



## 헬멧의 충격응답 분석을 위한 단순진동 모델

†최명진

경희대학교 공과대학 기계공학과

(2014년 1월 13일 접수, 2014년 2월 25일 수정, 2014년 2월 25일 채택)

### A Simple Vibration Model for the Impact Response Analysis of a Helmet

†Myung-Jin Choi

Dept. of Mechanical Eng., College of Eng., Kyung Hee University, Korea

(Received January 13, 2013; Revised February 25, 2014; Accepted February 25, 2014)

#### 요약

본 연구에서는 헬멧의 충격응답을 분석하기 위한 단순진동모델을 제시하였다. 실제 헬멧 설계 및 검증과정에서 사용하는 데이터에 기반을 두고 단자유도 진동모델을 채택하였다. 충격에 의한 과도진동응답을 산출하여, 헬멧의 감쇠, 고유진동수, 충돌속도와 같은 인자들이 헬멧의 충격응답에 미치는 영향을 고찰하였다. 최대 G-가속도는 감쇠가 증가함에 따라 감소하였고, 감쇠비가 0.6 이상이 되면 최대 가속도의 값은 변화가 없었다. 고유진동수와 충돌속도에 관하여는 선형적으로 증가하였다. 두부 상해기준(Head Injury Criterion, HIC)과 최대가속도의 관계도 제시하였다. 본 연구에서의 해석모델이 고품질 경량화 헬멧의 설계과정에서 경제성 제고에 활용될 수 있기를 기대한다.

**Abstract** - In this study, to analyze the impulsive response of a helmet, a simple vibration model is presented. Based upon the experimental data and the simulation results, 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 helmets.

**Key words** : Helmet, Impulse, HIC, Head Injury Criterion, G-Acceleration

#### 1. 서론

헬멧 또는 안전모는 작업현장에서 낙하하는 물체 또는 충격으로부터 착용자의 머리를 보호하는 일반적인 수단으로서, 머리에 대한 충격에너지를 완화시

킴으로써 안전을 확보하기 위한 머리 보호 장치이다. 따라서 헬멧은 오토바이 나 자전거를 운행할 때는 물론 가스설비 현장과 같은 산업체에서 근무하는 모든 작업자의 머리 보호를 위해 필수적인 안전장치이다. 머리 상해의 가장 큰 고려대상은 뇌 상해이며, 뇌 상해는 뇌의 어느 부분이 두개골 안에서 이격될 경우 일어날 수 있다. 머리에 대한 충격은 두개골을 변형시키거나, 두개골이 변형되지 않더라도 뇌

†Corresponding author:mjchoi@khu.ac.kr

Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

내부에 충격이 전달되어 뇌 내부 변형을 야기 시켜 손상을 입게 된다. 헬멧은 외부 Shell과 에너지를 흡수하는 Liner의 주요한 두 부분으로 구성되어 있으며, 외부 Shell은 충격하중을 넓은 면적에 분산 시켜 주고, 관통을 차단하고 안쪽에 있는 Liner를 보호해 준다. 따라서 Shell은 높은 표면 강도를 갖고, 가벼우며, 매끄럽게 외부를 마감한다. Liner는 외부 Shell의 내부에서, 충격에너지의 대부분을 흡수하며, 이 기능을 효과적으로 수행하기 위하여 머리에 상해를 입히는 수준보다는 낮은 힘이 전달되도록 변형되어야 한다. 이 요건을 만족하기 위해서는 가능한 일정하고, 낮은 압착 저항력을 가져야 하고, 변형속도에 영향을 적게 받아야 하며, 압착 반응에서 소성 성질을 가져야 한다고 알려져 있다.

현재 헬멧을 생산하고 있는 현장에서는, 충격흡수의 역학적 개념 이해가 부족하고, 충격흡수 메카니즘에 대하여 정확한 분석을 못하고 있는 상태에서, 제품의 소형화, 경량화 요구에 부응하기 위하여 많은 시험과 시행착오를 거쳐 문제점을 해결하게 되어 과도한 시간과 비용을 소모하고 있다. 이러한 실정에서도, 제품의 충격흡수 능력의 만족에 대한 인증을 받아야 하며, 규격 품질 이상의 고품질 제품을 시장에 내지 않으면 아니 되는 상황에 직면해 있다. 충격흡수 이론에 대한 역학적 수식 이해가 부족하고, 정량분석은 물론 정성적인 분석 능력도 미흡한 실정이므로 각종 규격을 만족하면서, 소형, 경량인 제품을 개발하기 위해 많은 소재를 시험하고 분석하여 개선 방향을 찾고 있는데 시행착오를 반복하고 있는 실정이다.

