



ECG 기반의 운전자별 인지 부하 평가 방법 개발

Development of an Evaluation Method for a Driver's Cognitive Workload Using ECG Signal



2012. 11. 02



Wongi Hong¹, Heecheon You²

¹Integrated Logistics Support R&D Lab, LIG Nex1

²Department of Industrial and Management Engineering, POSTECH

CONTENTS

- Background
 - Research Objectives
 - Method
 - Experiment Protocol
 - Analysis Method
 - Results
 - Optimal Analysis Condition of Cognitive Workload
 - Effectiveness Test
 - Discussion
-

Research Background

□ 안전 운전 지원 기술



보행자 추돌방지 시스템(New S60, Volvo)

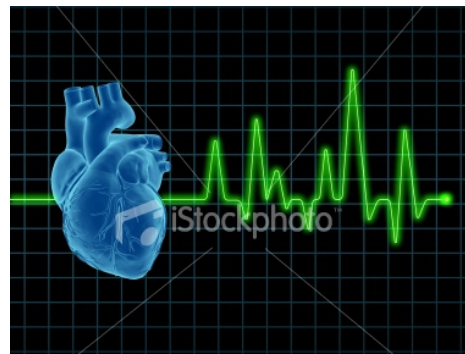


차선이탈 경보장치(Genesis, Hyundai Motor Company)

□ 심전도(electrocardiography; ECG)를 활용한 안전 운전 지원 기술



인지 부하 상승



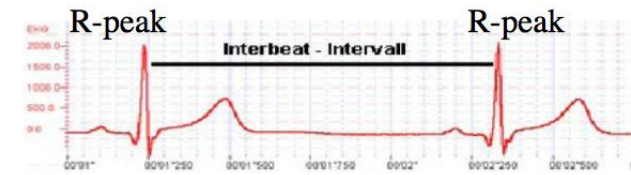
심전도를 활용한
인지 부하 파악



안전 운전 지원

Quantification Measures for ECG Analysis

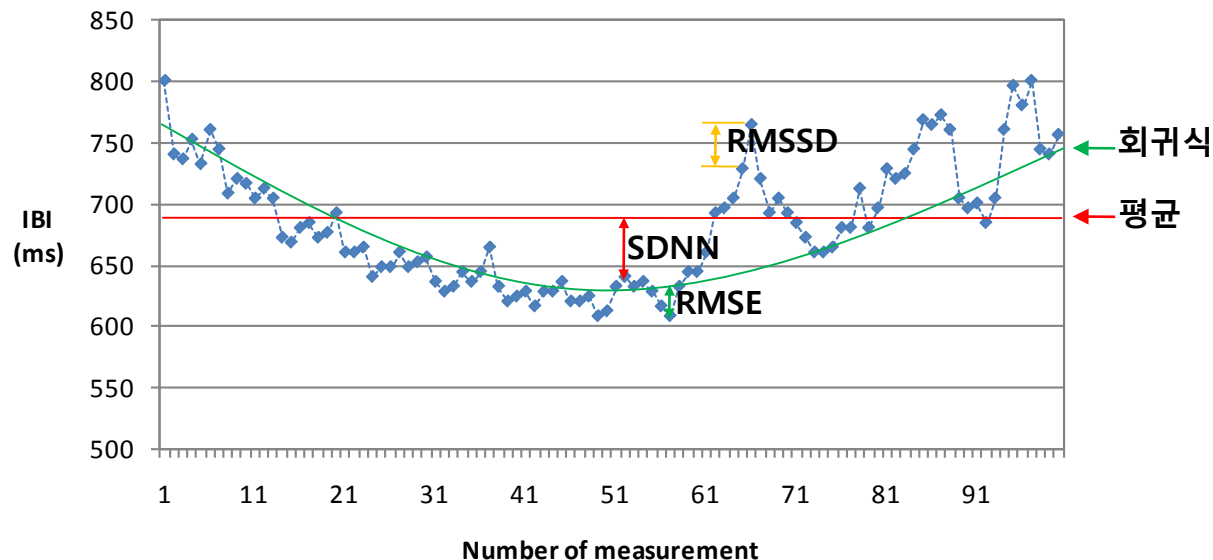
□ Mean IBI: 평균 심장 박동 간격 Yao et al. (2008) $\frac{\sum_{i=1}^n (y_i)}{n}$



Interbeat interval (IBI) Mehler et al. (2009)

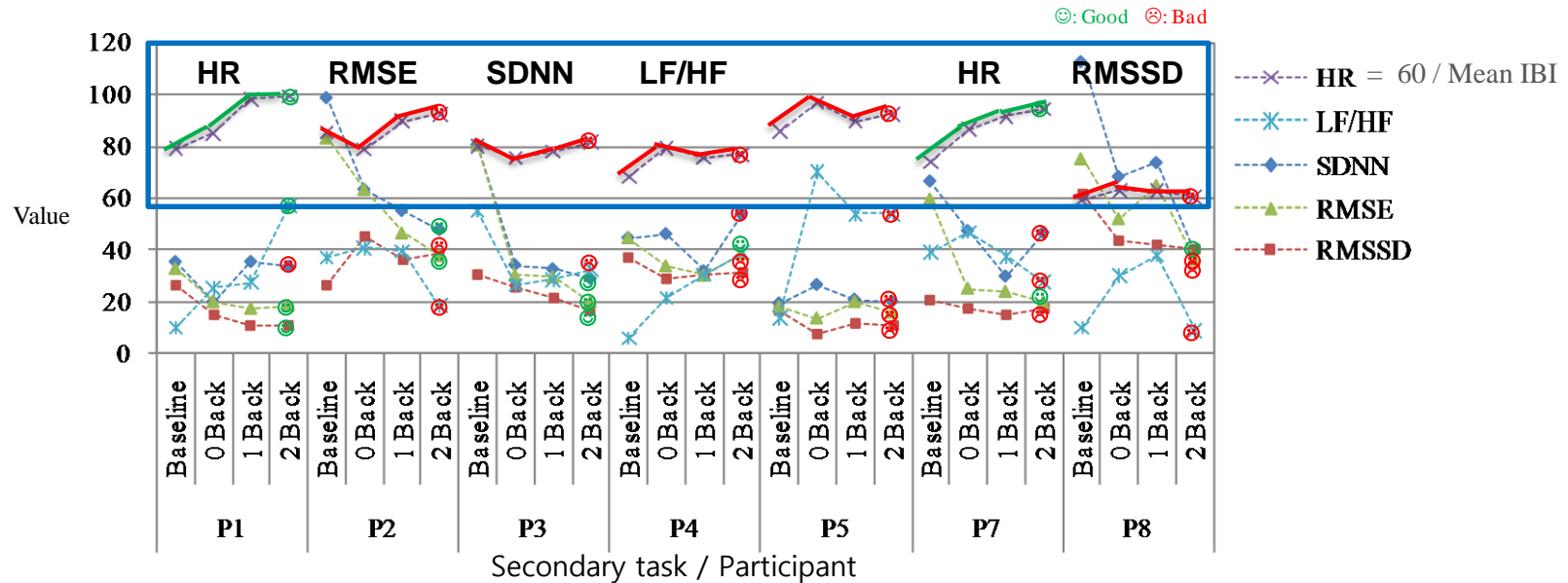
□ Variability measure $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i)^2}{n-1}}$

- SDNN: 평균 대비 편차 ($d_i = y_i - \bar{y}$) Schubert et al. (2002), Wood et al. (2002)
 - RMSSD: 직전 data 대비 편차 ($d_i = y_i - y_{i-1}$) Gould et al. (2009)
 - RMSE: 회귀 추정값 대비 편차 ($d_i = y_i - \hat{y}$) Lee et al. (2010)
- } IBI 변화 trend 반영



Limitation of Cognitive Workload Analysis based on ECG

- 운전자별 다양한 심장 박동 특성이 고려되지 않음 [Gould et al. \(2009\)](#), [Schubert et al. \(2002\)](#), [Wood et al. \(2002\)](#), [Yao et al. \(2008\)](#)
- 개인별 인지 부하 판별이 용이한 ECG 정량화 척도 상이 [Lee et al. \(2010\)](#)



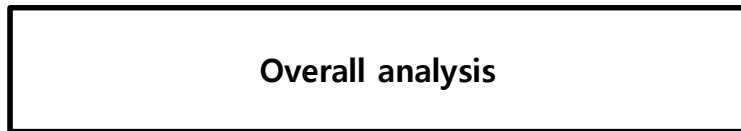
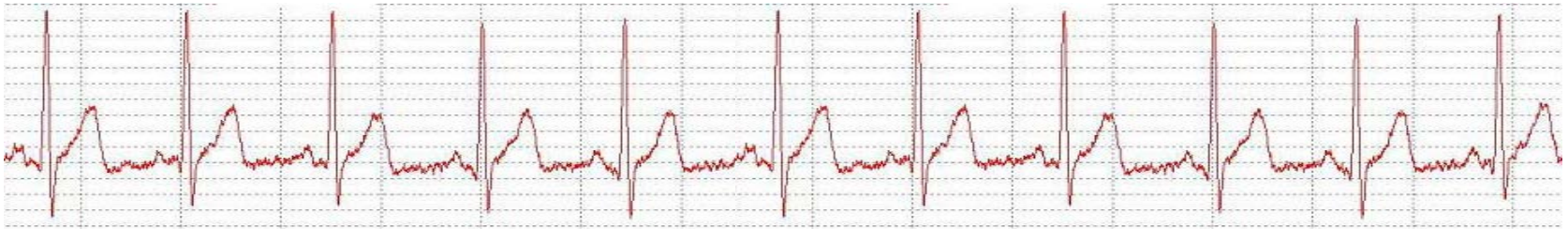
개인별 상이한 최적 ECG 정량화 척도 Lee et al. (2010)

→ 개인별 심장 박동 특성을 고려한 **최적 ECG 정량화 척도를 선정**하여 인지 부하를 평가하는 방법 개발 필요

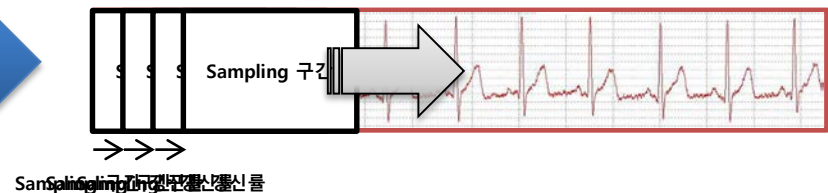
Real-time Evaluation of Cognitive Workload based on ECG

- 기존 연구는 특정 작업 부하 상황에서 전체 ECG 신호를 수집하고 사후에 인지 부하 평가 [Gould et al. \(2009\)](#), [Yao et al. \(2008\)](#), [Wood et al. \(2002\)](#), [Schubert et al. \(2002\)](#)

→ 자동차 안전 운전 시스템 적용을 위해서는 **실시간으로 측정**되는 ECG 신호를 **지속적으로 sampling**하여 분석 필요



기존 연구의 ECG 분석 형태



실시간 ECG 분석 형태

Research Objectives

운전자 개인의 심장 박동 특성이 고려된 ECG 기반의 개인별 최적 인지 부하 평가 방법 개발 및 효용성 평가

1. ECG 정량화 척도 및 실시간 분석 고려 요소 파악

- ✓ ECG 기반의 인지 부하 평가 관련 문헌 조사
- ✓ ECG 정량화 척도 및 실시간 분석 고려 요소 파악
- ✓ 선정된 고려 요소의 세부 수준 결정

2. 개인별 최적 인지 부하 평가 방법 개발

- ✓ 다양한 조건에서 인지 부하를 평가할 수 있도록 분석 조건 조합
- ✓ AUC를 활용한 다양한 인지 부하 분석 조건에서의 개인별 최적 조건 판정 방법 개발

3. 개발된 인지 부하 평가 방법의 효용성 평가

- ✓ 수집된 ECG data를 활용하여 개인별 인지 부하 평가 수준 검토
- ✓ 개발된 인지 부하 평가 방법 고찰



Methods

Participants & Apparatus

□ 실험 참여자

- 모집 인원: 20 ~ 30대 남성 15명(27.7 ± 3.0 세)
- 모집 기준: 운전 경력이 3년 이상, 심혈관계 질환이 없는 자

□ 실험 장비

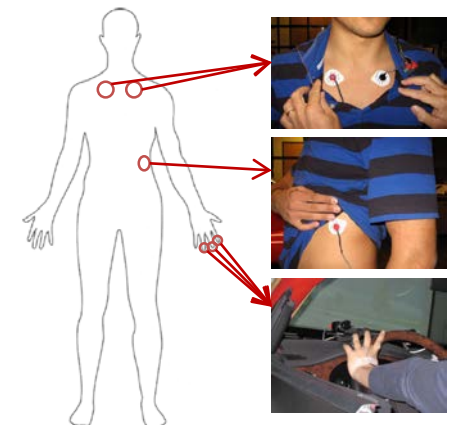
- 주행 시뮬레이터: STISIM Drive™ (Systems Technology Inc., USA)
- ECG 측정 장비: MEDAC system/3 (Biomation, USA)



주행 시뮬레이터



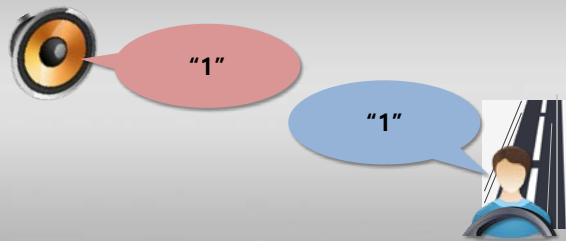
주행 시뮬레이터 화면



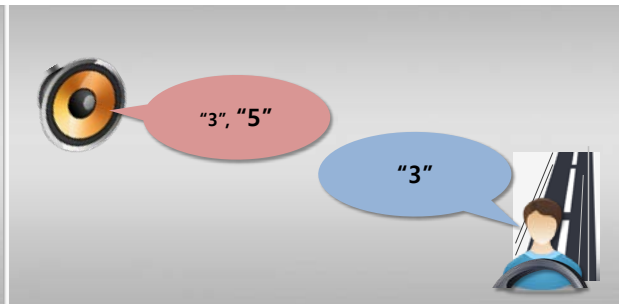
MEDAC 센서 부착 위치

Primary & Secondary Task

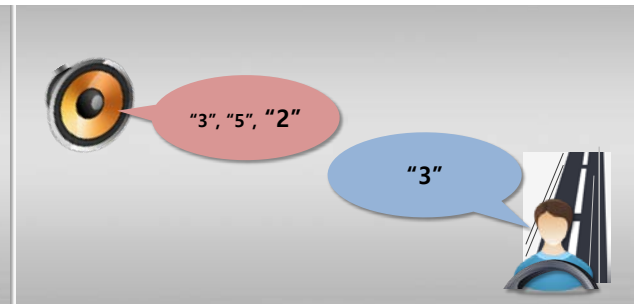
- 주 작업: 편도 2차 고속도로(폭: 4.57m) 약 37km를 23분 이내 주행
- 보조 작업: n-back task
 - 연속적으로 제시되는 무작위 숫자들의 n번째 이전 숫자를 기억해내는 암기 작업(Son et al., 2010)
 - 0-back: 낮은 부하
 - 1-back: 중간 부하
 - 2-back: 높은 부하



