

PRT 차량하부 열부하 저감방안 도출 연구

권 순 박,^{*1} 송 지 한,¹ 강 석 원,² 정 락 교,² 김 학 범,³ 이 창 현,³ 서 동 관⁴

¹한국철도기술연구원 에코시스템연구실

²한국철도기술연구원 수요응답형교통연구단TFT

³제이에스기술루션

⁴(주)동원OLEV 차량개발팀

STUDY ON THE PREVENTION METHOD FOR HEAT ACCUMULATION FOR PERSONAL RAPID TRANSIT (PRT) VEHICLE UNDER BODY

S.-B. Kwon,¹ J.H. Song,¹ S.-W. Kang,² R.-G. Jeong,² H.-B. Kim,³ C.H. Lee³ and D.-K. Seo⁴

¹Eco-System Research Division, Korea Railroad Research Institute, South Korea

²On-Demand Transit Research Team, Korea Railroad Research Institute, South Korea

³Dept. of CFD Analysis, JSCSolutions, Inc., South Korea

⁴Vehicle SI(System Integration) Team, Dongwon OLEV Co., Ltd., South Korea

Personal Rapid Transit (PRT) is the emerging personal transport vehicle operating on the loop automatically. The PRT system utilize the electrical power from super capacity or battery, it is important to manage the power or energy. In this regards, the management of high temperature occurred by the operation of system is significantly important to prevent from serious damage of component. In this study, we studied the adequate shape of underbody which can reduce the heat accumulation by pickup coil and condenser using natural air cooling. We suggested the additional air pathway, air inlet and flow separator to decrease the temperature of the heat source components. It was found that suggested system can decrease the temperature of PRT under body by 16% during the static mode and by 10% during the running mode at 30km/h. It is expected that the findings of this study will feed into final design of newly built Korean PRT vehicle.

Key Words : PRT(Personal Rapid Transit), 열원(Heat Source), 집전모듈(pickup coil module), 전산수치해석(Computational Fluid Dynamics), 차량(Vehicle)

1. 서 론

PRT(Personal Rapid Transit) 시스템은 다수의 루프(loop)를 포함하는 네트워크(network)로 구성된 노선 상에서 출발지에서 목적지까지 무정차로 무인자율주행 방법에 의해서 운영되는 미래형 신교통수단으로 정의될 수 있다[1]. 특히, 친환경 녹색 교통시스템에 대한 수요가 증가하고 있는 시점에서 PRT와 같은 에너지 소비가 적은 궤도 수송수단의 역할이 재조명

되고 있다[2]. 시스템의 용량 측면에서는 Fig. 1과 같이 지하철이나 경량전철보다 작은 규모(4-6명)이지만 자동차에 버금가는 승객의 요구 대응성 및 기존 궤도 대중교통 시스템의 정시성을 특징으로 한다[1,3]. 이러한 시스템은 오래전에 미래형 대중교통수단으로 정의되었고 현재까지 연구/개발이 활발히 진행되어 왔다[3]. 특히, 최근 영국의 히드로(Heathrow) 공항과 아랍에미리트연합(UAE)의 마스다르시(Masdar City)에 PRT의 개념에 가까운 시스템(예: ULTra, 2getthere)이 운용되고 있지만, 아직 PRT의 표준모델로 삼기에는 부족한 면이 있다. 국내의 경우에는 현재 한국철도기술연구원에서 PRT의 기본 개념에 가장 부합하는 한국형 PRT 시스템을 개발하기 위해 노력하고 있다.

한국형 PRT는 전기 동력 차량으로 전기에너지 저장장치

Received: December 15, 2012, Revised: March 8, 2013,

Accepted: March 9, 2013.