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 틸새를 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, 충돌 주파수와 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 Transportation이 요구하는 기준인 FMVSS 218과 소비자 보호 단체에서 제정한 Snell M85의 기준에서 요구하는 헬멧의 충격거동을 분석하여, 여기에서 요구하는 헬멧 변형 거동은 물리적 특성의 비합리성으로 인하여

두 기준을 동시에 만족하기가 어려움을 실험적으로 증명하였다. 이 연구에서는 헬멧을 구성하는 각 요소들의 개별적 분석 없이, 전체적인 충격거동을 실험적으로 연구하였다. Zelimer[4]는 여러 종류의 헬멧에 대하여 다양한 낙하 속도와 낙하지점으로 하여 낙하 실험을 수행함으로써, 두부 상해 기준과 최고 가속도의 관계를 고찰하였다. 최명진[5,6]은 실험 데이터와 유한요소해석을 통하여 오토바이 헬멧을 모델링하고, 헬멧의 충격응답을 분석하였다. 김청균[7,8]은 FEM을 이용한 강도해석을 통하여 안전도의 안전성에 관하여 연구하였다. 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, 헬멧의 충격흡수 거동을 분석하기 위해 단순진동 모델을 설정하여, 충격에 대한 헬멧의 과도진동응답을 구하고, 헬멧의 고유 물성 즉 진동인자와 충돌속도의 변화가 미치는 영향을 분석하였다.

## II. 두부 상해 기준 (Head Injury Criterion, HIC)

1980년 후반에 유럽에서는, 상해에 따른 사람 머리의 허용한도에 대한 이해를 향상시키기 위하여 Glasgow Southern Hospital과 협력하여 연구를 추진하였다. 사망 및 비사망사고의 자료를 수집하였고, 사망자의 뇌 사진과 헬멧의 자료를 포함 시켰는데, 관통에 대한 자료는 제외하였다. 단단한 나무로 만들어진 머리모형(Head Form)에 헬멧을 씌우고, 평평한 모루(Flat Anvil)와 원형 형태의 모루(Kerbstone Anvil)위에 낙하시킨 후 헬멧의 손상이 사고 시 손상을 재현할 때까지 에너지 수준을 달리하여 낙하 시험을 수행하였다. 두부상해기준(HIC)과 최고 가속도 값을 얻기 위하여, 머리모형의 가속도를 측정하였는데, 이들 값은 실제 사고에서 얻어진 값으로 간주 하였다.

HIC의 기원은 1932년 Guardjian과 그의 연구팀의 연구로 볼 수 있으며, 그들은 <Fig. 1>에서와 같은 Wayne State Tolerance Curve(WSTC)라고 하는 “두개골 골절 영역”과 “두개골 비골절”영역을 구분하는 곡선을 발표하였는데, 이는 유효한 가속도 대 지속시간에 대한 곡선을 나타낸 것이다.

1966년에Gadd는 WSTC의 사용을 향상시키기위해 SI(Severity Index)라는 개념을 소개 하였다.1 WSTC가

두개골 골절과 과 두개골 비골절 두 영역사이의 어떤 경계설정을 제공한다면, SI에서는 1,000 보다 큰 SI값은 “골절 영역”에 있으며, 1,000 보다 작은 SI값은 “비골절 영역”에 있음을 나타낸 것으로 다음과 같이 나타내었다.

$$a^{2.5}\Delta t = 1,000$$

$$SI = \int_{t_1}^{t_2} a^{2.5}dt$$

여기서 a는 유효가속도, Δt는 가속도 곡선의 지속 시간을 나타낸다.

