

낙하 충격 해석을 위한 명시법 과도응답의 가우스커널 평활화 기법

박 문 식^{*†} · 강 봉 수^{*}

* 한남대학교 기계공학과

Gaussian Kernel Smoothing of Explicit Transient Responses for Drop-Impact Analysis

Moon Shik Park^{*†} and Bong Soo Kang^{*}

* Dept. of Mechanical Engineering, Hannam Univ.

(Received December 20, 2010 ; Revised January 7, 2011 ; Accepted January 7, 2011)

Key Words : Explicit Method(명시법), Gaussian Kernel Smoothing(가우스커널 평활화), Drop Impact(낙하충격), Surveillance Robot(탐지로봇), Protection Cover(보호커버), Transient Response(과도응답), Floor Response Spectrum(층 응답스펙트럼)

초록: 명시적 유한요소법은 비선형성이 많은 대형 문제를 푸는 데는 꼭 필요하지만 종종 그 결과의 해석에 있어서는 어려움이 수반된다. 특별한 경우, 가속도의 과도응답은 극심한 불연속, 과도한 노이즈 또는 앨리어싱이 발생하여 평가가 불가능할 때도 있다. 본 논문에서는 유한요소법의 명시적분에 의한 과도응답 및 응답스펙트럼의 새로운 후처리기법을 제안한다. 해석기에 의한 가속도 거동의 수치적인 에러를 제거하고 물리적인 가속도를 추출하기 위하여 가우스커널을 이용하는 평활화법을 제안하였다. 이 평활화는 신호처리 필터링 기법과 같이 복잡한 주파수에 대한 고려가 없이도 속도에 대한 결과와 응답스펙트럼을 참조함으로써 행해진다. 특히 가우스커널 평활화는 가속도의 피크 값을 잘 나타내면서도 평활도가 우수하였다. 제안된 평활화법에 의하여 부드러운 가속도는 물론 이를 이용하여 설계에서 필요한 층 응답스펙트럼을 구할 수 있다.

Abstract: The explicit finite element method is an essential tool for solving large problems with severe nonlinear characteristics, but its results can be difficult to interpret. In particular, it can be impossible to evaluate its acceleration responses because of severe discontinuity, extreme noise or aliasing. We suggest a new post-processing method for transient responses and their response spectra. We propose smoothing methods using a Gaussian kernel without in-depth knowledge of the complex frequency characteristics; such methods are successfully used in the filtering of digital signals. This smoothing can be done by measuring the velocity results and monitoring the response spectra. Gaussian kernel smoothing gives a better smoothness and representation of the peak values than other approaches do. The floor response spectra can be derived using smoothed accelerations for the design.

1. 서 론

어떤 시스템의 동적 거동을 구하고자 할 때, 해석하고자 하는 모델이 소성변형과 접촉 등을 포함하고 있다면 선형이론에 근거한 모드 해석법은 사용할 수가 없다. 따라서 직접 시간적분, 그 중에서도 명시적분에 의한 과도응답 해석을 사용하는 경우가 많으며, 이러한 예로서 유한요소 명시법을

사용한 낙하 시뮬레이션에 관한 여러 문헌들을 볼 수 있다.⁽¹⁻⁴⁾

평형을 만족시키기 위한 축차과정이 있는 내재적분법과는 달리 명시법에서의 중앙차분법은 축차과정이 없는 시간 전진법을 취하므로 접촉 및 탄소성과 같은 문제를 풀 때 불평형 잔력이 들쭉날쭉 하게 되고, 이는 가속도나 반력의 결과에 극심한 진동 및 불연속을 가져다 주게 된다. 특히 가속도의 결과는 그 크기 및 경향이 물리적인 값과는 동떨어진 터무니없는 값을 가져다 주게 된다.

그럼에도 불구하고 대부분의 상용 패키지에서는

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

이에 대한 후처리를 제공하지 않고 있다. 최근에 이에 대한 처리 방안으로서 디지털 신호처리기법(DSP)에 의한 필터링 방법이 연구되고 있다.^(5,6) 그러나 DSP 방법에서는 데이터 정규화와 차단 주파수 등에 대한 지식이 있어야 한다.

본 연구에서는 이에 대한 대안으로서 과도응답으로 얻은 시 계열 데이터의 평활화(smoothing) 방법을 새로이 제안하고 이를 탐지로봇 및 보호커버의 충격해석에 적용하고 타당성을 보이고자 한다.

한편, 복잡한 구조물인 경우 지진이나 충격에 의한 과도응답해석은 단계별 접근법을 필요로 한다. 즉, 크고 무거운 구조물과 그 위에 여러 가지 세부 계통품들이 장착되어 있을 경우, 먼저 주 구조물들을 모델링하여 과도응답을 구한 후, 세부 계통품들의 동특성 해석을 위해서는 그 지지 구조물에서의 응답스펙트럼(response spectrum)을 제공해 주는 방식이다. 이것을 층 응답스펙트럼(floor response spectrum)이라 부르며 이에 대한 여러 연구들이 있다.⁽⁷⁻⁹⁾

