

설계자 전용 HDD 진동/충격해석 프로그램 개발 Development of HDD Vibration/Shock Simulation Tool for Design Engineers

김진곤 · 이재곤
J. G. Kim and J. K. Lee

(접수일 : 2009년 6월 29일, 수정일 : 2009년 8월 11일, 채택확정 : 2009년 9월 10일)

Key Words : Hard Disk Drive(하드디스크드라이브), Vibration/Shock Simulation(진동/충격해석), Parametric Modeling(매개변수모델링), ANSYS APDL, Tcl/Tk, LS-DYNA3D

Abstract : Recently, the shock resistance and dynamic characteristics of hard disk drives have become more important due to their highly increased storage density and miniaturization. In this study, we have developed an ANSYS/Mechanical/LS-DYNA based HDD vibration/shock simulation tool for design engineers. This simulation tool using ANSYS APDL can produce a parametric finite element modeling of HDD automatically and has GUI-based applications using the script program language Tcl/Tk. In the present tool, we adopt the reliable methodology of vibration/shock simulation, which is experimentally verified. It is expected that this simulation tool can make the repetitive computational efforts for the shock-proof design of HDD drastically reduced.

1. 서 론

최근 디지털 멀티미디어 분야가 급속히 발달하면서 이에 따른 대용량 미디어 파일 저장을 위한 저장매체 역시 빠르게 대용량화/고속화되고 있다. 현재 사용되고 있는 다양한 저장매체 중에서도 가격, 품질, 성능과 신뢰성 측면에서 HDD(Hard Disk Drive)의 경쟁력이 월등한 것으로 인정받고 있다. 하지만 HDD는 연간 100% 이상의 급격한 기록 밀도 증가 및 이에 따른 높은 속도의 디스크 회전으로 인해 진동 및 충격에 대한 높아지는 신뢰성 수준을 만족시켜야 하는 과제를 안고 있다.

HDD가 받는 치명적인 충격 입력은 대략 0.2~0.5 ms 정도의 짧은 시간동안의 충격에 의해 일어난다. 이러한 충격으로 인해 헤드가 충격하중을 받아 디스크 면으로부터 도약한 후 다시 디스크와 헤드-슬랩(head slap)되면서 디스크 면에 손상이 발생하여 HDD의 치명적인 오동작을 일으킬 수 있다^{1,2)}. 기존의 충격현상에 대한 연구는 헤드의 충돌 현상 및 방

지에 대한 연구로서 주로 헤드의 충돌을 방지하기 위한 헤드-서스펜션 어셈블리(HSA)의 거동 및 설계와 관련된 내용이었다. 이와 더불어, 최근에는 수치적 해석에 의한 충격 현상을 규명하고 방지하는 연구들도 진행되고 있다³⁻⁶⁾. 최근 급격하게 높아지는 설계 수준을 고려할 때, HDD의 내충격성 향상을 위해서는 전체 부품들을 완전히 포함한 상태에서 충격에 대한 헤드와 디스크의 정확한 거동을 살펴보는 것이 매우 중요할 것이다. 이를 위해서는 LS-DYNA3D와 같은 비선형 동적해석을 수행할 수 있는 상용 소프트웨어를 이용해서 충격해석을 수행하는 것이 가장 효과적인 방법 중 하나이다. 하지만, HDD의 유한요소모델링과 충격해석은 이러한 분야에서 오랜 경험을 가진 해석 전문가에게도 상당한 시간이 소요되는 작업이기 때문에, 현장의 설계 엔지니어가 실제 설계작업에서 이러한 충격해석결과를 활용하는 것은 현실적으로 매우 어려운 상황이다.