(a) 0-back



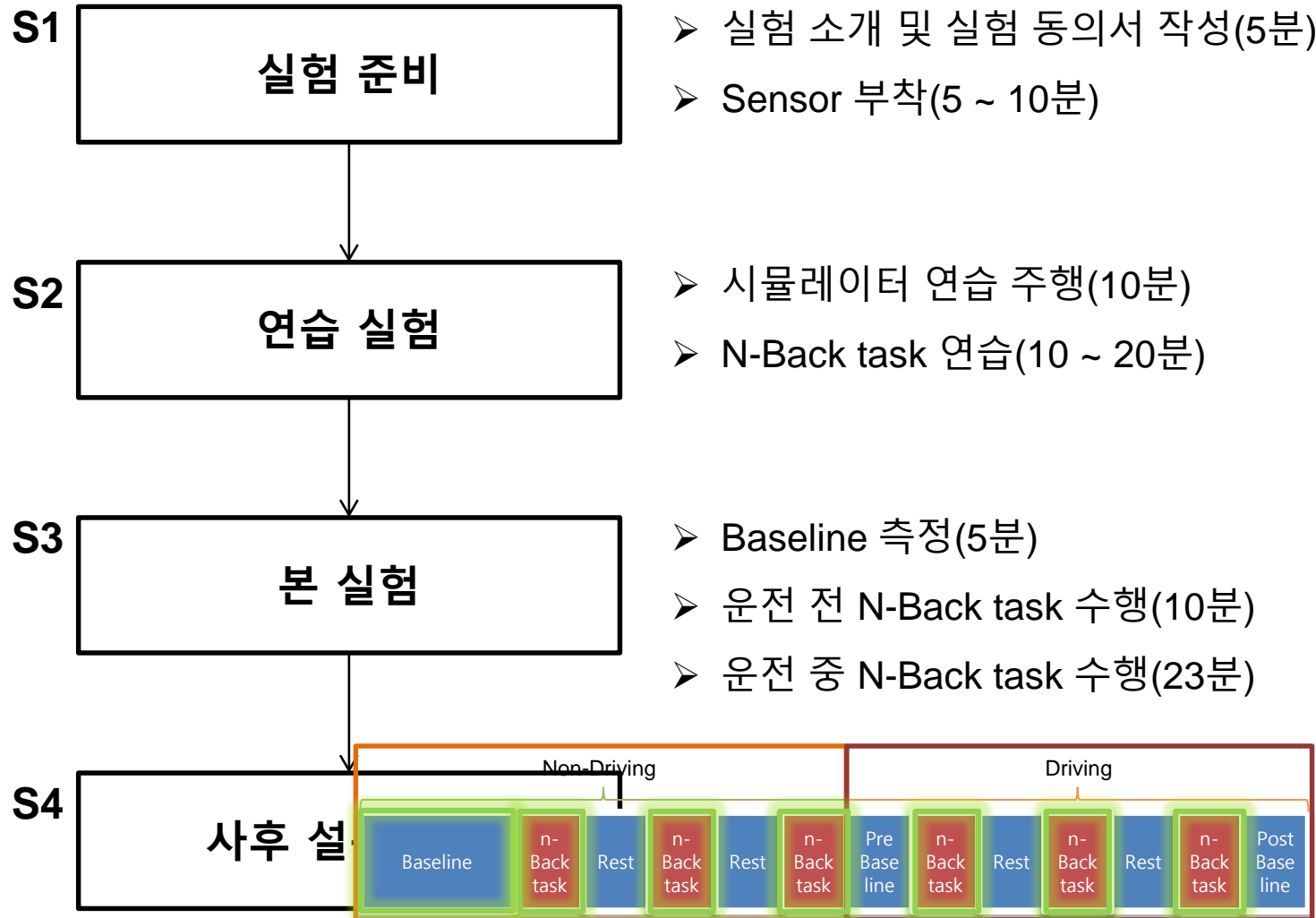
(b) 1-back



(c) 2-back

n-back task 예시
10

Experimental Design



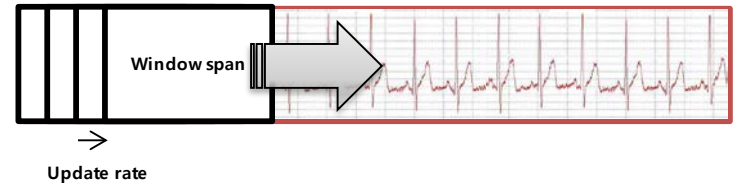
개인별 최적 인지 부하 분석 조건 판정에 사용

판정된 인지 부하 분석 조건의 효용성 평가에 사용

Window Span & Update Rate

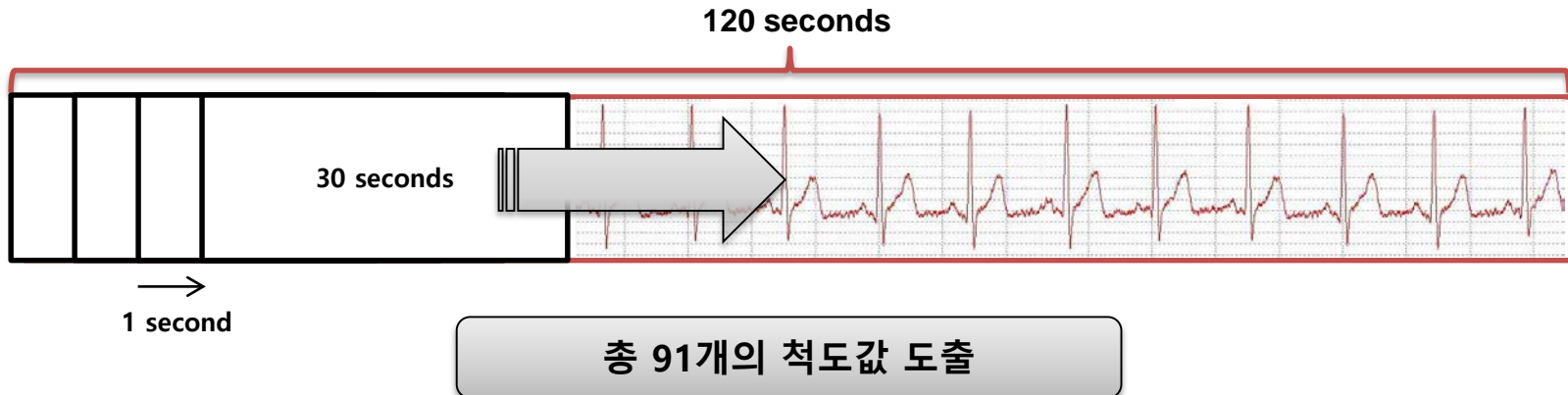
- ECG data는 IBI 변환 시 실시간 인지 부하 변화에 따른 경고를 제공하기 위해 data를 일정 구간으로 sampling하여 분석에 사용

- Sampling 구간 크기 = window span
- Sampling 구간 갱신속도 = update rate



- 분석 절차 예(window span = 30초, update rate = 1초)

- S1. 매 1초마다 30초 분량의 ECG data를 sampling
- S2. 각 sampling data (30초)에서 IBI 추출
- S3. IBI로부터 ECG 척도(예: Mean IBI) 변환



ECG Data Quantification

□ ECG data의 4가지 척도 변환

Task No.	Mean IBI				SDNN				RMSSD				RMSE			
	BL	0B	1B	2B	BL	0B	1B	2B	BL	0B	1B	2B	BL	0B	1B	2B
1	.606	.625	.636	.612	.007	.008	.006	.008	.006	.007	.006	.007	.006	.006	.006	.007
2	.606	.625	.638	.614	.008	.008	.006	.008	.006	.007	.006	.007	.006	.007	.006	.007
3	.606	.626	.638	.617	.008	.008	.006	.008	.006	.007	.006	.007	.006	.007	.006	.007
4	.607	.626	.639	.619	.008	.008	.006	.009	.006	.007	.006	.007	.007	.007	.006	.007
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
88	.609	.630	.640	.635	.009	.012	.007	.009	.006	.008	.007	.007	.008	.008	.006	.008
89	.609	.630	.640	.636	.009	.012	.007	.010	.006	.008	.007	.007	.008	.008	.006	.008
90	.610	.630	.641	.637	.009	.012	.007	.010	.006	.008	.007	.007	.008	.008	.006	.008
91	.610	.630	.641	.639	.009	.012	.007	.010	.006	.008	.007	.007	.008	.009	.006	.008

※ BL: baseline, 0B: 0-back, 1B: 1-back, 2B: 2-back

Cognitive Workload for ROC Analysis

- 인지 부하 비교 방법: 낮은 부하(안정 수준) vs. 높은 부하(위험 수준)

낮은 부하(안정 수준)

VS.

높은 부하(위험 수준)

1	Baseline	0-Back		1-Back	2-Back
2		0-Back		1-Back	2-Back
3	Baseline	0-Back	1-Back		2-Back
4		0-Back	1-Back		2-Back

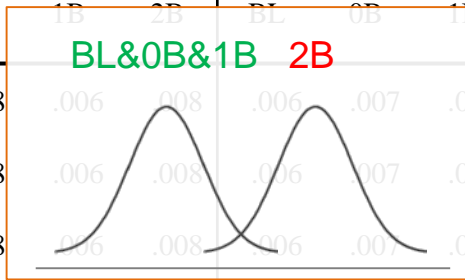


총 4가지 부하 비교 조건

Data Pooling for ROC Analysis

□ Baseline & 0-back & 1-back vs. 2-back의 경우

	Mean IBI				SDNN				RMSSD				RMSE			
	BL	0B	1B	2B	BL	0B	1B	2B	BL	0B	1B	2B	BL	0B	1B	2B
1	.606	.625	.636	.612	.007	.008	.006	.008	.006	.007	.006	.007	.006	.006	.006	.007
2	.606	.625	.638	.614	.008	.008	.006	.008	.006	.007	.006	.007	.006	.007	.006	.007
3	.606	.626	.638	.611	.008	.008	.006	.008	.006	.007	.006	.007	.006	.007	.006	.007
4	.607	.626	.639	.619	.008	.008	.006	.009	.006	.007	.006	.007	.007	.007	.006	.007
⋮	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid green; padding: 2px;">낮은 부하</div> <div style="border: 1px solid red; padding: 2px;">높은 부하</div> </div>				⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
88	.609	.630	.640	.635	.009	.012	.007	.009	.006	.008	.007	.007	.008	.008	.006	.008
89	.609	.630	.640	.636	.009	.012	.007	.010	.006	.008	.007	.007	.008	.008	.006	.008
90	.610	.630	.641	.637	.009	.012	.007	.010	.006	.008	.007	.007	.008	.008	.006	.008
91	.610	.630	.641	.639	.009	.012	.007	.010	.006	.008	.007	.007	.008	.009	.006	.008



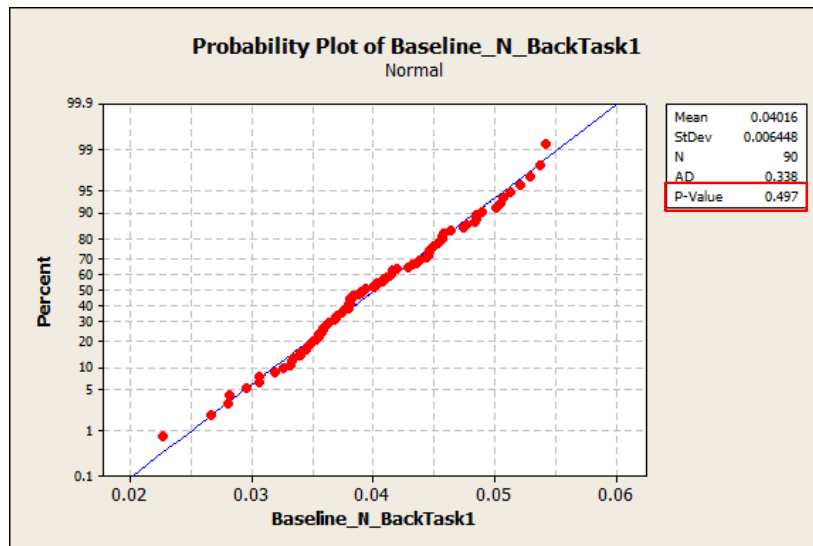
※ BL: baseline; 0B: 0-back; 1B: 1-back; 2B: 2-back

Normality Test for ROC Analysis

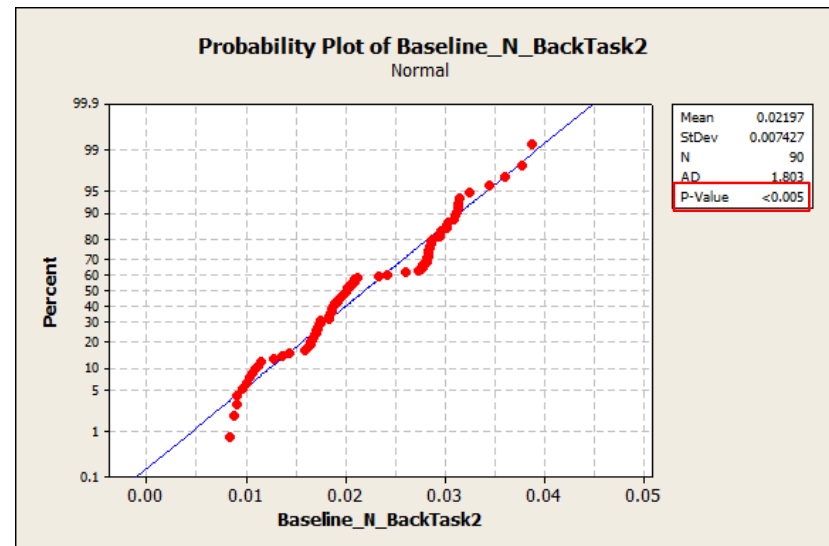
□ Anderson-darling 검정 결과(participant 2, 3, 4 data 사용)

- $p\text{-value} > 0.05$ means the null hypothesis is accepted and the **distribution is normal**.
- $p\text{-value} < 0.05$ means the null hypothesis is rejected and the distribution is not normal.