* Corresponding author, E-mail: sbkwon@krii.re.kr

DOI http://dx.doi.org/10.6112/ksce.2013.18.1.058

© KSCFE 2013

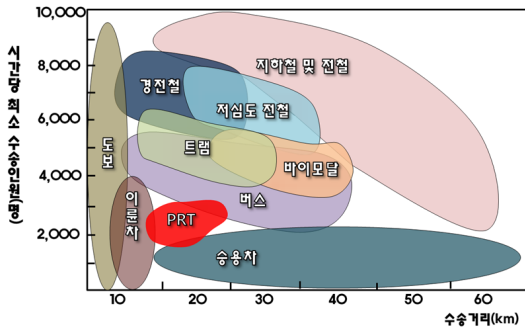


Fig. 1 Classification of urban transportation systems

(예: 슈퍼 커패시터(super capacitor) 혹은 배터리)로부터 공급되는 전기에너지로 추진되도록 설계되어 있다. 에너지 저장 장치의 충전은 역사에 설치된 비접촉식 급전(contact-less power supply) 방식에 의해 정차 시에 수행된다. 비접촉 전력전송 시스템은 인버터(inverter)로부터 지상에 매설된 급전선로에 공급되는 고주파 교류 전류로부터 발생된 1차 자계(magnetic field)가 차량 하부에 장착된 집전모듈(pickup module) 내 페라이트 코어(ferrite core)에 의해 유도되는 2차 유도자계(induced magnetic field)로 형성되는 과정에서 공진에 의한 자속의 변화에 의해 전기를 생산해 낸다[4]. 고풍력의 전기에너지를 생산하는 과정에서 집전모듈 내에서 많은 열이 발생하며, 그 외 추진모터에 전기에너지를 공급하기 위한 배터리, 레귤레이터(regulator) 및 DC-DC 컨버터(converter) 주변에서도 열이 발생하며, 이는 집전효율과 직접적으로 관련된다. 이에 더불어 운행 시에 냉각장치나 추진 모터 주변의 열 관리 또한 전체 차량 시스템의 성능에 영향을 미치기 때문에 매우 중요하다.

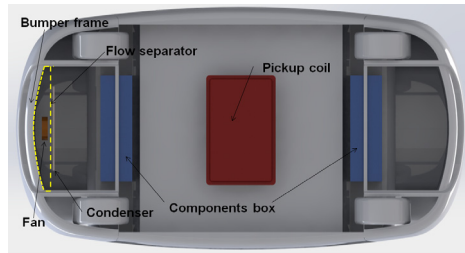
전기구동 차량에서 열관리 시스템은 안정적인 성능 확보를 위한 냉각시스템과 상품성과 관련되는 실내 냉/난방 시스템으로 구분된다. 특히, 배터리 관리 시스템(BMS: Battery Management

Table 1 Korean PRT system specifications

Item		Target Specifications
Loading Condition	Maximum Passengers Weight	0.4 ton
	Unloaded Vehicle Weight	0.9 ton
	Fully Loaded Vehicle Weight	1.3 ton
Vehicle Size	Dimension	3.8×2.0×1.8 m
	Wheelbase	2.2 m
	Tread	1.2 m
Operation Condition	Vehicle Operation	One-carriage Train
	Maximum Number of Passengers	4~6
etc.	Wheel	Rubber Tire
	Body Frame and Exterior Panel	- Frame: AL6063, Aluminum Honeycomb - Panel: FRP



(a) concept drawing of PRT body



(b) main components of PRT at under frame

Fig. 2 Concept drawing of PRT vehicle and under body

System)이나 구동 모터를 위한 냉각시스템의 설계는 차량의 성능(주행 시간 및 성능)을 결정하는 중요한 요소이다[5]. 궁극적으로 차량의 신뢰성 확보와 성능 저하를 막기 위해서는 시스템 내 전기 에너지 생산 및 관리 시스템의 온도가 기준 값 이하로 유지될 필요가 있다. 하지만, 배터리로부터 공급되는 에너지는 제한적이기에 비교적 작은 냉각 모듈이 적용되어야 한다. 이러한 이유로 에너지 소모가 큰 수 강제대류냉각(liquid forced convection cooling)방식보다는 자연대류공랭(natural convection air cooling)방식이 시스템에 적은 부담을 주기 때문에 선호되어 진다. 이에 따라 본 연구에서는 개발중인 PRT차량의 차량하부 전장품 등에서 발생하는 열과 여름철 지면에서 흡수되는 전도 및 복사열을 효과적으로 저감시킬 수 있는 방안을 검토하여, PRT 차량 상세설계에 활용하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 PRT 차량 기본 제원

현재 개발하고 있는 한국형 PRT차량의 기본 제원은 Table 1과 같다. 만차시 차량 중량이 약 1.3 ton이며, 차량크기는 길이방향으로 3.8 m이다. Fig. 2에 PRT차량의 예상 이미지와 하부부품 예상배치도를 제시하였다. 차량 하부에 설치하는 주요 전장품 가운데 열발생이 우려되는 픽업모듈내 픽업코일(pickup coil)과 콘덴서(condenser)를 주요 해석대상으로 선정하였으며, 기