본 연구에서는, 유한요소모델링 및 진동/충격해석과 관련된 전문적인 지식이나 경험이 없는 설계 엔지니어도 실제 제품설계 시 손쉽게 활용할 수 있는 ANSYS/Mechanical/LS-DYNA 기반의 HDD 전용 진동/충격해석 프로그램을 개발하고 그 결과를 소개하고자 한다. 전체적인 작업 중 가장 오랜 시간이

김진곤(책임저자) : 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부
E-mail : kimjg1@cu.ac.kr, Tel : 053-850-2711
이재곤 : 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

소요되는 HDD의 유한요소모델링은 각 부품들의 주요 형상변수들을 매개변수화 하여 설계자가 원하는 값을 입력하면 자동으로 유한요소모델링 및 부품간 결합이 되도록 하였다. 이를 위하여 ANSYS APDL(ANSYS Parametric Design Language)을 이용한 프로그램을 구성하여 전 작업을 자동화시켰다. 해석은 실제 충격실험과 동일한 가장 기본적인 해석조건만 사용자가 입력하면, 원하는 해석결과를 자동으로 확인할 수 있도록 스크립트 언어인 Tcl/Tk를 이용하여 GUI(Graphic User Interface) 기반의 프로그램을 구성하였다. 신뢰성 있는 충격해석 결과를 얻기 위해서, 실험결과와 비교를 통해 검증된 충격해석 조건들이 프로그램 내부적으로 자동으로 설정되도록 하였다. 개발된 소프트웨어는 특히 주요 형상 변수에 대해서 반복적인 해석을 수행할 때 더욱 효과적으로 활용할 수 있기 때문에, 제품의 내충격성 향상 및 제품개발 기간 단축에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 진동/충격 해석조건 및 절차

본 연구에서는 상용 소프트웨어인 ANSYS를 기반으로 Fig. 1과 같은 전처리/해석/후처리 과정을 가지는 HDD 전용 진동/충격해석 툴을 개발하였다. ANSYS는 가장 많은 사용자를 확보하고 있는 대표적인 상용 유한요소해석 프로그램이며, ANSYS APDL을 이용하여 사용자가 변수를 정의할 수 있게 함으로써 다양한 경우 매우 유연한 작업을 가능하게 하는 장점을 가지고 있다. ANSYS/LS-DYNA는 ANSYS가 내연적 해법(Implicite solver)이기 때문에 비선형성이 강한 동적 구조문제 해석에 대해 가지는 약점을 보완하기 위해 추가된 외연적 해법(Explicit solver)이다. ANSYS/LS-DYNA는 LSTC(Livemore Software Technology Corp.)사에서 개발된 LS-DYNA3D Solver를 100% 제공하고 해석의 전/후처리는 ANSYS Pre/Post를 사용하기 때문에 입력 문자와 명령어는 표준 ANSYS와 일치하여, ANSYS와 연동된 내연적-외연적 결합(Implicit-to-Explicit Sequential) 해석기법을 편리하게 적용할 수 있는 장점을 가진다.

충격해석 조건은 비작동중인 경우로 국한하였으며, Fig. 2와 같은 실제 충격시험 시 HDD가 받게되는 반정현파(half-sine)형태의 충격 가속도를 가하였다. 계산시간을 절약하기 위해 해당 높이에서 자

유낙하 하였을 때의 속도를 제품에 초기속도로 부여하였다. 초기속도는 에너지 보존의 법칙에 의하여 아래와 같이 구하여진다.

$$v_0 = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

접촉 타입에 따른 해석 결과의 차이는 관심영역이 충격 후 몇 번 되튐 후가 아니면 결과에 큰 영향이 없으며, 외연적 해법에서는 접촉처리에 소요되는 계산시간이 전체 계산시간에서 차지하는 비중이 낮으므로 각 부품간의 접촉은 “자동 면접촉(automatic single surface)” 타입을 이용하여 자동적으로 처리되도록 하였다. 해석 시 시간 간격의 크기는 가장 작은 요소에 대해 Courant-Friedrichs-Levy 조건에 의해 설정된다. 따라서, 제품의 상세 모델링으로 인하여 불가피하게 사용되어지는 매우 작은 요소로 인한 해석시간의 증가로 인하여 반복적인 해석작업이 어려워지는 문제는, 아래 식 (2)의 질량보정(mass-scaling) 방법을 이용하여 매우 작은 요소들의 질량을 적절하게 조정함으로써 적분 시간 간격을 변경시킬 수 있다.

