

단시간 운동검사 중 웨어러블 심전도, 가속도계 신호를 이용한 노인 심장재활 환자의 6MWT 거리 예측

오 승 준*

Predicting 6-Minute Walk Distance from Short-Duration Exercise Tests using Wearable ECG and Accelerometer Signals in Elderly Cardiac Rehabilitation Patients

SeungJun Oh*

요 약

6분 보행검사(6MWT, 6-Minute Walk Test)는 심장재활에서 기능적 능력을 평가하는 표준 검사이나, 지속적 노력과 충분한 보행 공간을 요구한다. 본 연구는 open-heart surgery를 받은 노인 노쇠 환자 80명(Edmonton Frail Scale ≥ 4)에서 다섯 가지 운동검사 중 측정한 웨어러블 심전도(ECG)와 가속도계(ACC) 신호로 6MWT 거리를 예측할 수 있는지 비교하였다. 단일 흉부 착용 장치로 신호를 기록하고, RidgeCV와 Random Forest 모델을 피험자 단위 교차검증(LOSO) 하에 평가하였다. 계단 오르기($\rho = 0.37$)와 TUG($\rho = 0.36$)의 ACC 신호가 가장 강한 예측을 제공하였으며, 보폭 주기와 케이던스가 주된 예측 인자였다. ECG와의 결합은 유의한 개선을 주지 못하였고, 자전거 운동검사 신호는 보행 능력으로 전이되지 않았다. 짧은 웨어러블 측정이 6MWT를 보완할 가능성을 보였다.

Abstract

The six-Minute Walk Test (6MWT) is a standard measure of functional capacity in cardiac rehabilitation but requires sustained effort and adequate walking space. In 80 elderly patients with frailty (Edmonton Frail Scale ≥ 4) after open-heart surgery, we compared wearable Electrocardiogram (ECG) and Accelerometer (ACC) signals recorded during five exercise tests for estimating 6MWT distance. Signals were acquired with a single chest-worn device, and RidgeCV and Random Forest models were evaluated under Leave-One-Subject-Out (LOSO) cross-validation. ACC signals from stair climbing ($\rho = 0.37$) and the timed up-and-go test ($\rho = 0.36$) provided the strongest prediction, driven by stride period and cadence. Combining ECG with ACC yielded no significant improvement, and veloergometry signals did not transfer to walking capacity. Brief wearable testing showed potential to complement the 6MWT.

Keywords

frailty, 6-minute walk test, ECG, accelerometer, cardiac rehabilitation, machine learning

* 상명대학교 스포츠ICT융합학과 조교수
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5507-2445>

• Received: Jul. 02, 2026, Revised: Jul. 17, 2026, Accepted: Jul. 20, 2026
• Corresponding Author: SeungJun Oh
Dept. of Sports ICT Convergence, Sangmyung University, Seoul, Korea
Tel.: +82-2-2287-6157, Email: seungjun@smu.ac.kr

1. 서 론

6MWT(6-Minute Walk Test)는 cardiac rehabilitation 과 노인 기능 평가의 표준검사로 활용된다[1]. 환자가 6분간 걸은 거리는 기능적 능력을 직접 반영하며, 이 지표는 예후 판정과 중재 효과 평가에 널리 사용된다. 그러나 6MWT는 6분간 지속 보행이 가능한 환자들에게만 시행할 수 있으며, 30m 이상의 직선 보행로가 필요하다. 따라서 중증 환자나 낙상 위험군은 검사 대상에서 제외되고, 병실이나 외래 환경처럼 좁은 공간에서는 적용하기 어려운 실정이다. 이러한 제약조건으로 인해 6MWT를 대체할 짧은 검사와 객관적 측정 도구의 필요성을 제시한다.

객관적 측정의 필요성은 노쇠(Frailty) 평가에서도 나타난다. EFS(Edmonton Frail Scale)은 frailty 평가의 임상 표준이나[2], 면담 기반의 주관적 척도이며 평가자의 판단과 환자의 응답에 의존한다. 이러한 한계는 보행 거리나 보행 속도와 같은 객관적 functional 지표의 필요성을 뒷받침한다.

단일 채널 심전도(ECG, Electrocardiogram)와 3축 가속도계(ACC, Accelerometer)는 운동 중 생체 반응을 포착할 수 있으며, ECG는 HR 반응과 심박변이도(HRV, Heart Rate Variability)를 반영한다. ACC는 Cadence, 보행 규칙성, 자세 안정성을 반영한다. 흉부 착용형 웨어러블 디바이스는 임상 도입이 비교적 용이하지만, 이러한 신호가 어느 운동검사에서

기능적 능력을 가장 잘 반영하는지는 보다 연구되어야 한다.

