

겨울철 온도와 습도변화에 따른 철도차량 실내 PMV 측정 분석

Measurement and Analysis of indoor PMV by Winter Temperature Humidity Change in Rolling Stock

소진섭* 유성연** 김희만*** 강성해*** 김완중***
So, Jin-Sub Yoo, Seong-Yeon, Kim, Hui-Man Kang, Sung-Hae Kim, Wan-Jong
김윤수*** 김진규*** 서승석*** 윤차중***
Kim, Yun-Su Kim, Jin-Kyu Seo, Seung-seok Yun, Cha-Jung

ABSTRACT

The indoor PMV(Predicted Mean Vote) in rolling stock is very important for the enhancement of the amenity and health of passengers. Many researchers have studied it not for train but for building. Thermal comfort in Rolling Stock is function of temperature, relative humidity, air current, radiation temperature, etc. So, in this study, we have performed thermal environment in rolling stock(Electric motor car, Saemaetul, Mugunghwa train), and verified the relation between the PMV from Nov.2007 and Feb.2008. As a result, the average PMV value for each trains are 0.2, -0.3 Electric motor car, 0.5, 0.1, 0.1, 1.1 for Mugunghwa, 0.3, 0.5 for Saemaetul.

1. 서 론

고속철도차량 KTX, 일반차량 새마을호, 무궁화호 객차, 그리고 전동차는 우리 생활에 있어서 가장 중요한 교통수단이다. 아울러 가정과 사무실은 물론 개인과 대중이 생활하는 모든 장소가 쾌적한 실내 공기환경을 요구하고 있으며, 특히 환경부에서는 대중교통수단 실내공기질 관리 가이드라인을 2006년 말에 제정함에 따라 특수차량인 철도차량 실내에 대해서도 쾌적한 실내공기환경이 요구되고 있다. 이에 따라 승객의 관심도 크게 증가하고 있다. 철도차량 공기조화시스템은 쾌적한 실내공기가 제공되도록 계절별 운전조건에 따른 유지관리노력을 달리하여 관리할 필요가 있다. 그리고 일반적으로 주택, 아파트, 빌딩, 상가 등의 공기조화시스템에 비해 철도차량 공기조화시스템은 특수환경에서 일정구간을 이동하는 교통수단이다. 따라서 승객 개개인이 느끼는 쾌적감에 따라 일정하게 공기조화시스템을 가동하기에는 많은 어려움이 있다. 그래서 터널 및 지하공간과 지상공간을 운행하는 열차종별, 계절에 따른 차량운행특성 조건, 주변 환경영향 등 상호 종합적인 검토가 필요하다고 본다.

철도차량 실내 PMV 관련 연구[1-2]는 주로 한국철도기술연구원과 한국과학기술원이 꾸준히 수행하고 있다. 특히 2005년부터 건설교통부 국가교통핵심기술개발사업과제 일환으로 공기조화시스템이 하부에 탑재된 무궁화호 객차 1량에 대해 차세대 객차용 청정시스템 개발과제를 수행하였다. 여기서 PMV는 승객이 없는 경우에는 속도분포에 영향을 받고, 승객이 존재하는 경우에는 온도분포에 더 큰 영향을 받는다고 밝힌 바 있다. 예상평균온열냉감(PMV:Predicted Mean Vote) 연구는 냉난방시스템과 실내 환기량 산정에 관련하여 주택, 건물, 학교 교실, 자동차 실내를 주 대상으로 수행하고 있다.

* 한국철도공사, 철도연구원, 기술연구팀, 정희원

E-mail : sojin71@korail.com

TEL : (042)609-3991 FAX : (042)609-3720

** 충남대학교 기계설계공학과 교수

*** 한국철도공사

특히 인체 및 마네킹을 이용한 체감실험, 수치해석(CFD), PMV 계산식을 이용한 연구도 현재 점차 증가하는 추세이다. PMV는 1967년 Fanger[3]에 의해 제시되었다. PMV와 PPD 산출식은 다음 (1)과 (2)에 나타내었다. 이에 대한 상관관계는 Fig.1 과 같다[4]. PMV는 인간의 온열감각에 대한 이론을 정량화시킨 것이다. 인체의 대사량, 의복의 단열성에 건구온도, 평균복사온도, 기류속도 및 수증기 분압 등을 측정하여 인체의 열평형을 기초로 한 쾌적 방정식에 대입하여 인체의 온열감을 이론적으로 예측한 것이다.