$$\left(\frac{\Delta t_{specified}}{l_i}\right)^2 = \frac{(1-\nu^2)\rho_i}{E}$$

$$\Delta t_{specified} = \sqrt{\frac{\rho_i l_i^2 (1-\nu^2)}{E}} \quad \text{for element } i \quad (2)$$

위 식에서, ρ_i 는 요소의 질량밀도, E 는 탄성계수, ν 는 프와송비를 나타내며 l_i 는 요소의 특성길이(characteristic length)를 나타낸다. 본 해석모델의 경우 가장 작은 요소에 대한 초기해석 시간 간격이 0.22×10^{-4} 겐 간 나왔지만, 질량보정을 통해 시간간격을 0.37×10^{-4} 겐 로 늘리면 제품에 추가되는 질량은 0.0012% 정도로 무시할 수준이지만 해석시간은 약 40% 이상 감소시킬 수 있었다.

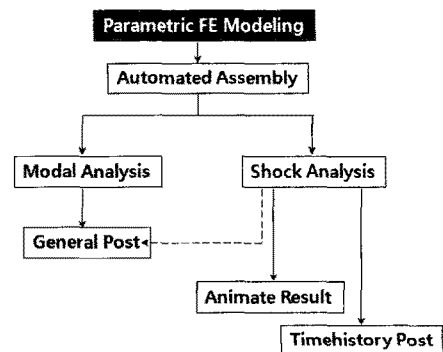


Fig. 1 Vibration/shock simulation procedure

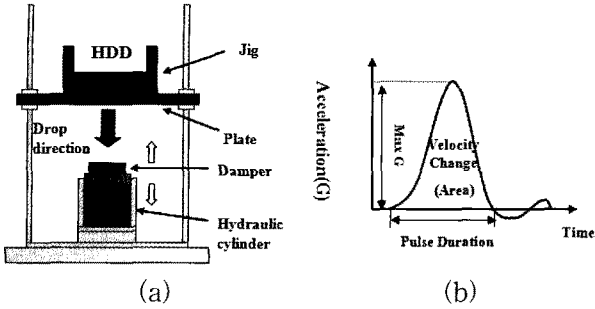


Fig. 2 Shock test: (a) test configuration and (b) half-sine shock acceleration

3. HDD 전용 진동/충격 해석 툴 구성

Fig. 3은 ANSYS/Mechanical/LS-DYNA를 기반으로 만든 HDD 전용 진동/충격해석 프로그램의 초기 메인 창을 보여주고 있다. 모든 작업과정에 사용자가 손쉽게 사용할 수 있도록 프로그래밍 언어인 Tcl/Tk(Tool Command Language/Tool Kit)를 이용하여 GUI 기반의 사용환경을 적용하였다. 메인 창에서는 HDD의 진동/충격해석을 위한 전처리/해석/후처리 과정을 선택할 수 있다.

Fig. 4는 해석을 위한 전처리 과정인 각 부품들의 유한요소모델링 작업 창을 보여주고 있다. HDD 각 부품들의 크기 및 위치 등을 정의하는 주요 형상 변수들간에 가지는 기하학적인 상호관계를 모두 식으로 구성한 후, ANSYS APDL을 이용하여 자동으로 유한요소모델링 작업이 수행되게 프로그램을 구성하였다. 따라서, 설계자가 변경하고자 하는 각 부품의 형상 변수값만 입력하면 연동된 부품들의 형상도 자동적으로 변경되어 유한요소모델링이 구성되게 하였다.

