시뮬레이션에 의한 오토바이 헬멧의 충격 응답 분석

A Simulation for the Imapct Response Analysis of a Motor Cycle Helmet

최명진*
Myung-Jin Choi

Abstract

To analyze the impulsive response of a motorcycle helmet, a simulation is performed using the finite element method. Based upon the simulation result, an equivalent one degree of freedom vibrational system is adapted, and transient impulsive responses are analysed to investigate the influence of engineering parameters such as damping, natural frequency, and impact velocity on the impulsive response of the helmet. Maximum gravitational acceleration reduces as the damping factor value increases. When the damping factor value is around 0.6 or larger, the maximum acceleration does not change. With respect to the natural frequency and the impact velocity, it increases linearly. The relationship between head injury criterion(HIC) and maximum gravitational acceleration is also presented. The scheme of this study is expected to be utilized to economize the design process of high quality motorcycle helmets.

* 경희대학교 기계산업시스템공학부 교수

1. 서 론

오토바이 헬멧은 사고 발생시 머리에 대한 충격을 완화시킴으로써 착용자의 머리를 보호하는 일반적인 수단으로서, 외부 shell과 내부 liner의 주요한 두 부분으로 구성되어 있다. 외부 shell은 충격 하중을 넓은 면적에 분산시켜 주고, 관통을 차단시켜 내부에 있는 liner를 보호하며, liner는 머리에 상해를 입히지 않을 정도의 작은 힘이 전달되도록 변형함으로써 대부분의 충격 에너지를 흡수한다.

오토바이 헬멧의 충격 흡수 성능에 대한 기준은 법규[5]로 제정되어 있으며, 헬멧을 일정한 높이에서 낙하 시켰을 때 헬멧 내부의 head-form에 설치한 가속도 계로부터 측정된 최대 가속도 값이 기준치를 넘지 않도록 규정하고 있다. 그런데, 미국 연방 교통 안전국(NHTSA)에서 최대 가속도의 제한보다는 좀 더 신뢰할 수 있는 기준으로, 가속도와 함께 지속 시간을 고려한 두부 상해 기준(HIC)을 정하였는데, 이는 최대 가속도라는 단일 변수보다는 가속도와 지속 시간이라는 2개의 변수가 충격 흡수 성능 기준의 한계를 정하는 데 보다 적합하다는 것 과 충격에 의한 상해에 대하여 가속도와 지속 시간의 상승 작용의 영향을 고려한 것이다[5].

현재, 오토바이 헬멧을 설계 생산하고 있는 현장에서는 충격 흡수의 역학적 개념 이해가 부족하고 충격 흡수 메카니즘에 대한 이해가 미흡하여, 설계 시 문제가 발생하면 문제의 핵심을 잘못 선정하는 등의 해결 방법상의 어려움이 있고 많은 시험과 시행 착오를 거쳐 문제점을 해결하고 있어 막대한 시간과 비용을 소모하고 있는 실정이다. 그러나, 헬멧의 충격 흡수 능력에 대한 인증을 받아야 하고, 규격 품질 이상의 고품질을 유지하면서 헬멧을 소형화, 경량화 하여야 하는 상황에 직면해 있다.

