

Wheelchair Multi-layer headrest foam 특성과 상해지수간 상관관계 분석

조성욱* · 지승민* · 전성식*†

Correlation Analysis between Wheelchair Multi-layer Headrest Foam Properties and Injury Index

Sungwook Cho*, Seungmin Ji*, Seong S. Cheon*†

ABSTRACT: Although the development of transportation means has realized the right to mobility for the disabled who have difficulty in moving, it can be said that the improvement of the safety of passengers with disabilities that can occur in a car accident is lower than that of ordinary passenger seats. In particular, in the case of a rear-end collision that can occur suddenly, it is a reality that disabled passengers are vulnerable to head and neck injuries. Therefore, in this study, a multi-layer headrest foam that divides the headrest into three parts in the coronal plane was proposed to improve the head and neck injury index of disabled passengers in the vehicle in the event of a rear-end collision of a wheelchair transport vehicle. A range of stress scale factors was selected to give various compressive characteristics of the foam through low-speed rear-end collision analysis through a simple model, and GA optimization was performed by specifying the range as a parameter. Through the optimization result, the phase relationship between HIC and NIC was analyzed according to the compression characteristics of the layers. HIC responded most sensitively to the compression characteristics of the front layer and NIC responded to the compression characteristics of the mid layer, and the compression characteristics of the rear layer showed the lowest. A normal headrest and an optimized multi-layer headrest were placed in the validation model to analyze the low-speed rear-end collision sled test, and HIC and NIC were derived lower in the multi-layer headrest than in the general headrest. The compression behavior of the multi-layer headrest was also clearly shown, and it was verified that the multi-layer headrest was effective in improving the injury index of the head and neck compared to the general headrest.

초 록: 교통수단의 발전은 이동이 불편한 장애인들의 이동권 보장을 실현하였지만 차량사고시 발생할 수 있는 장애인 탑승객의 안전 향상은 일반 승객좌석에 비해 낮다고 할 수 있다. 특히 갑자기 발생할 수 있는 후방 추돌 사고의 경우 장애인 탑승객의 머리와 목 부상에 취약한 것이 현실이다. 이에 본 연구에서는 휠체어 운송 차량의 후방 추돌 시 차량내 장애인 탑승객의 머리와 목 상해지수 개선을 위해 headrest를 관상면으로 3등분한 multi-layer headrest foam이 제안되었다. 간이 모델을 통한 저속 후방 추돌 해석을 통해 foam의 다양한 압축 특성을 부여하기 위한 stress scale factor의 범위가 선정되었으며, 해당 범위를 parameter로 지정하여 GA최적화가 수행되었다. 최적화결과를 통해 layer의 압축 특성에 따른 HIC와 NIC간의 상관관계 분석이 이뤄졌으며, HIC는 Front layer, NIC는 Mid layer의 압축 특성에 가장 민감하게 반응하였고 Rear layer의 압축 특성은 가장 낮게 나타났다. Validation model에 일반headrest와 최적화된 multi-layer headrest를 각각 배치하여 저속 후방 추돌 sled test 해석을 수행하였으며, 일반headrest대비 multi-layer headrest에서의 HIC와 NIC가 낮게 도출되었다. multi-layer headrest에서의 압축 거동 역시 명확하게 나타나 multi-layer headrest가 일반headrest대비 머리와 목의 상해지수 개선에 효과적인 것이 검증되었다.

Received 20 June 2023, received in revised form 14 July 2023, accepted 28 July 2023

*Department of Mechanical Engineering, Graduated School, Kongju National University

†Corresponding author (E-mail: sscheon@kongju.ac.kr)

Key Words: 후방 추돌(Rear-end collision), Multi-layer headrest foam, HIC(Head Injury Criteria), NIC(Neck Injury Criteria)