1971년 Versace는 WSTC와 SI의 관계에 대한 해석을 제공하였으며, 이것을 근거로 미국연방 도로 교통 안전국(NHTSA)은 1972년에 새로운 한계기준인 두부상해기준(HIC)을 정의하였는데 HIC의 원래 정의는 다음과 같다.

$$\left[ \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} a \, dt \right]^{2.5} = 1,000$$

여기서 a는 가속도에 대한 통상적인 평균 과형 수준을 나타낸다. 이 후 HIC는 여러번 수정되었으나, 현재의 정의는 1986년에 설정 되었으며, 이것은 최대 HIC간격의 한계를 정한것으로써, 가속도의 지속 시간 (t<sub>2</sub> - t<sub>1</sub>)이 최대 36msec 이하 이어야 한다.

$$(t_2 - t_1) \left[ \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} a(t) \, dt \right]^{2.5}$$

여기에서 a는 중력가속도의 배수로 표시되는 합

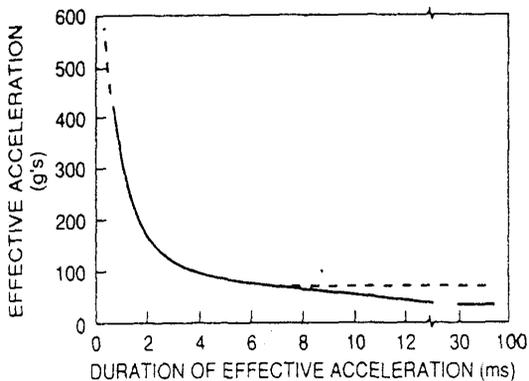


Fig. 1. Wayne state tolerance curve.

성 가속도, (t<sub>2</sub> - t<sub>1</sub>)은 충돌중  $\frac{36}{1,000}$  초 이하의 간격을 가지는 임의의 두 순간을 나타낸다.

HIC는 실험을 근거로 한 것이 아니라, 두부 가속도가 시간의 함수로 측정되어 HIC가 구해지는데, 이것은 가속도와 지속시간의 상승작용의 영향을 근거로 한 것이다.

### III. 단순진동모델의 충격응답

#### 3.1. 단순진동모델

간단한 동역학계 혹은 진동계는 Fig. 2와 같이 표시할 수 있으며, 여기에서 m, k, c 는 질량, 강성, 감쇠를 나타낸다.

이 계를 지배하는 운동방정식은

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \text{ 으로 나타낼 수 있다.}$$

또는

$$\ddot{x} + \frac{c}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = 0$$

정의에 의해  $\frac{k}{m} = \omega_n^2, \frac{c}{m} = 2\omega_n\zeta$

이며,  $\omega_n$  은 고유진동수(rad/sec),  $\zeta$ 는 감쇠비이다.

따라서, 지배 방정식 즉 운동방정식은

$$\ddot{x} + 2\omega_n\zeta\dot{x} + \omega_n^2x = 0 \text{ 로 쓸 수 있다.}$$

특성 방정식은 다음과 같다.

$$r^2 + 2\omega_n\zeta r + \omega_n^2 = 0$$

$$r = -\omega_n\zeta \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$$

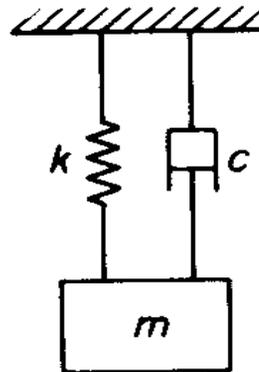


Fig. 2. Simple Vibration Model

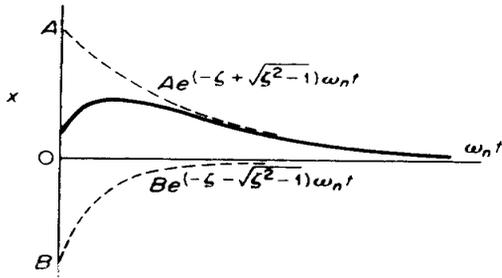


Fig. 3. Overdamped Vibration Response,  $\zeta > 1.0$

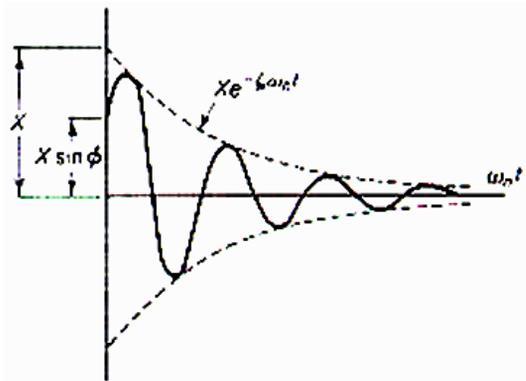


Fig. 4. Underdamped vibration response,  $\zeta < 1.0$

i)  $\zeta > 1$  인 경우

$$x(t) = A e^{(-\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n t} + B e^{(-\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_n t}$$