⇒ 정규 분포율: 6.9%



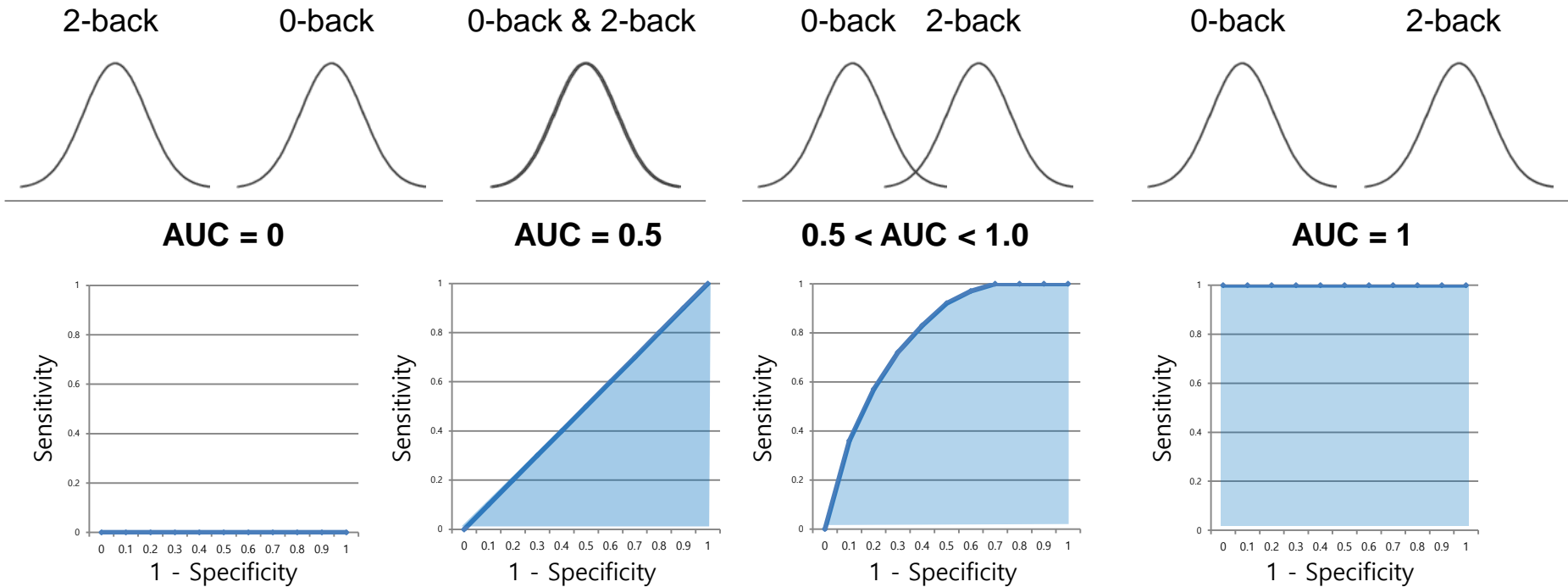
정규성을 갖는 경우



정규성을 갖지 않는 경우

Area Under the ROC Curve (AUC)

□ AUC는 비교에 사용되는 data가 정규분포를 따르지 않을때 사용되는 방법



AUC가 0.5를 초과할 때, 정상 범위의 값이며 클수록 변별 능력 높음

본 연구는 AUC가 높은 조건을 개인별 최적의 분석 조건으로 판별

Evaluation Method of Individual Optimal ECG Analysis Condition

□ 36가지의 AUC 분석 조건

- ECG 정량화 척도(4가지): Mean IBI, SDNN, RMSSD, RMSE
- Window span(3가지): 20초, 30초, 40초
- Update rate(3가지): 1초, 2초, 3초

□ 4가지의 인지 부하 간 비교 조건

⇒ 각 인지 부하 비교 조건(총 4가지)에서 최대 AUC를 갖는 분석 조건을 최적의 ECG 분석 조건으로 선정

총 144개 조건



1개의 최적 인지 부하 분석 조건

Ex) Optimal ECG Analysis Condition

- 40초의 window span, 2초의 update rate, 그리고 RMSSD 변환하여 baseline & 0-back & 1-back vs. 2-back 비교 시, 최대 AUC 나타남

⇒ 최적 인지 부하 분석 조건

Analysis condition			vs. 1B & 2B	BL & 0B & 1B vs. 2B	0B vs. 1B & 2B	0B & 1B vs. 2B
Window span (s)	Update rate (s)	정량화 척도				
20	1	Mean IBI	0.944	0.870	0.782	0.740
		SDNN	0.511	0.589	0.165	0.445
		RMSSD	0.696	0.980	0.037	0.253
		RMSE	0.499	0.666	0.296	0.486
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
40	2	Mean IBI	0.945	0.778	0.720	0.554
		SDNN	0.275	0.568	0.059	0.394
		RMSSD	0.877	0.989 최대 AUC	0.069	0.344
		RMSE	0.249	0.504	0.077	0.375
40	3	Mean IBI	0.946	0.777	0.715	0.540
		SDNN	0.111	0.349	0.064	0.430
		RMSSD	0.563	0.661	0.053	0.322
		RMSE	0.109	0.305	0.074	0.384

Result

Optimal ECG Analysis Condition

□ 다양한 최적 인지 부하 분석 조건이 나타남

Participant No.	Optimal quantification factors Measure	Window span (sec)	Update rate (sec)	AUC	Cognitive workload comparison condition	
					Low cognitive workload	High cognitive workload
1	RMSSD	40	2	0.989	BL & 0B & 1B	2B
2		-		< 0.500	-	-
3	SDNN	30	2	0.658	0B & 1B	2B
4	RMSSD	30	1	0.862	0B	1B & 2B
5	RMSSD	30	1	0.993	BL & 0B & 1B	2B
6	SDNN	40	3	0.636	BL & 0B & 1B	2B
7	SDNN	40	1	0.969	0B & 1B	2B
8	SDNN	20	3	0.947	0B & 1B	2B
9	SDNN	40	1	0.946	BL & 0B	1B & 2B
10		-		< 0.500	-	-
11	Mean IBI	40	2	0.986	BL & 0B & 1B	2B
12	Mean IBI	40	3	0.844	BL & 0B & 1B	2B
13	SDNN	40	3	0.885	0B & 1B	2B
14		-		< 0.500	-	-
15	RMSSD	30	1	0.970	BL & 0B	1B & 2B

※ BL: baseline; 0B: 0-back; 1B: 1-back; 2B: 2-back

Optimal ECG Analysis Condition

□ 12명 중 7명(58%)의 경우, 적합한 최적 인지 부하 분석 조건 판정

Participant No.	Optimal quantification factors Measure	Window span (sec)	Update rate (sec)	AUC			Cognitive workload comparison condition	
				Before driving	During driving	Difference	Low cognitive workload	High cognitive workload
1	RMSSD	40	2	0.989	0.947	-0.042 ☺	BL & 0B & 1B	2B
2		-		< 0.500		-		
3	SDNN	30	2	0.658	0.751	0.093 ☺	0B & 1B	2B
4	RMSSD	30	1	0.862	0.253	-0.609	0B	1B & 2B
5	RMSSD	30	1	0.993	0.850	-0.143 ☺	BL & 0B & 1B	2B
6	SDNN	40	3	0.636	0.336	-0.300	BL & 0B & 1B	2B
7	SDNN	40	1	0.969	0.963	-0.006 ☺	0B & 1B	2B
8	SDNN	20	3	0.947	0.651	-0.296	0B & 1B	2B
9	SDNN	40	1	0.946	0.992	0.046 ☺	BL & 0B	1B & 2B
10		-		< 0.500		-		
11	Mean IBI	40	2	0.986	0.894	-0.092 ☺	BL & 0B & 1B	2B
12	Mean IBI	40	3	0.844	0.693	-0.151	BL & 0B & 1B	2B
13	SDNN	40	3	0.885	0.830	-0.055 ☺	0B & 1B	2B
14		-		< 0.500		-		
15	RMSSD	30	1	0.970	0.795	-0.175	BL & 0B	1B & 2B

※ BL: baseline; 0B: 0-back; 1B: 1-back; 2B: 2-back

Difference = AUC(DD) - AUC(BD)
☺: Difference < 0.1 or AUC(DD) ≥ 0.8

Discussion

Discussion

- 운전자 개인의 심장 박동 특성이 고려된 ECG 기반의 개인별 최적 인지 부하 평가 방법 개발
 - ECG 정량화 척도 및 실시간 분석 고려 요소(window span, update rate) 파악 및 분석 수행
 - AUC를 활용한 개인별 최적 인지 부하 평가 방법 개발
- 효용성 평가
 - 58% (12명중 7명)의 개인별 심장 박동 특성에 적합한 최적 인지 부하 분석 조건 판정

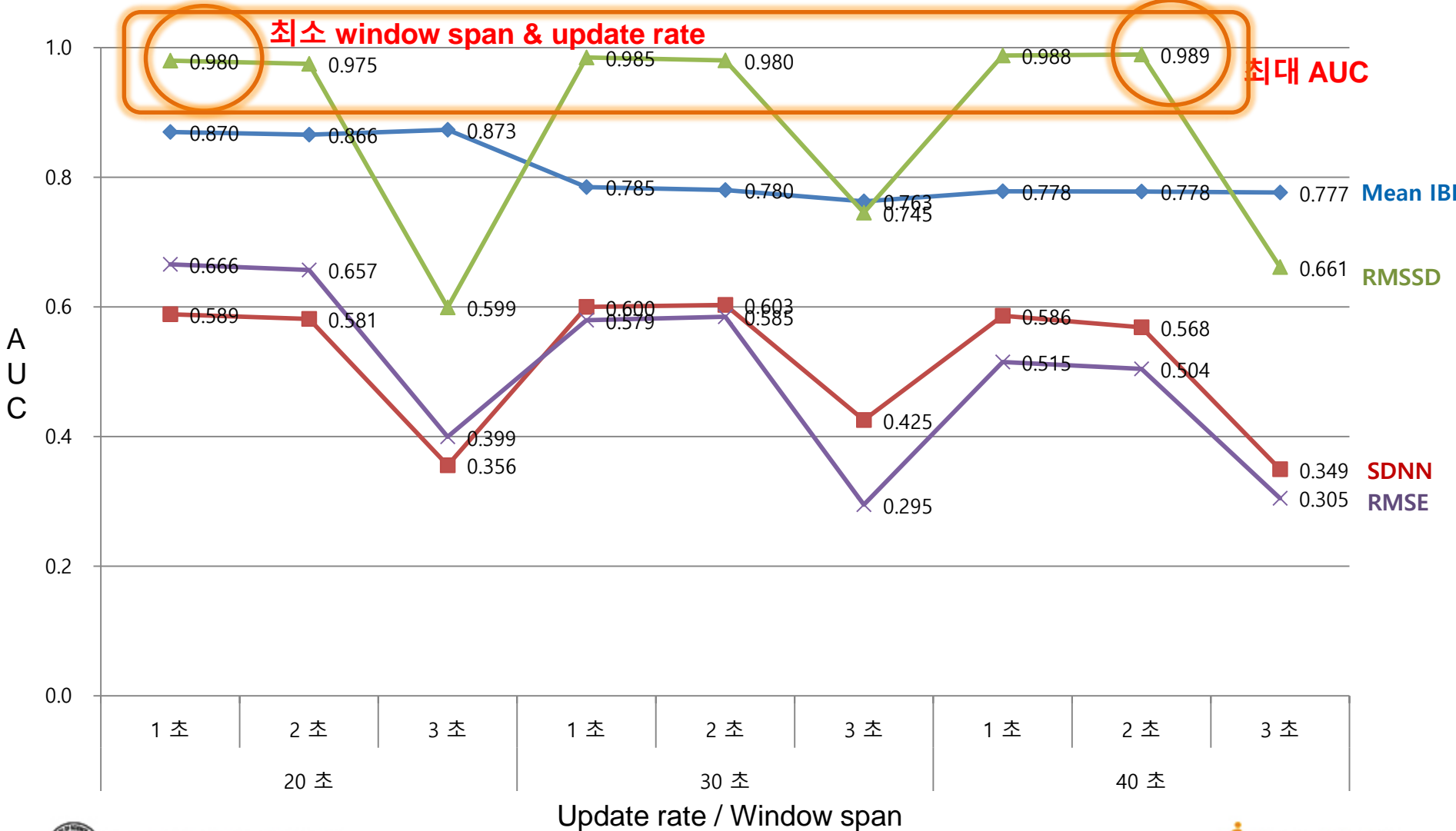
Follow-Up Study

- 다양한 심장 박동 특성을 고려하기 위해 인지 부하 분석 조건(ECG 정량화 척도, window span, 그리고 update rate)을 추가하여 개발된 인지 부하 평가 방법 보완
- 최적 인지 부하 분석 조건을 판정하는 방법 보완
- 실차 주행 ECG data를 활용하여 개발된 인지 부하 평가 방법의 효용성 평가 수행

Detailed Analysis: Participant 1 (Non-Driving)

인지 부하 비교 조건: BL & 0B & 1B vs. 2B

RMSSD의 update rate 1, 2초에서 높은 AUC 값 도출



Follow-Up Study

- 다양한 심장 박동 특성을 고려하기 위해 인지 부하 분석 조건(ECG 정량화 척도, window span, 그리고 update rate)을 추가하여 개발된 인지 부하 평가 방법 보완
- 최적 인지 부하 분석 조건을 판정하는 방법 보완
- 실차 주행 ECG data를 활용하여 개발된 인지 부하 평가 방법의 효용성 평가 수행