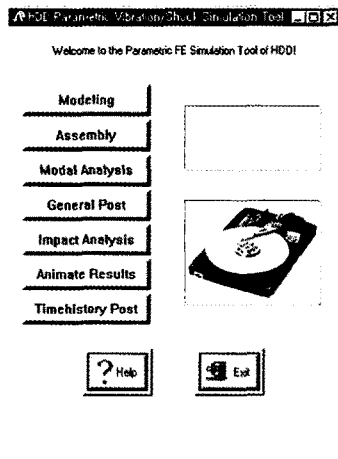


Fig. 3 Main window

Fig. 5는 입력된 변수에 대하여 유한요소모델링된 부품들을 볼 수 있는 작업창의 기능을 보여주고 있다. Fig. 6과 7은 각각 본 프로그램을 이용하여 자동으로 생성한 HDD 하부와 커버를 구성하는 각 부품들의 유한요소모델링을 보여주고 있으며, 이 경우 사용된 요소의 개수는 약 38000개 이상이다.

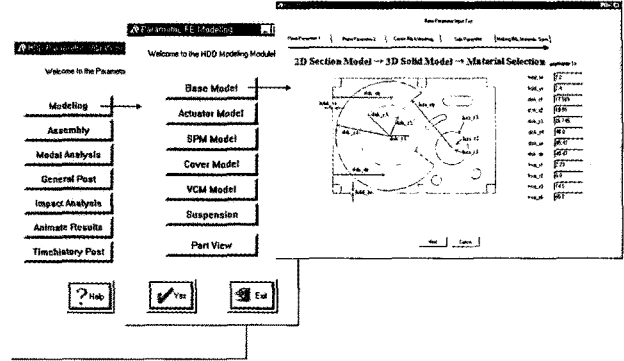


Fig. 4 Parametric FE modeling of parts

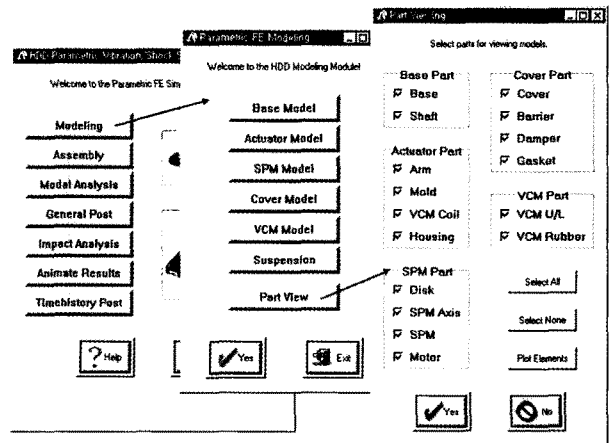


Fig. 5 Part viewing

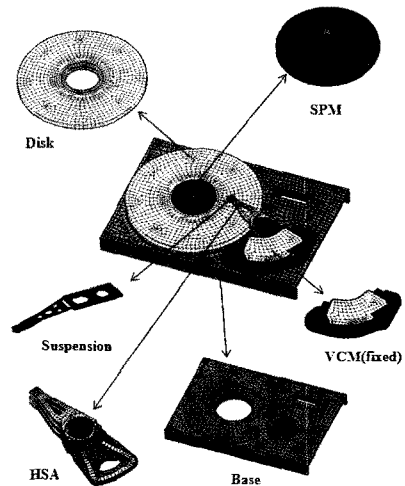


Fig. 6 Finite element modeling of base parts

Fig. 8은 충격해석을 위해 유한요소모델링된 각 부품들을 사용자가 원하는 수준까지 자동으로 어셈블리 해주는 기능을 보여주고 있다. 결합된 HDD의 하부 및 전체는 각각 basefull.db와 full.db로 자동으로 저장되어진다.