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028)L \quad (1)$$

여기서,

M:대사율, L:인체에 대한 열부하(W/m²)

$$PPD = 100 - 95 \times e^{-(0.03353 \times PMV^4 + 0.2179 \times PMV^2)} \quad (2)$$

대사량은 사람이 착석 안정시에 열적으로 쾌적하다고 느끼고 있는 상태에서의 에너지 대사량을 기준으로 잡아 이것과 어떤 작업시의 에너지 대사량의 비를 met로 표시하고, 1met=58.1W/m²(=50kcal/m².h)이다. 의복의 단열성은 기온 21℃, 상대습도 50%, 기류속도 5cm/s 이하의 실내에서 대사량 1met의 활동 레벨에 있는 사람이 33.3℃의 평균 피부온도가 되어 쾌적한 상태가 될 수 있는 착의의 단열성을 clo로 표시하고, 1clo=0.155 m².℃/W이다. 이와 같이 PMV는 Fig.1 과 같이 온열환경 6가지 요소를 쾌적 방정식에 대입시켰을 때의 발산열량과 인체 열부하, 그리고 사람의 온열감각을 피험자 실험에 의해 연관시켜 나타낸 지표이고, ASHRAE Handbook 에는 Fig.2 와 같이 실내 조건하에서 여름철의 쾌적범위는 약 22~26℃이며, 겨울철의 쾌적범위는 약 20~23℃로 제시하고 있다[4-6].

Table 1 Thermal sensation vote[4-6]

+3	+2	+1	0	-1	-2	-3
hot	warm	slightly warm	neutral	slightly cool	cool	cold

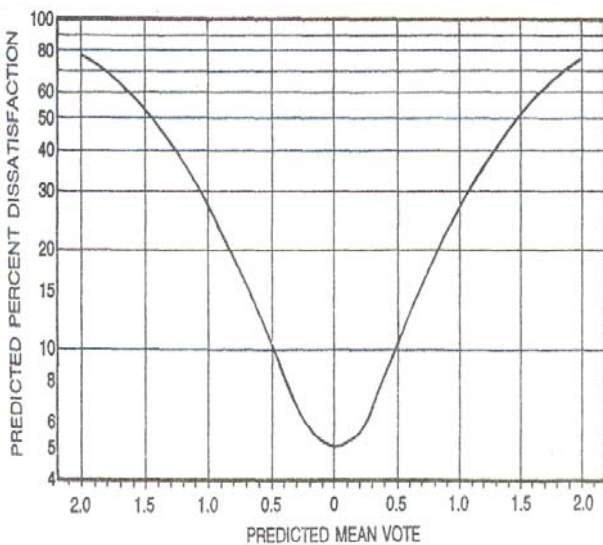


Fig. 1 Predicted Percentage of Dissatisfied(PPD) as Function of Predicted Mean Vote(PMV) [4]

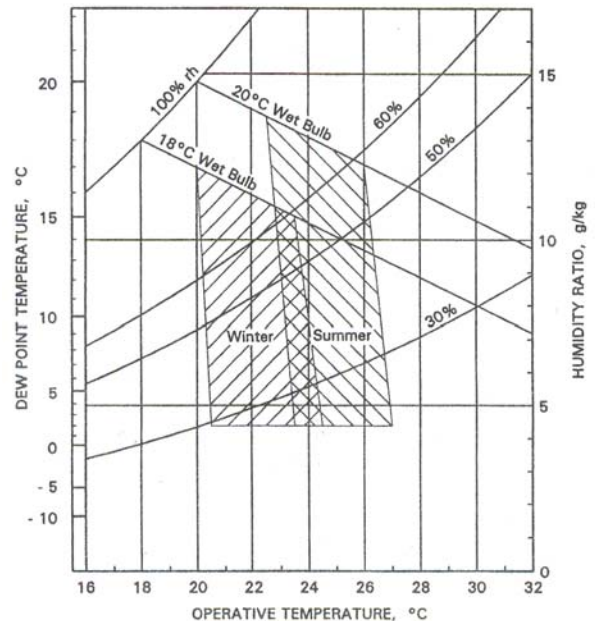


Fig. 2 ASHRAE Summer and Winter Comfort Zones [4]

본 연구에서는 ISO-7730과 미국냉난방공조학회(ASHRAE) Handbook[4-6]에서 제시하고 있는 실내 온열쾌적 범위 $-0.5 < PMV < +0.5$ 에 철도차량 실내공간에서의 예상평균온열냉감(PMV: Predicted Mean Vote) 범위는 어느 정도인지 겨울철을 대상으로 실내환경종합측정기(IES-3000, 일본)를 이용하여 측정[7]하였다. 그리고 이를 겨울철 난방 가동조건에 따른 전동차와 무궁화호, 새마을호 객차 실내 온도와 습도의 변화에 따른 PMV값을 비교 분석하고자 한다.