본 연구에서 다루고자 하는 문제는 Fig. 1 과 같은 탐지로봇과 보호체로 이루어진 발사물(projectile)이다. 일반적으로 낙하와 충돌시의 거동은 적절한 충격하중을 부여하고 이를 모드 해석법 또는 과도응답 해석법을 통하여 구한다. 충격하중과 충격거동에 대한 절차 및 방법론 등은 MIL-STD-810F,⁽¹⁰⁾ IEC 60068-2-27,⁽¹¹⁾ DEF-STAN 00-35, ISO 16750-3 등에서 제시하고 있다. 이러한 규격에서는 수작업에 의한 취급, 운반 및 운송, 발사 및 운용상에서의 기능적 시험 등을 다루고 있는데 충격의 종류는 일상적 취급 시의 6ms 동안 30g 에서부터 발사 시의 1ms 동안 500g, 광범위한 화염충격(pyroshock), 소형 전자 기기를 떨어뜨릴 때의 1ms 동안 5000g 까지의 다양한 충격을 제시하고 있다. 그러나 본 탐지로봇 시스템의 경우 발사되지만 땅에 떨어져 부분 파손을 허용한 상태에서도 작동해야 한다는 점에서 규격의 특정 범주와 절차에 해당되지 않는 문제라고 할 수 있다. 따라서 땅에 부딪히는 순간의 속도를 시스템 전체의 초기속도로 부여하고 명시법에 의한 과도응답을 구함으로써 충격거동을 구하고자 한다. 특히 본 문제는 주 구조물들이 많은 소성변형 및 접촉을 겪으므로 지상응답스펙트럼이 아니라 층 응답스펙트럼이 구해져야 한다.

본 논문에서는 평활화가 필요한 예로서 미소 압입 문제를 들어 보여주고, 낙하 충격 시물레이션의 예로서 탐지로봇 및 보호커버의 문제를 설명하고 적용한다. 그리고 가우스 커널을 이용한 가속도의 평활화와 그를 사용한 층응답스펙트럼을

제시한다. 그리고 결론을 맺는다.

2. 본 론

2.1 평활화의 개요

본 논문에서 다루게 될 명시적 동적 과도응답 해석의 평활화를 다루기에 앞서 먼저 전형적인 평활화의 필요성을 보여 주기 위하여 미소 압입(micro indentation) 문제의 예를 Fig. 1 에 나타내었다. 최근에 재료의 마이크로 크기 또는 나노 크기의 거동을 규명하기 위해 관련 연구가 매우 활발한 편이다.⁽¹²⁾

Fig. 1 에 직경이 32 μm , 두께가 8 μm 인 다결정 구리($\sigma = 688\epsilon^{0.3}$ MPa) 시편에 비커스 팁(Vickers tip)으로 2 μm 까지 압입하는 준 정적 유한요소 해석을 보여주고 있다. 사용된 요소는 선형 4 절점 감차적분 축대칭 요소이며 Fig. 1(a)는 압입 2 μm 에서의 유효소성변형률을, Fig. 1(b)는 압입 깊이(h)에 따른 경도 값을 보여 주고 있다. 경도 값은 다음과 같이 계산된다.

$$H = \frac{F}{A_p} \quad (1)$$

여기서, F는 수직 압입력을, A_p 는 접촉면적의 수평투영면적을, H는 경도 값을 의미한다. 식 (1)에 의한 경도 값은 Fig. 1(b)의 'Raw'로 표시하였는데, 그림에서 보는 바와 같이 매우 심한 진동을 볼 수 있다. 이는 식 (1)에서 F와 A_p 모두 불연속 한데, 특히 분모는 접촉면적으로서 선형요소를 쓸 경우 접촉면적이 불음 또는 떨어짐(on/off) 형식으로 계산이 되기 때문이다. 이러한 진동은 압입 깊이가 서브 마이크론 또는 나노미터 크기에서 더욱 극심해 짐을 알 수 있고 이러한 연구에서 세심한 주의를 기울여야 함을 말해 준다. 더 나아가 이러한 힘-변위 값이 동역학의 문제에서는 속도와 가속도에 영향을 미치며 그 결과에 있어서도 더욱 심한 불연속과 수치적 에러를 포함하게 된다. 따라서 접촉을 다루게 되는 동적 과도해석의 응답에서는 결과 값(특히 반력과 가속도)의 평활화가 반드시 필요하게 된다.

한편 이러한 불연속과 수치적 에러를 제거하는 방법으로서 본 논문에서 제안하는 평활화를 적용하게 되면 Fig. 1(b)의 'Smoothed'와 같이 변환된다.

평활화 된 정도 값은 충분히 부드러우며 압입 깊이가 커짐에 따라 이론 값(0.834 GPa)에 근접함을 알 수 있다.⁽¹³⁾

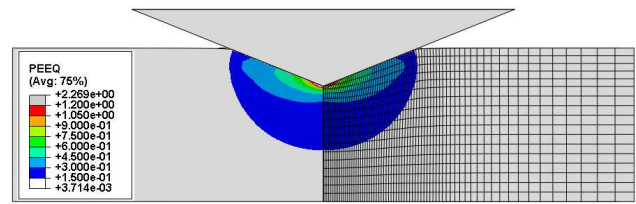
2.2 탐지로봇 시스템의 유한요소 모델링

본 논문에서 예로 사용하게 지름 100mm, 길이 240mm 의 소형 탐지로봇 시스템을 Fig. 2 에 나타내었다. 이 조립체는 목표지점을 향해 비행하며 비행체가 벽이나 창 또는 지면과 충돌한다. 이 때 가해지는 충격에 의해 보호커버는 분리 및 전개되고 탑재체(payload)인 탐지로봇이 튀어나와 임무를 수행하게 된다. 보호커버는 폴리 카보네이트 재질의 전방커버와 후방커버로 이루어져 있는데, 전방커버는 세 개의 그립 팔(grip arm, Al)이 접어져 있다가 충격에 의해 펼쳐지게 되며, 후방커버는 원통형 일체형 커버로서 충격을 받아 전방커버와 분리된다. 그러므로 보호커버는 내부의 탐지로봇을 운반할 뿐만이 아니라 충돌 시 충격에너지를 흡수하여 탑재체를 보호하고 또 반드시 분리되고 펼쳐져야 한다. 여기서는 탐지로봇 시스템의 유한요소 모델링에 대하여 설명한다.