1. 서 론

휠체어 탑승객의 안전과 편의성은 장애인의 이동에 있어서 핵심적인 고려사항이다. 이로 인해 국내 전동 휠체어 소지자의 증가와 그에 따른 교통약자 이동편의 정책으로 인한 특별교통수단의 이용도가 점차 높아지고 있다. 이러한 WAV(Wheel chair Accessible Vehicle)는 휠체어에 탑승한 장애인을 그대로 운송 수단에 탑승시켜 운행을 하게 된다. 그러나 아무리 서행을 하고 안전운전을 하여도 주행 중이나 정차 시에 갑작스레 발생할 수 있는 후방 추돌에는 안전하다고 할 수 없다. 특히 휠체어 탑승객의 목 부상은 주로 급정거, 급회전, 충돌 등과 같은 이동 동안의 갑작스러운 움직임으로 인해 발생할 수 있으며 차량내 휠체어 고정장치[1]만으로는 후방 추돌로 인한 목 상해지수를 개선할 수 없는 것이 현실이다. 또한 일반적으로 차량내에 적용되는 headrest는 휠체어 탑승객의 머리를 지지하기에는 제한된 기능을 가지고 있으며, WAV내부에 설치하는 것 또한 구조적인 제약을 받게 된다. 이러한 차량내 장애인 탑승객의 목과 머리의 안전을 위한 headrest의 연구는 활발하게 진행되고 있다. Karg 등[2]은 휠체어에 적용가능한 headrest의 충돌 내구성을 정적으로 결정하는 방법론을 개발하였고 여러 상용 headrest를 적용하여 그 방법론의 효율성을 나타내었다. Simms 등[3]은 IIWPG 후방 추돌 테스트를 surrogate 휠체어에 더미를 탑승시켜 실시하였으며 headrest 유무에 따른 목 상해지수를 평가 비교하였다. Hamzah 등[4]은 뇌성마비 아동에게 적용되는 headrest의 최적 두께, 위치와 각도에 따른 하중의 영향을 결정하기 위한 해석을 수행하였다. Fuhrman 등[5]은 소아용 더미를 휠체어에 탑재하여 후방 추돌 sled test를 실시하였으며 상업용 headrest 유무에 따른 머리와 목의 상해지수 평가를 수행하였다. Howard 등[6]은 3D프린팅을 이용해 나일론과 탄소섬유로 맞춤형 headrest를 제작하여 충격 시험을 수행하였다. 이러한 장애인 탑승객을 위한 headrest의 주요 요구 사항으로는 첫째로, 장애인 탑승객의 머리와 목을 안정적으로 지지하는 기능을 가져야 한다. 이를 통해 갑작스러운 머리의 움직임으로 인한 충격을 완화하고, 휠체어 탑승객의 목의 적절히 지지하여 부상을 방지해야 한다. 둘째로, 장애인의 장애의 종류와 정도에 따라 headrest의 크기와 모양을 맞춤형으로 제작할 수 있어야 한다. 이처럼 휠체어에 적용가능한 headrest에 관한 여러 연구가 다양하게 시도되고 있으나, 대부분 연구에 적용되는 headrest는 상업용 headrest를 적용하는 것이 일반적이었으며 장애인 탑승객의 상해지수 개선을 위한 headrest

foam에 관한 연구는 미흡한 상황이다.

본 연구에서는 WAV의 후방 추돌 시 차량 내 휠체어 탑승객의 상해지수 개선을 목적으로 하는 multi-layer headrest foam을 제안하였다. 제안된 multi-layer headrest는 총 3개의 다른 압축특성을 가지는 foam이 적층되는 구조로 이루어져 있다. 각기 다른 압축특성을 나타내는 foam이 각 layer에 적용되며 GA(Genetic Algorithm)를 통해 HIC(Head injury criteria)와 NIC(Neck injury criteria)를 최소화하는 최적화가 수행되었다. 이를 통해 각 layer별 압축특성과 HIC와 NIC 간의 상관관계를 분석하였으며 분석을 통해 얻은 layer 별 압축특성을 multi-layer headrest에 적용하여 후방 추돌 sled test 해석을 통해 비교 검증되었다.

2. 평가 상해지수와 유한요소해석

2.1 HIC(Head Injury Criteria)

HIC는 자동차 충돌 및 안전 시스템 설계와 관련하여 머리 부상의 위험을 평가하기 위해 사용되는 지표이다[7]. 두부 손상 기준을 나타내기 위해 식 (1)이 적용되며 머리 무게 중심에서 측정된 가속도 $a(t)$ 를 통해 산출된다.

$$HIC = \left\{ (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} \right\}_{max} \quad (1)$$

여기서 t_1 과 t_2 는 두부 가속도를 측정하는 동안의 시작과 끝 시간을 나타내며 $t_2 - t_1$ 의 최대값은 36 ms이고 일반적으로는 15 ms가 사용되고 있다[8].