지금까지 헬멧의 충격에 관하여 발표된 논문은 다른 연구 분야와 비교할 때 상당히 제한적이다. 이는 관련 산업의 비중이 작고, 산업체의 요구에 의해 수행한 연구 발표가 대부분이기 때문으로 사료된다. 관련 분야의 논문을 보면, Nguyen, Noah, 그리고 Kettleborough[1]는 틈새를 갖는 기계 시스템의 소음과 마모 연구에 응용하기 위해 스프링과 감쇠를 갖는 집중 질량으로 이루어진 간단한 진동 시스템을 구성하여 주기적인 가진이 작용할 경우, 갑자기 정지하여 충격을 가할 때 충돌주파수와 접촉에 대해 고찰하였다. Comparin과 Singh[2]는 조화 균형법을 이용하여 두 물체가 충돌할 경우 발생하는 비 선형 진동 응답을 근사적으로 해석하였다. 1990년에 Thom과 Hurt[3]는 미국 Department of Transportation 이 요구하는 기준인 FMVSS 218 과 소비자 보호 단체에서 제정한 Snell M85의 기준에서 요구하는 헬멧의 충격 거동을 분석하여, 여기에서 요구하는 헬멧 변형 거동은 물리적 특성의 비합리성으로 인하여 두 기준을 동시에 만족하기가 어려움을 실험적으로 증명하였다. 이 연구에서 보면, 헬멧을 구성하는 각 요소들의 개별적 분석 없이 전체적인 충격거동을 실험적으로 연구하였다. Zelimer[4]는 여러 종류의 헬멧에 대하여 다양한 낙하 속도와 낙하 지점으로 하여 낙하 실험을 수행함으로써 두부 상해 기준과 최고 가속도의 관계를 고찰하였다. 김 규현[5]은 유럽 기준(ECE R22.03, 04)에 따른 실험적 방법을 통해 다양한 종류의 오토바이 헬멧에 대하여, 충격 흡수 성능을 비교 분석하였다. 최명진[6]은 오토바이 헬멧을 단순 모델링하여 헬멧의 충격응답을 분석하였다. 이상에서와 같이 충격과 헬멧에 관한 연구들을 보면, 대부분의 연구가 헬멧을 구성하는 각 요소들을 개별적으로 분석하기보다는 전체적인 계로 간주하고, 충격시의 응답을 분석적으로, 또는 실험적으로 고찰하였다. 그러나 충격 거동에 영향을 주는 인자들에 관해 개별적인 영향을 고찰한 연구 논문은 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는, 충격 거동에 대한 이해를 증진시키고 고품질 헬멧 생산을 위한 기술력 제고를 위하여, 유한 요소법을 이용한 시뮬레이션을 통하여 시험 평가 기준에서 요구하는 높이에서 헬멧을 자유 낙하시킬 경우, 시간에 따른 변형 속도와 가속도 응답을 구하였으며, 이를 토대로

헬멧에 상응하는 1자유도 진동 모델을 설정하여 기계 진동이론을 적용함으로써 헬멧 구성 재료의 물성과 기하학적 형상에 의해 결정되는 진동 인자 및 충격 조건에 따른 충격 응답의 변화를 분석하였다.

2. 유한 요소법에 의한 충격응답 시뮬레이션

헬멧은 외부를 감싸고 있어 내부를 보호하는 shell과 충격 흡수부인 안 쪽의 liner로 구성되어 있고 shell은 2겹의 복합 재료로 구성되어 있다. 헬멧은 미국형 헬멧 SNELL M90으로 선정하였고, 도면을 참조하여 solid element로 모델링하였다. 사용된 물성치는 다음 <표 1>과 같다.

<표 1> 헬멧의 물성치

	SHELL	LINER	ANVIL
E_X	126.725 GPa	0.0036 GPa	210 GPa
E_Y E_Z	10.549 GPa	*	*
G_{YZ} G_{ZX} G_{XY}	5.8225 GPa	*	*
ν	0.21	0.05	0.28
ρ	1120 Kg/m^3	75 Kg/m^3	7853 Kg/m^3
인장 강도	0.532 GPa	0.235 MPa	*

* : 사용되지 않음

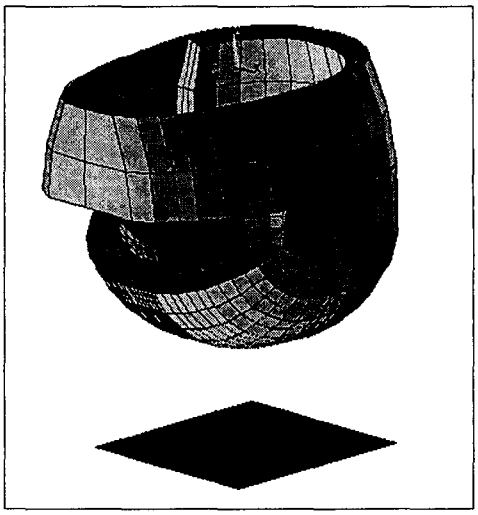
헬멧의 충격 지점은 실험 논문[5]과 산업체의 실험기준을 참조해서 가장 큰 가속도 값이 걸리는 부분으로 선정하였다. 헬멧이 낙하하여 부딪치는 anvil은 4절점을 가지는 shell element로 모델링 하였고 강철의 물성치를 사용하였다.

Map-Mesh를 사용하여 4848개의 요소를 생성하였으며, <그림 1>에서와 같이 충격을 받는 지점은 자세히 요소를 생성했고, 충격과 관계없다고 판단되는 부분은 대략적으로 요소 생성을 하였다. 외부의 shell과 안쪽의 liner는 접촉을 유지하고 있다고 가정하였고, shell은 두께 방향으로 1겹의 solid element로, liner는 두께 방향으로 3겹의 solid element로 구성하였으며 ANSYS를 사용하여 시뮬레이션 하였다.