2. 측정방법

전동차, 무궁화호를 대상으로 2007년 11월과 무궁화호, 새마을호 대상으로 2008년 2월에 측정하였다. 전동차는 2007년 11월23일 난방을 가동하지 않은 조건에서 의정부역을 출발하여 인천역에 도착하는 전동차 운행하는 구간 중에 일부구간으로 서울역(16:38)을 출발하여 간석역(17:30)까지 진행방향 2호 차량 중앙 우측에서 측정하였다. 또한 동인천역(17:54)을 출발하여 용산역(18:38)에 도착하는 급행열차를 대상으로 진행방향 5호 차량 중앙 우측에서 측정하였다. 무궁화호 객차는 11월27일 순천역을 출발하여 서울역까지 운행하는 구간 중에 일부구간으로 난방반과 실내송풍기가 가동되는 조건에서 대전역에서 서울역까지 측정하였다. 그리고 서울역에서 대전역까지 운행하는 구간을 측정하였다. 새마을호 객차는 2008년 2월20일 난방과 실내송풍기를 가동하지 않은 조건에서 용산역을 출발하여 광주역까지 운행하는 구간 중에 일부구간으로 서대전역(13:19)을 출발하여 광주역(15:35)까지 측정하였다. 그리고 광주역(16:10)을 출발하여 서대전역(18:25)까지 일부구간은 난방 반 자동조건에서 측정하였다. 측정위치는 각각 4호 객차 21-22호석 위치에서 측정하였다. 무궁화호 객차는 2월27일에 대전역(12:00)을 출발하여 제천역(14:15)까지 난방 전 자동조건에서 측정하였다. 그리고 제천역(15:00)을 출발하여 대전역(17:17)까지 난방 반 자동조건에서 측정하였다. 측정위치는 각각 3호 객차 33-34호석에서 측정하였다.

IES-3000에 전동차, 무궁화호, 새마을호 객차 측정 전에 초기입력 met와 clo값을 겨울철에 일반적으로 적용값 1로 하였다[12]. 열차가 출발하여 종착역까지 1분 간격으로 데이터가 평균되어 저장되도록 하였다. 그리고 PMV값이 계산에 의해 데이터로 산출되어 저장된다. 측정이 종료되면 Excel 데이터로 다운 받아 분석하였다.

3. 측정결과

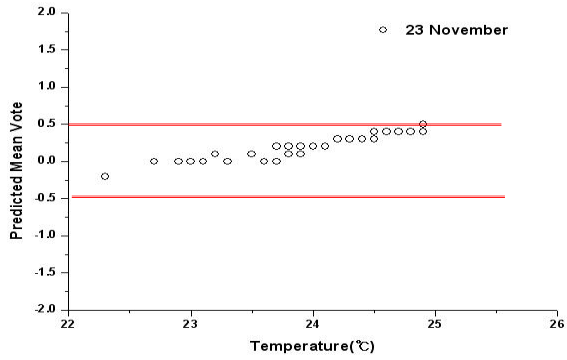
전동차, 무궁화호를 대상으로 2007년 11월과 무궁화호, 새마을호 대상으로 2008년 2월 측정결과는 Table 2 와 Fig.3, 4, 5, 6 에 각각 나타내었다.