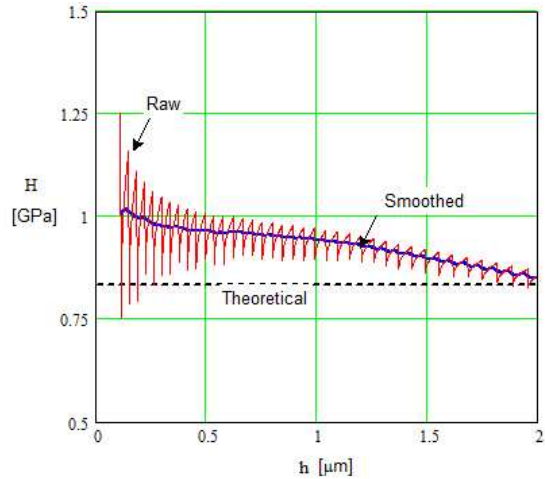
먼저 낙하 충돌의 다양한 양상 가운데에서도 핵심 설계 의도에 해당하는 Fig. 2(a)의 화살표 방향의 전방 정면충돌을 다루고자 한다. 정면충돌은 Fig. 2(b)에서 보인 바와 같이 복잡한 조립체를 단순화 할 수 있게 해준다. 즉, 탐지로봇은 축 대칭 모델로, 보호체는 삼차원으로 모델링 하되 펼침의 한 쪽에 해당하는 삼분의 일만을 고려하면 될 것이다. 해석 도구로는 Abaqus⁽¹⁴⁾를 이용한다.

축대칭 모델의 좌표계는 Fig. 2(b)에서 1 은 반지름(r) 방향을, 2 는 축(z) 방향을 의미한다. 해석을 위한 유한요소 모델링을 위해서는 탐지로봇과 보호커버의 정면충돌에 대한 하중경로(load path)의 분석이 선행되어야 한다. 만약 부품이 하중경로에 해당하는 부품이라면 유한요소에 포함되어야 하며 그렇지 않을 경우에는 등가질량으로 모델링이 되면 충분할 것이다.

탐지로봇의 하중경로를 담당하는 축 대칭 모델을 Fig. 3(a)에 나타내었다. 하중경로를 검증하기 위한 선행해석을 통해 휠 계통과 배터리를 하중경로에 포함시켰다. 부품 간극과 메쉬의 일부를 Fig. 3(b)에 나타내었다. 보호커버의 삼분의 일을 모델링한 것을 Fig. 3(c)에 나타내었다. 여기서 왼쪽 끝의 원통은 낙하 바닥면에 해당하는 해석적 강체(rigid body)이다. 이 때 경계조건은 부분모델에 대한 주기적 거동을 근사적으로 나타낼 수 있도록

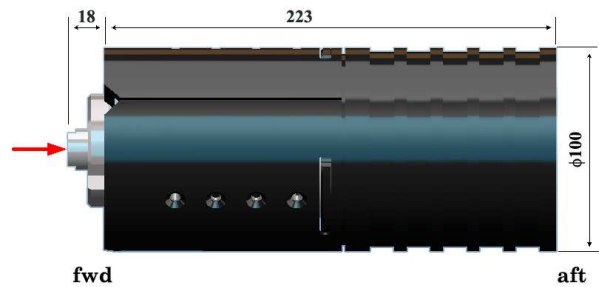


(a) Micro-indenting simulation model

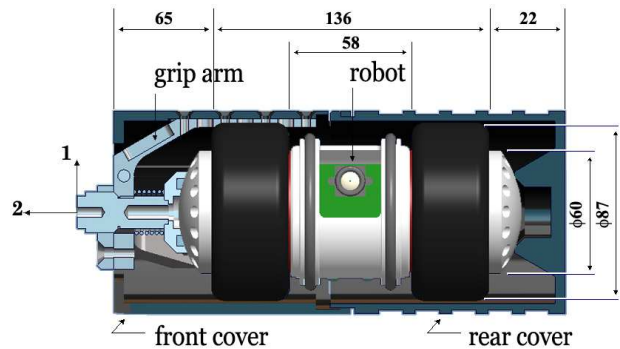


(b) Smoothed and unsmoothed hardness

Fig. 1 Typical smoothing of noisy hardness data



(a) Outer view

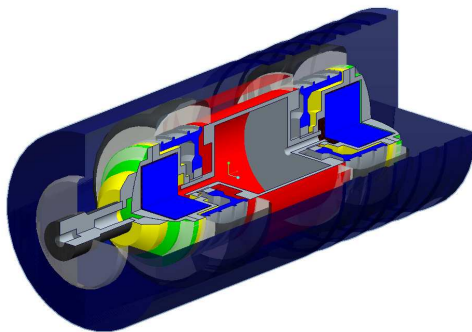


(b) Section view

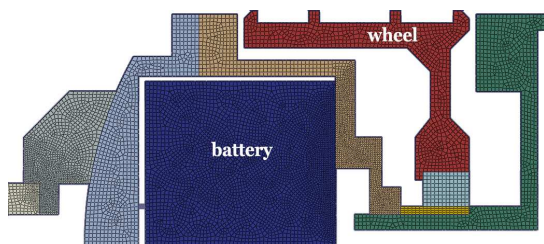
Fig. 2 Surveillance robot and protection cover system

Fig. 2(b)의 좌표계로 $u_1 = u_3 = 0$ 로 부여하였다. 전방커버는 경계면이 자유경계이므로 펼침이 일어날 수 있도록 어떤 구속도 부여하지 않는다. 유한 요소의 메쉬에 대한 요약은 Table 1 과 같다. 여기서 축 대칭 요소로는 주로선형 4 절점 감차적분 요소를 사용하면서 부분적으로는 3 절점 요소를 사용하였다. 삼차원 요소로는 메쉬가 용이하도록 사면체 요소를 사용하였다.

