



안전헬멧의 응력 및 변형거동에 관한 유한요소해석

*김청균

홍익대학교 트리보메카·에너지기술 연구센터
(2009년 5월 27일 접수, 2009년 8월 17일 수정, 2009년 8월 17일 채택)

Finite Element Analysis on the Stress and Deformation Behaviors of a Safety Helmet

*Chung Kyun Kim

Research Center for Tribology, Mechatronics and Energy Technology
Hongik University, Seoul 121-791, Korea
(Received 27. May. 2009, Revised 17. August. 2009, Accepted 17. August. 2009)

요 약

본 본문에서는 헬멧의 정상부에 별도로 보강뼈대를 설치하지 않은 경우에 헬멧의 두께를 변수로 헬멧 구조물에 걸리는 응력과 변형거동 특성을 유한요소법으로 해석하였다. 헬멧은 현장 작업자의 안전성과 충격에너지 흡수력을 높일 수 있도록 제작해야 하고, 헬멧을 오랫동안 착용해도 불편함이 없어야 하며, 또한 머리와 목을 보호할 수 있어야 한다. FEM 해석결과에 의하면, 외부의 충격력이 헬멧의 꼭대기에 가해졌을 때 헬멧에 작용하는 최대응력과 최대변형은 하중이 작용하는 지점에서 발생하고, 최대응력은 헬멧모체 구조물의 초기파손을 일으키는 원인으로 작용하는 것으로 나타났다. 헬멧의 두께를 4mm에서 2mm로 줄이면, 충격에너지 흡수율은 급격하게 증가하지만 헬멧에 작용하는 최대응력은 열가소성 소재의 인장강도 54.3MPa를 많이 초과하므로 파손되었다 할 수 있다. 따라서 헬멧의 강도안전을 확보하기 위해서는 헬멧의 정상부에 보강뼈대를 설치하는 것이 바람직하고, 헬멧모체 구조물의 두께를 보다 두껍게 설계할 필요가 있다.

Abstract - This paper presents the stress and deformation behaviors using the finite element method as a function of the thickness of the helmets without the bead frames on the top of the shell structure. The helmet that would provide head and neck protections without causing discomfort to the user when it was worn for long periods of time should be manufactured for increasing the safety and impact energy absorption. The FEM computed results show that when the impulsive force is applied on the top surface of a helmet, the maximum stress and strain have been occurred around the position of an applied impact force, which may lead to the initial failure on the top surface of the helmet shell. As the helmet thickness is decreased from 4mm to 2mm, the impact energy absorbing rate is radically increased, and the maximum stress of the helmet is increased over the tensile strength, 54.3MPa of the thermoplastic material. Thus, the top surface of the helmet should be supported by a bead frame and increased thickness of the shell structure.

Key words : safety helmet, strength safety, stress, strain, fem, bead frame

*주저자:ckkim_hongik@naver.com

I. 서론

가스폭발이나 화재발생과 같은 위험한 환경에서 작업을 수행해야 하는 가스기술자나 소방관이 갖추어야 하는 직접적인 개인안전 용품에는 머리에 쓰는 헬멧을 비롯하여 안전화 또는 방화복, 안전장갑 등이 있고, 간접적인 안전장비로는 무전기, 온도감지 장치, 위치추적 장치, 영상정보 장치, 헤드램프 등이 있다.

특히 헬멧은 가스·연료와 같은 위험물 취급장소나 화재현장에 진입하는 사람의 머리를 보호하기 위해 반드시 착용하는 안전모로, 외부의 물체가 헬멧에 부딪히면서 머리와 목에 전달되는 충격에너지를 최소로 줄일 수 있도록 감쇠효과가 우수해야 하고, 화재현장의 열원에 의한 화상을 차단할 수 있어야 한다.

