J. of KOSOMBE
Vol. 19, No. 6, 611-616, 1998

성인 뇌와 유아 뇌 모델의 진동 특성 해석

김 영 은·유 진 환

단국대학교 기계공학과, 단국대학교 대학원
(1998년 11월 6일 접수, 1998년 12월 12일 채택)

Analysis of the Vibratory Characteristic of the Adult's and Baby's Brain Model

Y.E. Kim, J.H. Yu

Department of Mechanical Engineering Dankook University
(Received November 6, 1998, Accepted December 12, 1998)

요 약 : 머리(뇌 포함) 부분에 대한 3차원 유한 요소 모델을 이용하여 진동 방향에 따른 응답특성을 해석하였다. 해석 결과 성인의 뇌는 9Hz, 14Hz에서 고유 진동수를 나타내었으며 유아의 뇌에서는 2Hz, 3Hz에서 고유 진동수가 계산되었다. 진동 방향에 관계없이 각 진동에 대해 계산된 가속도를 제외한 전단력, 압력, von-Mises 값의 최대, 최소값의 비는 성인에 비해 유아모델에서 더 크게 나타났다. 각 고유 진동수에서 성인모델은 14Hz에서 상지 중추보다 하지 중추를 관장하는 뇌의 영역에서 보다 큰 응력이 계산되어 상지에 의한 오동작 보다 하지에 의한 오동작을 일으킬 가능성이 더 큼을 유추할 수 있었다.

Abstract : Using three dimensional finite element model of the human brain, vibratory characteristics of the human brain according to vibratory direction was analyzed. From this analysis 9, 14Hz and 2, 3Hz natural frequencies were calculated for adult's and baby's brain model respectively. Regardless of the vibratory direction relatively high shear stress, pressure and von Mises stress variation except acceleration were detected in the baby brain model. At each natural frequencies, adult's model showed relatively high stress level in the region of lower limb control area compared with upper limb control area at 14Hz natural frequency.
Key words : Human Brain, Vibration, Natural frequency, Finite element model

서 론

인체는 매일 같이 크고 작은 진동에 노출되어 있다. 그 중에서도 큰 진폭의 진동이 발생되는 중장비(불도저, 굴착기, 천장 크레인 등)나, 또 그에 비해 진폭은 적지만 장시간 진동에 노출되는 대형 자동차의 운전자는 지속적인 진동에 노출된 결과 진동에의한 통증을 호소하는 경우가 매우 많다. 특히 일정 주파수대에 노출된 경우에는 운전자가 오동작으로 인한 안전사고를 일으키기도 한다. 이렇게 심각한 사고를 유발할 수 있음에도 불구하고 인체에 대한 진동 특성 해석은 최근 들어서야 활발히 진행되기 시작하였으며, 인체의 특정 부분에 대한 진동 특성 해석에 대한 연구는 아직 초기상태에 불과한 형편이다. 그러나 특히 인체 부분중 머리 부분에 대한 진동 특성 해석은 뇌의 기능적 중요성으로 미루어 볼 때 매우 중요한 연구과제이나 인체에 대한 실험시 유발되는 많은 제약 때문에 그동안 이에 대한 연구는 매우 제한적으로만 수행되어 왔었다. 이에 대한 최초의 연구는 Ward[1] 에 의한 시상면(sagittal plane)에 대칭된 매우 간단한 형태의 뇌의 유한요소 모델을 들 수 있으며 해석 결과 23.1Hz로부터 50.0Hz까지 무려 18개의 공진 주파수를 찾아내었다. 그러나 개발된 모델에 대한 검증절차가 없어 최초의 해석적 시도로만 의미를 부여할 수 있을 뿐이었다. 뇌에대한 직접적 진동해석은 최근까지 뚜렷한 진전을 보이고 있지 못하였으나 실험적

