

# 충격하중 시 경막하 출혈을 예측할 수 있는 유한요소 머리모델 개발

## Prediction of the subdural hemorrhage risk in a finite element head model

\*김영은<sup>1</sup>, #한인석<sup>2</sup>

\*Y. E. Kim<sup>1</sup>, #I. S. Han(haninseok@hotmail.com)<sup>2</sup>

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

Key words : Subdural hemorrhage, Bridging vein, Dura mater, Arachnoid membrane

### 1. 서론

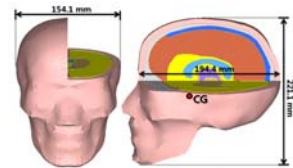
경막하 출혈(subdural hemorrhage)은 두개골(skull)에 붙어있는 경막(dura mater)과 뇌 표면을 둘러싸고 있는 지주막(arachnoid membrane) 사이를 이어주는 혈관(bridging vein)이 외상(trauma)에 의해 파열되어 뇌와 경막 사이의 경막하 공간(subdural space)에 혈액이 고이는 상태를 의미한다. 이러한 경막하 출혈은 낙상이나 교통사고와 같이 머리에 직접적인 충격과 함께 가속력에 의한 회전 운동량이 발생하는 경우에 주로 발생하는 것으로 알려져 있다.

그동안 Traumatic brain injury(TBI)와 관련하여 여러 연구자들은 유한요소 머리 모델을 활용하여 다양한 연구를 시도해 왔다. 하지만 이들 연구는 대부분이 Diffuse axonal injury(DAI)에 집중돼있으며, 경막하 출혈과 관련된 연구는 진행된 사례가 없다. 따라서 본 연구에서는 경막하 출혈을 예측할 수 있는 유한요소 머리모델을 개발하고, 충격방향에 따른 경막하 출혈 위험도를 분석하고자 하였다.

### 2. Method

머리 유한요소 모델의 형상은 표준사이즈의 서양 남성을 대변하는 NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) human anatomy model (Digimation, Inc., FL)을 참고 하였고, 상용 해석 프로그램인 LS-DYNA (version 971, Livermore Software Technology Co., CA)를 사용하여 해석하였다.

모델은 두피(scalp), 두개골(skull), 경막(dura), 지주막, 지주막하공간(subarachnoid space), 연막(pia), 대뇌 겹막(falx cerebri), 뇌(brain)로 구성하였다. 두피와 해면골(dipole)은 4 절점 사면체 요소로 구성하고 선형 물성을 입력하였으며, 경막과 대뇌겹, 피질골은 3 절점 삼각면



Component	Anatomical structure	Constitutive model	Element type
Scalp, dipole	2.5-4.2 mm thick	Linear elastic	4-node tetrahedron solid
Dura falx, cortical bone	0.4-3.0 mm thick	Linear elastic	3-node triangular shell
Arachnoid memb., pia	0.4 mm thick	Linear elastic	3-node triangular membrane
Arachnoid space	1.5-3.0 mm thick	Visco elastic	4-node tetrahedron solid
Cerebrum, cerebellum	-	Visco elastic	4-node tetrahedron solid
Ventricles	-	Linear elastic with "fluid" option	-
Model	Mass	Moment of inertia	# of elements and node
Head	4.5 kg	$I_x = 200 \text{ kg-cm}^2$ $I_y = 230 \text{ kg-cm}^2$ $I_z = 200 \text{ kg-cm}^2$	134921 elements 21600 nodes

Fig. 1 Developed FE head model.

요소로 구성하였고, 연막과 지주막은 3절점 막 요소로 구성하였다. 지주막하공간은 사면체 요소로 구성하고 매우 낮은 점탄성 물성을 입력하였다. 뇌는 백질(white matter)과 회백질(gray matter)을 따로 나누지 않고, 둘의 중간 값에 해당하는 물성을 부여하였다. 모든 뇌실(ventricle)은 사면체 요소로 모델링하고, elastic-fluid 물성을 입력하였다. 경막하 출혈은 경막과 지주막 사이를 연결하는 혈관이 파열되어 발생하기 때문에, 두 막 사이의 경계면에 대한 모델링은 무엇보다 중요하다. 경막과 지주막 사이의 경계면 설정은 여러 가지 방법으로 모사되어 왔다. Kleiven 과 Hardy는 Tie break, Tie, Sliding contact 등의 다양한 방법으로 구성하여 그에 따른 뇌의 거동과 내부 압력 변화를 분석한 결과, 지주막과 경막은 서로 묶여(Tie)있는 경우가 전반적으로 실험치에 가장 근접함을 보이고 있었다.<sup>(1)</sup> 또한, 경막과 지주막 사이에는 많은 혈관이 연결되어있고 대뇌낫 등에 의해 뇌의 상대적 운동은 매우 제한되게 된다. 따라서 많은 연구자들은 두 면 사이의 절점을 공유하는 방법을 이용하고 있다. 그러나 이와 같은 방법으로는 경막하 출혈을 예측할 수가 없다. 본 연구에서는 두 면의 이동량을 예측할 수 있도록 spotweld constraint를 경막과 지주막사이에 0.01mm간격을 두고 전체 노드에 대하여 설정해 주었다. 개발된 모델과 모델 세부정보는 그림1과 같다.