2.2 NIC(Neck injury criteria)

NIC는 저속 후방 추돌 시 목 부위에서 발생하는 편타성 손상을 예측하는 지표이다[9]. 해당 상해지수는 머리와 흉추골(T1) 사이의 상대적인 가속도 차이에 따른 경추 압축 부상 가능성에 대한 지표로 식 (2)에 의해 산출된다. 여기서 식 (3)은 머리무게중심과 흉추골 사이의 상대가속도를 나타내며, 식 (4)는 상대가속도를 상대속도로 변환한 것을 나타낸다. 상수 0.2는 일반적인 목의 길이(0.2 m)를 의미한다.

$$NIC = 0.2 \times a_{rel}(t) + [v_{rel}(t)]^2 \quad (2)$$

$$a_{rel}(t) = a_{T1}(t) - a_{C1}(t) \quad (3)$$

$$v_{rel}(t) = \int a_{rel}(t) dt \quad (4)$$

2.3 유한요소해석

저속 후방 추돌 해석을 위한 인체모형 모델로는 Hybrid III 50th percentile male dummy가 적용되었다. 최적화 수행 시 소요되는 해석 시간 단축을 위해 Fig. 1과 같이 Neck angle bracket에서 머리 까지만 최적화 해석에 적용되었다. 적용된 가속도는 휠체어 모델에 full model dummy가 탑승한 상태에서 FMVSS 202a dynamic testing corridor[10]를 만족하는 펄스가 가해졌을 때 Neck angle bracket에서 기록된 가속도를 적용하였으며 Fig. 2와 같다.

Multi-layer headrest의 형상은 NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration)로부터 제공된 2010 Toyota Yaris Passenger sedan의 조수석 쪽 head rest FE-model이 적

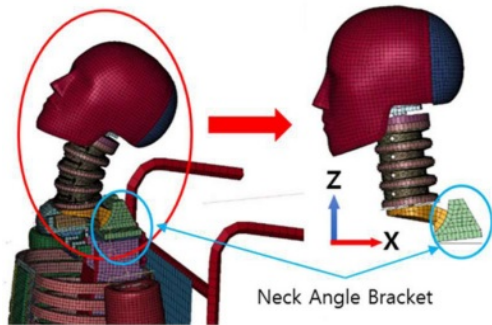


Fig. 1. Simplified analysis model

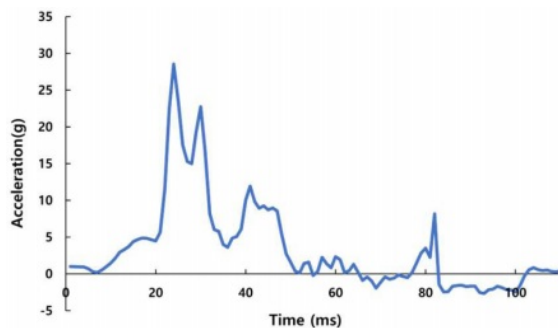


Fig. 2. Extracted acceleration curve

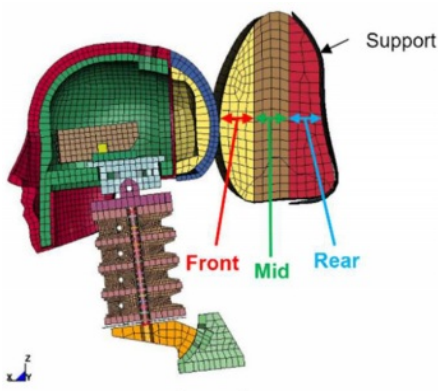


Fig. 3. Section view of analysis model

용되었으며 인체 모형의 관상면 방향으로 등분되었다. 생성된 layer는 후두부와 가장 가까운 쪽부터 Front, Mid, Rear layer순으로 배치되며 이렇게 형성된 Multi-layer headrest의 FE-model은 Fig. 3과 같다.

