

하드디스크 드라이브의 충격해석 및 실험적 검증

김진곤^{1*}, 이재곤¹

¹대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

Shock Simulation and Experimental Verification of HDD

Jin-Gon Kim^{1*} and Jae-Kon Lee¹

¹School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu

요약 본 논문에서는 반정현파 형태의 충격을 받는 HDD에 대한 충격해석을 수행하고, 그 타당성을 실험적으로 검증하였다. 일반적으로 센서를 이용한 제품의 충격실험을 통해서만 제한적인 정보만을 얻을 수 있지만, 컴퓨터를 이용한 해석기술은 제품의 파손현상을 규명하는데 필요한 보다 광범위하고 상세한 정보를 제공할 수 있는 장점을 가진다. 하지만, 이러한 해석결과는 여러 요인들에 따라 매우 민감하기 때문에 그 타당성을 검증하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 200G/1ms의 전자기 충격실험과 300G/2ms의 낙하충격실험을 통하여 HDD의 조립단계별로 LS-DYNA를 이용한 유한요소해석의 신뢰성을 검증하였다.

Abstract This study deals with the shock response analysis of HDD subjected to a half-sine shock pulse and its experimental verification. Comparatively, accurate computer simulation allows designers to determine complete mechanical information during the product impact time period, compared with only segmental messages by sensors in a test, to predict potential failures. But, impact/shock simulation technology is rather sensitive to various factors to predict the shock behavior without validation. In our shock simulation, the methodology of analysis with LS-DYNA3D and test validation is adopted to predict the shock behavior of HDD. We can confirm the soundness of the present shock simulation through the comparison with electromagnetic shock test(200G/1ms) and linear drop test(300G/2ms).

Key Words : Hard Disk Drive, Shock Simulation, Shock Test, Finite Element Analysis, LS-DYNA

1. 서론

정보화 산업에서 가장 중요한 요소 중의 하나인 고성능 컴퓨터는 대용량의 정보저장과 고속의 정보 입출력이 가능한 정보저장기기를 필요로 한다. 현재 사용되고 있는 다양한 정보저장기기는 SRAM, DRAM, flash memory 등과 같은 반도체 메모리와 자기를 이용한 하드 디스크, 테이프 그리고 광자기 디스크 등이 있다. 이 중에서도 가격, 품질, 성능과 신뢰성 측면에서 HDD(Hard Disk Drive)를 능가하는 기억장치는 아직까지 없다. 하지만 HDD의 급격한 기록 밀도 증가 및 이에 따른 높은 속도의 디스크 회전으로 인해 진동 및 충격에 대한 신뢰성 수준은 계속 높아지고 있어 설계자들에게 큰 어려움을 주

고 있다.

최근 높은 성능의 HDD가 비작동 중에 받는 치명적인 충격 입력은 대략 0.2~0.5 ms 정도의 짧은 시간동안의 충격에 의해 일어나는 것으로 알려져 있다. 이때 HDD가 손상을 입는 파괴 메커니즘은 헤드-슬랩(head-slap)과 관련되어 있으며, 이는 충격을 받은 서스펜션 끝단의 헤드가 디스크로부터 lift-off하고 나서 디스크와 충돌하는 현상을 말한다. 이러한 충격에 의해서 헤드의 균열(crack) 및 파편 조각으로 인한 기록/재생 시에 HDD에 치명적인 오동작이 발생할 수 있다. 따라서 대부분의 업체들은 150-400G의 충격치와 0.5-2ms의 짧은 충격전달시간동안 견딜 수 있는 제품 개발을 위해 충격현상을 규명하고, 이를 예측할 수 있는 해석모델을 개발하는 연구를 활발히

*교신저자 : 김진곤(kimjg1@cu.ac.kr)

접수일 09년 07월 28일

수정일 09년 09월 30일

게재확정일 09년 10월 14일

수행하고 있다[1-3]. 하지만, 전체 HDD 구조에 대한 이론적인 해석모델이나 실험을 통한 충격현상을 정확하게 고찰하는 것은 매우 어렵기 때문에, 유한요소해석과 같은 수치해석을 통하여 충격현상을 연구하려는 접근도 진행 중이다[4-5]. 하지만, 다른 전자제품들과는 달리 완제품 단계의 HDD에 대한 유한요소해석을 통한 충격해석을 수행한 연구는 찾아보기 힘든 실정이다[6-7].