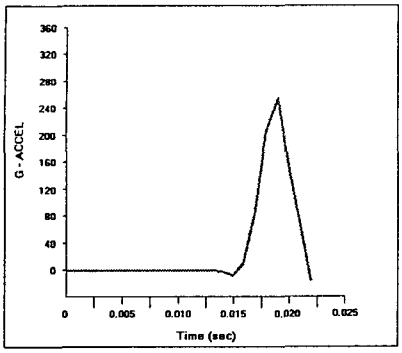
안전 기준에 따라 요구되는 헬멧의 충격 순간 속도 7.5m/s에 상응하는 낙하높이를 가속도-속도-변위의 관계에서 계산할 수 있다. 계산된 식에 의해서, 높이는 2.86m이며, 낙하 시간은 0.7645 초이다. 그러나 이 상태로 시뮬레이션을 하면, 계산 시간이 많이 필요하므로, 가속도-속도-변위 식으로부터 정리하여, 낙하 높이 0.1미터에서 초기 속도 7.37m/s로 낙하하여 0.0135 초 후에 충격이 일어난다고 가정을 하였다.

충격의 target에 해당하는 Anvil은 100mm×100mm×5mm의 크기를 가지는 flat anvil이며, 헬멧은 높이 0.1m에서 초속도 7.37m/s로 떨어뜨렸으며, 충격 후 헬멧이 받는 가속도 응답을 구하였다.

<그림 1>은 헬멧의 낙하 충격 시뮬레이션에서의 헬멧과 flat anvil을 보여주며, <그림 2>는 헬멧의 충격 지점에 대하여 시간에 따른 가속도 응답을 보여 준다.



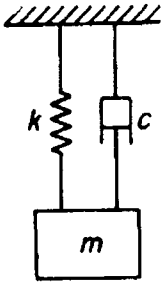
<그림 1> 낙하 헬멧과 flat anvil



<그림 2> 낙하 충격에 의한 가속도 응답

3.1 자유도 진동 모델에 의한 충격 응답 분석

오토바이 헬멧을 1 자유도 진동 계로 간주하면, 헬멧 재료의 물성과 헬멧 형상에 의해 탄성 특성을 나타내는 강성, 헬멧과 head-form의 질량, liner의 에너지 흡수 능력을 나타내는 감쇠로 구성되어 있는, <그림 3>에서와 같은 진동계로 나타낼 수 있으며, 운동 방정식은 $m\ddot{x}+c\dot{x}+kx=f(t)$가 된다. 이러한 진동계에 비 주기적인 힘이 갑자기 작용할 때, 즉, 충격력이 작용할 경우의 진동 응답은 고유 진동수로 진동하는 과도 응답이며, 가진력의 형태와 경계 조건에 의존하게 된다.



m:질량, k:강성도, c:감쇠계수
<그림 3> 1자유도 진동 모델

진동 계에 크기가 1인 단위 충격(unit impulse)이 가해질 때의 응답을 단위 충격응답(unit impulsive response) 이라 하며, τ 초 후의 단위 충격에 의한 응답 $h(t-\tau)$ 는 다음 식 (3.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h(t-\tau)=\frac{e^{-\zeta\omega_n(t-\tau)}}{m\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}}\sin\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}(t-\tau),\ t>\tau \tag{3.1}$$

이때, ω_n, m, ζ 는 계의 고유진동수, 질량, 감쇠를 나타내며, 임의의 충격력 $f(t)$ 에 대한 응답은 $x(t)=\int_0^t f(\xi)h(t-\tau)d\xi$ 로 나타낼 수 있다.

질량과 탄성이 있고 감쇠 성질도 갖고 있는 어떤 물체가 자유 낙하할 경우, 지면에 충돌 할 때 물체의 충격흡수 거동을 고찰하기 위해 1자유도 진동 모델을 설정하면, 이를 지배하는 운동방정식은 식 (3.2)와 같으며, m, c, k, s, g 는 각각 유효 질량, 감쇠 계수, 강성, 낙하 높이, 중력 가속도를 나타낸다.