본 연구는 단국대학교 연구비 지원에 의해 연구되었음.
통신저자 : 김영은, (140-714) 서울시 용산구 한남동 산 8
단국대학교 기계공학과,
Tel. (02)709-2561, Fax. (02)790-9661
E-mail : yekim@ns.dankook.ac.kr

방법에 의한 인체의 안락도 측정은 영국의 South Hampton 대학의 I.S.V.R.에서 지속적으로 연구되고 있다. 그리고 이와같은 연구결과는 ISO기준치 작성에 이용되었다. Ziegenruecker and Magid[2]가 행한 실험에 의하면 인체는 1-3Hz의 저 주파수에서는 소화장애(dyspnea)를 겪게되고 15Hz에서는 모든 측정 대상자들이 일반적인 불쾌감을 나타낸 것을 볼 수 있었다. Griffin과 Whitham[3]은 112명(남성 56명, 여성 28명, 어린이 28명)을 대상으로 하여 4Hz와 16Hz의 수직 방향으로의 조화(sine) 진동에서 각 그룹이 느끼는 불쾌감의 차이에 대하여 연구를 하였으며 같은 크기의 가속도의 경우 4Hz, 16Hz에서 80%의 실험 대상자가 매우 큰 불쾌감을 나타냄을 보고 하였다. 한편 Leatherwood등[4]은 각종 운송 수단에서 발생하는 진동에 대한 불쾌감 크기를 수학적 함수로 표현하고자 하였으며 Shoenberger[5]는 좌석에 앉은 인체를 대상으로 수직 진동과 각(angular)진동에 의해 인체가 느끼는 불쾌감의 정도를 연구하였다. Fairley와 Griffin[6]은 좌석에 앉은 인체를 대상으로 발받이와 등받이의 유무, 앉은 자세, 근육의 긴장 정도, 진동의 크기 등이 공진 주파수에 미치는 영향에 대하여 실험한 결과 발받이와 등받이의 사용, 곧은 자세, 근육의 긴장이 공진 주파수를 약간 증가시킨 다는 것을 알아냈다. 또 Paddan과 Griffin[7]은 좌석에 앉은 인체에 대해 진동을 가하여 좌석에서 머리로의 진동 전달성에 관해 실험한 결과, 5Hz에서 큰 전달성을 갖는다는 것을 알아냈으며, 또 등받이가 없는 경우 5Hz뿐만 아니고 15Hz에서도 좌석에서 머리로의 진동 전달성이 크게 나타나는 것을 밝혀 냈다. 그리고 Fairley와 Griffin[8]은 좌석에 앉은 인체를 대상으로 실험하여 인체 몸통 부위의 1차 공진 주파수는 대략 5Hz이며, 2차 공진 주파수는 대략 10Hz임을 찾아냈다. 그러나 이와 같은 연구들은 인체 전체에 대한 진동 특성을 측정하였을 뿐 머리(뇌 포함) 부분 자체에 대한 진동 특성 연구는 거의 수행된 바가 없는 형편이다. 따라서 본 연구에서는 실험 결과와 비교하여 그 타당성이 입증된 머리(뇌 포함) 부분의 유한요소모델을 이용하여 뇌 에 대한 진동 특성을 해석 하고자 하였다.