이므로 진동하지 못하므로, 이러한 계를 Overdamped, 즉 과감쇠라 하며 응답은 Fig. 3에 나타나 있다[9].

ii)  $0 < \zeta < 1$  인 경우

$$r_{1,2} = -\omega_n \zeta \pm \omega_n i \sqrt{1 - \zeta^2}$$

$$x(t) = e^{-\omega_n \zeta t} [A \cos \omega_d t + B \sin \omega_d t]$$

여기에서  $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$  이다.

이때는 응답은 일정한 고유진동수  $\omega_d$  로 진동하게 되는데, 이 계를 Underdamped, 점성감쇠 라고 하며, Fig. 4에 나타나 있다[9].

iii)  $\zeta = 1$  인 경우

$x = (A + Bt) e^{-\omega_n \zeta t}$  로 되어 진동 하지 못한다. 이때를 Critical, 임계 감쇠라고 하며, Fig. 5에 나타나 있다[9]. 무주기 운동을 일으키는 최소의 감쇠이므로,

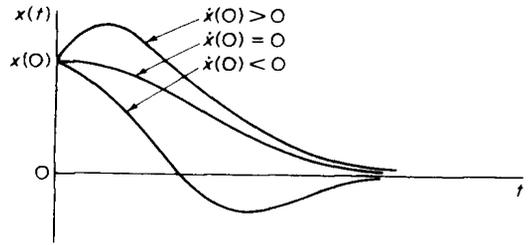


Fig. 5. Underdamped vibration response,  $\zeta = 1.0$

최단 시간으로 감쇠하여 정적인 평형 상태가 된다.

### 3.2. 충격 진동응답

어떤 동역학계에 비주기적인 힘이 갑자기 작용할 때, 즉, 충격력이 작용할 때, 이에 대한 응답을 과도 응답이라 부르며, 이러한 과도응답은 이계의 고유진동수로 진동하게 되는데, 진동모드는 가진력의 형태와 경계조건에 의존하게 된다. 충격량은 시간에 대한 힘의 적분으로 정의되며

$$\hat{F} = \int F(t) dt$$

로 표시할 수 있다. 특히, 짧은 시간에 큰 힘이 작용할 때, 이러한 힘을 충격력(Impulsive Force)이라 한다.

$F_0$  크기의 힘이 시간  $t_0$  동안 작용할 때를 생각해 보자. 만약  $t_0 = \frac{1}{F_0}$  이라 하면 충격량(Impulse)의 크

기는  $\int_0^{t_0} F_0 dt = 1$  이라 할 수 있다.

이 때 크기가 1인 충격량을 단위 충격(Unit Impulse)이라 한다.

이 때 단위충격을 유지하면서  $t_0$ 가 0 으로 접근할 때, 즉 시간 간격이 아주 짧아질 때, 충격력  $F_0$  는 무한대로 접근하게 된다. 이때의 충격력은  $\delta(t)$  로 표시하고, Delta Function 혹은 Unit Impulsive Force 라고 부르며,

$$\delta(t) = 0 \text{ for } t \neq 0$$

$$= 1 \text{ for } t = 0$$

$$\int_0^{\infty} \delta(t) dt = 1$$

이라 할 수 있다.

만약에 충격력이 가해 지는 시간을 변경시키면, 즉  $\tau$ 만큼 평행 이동 시키면

$$\delta(t-\tau) = 0 \text{ for } t \neq \tau$$

$$= 1 \text{ for } t = \tau$$

$$\int \delta(t-\tau) dt = 1$$

로 나타낼 수 있다.

만약 임의의 힘의 함수  $f(t)$ 가 곱해지면,  $t \neq \tau$ 일 때는 영이 되고,  $t = \tau$ 일 때는  $f(\tau)$ 로 되며,  $\int_0^\infty f(t)\delta(t-\tau)dt = f(\tau)$ ,  $0 < \tau < \infty$  로 나타낼 수 있다.