본 연구에서는 lift-off 현상에 의한 HDD 손상예방을 위한 신뢰성있는 충격해석기술 확보를 위해서 부품들이 결합된 단계별로 제품의 충격해석을 수행하고 해석결과를 실험적으로 검증하고자 하였다. 충격해석은 비선형 동적거동해석에 탁월한 기능을 제공하고 있는 범용 유한요소 프로그램인 LS-DYNA를 사용하여 수행하였다. 실험은 먼저 충격해머(impact hammer)를 이용한 각 부품별 진동실험을 수행하여 부품별로 유한요소해석모델의 타당성을 검증하였다. 다음으로, 0.5ms동안 200G의 충격을 가하는 전자기 충격실험(electromagnetic shock test) 및 2ms동안 350G의 충격을 가하는 낙하충격실험(linear drop test)들을 각 부품들이 결합된 완제품에 대해서 수행하여 해석결과와 비교하였다. 해석결과와 충격실험결과들의 비교를 통하여, 본 연구에서 정립한 HDD 충격해석 기법의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 이러한 충격해석의 신뢰성을 높이는 연구가 꾸준히 진행된다면, HDD의 충격현상을 물리적으로 정확하게 규명하고 내충격성을 향상시키는데 크게 기여할 것으로 기대된다.

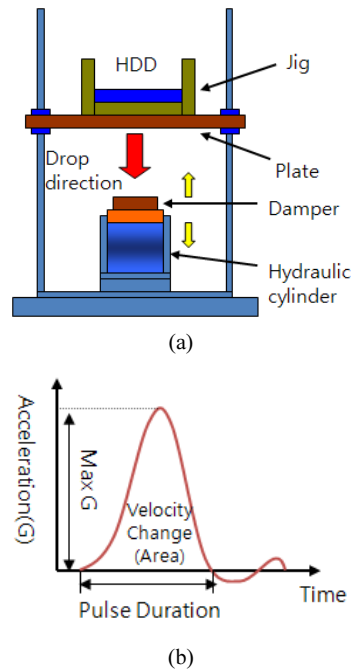
2. 유한요소모델링 및 해석조건

본 연구에서는 충돌, 충격 기타 접촉문제 등의 비선형 동적해석에 가장 탁월한 기능을 제공하는 LS-DYNA3D를 사용하여 충격해석을 수행하였다. 충격해머와 전자기 충격발생기를 이용한 충격실험 및 그림 1과 같은 낙하충격시험에서 HDD가 받게 되는 반정현파(half-sine)형태의 충격 가속도를 초기 충격조건으로 제품에 부가하였다. 낙하충격해석에서는 계산시간을 절약하기 위해 해당 높이에서 자유낙하 하였을 때의 속도를 에너지보존법칙에 의하여 아래와 같이 구하여 제품에 초기속도로 부여하였다.

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

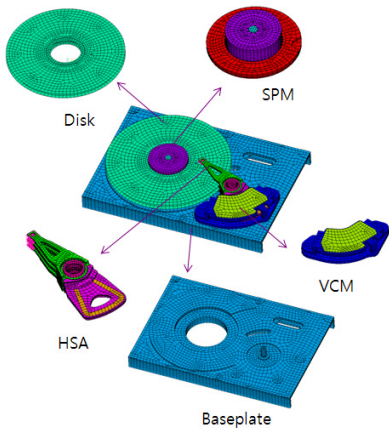
밀판(baseplate)과 SPM(Spindle Motor)의 3군데 및 VCM(Voice Coil Motor)의 2군데 나사체결 부위는 결합 접촉(tied contact)조건을 부여하고 나머지 접촉 부위들은

모두 면접촉(surface contact) 조건을 사용하였다. VCM을 구성하는 위와 아래 부분도 결합접촉조건을 사용하였다. 이외에도, 커버와 방음벽(noise barrier), 커버와 댐퍼 그리고 커버와 밀판의 나사 체결부위들은 전부 결합접촉조건을 적용하였다. 나머지 접촉 가능 부위들은 모두 면접촉 조건을 사용하였다.