유한요소 모델

3mm 간격으로 촬영된 CT 이미지를 이용하여 앞서 개발된 성인의 유한요소 모델을 본 연구의 진동특성 해석에 이용하였다. 모델은 두개골, 뇌, 뇌척수, 격막으로 구성 시켰으며 총 1170개의 절점과 1206개의 요소로 구성되어 있다. 두개골은 4절점 쉘 요소로 모델링 하였으며 두께가 두꺼운 부분의 모델링에는 8절점 3차원 등계수 요소를 사용하였다. 그리고 뇌(대뇌와 소뇌)와 뇌척수(cerebral spinal fluid)도 8절점 3차원 등계수 요소로 모델링되었으며, 대뇌의 중간을 가로지르는 점막(falx)과 소뇌 사이의 천막(tentorium)은 4절점의 membrane 요소로 구성시켰다. 턱, 뇌 내의 혈관 및 목 부분으로 내려가는 신경망 등은 모델에 포함시키지 않았으며 모델은 시상면(midsagittal plane)에 대해 대칭 된다고 가정하였다. 그림 1은 본 연구에서 사용한 3차원 유한 요소 머리 모델중 뇌 부분만을 보여주고 있다. 모델중 뇌의 질량은 약 1.12kg으로서 서양인의 평균(1.36 kg)보다는 약간 적은 값을 보이고 있으며 두개골을 포함한 총 질량은 2.1kg에 달한다. 모델의 머리 두께와 머리 너비는 각기 174㎜, 142.6㎜로써 한국인 여자 성인의 크기 175㎜와 154㎜에 가깝게 모델링 되었다.

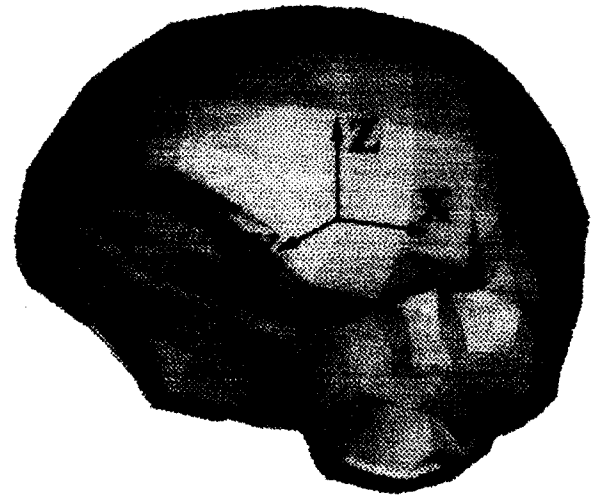

그림 1. 뇌의 3차원 모델과 좌표계
Fig. 1. 3-D model of the brain and coordinate system

모델을 구성한 요소들은 균질, 등방성 및 선형 탄성체로 가정하였다. 뇌에 대한 유한 요소 해석에서 뇌의 탄성계수(66.7~667)와 포아송비(0.48~0.4999)는 연구자들에 따라 큰 차이를 보이고 있기 때문에 본 연구에서는 사용빈도와 결과에 대한 타당성 검토가 어느 정도 이루어진 체적 탄성계수(2.19 GPa), 전단탄성계수(1.68 MPa), 포아송비(0.4996)와 이들 값에 의해 구해지는 종탄성계수를 해석에 이용하였다. 모델에 사용된 각 요소의 물성치들은 앞서 수행한 연구[9]에서와 같은 값을 사용하였다. 뇌실과 척추공(spinal cord) 사이를 연결하며 흐르는 뇌척수는 머리에 충격이 가해질 경우 급속한 유동을 유발하여 뇌에 가해진 충격을 어느 정도 흡수하고 있다. 이와 같은 뇌의 충격흡수 능력에 대한 해석을 구성된 모델에 반영시키기 위하여 뇌 및 두개골에 각각 0.002와 0.08의 구조댐핑계수(structural damping coefficient)를 대입하였다.

진동 조건은 각 방향(수직, 전후 수평, 좌우 수평)으로 일정한 최대 가속도 5.4m/s²을 조화 진동으로 1Hz에서 30 Hz까지 진동수를 변화시켜 가며 해석하였다. 본 연구에선 머리부분만의 진동 특성으로 국한하였으므로 목 부분의 인대, 근육 등에 의한 머리 진동 특성의 변화는 없다고 보고 자유경계조건으로 가정하였다.

머리의 진동 특성을 파악하기 위한 인자로 세 방향의 전단응력(τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{zx}), 세 방향의 가속도와 각각 다음 식으로 표현되는 뇌의 압력(p), von-Mises(τ_h)를 택하였다.