위험장소에서 사용하는 안전모는 레포츠용 또는 산업현장용 안전헬멧에 비해 고강도와 방수성을 비롯하여 많은 기능성을 요구하지만, 수요가 대단히 적어 사업성은 많이 떨어지는 제품으로 기술개발을 추진하기가 현실적으로 어렵다. 수요가 많은 레포츠용 헬멧은 국산제품도 많지만, 다양하게 개발한 안전성이 높은 외국제품이 수입되면서 국내 제조메이커는 고전하고 있다. 또한, 소방용 헬멧은 제한된 시장규모와 외국사가 우리의 두상과 체구에 적합

하도록 새로운 헬멧을 개발하기 어렵다는 측면에서 국내업체의 독과점이 예상되나, 실제로는 헬멧업체의 영세성으로 국내 제품의 성능과 품질, 디자인 등에서 외국제품과 비교하기에는 어려움이 있다.

본 연구에서는 안전헬멧의 강도안전을 확보할 수 있는 응력 및 변형거동에 대한 수치해석 기반연구를 수행하고자 한다. 사람들이 헬멧을 사용하는 첫 번째 목적은 강도안전을 확보하여 사람의 머리를 보호하자는 것으로 유한요소해석을 통한 헬멧의 응력분포 및 변형거동에 대한 안전성을 기존의 헬멧을 중심으로 고찰하고자 한다.

II. 헬멧종류 및 구조

2.1. 헬멧의 종류

헬멧은 외부의 비산물체나 낙하물체에 의한 충돌력과 외부의 충격력에 충분히 견딜 수 있는 정도의 기계적 강도를 확보하고 있어야 한다. 또한 헬멧을 착용하고 있던 사람이 화재현장에서 넘어질 경우 머리에 가해지는 충격력을 어느 정도 흡수할 수 있어야 한다.

Fig. 1은 소방헬멧으로 사용하고 있는 대표적인 모델로, 헬멧의 정상부에 작용하는 하중을 효과적으로 대응하기 위해 다양한 형상의 주름뼈대를 설치하고 있다. 헬멧의 충격강도를 확보하기 위해



(a) One bead frame



(b) Three bead frames



(c) Four bead frames



(d) Six bead frames

Fig. 1. Shell structure models with various bead frames of helmets.

많이 사용하는 모델은 Fig. 1(a)로 주름뼈대의 배열을 단순하게 일자형으로 설치하여 한국의 행정안전부[1]나 미국의 NFPA[2]에서 요구하는 충격전달력 제한조건을 충족하고 있다.

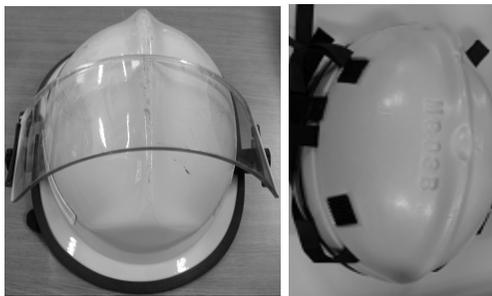
헬멧은 사람의 머리를 보호하고 오랫동안 착용해도 피로감을 느끼지 않도록 개발하는 것이 중요하다. 안전조건을 만족하기 위해서 최고의 소재를 선정하면 되지만, 실제로는 기능적으로 모든 특성을 보유한 소재를 찾기는 불가능하므로 헬멧의 안전성과 기능성을 함께 확보할 수 있는 최적설계 기술을 적용하여 개발해야 한다.

따라서 Fig. 1에서 제시한 여러 가지 보강뼈대를 안전하게 설계하고, 최적의 소재를 개발하여 타원반구형상의 다양한 헬멧을 디자인하게 된다. 결국 헬멧 개발자는 헬멧의 강도와 안전성, 착용감과 충격에너지 감쇠효율에 대한 설계요소를 감안하여 가벼운 헬멧을 개발하려고 노력한다.

2.2. 헬멧의 구조 및 소재

비산체, 낙하체가 발생하는 위험한 작업환경에서 사람의 머리부상을 방지할 수 있도록 착용하는 헬멧은 모체, 착장체, 충격흡수재, 턱끈, 반사표시, 보안렌즈, 벽걸이장치, 물받이 등으로 구성되며, 무게는 보통 1.1~1.3kg에 달한다.