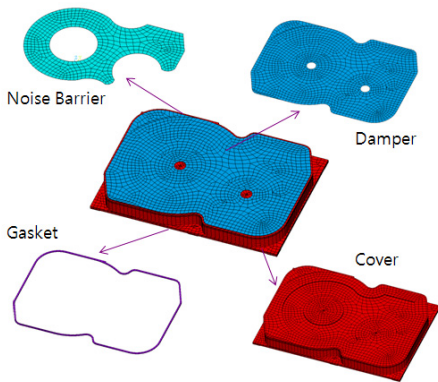


[그림 1] 낙하충격실험: (a)실험장치 (b)반정현파충격가속도

그림 2와 3의 유한요소모델링에서 사용된 요소는 커버, 밀판, HSA(Head Stack Assembly), VCM, SPM 등은 솔리드요소(solid element), 방음벽과 댐퍼 같은 나머지 부품들은 셸요소(shell element)를 그리고 스피들모터에 사용되는 유체베어링의 강성을 표현하기 위하여 스프링 요소(spring element)를 이용하였다. 부품들이 모두 결합된 전체 모델에는 총 37000여개의 요소들이 사용되었다. 표 1은 해석에 사용된 재료들의 기계적 물성을 보여주고 있다. 개스킷에 사용되는 고무는 실험치는 230MPa이었지만, 조립 시 고무의 압축으로 인한 강성이 증가하는 현상을 고려하여 해석에서는 실험과의 보정을 통해서 2.3GPa를 사용하였다.



[그림 2] HDD 하부 본체를 구성하는 각 부품



[그림 3] HDD 커버를 구성하는 각 부품

[표 1] 재료의 기계적 성질

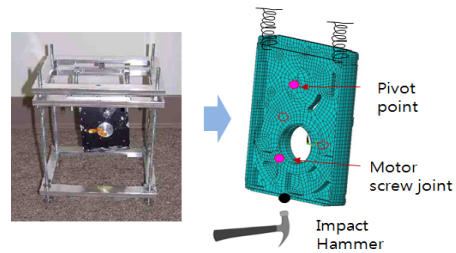
Material	Density [kg/m ³]	Elastic Modulus [GPa]	Poisson's Ratio
Steel	7800-8080	150-210	0.28-0.3
Al	2560-3430	68.6-72	0.33-0.35
Rubber	1100	2.3	0.4
Vectra(Mold)	1620	18	0.4
Cu(Coil)	6130	47.8	0.3

3. 충격해석 및 correlation

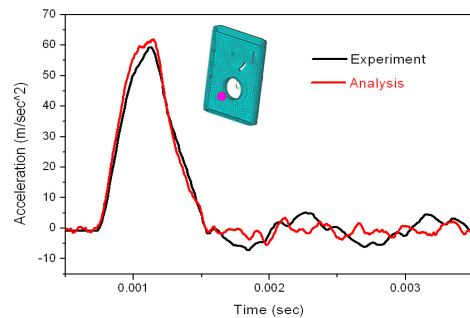
유한요소모델링의 보정을 통한 신뢰성 확보를 위해서 먼저, 그림 4와 같이 충격해머를 이용하여 밀판, 부품들이 결합된 상태의 밀판 및 커버에 대한 충격실험을 순차적으로 수행하여 각 부품들의 조립단계별로 해석결과를

비교하였다. 충격해머의 머리부에 의해 제품에 그림 1(b)와 같은 정현파 형태의 충격력이 가해지며, 제품의 충격에 대한 응답은 그림 4와 같이 각각 헤드와 디스크로 충격파가 전해지는 피봇점(pivot point)과 모터의 나사체결위치(motor screw joint)에서 충격에 의한 응답을 측정하였다.