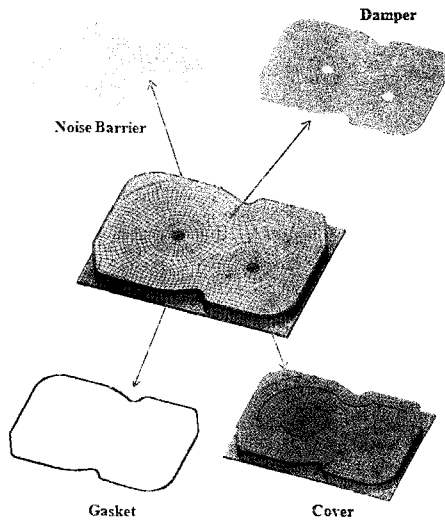


Fig. 7 Finite element modeling of cover parts

Fig. 9는 유한요소모델링 된 부품별 또는 몇 가지 단계별로 부품들이 결합된 상태의 어셈블리에 대해서 진동특성을 분석할 수 있는 기능을 보여주고 있다. Fig. 10은 이러한 진동해석기능을 이용하여 Block Lanczos 법으로 구한 HSA(Head Stack Assembly)의 진동모드를 사용자가 손쉽게 확인할 수 있는 프로그램의 후처리 기능을 보여주고 있다.

