



가스산업용 안전모의 내충격 안전성에 관한 연구

†김청균 · 김태환

홍익대학교 트리보·메카·에너지기술 연구센터
(2013년 8월 10일 접수, 2013년 12월 23일 수정, 2013년 12월 23일 채택)

A Study on the Anti-impulsive Strength of the Helmets for a Gas Industry

†Chung Kyun Kim · Tae Whan Kim

Research Center for Tribology, Mechatronics and Energy Technology
Hongik University, Seoul 121-791, Korea

(Received August 10, 2013; Revised December 23, 2013; Accepted December 23, 2013)

요약

본 연구에서는 안전모 셸 구조물의 정상부에 돌출부를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우에 대해, 안전모의 두께와 하중면적을 변수로 변형률 에너지 밀도, 응력, 변위거동을 유한요소법으로 해석하였다. 변형률 에너지 밀도는 안전모로 전달되는 충격에너지 전달을 흡수하는 성능을 나타내는 변수로 안전모의 안전성을 고찰하는 중요한 요소 중의 하나이다. 유한요소 해석 결과에 의하면, 4,540N의 충격력이 안전모의 정상부 표면에 가해질 때 충격하중을 받는 하중면적이 증가할수록 최대응력은 선형적으로 줄어든다. 그러나, 최대 변형률 에너지 밀도는 하중면적이 증가할수록 커지는 것으로 나타났다. 변형률 에너지 밀도가 줄어들면, 안전모 착용자의 머리와 목 부분으로 전달되는 충격력은 줄어드는 것으로 나타났으며, 이것은 안전모의 충격에너지 흡수 안전성을 약화시키는 요인이 될 수 있다. 따라서, 안전모의 안전한 설계를 위해서는 정상부에 돌출 구조물을 설치하는 것이 좋지만, 이러한 수정 안전모는 충격에너지 흡수성능 측면에서는 불리함을 알 수 있다.

Abstract - In this study, the strain energy density, stress and deformation behaviors have been analyzed as functions of a thickness and a force area of protective helmets with and without an extruder on the top of the shell structure using the finite element method. The strain energy density in which is related to the absorption capacity of an impact energy transfer is one of a key element of the helmet safety. The FEM analyzed results show that when the impulsive force of 4,540N is applied on the top surface of the helmets, the maximum stress is linearly reduced for an increased area of impact forces. But, the maximum strain energy density has been reduced for the increased force area. The reduced strain energy density may increase the impulsive forces transferred to the head and neck of helmet wearers, which may decrease the impact energy absorption safety of the helmets. In thus, it is safer design of the helmet in which has an extruded structure on the summit surface, but the modified helmet may decrease the impact energy absorption capacity.

Key words : helmets, strain energy density, stress, deformation, FEM

†Corresponding author: ckkim_hongik@nate.com

Copyright © 2013 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

안전모는 외부의 충격력에 의해 파손되면서 머리에 직접 상해를 가하는 것을 방지하는 기능을 갖는다. 동시에 안전모에 공급된 충격에너지가 머리로 전달하기 보다는 자체적으로 흡수하여 안전성을 확보할 수 있어야 한다. 특히 가스사업장에서 폭발사고에 의해 순간적으로 물체가 비산하여 안전모에 충격을 가할 경우, 안전모 착용자의 머리는 큰 부상을 당할 수 있어 반드시 착용해야 한다.

선진국으로 갈수록 산업현장에서 개인의 안전을 대단히 중요하게 다루게 때문에 안전모 착용비율은 크게 높아졌다. 그렇지만, 대부분의 사업장에서 원가 절감이라는 명분하에 산업안전기준에서 정한 최소한의 안전기준을 만족한 안전모를 사용하고 있다. 산업 재해를 줄이기 위해서는 최소기준을 만족하는 안전모 보다는 안전성을 충분히 갖춘 안전모를 선정하여 형식적인 안전보다는 실질적인 개인안전을 확보하는 것이 중요하다.

안전모 착용자의 머리와 목 부분의 부상을 방지하기 위해서는 외부에서 전달되는 충격에너지를 완화하고, 차단하는 기능이 중요하다. 이것을 위해 안전모를 구성하는 플라스틱 모체(plastic shell)에 의한 충격에너지 흡수율이 높아야 유리하지만 실제로는 강도 안전성을 더 강조하기 때문에 제한적이다[1,2]. 따라서 안전모에 작용하는 충격에너지는 안전모 자체의 감쇄 효과보다는 머리띠를 비롯한 착장체에 의한 감쇄작용으로 머리에 전달되는 충격에너지를 줄이는 것이 일반적이다.