심장재활에서 임상적으로 중요한 것은 환자의 객관적 기능 능력을 신뢰성 있게 추정하는 일이다. 6MWT 거리는 그 핵심 지표이나, 모든 환자에게 시행 가능하지는 않다. 따라서 더 짧고 접근성 높은 검사로부터 6MWT 거리를 추정하는 접근은 그 자체로 임상적 가치를 가지며, 웨어러블 신호는 운동 중 심혈관 반응과 보행 운동학을 동시에 포착하므로 이러한 추정의 유망한 수단이다.

웨어러블 기반 보행 지표와 HR 반응 지표가 frailty 정보를 담는다는 점이 입증되었지만[3,4], 본 연구에서는 다섯가지 표준 운동검사와 ECG, 가속도계 신호를 동일한 분석 틀에서 비교하여 객관적 보행 능력을 잘 예측하고, 신호끼리의 결합이 이 예측을 개선하는지 확인하고자 한다.

본 연구의 기여는 다음과 같다. 첫째, 다섯가지 운동검사와 세가지 modality(ECG, ACC, fusion)를 동일한 feature·모델·검증 조건에서 체계적으로 비교한다. 둘째, 엄격한 피험자 단위 검증(LOSO 및 subject-level bootstrap 95% CI)으로 각 조합의 예측 가치를 정량화한다. 셋째, LOSO-faithful permutation importance로 해석 가능한 feature 기여 인자를 식별한다. 넷째, cycling 기반 검사의 신호가 보행 능력으로 전이되지 않는다는 negative finding을 보고한다. 전체 연구 흐름은 그림 1과 같다.

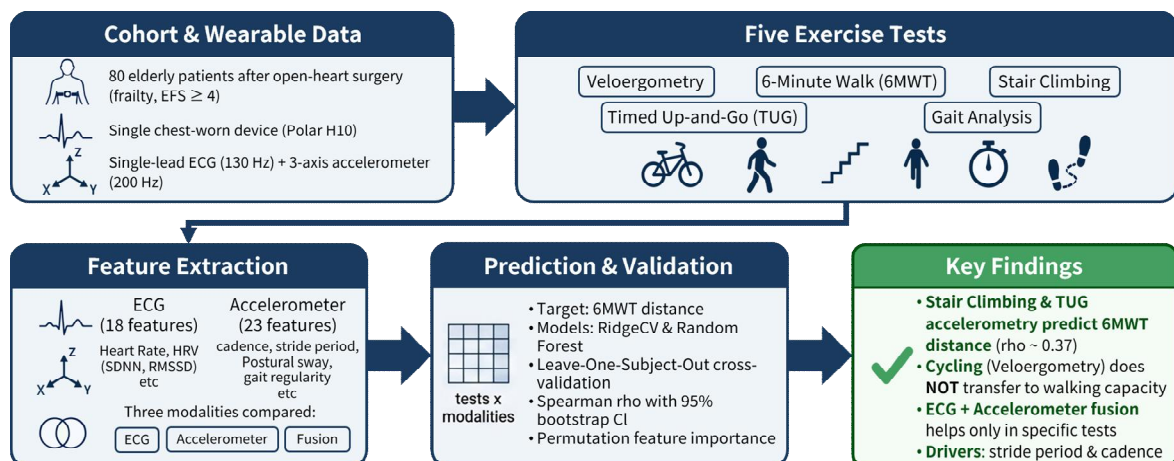


그림 1. 본 연구의 전체 분석 흐름. 노인 심장재활 환자 80명의 웨어러블 신호를 이용한 다섯 운동검사·세 modality의 6MWT 거리 예측 성능 비교

Fig. 1. Overview of the study pipeline for comparing 6MWT distance prediction across five exercise tests and three modalities, using wearable signals from 80 elderly cardiac rehabilitation patients

II. 방 법

2.1 데이터 및 실험대상자

본 연구는 공개 데이터셋(PhysioNet v1.0.0)을 사용하였다[5][6]. 코호트는 open-heart surgery 후 cardiac rehabilitation에 참여한 노인 환자 80명이다. 모든 환자의 EFS 점수는 4점 이상이다(범위 4 - 9, 중앙값 6). 연령 중앙값은 73세이다(IQR 68 - 77). 수술 유형은 CABG(Coronary Artery Bypass Grafting), 단독 판막치환술, 복합 수술을 포함하였다. 모든 신호는 단일 흉부 착용 장치(Polar H10)로 기록되었다. single-lead ECG는 130 Hz로, 3축 ACC는 200 Hz로 동기 수집되었다.