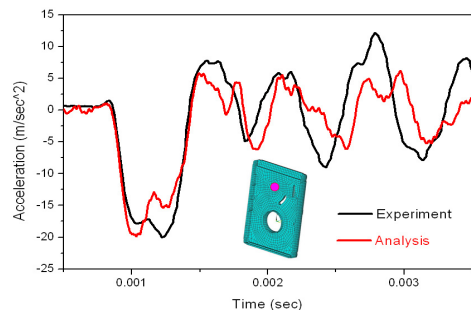
그림 5와 6은 각각 밀판의 모터 나사체결위치와 피봇점에서 측정한 충격가속도 응답을 해석결과와 비교한 그림들이다. 두 위치에서 비교한 가속도 응답 모두 실험치와 해석치가 매우 정확하게 일치함을 확인할 수 있다. 또한, 그림 7에서와 같이 밀판의 고유진동수 또한 실험치와 해석치의 유사성으로부터 밀판의 유한요소모델링에 대한 신뢰성을 확인할 수 있었다.



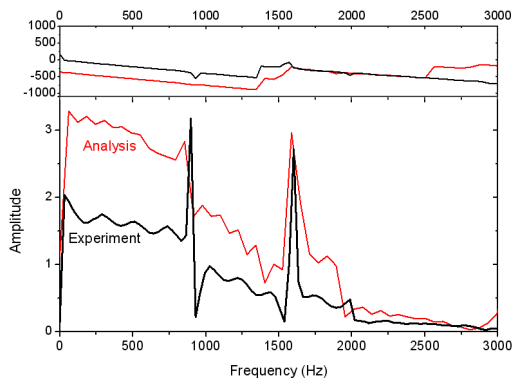
[그림 4] 충격실험장치 구성 및 가속도측정위치



[그림 5] 하부 모터 나사체결위치의 충격가속도



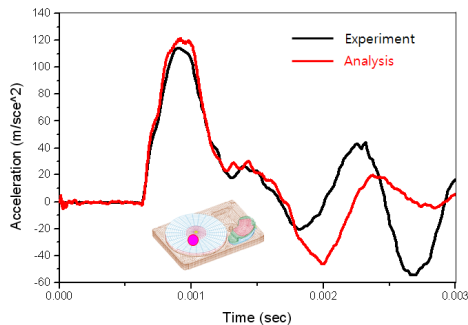
[그림 6] 하부 피봇점의 충격가속도



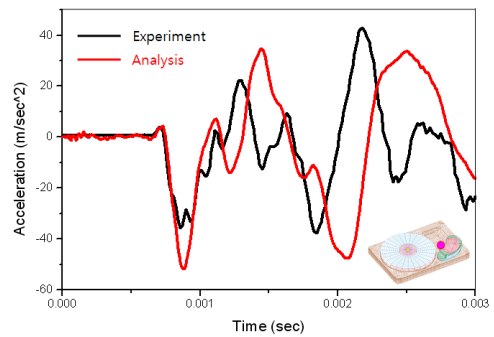
[그림 7] 하부 모터 나사체결위치의 주파수응답함수

다음으로, 그림 8과 9에서 각 부품들이 결합된 상태의 밑판에 대해 그림 4의 충격실험을 수행하여 얻은 결과를 유한요소해석결과와 비교하였다. 그림 8에서 부품이 체결된 밑판의 모터 체결위치에서 발생하는 최대 가속도의 크기가 실험치와 상당히 유사함을 알 수 있다. 부품들이 체결된 경우 충격이 가해지고 2ms 지난 후에는 다소 오차가 커지는 경향을 나타내지만, 전체적으로는 해석과 실험결과가 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

