

# 고령운전자 안전도 향상을 위한 흉곽 유한요소 모델 개발 Development of Rib cage FE model for Older Occupants safety

\*한인석<sup>1</sup>, #김영은<sup>2</sup>

\*I. S. Han<sup>1</sup>, #Y. E. Kim(yekim@Dankook.ac.kr)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 단국대학교 대학원 기계공학과, <sup>2</sup> 단국대학교 기계공학과

Key words : Thorax, Rib, Cortical bone, Cancellous bone, Older occupants

## 1. 서론

과학과 의학기술의 발전으로 인하여 인간의 평균수명이 빠르게 증가하고 있다. 이에 따라 인구의 고령화 문제가 세계적인 현상으로 나타나고 있다. 이러한 추세로 인해 고령운전자 또한 증가하고 있는데, 이들은 젊은 운전자에 비하여 대처능력 및 판단력이 떨어지기 때문에 사고발생 위험이 높고, 사고 시 치사율이 높게 나타나는 특징을 가지고 있다. 이에 따라 최근 들어 고령운전자의 안전에 관련된 많은 연구들이 새롭게 진행되고 있다.

Kent<sup>(1)</sup> 등에 의하면 정면충돌 관련 사망자 중 흉부 부상으로 인해 사망한 비율이 16~33세 연령군에서는 22%인 반면 64세 이상 고령운전자의 경우 47%로 약 두 배의 사망률을 보이고 있다. 또한 고령운전자의 상해발생 주요 부위는 흉부임을 보였다. 이와 관련하여 인체 유한요소모델(H-Thorax, ESI Software)에 늑골(Rib)의 각도 변화와 물성변화, 피질골의 두께 변화를 적용하여 벨트 하중(Belt Loading)에 따른 영향을 평가하였다. 이를 통해 늑골의 각도가 증가 할수록, 물성과 피질골의 두께가 줄어들수록 골절 위험성이 커지는 것을 보였다. 하지만 연구에 사용된 유한요소 모델 H-Thorax의 경우 늑골의 피질골(Cortical bone)의 두께가 5mm로 적용되어 있는 모델로서, 실제 두께(0.7~1.3mm)에 부합되지 않았으며, 단순히 뼈의 물성을 30~40% 낮추어 그에 따른 경향성만을 고려했다는 제한점이 있다.

따라서 본 연구에서는 고령운전자의 주요 상해 부위인 흉부의 상해도를 보다 자세하게 평가할 수 있는 유한요소 흉곽 모델을 개발하여 타당성을 검증하고, 개발된 모델을 사용해 연령증가에 따른 늑골의 물성과 형상 변화가 흉부 상해에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 모델개발

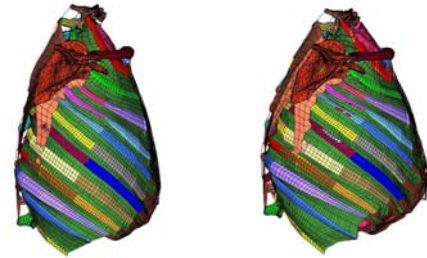
### 2.1 성인 모델

본 연구를 통해 개발된 모델은 흉부 상해를 보다 정확히 판단하기 위해 늑골의 형상과 해면골(Trabecular bone)의 면적분포, 위치에 따른 피질골의 두께 차이 등을 고려하여 개발하였다. 모델은 요소생성 프로그램 HyperMesh(Altair engineering)를 이용하여 모델링하였으며, 해석은 PamCrach(ESI software)로 진행하였다. 대상 모델은 미국 성인 남성 평균 신체사이즈에 해당하는 Visible Human(Digimation)의 형상을 기초로 늑골과 추체(Vertbral body),

흉골(Sternum), 늑연골(Costal cartilage) 등의 형상을 형성하였으며, 해부학적 자료를 토대로 추체관련 7종류의 인대(Ligament)와 흉곽(Rib cage)관련 8종류의 인대를 부착하였다. 늑골결절(Tubercle of Rib)과 추체 사이는 접촉(Contact)조건을 설정하고 방사상늑골두인대(Radiate ligament)를 부착하여 생성하였다. 폐와 심장 등의 내장기관은 전체를 한 모델로 설정하였으며 점탄성 물성치를 대입하였다.(Fig.1\_A)

### 2.2 고령자 모델

Gayzig<sup>(2)</sup> 등은 63명의 CT 이미지를 재건(Reconstruction)하는 방법을 통해 노화에 따른 흉곽 형상의 변화를 전체 106점(Point)에 대한 각각의 변화량을 구하였으며, 이를 수학적 계산식으로 정량화하였다. 노화에 따른 해면골과 피질골, 늑연골 등의 물성변화를 연령대별로 제시된 데이터(Zhou et. al<sup>(3)</sup>)를 본 모델에 적용시켰다.