Fig. 2에서 보여준 모체(shell)는 헬멧 착용자의 머리를 덮는 최외곽의 플라스틱 사출제품으로 외부에서 가해지는 충격력[3]과 열원을 감당하고, 물이나 가스과 같은 유체, 먼지나 모래와 같은 분체를 막아주는 구조물이다. 따라서 헬멧의 모체는 경량의 내열성, 내식성, 내수성, 내충격성, 내화학성을 갖는 열가소성 플라스틱 소재를 사용하는 것이 일반적이고, 착용자의 시야 확보와 작업성을



(a) Shell structure (b) Energy absorber

Fig. 2. Conventional helmet with energy absorbing impact cap.

높이면서 착용감이 우수하도록 설계하는 것이 중요하다.

충격흡수재는 헬멧에 충격력이 가해질 때 헬멧 착용자의 머리나 목 부위로 전달되는 충격에너지를 완화하기 위해 헬멧모체의 내면에 붙이는 부품으로 다양하게 개발되어 있다. 따라서 충격흡수재는 가벼우면서 에너지 흡수효과가 높은 고탄성 수지를 사용하는 것이 일반적이다.

III. FEM 강도해석

3.1. 해석모델

헬멧의 강도안전과 충격에너지 흡수력에 관련된 응력과 변형거동 특성을 해석하기 위해 Fig. 3에서 보여준 것과 같은 타원의 반구형 헬멧모델에 대해 헬멧 두께를 설계변수로 FEM 해석[4]을 수행하였다.

FEM 강도해석에서 헬멧의 두께는 직경에 비해 대단히 작기 때문에 6면체요소(hexahedral element)를 사용하였고, X축과 Z축에는 대칭적 구속조건을 적용하였다. 또한 헬멧을 바닥에 놓았을 때의 경계조건은 Y=0을 적용하여 X-Z축의 거동특성에 대해 고찰하였다.

3.2. 해석조건

헬멧의 강도안전과 변형거동 안전성은 행정안전부의 소방용 헬멧규격[1]과 성능시험에 대한 미국의 NFPA 1971[2] 기준을 따라 고찰하였다.

모체 구조물에 대한 강도안전 및 충격에너지 흡수력을 예측하기 위해 Fig. 3의 해석모델에 대한 두께를 변경하면서 유한요소법으로 상대적인 비교 연구를 수행하였다. 헬멧에 가해지는 충격하중은

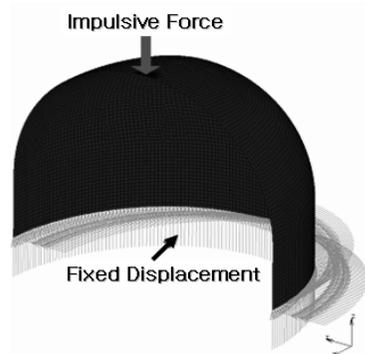


Fig. 3. Finite element meshes and boundary conditions.

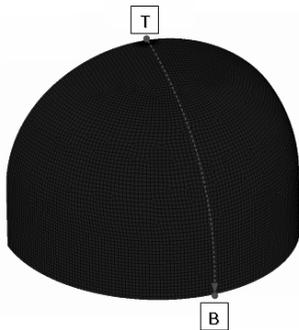
Fig. 3처럼 헬멧의 모체 정상부에 작용한다고 가정하였고, 헬멧에 걸리는 응력과 변형조건을 두께의 변화에 따라 안전성을 검토하였다.

헬멧의 치수와 형상은 기존에 널리 사용하는 헬멧을 기준으로 상대적인 추정치를 사용하였고, 헬멧의 소재로는 인장강도 54.3MPa, 탄성계수 2.53GPa, 포아송비 0.39를 갖는 열가소성 플라스틱 수지를 선정하였다.