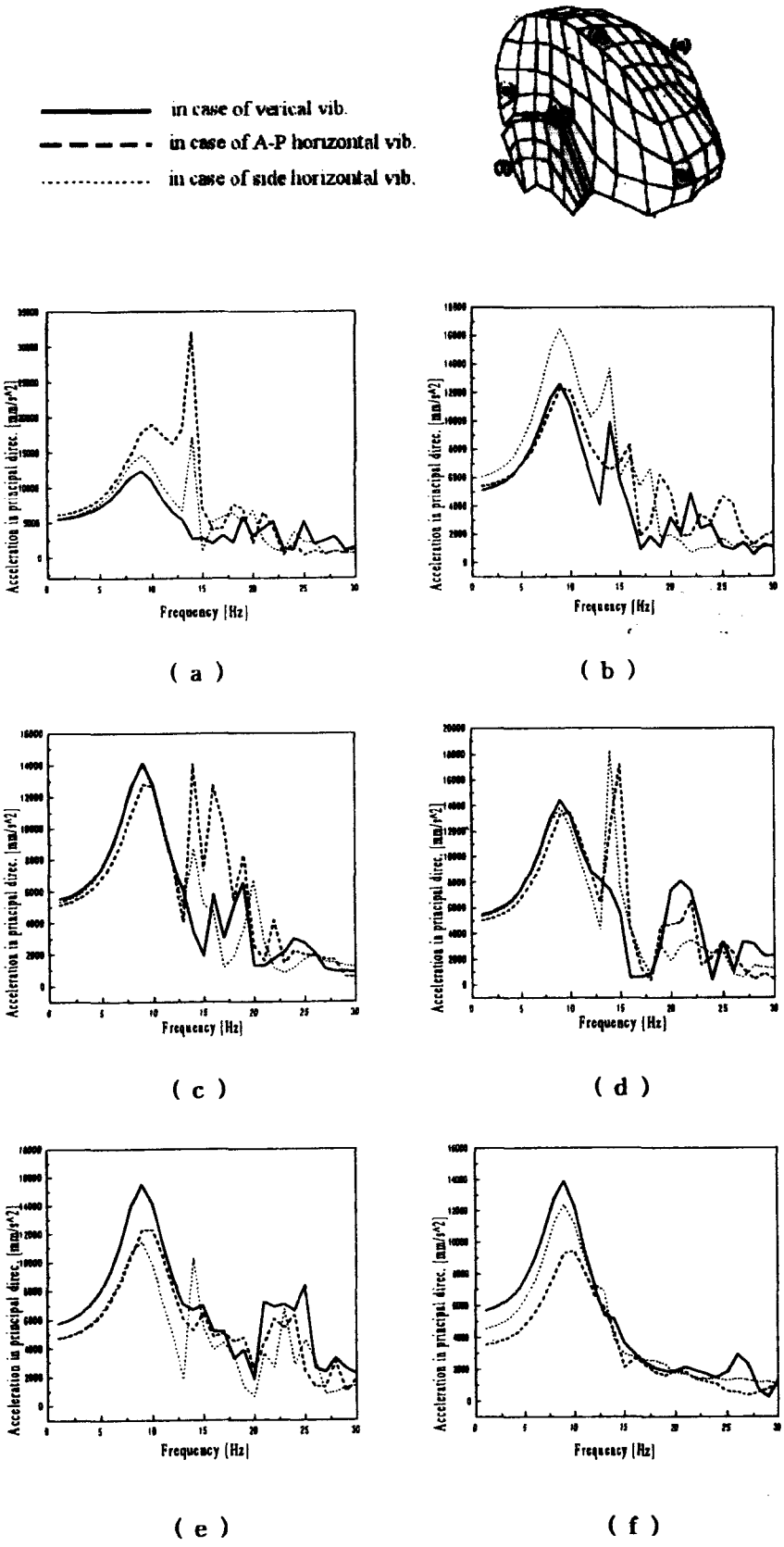

그림 2. 뇌의 각 부분에서의 진동특성(가속도 변화)
Fig. 2. Vibration characteristic of the brain (variation of acceleration)