본 연구에서는 안전모에 작용하는 충격에너지를 안전하게 흡수할 수 있는 설계변수로 변형률 에너지 밀도를 고려하여 종래의 안전모와 돌출 구조물을 갖는 새로운 안전모에 대한 충격에너지 안전성을 비교 고찰하고자 한다. 또한, 안전모의 정상부에 작용하는 충격력을 접수하는 하중면적에 의해 충격에너지 흡수 정도가 달라지므로 이에 관련된 변형률 에너지에 대한 고찰도 함께 수행하고자 한다.

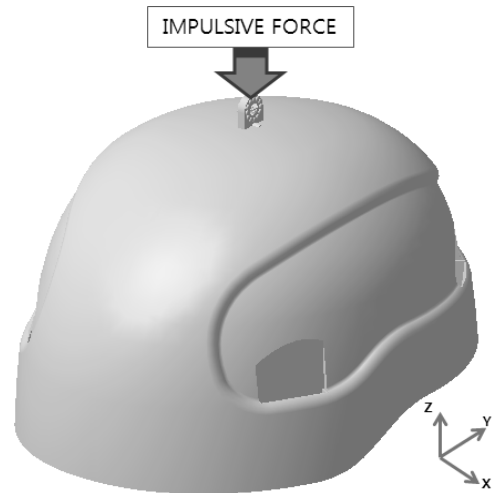
II. FEM 해석

2.1. 해석모델

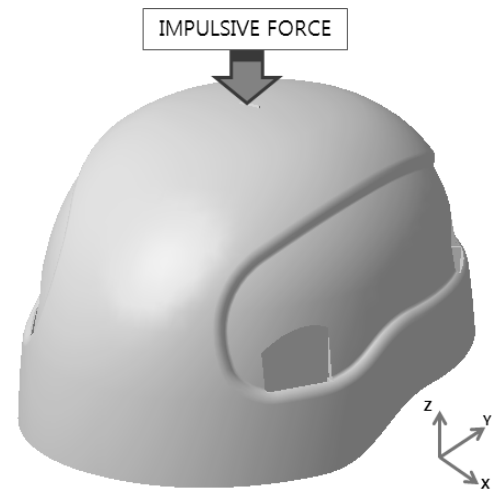
안전모의 충격에너지 감쇄효과에 관련된 변형률 에너지 밀도와 응력강도를 FEM으로 해석하기 위해, Fig. 1(a)에서 보여준 종래의 안전모 모델과 Fig. 1(b)에서 보여준 돌출 구조물을 장착한 새로운 안전모 모델을 고려하였다. Fig. 1(b)와 같은 안전모는 종래의 안전모와는 달리 충격력을 분산하기 위해 안전모의 정상

Table 1. Material properties of PC/ABS plastics

Material properties	Values
Elastic modulus, GPa	2.53
Yield strength, MPa	54.4
Poisson's ratio	0.39
Density, kg/cm ³	1,150



(b) Modified helmet with a extruder



(a) Conventional helmet

Fig. 1. FEM design models with impulsive forces.

부에 돌출 구조물을 설치한 새로운 설계모델이다.

본 연구에서 고려한 두 가지 안전모의 크기와 기본 두께, 소재는 모두 같다. 다만, 안전모의 정상부에 돌출 구조물을 설치하느냐, 마느냐가 특징적인 차이점이다.

Fig. 1의 안전모에 작용하는 충격에너지를 흡수하는 변형률 에너지 안전성과 강도 안전성을 상대적으로 고찰하기 위해 MSC/MARC[3] 프로그램을 사용하였다. 이들 두 가지 설계모델에서 안전모의 두께는 직경에 비해 대단히 작기 때문에 4각 쉘 요소(shell element)를 사용하였고, X축과 Y축에는 대칭적 구속조건을 적용하였다. 또한, 안전모를 바닥면에 놓았을 때의 경계조건은 Z=0을 적용하여 X-Y축의 안전성에 대해 고찰하였다.