각 환자는 최대 다섯 가지 운동검사를 수행하였다: VELO(Veloergometry), 6MWT[1], 계단 12개(STAIR, Stair climbing), TUG(Timed Up-and-Go)[7], gait analysis. 각 검사의 수행 방식과 임상적 의미는 표 1과 같다.

표 1. 본 연구에 사용된 다섯 가지 운동검사의 수행 방식과 임상적 의미

Table 1. Description and clinical relevance of the five exercise tests

Test	Protocol	Duration	Clinical relevance
Veloergo-metry (VELO)	Incremental cycling on a stationary ergometer with stepwise load increase until symptom limit	~12 min	Cardiorespiratory reserve under graded, non-weight-bearing load
6-Minute Walk Test (6MWT)	Walking as far as possible along a ≥ 30 m straight corridor for 6 min	6 min	Submaximal functional capacity; primary outcome of this study
Stair climbing (STAIR)	Ascending and descending a flight of 12 steps at a self-selected pace	~90 - 120 s	Lower-limb power and weight-bearing capacity under vertical load
Timed Up-and-Go (TUG)	Rising from a chair, walking 3 m, turning, returning, and sitting down	~90 s	Functional mobility, balance, and transfer ability

Gait analysis	Walking at a comfortable pace along a straight walkway	~90 - 120 s	Steady-state gait kinematics and postural stability
---------------	--	-------------	---

VELO는 자전거 에르고미터에서 부하를 단계적으로 높이는 검사로 비체중부하 상태의 심폐 예비능을 반영한다. 6MWT는 6분간 최대한 멀리 걷는 검사로 본 연구의 예측 대상이다. STAIR는 계단을 오르내리는 검사로 하지 근력과 체중부하 능력을, TUG는 의자에서 일어나 3 m를 걷고 돌아와 앉는 검사로 기능적 이동성과 균형을 반영한다. gait analysis는 편안한 속도로 직선 보행하는 검사로 정상 보행의 운동학과 자세 안정성을 반영한다. VELO와 6MWT를 제외한 세 검사는 90 - 120초 내에 완료되어 단시간 검사에 해당한다.

2.2 검사별 신호 구간 분할

데이터셋은 약 90분 길이의 연속 기록 내 각 운동검사의 시작 시점을 주석으로 제공한다. 본 연구는 주석된 시작 시점부터 구간을 추출하였다. 구간 종료는 동일 기록 내 다음 주석 또는 검사별 최대 길이 중 먼저 도달하는 지점으로 정의하였다(최대 길이: VELO 720초, 6MWT 420초, 그 외 90 - 120 초). 시작 시점(초 단위)은 각 센서의 샘플링 레이트에 따라 modality별 표본 인덱스로 변환하였다. 분산이 0인 ECG 구간은 자동으로 제외하였다. HRV 및 주파수 영역 feature의 안정적 추정을 위해 60초 미만 구간도 제외하였다.

2.3 Feature 추출

각 구간에서 ECG 기반 18개, ACC 기반 23개 feature를 추출하였다. fusion 분석에서는 두 집합을 결합하여 41개 feature를 사용하였다.

• ECG feature: QRS 복합체는 WFDB의 xqrs 알고리즘으로 검출하였다. 연속된 R-R 간격은 0.3 - 2.0 초(30 - 200 bpm) 범위만 채택하였다. 이로부터 시간 영역 지표를 산출하였다: HR 평균·표준편차, HR 25/75 백분위수, R-R 평균·표준편차·변동계수, SDNN, RMSSD, pNN20, pNN50[8]. 운동 중 HR 반

응을 포착하기 위해 시간에 대한 HR의 선형회귀 기울기(HR slope), 구간 전·후반부 HR 평균과 그 차이(Δ HR)를 계산하였다. R-peak 검출 신뢰도를 요약하는 3개 품질 feature(n_beats, beat_rate_per_min, valid_beats_frac)를 포함하였다.

• ACC feature: 각 축(X: 수직, Y: 내외측, Z: 전후)에 대해 평균, 표준편차, 범위, 평균 절대 jerk를 계산하였다. 합성 크기 벡터로부터 평균 크기, 크기 표준편차, signal magnitude area(SMA)를 도출하였다. 수직축 스펙트럼(Welch 방법)에서 0.5 - 3 Hz 보행 대역의 주된 cadence 주파수와 cadence power fraction을 산출하였다. 또한 세 대역의 bandpower를 계산하였다: 자세 동요(0.1 - 0.5 Hz), 보행(0.5 - 3 Hz), jerk(3 - 8 Hz). 보행의 규칙성과 구조는 step regularity(수직축 자기상관의 0.3 - 1.5초 lag 최대값), stride period, harmonic ratio로 포착하였다.