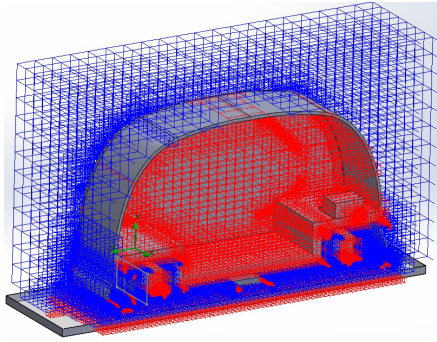


Fig. 3 PRT mesh for CFD analysis

타 부품 등은 부품박스(components box)로 처리하였다. 콘덴서의 열을 저감시키는 팬을 함께 고려하였다. 현재까지 차량 상세설계가 이루어지기 전 단계 인 만큼 주요 부품의 발열량과 대략적인 위치를 가정하여, 정차 및 주행 중 하단부의 기류와 온도분포를 분석하고 효과적인 저감방안을 사전에 제시하고자 한다.

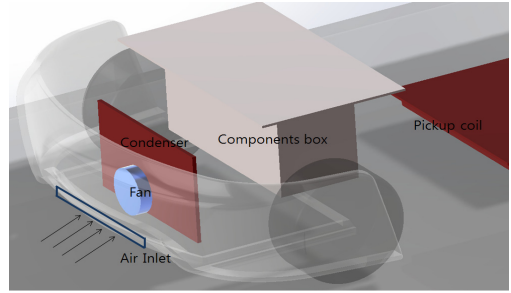
2.2 열원의 해석 방법 및 경계조건

집전모듈은 전자기 유도 원리를 이용하여 집전을 하는 장치로서, 대략 10 kW의 출력을 공급하도록 설계되었다. 픽업 장치 내부 온도 30℃, 코어에서 발생하는 발열량은 2 kW가 연속적으로 발생할 경우로 가정하였다. 이때 육면체의 박스 형태로 가정된 픽업코일부에서는 상면에서 167 W/m², 측면에서 86 W/m²의 열이 발생하는 것으로 예측되며 이를 Table 2에 제시하였다. 픽업코일부 외 주요열원 발생부인 콘덴서 발열량과 콘덴서 통기저항 및 콘덴서 전단에 적용되는 팬의 속도를 Table 2에 함께 정리하였다. 외기온도와 노면온도는 여름철을 가정하여 40℃로 하였으며, 차량의 재질은 알루미늄과 유리로 구성하였고, 노면은 콘크리트로 가정하였다. 콘덴서에서 발생하는 열을 저감하기 위한 송풍기 팬은 콘덴서 용량에 맞게 설계되었으며, 약 2~2.2 m/s의 유동이 발생되도록 설정하였다.

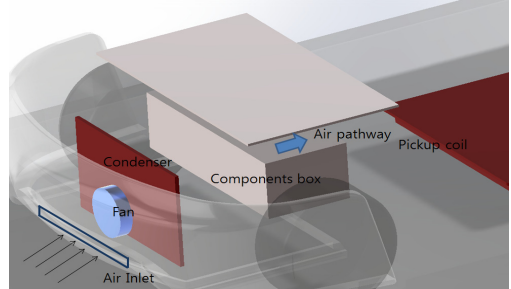
본 연구에서의 차량은 3D_CAD를 이용하여 모델링하여 이를 바탕으로 Fig. 3과 같이 약 20만 개의 격자를 생성하여 정차 중인 경우와 30 km/h의 속도로 운행 중인 경우에 대하여 정

Table 2 Heat source and analytic conditions

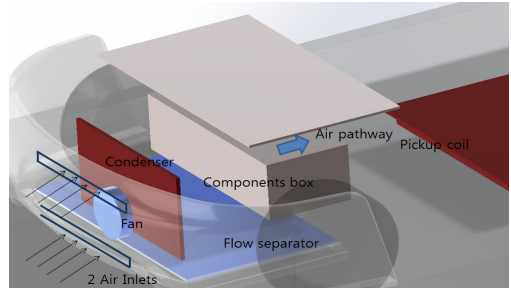
Heat source and analytic condition		
Pickup Coil Module	Upper face 1	67 W/m ²
	Side face	86 W/m ²
Condenser	Heat	5600 kcal/h
	Pressure drop	21.1 Pa
Fan Outflow velocity	2~2.2 m/s	
Air/ road temperature	40℃	