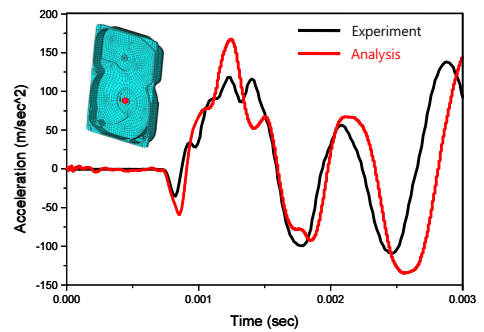
그림 10과 11은 커버에 대해서 수행한 충격시험결과와 해석결과를 비교한 그림들이다. 전체적으로 비슷한 가속도 양상을 나타내고 있으며, 밑판과 마찬가지로 피봇 위치에서 약간 오차가 더 커지는 경향을 보였다. 모터 나사체결위치에서 최대가속도의 크기가 해석치가 실험치보다 다소 크게 나오는데, 이는 커버에 사용되는 고무의 압축에 의한 물성의 비선형 변화나 감쇠 등을 정확하게 해석 시 고려하는 것이 어렵기 때문인 것으로 판단된다.



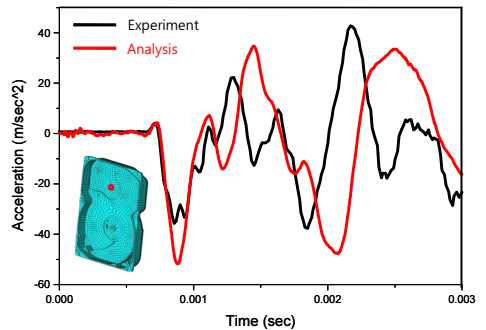
[그림 8] 조립된 하부 모터 나사체결위치의 충격가속도



[그림 9] 조립된 하부 피봇점의 충격가속도



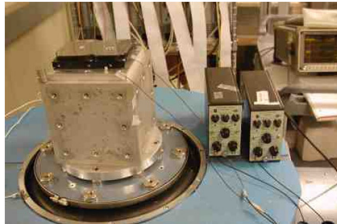
[그림 10] 커버 모터 나사체결위치의 충격가속도



[그림 11] 커버 피봇점의 충격가속도

다음으로 완제품에 대하여 그림 12와 같은 두 가지 충격실험들을 수행한 후 해석결과와 비교하였다. 그림 13은 전자기 충격발생기를 이용하여 200G의 크기와 0.5ms의 지속시간을 갖는 반정현파 충격을 가한 경우, 모터 체결위치에서 측정된 충격 가속도의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다. 해석치가 실험치보다 발생하는 가속도가 다소 크게 나오지만, 전체적인 가속도 경향은 매우 유사하게 나타났다. 그림 14는 낙하충격실험을 통해 2ms동안 350G 크기의 반정현파 충격을 가한 경우, 피봇점에서 발

생하는 충격 가속도를 보여주고 있다. 그림 15는 충격 시 HSA의 압과 디스크 사이의 충격거동을 보여주고 있다. 서스펜션까지를 모델링하여, 굽힘변형에 의한 예측중 효과를 고려하여 상세한 충격해석을 수행하면 lift-off 현상에 의한 디스크 손상 유무를 보다 정확하게 판단하는데 도움이 될 것으로 보여 진다. 이상의 비교결과들로부터 유한요소모델링 단계별로 충격실험을 수행하여 보정된 해석모델의 신뢰성이 상당히 만족할만한 수준임을 확인할 수 있었다.

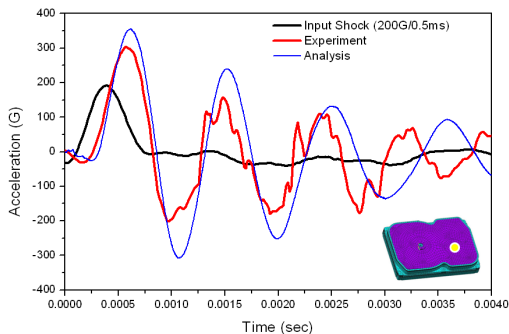


(a) 전자기 충격실험 (200G/0.5ms)