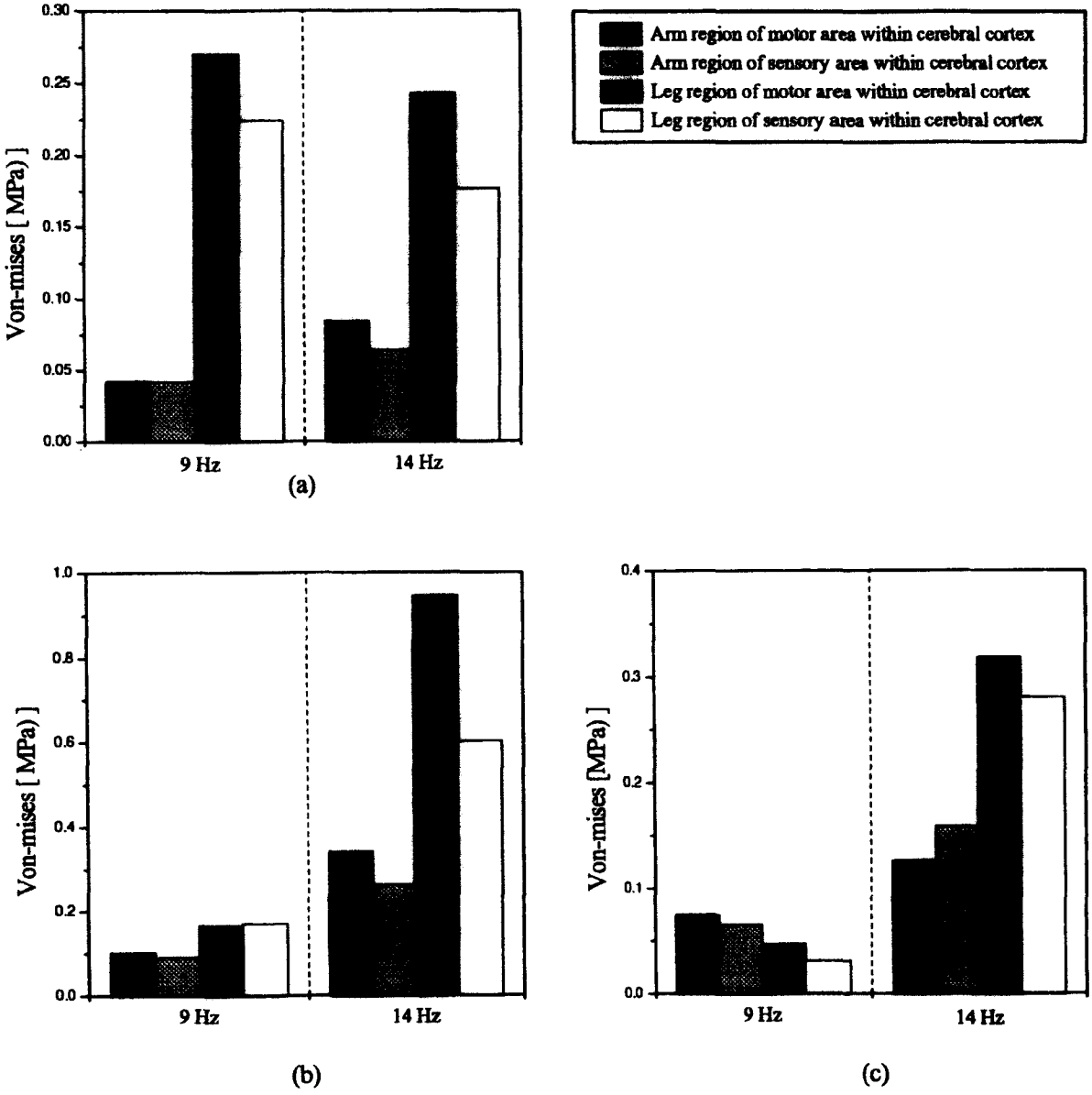

그림 3. 뇌의 대뇌 피질부의 운동 및 지각 중추내에 발생된 von Mises 응력
Fig. 3. Von Mises stress at the cerebral cortex of the brain

$$p = \frac{(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)}{3} \tag{1}$$

$$= \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2} \tag{2}$$

윗식에서 σ_i는 주응력 성분을 나타낸다.