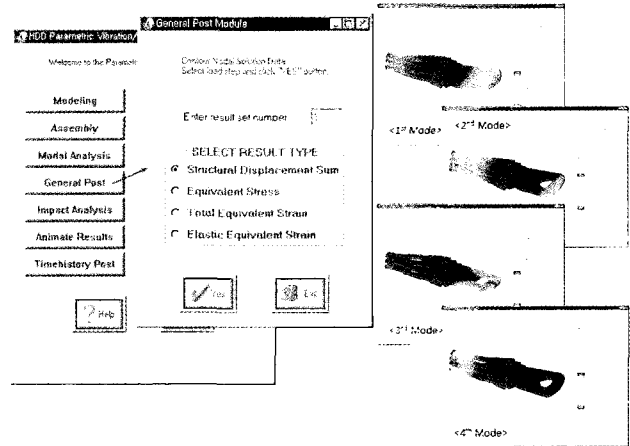


Fig. 10 General postprocessing

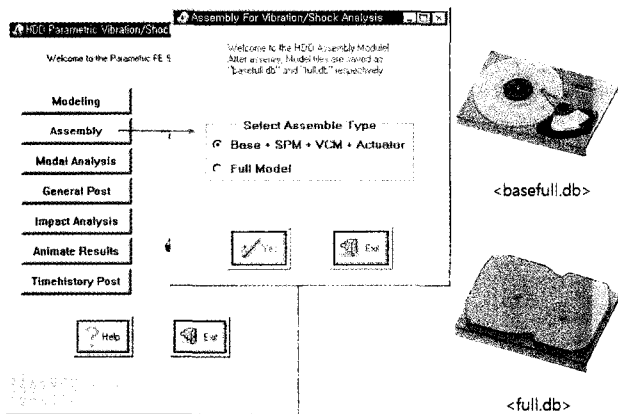


Fig. 8 Part assembly

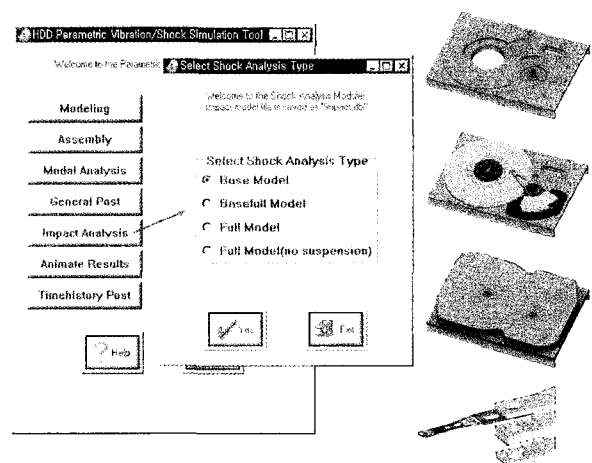


Fig. 11 Drop-impact analysis

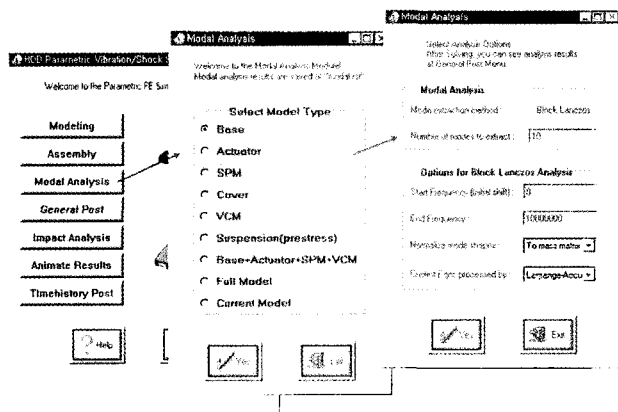


Fig. 9 Modal analysis

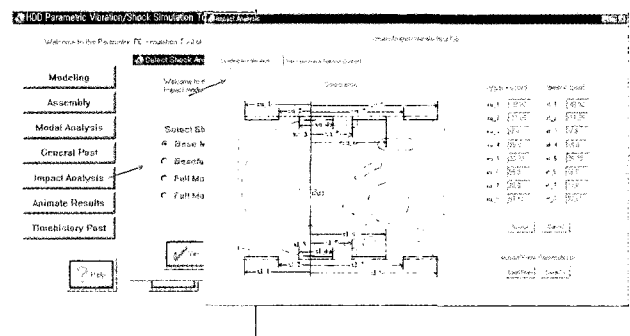


Fig. 12 Drop-impact analysis: Define loading acceleration data

Fig. 11은 마지막으로 충격해석기능을 보여주는 그림이다. 그림에서와 같이 네 가지 수준의 어셈블리들에 대한 충격해석을 수행할 수 있다. 특히, Fig. 12와 같이 충격실험 시 충격가속도가 전달되는 HDD의 지그 고정 부위를 자유롭게 지정할 수 있도록 하였다. Fig. 13은 충격해석에 필요한 충격가속도 프로파일, 초기속도 및 질량보정 등의 기본적인 해석조건을 설정할 수 있는 기능을 보여주고 있다. 이와 더불어, 보다 정확한 충격거동을 살펴보기 위하여 그림 13에서와 같이 ANSYS의 내연적-외연적 결합 해석기능을 이용하여 서스펜션의 굽힘 변형에 의한 초기응력상태를 포함시켜 해석할 수 있도록 하였다. Fig. 14와 15는 설정된 충격해석조건 하에서 구한 HDD의 충격해석결과를 손쉽게 선택하여 볼 수 있는 후처리 기능을 보여준다. 그림에 있는 결과들은 시간에 대한 특정 관심 부위에서의 가속도 변화나 또는 수치해석결과와 신뢰성을 판별할 수 있는 아워클래스 에너지(hourglass energy) 및 내부변형에너지 등의 변화를 살펴본 예를 보여주고 있다.

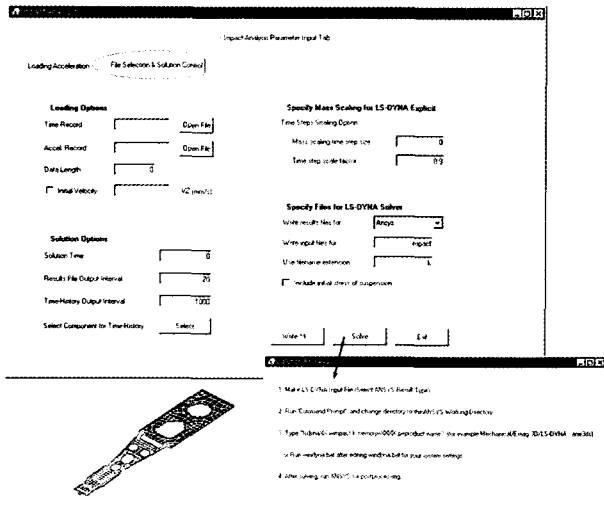


Fig. 13 Drop-impact analysis: Loading conditions and initial stress of suspension

