시트 물성 기반 착좌 안락감 추정 방법 개발

이승훈[1], 정하영[1], 정규호[2], 유희천[1]

[1]포항공과대학교 산업경영공학과
[2]현대자동차 바디시험 3팀

Development of a Seating Comfort Prediction Method Based on the Material Properties of Seat

Seunghoon Lee[1], Hayoung Jung[1], Gyuho Chung[2], Heecheon You[1]

[1]Department of Industrial and Management Engineering, Pohang University of Science and Technology
[2]Body Test Team 3, Hyundai Motor Group

ABSTRACT

Objective: The present study developed a seating comfort prediction method using the material properties of seat. **Background:** Different material properties are applied to each seating area to improve seating comfort such as cushioning and supportability. Prediction models of seating comfort is needed for a seat made of a combination of various material properties. **Method:** A group of 33 adults (7 females and 26 males) was recruited to the subjective seating comfort evaluation experiment in the present study. The material properties of 12 seats were measured by a multi-segment static load tester developed in the present study. Seating comfort prediction models were developed using data of subjective seating comfort evaluation and material propertie collected in the experiment. **Results:** The adjusted R^2 values of the developed models were identified as 75.3% ± 2.9% for cushion and 74.8% ± 2.0% for backrest. **Conclusion:** The prediction models which can predict the seating comfort of a seat with a combination of seat material properties were developed in the study. **Application:** The prediction models can be used to examine the adequacy of seat material properties at the early stage of seat development.

Keywords: Automotive seat, seating comfort, foam material property, comfort prediction models

Corresponding author: Heecheon You (hcyou@postech.ac.kr)

1. Introduction

시트의 착좌 안락감, 쿠션감, 지지성 등을 향상시키기 위해 시트 부위(엉덩이 지지부, 요추 지지부 등)별로 물성이 상이하게 적용되고 있다. 예를 들어, 엉덩이 지지부는 전반적인 쿠션감을 향상시키기 위해 낮은 경도(부드러운)의 물성을 갖도록 설계된 반면, 요추 지지부는 상체 지지성을 확보하기 위해 높은 경도(딱딱한)로 설계된다. 그러나, 시트 부위별 물성이 조화롭게 구성되지 않으면 운전자의 착좌 안락감을 저하시킬 뿐 아니라 신체의 국소 압력 증가, 혈액 공급 저하, 혈액 순환 저하를 야기하여 신체적 피로 발생의 원인이 되는 것으로 보고되었다.

시트의 물성을 평가하기 위해 정하중 평가법과 점하중 평가법이 사용되고 있으나, 복합적인 시트 물성의 조화를 평가하지 못하는 한계가 있다. 정하중 평가법은 약 20~30 cm 지름을 갖는 원형 가압판을 사용하여 엉덩이 지지부와 요추 지지부 근처를 가압하고 시트의 변형량을 측정한다. 점하중 평가는 약 5 cm 지름을 갖는 원형 가압판을 사용하여 허벅지 지지부, 볼스터 부위와 같은 국소 부위를 가압하여 시트 변형량을 측정한다. 그러나, 이러한 평가법은 시트의 국부적인 부위만 평가하여 시트의 전반적인 안락감을 평가하는데 한계가 있다. 또한, 인체 형상을 고려하지 않은 가압판을 사용하므로 실제 운전자가 착좌한 경우와 동일하게 시트의 변형을 분석할 수 없다.

본 연구의 목적은 착좌 안락감 향상을 위해 시트 부위별 물성 평가 방법 및 안락감 추정식을 개발하는

것이다. 세부적으로, 본 연구는 인체 형상을 고려한 시트 물성 평가 장치 개발, 상용 시트에 대한 인간공학적 착좌감 평가, 그리고 시트 물성 기반 착좌 안락감 추정식 개발의 3단계 절차에 따라 수행되었다.

2. Material Property of Seat

2.1 Multi-Segment Static Load Tester (MSLT)

인체 착좌와 유사한 조건에서 시트의 물성 측정이 가능한 다중 분할 정하중 측정 시스템(Multi-Segment Static Load Tester, MSLT)이 개발되었다. 기존의 정하중 측정 시스템은 단면이 평평한 원형 가압판을 사용하여 시트의 물성을 국부적으로 측정한다. 반면, MSLT는 Figure 1과 같이 인체 형상과 동일한 3개의 가압판을 사용하여 시트 부위별로 상이한 하중을 인가하며 물성을 측정할 수 있도록 개발되었다.