계산은 ABCUS(version 5.4)를 이용하였으며 시간적분은 implicit method를 사용하였다.

결과 및 고찰

뇌를 포함한 머리부분에 대한 유한 요소 모델을 이용하여 가속도, 전단응력, von-Mises 응력, 압력의 변화를 진동수 변화에 대하여 구하였다. 두정부(parietal region), 전두부(frontal region), 측두부(temporal region), 질량 중심부(mass center region), 후두부(occipital region)와 소뇌부(cerebellum)에 해당되는 부분에서 각기 수직 진동(vertical vibration), 전후 수평진동(A-P horizontal vibration)과 좌우 수평 진동(side hori-

표 1. 성인 뇌 모델에서 고유 진동수와 진동 방향에 따른 각 파라메타의 최대값의 분포
Table 1. Maximum value distribution of each parameter according to natural frequency and acceleration direction in adult's brain model

	a	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}	τ_h	p
vertical vib.	S	S	L(9Hz)	L(14Hz)	S	L(9Hz)
A-P horizontal vib.	L(14Hz)	S	L(14Hz)	L(14Hz)	L(14Hz)	S
side horizontal vib.	S	S	L(14Hz)	U(14Hz)	L(14Hz)	U(9Hz)

U : upper limbs L : lower limbs S : similar

표 2. 성인과 유아 뇌 모델에서 계산된 각 파라메타 값들의 비교
Table 2. Comparison of calculated parameter values in adult's and baby's brain model

	a		τ_{xy}		τ_{yz}		τ_{zx}		τ_h		p	
	adult	baby	adult	baby	adult	baby	adult	baby	adult	baby	adult	baby
α	1.94 > 1.13		6.0 << 133		6.3 << 53.		5.5 << 34.		21.7 < 58.3		2.6 << 12.	
β	1.71		0.044		0.09		1.16		0.19		0.17	

α : The rate of the largest and smallest value of each parameter at natural frequency
β : The rate of the largest value of each parameter in the adult's and baby's brain model at natural frequency

zontal vibration)이 가해진 경우에 대해 각기 응답 특성을 구해 비교하였다.

1. 가속도 방향에 따른 진동특성의 변화

그림 2에서 볼 수 있듯이 세 방향에 의한 가속도진동에 따른 각 방향으로의 경향이 비슷하게 나타남을 볼 수 이었다. 두정부에선 전후 수평 진동에 의한 가속도가 다른 가속도에 비해 14Hz에서 비교적 크게 나타 났으며 전체적으로 9Hz와 14Hz에서 가장 큰 가속도 값을 보이고 있으며 소뇌부에선 9Hz의 고유 진동수 만이 나타났다. 각 진동 방향에 따라 발생되는 전단응력의 변화는 전두부와 후두부를 제외한 나머지 부분에서 공통적으로 14Hz에서 가장 큰 τ_{xy}값을 나타내었으며 측두부, 질량 중심부와 후두부에선 9Hz에서 τ_{yz} 에 의한 고유 진동수는 나타나지 않았다. 특이하게 질량 중심부에선 14Hz뿐만 아니라 여러개의 고유 진동수가 나타나 각 방향의 진동에 대한 τ_{yz} 값의 특성을 찾아 볼 수 없었다. 한편 질량 중심부와 소뇌부에선 9, 14, 16Hz의 세 진동수에서 τ_{zx}값이 크게 나타났고 그 중에서도 14Hz에서 가장 큰 τ_{zx}값이 발생함을 볼 수 있었다.