전동차는 2007년 11월23일 난방을 가동하지 않은 조건에서 의정부역을 출발하여 인천역에 도착하는 전동차 운행하는 구간 중에 일부구간으로 서울역(16:38)을 출발하여 간석역(17:30)까지 측정하였다. 실내온도와 습도의 변화에 따른 PMV값을 비교한 결과는 Table 2 와 Fig. 3(a)-(b)에 나타내었다. 승객인원을 보면 최고 173명 평균 118명 승차하였다. 평균 실내온도 23.9℃, 평균 습도 53%로, PMV값은 최고 0.5, 최저 -0.2, 평균 0.2로 나타났다. 이는 ASHRAE Handbook에서 제시하고 있는 실내 온열쾌적 범위 $-0.5 < PMV < +0.5$ 에 만족한 수준이다. 또한 동인천역(17:54)을 출발하여 용산역(18:38) 도착하는 급행열차를 대상으로 측정하였다. 실내온도와 습도의 변화에 따른 PMV값을 비교한 결과는 Table 2 와 Fig. 3(c)-(d)에 나타내었다. 승객인원을 보면 최대 167명 평균 93명 승차하였다. 평균 실내온도 21.4℃, 평균 습도 66.8%로, 서울-간석역 측정치 보다는 승객인원수에 적어 다소 실내온도가 낮게 나타남을 알 수 있었다. 그리고 PMV값은 최고 0.4, 최저 -1.9, 평균 -0.3으로, 이는 ASHRAE Handbook에서 제시하고 있는 실내 온열쾌적 범위 $-0.5 < PMV < +0.5$ 에 만족한 수준이다. 다만, 동인천역 13명, 주안역 67명, 동암역 92명으로 승객의 인원이 적을때에 난방을 하지 않은 영향으로 실내온도 20℃ 이하로, 습도 72% 이상으로 높게 나타났다. 하지만 송내역 이후부터 150명 이상이 승차하여 승객인원수에 의한 실내온도 영향이 많이 있음을 알 수 있었다. 무궁화호 객차는 11월27일 순천역을 출발하여 서울역까지 운행하는 구간 중에 일부구간으로 대전역에서 서울역까지 난방반과 실내송풍기가 가동되는 조건에

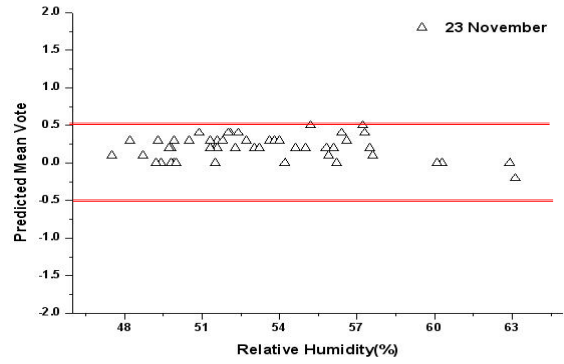
서 측정된 결과 Table 2 와 Fig.4(a)-(b)에 나타내었다. 평균 실내온도 26℃, 평균 습도 27%, PMV값은 최고 1, 최저 -1, 평균 0.5로, 이는 ASHRAE Handbook에서 제시하고 있는 실내 온열쾌적 범위 $-0.5 < PMV < +0.5$ 에 만족한 수준이다. 다만, 실내온도 26~27℃, 습도 26~29%로 이 구간에서의 승객인원수는 천안역 79명, 평택역 82명, 수원역 71명으로 난방을 가동하는 조건에서 정원 74명에 가까운 승객이 승차할 때는 쾌적범위를 다소 상회하는 것으로 나타났다. 그리고 서울역에서 대전역까지 운행하는 구간을 측정된 결과 Table 2 와 Fig.4(c)-(d)에 나타내었다. 평균 실내온도 24.7℃, 평균 습도 19.4%, PMV값은 최고 0.5, 최저 0.1, 평균 0.1로, 이는 ASHRAE Handbook에서 제시하고 있는 실내 온열쾌적 범위 $-0.5 < PMV < +0.5$ 에 만족한 수준이다. 이는 대전역-서울역을 측정치와 비교할 때 실내온도와 평균 습도가 다소 낮지만, 난방조건에서 승객인원수에 의한 실내온도 영향이 많이 있음을 알 수 있었다. 새마을호 객차는 새마을호 객차는 2008년 2월20일 난방과 실내송풍기를 가동하지 않은 조건에서 용산역을 출발하여 광주역까지 운행하는 구간 중에 일부구간으로 서대전역을 출발하여 광주역까지 측정된 결과 Table 2 와 Fig.5(a)-(b)에 나타내었다. 평균 실내온도 25.4℃, 평균 습도 18.2%, PMV값은 최고 0.6, 최저 -0.6, 평균 0.3으로, 이는 ASHRAE Handbook에서 제시하고 있는 실내 온열쾌적 범위 $-0.5 < PMV < +0.5$ 에 만족한 수준이다. 다만, 종착역인 광주역 도착 3분전으로 실내온도 27℃, 습도 25%, 승객의 인원수가 19명에서는 쾌적범위를 다소 상회하는 것으로 나타났다. 그리고 광주역을 출발하여 서대전역까지 일부구간은 난방 반 자동조건에서 측정된 결과 Table 2 와 Fig.5(c)-(d)에 나타내었다. 평균 실내온도 24.7℃, 평균 습도 19.4%, PMV값은 최고 0.5, 최저 -0.2, 평균 0.1로, 이는 ASHRAE Handbook에서 제시하고 있는 실내 온열쾌적 범위 $-0.5 < PMV < +0.5$ 에 만족한 수준이다.