인체 형상 기반 가압판은 Figure 2와 같이 차량의 시트 평가에 표준으로 사용되는 Hip-Point Machine II (HPM II, SAE J4004)을 분할하여 개발되었다. 먼저, 상체는 척추의 해부학적 구조를 고려하여 시트와 접촉이 없는 경추 부위를 제외한 천추, 요추, 흉추의 3개 영역으로 분할되었다. 하체는 엉덩이와 허벅지 영역으로 구분되었다(Bhise, 2011). 허벅지 영역은 오금 부위가 시트와 접촉되는 경우(e.g., 5th %ile 여성)를 고려하여 허벅지 중단과 허벅지 앞단으로 세분화되었다.

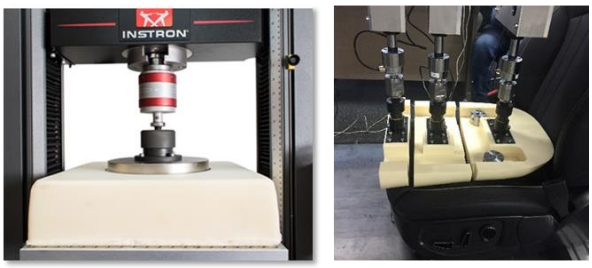

Figure 1. Existing (L) and multi-segment (R) static load tester

2.2 Material Property Measurement Protocol

시트 물성 평가법은 foam pad에 대한 표준화된 시험법인 ASTM D3574(ASTM International, 2017)를 개선하여 개발되었다. 본 연구에서 개발된 시트 물성 평가법은 단일 foam pad에 대해 물성을 측정하는 ASTM D3574와 달리 시트에 3개(쿠션: 엉덩이, 허벅지 중단, 허벅지 앞단, 등받이: 골반, 요추, 흉부)의 가압판이 동시에 하중을 인가하도록 하였다. 부위별 가압 거리는 상용 시트 7종의 부위별 평균 두께의 75% 수준으로, 가압 속도는 시트 부위별 가압과 감압이 동시에 완료되도록 가압 거리에 1:1로 설정되었다.

시트 물성 척도는 ASTM D3574와 시트 전문가 의견을 참고하여 총 5종(F_{HPM}, 히스테리시스 손실률, $F_{25\%}$, support factor, modulus irregularity factor)을 정의하였다. 첫째, 착좌 정하중(F_{HPM})은 HPM II를 시트에 착좌 시켰을 때 시트 부위별로 변형되는 거리를 기준으로 반발력을 측정한다. 둘째, 히스테리시스 손실률은 가압과 감압 시 시트에서 손실된 에너지의 양을 나타낸다. 셋째, $F_{25\%}$는 시트 두께의 25%를 변형시키는데 필요한 힘을 의미한다. 넷째, support factor (SF)는 시트를 65% 변형시키는데 필요한 힘($F_{65\%}$)과 25% 변형시키는데 필요한 힘($F_{25\%}$)의 비율로 계산된다. 마지막으로, 변형의 비선형성을 나타내는 modulus irregularity factor (MIF)는 시트 두께의 40%와 20% 변형에 필요한 힘의 선형적인 관계식(MIF = 2 × $F_{20\%}$ - $F_{40\%}$)으로 계산된다.

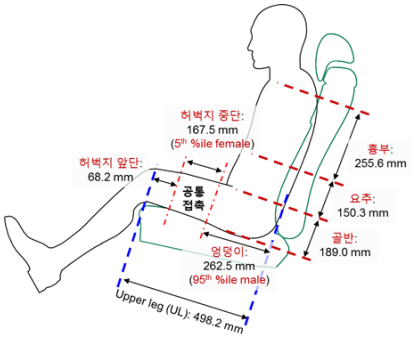

Figure 2. Parts and dimension of body shape indenter

3. Evaluation of Seating Comfort

3.1 Method

Participants

운전 경력이 2년 이상인 한국인 33명(남성: 26명, 여성: 7명)이 착좌 안락감 평가에 참여하였다. 신장과 몸무게 분포가 한국인(Size Korea, 2010)과 미국인(CAESAR, 2012)의 1:1의 composite anthropometric data와 유사하도록 모집되었다. 실험참여자의 신장과 몸무게가 composite group의 평균과 차이가 없는 것으로 확인되었다($p > 0.05$).

Seats

착좌감 평가와 시트 물성 측정 대상 시트 12종이 소비자 만족도(Consumer Reports, USA)를 참고하여 착좌감 상, 중, 하 그룹별로 4종씩 선정되었다. 소비자 만족도는

글로벌 차량 판매 1 ~ 15위 제조사(2010년 ~ 2017년)에서 출시된 시트를 대상으로 조사되었다. 평가 대상 선정 시 SUV 차종은 sedan 차종과 착좌 자세가 상이하여 제외되었다.

Experimental Environment

평가 대상 시트는 차량에서 탈거된 후 2개의 실험 공간에 만족도 상, 중, 하 그룹별로 2개씩 배치되었다. Seat configuration (height = 278.0 mm, cushion angle = 16.4°, seatback angle = 23.0°)을 동일하게 정렬하여 착좌 자세에 의한 영향을 최소화하였다.