각 주파수에 따른 von Mises 응력, τ_h의 변화는 측정 부분에 따라 모두 형태가 다른 특징적인 형태를 가지고 있었으나 모든 부분에서 14Hz의 주파수에서 가장 큰 τ_h값이 발생함을 보이고 있었다. 그림 3은 두정부의 대뇌 피질의 운동을 담당하는 중추 신경부위에 대한 진동특성을 분석한 결과를 보여주고 있다. 진동 방향에 관계없이 모두 하지쪽 지각 및 운동 영역에서 큰 응력 값을 보이고 있었으며 수직 진동을 제외 하고는 14Hz에서 상대적으로 더 큰 응력을 보이고 있었다. 한편 진동 주파수변화에 따른 압력 변화는 전 지역에서 9Hz에 가장 큰 압력 값이 나타나고 있었다. 이와 같은 해석 결과는 간접적인 비교이긴 하지만 Ziegenruecker와 Magid[2]에 의한 실험에서 15Hz에서 10명의 실험 대상 중 8명이 일반적인 불쾌감을 경험하였다는 연구결과와 Sherwood와 Griffin[10]에 의한 실험에서 16Hz에서 학습 능력이 현저히 떨어진다는 결과와도 일치하는 결과를 보이고 있다. 위에서 언급한 해석 결과를 종합하여 세 방향의 진동에 대한 대뇌 피질 부분의 상지와 하지의 지각 및 운동 영역에서 계산되는 가속도, 전단응력, von-Mises 응력 및 압력 값을 구한 후 그 수치가 가장 크게 나타나는 영역을 표 1에 표시하였다. 표에서 보여주는 것과 같이 대부분에서 하지 중추 신경 영역에서의 각 파라미터 값이 상지 중추 신경 영역에서의 값에 비해 큰 값을 가졌으며(표에서 보듯이 가속도와 τ_{xy}의 경우를 제외하고는 대부분의 경우에서 하지의 신경 중추를 나타내는 L로 표기되고있음) 9Hz보다 14Hz의 고유 진동수에서 더 큰 값을 보이고 있다. 이는 고유 진동수인 14Hz에서 작업자가 팔의 오동작보다 다리의 오동작을 일으킬 가능성이 더 높다는 것을 나타낸다. 단, 좌우 수평 진동의 경우엔 상지와 하지의 신경영역에서 비슷한 값이 나타나고 있었다.

2. 유아와 성인 머리 유한 요소 모델의 진동 해석 결과 비교

유아의 경우는 진동 방향에 관계없이 2Hz와 3Hz의 고유 진동수를 나타내고 있으며 각 방향의 진동에 대해 유아의 뇌에서 가장 큰 응력 값은 두정부, 전두부에서 나타나고 있었다.

모든 파라미터에서 비교해 볼 때, 성인은 대체적으로 9Hz, 14Hz에서, 유아는 2Hz, 3Hz에서 고유진동수를 가지고 있었으며 표 2는 각 고유 진동수에서 발생되는 각 파라미터의 최대값 대 최소값의 비와 성인모델에서의 최대값과 유아모델에서 계산되는 각 파라메타의 최대값의 비를 나타내고 있다. 표에서 보는 바와 같이 뇌에 발생되는 가속도의 경우 고유 진동수(성인 : 9Hz, 14Hz, 유아 : 2Hz, 3Hz)에서 가속도의 최대값 대 최소값의 비(표에서 α값을 의미함) 가 성인이 유아에 비해 약간 크게 나타났지만 나머지 전단응력, von-Mises 응력과 압력에선 유아의 경우가 훨씬 크게 나타나고있다. 그 중에서도 발생되는 최대, 최

소 전단응력의 크기 비는 유아모델에서 매우 크게 나타나고 있다. 그리고 성인과 유아의 각 파라미터에서 성인 최대값과 유아 최대값의 비(표에서 β 값을 의미함)는 가속도와 τ_{xx}에선 1보다 크게(유아 보다 성인이 더 큼) 나타나고 있어 유아의 경우 전후 방향에 의한 진동이 매우 위험함을 알 수 있었다.