2.2. 해석조건

안전모에 작용하는 충격강도와 충격에너지 흡수능을 고찰하기 위해서 안전행정부의 산업용 안전모 [4]와 미국의 NFPA 1971[5] 기준을 참고로 고찰하였다. 국제적으로 통용되는 안전규격에 따르면 3.58kg의 철제봉을 1.5m의 높이에서 안전모의 정상부에 낙하시켰을 때 안전모에 전달되는 최고 충격력은 4,540N을 초과해서는 안 된다고 규정하고 있다.

본 연구에서 사용한 플라스틱 안전모는 PC/ABS 소재를 사용하였고, 이 소재에 대한 물성치는 Table 1에서 제시하고 있다.

III. 해석결과 및 고찰

3.1. 강도안전성 해석

Fig. 1에서 보여준 것과 같은 안전모 설계모델의 정상부에 충격하중 4,540N을 가할 때, 안전모에 작용하는 응력, 변형거동, 변형률 에너지 밀도 안전성에 대한 FEM 해석결과를 Figs. 2~8에서 보여주고 있다.

Fig. 2와 3은 2.0mm의 두께로 제작된 안전모의 정상부에 4,540N의 충격하중을 가할 때 발생한 von Mises 응력분포와 변위량 분포를 각각 보여주고 있다. FEM 해석결과에 의하면, 종래 안전모의 정상부에서 발생한 von Mises 최대응력은 181MPa로 높게 나타났지만, 정상부에 돌출 구조물을 형성한 새로운 안전모 모델에서는 123MPa로 32%나 증가된 강도 안전성을 보여주고 있다. 그렇지만, 이들 해석결과는 플라스틱 소재의 강도 안전성을 고려할 때 대단히 위험한 해석결과라 할 수 있다.

또한, 변위량 분포를 제시한 Fig. 3의 해석결과에 의하면, 종래 안전모의 정상부에서 발생한 최대 변위량은 24.8mm로 큰 변위량을 나타내지만, 정상부에 돌출 구조물을 형성한 안전모 모델에서는 10mm로

59.7%나 감소된 우수한 강도 안전성을 보여주고 있다.

Fig. 4는 안전모의 정상부에 가한 충격력 4,540N을 가할 때 충격력을 받는 하중면적의 크기에 따라 달라지는 충격강도 안전성을 해석한 결과이다. 해석결과에 의하면, 충격력을 받는 하중면적이 증가함에 따라 von Mises 최대응력은 거의 선형적으로 줄어드는 경향을 나타내고 있다. 일례로 충격력을 받는 하중면적이 0.2mm²로 대단히 작을 경우는 69.4MPa의 높은 von Mises 응력을 나타내지만, 하중면적이 4mm²로 20배나 증가할 경우는 39.1MPa로 크게 낮아지는 것을 알 수 있다. 이것은 외부의 비산체가 안전모의 정상부에 부딪힐 때 접촉면적을 최대한 크게 충돌할 수 있는 방안을 안전모에 설계하면 유리할

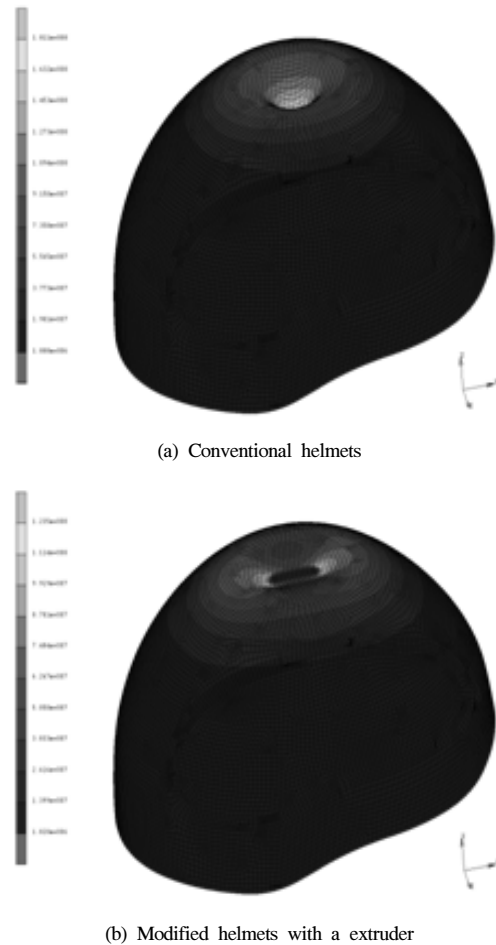


Fig. 2. Von Mises stress distributions of the helmets with a thickness of 2mm.