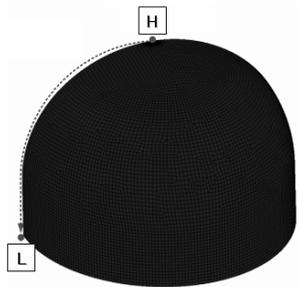
IV. 해석결과 및 고찰

Fig. 5~8의 FEM 해석결과에서 고려한 헬멧 정상부의 충격하중은 한국소방검정공사(KFI)에서 안전조건으로 요구하는 최대하중 4,540N을 기준으로 안전성을 해석하였다.

Fig. 4에서 보여준 타원의 반구형 헬멧모델에서 Fig. 4(a)는 헬멧의 전후방향을 나타내는 장반경을 따라서 정상부 [T]에서 바닥면 [B]까지 모체의 외곽면을 따라 예측한 응력과 변위량 결과를 도출한



(a) Results along the major axis



(b) Results along the minor axis

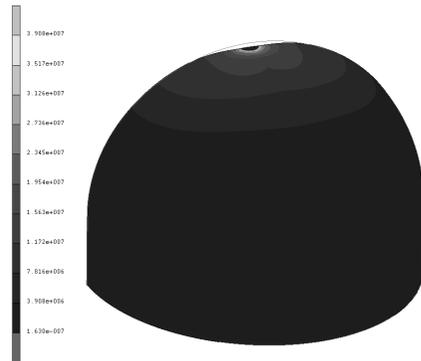
Fig. 4. Calculated stress and displacement from the top to the bottom of helmets.

것이고, Fig. 4(b)는 헬멧의 좌우방향을 나타내는 단반경을 따라서 정상부 [H]에서 [L]까지 측정된 응력과 변위량에 관한 것이다.

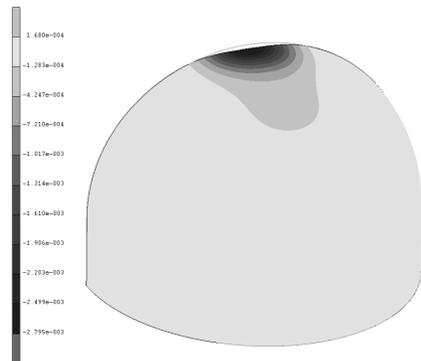
헬멧의 강도안전과 변형거동 특성에 대한 FEM 해석결과를 제시한 Figs. 5~8은 헬멧의 두께가 2~4mm인 경우로 헬멧의 강도안전에 중요한 설계요소로 작용함을 고찰할 수 있다.

Fig. 5는 두께가 4mm인 헬멧의 정상부에 충격하중 4,540N을 가한 상태에서 FEM으로 해석한 von Mises 응력과 변위량 분포도에 대한 계산결과이다.

안전헬멧의 모체 구조물에 걸리는 von Mises 최대응력은 39MPa로 헬멧의 정상부에 집중적으로 작용하고, 수직방향의 최대변위 2.79mm은 하중이 작용하는 지점에서 헬멧이 함몰되는 현상으로 나타났다. 이러한 해석 데이터는 플라스틱 수지소재

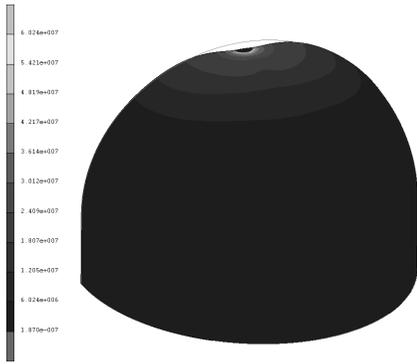


(a) von Mises stress

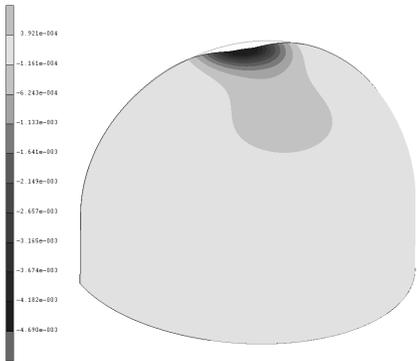


(b) Displacement in y direction

Fig. 5. von Mises stress and vertical displacement distributions for 4mm helmet thickness.