2.4 예측 대상

1차 회귀 대상은 6MWT 거리(m)이다. 이 값은 코호트 내 연속적으로 분포한다($n = 80$, 범위 150 - 502 m, 결측 없음). 보조 분석으로 EFS 점수(서열형, 4 - 9)도 예측하였다. 6MWT 구간 신호로 6MWT 거리를 예측하는 것은 부분적으로 동어반복적이다. 따라서 6MWT $\times$ modality 조합은 상한 sanity check으로 보고하며, VELO, STAIR, TUG, gait analysis 신호로 구성된 24개 non-circular 조합에 1차 해석을 집중하였다.

2.5 모델

두 모델을 평가하였다. RidgeCV 선형회귀는 fold마다 정규화 강도 α 를 {0.1, 1, 10, 100, 1000}에서 선택하였다. Random Forest regressor는 300개 트리와 고정 난수 시드(42)를 사용하였다. 모든 feature는 각 교차검증 fold 내에서 표준화하였다.

2.6 교차검증 및 통계적 추론

작은 표본 수와 피험자별 검사 구간의 상관을 고

려하여 엄격한 LOSO 교차검증을 사용하였다. 각 피험자의 구간은 정확히 한 번 검증셋으로 사용된다. 모든 모델 적합과 feature 표준화는 나머지 $n - 1$ 명에 대해 수행하였다. 1차 효과크기는 out-of-fold 예측과 실제 값 간 Spearman 순위상관(ρ)이다. 이 지표는 비정규 잔차와 Ridge 예측 이상치에 강건하다. 95% CI는 피험자 단위 bootstrap으로 산출하였다(피험자를 복원추출로 1000회 재표집하여 ρ 를 재계산). fusion 대 최적 단일 modality의 짝지은 비교는 동일 피험자 bootstrap에 의한 ρ 차이 분포로 계산하였다. 통계적 유의성은 95% CI가 0을 포함하지 않을 때로 정의하였다.

2.7 Feature 중요도

유의한 조합을 해석하기 위해 LOSO-faithful permutation importance를 계산하였다. 각 LOSO fold의 학습된 모델을 보존하였다. 각 feature에 대해 검증 피험자의 해당 값을 동일 fold 학습 분포에서 무작위로 추출한 값으로 대체하였다. 이후 모델로 재예측하여 out-of-fold ρ 의 하락을 기록하였다. 중요도는 20회 순열 반복의 평균 하락량으로 보고하며, 표준편차를 안정성 추정치로 제시하였다.

III. 결 과

3.1 코호트 특성

신호 필터링 결과 80명의 환자가 분석에 포함되었다. 연령 중앙값은 73세(IQR 68 - 77)이고 여성 비율은 35%이다. 수술 유형은 CABG가 54%로 가장 많았고, 복합 수술(31%), 단독 판막 수술(15%)이 뒤를 이었다. 코호트는 beta-blocker를 균일하게 복용하였다(99%). 신체 계측치와 약물 사용은 두 군 간에 유사하였다. 표 2은 frailty 군별 코호트 baseline 특성이다.

연속·서열 변수는 중앙값(IQR), 범주형 변수는 $n(\%)$ 로 표시하고, 통계적 검정은 연속·서열(Mann-Whitney U), 이분형(Fisher exact), 다범주(Chi-square)를 사용하였다.

EFS 취약성 기준($EFS \geq 6$ 대 $EFS < 6$; $n = 45$ 대 35)으로 군을 나누었을 때, 두 군은 인구학적·동반질환·약물 변수에서 유의한 차이를 보이지 않았다. 명목상 유의했던 유일한 차이는 수술 후 경과일이다(중앙값 15일 대 14일, $p = 0.042$). 특히 두 군은 객관적 기능 결과에서도 차이를 보이지 않았다(6MWT 거리 283 대 303 m, $p = 0.58$; TUG 시간 8.6 대 8.4초, $p = 0.178$; VELO 최대 부하 48 대 48 W, $p = 1.00$). 이는 본 동질적 코호트에서 EFS 점수가 객관적 기능 지표와 독립적임을 의미한다. 또한 웨어러블 신호에서 추출되는 예측 신호가 군 수준의 차이에 의해 교란될 가능성이 낮음을 시사한다.