(a) case A



(b) case B



(c) case C

Fig. 4 Geometry of PRT cases for analysis

상상태(steady state) 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 프로그램은 상용수치해석 프로그램인 Flow Simulation v.12 (Solid Works사)를 사용하였다. Flow Simulation은 실내공간의 유동과 온열환경 해석[6], 자동차 전장품의 최적열관리 등[7] 유동과 온열환경해석에 널리 사용되는 상용수치해석 프로그램이다.

수치해석은 PRT차량 전륜부 하단에 공기 유입구를 설치한 경우(Case A), 전륜부 하단에 공기 유입구를 설치하고 차량 전장품 박스 상단에 공기통로(air pathway)를 설치한 경우(Case B), 범퍼 하단에 기류 분리판(flow separator)을 설치하고 공기 유입부를 추가로 설치한 경우(Case C)에 대하여 각각 해석을 수행하였다(Fig. 2(b), Fig. 4). 정차중(static mode)인 경우 세 가지 해석케이스를 각각 Case A_S, Case B_S, Case C_S로 주행중(running mode)인 경우를 Case A_R, Case B_R, Case C_R로 각각 구분하여 해석결과를 제시하였다. 정차중 상태와 주행중 상태에서 모두 태양광에 의한 복사열을 고려하였다(서울 기준).

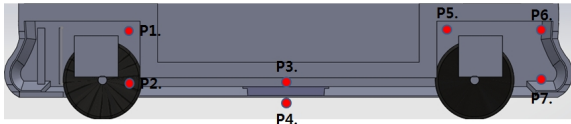


Fig. 5 Points of temperature monitored

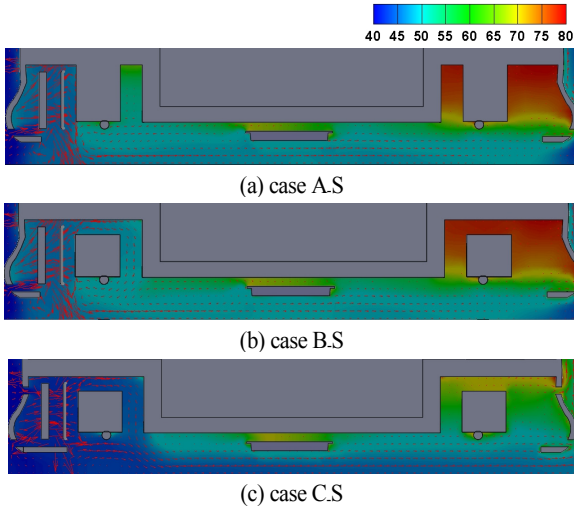


Fig. 6 Flow velocity and temperature profile

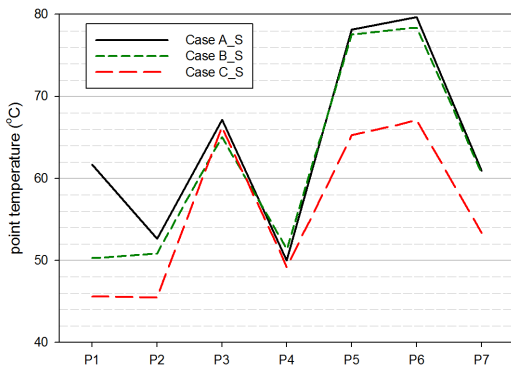


Fig. 7 Point temperatures for static mode of PRT

3. 해석 결과

3.1 정차중 PRT하부 열유동 해석

차량 하부 주요지점에서의 온도분포 특성을 파악하기 위하여 Fig. 5와 같이 7지점을 선정하였다. P1~P7의 7지점은 모두 차량 단면 중심에 위치하고 있는데, P1과 P2는 공기통로 후단부와 하단부이며, P3과 P4는 각각 픽업코일 상부와 하부위치