1자유도 모델에 단위 충격이 작용할 경우 운동방정식은

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = \delta(t)$$

$$x(0) = \dot{x}(0) = 0$$

으로 표현할 수 있으며, 이는 unit impulse 의 특성을 고려할 때, 다음과 같은 등가 운동 방정식으로 표현할 수 있다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$$

$$x(0) = 0, \dot{x}(0) = \frac{1}{m}$$

따라서 이에 대한 응답은

$$x(t) = \frac{1}{m\omega_d} e^{-\omega_c t} \sin \omega_d t \quad \text{for } t > 0$$

이때 응답을 단위충격응답(Unit Impulsive Response)이라 부르며

$$h(t) = \frac{1}{m\omega_d} e^{-\omega_c t} \sin \omega_d t$$

로 나타낸다.

만약  $\tau$  초 후에 단위 충격이 가해질 경우에 그 응답은

$$h(t-\tau) = \frac{1}{m\omega_d} e^{-\omega_c(t-\tau)} \sin \omega_d(t-\tau) \quad \text{for } t > \tau$$

로 나타낼 수 있다.

Fig. 6와 같은 임의의 힘이 가해질 경우, 시간 간격  $\Delta\xi$  동안 가해지는 충격은  $f(\xi)\Delta\xi$  로 나타낼 수 있고, 이때 충격응답은 선형공간 이므로,  $f(\xi) \Delta(\xi) h(t-\xi)$  로 나타낼 수 있다. 처음부터 시간  $t$  까지 가해진 충격

에 대한 응답은

$$x(t) = \int_0^t f(\xi)h(t-\xi)d\xi$$

로 나타낼 수 있으며, 이를 Convolution Integral 이라 하며, 이는 Chain Rule에 의해

$$x(t) = \int_0^t f(t-\xi)h(\xi)d\xi \text{ 와 같은 값이다.}$$

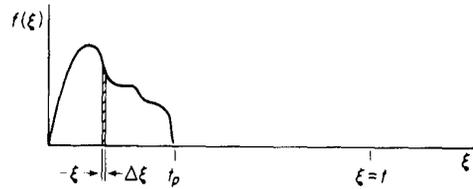


Fig. 6. Arbitrary Impulsive Force

### 3.3. 자유 낙하에 의한 헬멧의 충격 진동응답

어떤 물체가 자유 낙하할 경우, 지면에 충돌 할 때, 물체의 충격흡수 거동을 고찰하기 위해, 단순 모델을 설정하였다. 이 물체는 질량과 탄성을 갖고 있고, 또한 감쇠 성질도 보유하고 있다. 이 때 이 물체의 질량을  $m$  탄성을  $k$  라 하고, 감쇠계수를  $c$ 라 할 때, 이를 지배하는 운동방정식은

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = mg$$

$$x(0) = 0, \dot{x}(0) = \sqrt{2gh}$$

로 나타낼 수 있으며, 이 때 응답을 구할 수 있다. 최대 가속도는 다음과 같다.

$$\left[\frac{\ddot{x}(t)}{g}\right]_{\max} = A_g = ABS(e^{-\omega_c t} \sqrt{C^2 + D^2})$$

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

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

$$t = \frac{1}{\omega_d} \tan^{-1} \left( \frac{D}{C} \right)$$

감쇠를 무시할 경우

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

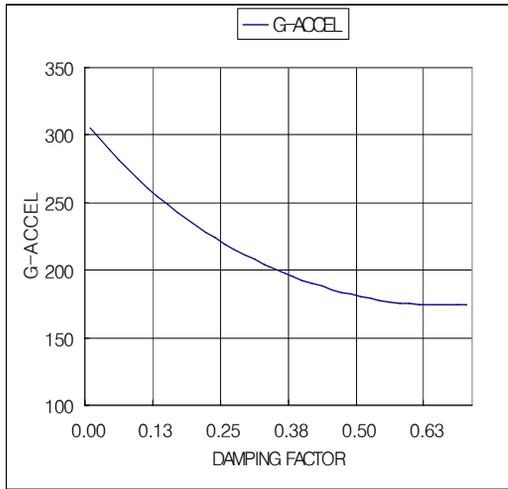


Fig. 7. G-Acceleration vs. Damping Factor.