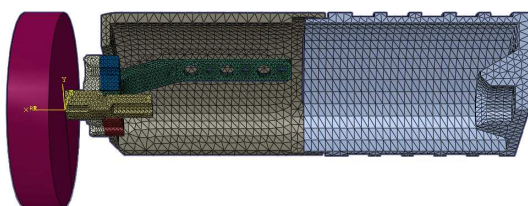
유한요소 모델에 입력된 재료들은 로봇의 메인 프레임과 그립 팔의 알루미늄(Al 6061) 및 기타 부품에는 수지계통의 재료가 다양하게 쓰였으며 서로의 탄성계수는 수 백 배, 항복응력은 수 십 배의 차이가 나므로 파손 및 에너지 흡수의 측면에서 부품간의 역할이 매우 상이하다. 또한 동 특성을 구할 때는 구조감쇠계수를 고려하였는데 금속의 경우에는 0.01 로, 수지재료들의 경우는 0.05 로 입력하였다. 접촉면에서의 마찰계수는 0.2 로 입력하였다.



(a) Axi-symmetric robot model



(b) Partial view of axi-symmetric mesh



(c) 3D mesh of protecting cover (one third)

Fig. 3 Finite element modeling

2.3 충격거동 분석

충격해석에서는 충격부에 가하게 될 가진 하중의 선택이 중요하다. 대부분의 해석적 접근에서는 여러 표준과 규정에서 제시하고 있는 바와 같이 가속도로 된 단순파형을 충격부에 가진하는 방법을 사용한다. 단순파형으로서는 톱니 파, 사다리꼴 파, 반정현 파 등이 있다. 그러나 전 절에서 설명한 바와 같이 여기서는 가속도 가진을 사용하지 않고 물체를 강제 바닥에 초기속도로 충돌시키는 방법을 사용한다.

수치실험에 사용될 초기 충돌속도 및 해당 낙하 높이, 그리고 에너지 값을 Table 2 에 나타내었다. 10m 는 설계기준 높이에 해당되는 것으로서 이 높이의 낙하에서도 탐지로봇이 정상 작동해야 한다. 낙하높이에 해당하는 충돌속도는 $v = \sqrt{2gh}$ 로 계산되며 이때의 운동에너지는 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ 이다.

명시적분법에서는 축차과정이 없는 중앙차분 과정을 사용하기 때문에 반드시 수치적 안정성을 보장할 수 있는 매우 작은 증분 시간을 사용하여야 한다. 이 증분 시간은 메쉬의 크기가 작아질수록 작아지기 때문에 필요이상으로 메쉬를 세분화하는 것은 피하는 것이 좋다. 앞에서 기술한 유한요소 모델링에서 요구되는 증분시간은 탐지로봇과 보호커버에 대해서 대략 $\Delta t = 10^{-5}$ ms 이다. 또한 데이터를 출력하는 시간으로서 10^{-5} ms 를 쓰게 되면, 데이터의 양이 너무 많으므로 10^{-3} ms 정도의 주기를 사용하여 출력하였다.

해석결과를 요약하여 Table 3 에 수록하였다. 여기에는 각각의 반력과, 탐지로봇 프레임에서의 가속도와, 보호커버의 개폐여부 및 최대 가속도를

Table 1 Summary of the number of finite element mesh

Model	Elements	Nodes	Variables	Contact Elements
Robot	19,144	21,462	40,965	980
Cover	45,981	19,702	46,545	4,188

Table 2 Impact velocity and its kinetic energy for the drop height

	Height[m]			
	0.7	2	5	10
Velocity[m/sec]	3.71	6.26	9.91	14.0
Energy[J]	6.87	19.6	49.1	98.1

보여준다. 여기서 반력과 가속도의 값은 다음에 자세히 설명될 평활화에 의한 후처리 과정을 거친 것이다. 10m 낙하시의 결과를 보면 충격 반력은 약 2.4ms 에 걸쳐 작용되며 순간 최대 값은 1160g 즉, 무게의 1160 배이고 평균값은 약 610g 정도이다. 역으로 이러한 충격파와 가장 유사한 반정현파를 표준이나 규정에서 찾는다면 IEC 60068-2-27⁽¹¹⁾ 의 500g 와 1ms 를 들 수 있겠으나 지속시간은 2.4ms 와 크게 다르므로 동일한 규격은 없다. 따라서 본 논문에서 취한 시스템 전체에 충돌속도를 부여하고 강체로 모델링 된 바닥에 충격시키는 해석방법은 적절하였다. Fig. 4(a)에서 충격 반력을 나타내었는데 해석에 의한 것과 이를 반 정현파(half-sine wave)로 피팅한 것을 함께 나타내었다. 피팅한 반 정현파는 다음의 함수이다.

$$a(t) = A \sin(\omega t) \quad (2)$$

여기서 $\omega T = \pi$ 이고 T 는 반주기이다. 그림에서 보면 반력의 파형은 사다리꼴 또는 반 정현파로 근사화할 수 있다고 판단된다.