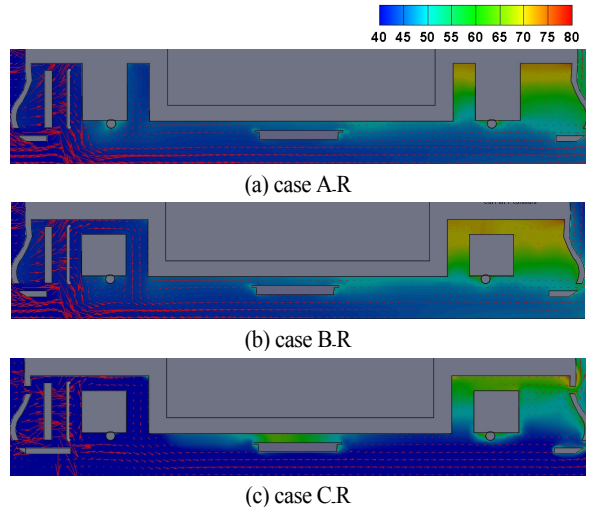


Fig. 8 Flow velocity and temperature profile

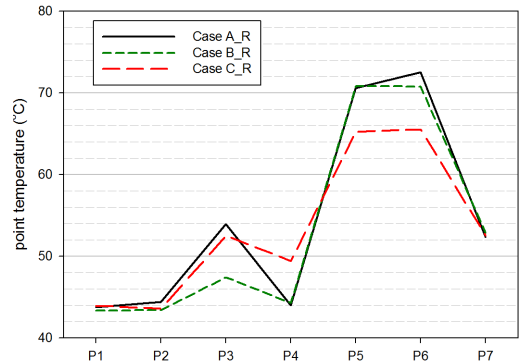


Fig. 9 Point temperatures for running mode of PRT

이며, P5~P7은 후륜부의 주요지점을 나타내고 있다.

정차중 상태의 유동장 속도벡터와 온도장 분포결과를 Fig. 6에 제시하였다. Case A와 B는 유사한 유동장과 온도패턴을 나타내는 것으로 나타났으며, 기류분리판이 설치된 Case C의 경우 후륜부의 온도(P6 지점)가 약 8°C 감소하였다. 부품박스 상부에 설치된 공기통로는 후단부 P1지점의 온도를 공기통로가 없는 경우에 비하여 약 10°C 이상 낮추는 효과가 있었으며, 기류분리판 설치로 인하여 Case B에 비하여 Case C에서 P3지점의 온도가 약 5°C 감소하는 효과가 나타났다. 각 지점별 온도분포 특성을 Fig. 7에 보다 자세히 제시하였다.

Case A_S와 Case B_S의 경우 P1지점을 제외하고 전체적으로 유사한 온도분포를 나타낸 반면, 2개의 공기유입부와 기류분리판이 설치된 Case C_S의 경우 후륜부 최고 온도가 10°C 이상 낮은 상태로 유지되는 것을 알 수 있다.

3.2 주행중 PRT하부 열유동 해석

시속 30 km/h의 속도로 운행중인 경우 정차중일 때에 비하여 차량 하부의 유동이 활발해짐에 따라 정차중일 때보다 전체적으로 낮은 온도분포를 보였다. 정차중일 때와 마찬가지로 Case A_R과 Case B_R은 전체적으로 유사한 온도분포와 속도분포 양상을 나타내는 것으로 나타났다(Fig. 8). 각 지점별 온도분포 변화양상을 Fig. 9에 제시하였다.

Case A_R에 비해 Case B_R의 경우 차량 전륜부 P3지점에서 약 11℃ 온도저감효과가 나타났으며, Case C_R의 경우 P4 지점, 즉 픽업코일 상부에서 Case A_R과 Case B_R보다 온도가 높아지는 점을 제외하면, 전 지점에서 온도저감 효과가 나타났다. P4지점에서의 상대적 고온축적은 기류분리판의 효과에 의한 것으로 차량주행중에는 차량의 하단과 지상면 사이에 고속의 풍량이 발행하여 픽업코일에서 발생한 열량이 차량 바닥으로 빠져나가지 못하고 축적되는 현상을 보이기 때문이다. 하지만 전체적으로 보았을 때 Case C_R가 하단부 온도증가를 최소화 하는 것으로 나타났다. Table 3에 제시된 것처럼, 각 해석케이스의 평균온도는 정차중일 때, 64.3℃ > 62.0℃ > 56.0℃로 Case C의 하부평균온도가 가장 낮게 나타났으며, 주행중인 경우에는 54.5℃, 53.3℃, 53.3℃로 정차중일 때에 비하여 주행풍에 의한 전체적 온도저감 및 Case C의 공기유입부 추가설치 및 기류분리판의 효과가 크지 않은 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 PRT 하부구조에 정차 및 주행 중 발생하는 온도증가에 의한 장치이상 등의 문제를 사전에 예방할 수 있도록 기본 설계구조 외 2가지의 변경된 설계안을 적용한 열유동 수치해석을 수행하였다. 하부구조에서 가장 많은 열을 발생시키는 픽업코일과 콘덴서를 열원으로 선정하여 온도분포와 유동장 백터를 분석하였다. 수치해석결과 기본 설계구조인 공기유입구와 콘덴서 전단에 설치된 송풍기 팬만 적용할 경우 차량 후륜부에서 정차중 최고 80℃까지 증가하는 현상이