Q & A

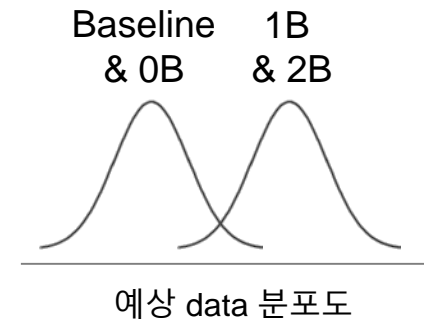
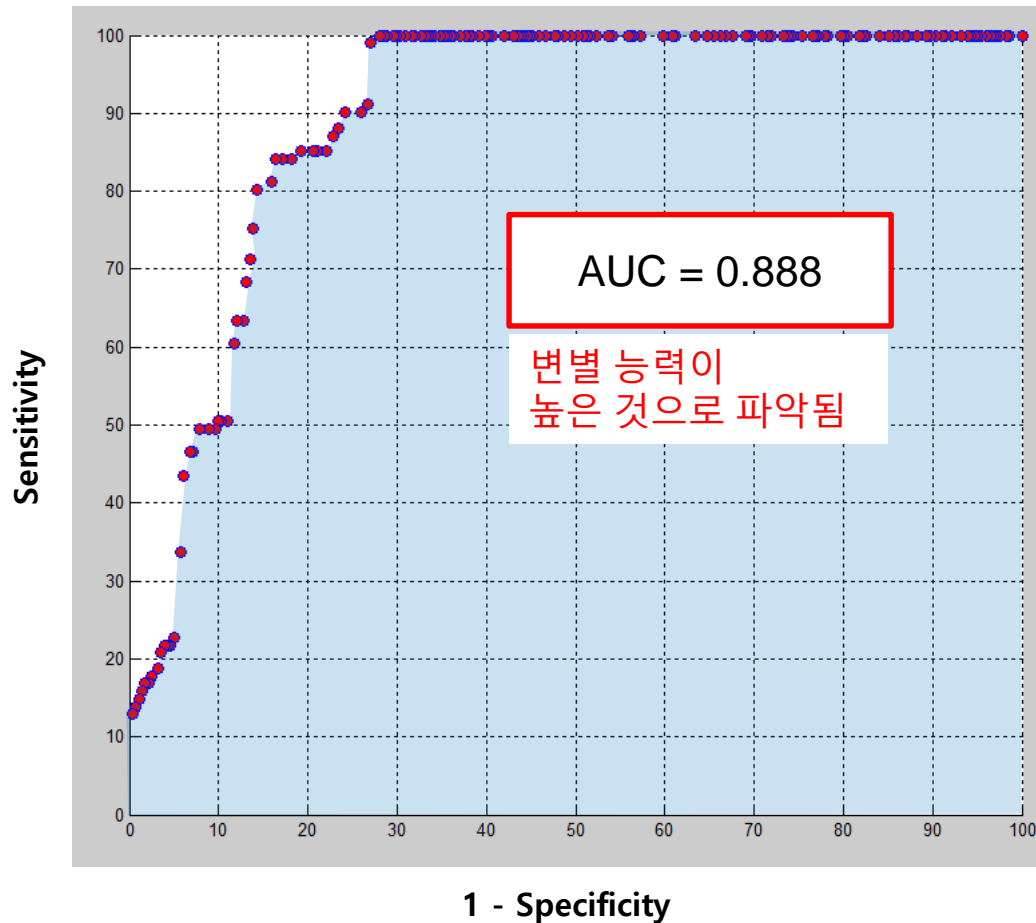
Thank You
for Your **Attention!** 😊



APPENDIX

Example of AUC Analysis

□ Baseline & 0-back vs. 1-back & 2-back의 경우



Plotting된 AUC 분석 결과 예
30

Optimal ECG Analysis Condition

□ 다양한 최적 인지 부하 분석 조건이 나타남

Participant No.	Optimal quantification factors	Measure	Window span (sec)	Update rate (sec)	AUC	Cognitive workload comparison condition	
						Low cognitive workload	High cognitive workload
1		RMSSD	40	2	0.989	BL & 0B & 1B	2B

정량화 척도: SDNN (6명) > RMSSD (4명) > Mean IBI (2명) > RMSE (0명)

Window span: 40초(7명) > 30초(4명) > 20초(1명)

Update rate: 1초(5명) > 3초(4명) > 2초(3명)

10					< 0.500		
11		Mean IBI	40	2	0.986	BL & 0B & 1B	2B
12		Mean IBI	40	3	0.844	BL & 0B & 1B	2B
13		SDNN	40	3	0.885	0B & 1B	2B
14					< 0.500		
15		RMSSD	30	1	0.970	BL & 0B	1B & 2B

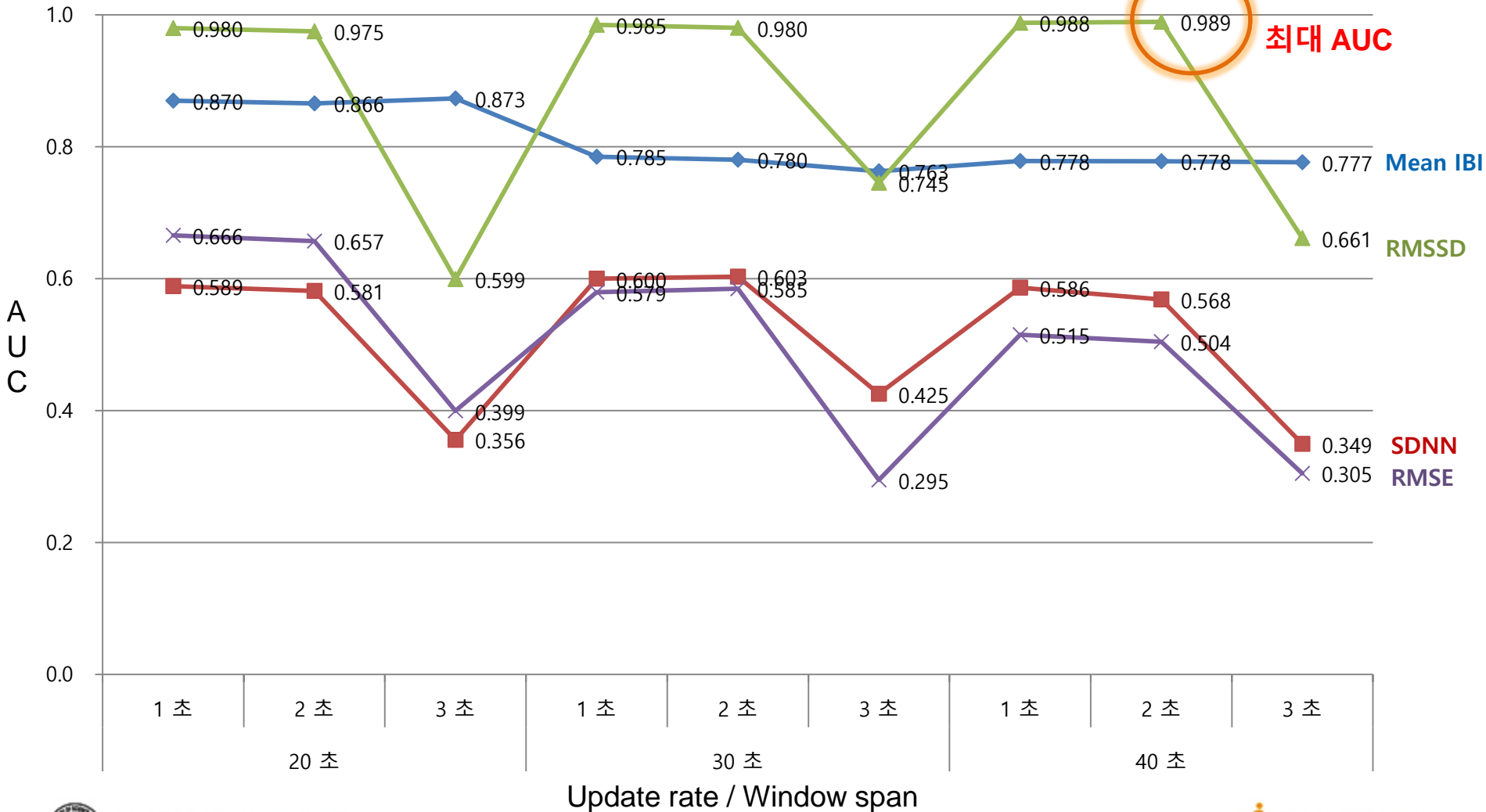
※ BL: baseline; 0B: 0-back; 1B: 1-back; 2B: 2-back



Detailed Analysis

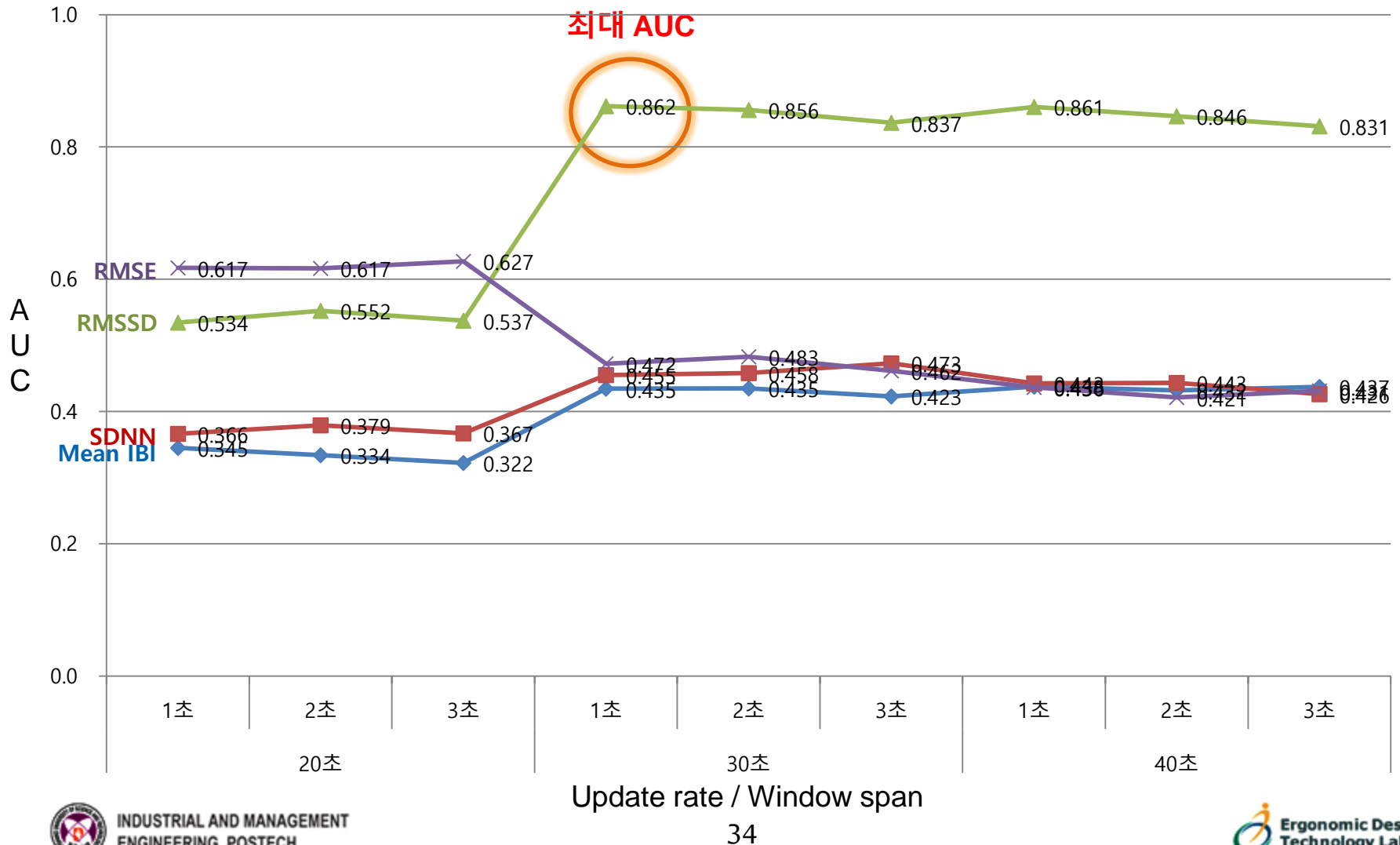
Detailed Analysis: Participant 1 (Non-Driving)

인지 부하 비교 조건: BL & 0B & 1B vs. 2B



Detailed Analysis: Participant 4 (Non-Driving)

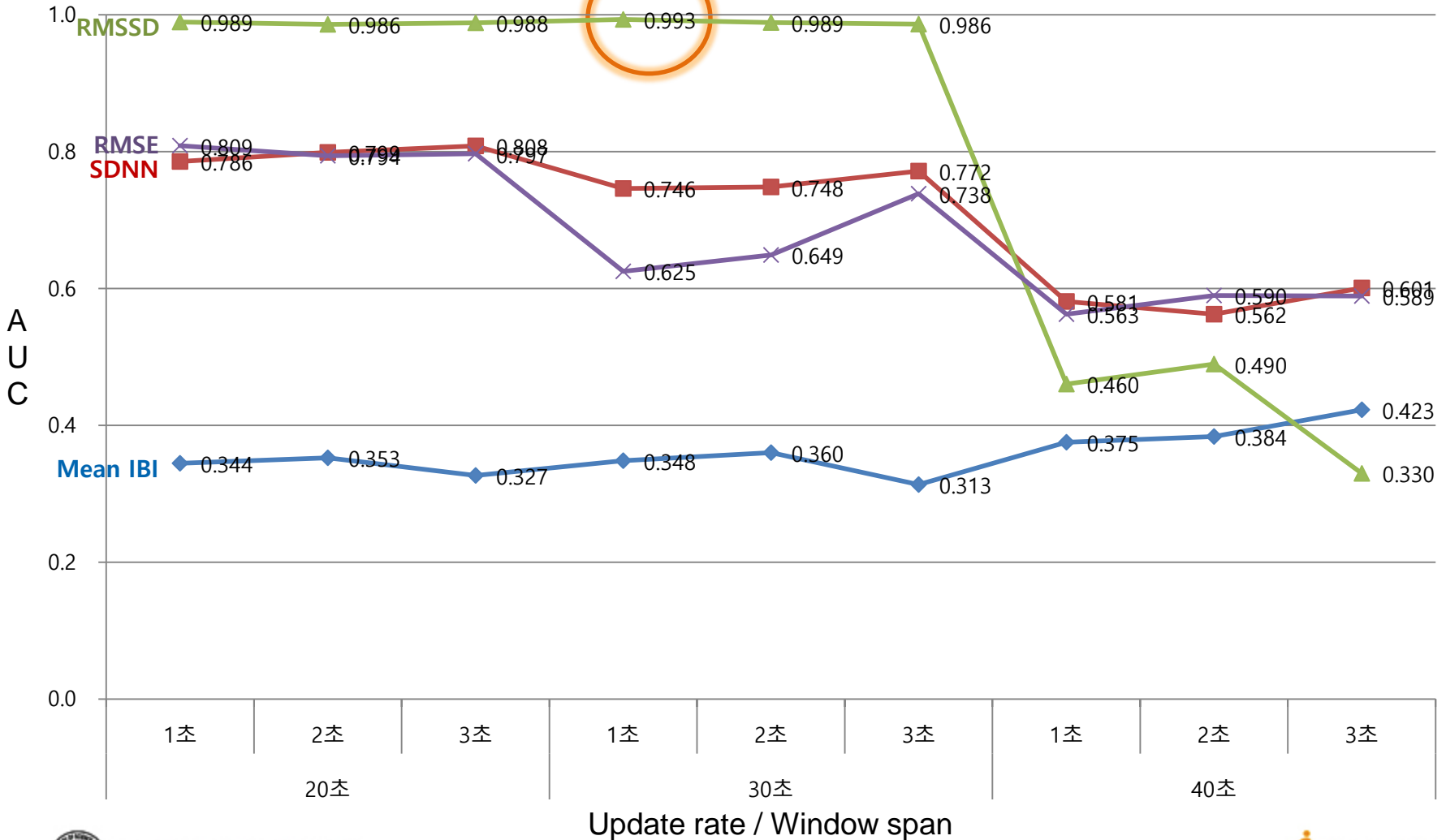
인지 부하 비교 조건: 0B vs. 1B & 2B



Detailed Analysis: Participant 5 (Non-Driving)