(a) von Mises stress



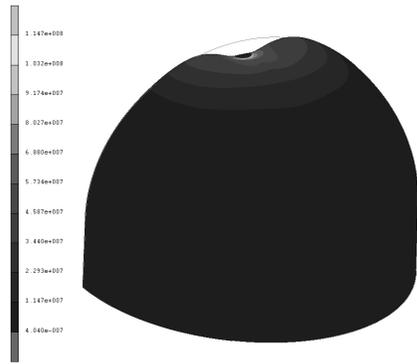
(b) Displacement in y direction

Fig. 6. von Mises stress and vertical displacement distributions for 3mm helmet thickness.

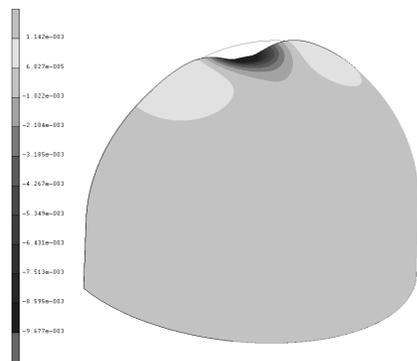
의 인장강도나 KFI의 안전기준을 모두 만족하는 것으로 4mm 두께의 헬멧은 별도의 보강뼈대를 설치하지 않아도 강도안전성 측면에서는 안전하다 평가할 수 있다.

Fig. 6은 헬멧의 두께가 3mm인 경우에 대한 von Mises 응력과 변위량 분포에 대한 안전성 해석결과를 보여주고 있다.

헬멧에 걸리는 von Mises 최대응력은 60MPa로 헬멧의 정상부에 집중적으로 작용한다. 이것은 플라스틱 수지의 인장강도를 넘었기 때문에 헬멧 구조물의 강도는 보장할 수 없다. 따라서 3mm 두께로 제조된 헬멧의 강도안전성을 확보하기 위해서는 두께를 보다 두껍게 하거나, 또는 헬멧의 정상부에 별도의 보강뼈대를 설치하여 하중이 작용하는 지점의 강도를 높이는 것이 바람직하다. 또한



(a) von Mises stress



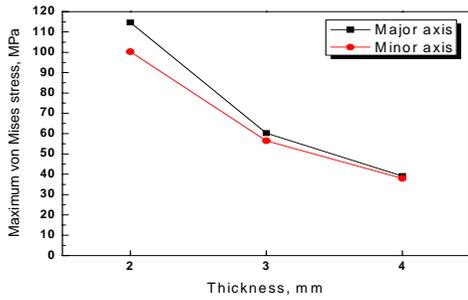
(b) Displacement in y direction

Fig. 7. von Mises stress and vertical displacement distributions for 2mm helmet thickness.

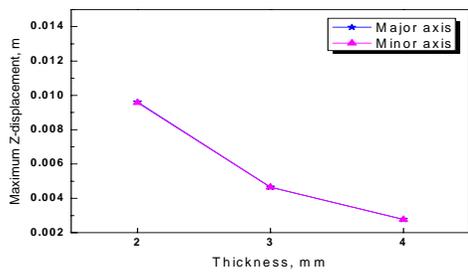
충격에너지 흡수력을 나타내는 수직방향의 최대 변위량 4.69mm은 하중이 작용하는 지점에서 함몰되는 방향으로 나타났으며, 이것은 4mm 두께의 헬멧에 비해서 감쇠효과는 우수하다 할 수 있다.

Fig. 7은 헬멧 모체의 두께가 2mm인 경우에 대한 von Mises 응력과 변위량 분포에 대한 FEM 해석결과를 제시한다.