나타났으며 주행중에도 72℃까지 온도가 증가하는 현상이 예측되었다. 공기통로만을 추가로 설치한 Case B의 경우 전반적인 온도 저감효과는 나타났으나, 후륜부의 최고온도는 Case A와 유사한 수준으로 최고온도가 도달되는 것을 알 수 있었다. 전면에 공기유입부를 추가로 설치하고, 기류분리판을 설치한 Case C의 경우 후륜부 최고온도가 정차중 67.1℃ 주행중 65.5℃로 나타나 약 정차중 최대 16% 운행중 최대 10% 수준의 최고온도 감소현상이 나타났다. 본 연구를 통해 향후 제작되는 PRT차량 하부의 기본적인 열부하 저감방안이 검토되었으며, 차량의 상세설계에 공기유입부와 기류방지판을 반영하고자 한다.

후 기

본 연구는 “수요응답형 순환교통시스템(PRT) 핵심기술 개발” 사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 1978, Irving, J.H., Bernstein, H., Olson, C.L. and Buyan, J., "Fundamentals of Personal Rapid Transit," D.C. Health and Company, Lexington MA.
- [2] 2011, Lee, J.S. and Kim, K.T., "PRT Application Study Using Corridor Analysis: Focused on Nan-Gok Area," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.14, pp.188-193.
- [3] 2009, Kim, M.W. and Lee, H.Y., "Status of PRT Technology Development and Guide-Way R&D," DAEWOO engineering company report, pp.83-103.
- [4] 2010, Jung, G.-H., Lee, K.-H., Kim, H.-G., Cho, Y.-J., Song, B.-Y., Son, Y.-D., Park, E.-H., Choi, J.-Y., Kong, B.-O., Son, H.-S., Cho, J.-G., Rim, C.-T. and Jeon, S.-J., "Wireless Power Transfer System for Online Electric Vehicles," *Korean Journal of Power Electronics*, pp.218-219.
- [5] 2011, Won, J. and Lee, H., "The Need to Develop Thermal Management System Technologies of Electric Driven Vehicles (EV, PHEV, FCEV)," *Auto Journal, Special Edition(2011.12)*, pp.22-28.
- [6] 2012, Ahmed, T. and Rahman, M.D.Z., "Performance Investigation of Building Ventilation Systems by Calculating Comfort Criteria through HVAC Simulation," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Vol.3, pp.7-12.
- [7] 2011, Silva, C.M.D., Azmi, M.N., Christie, T., Abou-Saba, E. and Ooi, A., "Computational flow Modelling of Formula-1 Sidepods for Optimum Radiator Heat Management," *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol.6, pp.94-108.

Table 3 Point temperatures of each case

	Static Mode Case Temperature (°C)			Running Mode Case Temperature (°C)		
	A S	B S	C S	A R	B R	C R
P1	61.7	50.3	45.6	43.8	43.3	44.0
P2	52.7	50.8	45.5	44.4	43.4	43.6
P3	67.2	65.1	66.3	53.9	47.4	52.5
P4	50.0	51.4	49.2	44.0	44.3	49.4
P5	78.1	77.6	65.3	70.6	70.8	65.2
P6	79.7	78.4	67.1	72.5	70.8	65.5
P7	60.9	60.6	53.3	52.3	52.9	52.6
Avg.	64.3	62.0	56.0	54.5	53.3	53.3