또한 과도응답으로 구한 충격 반력을 $f(t)$ 라고 하면 평균 반력은 다음과 같다.

$$\bar{f} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (3)$$

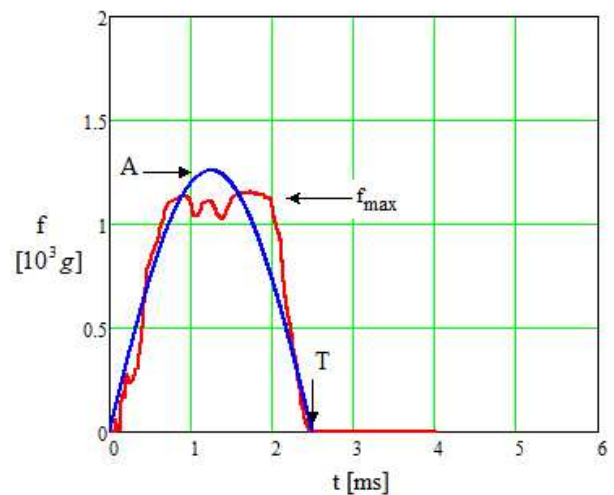
반 정현파의 평균력은 $\bar{a} = 2A/\pi$ 이다. 이러한 과정에 의하여 다른 높이에 대해서도 구한 결과를 Table 3 에서 보면 높이에 따라 지속시간과 최대값, 평균값 등의 경향을 볼 수 있다. 0.7m 에서 10m 로 감에 따라 지속시간은 3.5ms 에서 2.4ms 로, 최대값은 260g 에서 1157g 로 바뀐다.

Table 3 Summary of analysis results: impact reaction force and frame acceleration

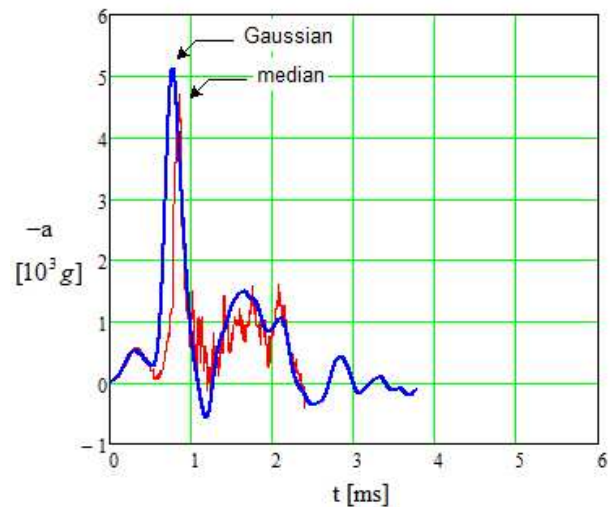
Analysis variable		Height[m]			
		0.7	2	5	10
Impact reaction force	T[ms]	3.479	2.983	2.484	2.396
	f_{max} [g]	260	422	874	1157
	\bar{f} [g]	72	287	585	607
Main frame acceleration	a_{max} [g]	1440	1820	4160	4840
	Median				
	a_{max} [g]	1360	1850	3420	5130
Protection Cover	Open	No	Yes	Yes	Yes
	Damage	-	-	-	Grip arm

한편 Fig. 4(b) 및 Table 3 의 메인프레임의 가속도를(Fig. 5 의 점 P) 보면 0.7m 에서 10m 로 커짐에 따라 그 최대값은 약 1400g 에서 약 5000g 까지 증가한다. 여기서 가속도는 실험적으로 규명이 되어야 하는데, 현재 별도의 실험을 통해 0.7m 의 경우에 약 1000g 정도의 값을 얻었고⁽¹⁵⁾ 그 이상의 높이에 대한 실험을 계획 중에 있다. Fig. 4(b)에서 두 가지의 결과는 나중에 설명하게 될 가우스커널 및 메디안 평활화에 의한 후처리 결과이다. 피팅과 평활화 및 스펙트럼의 계산 등에는 Mathcad⁽¹⁶⁾ 를 이용한다. 실제로 여기서의 가속도는 감속도를 의미한다.

한편 탐지 로봇에 대한 변형 및 손상정도는 Fig. 5 에 표시하였다. 이 그림은 시간 1.5ms 에 해당하



(a) Reaction force



(b) Main frame acceleration

Fig. 4 Analysis results for the 10m drop

는 것으로서 Fig. 4(b)의 시간을 보면 1.5ms 는 최대가속도를 겪은 후가 되므로 손상의 정도를 잘 볼 수 있는 시간이다. 매우 큰 소성변형이 여러 부품에 걸쳐 발생함을 볼 수 있다(최대 유효소성 변형률 값 약 4.5). 그러나 특이하게도 휠 계통의 부품들과 메인 프레임의 바닥은 손상이 없음을 볼 수 있다. 즉, 휠 계통은 충격을 겪은 후에도 기능에 지장이 없어 탐지로봇이 기동할 수 있으며 메인 프레임의 바닥은 중요 세부계통 장치들이 장착되는 곳으로서 충격에 대해서도 비교적 손상이 없이 남을 것으로 판단된다.

2.4 과도응답의 평활화

접촉 및 소성 문제의 명시법에 의한 가속도의 해석결과에 수반되는 수치적 노이즈 및 출력 샘플링 차이에 따른 앨리어싱 신호를 제거하는 방법에는 데이터 평활화법과 디지털신호처리(DSP)에 의한 필터링이 있을 수 있다. 본 연구에서는 필터링을 할 때와 같이 정규화 작업 및 차단주파수에 대한 판단기준이 요구되지 않는 데이터 평활화법을 제안하고자 한다.

10m 낙하충돌 시 전술한 해석에 의한 과도응답의 결과를 반력과 변위-속도-가속도로 각각 Fig. 6(a) 및 (b)에 표시하였다. 반력은 낙하충돌 바닥에서의 접촉 반력이고 변위-속도-가속도는 메인 프레임의 바닥에서의 값이다. 변위와 속도 응답은 부드러운 반면 반력과 가속도는 심한 진동을 보여준다. 특히 가속도는 물리적으로 있을 수 없는(Fig. 6(b)의 가속도 축은 $\pm 40,000g$ 임) 매우 큰 값의 진동을 가져다 주었다. 그럼에도 불구하고 속도와 변위의 거동을 보면 매우 부드러움을 알 수 있다. 한편 Fig. 6(b)의 가속도 원 데이터를 동력스펙트럼으로 분석한 결과에서도 본 문제와 같은 기계적 시스템에서 있을 수 없는 수만~수십만 Hz 성분도 포함하고 있음을 확인하였다.