인지 부하 비교 조건: BL & 0B & 1B vs. 2B

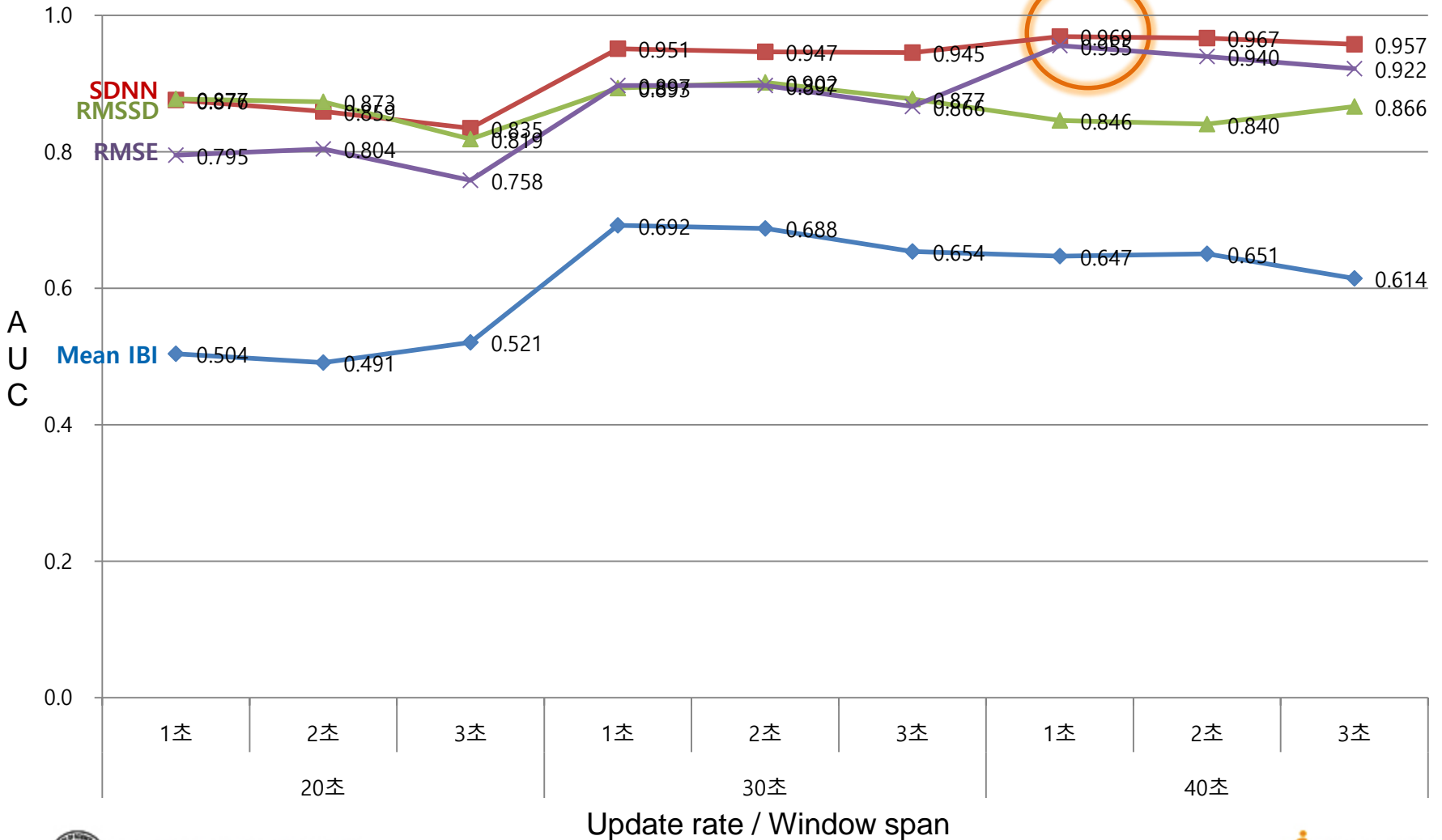
최대 AUC



Detailed Analysis: Participant 7 (Non-Driving)

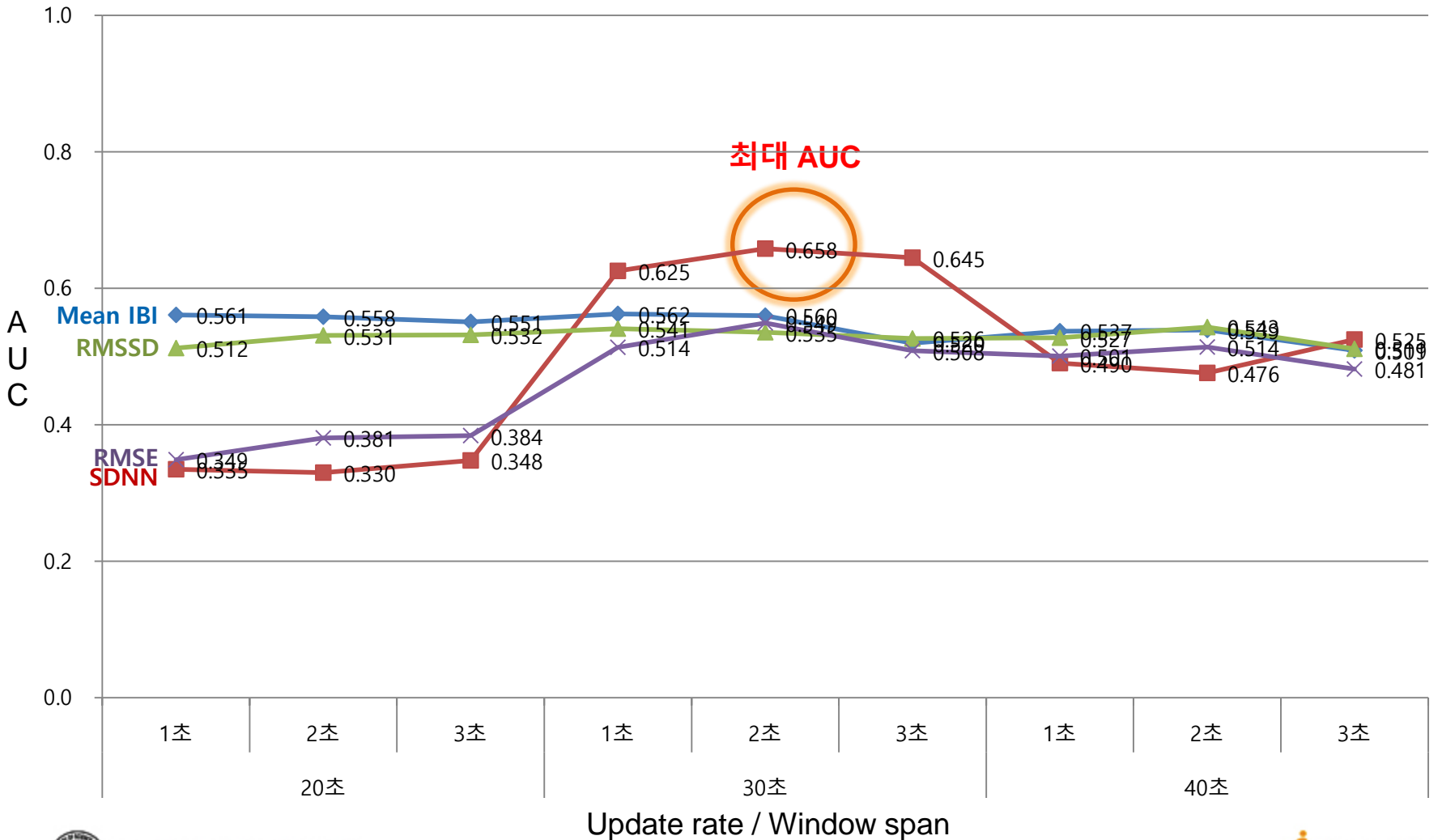
인지 부하 비교 조건: 0B & 1B vs. 2B

최대 AUC



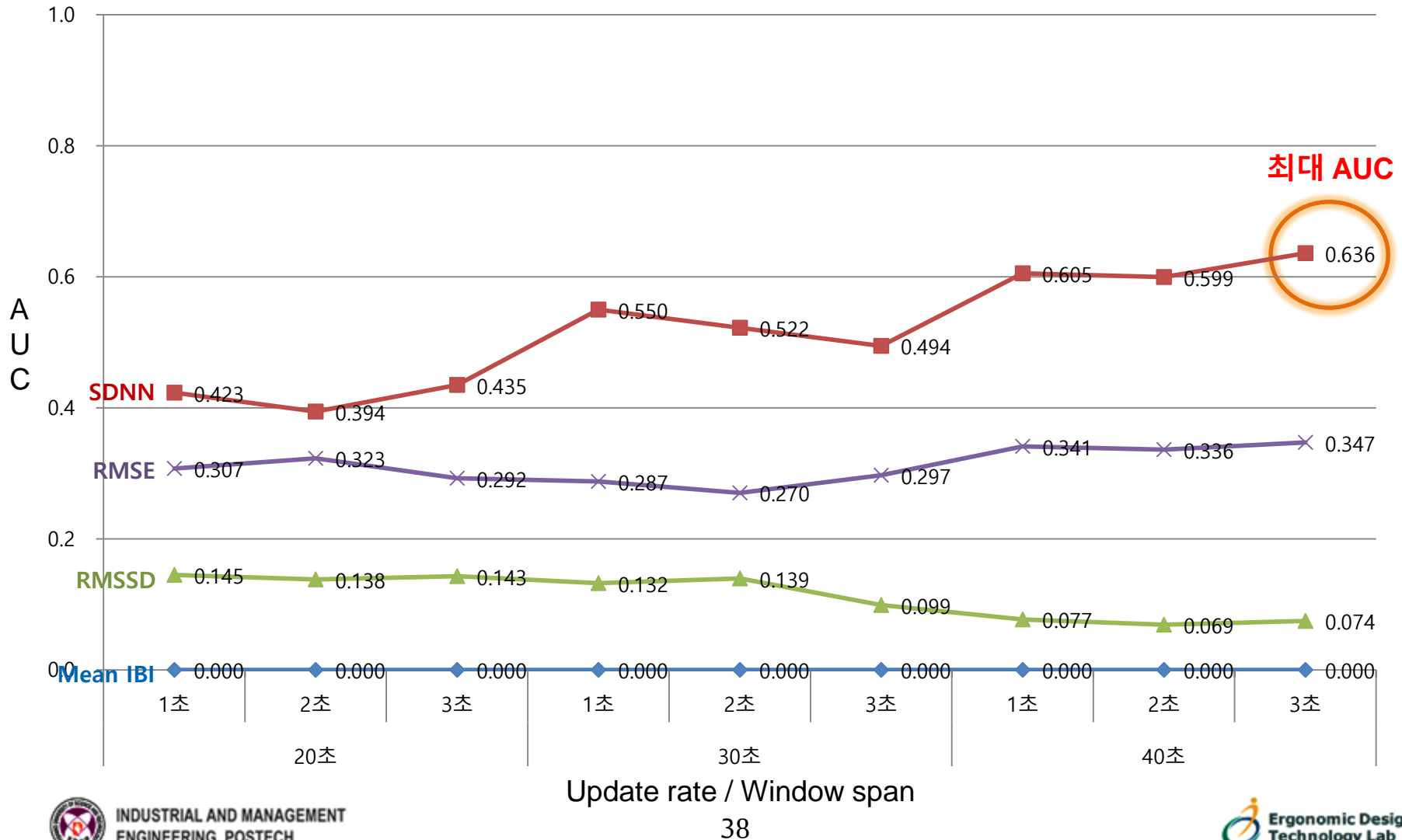
Detailed Analysis: Participant 3 (Non-Driving)

인지 부하 비교 조건: 0B & 1B vs. 2B



Detailed Analysis: Participant 6 (Non-Driving)