3. Multi-layer headrest foam 최적화와 비교 검증

3.1 최적화 수행을 위한 foam의 stress scale factor parameter range선정

적용된 foam의 밀도는 35 kg/m^3 이고 Fig. 4에서와 같이 MTS 858 장비를 통해 0.01 mm/s 의 속도로 35 mm 까지 눌렀을 때 Fig. 5와 같은 압축 응력-변형률 곡선을 나타내었다. 본 연구에서는 해당 foam의 hard한 기계적 거동 특성을 구현하기 위해 해당 압축시험을 통해 얻은 응력-변형률 선도의 응력값이 10^n (stress scale factor)만큼 확대되어 적용되었다. 여기서 stress scale factor가 10^0 일 때는 Fig. 5를 의미하며 n 이 증가할수록 기존 시편대비 상대적으로 hard한 기계적 거동을 해석을 통해 나타내게 된다.

Fig. 5의 응력-변형률 곡선을 바탕으로 각기 다른 stress scale factor가 적용된 foam 특성을 활용하여 Fig. 1의 간이 해석 모델을 통한 저속 후방 추돌 해석이 선행되었으며, 본 경향성 파악에서는 headrest가 layer 구조로 구성되지 않은 one body headrest로 적용되었다. Headrest foam의 stress scale factor별 HIC와 NIC의 경향성은 Fig. 6과 같으며, stress scale factor= 10^0 에서는 foam의 물성이 soft하여 두부를 충분히 감소시켜주지만 목의 over extension으로 인해 NIC는 오히려

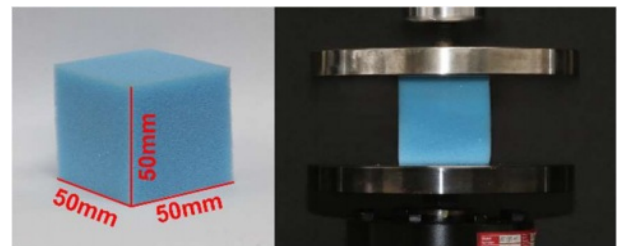


Fig. 4. Test for compressive properties of foam

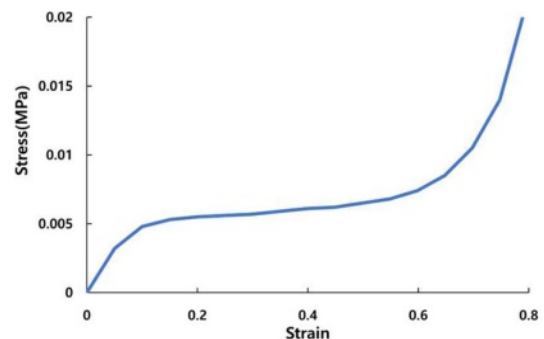


Fig. 5. Compressive stress strain curve of foam when stress scale factor= 10^0

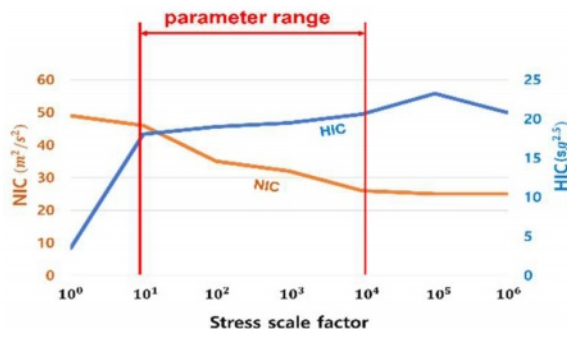


Fig. 6. Tendency of HIC and NIC by stress scale factor

증가하는 것을 알 수 있다. HIC는 10^1 을 기점으로 foam이 hard해질수록 두부 감속은 서서히 증가하였으며, NIC는 지속적으로 감소되었다. 10^4 이후에 NIC는 $25 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 으로 일정했으며, 이는 foam이 hard할수록 목의 over extension을 방지하는 것에 효과적이지만 10^4 이후에는 NIC 값의 변화에 큰 영향력이 없는 것으로 판단되어진다. 따라서 최적화에 적용될 stress scale factor의 parameter range는 HIC 변화가 급격히 완만해지는 10^1 에서 NIC의 변화가 일정해지는 10^4 까지 선정되었다.