개발된 모델의 타당성 확보를 위해 Nahum 등<sup>(2)</sup>에 의해 수행된 사체 실험 data를 참고해 충격 하중 시 brain 내부 압력변화를 검증 하였고, Hardy 등<sup>(3)</sup>에 의해 수행된 연구결과를 참고하여 brain 거동을 검증하였다.

충돌 방향에 따른 경막하 출혈 가능성을 분석하기 위해 5.9kg의 impactor를 3방향(frontal, rear, lateral)에 대하여 6m/s의 속도로 하중을 부여하고 Spot-weld 요소에서의 전단력(shear force)을 계산하여 경막하 출혈의 가능성을 예측하여 보았다.

### 3. 결과

충격하중 시 두개내 압력에 대한 검증결과는 그림2와 같이 사체 실험결과에 부합하는 것으로 나타났다. 4가지 위치 모두에서 최대/최소 압력이 일치하고 있으며, 충격 이후의 압력변화 양상이 유사한 경향을 보였다. 뇌의 거동 검증 결과는 변위량과 거동양상이 사체실험에 부합하는 것으로 나타났다.

충격 방향에 따른 경막하 출혈 위험에 관한 시뮬레이션의 결과는 그림3 과 같다. 전체적인 경향은 충격력(impact force)을 직접적으로 받는 부위에서 전단력이 크며, 반대쪽에서도 마찬가지로 크게 나타나는 것으로 확인되었다. 측방향 충격 시 측두엽(temporal lobe) 부위와 후두와(posterior fossa) 부분에서의 전단력이 뚜렷하게 크게 나타나고 있어 경막하 출혈의 발생가능성이 가장 높음을 알 수 있었다. 최대 충격력이 발생하는 시점에서의 최대 전단력은 전방 충돌, 후방 충돌, 측면 충돌 각각에 대하여 6.57N, 5.76N, 8.30N으로 계산 되었다.

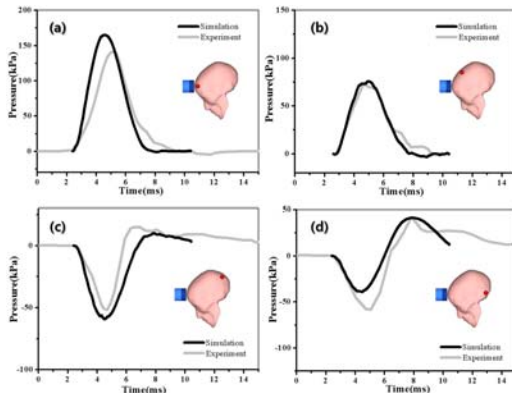


Fig. 2 Time history curves of intracranial pressure at (a)frontal, (b)parietal, (c)occipital and (d) posterior fossa region.

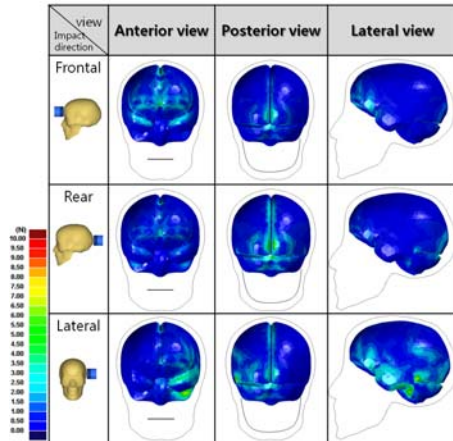


Fig. 3 The contour plots of shear force at the time when peak impact force was generated

### 4. 결론

경막과 지주막 사이의 인터페이스를 기존의 방법이 아닌 새로운 방법(spotweld constraint)을 사용하여 둘 사이에서 발생하는 상대적 이동량을 예측할 수 있는 모델을 개발하였다. 따라서 본 연구를 통해서 개발된 유한요소 모델은 기존 모델들에서 수행한 DAI뿐만 아니라 경막하 출혈의 위험도까지 분석 가능하기 때문에 다양한 응용연구에 활용도가 높을 것으로 기대된다.

### 후기

본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2012-0000783)

### 참고문헌

1. Kleiven, S. and Hardy, W., N., "Correlation of an FE Model of the Human Head with Local Brain Motion--Consequences for Injury Prediction," Stapp Car Crash J., **46**, 123-44, 2002.
2. Nahum, A., M., Smith, R., and Ward, C., C., "Intracranial pressure dynamics during head impact," Stapp Car Crash J., **50**, 509-44, 1977.
3. Hardy, W., N., Foster, C., D., Mason, M., J., Yang, K., H., King, A., I. and Tashman, S., "Investigation of Head Injury Mechanisms Using Neutral Density Technology and High-Speed Biplanar X-ray," Stapp Car Crash J., **45**, 337-68, 2001.