결 론

성인 머리 및 유아 머리의 유한 요소 모델을 이용하여 x, y, z방향의 진동(일정한 최대 가속도 5.4m/s²의 조화진동)조건에 대하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 성인의 뇌는 9Hz, 14Hz에서 고유 진동수를 나타내었으며 유아의 뇌에서는 2Hz, 3Hz에서 고유 진동수가 나타나고 있었다. 이와 같은 결과는 간접적 실험적 관찰과도 일치하고 있었으며 압력을 제외한 가속도, 전단응력, von-Mises 값은 9Hz보단 14Hz에서 좀 더 큰 값을 보이고 있었다.

2. 진동에 대해 가속도를 제외한 전단력, 압력, von-Mises 값의 최대 최소 값의 차이는 성인에 비해 유아모델에서 훨씬 큰 값을 나타내어 같은 진동에 대해 유아가 성인에 비해 진동대한 저항 능력이 떨어질 것이라고 예측되었으며 이 결과는 실험적 연구에서 같은 진동에 대해 성인에 비해 유아가 더 큰 불쾌감을 나타낸다는 결과와도 일치하는 것이다.

3. 고유 진동수에서 대뇌 피질의 두정부에 있는 사지에 대한 운동 및 지각 중추 신경 영역에서 발생되는 응력의 크기를 비교한 결과, 성인은 9Hz보다 14Hz에서 상지 중추보다 하지 중추에서 보다 큰 응력이 계산되어 각 고유 진동수에 노출된 작업자는 상지에 의한 오동작보다 하지에 의한 오동작을 일으킬 가능성이 더 크다고 유추 할 수 가 있다.

참 고 문 헌

1. C.C. Ward, "*A Dynamic Finite Element Model of the Human Brain*", Ph.D. Dissertation, UCLA, 1974.
2. G. Ziegenruecker and E.B. Magid, "*Criteria of Tolerance for Short Exposure to Vertical Vibration for Various Frequencies*", USAF, WADC Tech. Report 59-18, 1995.
3. M.J. Griffin and E.M. Whitham "*Individual Variability and Its Effect on Subjective and Biodynamic Response to Whole-body Vibration*", J. Sound and Vibration, Vol. 58, No. 2, 1978.
4. J.D. Leatherwood, T.K. Dempsey and S.A. Clevenson, "*A Design Tool for Estimating Passenger Ride Discomfort Within Complex Ride Environments*", Human Factors, Vol. 22. No. 3, pp. 291-312, 1980.
5. R.W. Shoenberger, "*Psychophysical Comparison of Vertical and Angular Vibrations*", Avia. Space. Environ. Med., Vol. 51, No. 8, pp.759-762, 1980.
6. T,E. Fairley and M.J. Griffin, "*A Test Method for the Prediction of Seat Transmissibility*", Society of Automotive Engineers International Congress and Exposition, Detroit, SAE Paper 860047, 1986.
7. G.S. Paddan and M.J. Griffin, "*The Transmission of Translational Seat Vibration to the Head-II: Horizontal Seat Vibration*", J. Biomechanics, Vol. 21, No. 3, pp. 199-206, 1988.
8. T.E. Fairley and M.J. Griffin, "*The Apparent Mass of the Seated Human Body: Vertical Vibration*", J. Biomechanics, Vol. 22, No. 2, pp. 81-94, 1989
9. 김영은, 남대훈 "유한요소모델을 이용한 인간뇌의 미만성 부상에 대한 해석" 의공학회지(in press), 1998
10. N. Sherwood and M.J. Griffin, "*Evidence of Impaired Learning During Whole-body Vibration*", J. of Sound and Vibration, Vol. 152, No. 2, pp. 219-225, 1992