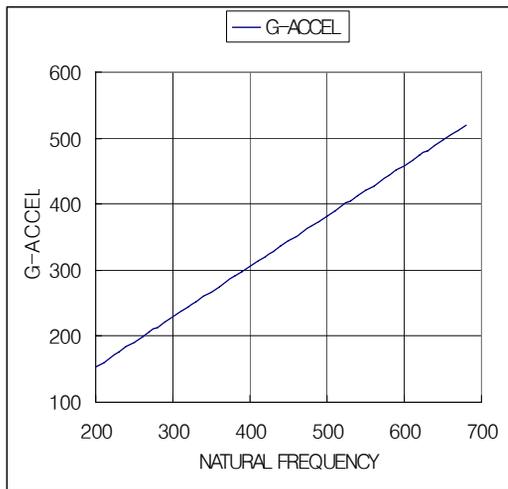


Fig. 8. G-Acceleration vs. Natural Frequency.

실제 현장에서의 실험데이터를 기준으로 하여 헬멧의 표준값을

$$m = 5kg, \quad \omega_n = 400rad/sec,$$

$v_0 = 7.5m/s, k = 800 \times 10^3 N/m$  로 하여 충격흡수 거동 즉 최대 가속도 영향을 미치는 인자에 따라 상관성을 구하여 Fig. 7, 8, 9 에 나타내었다.

Fig. 7에서 보면, 최대 가속도는 댐핑이 커짐에 따라 감소하는 것을 알 수 있으며, 감소 구배가 점차적으로 줄어드는 체감적 감소임을 알 수 있다. 감쇠비

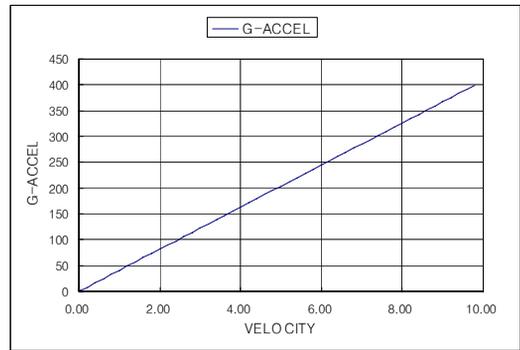


Fig. 9. G-Acceleration vs. Impact Velocity.

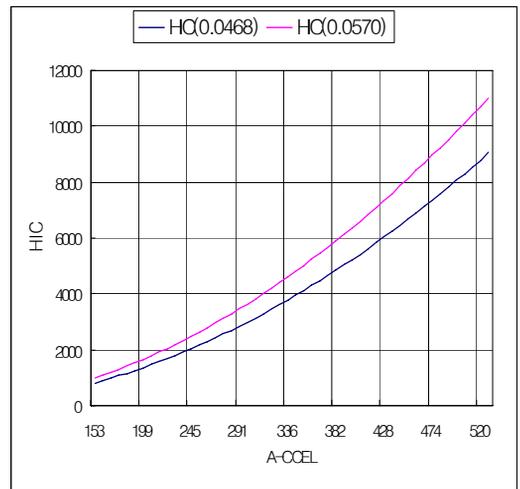


Fig. 10. Relationship between HIC and G-Acceleration.

가 0.6정도가 되면, 최대 가속도의 크기는 거의 변하지 않는 것으로 나타났으며, 댐핑값이 큰 재료를 선택하면 충격흡수에 유리하게 된다. Fig. 8에서는 고유 진동수는 재료의 질량과 강성도에 의해 결정되는 것으로, 이 값이 증가함에 따라 최대 가속도가, 선형적으로 증가함을 알 수 있으며, 강성이 크게 되면, 충격흡수에 불리함을 보여 주고 있다. 그러나, 강성도 자체보다는 질량과 관계하여, 고유진동수에 따라 충격흡수 성능이 달라짐을 알 수 있다. 충격 속도는 낙하높이에 의존하는 값으로써, Fig. 9에서 보면 충격속도에 따라 최대 가속도 값이 단순 증가함을 알 수 있다.