또한 가속도 원 데이터를 응답스펙트럼으로 구한 결과를 Fig. 6(c)에 나타내었다. 여기서는 다음에 설명할 가우스커널 평활화를 거친 가속도에 대한 결과도 함께 수록하였는데, 평활화 가속도는 일반적인 충격응답스펙트럼과 같은 교차주파수(cross-over frequency, 이 값 이상에서는 더 이상 응답이 커지지 않음)를 보이는데 반하여, 원 가속도는 교차주파수를 보이지 않고 있다. Fig. 6(c)에서 보면 교차주파수는 약 1,000 Hz 부근이다. 따라서 속도에 대한 그래프와 더불어 충격응답스펙트럼을 세심하게 살펴본다면 평활화에 의해서 물리적 가속도를 추출할 수 있게 된다.

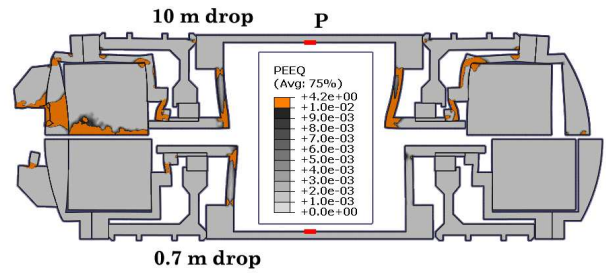


Fig. 5 Deformation and damage of the robot (time at 1.5ms)

평활화는 두 가지로 수행해 본다. 첫째는 측정점을 주변의 값들의 중앙값으로 대체하는 메디안 평활화(median smoothing)이다. 이 경우 단순 진동성분의 노이즈는 완전히 사라지게 된다. 평활화의 정도는 주변의 범위를 좁게 하느냐 또는 넓게 하느냐 인데 본 문제에서는 Fig. 6(b)의 속도 그래프로부터 부분 부분의 기울기 즉, 가속도를 쟀 후 메디안의 범위를 조절하는 방법으로 주변 값 200 개 즉, 밴드폭 $b=0.2ms$ 를 사용하였다. 이에 대한 결과는 반력을 Fig. 6(a)에, 가속도를 Fig. 4(b)에 나타내었다. 여기서 반력은 충분히 평활화 되었으나 가속도는 평활도가 부족함을 볼 수 있다.

둘째는 가우스 커널(Gaussian kernel)을 이용한 평활화이다. 가우스 커널에 의한 평활화 데이터는 다음과 같다.

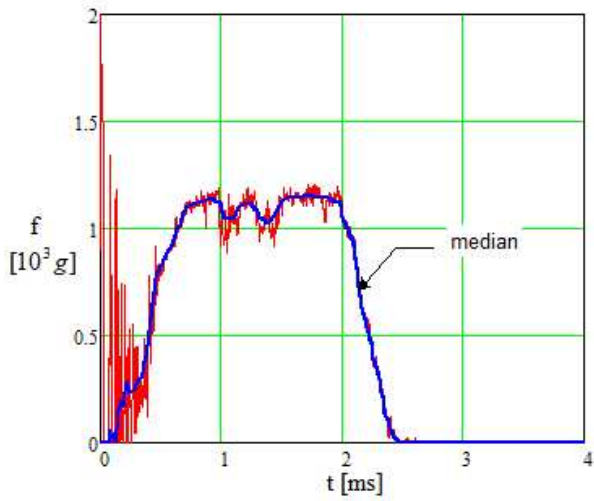
$$y_i = \frac{\sum_{j=1}^n G\left(\frac{x_i - x_j}{b}\right) \cdot y_j}{\sum_{j=1}^n G\left(\frac{x_i - x_j}{b}\right)} \quad (4)$$

여기서 $G(x)$ 는 다음의 가우스 커널이다.

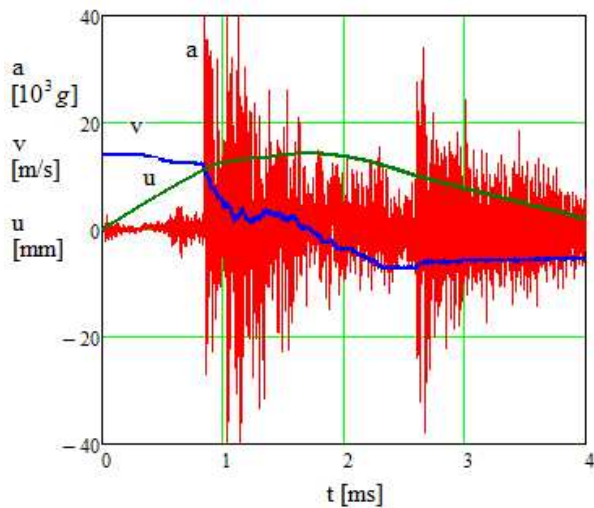
$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\cdot\sigma^2}\right) \quad (5)$$

식 (4)에서 밴드 폭은 $b=0.2ms$ 로 사용하였으며 n 는 밴드 폭 범위 안에 있는 데이터의 총 수를, 식 (5)에서 σ 는 커널의 폭 또는 내부척(inner scale)으로서 0.37 을 썼다. 이러한 평활화는 국부적 산포를 반영한 가중평균의 의미를 갖는다.