표 2. frailty 군별 코호트 baseline 특성

Table 2. Cohort baseline characteristics by frailty group

Variable		Non-frail (EFS<6, n=35)	Frail (EFS≥6, n=45)	p
Demographics				
Age, years		73 (67 - 75)	73 (69 - 78)	0.178
Sex	Male	22 (63%)	30 (67%)	0.815
	Female	13 (37%)	15 (33%)	
Height, cm		169 (160 - 176)	169 (163 - 174)	0.919
Weight, kg		75.0 (69.0 - 81.5)	75.0 (69.0 - 89.0)	0.696
Clinical characteristics				
EFS score		5 (4 - 5)	7 (6 - 8)	<0.001
Days since surgery		14 (12 - 18)	15 (14 - 21)	0.042
Surgery type	CABG	18 (51%)	25 (56%)	0.537
	Isolated valve	7 (20%)	5 (11%)	
	Combined	10 (29%)	15 (33%)	
Medication: Beta-blocker		35 (100%)	44 (98%)	1.000
Functional outcomes (exercise tests)				
6MWT distance, m		303 (228 - 352)	283 (228 - 337)	0.580
TUG time, s		8.37 (6.70 - 9.07)	8.63 (7.50 - 10.03)	0.178
VELO peak load, W		48 (40 - 60)	48 (42 - 56)	1.000
VELO peak HR, bpm		91 (86 - 100)	96 (81 - 105)	0.625

3.2 검사별·modality별 6MWT 거리 예측

검사·modality·모델별 예측 성능을 표 3과 그림 2에 제시하였다. 1차 예측 그리드는 30개 검사 × modality × 모델 조합으로 구성된다. 이 중 15개 조합(50%)에서 Spearman 순위상관의 95% bootstrap CI가 0인 값을 배제하였다. 6MWT 신호로 6MWT 거리를 예측한 6개 순환 조합을 제외하면, 나머지 24개 non-circular 조합 중 10개가 유의하였다.

표 3. 전체 30개 조합의 예측 지표. 값은 Spearman 순위상관 ρ [95% subject-level bootstrap CI]

Table 3. Prediction metrics for a total of 30 cells. Values are Spearman rank correlation ρ [95% subject-level bootstrap CI]

Test	Modality	RidgeCV ρ [95% CI]	RF ρ [95% CI]	MAE (RF), m
Veloergo-metry (n=74)	ECG	+0.09 [-0.15, +0.30]	+0.17 [-0.06, +0.38]	63.4
	ACC	+0.17 [-0.04, +0.38]	+0.21 [-0.02, +0.41]	64.2
	Fusion	+0.14 [-0.10, +0.35]	+0.15 [-0.08, +0.36]	64.4
6MWT (n=67)	ECG	+0.35 [+0.11, +0.55]*	+0.16 [-0.12, +0.39]*	61.1
	ACC	+0.85 [+0.74, +0.92]*	+0.86 [+0.76, +0.92]*	30.7
	Fusion	+0.85 [+0.75, +0.92]*	+0.86 [+0.76, +0.92]*	30.2
Stair climbing (n=74)	ECG	-0.26 [-0.47, -0.05]	+0.17 [-0.06, +0.38]	67.3
	ACC	+0.37 [+0.15, +0.57]	+0.33 [+0.10, +0.53]	60.5
	Fusion	+0.26 [+0.04, +0.48]	+0.33 [+0.11, +0.53]	58.6
TUG (n=75)	ECG	-0.17 [-0.39, +0.05]	-0.14 [-0.37, +0.09]	73.3
	ACC	+0.36 [+0.14, +0.56]	+0.33 [+0.12, +0.53]	62.5
	Fusion	+0.32 [+0.09, +0.53]	+0.29 [+0.07, +0.50]	64.5
Gait analysis (n=66)	ECG	+0.09 [-0.14, +0.32]	+0.13 [-0.13, +0.41]	64.9
	ACC	+0.10 [-0.17, +0.32]	-0.06 [-0.31, +0.17]	70.1
	Fusion	+0.28 [+0.03, +0.50]	+0.19 [-0.07, +0.42]	65.2