3.2 GA를 통한 Multi-layer headrest foam 최적화

각 layer별 foam 압축특성에 따른 HIC와 NIC의 상관관계 분석을 위한 최적화는 LS-DYNA와 호환이 되는 LS-OPT를 통해 수행되었으며, 흐름도는 Fig. 7과 같다. 최적화 수행을 위한 알고리즘으로는 GA가 적용되었으며, response는 식 (1)을 통해 계산되는 HIC와 식 (2)를 통해 계산되는 NIC로 지정되었다. Foam의 압축특성에 관여하는 stress scale factor가 주요 parameter로 지정되었고 최소 10^1 에서 최대 10^4 로 설정되었다. 목적함수는 HIC와 NIC가 최소가 되는 layer의 조합이며, 매회 16개의 sampling을 총 4번의 iteration을 거쳐 최종 verification을 통해 루프가 종료되게 된다.

층별 적용되는 foam의 stress scale factor에 따른 HIC와

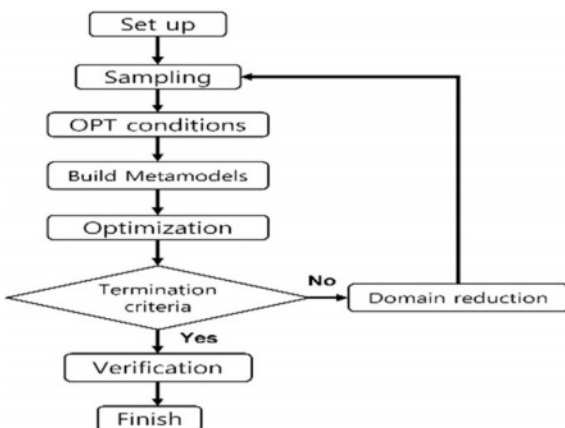


Fig. 7. Flow chart of optimization

NIC의 RSM(Response Surface Metamodels)은 Fig. 8과 같으며, x축과 y축은 각각 layer의 stress scale factor를 의미하고 z축은 HIC 또는 NIC를 나타낸다. Front-Mid와 Front-Rear일 때 HIC가 최소값을 만족하였고 NIC는 Front-Mid에서만 최소값을 나타내었다. Rear-Mid는 Front-Mid와 Front-Rear 대

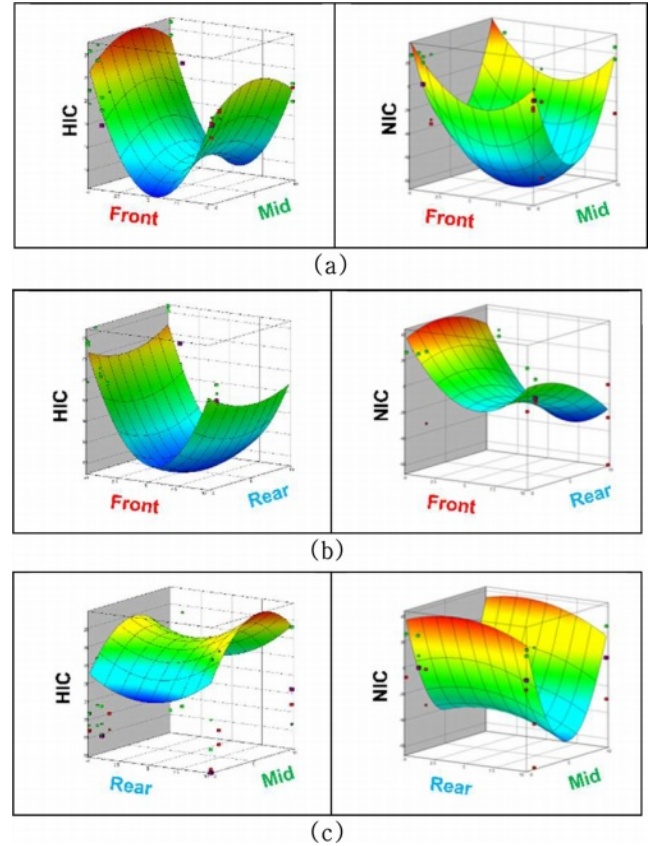


Fig. 8. Response surface according to the combination of compression characteristics: (a) Front-Mid, (b) Front-Rear, (c) Rear-Mid