Experimental procedure

착좌 안락감 평가는 실험 설명, 인체 측정, 착좌 안락감 평가의 3단계를 통해 수행되었다. 착좌 안락감 평가 설문은 시트 부위별(예: 엉덩이 지지부) 쿠션감, 꺼짐감, 지지성, 이물감 평가 항목과 시트 전반(쿠션 전반, 등받이 전반)의 만족도와 조화감 평가 항목으로 구성되었다. 실험참여자별로 무작위로 배치된 실험 순서에 따라 평가를 수행하여 평가 순서에 의한 영향을 제거하였다.

3.2 Results

Seating comfort

우수 시트가 착좌감 평균 점수와 우수/열세 순위 분포 비율을 고려하여 쿠션과 등받이에서 탐색되었다. 착좌감 평균 점수 측면에서 약간 만족 이상(≥ 5점), 보통 ~ 약간 만족, 보통 미만(< 4점)을 기준으로 선호 시트가 분석되었다. 우수/열세 순위 분포 비율은 실험참여자별 착좌감 평가 점수를 순위로 변경하여 시트간 상대적 우위를 확인하였다. 전체 응답 중 순위가 상위(1 ~ 4등)에 50% 이상이고 하위(9 ~ 12등)에 10% 이하로 평가된 경우 강건성이 높은 시트로 파악되었다. 예를 들어, Figure 3와 같이 쿠션의 전반적 만족도는 A, B, F, H가 평균 점수 측면에서 약간 만족 이상으로 선호되는 것으로 평가되었다. 그러나, H 시트의 경우 순위 분포가 상위인 비율이 50% 보다 작아 우수 시트로 선정되지 않았다.

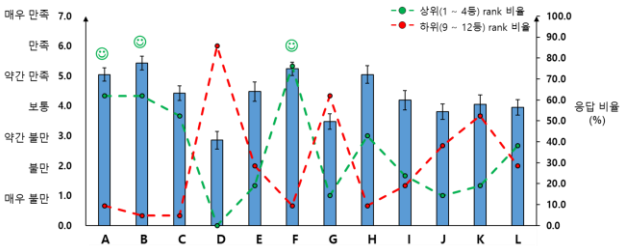

Figure 3. Overall satisfaction by cushion

Correlation between material properties and seating comfort

시트 부위별 중요 착좌감 평가 항목과 연관성이 상대적으로 높은(r > 0.3) 물성 척도가 파악되었다. 시트 부위별 중요 만족도 평가 항목은 시트 평가 전문가의 의견을 수렴하여 선정되었다. 예를 들어, Table 1의 예시와 같이 엉덩이 지지부의 중요 만족도 평가 항목인 쿠션감, 꺼짐감, 그리고 지지성은 F_{HPM}, $F_{25\%}$, 그리고 MIF와 상관관계가 높은 것으로 파악되었다.

시트 부위별 물성 측정값이 착좌감 우수/열세 시트 그룹의 특성을 선형적으로 나타내지 않았다. 예를 들어, Figure 4와 같이 쿠션의 전반적 만족도는 엉덩이 지지부 F_{HPM}이 우수 그룹에서 낮으며 열세 그룹에서 높은 경향을 보였으나 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 따라서, 시트의 전반적인 만족도는 시트 부위와 물성의 다양한 조합에 결정될 것으로 예상되었다.

Table 1. Correlations between material properties and seating comfort (illustrated)

		쿠션감	꺼짐감	지지성	이물감	전반적 만족도
엉덩이 지지부	F_{HPM}	**-0.75**	**-0.74**	**-0.77**	-	-0.77
	Hysteresis	-0.20	-0.15	-0.08	-	-0.18
	$F_{25\%}$	**-0.58**	**-0.57**	**-0.44**	-	-0.60
	SF	-0.03	-0.01	-0.19	-	-0.02
	MIF	**0.51**	**0.49**	**0.65**	-	0.52
…	…	…	…	…	…	…
요추 지지부	F_{HPM}	**-0.67**	-	-	**-0.59**	-0.62
	Hysteresis	-0.30	-	-	-0.34	-0.33
	$F_{25\%}$	0.15	-	-	0.10	0.06
	SF	**-0.57**	-	-	**-0.51**	-0.51
	MIF	0.26	-	-	0.27	0.23

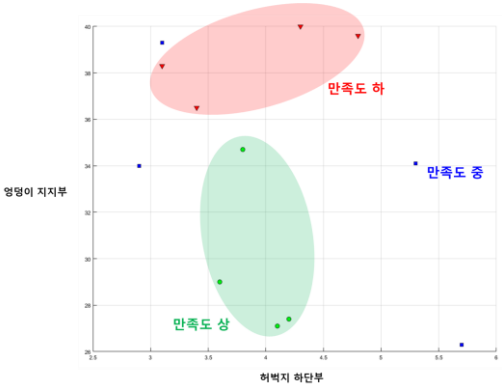

Figure 4. Static load (F_{HPM}) by satisfaction group (illustrated)