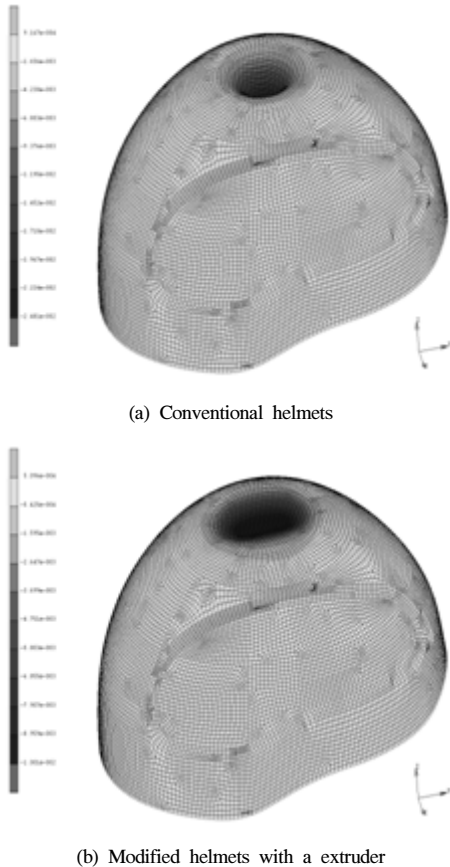


Fig. 3. Deflection distributions of the helmets with a thickness of 2mm.

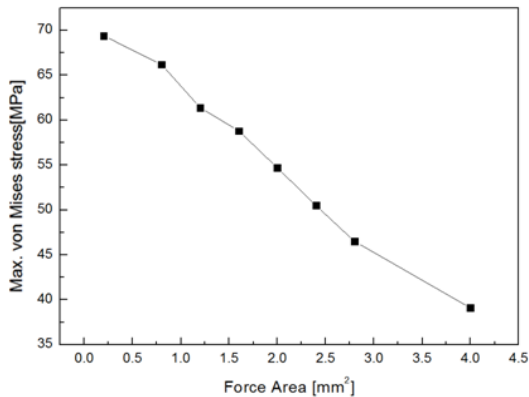


Fig. 4. Maximum von Mises stress distributions of the helmets.

것이라는 데이터이다. 따라서 본 연구에서 고려한 Fig. 1(b)처럼 정상부에 돌출 구조물을 설치하는 것도 안전성을 높이는 하나의 방법임을 알 수 있다.

3.2. 충격에너지 안전성 해석

Fig. 5~8은 종래의 안전모와 안전모의 정상부에 돌출 구조물을 장착한 안전모에 대한 충격에너지 흡수 성능을 평가한 해석결과이다. 본 연구에서는 안전모의 정상부에 4,540N의 충격력이 가할 때 플라스틱 안전모가 흡수할 수 있는 충격에너지를 추정한 것으로 머리에 전달되는 에너지 감쇄효과를 상대적으로 고찰할 수 있다.

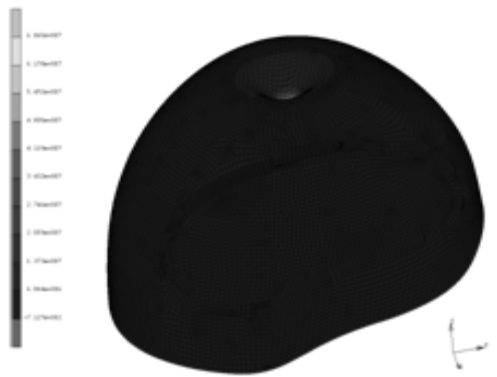
Figs. 5와 6은 안전모의 두께가 2.0mm와 3.5mm를 갖는 종래의 안전모와 정상부에 돌출 구조물을 설치한 새로운 안전모에 대한 충격에너지 감쇄효과를 측정하기 위해 변형률 에너지 밀도분포를 FEM으로 해석한 결과이다.

안전모의 정상부에 충격력이 작용할 때 종래의 안전모 정상부에 나타난 최대 변형률 에너지 밀도를 보여준 Fig. 5에서 안전모의 두께가 2.0mm일 경우는 68.7MJ/m³이지만, 두께가 3.5mm일 경우는 13.1MJ/cm³로 80.1%나 줄어든 결과를 나타내고 있다. 이것은 안전모의 두께를 두껍게 하면 강도 안전성 측면에서는 유리하지만 충격에너지를 흡수하는 성능은 떨어지기 때문에 머리로 전달되는 충격에너지는 상대적으로 증가한다는 것을 의미한다.