헬멧에 걸리는 von Mises 최대응력은 114MPa로 대단히 높으며, 이것은 모체소재의 인장강도를 크게 넘어섰기 때문에 헬멧 구조물의 강도안전성은 상실한 것으로 판단된다. 또한 충격에너지 흡수력을 나타내는 수직방향의 최대변위량은 9.67mm로 대단히 우수하지만, 너무 많이 함몰되었기 때문에 KFI의 안전기준을 통과하기가 어렵다. 따라서 헬멧의 두께를 2mm로 설계할 경우는 헬멧의 정상부



(a) Maximum von Mises stress



(b) Maximum displacement in y direction

Fig. 8. Maximum von Mises stress and vertical displacement as a function of a helmet thickness.

에 특별한 보강뼈대를 별도로 설치하고, 두께를 증가하는 최적설계를 수행해야 헬멧은 안전하게 사용할 수 있다.

Fig. 8은 헬멧 구조물의 두께변화에 따른 von Mises 최대응력과 수직방향의 최대변위량을 Fig. 4에서 표시한 장축과 단축을 따라서 측정한 해석 결과를 제시하고 있다. 최대응력을 제시한 Fig. 8(a)의 결과에 의하면, 헬멧의 두께를 3mm 이하로 설계할 경우는 응력이 수지소재의 인장강도를 넘어서기 때문에 강도안전 측면에서 위험하다. 특히 정상부 ㉠에서 바닥면 ㉢를 따르는 장축방향의 헬멧 구조물에서 상대적으로 높은 응력이 걸리므로 헬멧의 두께를 증가하는 것이 필요하고, 또한 강도 문제를 해결하기 위해서는 헬멧의 정상부에 Fig.

1에서 보여준 보강뼈대를 설치하는 것도 하나의 대안이 될 수 있다.

헬멧 모체의 충격에너지 흡수력을 나타내는 변위거동 특성을 요약한 Fig. 8(b)에서 헬멧의 두께 변화에 따른 변위량 거동결과를 제시하였는데, 헬멧의 두께가 얇을수록 감쇄효과는 대단히 우수해 지지만, 2mm 두께처럼 너무 얇게 제작하면 강도안전에서 더 큰 문제가 제기되고, 또한 수직방향의 변위량이 너무 많이 발생되어 KFI의 검사기준을 만족하지 못하기 때문에 인증을 받을 수 없다. 따라서 헬멧은 어느 정도의 최소두께를 확보해야 하고, 동시에 Fig. 1에서 제시한 여러 가지의 보강뼈대를 설치하는 것도 강도안전을 확보하는 측면에서 유리할 것이라는 해석결과를 Fig. 8에서 제시하였다.

V. 결론

헬멧 모체의 정상부에 별도의 보강뼈대가 없는 소방헬멧에 대한 강도안전과 변형거동 특성을 헬멧의 두께(2mm~4mm)에 대해 FEM으로 해석하였다.

FEM 해석결과에 의하면, 헬멧의 두께가 4mm인 경우는 강도안전성은 우수하여 별도의 보강뼈대를 설치하지 않아도 되지만, 충격에너지 흡수효과는 상대적으로 떨어지는 것으로 나타났다. 반면에 3mm 이하의 헬멧은 충격에너지를 흡수하는 변형거동성은 대단히 우수하지만, 강도안전성을 상실하기 때문에 헬멧의 정상부에 별도의 보강뼈대를 설치하여 강도를 높여야 특히 강도안전성을 확보할 수 있다.

참고문헌

- [1] 소방용헬멧 규격서, 행정안전부 제정, (2001. 9. 29)
- [2] NFPA standards 1971-2000, National Fire Protection Association, (2007)
- [3] 한응교, 엄기원, 박준서, 이성우, “소방 안전모의 안전도 평가에 관한 연구”, 한국화재학회지, Vol. 5, No. 3, pp.5-14(1991. 11.).
- [4] “MARC user’s manual,” Ver. K6.1, MARC Analysis Research Co., (1996)