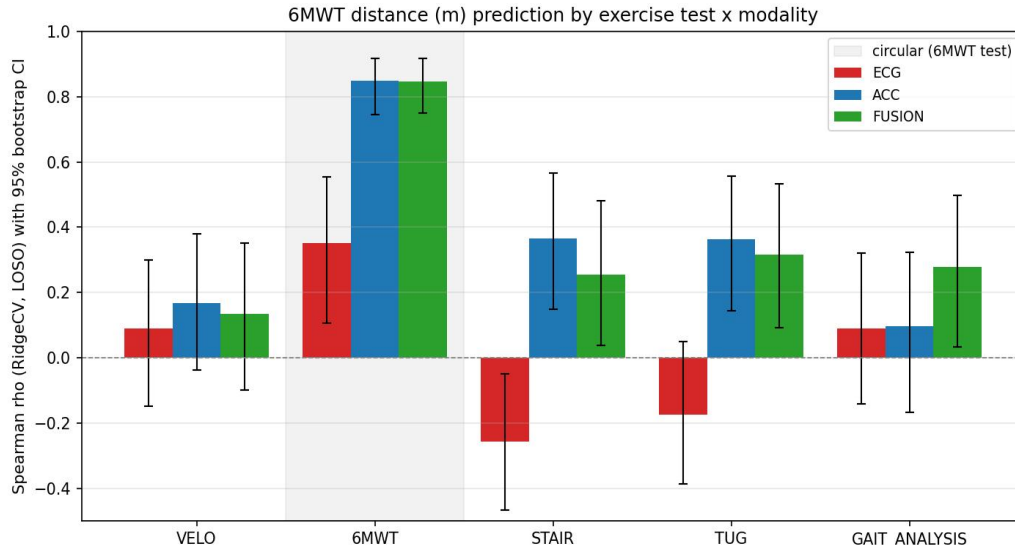


그림 2. 다섯가지 운동검사(veloergometry, 6MWT, stair climbing, TUG, gait analysis)와 세 modality(ECG, ACC, fusion)에 대한 6MWT 거리 예측 성능

Fig. 2. 6MWT distance prediction performance for five movement tests (veloergometry, 6MWT, stair climbing, TUG, gait analysis) and three modalities (ECG, ACC, fusion)

단시간 검사에서 가장 강한 예측은 STAIR/ACC (RidgeCV $\rho = 0.37$, 95% CI 0.15 - 0.57)와 TUG/ACC (RidgeCV $\rho = 0.36$, 95% CI 0.14 - 0.56)에서 나타났다. 두 결과는 Random Forest에서도 동일하게 확인되었다(두 경우 모두 $\rho = 0.33$, 95% CI가 0인 값을 배제). fusion은 추가로 세 조합에서 유의한 예측을 보였다(TUG/fusion $\rho = 0.32$, 95% CI 0.09 - 0.53; gait analysis/fusion $\rho = 0.28$, 95% CI 0.03 - 0.50; STAIR/fusion $\rho = 0.26$, 95% CI 0.04 - 0.48). 짝지은 비교에서 fusion이 최적 단일 modality 대비 보인 개선은 어떤 검사에서도 유의하지 않았다(최대 짝지은 $\Delta\rho = +0.05$, 6MWT, 95% CI -0.07 ~ +0.17). 이는 fusion의 이득이 존재하더라도 본 표본 크기에서는 미미함을 시사한다.

VELO의 6개 조합 중 어느 것도 유의하지 않았다(RidgeCV ρ 범위 -0.18 ~ +0.17, 모든 95% CI가 0을 포함). 이러한 비전이는 ECG, ACC, fusion에 걸쳐 일관되었다. 예측 신호의 부재는 표본 크기(VELO는 두 번째로 큰 조합, $n = 74$)나 feature 차원으로 설명되지 않는다. 이 결과는 cycling 기반 검사와 보행 기반 검사를 구분하는 실질적 negative finding으로서 추후 논의에서 더 서술한다.

upper-bound sanity check으로서, 6MWT 구간 ACC

feature로 6MWT 거리를 예측한 결과는 두 모델 모두 $\rho = 0.85$ (95% CI 0.74 - 0.92)였다. 이는 예측 변수와 결과가 동일한 신체 활동을 공유할 때 본 파이프라인이 거의 완벽한 신호를 회복함을 확인한다.

그림 2의 막대는 RidgeCV 모델의 Spearman 순위상관(ρ)을, error bar는 1000회 subject-level bootstrap 95% CI를 나타낸다. 회색 음영의 6MWT 열은 self-prediction(circular)으로 상한 sanity check이다. 표 3의 굵은 글씨는 95% CI가 0을 배제한 유의 조합(non-circular)을 의미하고, MAE는 Random Forest 모델 기준(m)이다. 해당 표의 *은 6MWT self-prediction circular) 조합으로 sanity check이며 1차 해석에서 제외하였다.

3.3 유의 조합의 feature 기여 인자

그림 3은 5개 유의 non-circular 조합과 2개 진단용 조합(음의 방향을 보인 STAIR/ECG, sanity 기준인 6MWT/ACC)에 대한 permutation importance 결과이다. 각 패널은 상위 feature와, 그 feature를 무작위로 치환했을 때의 Spearman ρ 하락량(평균 $\pm$ SD, 20회 반복)을 보여준다. 값이 클수록 예측에 중요한 feature이다.