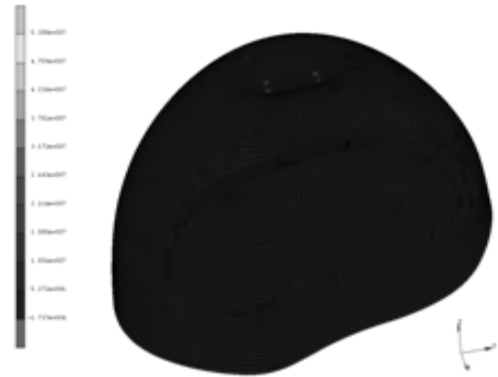
또한, Fig. 6은 정상부에 돌출 구조물을 설치한 안전모의 변형률 에너지 밀도분포를 보여준 FEM 해석 결과로 안전모의 두께가 2.0mm인 경우는 52.97MJ/m³이지만, 두께가 3.5mm인 경우는 9.1MJ/cm³로 82.8%나 줄어든 결과를 보여주고 있다. 이 결과는 안전모의 두께가 두꺼워질수록 충격에너지 흡수율은 떨어지고, 정상부에 돌출부를 설치할 경우는 충격강도 안전성 측면에서 볼 때 유리하지만, 머리로 전달되는 충격에너지 감쇄효과 측면에서는 불리하다는 것이다.

따라서 안전모의 두께를 증가하거나, 정상부에 돌출 구조물을 설치할 경우는 머리로 전달되는 충격에너지를 줄이기 위해 머리끈을 비롯한 착장체를 설계할 때 충격에너지 전달율을 줄이기 위한 댐핑 소재를 사용하는 것이 중요함을 예상할 수 있다.

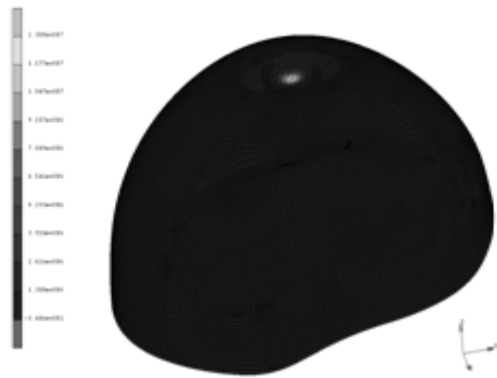
Fig. 7은 두 가지 안전모에 대한 최대 변형률 에너지 밀도를 제시한 결과이다. FEM 해석결과에 의하면, 안전모의 두께가 두꺼워질수록 충격에너지 밀도는 포물선적으로 떨어지는 결과를 제시하고 있다. 이것은 충격에너지를 흡수하는 감쇄효과가 줄어든다는 것을 의미한다.



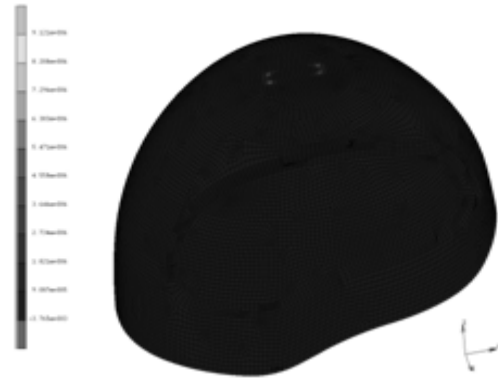
(a) For 2.0 thickness



(a) For 2.0 thickness



(b) For 3.5 thickness



(b) For 3.5 thickness

Fig. 5. Strain energy density distributions of conventional helmets.

Fig. 6. Strain energy density distributions of modified helmets with a extruder.

또한, Fig. 7에서는 종래의 안전모가 새로운 안전모에 비해 최대 변형률 에너지 밀도가 높게 나타났는데, 이것은 종래의 안전모 정상부에서는 변형률이 대단히 높기 때문에 충격흡수성이 우수한 것이다. 반면에 정상부에 돌출 구조물을 설치한 새로운 안전모의 충격강도는 우수하지만 상대적으로 충격에너지 밀도가 낮아 머리로 전달되는 충격에너지가 그만큼 높아지기 때문에 불리하다는 것이다. 따라서 새로운 안전모처럼 돌출부를 설치하여 강도 안전성을 확보한 안전모를 설계하기 위해서는 머리끈 및 착용체의 감쇄효과를 극대화시킬 수 있는 댄핑설계를 해야 더 안전한 안전모가 될 것이다.