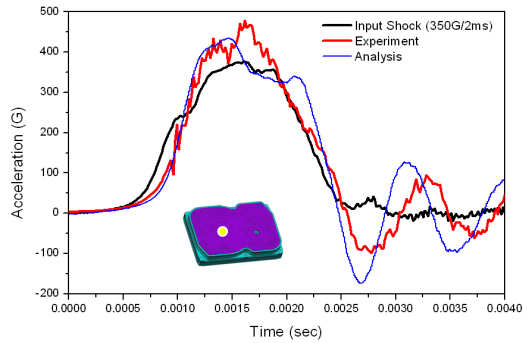


(b) 낙하충격실험 (350G/2ms)

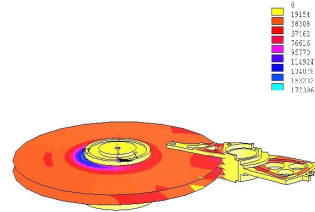
[그림 12] 조립된 완제품의 충격실험



[그림 13] 조립된 완제품의 피봇점 충격가속도 (200G/0.5ms 전자기충격실험)



[그림 14] 조립된 완제품의 피봇점 충격가속도 (350G/2ms 낙하충격실험)



[그림 15] 디스크와 HSA의 충격에 의한 변형모습

4. 결론

본 연구에서는 최근 들어 더욱 강화되고 있는 HDD의 내충격 설계조건을 만족시키는데 효과적으로 활용할 수 있는 충격해석기법의 신뢰성을 면밀하게 살펴보았다. 이를 위해서, HDD의 모델링 단계별로 충격해머를 이용한 충격실험, 전자기 충격발생기를 이용한 충격실험 및 낙하 충격시험 등을 수행하였다. 이러한 다양한 충격실험 결과와 유한요소해석 결과를 비교 분석하여 HDD의 신뢰성 있는 충격해석 모델을 단계별로 구축하였다. 실험치와의 비교결과 본 연구에서 충격해석을 위해 사용한 유한요소 모델과 해석기법들의 타당성을 확인할 수 있었다. 이러한 연구들은, 궁극적으로 디스크와 헤드의 lift-off 현상에 의한 HDD의 손상 메커니즘을 정확하게 규명하는데 많은 도움이 될 것이다.

참고문헌

- [1] 장영배, 박대경, 박노철, 박영필, 하드디스크 드라이브의 회전속도 변화에 따른 디스크와 헤드의 충격해석, 한국소음진동공학회논문집, 제14권, 제11호, pp.

1075-1082, 2004.

- [2] 손진승, 좌승훈, 이행수, 홍민표, 내충격성 향상을 위한 HDD Actuator의 거동 연구, 한국소음진동공학회 논문집, 제11권, 제3호, pp. 449-454, 2001.
- [3] 황태연, 강성우, 한윤식, 오동호, 하드디스크 드라이브 개발과 관련된 기계기술, 기계저널, 제43권, 제5호, pp. 38-48, 2003.
- [4] J. Edward, Finite Element Analysis of the Shock Response and Head Slap Behavior of a Hard Disk Drive, IEEE Tans. on Magnetics, V. 35, pp. 863-867, 1999.
- [5] 설웅, 장영배, 박노철, 박영필, 고무 마운트로 지지된 2.5인치 하드 디스크 드라이브의 충격응답해석, 정보저장시스템학회 추계학술대회논문집, pp. 215-216, 2005.
- [6] 김진곤, 김정운, 김홍수, 낙하/충격해석을 통한 전자렌지의 내충격설계, 한국동력기계공학회지, 제13권, 제3호, pp. 53-58, 2009.
- [7] 석기영, 윤기원, 나정민, 박창배, 광 디스크 드라이브용 완충포장재의 낙하충격 해석 및 활용, 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 177-182, 2004.

이 재 곤(Jae-Kon Lee)

[정회원]



- 1985년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (기계공학학사)
- 1996년 8월 : 미국 Washington대 (기계공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1997년 4월 : 현대자동차
- 1997년 9월 ~ 현재 : 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>
지능재료

김진곤(Jin-Gon Kim)

[정회원]



- 1993년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (기계공학석사)
- 1998년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (기계공학박사)
- 1998년 3월 ~ 2001년 2월 : 삼성전자 책임연구원
- 2001년 3월 ~ 현재 : 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>
구조해석, CAE