HIC는 정의에 따라,  $HIC = constant \cdot a_{max}^{2.5}$  로 나타낼 수 있으며, Zelimer의 연구 논문에 의하면,  $HIC = Aa_{max}^B$  로 나타낼 수 있고,  $1.5 \leq B \leq 2.5$  이다. Curve Fitting 기법에 의해  $A=0.0526(0.0468 \sim 0.0570)$ ,  $B=1.942$  로 표현할 수 있으며, 최대가속도는 G-가속도이다. 이때 Correlation Coefficient는 0.95이며, Fig. 10에  $A=0.0526 \times 0.052$ 일 때의 HIC와 최대 가속도의 관계가 나타나 있다.

본 연구에서는 헬멧의 단순 모델을 설정하여, 충격흡수 성능에 미치는 인자, 즉 헬멧의 댄핑, 고유진동수, 충돌 속도가 최대 가속도의 크기에 미치는 영향을 분석, 제시하였으며, 또한 최대 가속도(G-value)와 두부상해기준(HIC)과의 상관관계를 제시하였다. 헬멧의 충격응답 메커니즘을 분석, 고찰하였고, 고품질 헬멧 생산을 위한 기초 자료 확보를 위한 기본 개념을 제시 하였다. 본 연구에서의 단순 모델링을 헬멧의 설계에 적용함으로써, 개발 소요시간을 단축할 수 있을 것으로 사료된다.

#### IV. 결론

본 연구에서의 연구를 요약하면 다음과 같다.

1. 단순진동모델을 설정하여, 충격에 의한 과도 응답을 해석하고, 충격 흡수 성능에 미치는 인자, 즉 헬멧의 댄핑, 고유 진동수, 충돌 속도에 따른 최대 가속도의 변화를 분석하였고, 최대 가속도와 두부상해 기준과의 상관관계를 고찰하였다.
2. 최대 가속도는 감쇠가 커짐에 따라 감소하는 것을 알 수 있으며, 감소 구배가 점차적으로 줄어드는 체감적 감소임을 알 수 있다. 감쇠비가 어느 정도 되면, 최대 가속도의 크기는 거의 변하지 않는 것으로 나타났다.
3. 최대 가속도는 고유 진동수와 충돌 속도가 증가함에 따라 선형적으로 증가하였다.
4. 본 연구의 단순진동모델을 이용하여 물성치의 변화에 따른 헬멧의 충격 응답의 관계성을 파악하고, 고품질 헬멧 생산을 위한 기초 자료 확보하여, 헬멧의 설계 및 개발 소요시간의 단축에 기여할 수 있기를 기대한다.

#### 참고문헌

- [1] Nguyen, D. T., Noah, S. T. and Kettleborough, C. T., "Impact Behavior of an Oscillator with Limiting Stops, Part 1 :A Parametric Study" Journal of Sound and Vibration, Vol.109(2), 293-397, (1986)
- [2] Comparin, R. J. and Singh, R., "Non-Linear Frequency Response Characteristics of an Impact Pair." Journal of Sound and Vibration, Vol. 134(2), 259-290, (1989)
- [3] Thom, D. R. and Hurt, H. H., Jr., "Conflict of Contemporary Motorcycle Safety Helmet Standards", 1990 International Motorcycle Safety Conference, Orlando, FL, USA, (1990)
- [4] Zelimer, H., "Investigation of the Performance of Motorcycle Helmets under Impact Conditions" Society of Automotive Engineers Paper, No. 933113, (1993)
- [5] Myung-Jin Choi, "Simple Modelling for the Impulsive Response of Motorcycle Helmets", Thesis Collection Kyung Hee University, Seoul, Korea 27, 459-466 (1998)
- [6] Myung-Jin Choi, "A Simulation for the Impact Response Analysis of a Motorcycle Helmet", Journal of Korea Society for Simulation, Vol. 27 No. 4, 25-31 (1999)
- [7] Chung Kyun Kim and Do Hyun Kim, "Numerical Study on the Strength Safety and Displacement Behaviors of a Helmet", J. of the KIGAS, 12(4), 34-40, (2008)
- [8] Chung Kyun Kim, "On the Damping Effects of Helmet Safety with a Corrugation Damper using Taguchi's Optimization Design", J. of the KIGAS, 12(4), 41-45, (2008)
- [9] W. T. Thomson and M. D. Dahleh, *Theory of Vibration with Application*, 5<sup>th</sup> ed., Prentice Hall, (2003)