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx=mg \tag{3.2}$$
$$x(0)=0,\ \dot{x}(0)=\sqrt{2gs}$$

이 때 응답을 구하면 다음과 같다.

$$x(t)=\int_0^t mg\,h(t-\tau)d\xi \tag{3.3}$$

초기 조건을 적용하고, 시간에 관한 미분에 의해 최대 가속도를 구하면, 다음과 같다.

$$\left[\frac{\dot{x}(t)}{g}\right]_{\max}=A_g=ABS(e^{-\omega_n\zeta t}\sqrt{C^2+D^2}) \tag{3.4}$$

$$C=\frac{\zeta}{\omega_n}+1-\frac{v_0}{g}\omega_n\zeta$$

$$D=\frac{\zeta^2}{\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}}-\frac{v_0}{g}\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\phi^2}}+\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}\right)$$

$$t=\frac{1}{\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}}\tan^{-1}\left(\frac{D}{C}\right)$$

감쇠를 무시할 경우의 최대 가속도는,

$a_{\max} = (\frac{\ddot{x}}{g})_{\max} = \frac{1}{g}\sqrt{v_0^2\omega_n^2 + g^2}$ 으로 나타낼 수 있다.

댐핑을 포함하여, 고유 진동수, 충돌 속도, 질량 및 강성도 등이 충격 응답에 미치는 개별적인 영향을 고찰하려면, 다른 인자의 값을 고정시키고, 해당 인자의 값의 변화에 따른 최대 충격 응답 가속도의 변화를 고찰하여야 한다. 유한 요소법에 의한 시뮬레이션과 실험논문[5]에서의 데이터를 기준하여,

표준값을 $m = 5kg$, $w_n = 400rad/\sec$,

$v_0 = 7.5m/s$, $k = 800 \times 10^3 N/m$ 로 하여 충격흡수 거동 즉 최대 가속도 영향을 미치는 인자, 즉 댐핑, 고유 진동수, 충돌 속도 에 따른 상관성을 구하여 <그림 4>, <그림 5>, <그림 6>에 나타내었다.

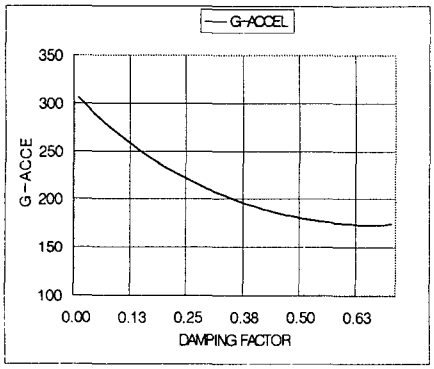
<그림 4>에서, 최대 가속도는 댐핑이 커짐에 따라 감소하는 것을 알 수 있으며, 감소 구배가 점차적으로 줄어드는 체감적 감소임을 알 수 있다. 감쇠비가 0.6정도가 되면, 최대 가속도의 크기는 거의 변하지 않는 것으로 나타났으며, 댐핑값이 큰 재료를 선택하면 충격흡수에 유리하게 된다.

<그림 5>를 보면, 고유 진동수가 증가함에 따라 최대 가속도가 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 고유 진동수 ω_n 는 재료의 질량 m 과 강성 k 에 의해, $\omega_n = \sqrt{k/m}$ 으로 결정되므로, 강성이 큰 재료를 사용하게 되면, 충격흡수에 불리함을 보여 주고 있다. 그러나, 강성 자체보다는 질량과 관계하여, 고유진동수에 따라 충격흡수 성능이 달라짐을 알 수 있다.

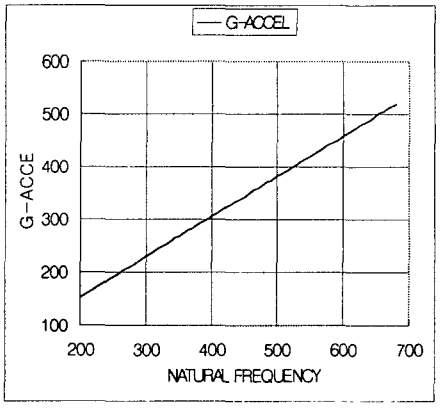
충격 속도는 낙하높이에 의존하는 값으로서, <그림 6>에서 보면, 충격속도에 따라 최대 가속도 값이 단순 증가함을 알 수 있다.

