점에 도착하게 되면 부가적 동력장치가 없이 지면이나 벽과의 충돌에 의해서 전방부 슬라이더-크랭크 기구가 자동으로 작동하여 보호체 외피가 두 부분으로 분리·개방된다. 이때 내부에 위치한 정찰로봇이 외부로 임무수행을 위해 탈출하게 된다. 보호체의 설계치수에 따른 내충격 성능을 분석하기 위해서 Abaqus 를 이용한 정찰로봇과 보호체의 유한요소 모델링을 수행하였다. 유한요소 모델을 이용한 충격예측과 실제 낙하충돌 실험으로 측정한 충격가속도, 충격에 의한 부품의 파손형태, 그리고 충격반응 스펙트럼 비교를 통해서 제시한 유한요소 모델링의 유효성을 검증하였다. 그리고 실제 제작된 시작품을 가지고 수행한 충격시험을 통해서 개발된 보호체는 외부에서 작용하는 충격을 효과적으로 완화하여 발사, 비행, 착지 시 발생할 수 있는 외부의 충격으로부터 정찰로봇을 보호할 수 있음을 관찰하였다. 향후 연구내용으로 보호체 설계기술을 다양하게 검증하기 위해 충격 흡수재를 포함한 보호체 부품의 재질특성, 부품간의 접촉환경 및 하중조건, 수치적분 후처리과정 등 유한요소 모델링 환경에 따른 수치해의 정확성 분석이 필요하다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지역산업기술개발사업(과제번호:70004887)의 지원에 의해서 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

(1) Maurette, M., 2003, “Mars Rover Autonomous Navigation,” *Autonomous Robots*, Vol. 14, No. 2, pp. 199~208.
(2) O'Halloran, D., Wolf, A. and Choset, H., 2004, “Design of a High-Impact Survivable Robot,” *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3551~3558.
(3) Siegwart, R. and Nourbakhsh, I., 2004, *Introduction to Autonomous Mobile Robot,* The MIT Press.
(4) Kim, J. Y., Park, I. W. and Oh, J. H., 2009, “Experimental Realization of Dynamic Stair Climbing and Descending of Biped Humanoid Robot, HUBO. ” *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 6, No. 2, pp. 205~240.
(5) Yamaguchi, H., 2003, “A Distributed Motion Coordination Strategy for Multiple Nonholonomic Mobile Robots in Cooperative Hunting Operations,” *Robotics and Autonomous Systems*, Vol .43, No. 4, pp. 257~282.
(6) Hougen, D.F., 2000, “Miniature Robotic System for Reconnaissance and Surveillance,” *Proc. IEEE conf. on Robotics and Automation,* pp.501~507.
(7) *http://www.odfopt.com/eyeball_r1/eyeballr1_home.htm*
(8) Kim, C.-Y., Jung, W.-S., Kang, B.-S., Kim, K.-S. and Kim, S.-H., 2010, “ Development of the Crossbow Type Launcher for a Cmall Reconnaissance Robot,” *Proc. Korea Institute of Military Science and Technology Conference*
(9) Kim, J., Lee, J. and Lee, S., 2001, “Drop/Impact Simulation and Experimental Verification of Mobile Phone,” *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 25, No.4, pp. 695~702.
(10) Joung, J.-H., Kim, H.-B.-R., Seong, Y.-H. and Choi, H.-H., 2007, “A Study on Strength Evaluation of LCD Glass for Drop Test,” *Trans. of the KSPE*, Vol. 24, No. 10, pp. 99~108.
(11) http://www.matweb.com/index.aspx
(12) Park, M.S. and Kang, B.S., 2011, “Gaussian Kernel Smoothing of Explicit ransient Responses for the Drop Impact Analysis,” *Trans. of the KSME(A),* Vol. 35, No. 3, pp.289~297.
(13) Piersol, A.G. and Paez, T.L., 2010, *Harris' Shock and Vibration Handbook (Sixth Ed.)* , McGraw-Hill.
(14) Department of Defence, 1989, *MIL-STD-810F, Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests*.
(15) IEC, 2008, *Environmental Testing Part 2-27:Shock*.