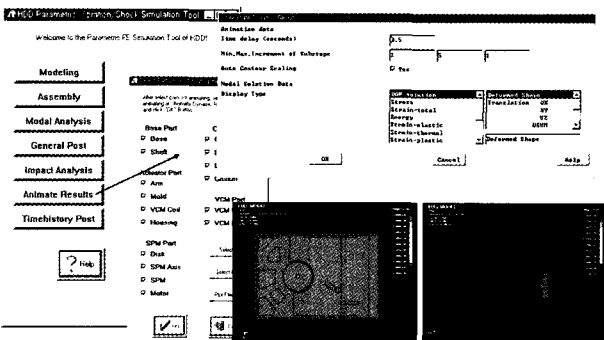


Fig. 14 Animating results

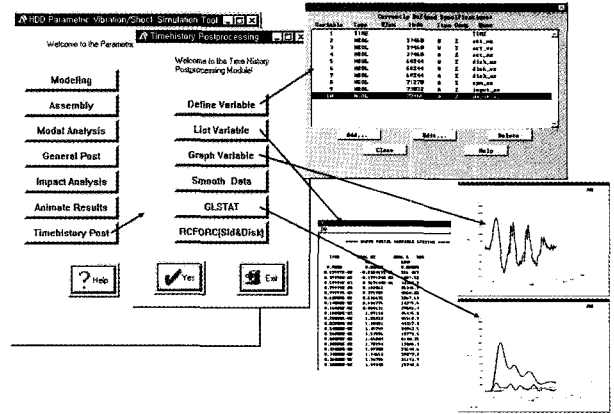


Fig. 15 Timehistory postprocessing

4. 해석결과 및 검증

본 절에서는 실제 실험결과와의 비교를 통해 개발한 HDD 전용 진동/충격해석 툴을 이용하여 구한 해석결과와 신뢰성을 살펴보았다. 먼저, Fig. 16과 같이 진동실험을 수행하여 얻은 HDD 하부 판의 진동모드 들은 Fig. 17과 같다. 이 때, 실험과 해석으로부터 구한 고유진동수들을 Table 1에 비교하였다. 비교결과 4번째 진동모드까지 해석치가 실험치와 최대 2 % 내외의 오차만을 나타냄을 알 수 있다. 이러한 실험결과와의 비교를 통해 진동해석 결과의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

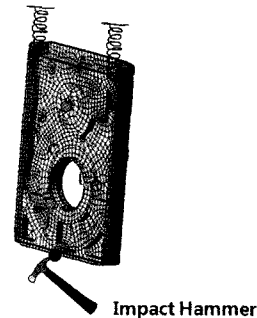


Fig. 16 Schematic diagram of modal test

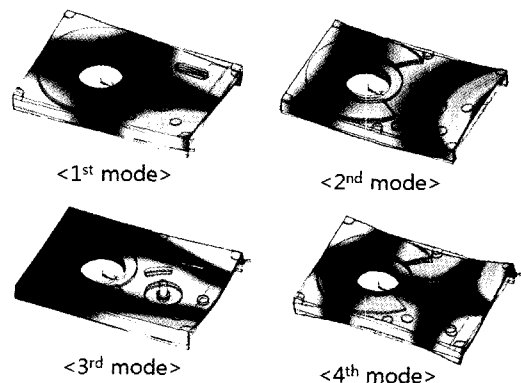


Fig. 17 Mode shapes of base plate

다음으로 Fig. 18과 같은 0.5 ms동안 지속되는 200 G크기의 반정현파 충격가속도를 가한 충격실험으로부터 충격이 전달되는 하부판의 피봇에서 측정된 충격에 대한 응답을 비교하였다. 모든 부품들이 결합된 상태의 전체 모델의 충격해석치들을 실험치와 비교한 결과, Fig. 19와 같이 두 값들의 크기와 위상들이 상당히 유사함을 확인할 수 있다.