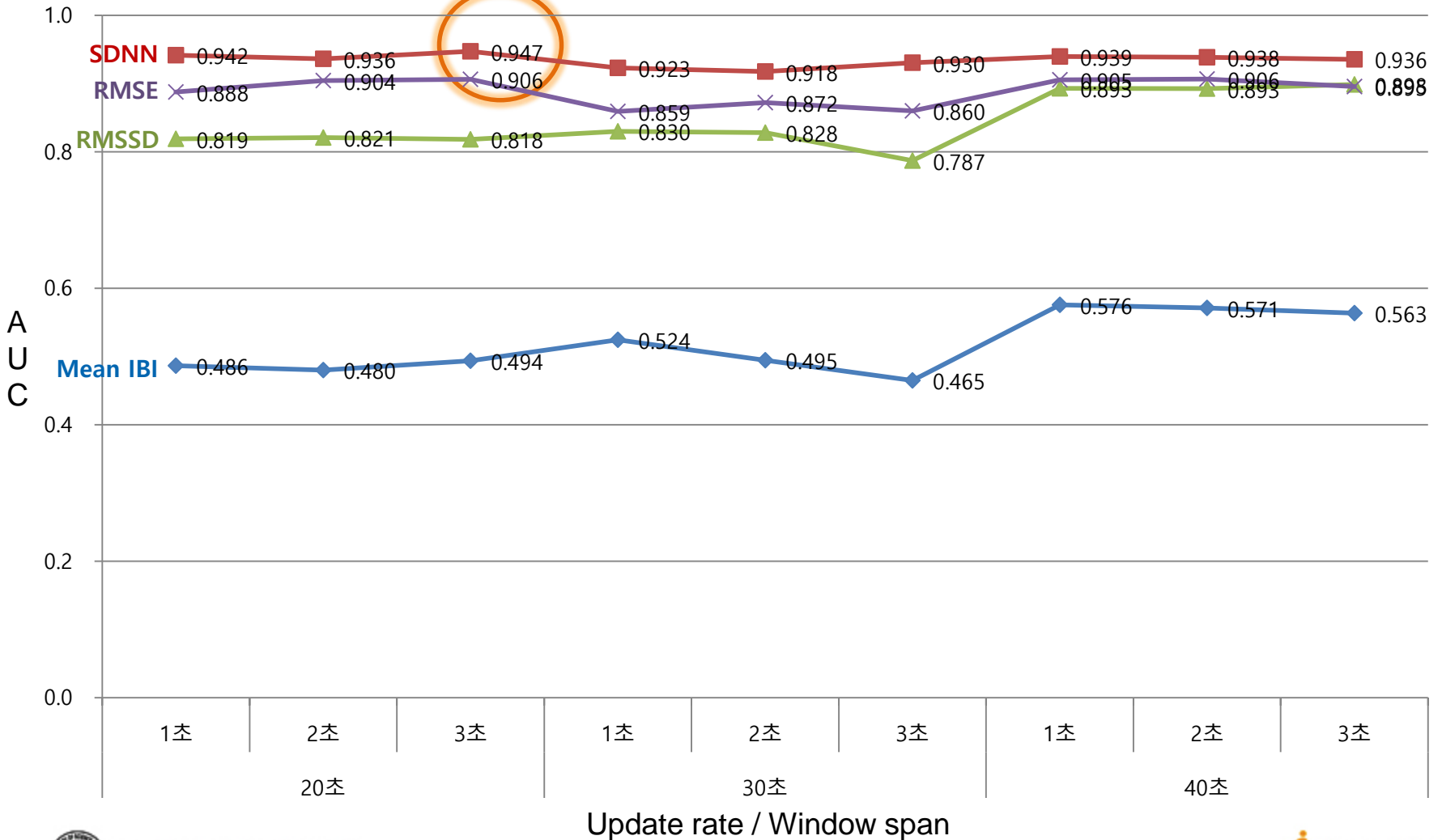
인지 부하 비교 조건: BL & 0B & 1B vs. 2B



Detailed Analysis: Participant 8 (Non-Driving)

인지 부하 비교 조건: 0B & 1B vs. 2B

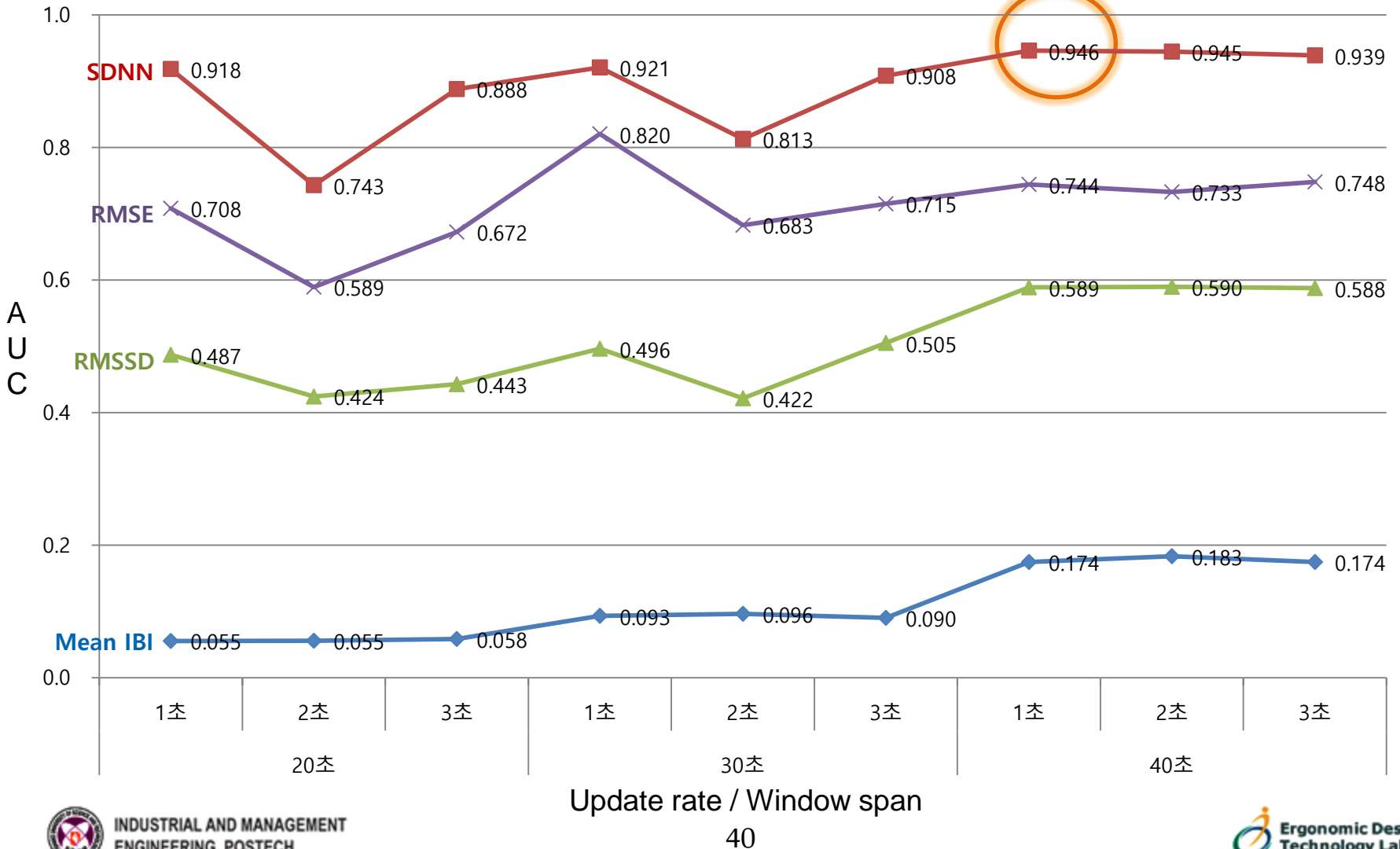
최대 AUC



Detailed Analysis: Participant 9 (Non-Driving)

인지 부하 비교 조건: BL & 0B vs. 1B & 2B

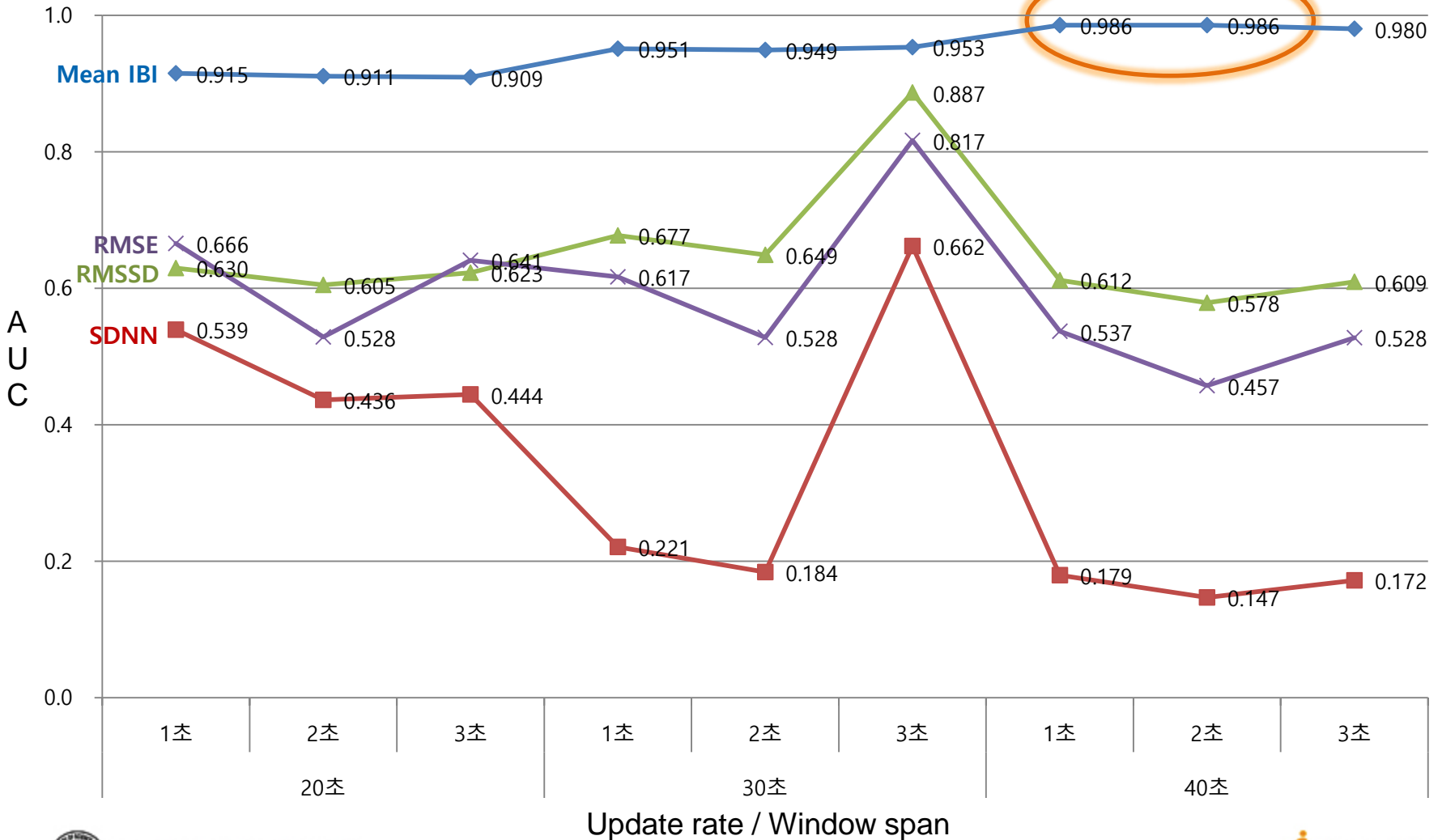
최대 AUC



Detailed Analysis: Participant 11 (Non-Driving)