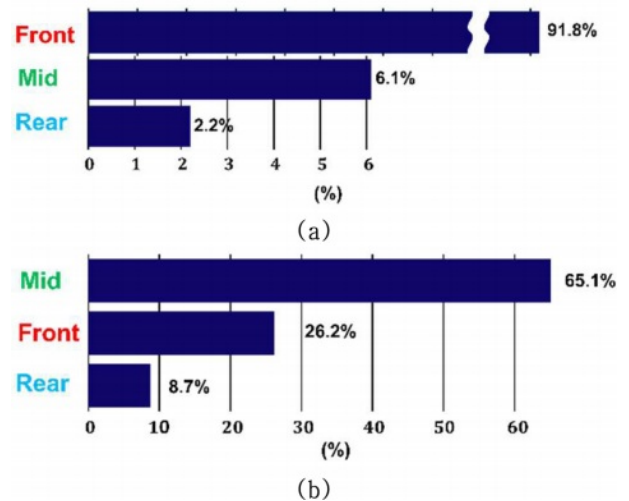


Fig. 9. Sensitivity to response for each layer: (a) HIC, (b) NIC

비 HIC와 NIC둘다 최소값에 도달하지 못한 것으로 나타났다.

Fig. 9는 각각의 layer가 HIC와 NIC에 미치는 민감도를 나타낸 것으로 HIC에 가장 민감하게 반응한 layer는 Front (91.8%)이고 Rear(2.2%)는 민감도가 가장 낮은 것으로 나타났다. NIC에서 민감하게 반응한 layer는 Mid(65.1%)이고 Rear(8.7%)는 NIC에서도 민감도가 가장 낮게 나타났다.

GA를 통한 multi-layer headrest의 stress scale factor 최적화 결과는 Front가 10^3 , Mid가 10^1 , Rear가 10^4 로 도출되었으며 이는 Mid가 Front와 Rear 대비 상대적으로 더 soft한 압축특성을 나타내며 Front와 Mid에서의 압축특성이 HIC와 NIC의 결과에 우세한 것으로 판단되어진다.

3.3 Validation model과의 거동 비교 분석

일반 headrest와 GA를 통한 layer의 최적 배치가 이루어진 Multi-layer headrest간의 비교 분석을 위해 Fig. 10과 같이 validation model에 적용을 통한 전체 해석이 수행되었고 일반 headrest에 적용된 foam의 물성은 NHTSA의 crash simulations에 이용되는 headrest의 물성치가 사용되었다. 해석은 차량내 휠체어에 탑승한 장애인의 상황을 구현하였으며, 휠체어는 WC-19[11]를 만족하는 surrogate wheelchair가 적용되었다. 실제 탑승 시 장애인과 휠체어의 구속 조건[12]에 따라서 휠체어는 플랫폼과 tie-down을 통해 구속조건이 부여되었고, 탑승자는 3점식 안전벨트로 구속하였다. 저속 후방 추돌 상황을 모사하기 위해 충돌속도 17 km/h, 최대 가속도 9.0 g, 지속시간 90ms를 만족하는 가속도[10]가 적용되었으며, 가속도 곡선은 Fig. 11과 같다.

Validation model에서의 일반headrest와 multi-layer headrest간의 전체 해석 비교 결과 두 headrest 모두 57ms에서 첫 접촉이 발생하게 되며 일반headrest의 접촉종료시점은 124ms이고 multi-layer headrest는 120ms로 나타났다. HIC는 식 (1)을 통해 전체 두부 가속도에서 15ms 동안 두부에 가해진 가속도를 대입하여 계산한 결과 중 최대값을 나타내며 일반 headrest의 경우 74~89ms에서 최대 $19.8\text{sg}^{2.5}$ 로 도출되었고 multi-layer headrest는 76~91ms에서 최대