Table 2 Measurement result of thermal environment

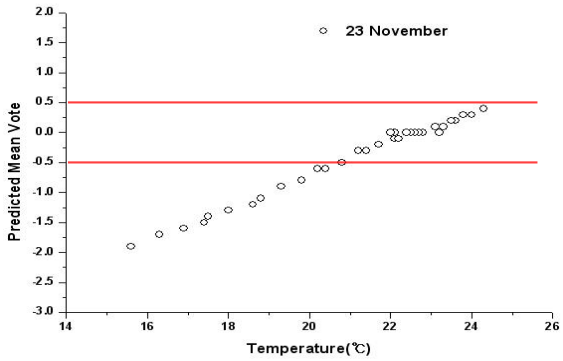
구분	일자	구분	온도 (℃)	습도 (%)	기류 (m/s)	복사온도 (℃)	PMV	PPD	인원 (명)
전동차 서울→간석	2007.11.23	max	24.9	63	0.06	25	0.5	10.3	173
		min	22.3	47.5	0	21	-0.2	5	22
		mean	23.9	53.2	0	24	0.2	6.7	118
전동차 동인천→용산		max	24.3	76.8	0.05	24.4	0.4	74.4	167
		min	15.6	49.7	0	14.9	-1.9	5	13
		mean	21.4	66.8	0	21.5	-0.3	15	93
무궁화호 대전→서울	2007.11.27	max	27.5	44.8	0.3	28.3	1	29.2	82
		min	22.4	21	0	17.9	-1	5.2	39
		mean	26	27	0.1	26.5	0.5	15.2	70
무궁화호 서울→대전		max	26.7	22.4	0.2	26.3	0.5	12.3	25
		min	22.8	15.4	0	23.7	-0.2	5	16
		mean	24.7	19.4	0.1	24.8	0.1	6.5	21
새마을호 서대전→광주	2008.02.20	max	27	23	0.09	26.7	0.6	15	45
		min	23	15.9	0	20.2	-0.6	5	19
		mean	25.4	18.2	0.07	25.3	0.3	7.8	35
새마을호 광주→서대전		max	28	20.7	0.04	27.6	0.9	22.1	33
		min	24.5	13.5	0	24.3	0	5.1	25
		mean	26.3	17	0.01	26.4	0.5	12.6	19
무궁화호 대전→제천	2008.02.27	max	25.6	23	0.14	25.2	0.3	7.8	44
		min	22.8	19.4	0	21.8	-0.3	5	17
		mean	24.7	21.2	0.03	24.4	0.1	5.6	36
무궁화호 제천→대전		max	30.9	23.2	0.12	32.5	1.9	75	46
		min	25.6	15.9	0	22	0	5	24
		mean	28.9	20.2	0.01	28	1.1	34	37