Fig. 8은 안전모의 정상부에 외부 충격력 4,540N을 가할 때 충격력을 받는 하중면적의 크기에 따라 달라지는 충격에너지 감쇄도 안전성을 해석한 결과이다. 해석결과에 의하면 충격력을 받는 하중면적이

증가함에 따라 최대 충격에너지 밀도는 포물선적으로 줄어드는 경향을 나타내고 있다. 충격력을 받는 하중면적이 0.2mm^2 일 경우의 최대 충격에너지 밀도는 $60.6\text{MJ}/\text{m}^3$ 으로 높지만, 하중면적이 1.2mm^2 일 경우는 $13.1\text{MJ}/\text{m}^3$ 으로 78.4%나 급감하고, 그 이후로는 수렴하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 외부에서 가해지는 충격력이 안전모의 정상부에 작용할 때 하중면적이 커질수록 머리로 전달되는 충격에너지는 상대적으로 증가하여 머리가 멎해지는 충격을 받을 가능성이 높다는 것을 의미한다.

따라서 안전모의 강도 안전성을 높이기 위해서는 안전모의 두께를 증가하고, 정상부에 돌출 구조물을 설치하는 것이 효과적이지만, 이러한 설계기술은 머리로 전달되는 충격에너지를 완화시킬 수 없기 때문에 안전모 고정용 끈과 착용체에 설치되는 댄핑설계에 의해 해결하는 것이 최상임을 알 수 있다.

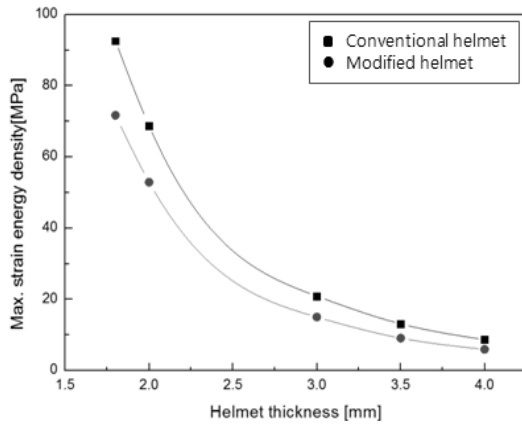


Fig. 7. Maximum strain energy density of the helmets.

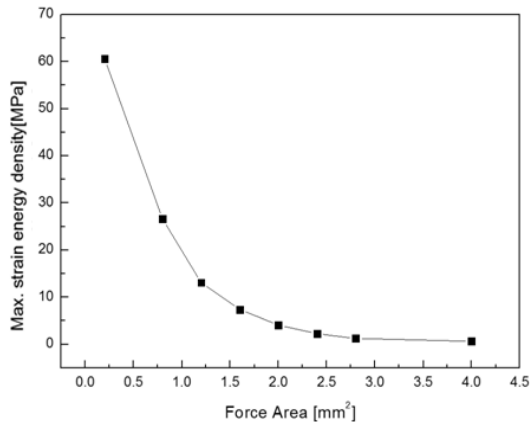


Fig. 8. Maximum strain energy density of the helmets.

IV. 결론

종래의 안전모와 정상부에 돌출 구조물을 갖는 새로운 안전모에 대한 충격강도 안전성과 충격에너지 감쇄효과를 상대적으로 비교하였다.

FEM 해석결과에 의하면, 강도 안전성 측면에서 볼 때 종래의 안전모는 정상부에 돌출 구조물을 설치한 새로운 안전모에 비해 충격강도는 떨어지지만, 충격에너지를 흡수하는 감쇄용량 측면에서는 유리함을 알 수 있다. 따라서 정상부에 돌출 구조물을 설치하여 강도 안전성을 높인 안전모는 머리띠 및 착용체에 충격에너지를 완화시킬 수 있는 댐핑 설계를 추가해야 안전모의 충격에너지 전달 차단효과를 기대할 수 있다.

참고문헌

- [1] 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)
- [2] 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)
- [3] "MARC user's manual," Ver. K6.1, MARC Analysis Research Co., (1996)
- [4] Protective helmets standard, MOEL, (1997. 12. 29)
- [5] NFPA standards 1971-2000, National Fire Protection Association, (2007)