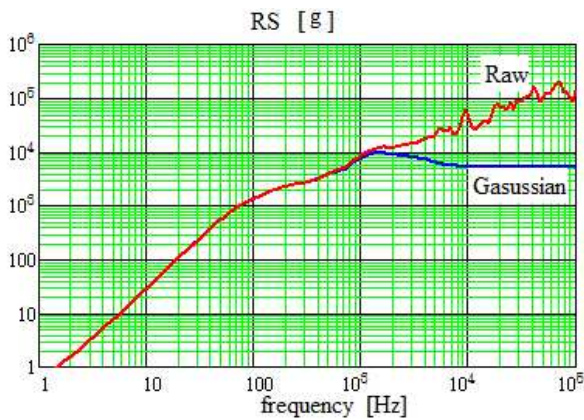
Fig. 6(a)의 원 가속도를 가우스 평활화 한 결과는 Fig. 4(b)에 메디안 평활화와 함께 표시하였는데 메디안 평활화보다 부드러우면서 최대값은 비슷한 결과를 나타내 준다. 따라서 Fig. 4(b)의 가우스 평활화 가속도를 입력으로 하여 Fig. 6(c)의 응답스펙



(a) Reaction force



(b) Acceleration, velocity and displacement



(c) Floor response spectrum of raw and smoothed acceleration data

Fig. 6 Transient responses and their frequency characteristics

트럼을 얻은 것이다. 즉, 속도그래프를 이용하여 평활화 밴드 폭을 결정할 수 있고 평활화 가속도를 이용하여 원 데이터와의 응답 스펙트럼을 비교 분석함으로써 평활화를 완성할 수 있게 된다.

2.5 층 응답스펙트럼

충격 응답스펙트럼은 어떤 바닥 충격과에 의한 단 자유도계 시스템의 최대 크기의 과도응답을 말한다. 응답스펙트럼을 구하는 과정은 본 논문의 범위를 벗어나므로 생략하였다. 평활화 하기 전과 (Raw) 한 후의(Gaussian) 충격 응답스펙트럼은 Fig. 6(c)와 같다. 여기서, 단 감쇠비를 고려할 수 있는데 Fig. 6(c)에서는 1%의 감쇠비를 사용하였고 앞으로 모든 응답스펙트럼도 같은 감쇠비를 적용한다.

Fig. 4(b)의 가우시안 평활화 가속도를 입력으로 하고 로봇의 메인 프레임의 바닥(Fig. 5의 점 P)에서의 층 응답스펙트럼을 Fig. 7(a)와 같이 구하였다. 낙하 높이가 2m 부터 10m 까지 달라지지만 층 응답스펙트럼의 모양은 유사함을 볼 수 있다. 보수적인 설계관점으로 각각의 높이에 대한 스펙트럼의 최대값 포락선을 상정한다면 Fig. 7(b)의 'FRS'와 같이 직선으로 구성된 스펙트럼을 제시할 수 있다. 따라서 메인 프레임에 장착되는 세부계통품의 설계에서는 Fig. 7(b)의 층 응답스펙트럼을 이용하여 모드해석방법에 의해 동특성 해석을 할 수 있게 된다. 한편, Fig. 4(a)의 반 정현파를 입력으로 하는 지상 응답스펙트럼을 역시 Fig. 7(b)에 'GRS'로 그렸다. GRS와 FRS의 차이로 부터 200 Hz 부근을 제외하고는 상당한 동적 확대가 있음을 알 수 있다. 즉, 탐지로봇은 충격을 받아 충격 성분 보다 훨씬 큰 가속도를 세부 계통품에 전달한다.

3. 결론

탐지로봇과 보호커버의 모델링 및 분석 그리고 평활화 후처리 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 본 연구에 의한 결과는 0.7m 낙하 충격의 경우(Table 3) 별도 연구의 실험에 의한 최대 값 결과와,⁽¹⁵⁾ 그리고 휴대폰에 대한 1.2m 낙하충격의 결과와⁽¹⁾ 차수 크기 정도로 맞는다. 그리고 아직 실험이 불가능하지만 10m 낙하 해석을 기준으로 볼 때 탐지로봇은 바닥으로부터 최대 약 1200g의 충격력을 받으며 메인 프레임의 시스템 장착부에는 최대 약 5000g 정도의 가속도가 발생하였으므로 IEC 규격의 소형 전자부품의 1500g 레벨에 해

당한다.⁽¹¹⁾ 10m 낙하 시에는 충돌 어댑터, 보호 커버와 배터리 하우징이 크게 파손되지만(Fig. 5) 그림에도 불구하고 탐지로봇은 구조적인 측면에서 축 계통 및 휠의 손상은 미미하여 기동에는 지장이 없는 것으로 분석되었다. 다만, 배터리와 메인 프레임에 장착될 세부 계통품들에 대해서는 Fig. 7과 같은 충격응답스펙트럼 및 응답스펙트럼 해석법을 활용하여 동특성을 평가해야 할 것이다.

둘째, 명시법에 의한 과도응답의 결과는 재료 및 기하학적 비선형성과 접촉 및 마찰에 의한 수치 알고리즘 상의 심각한 불연속, 그리고 출력 샘플링으로 말미암아 불연속 및 앨리어싱이 대량 발생함을 확인하였다. 특히 매우 부드러운 변위 및 속도 응답에 비하여 가속도는 극심한 노이즈로 인하여 의미 있는 분석이 불가능하였다. 따라서 이에 대한 평활화를 시도하였는데 메디안 평활화와 가우스커널 평활화를 시도하였다. 평활화의 판단 기준으로서는 속도 그래프로부터 구간 구간의 가속도 값과 평활화 결과를 비교하면서, 그리고 이에 대한 응답스펙트럼의 교차 주파수의 존재유무를

확인하면서 진행하였다. 메디안 평활화에 비해 가우스커널 평활화가 피크를 잘 표현하면서 더 부드러운 결과를 가져다 주었다.