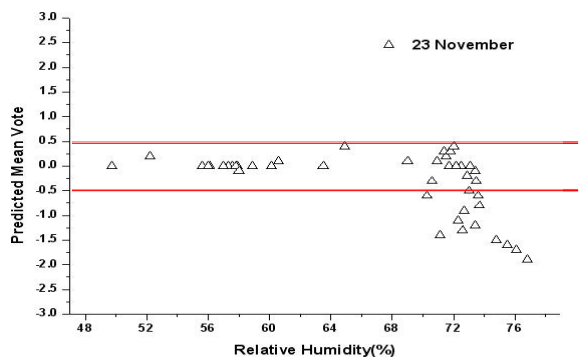
(a) From Seoul to Ganseok



(b) From Seoul to Ganseok

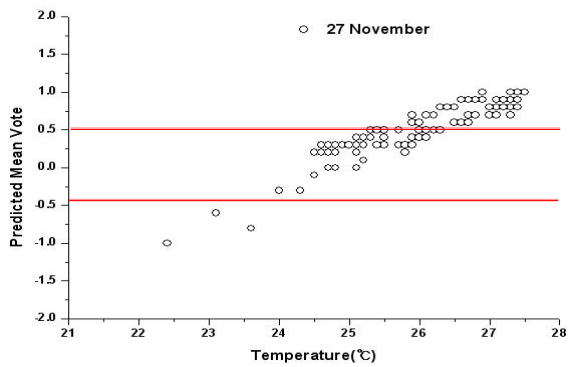


(c) From Dongincheon to Yongsan

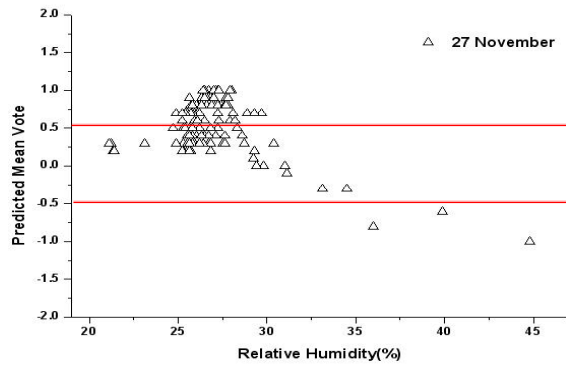


(d) From Dongincheon to Yongsan

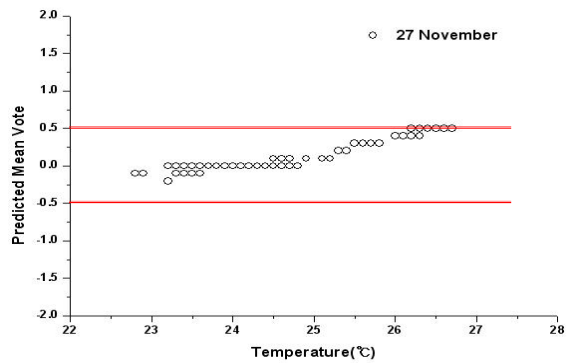
Fig. 3 The relation of PMV depending on temperature and humidity(Electric moter car, November 23, 2007)



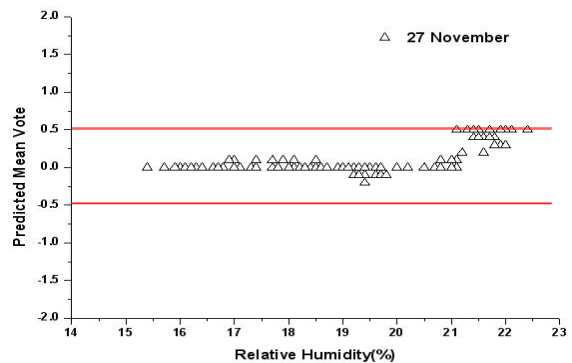
(a) From Daejeon to Seoul



(b) From Daejeon to Seoul

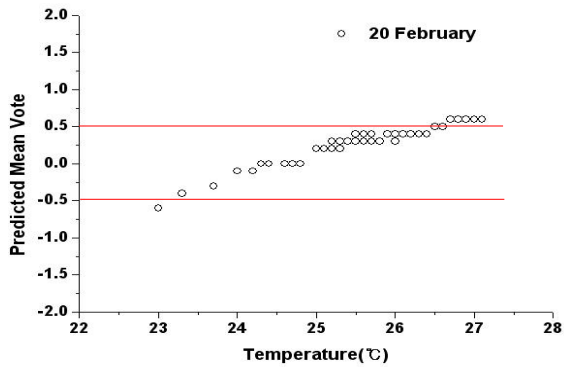


(c) From Seoul to Daejeon

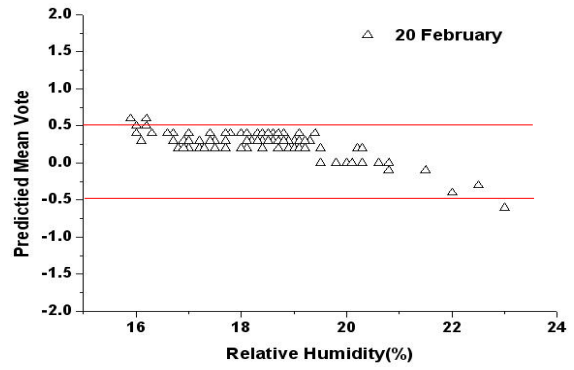


(d) From Seoul to Daejeon

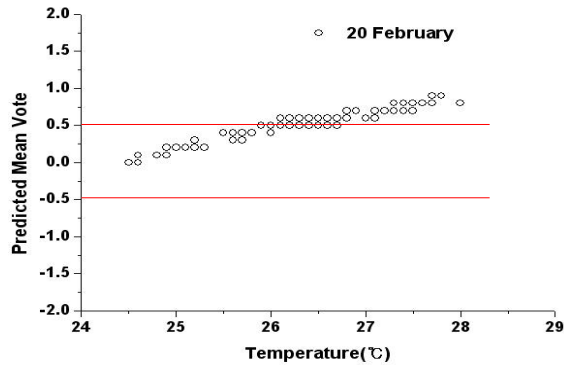
Fig. 4 The relation of PMV depending on temperature and humidity(Mugunghwa, November 27, 2007)