4. Seating Comfort Prediction Models

시트 부위별 물성을 이용하여 주관적인 착좌감을 예측할 수 있는 추정식이 ordinal logistic regression 방법을 사용하여 개발되었다. 추정 변수는 3.2 Results에서 제시된 것과 같이 시트 부위별로 주관적 착좌감과 연관성이 있는 물성 변수가 사용되었다. 주관적 착좌감 평가 결과가 순위로 변환되어 만족(1 ~ 4등), 보통(5 ~ 8등), 불만족(9 ~ 12등)의 3단계로 구분한 후 추정식의 입력으로 사용되었다. 이는 동일한 만족도에 대해 실험참여자별로 사용하는 주관적 평가의 scale이 상이하고, 주관적 평가 시 극단값(e.g., 1점: 매우 불만, 7점: 매우 만족)을 드물게 사용하였기 때문이다.

개발된 추정식의 추정 성능은 쿠션과 등받이에서 각각 평균적으로 75.3% ± 2.9%와 74.8% ± 2.0%으로 평가되었다. 시트 부위별 중요 착좌감 평가 항목의 추정 성능은 모두 70.0% 이상이었다. 개발된 추정식은 시트의 물성이 주관적 착좌감에 미치는 영향을 분석하는데 활용될 수 있다. 예를 들어, Figure 5과 같이 B시트는 엉덩이 지지부의 F_{HPM}을 증가 시킬수록 쿠션 전반적 만족도의 만족 확률이 감소되고 불만족 확률이 증가되는 경향을 확인할 수 있다.

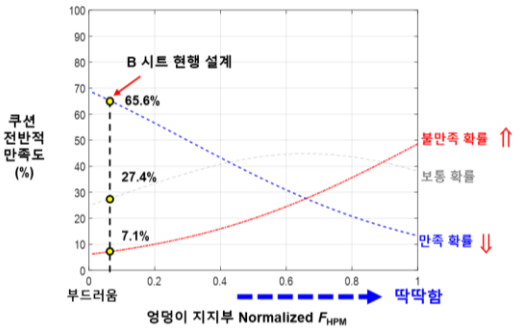

Figure 5. Overall satisfaction prediction results (illustrated)

5. Discussion

본 연구에서는 부위별 물성이 상이한 시트에 대한 착좌 안락감 추정 모델이 주관적 착좌감 평가 결과와 시트 부위별 물성 측정값을 사용하여 개발되었다. 기존의 국부적인 시트 물성 평가법은 다양한 부위별로 물성이 상이한 시트의 복합적인 물성을 평가하지 못하는 한계가 있다. 그러나, 본 연구는 인체 착좌와 유사한 조건에서 변형되는 시트의 물성 특성을 추정 모델에 반영하기 위하여 HPM II와 동일한 형상으로 개발된 인체 형상 기반 가압판이 사용되었다. 개발된 추정식은 착좌 안락감을 만족, 보통, 불만족의 3단계로 구분하는 성능이 쿠션과 등받이에서 각각 75.3%와 74.8%로 우수한 것으로 파악되었다.

착좌 안락감 추정식은 개발된 시트에 대한 개선 사항 파악과 착좌 안락감이 높은 신규 시트 개발에 활용될 수 있다. 기존에는 개발된 시트에 대한 착좌 안락감을 분석하기 위해 다수의 실험참여자가 직접 평가에 참여하여야 하므로 많은 시간과 비용이 소모된다. 그러나, 개발된 추정식은 주관적 평가 방법을 대체하여 착좌 안락감을 예측하고 개선점을 파악할 수 있다. 또한, 신규 시트 개발 시에는 시제품 제작과 주관적 평가의 반복적인 과정이 필수적이지만 추정식을 사용하면 부위별 물성의 적절성을 미리 검토하여 우수한 시트 개발에 도움을 줄 수 있다.

본 연구의 추정식은 소비자 만족도가 다양한 시트를 사용하여 개발되었지만 한정된 물성 범위에서만 추정식이 유효하다. 따라서, 추후 연구를 통해 다양한 시트에 대한 추가적인 분석과 검증이 이루어질 필요가 있다.

Acknowledgements

This work was funded by grants from Hyundai Motor Group.

References

SAE J4004. “Positioning the H-Point Design Tool”, *Society of Automotive Engineers*, PA, 2005.

ASTM D3574, “Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials—Slab, Bonded, and Molded Urethane Foams”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2017.

Bhise, V. D. “Ergonomics in the automotive design process”, CRC Press, 2016.

Civilian American and European Surface Anthropometry Resource Project (CAESAR), 2012