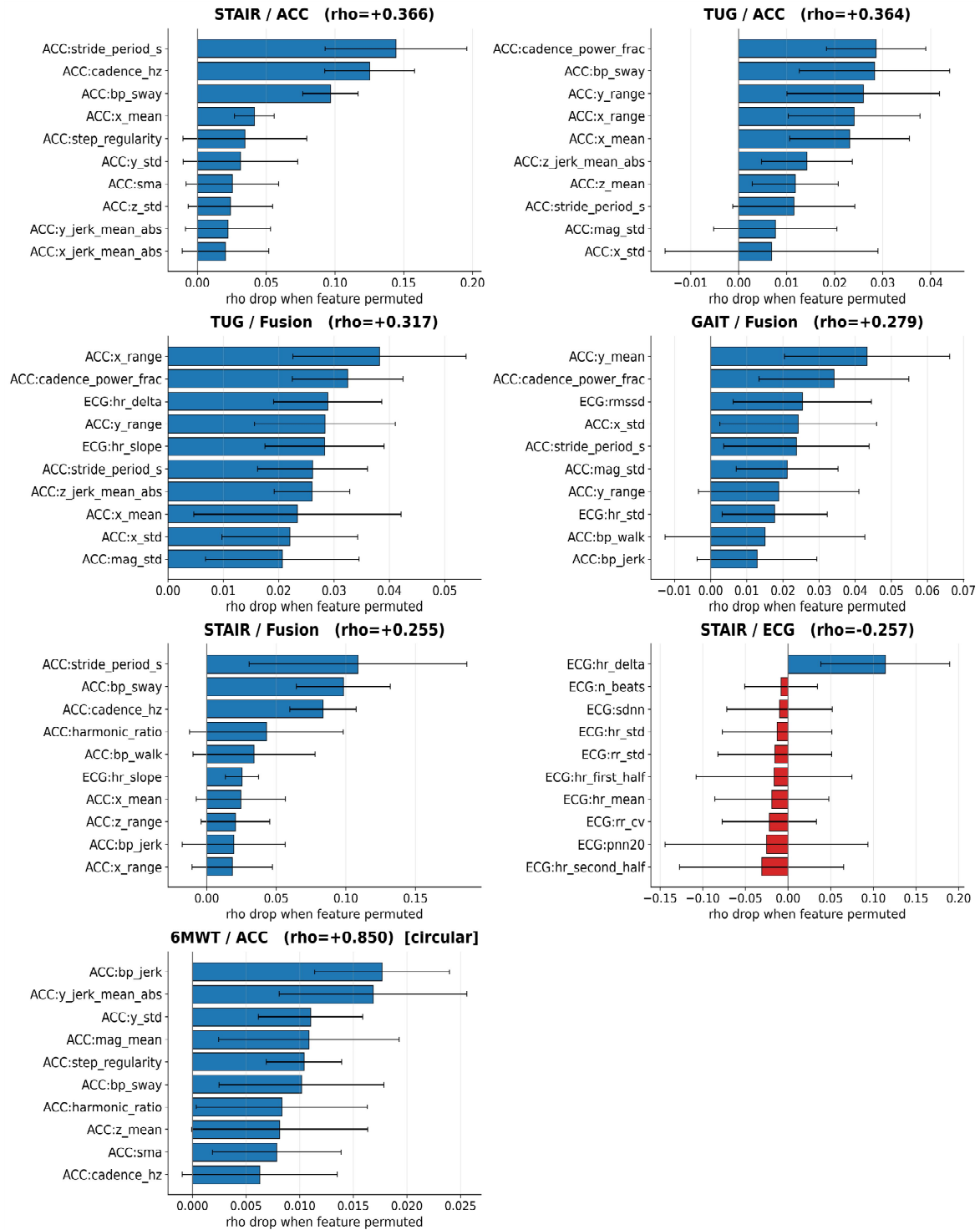


그림 3. 유의한 5개 조합과 2개 진단용 조합(STAIR/ECG, 6MWT/ACC)에 대한 LOSO-faithful permutation importance
Fig. 3. LOSO-faithful permutation importance for the five significant cells and two diagnostic cells (STAIR/ECG, 6MWT/ACC)

STAIR/ACC에서는 상위 3개 feature가 전체 양의 중요도의 52%를 차지하였다. stride period($\Delta p = 0.144 \pm 0.052$), cadence 주파수($\Delta p = 0.125 \pm 0.033$), 자세 동요 대역 bandpower($\Delta p = 0.097 \pm 0.020$)가

이에 해당한다. stride period 하나만 제거해도 p 가 평균 0.37에서 0.22로 하락하여, 소수의 해석 가능한 보행 운동학 지표에 예측이 집중됨을 보여준다. STAIR/fusion도 동일한 ACC feature 3종을 상위에

보였으며, ECG 기여는 유의하지 않았다(최상위 ECG feature인 HR slope가 6위, $\Delta p = 0.025$).