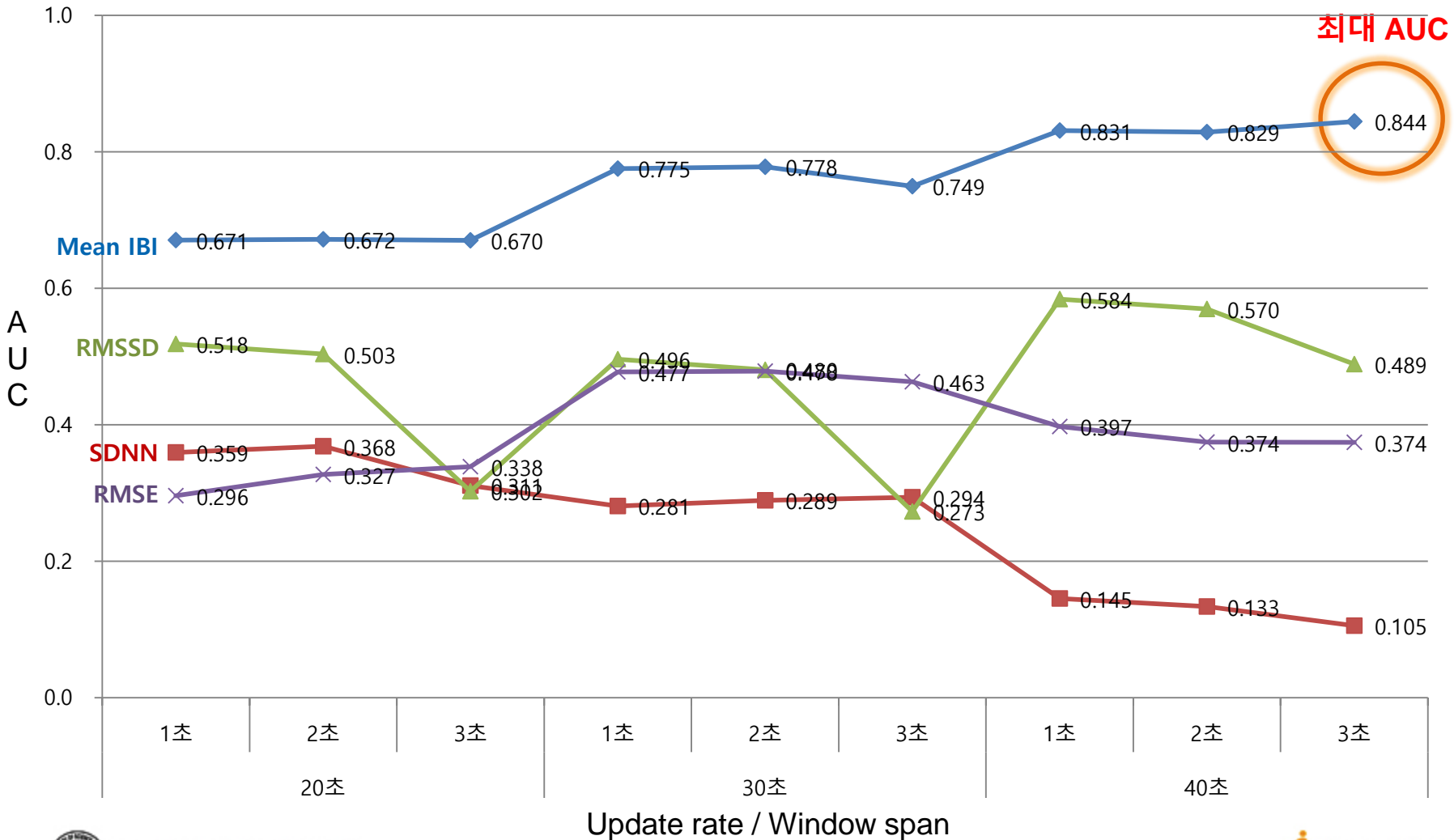
인지 부하 비교 조건: BL & 0B & 1B vs. 2B

최대 AUC



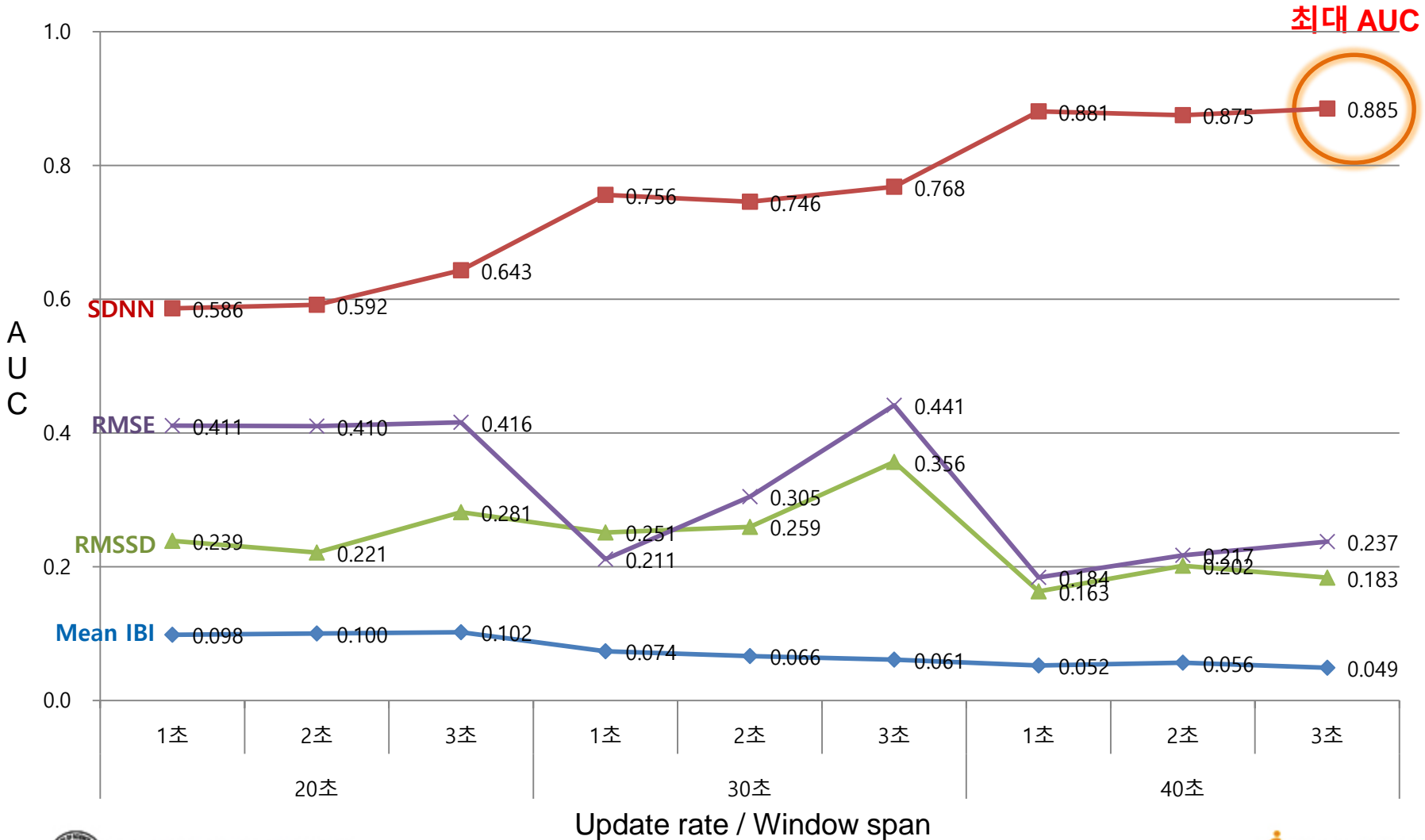
Detailed Analysis: Participant 12 (Non-Driving)

인지 부하 비교 조건: BL & 0B & 1B vs. 2B



Detailed Analysis: Participant 13 (Non-Driving)

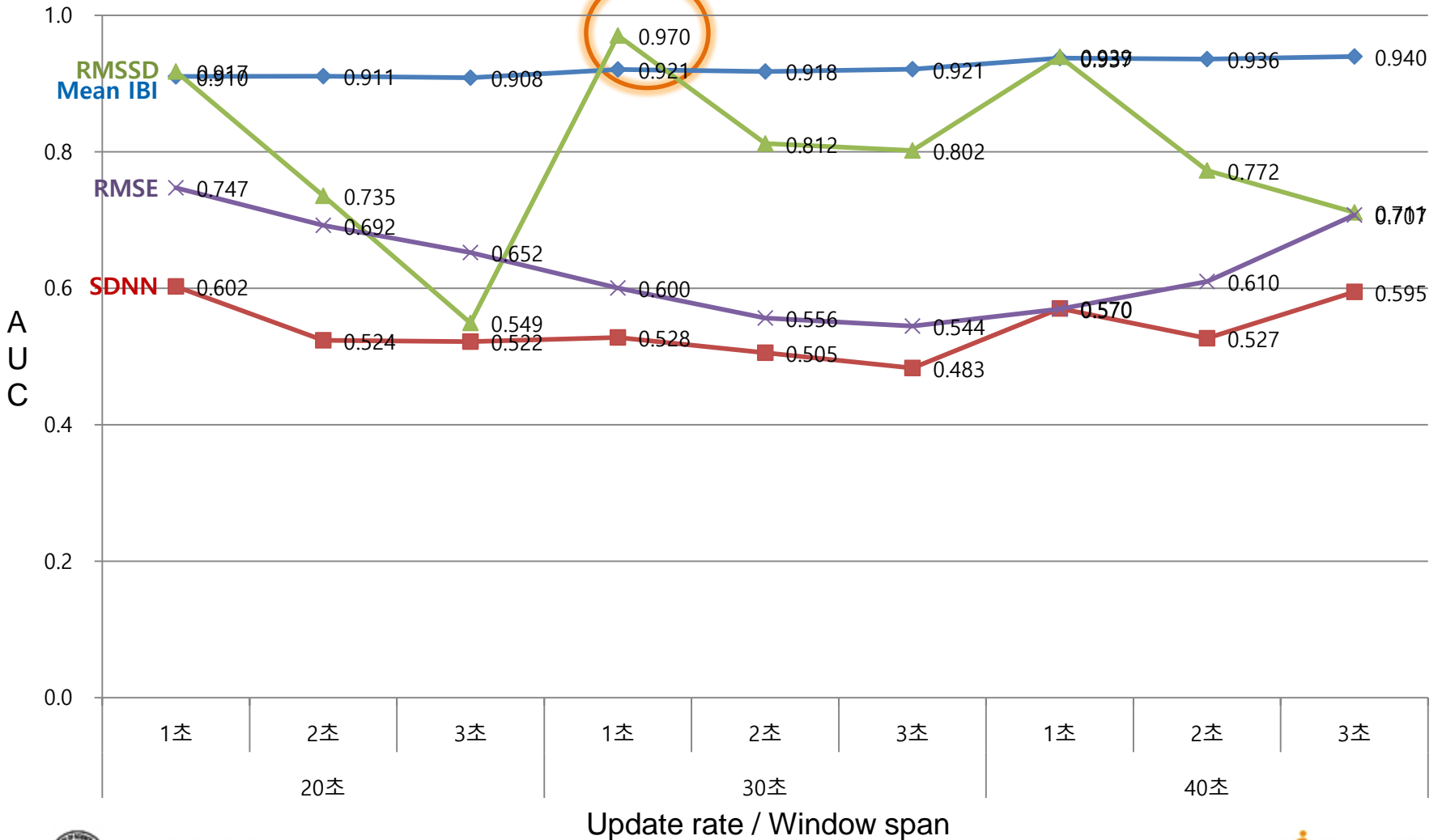
인지 부하 비교 조건: 0B & 1B vs. 2B



Detailed Analysis: Participant 15 (Non-Driving)

인지 부하 비교 조건: BL & 0B vs. 1B & 2B

최대 AUC





Literature Review

Cognitive Workload

- 인지 부하는 인간의 작업 수행 능력에 따른 시간당 정보를 처리해야 하는 양 [Wickens and Hollands \(2000\)](#); [De Waard \(1996\)](#), 또는 임의의 과제 해결 과정에서 요구되는 인지 능력으로 정의됨 [Kim \(2008\)](#)
- 인지 부하는 다양한 상황에 의해 가중됨(예: 장시간 운전, 주변 차량의 끼어들기) [Hong et al. \(2011\)](#)
- 인지 부하가 높으면 상황 판단 능력이 저하되어 사고 발생 확률 증가 [Pollard et al.\(1990\)](#); [Wang et al.\(1996\)](#); [USCG\(1998\)](#)



인지 부하 가중




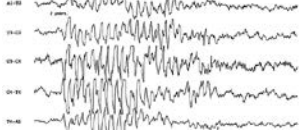

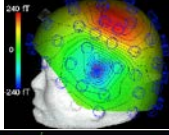



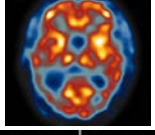

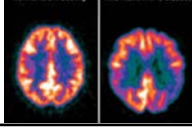


상황 판단 능력 저하

Evaluation Method of Cognitive Workload

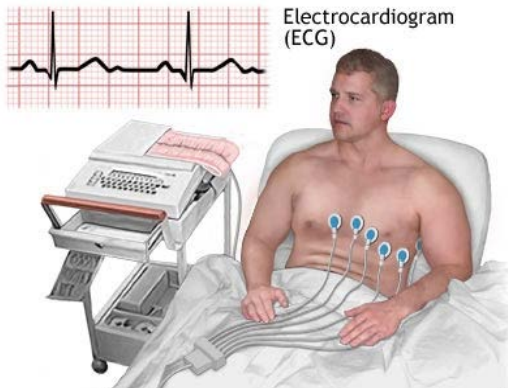
- ❑ 다양한 장비를 통해 정량적 측정 가능
- ❑ 설문지를 통해 정성적 평가 가능

인지 부하의 정량적 측정 방법

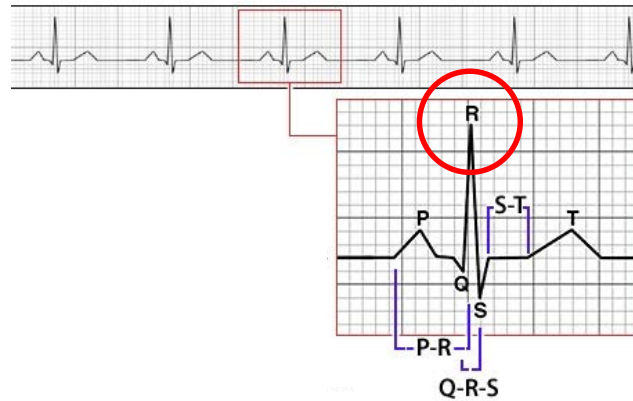
No.	측정 방법	측정 장면	발생 신호[영상]
1	Electrocardiography (ECG)		
2	Electroencephalogram (EEG)		
3	Magnetoencephalography (MEG)		
4	Functional magnetic resonance imaging (fMRI)		
5	Single photon emission computed tomography (SPECT)		
6	Brain positron emission tomography (brain PET)		

Electrocardiography (ECG)

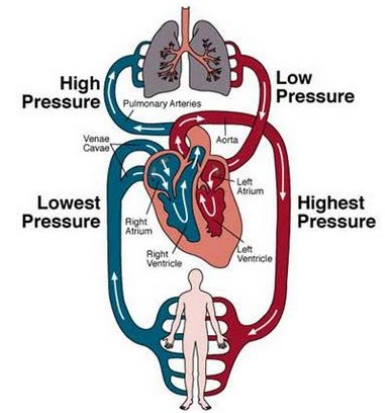
- ❑ ECG는 심장 박동시 심근에서 발생하는 전류를 전류계에 그래프로 기록한 것이며 Lee (2011), 인간의 인지 부하나 신체 부하를 평가하기 위해 활용 Piechulla et al. (2003)
- ❑ 심장 박동 시 R-peak가 발생하고, 인지 부하 평가 시 유용하게 활용



ECG 측정 장면



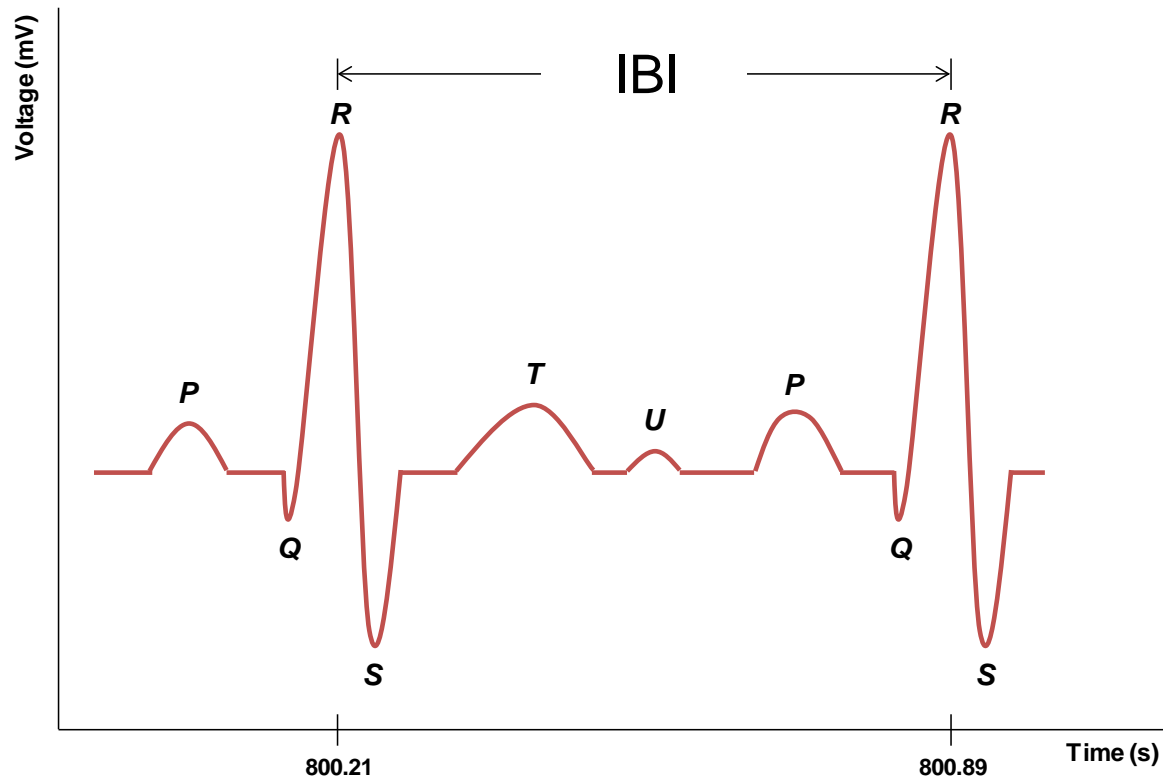
ECG 신호 파형



혈액 흐름도

Interbeat Interval (IBI)