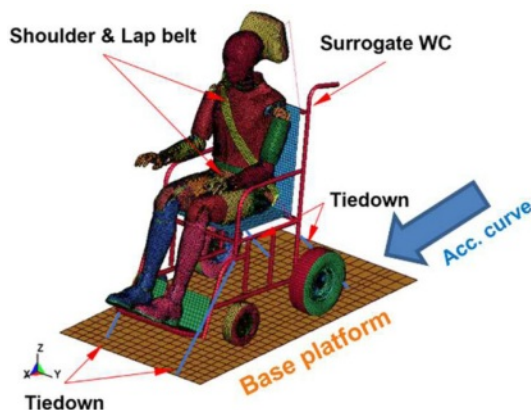


Fig. 10. Full analysis model for verification

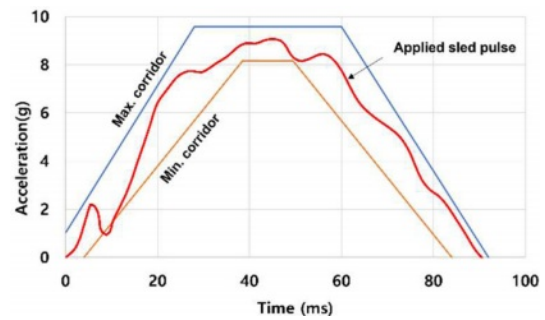


Fig. 11. Acceleration curve used for rear-end collision sled test based on FMVSS 202 dynamic testing corridor

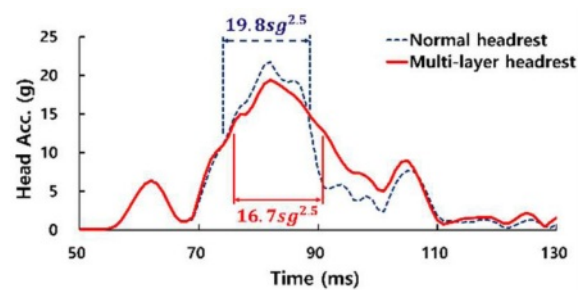


Fig. 12. HIC results through validation analysis

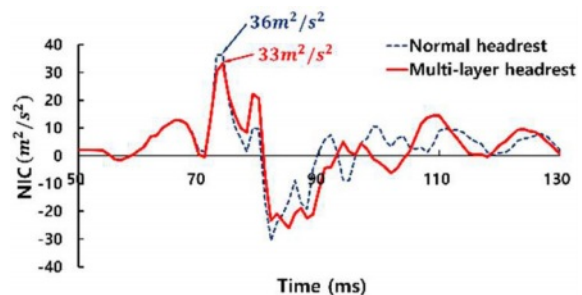


Fig. 13. NIC results through validation analysis

$16.7\text{sg}^{2.5}$ 로 Fig. 12와 같다. 두 headrest의 HIC 최대값을 비교해보면 일반headrest대비 multi-layer headrest가 두부 감속에 효과적인 것을 알 수 있다. NIC의 경우 식 (2)를 통해 계산되었으며 일반 headrest의 최대 NIC는 74ms에서 $36\text{m}^2/\text{s}^2$ 로 나타났고 multi-layer headrest의 최대 NIC는 74ms에서 $33\text{m}^2/\text{s}^2$ 로 Fig. 13과 같다. 이는 흉추골과 두부의 상대가속도와 상대속도를 통해 계산되는 NIC의 특성상 multi-layer headrest의 압축특성으로 인해 머리가 뒤로 젖힐 때 충분한 감속이 이루어져 일반headrest대비 NIC 값이 낮게 나온 것으로 판단되어진다.

4. 결 론

본 연구에서는 WAV의 저속 후방 추돌 시 내부 휠체어 탑승객의 상해지수 개선을 위한 multi-layer headrest를 제안하

였으며 Front, Mid, Rear의 다층 구조로 각 layer마다 stress scale factor를 다르게 부여하여 HIC와 NIC간의 상관관계를 최적화를 통해 분석하였다. GA 최적화를 하기에 앞서 foam의 stress scale factor 범위에 따른 HIC와 NIC의 경향성 파악이 수행되었고 도출된 stress scale factor의 범위는 10^1 에서 10^4 로 선정되었다. 최적화는 GA를 통해 이뤄졌으며 response는 각각 HIC와 NIC로 지정되었다. 또한 목적함수는 HIC와 NIC가 최소가 되는 layer의 조합으로 선정되었고 매 회 16개의 sampling을 총 4번의 iteration을 거쳐 최적화가 수행되었다. RSM과 민감도 분석 결과 HIC가 최소가 되기 위해서는 Front layer의 압축 특성이 가장 영향도가 높은 것으로 나타났다, multi-layer headrest에서의 NIC는 Mid layer가 가장 영향도가 높은 것으로 나타났다. 또한 Rear layer는 HIC와 NIC에서 그 영향도가 가장 낮게 나왔으며 이를 통해 multi-layer headrest의 두께 감소가 가능해질 것으로 사료된다.