(A) Adult model (B) Aged model  
Fig. 1 Developed Rib cage FE model

이와 같은 연구내용을 참고하여 일반 성인 모델(20세)의 형상과 물성을 변화시켜 고령자 모델(65세)을 개발하였다. 적용된 물성변화 및 형상변화의 내용은 Table 1 과 같다.

Table 1 Aged model changes

| Object           | Rate of change  |
|------------------|-----------------|
| Cortical Bone    | 24.4% Reduced   |
| Cancellous Bone  | 57.8% Reduced   |
| Costal Cartilage | 67% Reduced     |
| Chest Depth      | 16.7% Increased |
| Chest Width      | 0.9% Increased  |
| Chest Height     | 6% Reduced      |

## 3. 모델 검증

### 3.1 늑골 모델 검증

흉부의 상해도를 자세하게 평가하기 위하여 개발된 모델의 타당성에 대한 보다 정확한 검증이 필요하다고 판단하여 먼저 늑골 각각에 대하여 검증한 뒤 전체 모델을 검증하였다.

Kemper<sup>(4)</sup> 등은 4~7번째 늑골의 탄성계수 및 항복응력 등의 물성과 관련하여 전방(Anterior)과 측면(Lateral)부분으로 각 영역에 대해 3점 굽힘 실험(3-point Bending test)을 실시하여 연구하였다. 개발된 성인 모델의 타당성을 검증하기 위하여 위의 연구와 동일한 해석조건(Span Length - 82.55mm, Impactor Speed - 177.8mm/sec, Impactor Radius - 4.8mm)을 적용하여 유한요소 해석을 진행했다.

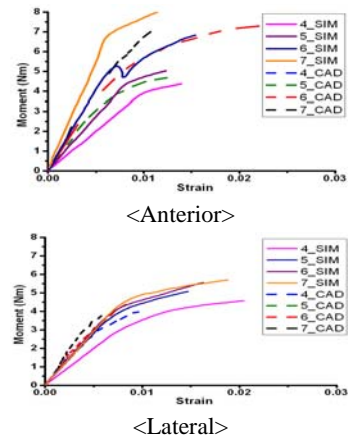


Fig. 2 Moment-strain comparison

3점 굽힘 해석 결과는 Fig. 2와 같이 실험적 결과와 잘 부합됨을 확인함으로써 각 늑골 모델에 대한 타당성을 검증하였다.

### 3.2 흉곽 모델 검증

전체 흉부 모델에 대한 타당성 검증을 위하여 4종류의 PMHS(Post Mortem Human Subject) pendulum impact test 결과와 해석결과를 비교하였다. Chest Deflection은 Impactor의 중심부와 맞닿는 포인트로부터 계산하고, 흉부의 반력은 Impactor와 흉곽 모델 간의 접촉력(Contact force)으로 계산하였다. 종류별 PMHS test 조건은 Table 2와 같다.

Table 2. PMHS pendulum impact test for the model validation

| Case No. | Description of the test conditions                   | Ref. No. |
|----------|--|----------|
| 1        | 23.4Kg 150mm disk at 4.9m/s to center of thorax      | [5]      |
| 2        | 23.4Kg 150mm disk at 6.9m/s to center of thorax      | [5]      |
| 3        | 23.4Kg 150mm disk at 9.9m/s to center of thorax      | [5]      |
| 4        | 23.4Kg 150mm disk lateral impact to thorax at 5.9m/s | [6]      |

해석결과 Fig. 3과 같이 4가지 조건의 해석 모두 하중-변위 곡선이 PMHS test Corridor 내에 존재함을 알 수 있었다.

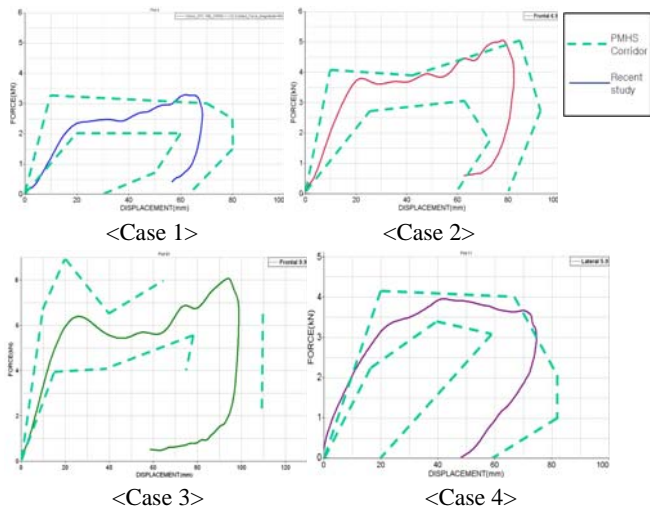


Fig. 3 Force-Deflection comparisons

각각의 늑골 과 흉곽모델을 해석한 결과 모두 실험적 결과와 부합됨을 확인함으로써 본 연구를 통해 개발된 모델의 타당성을 검증하였다.