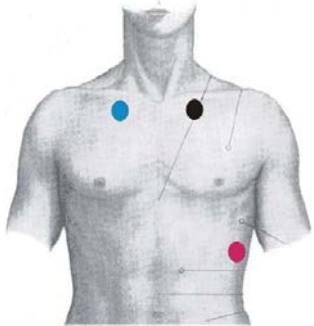
- ❑ 측정된 ECG data는 인지 부하 평가에 적용하기 위하여 심장 박동 간격(interbeat interval; IBI)으로 변환되어 사용 [Mehler et al. \(2009\)](#)



Interbeat interval (IBI)

Measurement of ECG

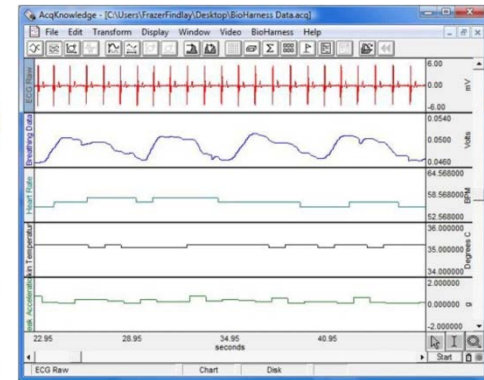
- ECG는 심장의 전기적 신호를 기록하여 추후 해석 가능한 형태로 변환하는 다양한 장비들(예: MEDAC System/3, BioHarness BT)로 측정



MEDAC System/3(Biomation, USA)



BioHarness BT(Zephyr™, USA)



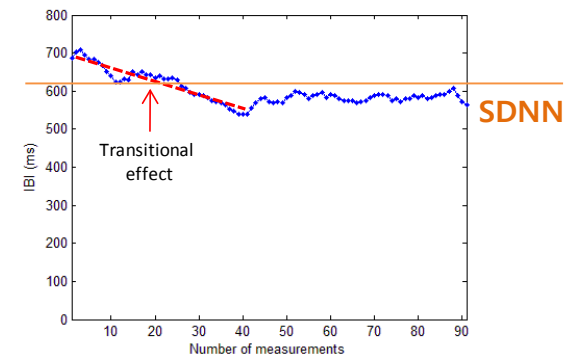
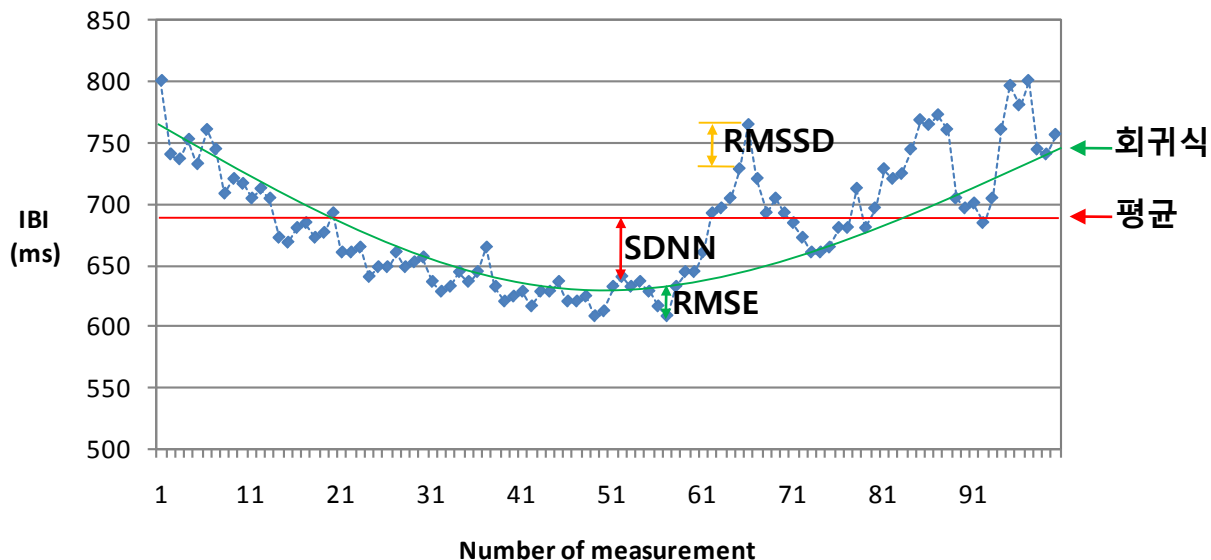
Quantification Measures for ECG Analysis

❑ Heart rate (HR) = $60 / \text{Mean IBI}$ (평균 심장 박동 간격) Yao et al. (2008) $\frac{\sum_{i=1}^n (y_i)}{n}$

❑ Heart rate variability (HRV) measure $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i)^2}{n-1}}$

- SDNN: 평균 대비 편차 ($d_i = y_i - \bar{y}$) Wood et al. (2002), Schubert et al. (2002)
- RMSSD: 직전 data 대비 편차 ($d_i = y_i - y_{i-1}$) Gould et al. (2009)
- RMSE: 회귀 추정값 대비 편차 ($d_i = y_i - \hat{y}$) Lee et al. (2010)

} IBI 변화 trend 반영



*RMSE 사용 목적: 인지 부하 가중 시 IBI가 점진적으로 감소하는 경향 (transition effect)을 제외한 실제적인 IBI의 변동성을 파악하기 위함 Lee et al. (2010)

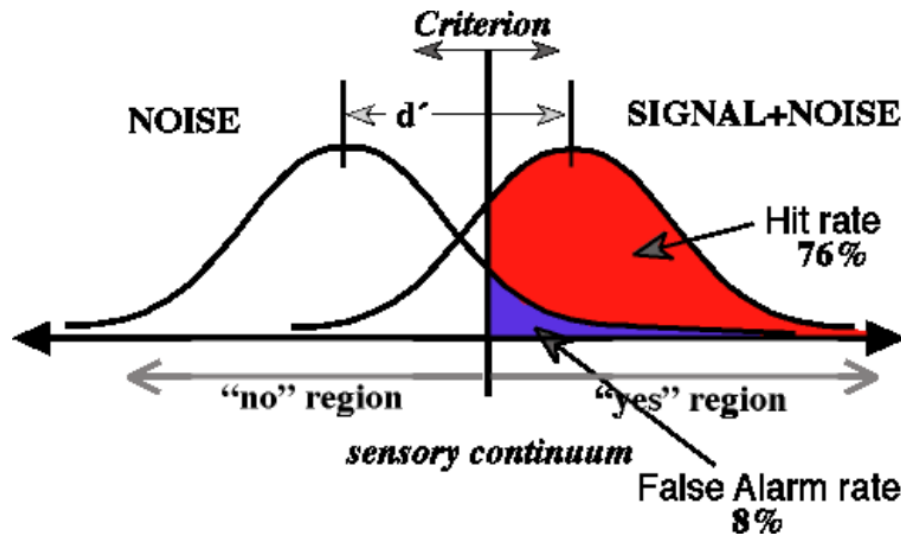
Cognitive Workload Evaluation Using ECG

□ 인지 부하 평가를 위해 ECG가 유용하게 활용

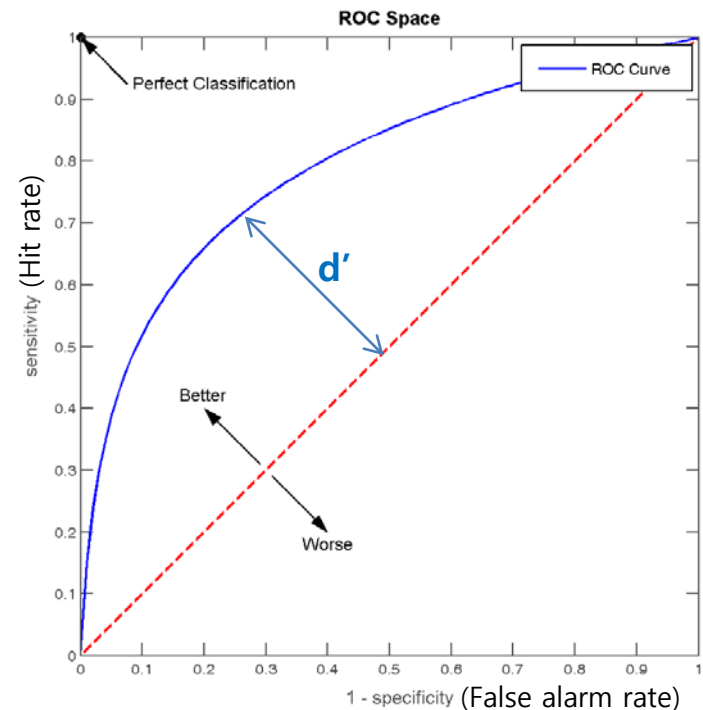
No.	연구 내용	참고 문헌
1	ECG를 활용하여 일반도로보다 교통이 복잡한 회전형 교차로 진입 및 진출이 인지 부하의 변화에 영향을 미치는지 파악하였으며, 작업 부하가 높아짐에 따라 심장 박동률이 유의하게 증가하는 것을 파악	Brookhuis and Waard(2001)
2	작업 부하가 점차 높아짐에 따라 HR과 혈압이 높아지는 것을 실험을 통해 증명함으로써, ECG가 작업 부하의 변화에 따라 인지 부하를 평가하는 데에 신뢰할 수 있는 방법임을 입증	Sosnowski et al.(2004), Boutcher and Boutcher(2006)
3	신체에 대한 실제 위험이 없는 가상 비행 중 발생하는 인지 부하를 평가하기 위해 ECG를 활용하여 심혈관의 변화 (cardiovascular change)에 관한 연구를 수행	Dussault et al.(2005)
4	운전 중 휴대 전화 사용으로 인한 운전 수행 능력을 정량적으로 평가하기 위해 ECG를 활용	Liu and Lee(2006)
5	ECG를 활용하여 운전 시 돌발상황에 따른 연령별 운전자의 인지 부하를 평가	Bae et al.(2008)
6	ECG를 활용하여 운전 시 인지 부하 가중 작업의 수준에 따라 인지 부하의 변화를 파악	Lee et al.(2010)

Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve

- ❑ ROC curve는 신호 탐지 이론(signal detection theory; SDT)의 적중 확률(hit rate, sensitivity) 대비 오경보 확률(false alarm rate, 1-specificity)을 그래프로 나타낸 것
- ❑ ROC curve의 휘어진 정도는 탐지의 변별 능력(discriminability; d')



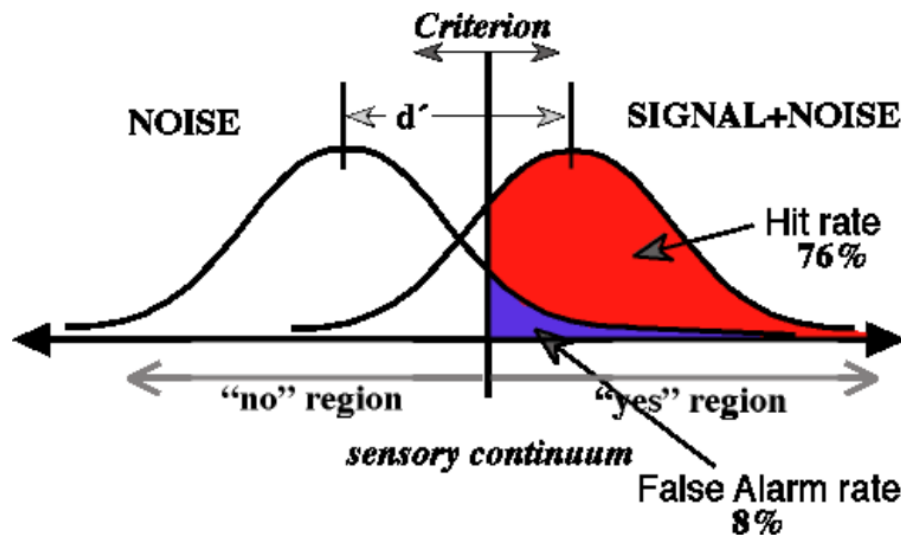
SDT 개념도



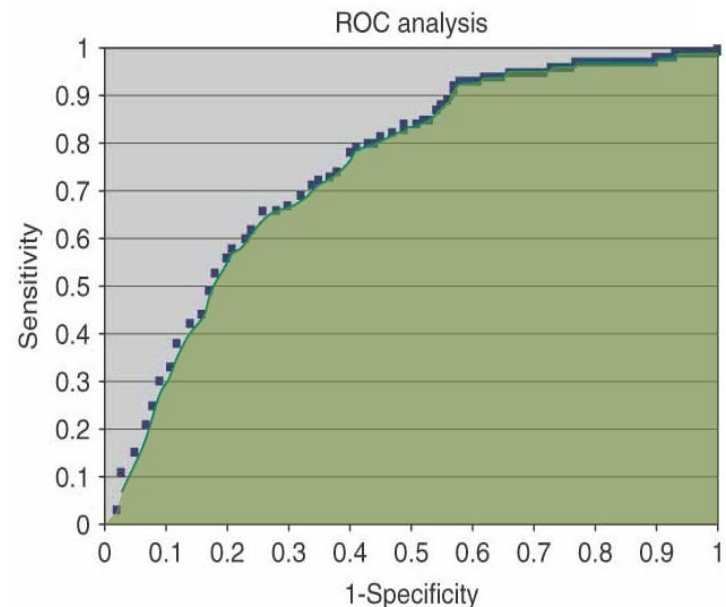
ROC curve 개념도

Area Under the ROC Curve (AUC)

- ❑ ROC 분석 시 분석에 사용되는 data가 정규 분포를 따르지 않을 때 data 분포 간의 변별 능력을 평가하기 위해 사용
- ❑ ROC curve와 '1-specificity' 축 간 면적으로 변별 능력 평가



SDT 개념도



AUC 개념도(AUC = 0.75)