일반 headrest와 최적화를 통해 도출된 multi-layer headrest를 비교 검증하기 위해 각각 validation model에 배치하여 저속 후방 추돌 sled test 해석이 진행되었다. 두 headrest 모두 동일한 시간에 첫 접촉이 이뤄졌으며 multi-layer headrest에서의 HIC와 NIC 최대값이 일반headrest대비 낮게 나타난 것을 통해 multi-layer headrest가 일반headrest대비 상대적으로 우수한 것이 검증되었다. 이를 통해 Front와 Mid layer의 상호작용이 HIC와 NIC의 감소에 효과적인 것으로 사료된다.

본 연구에서는 headrest를 관상면 방향으로 3등분하여 layer를 형성하였지만 시상면과 횡단면 방향으로의 구획화를 통해 후두부의 충돌 위치에 따른 상해지수와 headrest간의 상관관계 분석 역시 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2018R1D1A1B07051169). 또한, 본 과제(결과물)는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과임(2021RIS-004).

REFERENCES

- Oh, H.S., Kim, G.S., and Cheon, S.S., "A Study on the Analysis of Human Injury According to the Fixed Position of the Tie-down Type Wheelchair," *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 19, No. 4, 2017, pp. 478-483.
- Karg, P., and Sprigle, S., "Development of Test Methodologies for Determining the Safety of Wheelchair Headrest Systems During Vehicle Transport," *Journal of Rehabilitation Research & Development*, Vol. 33, No. 3, 1996, pp. 290-304.
- Simms, C., Madden, B., Tiernan, J., and FitzPatrick, D., "Development of a Wheelchair Headrest for Rear Impact Protection," *Proceedings of the International Research Council on the Biomechanics of Injury-2008 International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Injury (September)*, 2008, pp. 425-428.
- Hamzah, S.R., Izmin, N.A.N., Tardan, G., and Abdullah, A.H., "Design and Analysis of Adjustable Headrest for Total Body Involvement Cerebral Palsy," *International Journal of Recent Technology and Engineering*, Vol. 8, No. 1, 2019, pp. 3208-3211.
- Fuhrman, S.I., Karg, P.E., and Bertocci, G.E., "Effect of Wheelchair Headrest Use on Pediatric Head and Neck Injury Risk Outcomes during Rear Impact," *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 40, No. 4, 2008, pp. 1595-1603.
- Howard, J.D., Eggbeer, D., Dorrington, P., Korkees, F., and Tasker, L.H., "Evaluating Additive Manufacturing for the Production of Custom Head Supports: A Comparison Against a Commercial Head Support under Static Loading Conditions," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, Vol. 234, No. 5, 2020, pp. 458-467.
- Chou, C.C., and Nyquist, G.W., "Analytical Studies of the Head Injury Criterion (HIC)," *SAE Tech. Pap.*, 1974, pp. 398-410.
- Bandak, F., Eppinger, R., Haffner, M., Khaewpong, N., Kuppa, S., Maltese, M., Nguyen, T., Saul, R., Sun, E., Takhounts, E., Tannous, R., and Zhang, A., "Development of Improved Injury Criteria for the Assessment of Advanced Automotive Restraint Systems: II," *Nhtsa*, November, 1999.
- Schmitt, K.-U., Muser, M.H., and Niederer, P., "A New Neck Injury Criterion Candidate for Rear-End Collisions Taking Into Account Shear Forces and Bending Moments," *Technology* 2000, pp. 1-9.
- Street, S., "National Highway Traffic Safety Administration Laboratory Test Procedure For Fmvss No. 218," *Traffic Saf.*, 218, 2006.
- Lee, Y.S., Lee, K. Du, and Lim, H.K., "The Safety Assessment of Wheelchair Occupants in Road Passenger Vehicles in a Frontal Crash: A Computer Simulation," *Key Engineering Materials* 353-358 (PART 4), 2007, pp. 2569-2572.
- "Wheelchair Tie-downs and Occupant Restraints for Use in Motor Vehicles," SAE J2249, 2010, pp. 143-150.