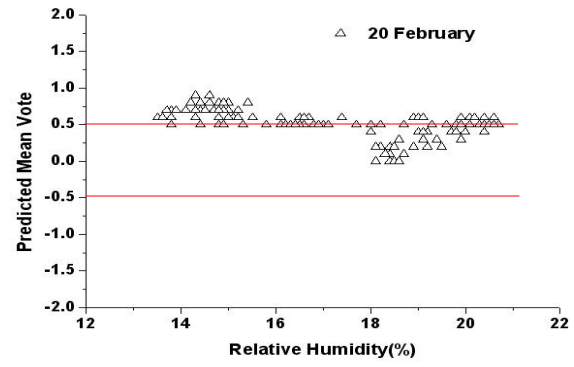
(a) From Seodaejeon to Gwangju



(b) From Seodaejeon to Gwangju

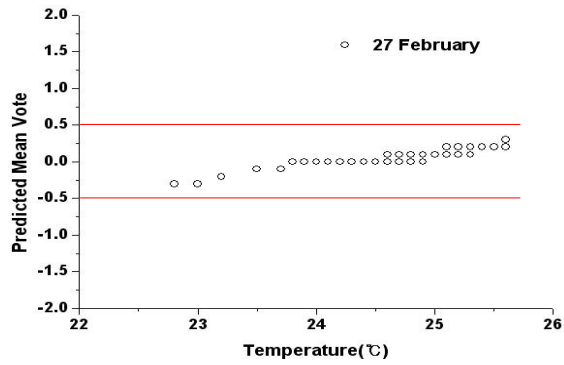


(c) From Gwangju to Seodaejeon

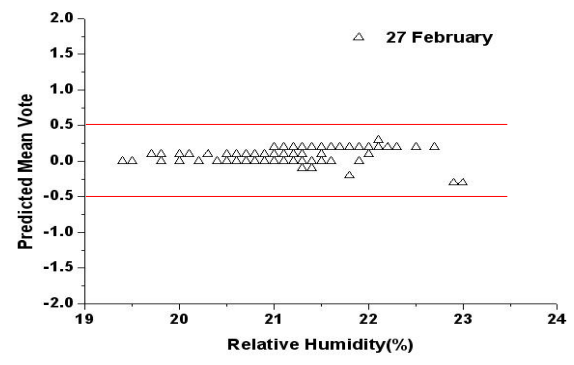


(d) From Gwangju to Seodaejeon

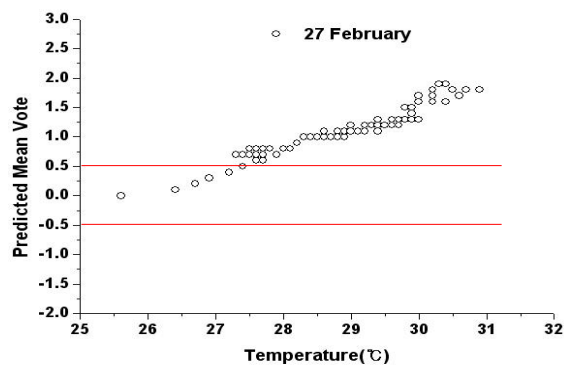
Fig. 5 The relation of PMV depending on temperature and humidity(Saemaoul, February 20, 2008)



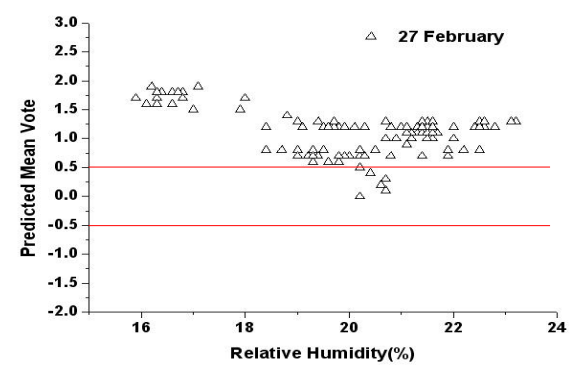
(a) From Seoul to Daejeon



(b) From Seoul to Daejeon



(c) From Daejeon to Seoul



(d) From Daejeon to Seoul

Fig. 6 The relation of PMV depending on temperature and humidity(Mugunghwa, February 27, 2007)