### 4. 해석방법

정면충돌 시 성인 대비 고령자의 흉부 상해도를 평가하기 위하여 동일한 조건의 좌측벨트(Seat Belt)를 생성하고 양 끝단에 X방향으로 -2.5KN의 하중을 각각 부여했다. 흉곽 부분의 해석과 관련된 Shoulder 벨트를 제외한 나머지부분은 적용하지 않았으며, Slip ring조건을 부여하여 벨트 양 끝단의 움직임을 X방향을 제외한 나머지 방향에 대하여 구속하였다. 벨트하중에 의한 늑골의 상해도를 판단하기 위해 추체(Vertebral Body)를 모든 방향에 대해 구속하였다. (Fig. 4)



Fig. 4 Loading and Boundary condition.

### 5. 해석결과

고령자 모델의 경우 하중에 의해 생성되는 벨트와 흉곽사이의 접촉력이 성인모델에 비하여 크게 나타났다.(Fig. 5) 상해도 평가에서 가장 중요한 늑골 골절 위험(Fracture Risk)도의 경우도 고령자 모델이 더 크게 나타남을 알 수 있었다. 골절 위험도의 경우 피질골에 부여한 물성과 변형량(Strain)해석 결과를 바탕으로 판단하였다.(Fig. 6)

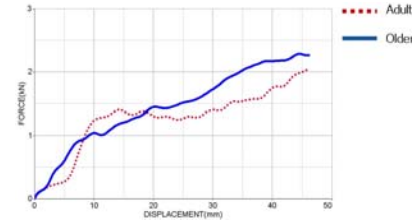


Fig 5. Force-Deflection curves of Adult and Older model

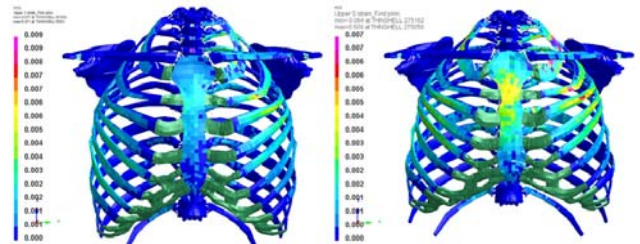


Fig 6. Strain contours of Adult and Older model

### 6. 결론

본 연구를 통해 노화 작용으로 인한 흉곽 형상 변화는 늑골과 벨트간의 각도를 커지게 만들고 이로 인해 늑골에 추가되는 하중이 커짐을 알 수 있었다. 또한 노화에 따른 물성 변화로 인하여 늑골과 늑연골에 많은 변형량이 발생되어 골절 위험도가 크게 증가함을 확인 할 수 있었다. 이상과 같이 고령자의 경우 일반 성인보다 상해 위험도가 상대적으로 높게 나타나기 때문에 이들의 안전을 위해 별도의 안전장치가 필요할 것으로 판단된다.

### 후기

본 연구는 국토해양부 교통체계효율화사업(06 교통핵심 C01)의 지원을 받아 수행되었음.

### 참고문헌

1. R. Kent, S. H. Lee, and Darvish K. "Structural and Material Changes in the Aging Thorax and Their Role in Crash Protection for Older Occupants," Stapp Car Crash Journal, 49, 231-249, 2005.
2. F. S. Gayzik, M. M. Yu, K. A. Danelson, "Quantification of Age-related shape change of the human rib cage through geometric morphometrics," BIOMECHANICS Journal, 41, 1545-1554, 2008.
3. Q. Zhou, Stephen, W. R. and John, W. M., "Age Effects on Thoracic Injury Tolerance," Stapp Car Crash Journal, SAE-962421, 1996.
4. A. R. Kemper, Craig M., Clayton A. P., Laura J. F., and Stefan M. Duma, "The Biomechanics of Human Ribs: Material and Structural Properties From Dynamic Tension and Bending Tests," Stapp Car Crash Journal, 51, 235-27, 2005.
5. Kroell C. K., Schneider D. C. and Nahum M., "Impact Tolerance and Response of the Human Thorax II," Stapp Car Crash Journal, 18, 741187, 1974.
6. Bouquet R., Ramet M., Bermond F., Cesari D., "Thoracic and Pelvis Human Response to Impact," 14th international Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, 100-109, 1994