두부 상해 기준(*HIC*)은,

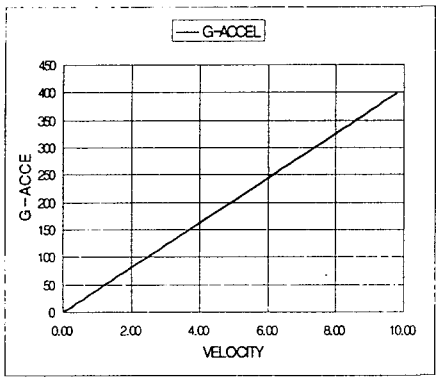
$HIC = constant \cdot a_{\max}^{2.5}$로 나타낼 수 있으며, Zelimer[4]에 의하면, $HIC = A\, a_{\max}^{B}$ 로 나타낼 수 있고, Curve fitting 기법에 의해 A=0.0526(0.0468~0.0570), B=1.942 로 표현할 수 있으며, 이 때 Correlation coefficient 는 0.95이다. <그림 7>은 A=0.0526×0.052 일 때의 두부 상해 기준과 최대 가속도의 관계를 보여 준다.



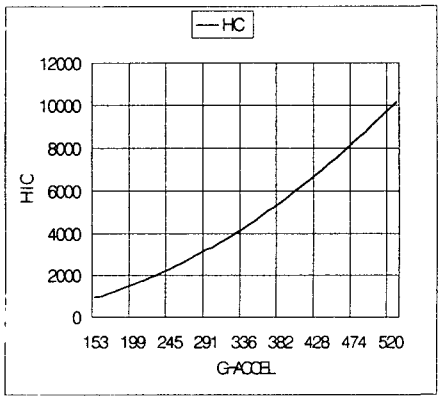
<그림 4> 댐핑에 따른 최대 가속도



<그림 5> 고유 진동수에 따른 최대 가속도



<그림 6> 충돌 속도에 따른 최대 가속도



<그림 7> 두부 상해 기준(HIC)과 최대 가속도의 관계

4. 결론

본 연구에서는 유한 요소법에 의한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여, 오토바이 헬멧의 충격 거동을 고찰함으로써 설계에 적용할 수 있는 기반을 마련하였으며, 요약하면 다음과 같다.

1. 자유도 진동 모델을 설정하여, 충격에 의한 과도 응답을 해석하고, 충격 흡수 성능에 미치는 인자, 즉 헬멧의 댐핑, 고유 진동수, 충돌 속도에 따른 최대 가속도의 변화를 분석하였고, 최대 가속도와 두부 상해 기준과의 상관 관계를 고찰하였다.
2. 최대 가속도는 댐핑이 커짐에 따라 감소하는 것을 알 수 있으며, 감소 구배가 점차적으로 줄어드는 체감적 감소임을 알 수 있다. 감쇠비가 0.6정도가 되면, 최대 가속도의 크기는 거의 변하지 않는 것으로 나타났다.
3. 최대 가속도는 고유 진동수와 충돌 속도가 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

본 연구를 통하여, 헬멧의 충격 응답에 대한 분석 능력을 제고시키고, 고품질 헬멧 생산을 위한 기초 자료 확보하여, 헬멧의 설계에 적용함으로써, 개발 소요시간의 단축에 기여할 수 있기를 기대한다.

참고문헌

[1] Nguyen, D. T., Noah, S. T. and Kettle-borough, C. T., "Impact Behavior of an Oscillator with Limiting Stops, Part 1 :A Parametric Study" Journal of Sound and Vibration, Vol.109(2) (1986), pp 293-397

[2] Comparin, R. J. and Singh, R., "Non-Linear Frequency Response Characteristics of an Impact Pair." Journal of Sound and Vibration, Vol. 134(2) (1989), pp 259-290

[3] Thom, D. R. and Hurt, H. H., Jr., "Conflict of Contemporary Motorcycle Safety Helmet Standards", 1990 International Motorcycle Safety Conference(1990), Orlando, FL, USA

[4] Zelimer, H., "Investigation of the Perfor-mance of Motorcycle Helmets under Impact Conditions" Society of Automotive Engineers Paper(1993) No. 933113

[5] 김규현, 오토바이 헬멧의 충격흡수 성능에 관한 실험적 연구, 인하 대학교 산업 기술 대학원 석사학위 논문(1995)

[6] 최명진, "단순 모델링에 의한 오토바이 헬멧의 충격 응답 분석", 경희 대학교 논문집, 제27집(1998) 자연 과학편, pp 459-466

저자소개

최명진

1984년 경희대학교 기계공학과 학사

1987년 North Carolina State Univ. 기계공학 석사

1992년 North Carolina State Univ. 기계공학 박사

1992년~1993년 한국 원자력 연구소 선임연구원

1993년~현재 경희대학교 기계공학과 조교수, 부교수

관심 분야 기계공학 관련 현상에 대한 시뮬레이션