다만, 광주역을 지나 정읍역 구간에서 실내온도 28~30℃, 습도16~23%, 승객수가 45명에서 24명으로 점점 감소하였다. 이로 인해 실내 온열쾌적 범위를 일부구간에서 다소 상회하는 것으로 나타났다. 무궁화호 객차는 2008년 2월27일에 대전역을 출발하여 제천역까지 난방전 자동조건에서 측정한 결과 Table 2 와 Fig.6(a)-(b)에 나타내었다. 평균 실내온도 24.7℃, 평균 습도 21.2%, PMV값은 최고 0.3, 최저 0.1, 평균 0.1로, 이는 ASHRAE Handbook에서 제시하고 있는 실내 온열쾌적 범위 $-0.5 < PMV < +0.5$ 에 만족한 수준이다. 그리고 제천역을 출발하여 대전역까지 난방반 자동조건에서 측정한 결과 Table 2 와 Fig.6(c)-(d)에 나타내었다. 평균 실내온도 28.9℃, 평균 습도 20.2%, PMV값은 최고 1.9, 최저 0, 평균 1.1로, 이는 ASHRAE Handbook에서 제시하고 있는 실내 온열쾌적범위에 다소 불만족한 수준이다. 이는 주덕역(15:45)부터 최종 종착 대전역(17:17)까지 구간으로 실내온도 27℃, 습도 25%, 승객의 인원수가 19명에서는 쾌적범위를 다소 상회하는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 ISO-7730과 미국냉난방공조학회(ASHRAE) Handbook[4-6]에서 제시하고 있는 실내 온열쾌적범위 $-0.5 < PMV < +0.5$ 에 철도차량 실내공간에서의 예상평균온열냉감(PMV:Predicted Mean Vote) 범위는 어느 정도인지 겨울철을 대상으로 실내환경종합측정기(IES-3000, 일본)를 이용하여 측정하였다. 그리고 겨울철 난방 가동조건에 따른 전동차와 무궁화호, 새마을호 객차 실내온도와 습도의 변화에 따른 PMV값을 비교 분석하였다.

- (1) 전동차는 2007년 11월 측정, 각각 평균 PMV값은 0.2, -0.3으로, 평균 실내온도 23.9℃, 21.4℃, 평균 습도 53%, 66.8%로 쾌적범위로 나타났다. 이는 난방가동을 하지 않은 조건에서 승객인원수에 의한 실내온도 영향이 많이 있음을 알 수 있었다.
- (2) 무궁화호 객차는 2007년 11월과 2008년 2월에 측정, 각각 평균 PMV값은 0.5, 0.1, 0.1, 1.1로, 평균 실내온도 26℃, 24.7℃, 24.7℃, 28.9℃로, 평균 습도 27%, 19.4%, 21%, 20%로, 난방 가동조건에서 승객인원수에 따라 실내온도 영향으로 일부구간은 쾌적범위를 다소 상회하는 것으로 나타났다.
- (3) 새마을호 객차는 2008년 2월에 측정, 각각 평균 PMV값은 0.3, 0.5로, 평균 실내온도 25.4℃, 26.3℃로, 평균 습도 18%, 17%로, 난방과 실내송풍기를 가동하지 않은 조건에서 일부구간은 승객 인원수가 적은 영향으로 쾌적범위를 다소 상회하는 것으로 나타났다.
- (4) 겨울철 전동차, 무궁화호, 새마을호 실내공간에서의 PMV는 승객 개개인의 인체 열부하에 따라 실내 승객인원수 증감의 영향과 난방 가동유무에 따라, 온도와 습도분포 영향의 차이가 있는 것으로, 이를 통해 겨울철은 실내기류의 영향보다는 승객인원수의 영향이 많음을 확인하였다.

참고문헌

1. 건설교통부(2007), “차세대 객차용 청정시스템 개발”, 한국철도기술연구원
2. 연봉준(2007), “철도차량의 온열쾌적성 및 2차원 모델”, 석사학위논문, 한국과학기술원
3. Kate E. Charles(2003), “Fanger's Thermal Comfort and Draught Models”, IRC Research Report RR-162, October 10.
4. ASHRAE Fundamentals Handbook(1997), “Thermal Comfort”.
5. 정광섭, 홍희기 공역(2004), “공기선도 읽는법·사용법”, 성안당.
6. (주)신성엔지니어링 역(2004), “공기조화 핸드북”, 도서출판 한미.
7. SIBATA(2007), "Indoor Air Quality Monitoring System(Model IES-3000) Manual".