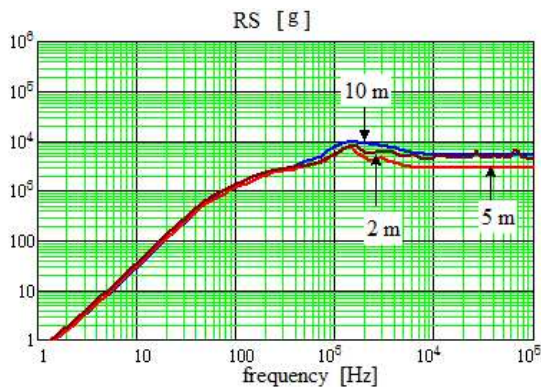
셋째, 이러한 일련의 해석과정은 낙하시험을 통하여 더 자세히 밝혀져야 할 것이다. 현재는 시험 장치의 제약 때문에 1m 정도의 시험만이 가능하지만 10m 정도의 시험에서는 시험대가 정확한 충격파를 인가하였는지를 보장하며, 단품이 아닌 복잡한 조립체의 손상까지를 볼 수 있어야 하므로 향후에는 시험법에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다. 또한 충돌시에 보호체가 더 적극적으로 충격에너지를 흡수하여 탐지로봇에 전달되는 충격이 줄어 들 수 있도록 설계의 변경이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

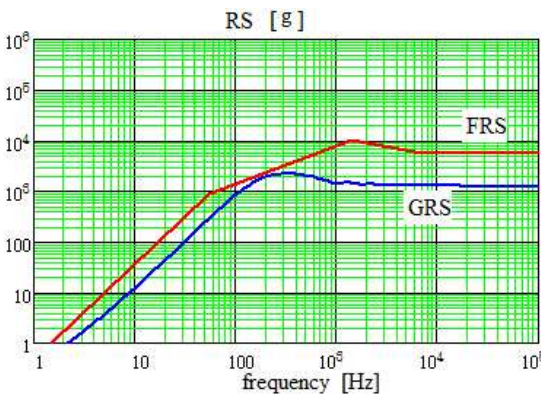
이 논문은 첫 번째 저자에게 수여 된 2010 년도 한남대학교 학술연구비 조성사업의 지원에 의하여 집필되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Kim, J. G. and Park, Y. K., 2004, "Experimental Verification of Drop/Impact Simulation for a Cellular Phone," *Experimental Mechanics*, Vol. 44, No. 4, pp. 375~380.
- (2) 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," *J. Korean Soc. Precision Engineering*, Vol. 24, No. 10, pp. 99~108.
- (3) Samgeeth, R., Tho, C. H. and Smith, M. R., 2009, "Rotorcraft Fuel System Drop Test Simulation Methodology," *American Helicopter Society 65th Annual Forum*, Grapevine, Texas, pp. 1478~1487.
- (4) Kim, K. S., Chung, S. H., Kim, J. S., Choi, K. S. and Yun, H. D., 2010, "Demonstration of Structural Performance of IP-2 Packages by Advanced Analytical Simulation and Full-Scale Drop Test," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240, No. 3, pp. 639~655.
- (5) Diehl, T., Carroll, D. and Nagaraj, B., 2000, "Applications of DSP to Explicit Dynamic FEA Simulations of Elastically-Dominated Impact Problems," *Shock and Vibration*, Vol. 7, No. 3, pp. 167~177.
- (6) Diehl, T., 2008, "Integrating Theory, Experiment, and FEA to Solve Challenging Nonlinear Mechanics



(a) Floor response spectrum for various drop height



(b) Envelope floor response spectrum(FRS) and ground response spectrum(GRS)

Fig. 7 Floor response spectra

- Problems,” *2008 Abaqus Users’ Conference*, pp. 1~17.
- (7) Varpasuo, P., 1999, "Development of the Floor Response Spectra Using Large 3D Model." *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 192, No. 2, pp. 229~241.
- (8) Paskalov, A. and Reese, S., 2003, "Deterministic and Probabilistic Floor Response Spectra," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 23, No.7, pp. 605~618.
- (9) Park, M. S., 2007, "Assessment of Floor Response Spectrum by Parametric Error Estimation and Its Application to a Spring-Mounted Reactor Vessel Assembly," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, No.12, pp. 2091~2100.
- (10) DOD, 1989, MIL-STD-810F, *Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests*, USA.
- (11) IEC, 2008, *Environmental Testing Part 2-27: Shock*.
- (12) Abu Al-Rub, R. K. and Voyiadjis, G. Z., 2004, "Analytical and Experimental Determination of the Material Intrinsic Length Scale of Strain Gradient Plasticity Theory from Micro- and Nano-Indentation Experiments,” *International Journal of Plasticity*, Vol. 20, No. 6, pp. 1139~1182.
- (13) Guo, Y., Huang, Y., Gao, H., Zhuang, Z. and Hwang, K. C., 2001, "Taylor-Based Nonlocal Theory of Plasticity: Numerical Studies of the Micro-Indentation Experiments and Crack Tip Fields,” *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, No.42-43, pp. 7447~7460.
- (14) Dassault Systèmes Simulia, Inc., 2010, Abaqus v. 6.9, Providence, U.S.A.
- (15) Kang, B. S. and Park, M. S., 2010, "A Protector Design and Shock Analysis for a Launch Reconnaissance Robot,” *Proceedings of the KSME 2010 Fall Annual Meeting*, Jeju, Korea, pp. 1061~1064.
- (16) Parametric Technology Corporation, Inc., 2010, Mathcad R14, Massachusetts, U.S.A.