Table 1 Natural frequencies obtained from modal test and shock simulation (unit: Hz)

Mode	Experiment	Tool	Error (%)
1st	1,080	1,061	1.77
2nd	1,656	1,680	1.47
3rd	2,224	2,225	0.04
4th	3,256	3,186	2.16

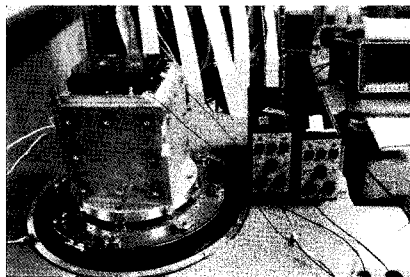


Fig. 18 Experimental equipments for shock test(200G/0.5ms)

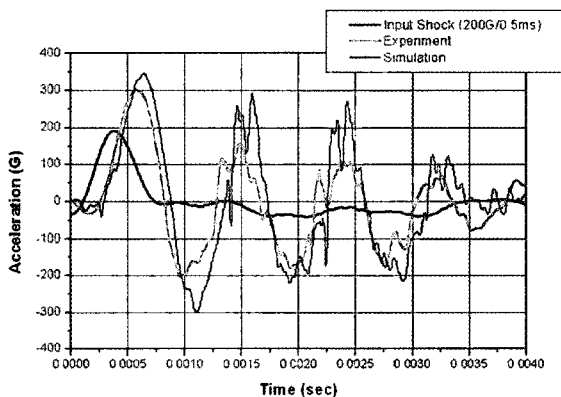


Fig. 19 Comparison of pivot acceleration on the base of a full model

5. 결 론

본 연구의 목적은, 제품의 실제 설계자가 필요 시 유한요소해석을 직접 수행하여 그 결과를 제품 설계에 활용하여 가장 큰 효과를 얻도록 하는데 있다.

이를 위하여 유한요소모델링 및 진동/충격해석과 관련된 지식이나 경험이 없는 설계자도 손쉽게 직접 활용할 수 있는 ANSYS/Mechanical/LS-DYNA 기반의 HDD 전용 진동/충격해석 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램에서는 ANSYS APDL (ANSYS Parametric Design Language)과 스크립트 언어인 Tcl/Tk를 이용하여 GUI 기반의 프로그램을 구성하였다. 이를 통하여 기존에 많은 시간이 걸리던 작업들을 대부분 자동으로 수행할 수 있게 함으로써, 유한요소모델링 및 해석에 소요되던 시간을 크게 단축시킬 수 있었다. 실험결과와의 비교를 통하여 개발된 프로그램에서 사용된 유한요소모델링과 해석조건들의 타당성을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 개발된 소프트웨어를 사용할 경우, HDD의 충격해석 결과를 얻기위해 관련 해석경험이 없는 비전문가의 경우 기존에 교육 및 작업에 약 12주 정도 소요되던 시간이 약 일주일 내로 단축되는 효과를 얻을 수 있었다. 개발된 프로그램은 특히 주요 형상 변수에 대해서 반복적인 해석을 수행할 때 매우 효율적으로 활용할 수 있기 때문에, 제품의 내충격성 향상 및 제품개발 기간 단축에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. K. Marek, P. Carlson and R. Resh, 1995, "Why Head Suspension Need Shock Treatment", Data Storage, Vol. 2, pp. 51~56.
2. T. Kouhei, T. Yamada and K. Aruga, 1995, "A Study of Head-Disk Interface Shock Resistance", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 31, pp. 3006~3008.
3. 손진승 외 4인, 2001, "내충격성 향상을 위한 HDD Actuator의 거동연구", 한국소음진동공학회 논문집, 제11권, 제3호, pp. 449~454.
4. 장영배 외 4인, 2004, "하드디스크 드라이브의 회전속도 변화에 따른 디스크와 헤드의 충격해석", 한국소음진동공학회논문집, 제14권, 제11호, pp. 1075~1082.
5. 김진곤, 이준영, 이신영, 2001, "휴대용 단말기의 낙하충격해석 및 실험적 검증", 대한기계학회 논문집, 제25권, 제4호, pp. 695~702.
6. 김진곤, 김정윤, 김홍수, 2009, "낙하충격해석을 통한 전자렌지의 내충격설계", 한국동력기계공학 회지, 제13권, 제3호, pp. 53~58.