TUG/ACC에서는 중요도가 더 여러 feature에 고르게 분산되었다(상위 3개가 44%). cadence power fraction($\Delta p = 0.029$), 자세 동요 bandpower($\Delta p = 0.028$), 내외측 가속도 범위($\Delta p = 0.026$)가 선두였으며, 이는 TUG의 다단계 구조와 일치한다. TUG/fusion에서는 Δ HR($\Delta p = 0.029$)과 HR slope($\Delta p = 0.028$) 두 ECG feature가 상위 5개에 들었다. 90초 TUG 구간에서 심혈관 반응 feature가 보행 운동학 만으로는 담기지 않는 정보를 더하며, 이것이 fusion 이 예측을 개선한 근거가 된다.

gait analysis/fusion은 단일 modality가 모두 비유의 했으나 fusion에서 유의해진 조합이다($p = 0.28$). ACC feature(내외측 평균, cadence power fraction)와 ECG 미주신경 HRV 지표(RMSSD 3위, HR 표준편차 8위)의 혼합으로 구동되었으며, 짧은 보행 구간에서 자세 정보와 자율신경 정보를 함께 쓸 때 예측이 개선됨을 시사한다.

6MWT/ACC sanity 조합($p = 0.85$)에서는 중요도가 jerk, 크기, 보행 규칙성 feature에 걸쳐 넓게 분산되었다(상위 3개가 32%). 이는 동일 검사 내 보행 기반 feature 간의 높은 공선성을 반영한다.

3.4 진단: STAIR/ECG의 음의 방향

STAIR/ECG에서 유의한 음의 상관이 관찰되었다(RidgeCV $p = -0.26$, 95% CI $-0.47 \sim -0.05$). permutation importance는 양의 기여 전체를 단일 feature, 즉 계단 오르기 구간 전·후반부 간 Δ HR($\Delta p = 0.114 \pm 0.076$)에 귀속시켰고, 나머지 ECG feature는 양의 중요도를 보이지 않았다. 사실상 모델이 Δ HR 하나만 사용하고 나머지를 잡음으로 취급한 것이다.

음의 방향은 다음과 같이 해석된다. 고정된 계단 과제에서 더 큰 HR 상승은 단위 작업당 상대적 노력이 크다는 것, 즉 더 낮은 기능적 예비능을 지표 하므로 6MWT 거리와 음의 연관을 보인다. 다만 feature 상호작용을 덜 제약하는 Random Forest에서는 동일 조합이 $p = +0.17$ (95% CI $-0.06 \sim +0.38$,

비유의)이었다. 따라서 이 방향성은 모델 의존적이며, 양의 예측이 아니라 생물학적으로 해석 가능한 단일 feature 신호로 보고한다.

3.5 EFS 점수 회귀

동일한 30개 조합 그리드를 EFS 점수(서열형, 4 - 9)를 대상으로 반복하였다. bootstrap CI 기준 어떤 조합도 유의하지 않았다(최적 조합: 6MWT/fusion RidgeCV $p = 0.21$, 95% CI $-0.03 \sim +0.44$). 이는 EFS와 객관적 functional 결과 간 직교성과 일관된다. 또한 본 집단에서 웨어러블 신호 기반 functional 예측의 더 민감한 대상으로 EFS 점수가 아니라 6MWT 거리를 사용하는 것을 뒷받침한다.

IV. 논 의

노인 open-heart surgery 환자의 동질적 코호트($n = 80$)에서, 60 - 120초 운동검사 동안 추출한 웨어러블 ACC feature는 엄격한 피험자 단위 교차검증 하에 6MWT 거리를 중간 강도로 예측하였다. 가장 강한 교차검사 예측은 STAIR/ACC($p = 0.37$, 95% CI $0.15 - 0.57$)와 TUG/ACC($p = 0.36$, 95% CI $0.14 - 0.56$)에서 얻어졌다. ECG feature를 함께 사용하면 일부 검사에서 예측 정확도가 다소 높아졌으나, 그 개선은 통계적으로 유의하지 않았다. 반대로 VELO feature는 어떤 modality로도 6MWT 거리를 예측하지 못하였다. EFS 점수 역시 객관적 functional 결과와 무관하여, 어떤 feature 조합으로도 의미 있게 예측되지 않았다.

유의한 예측을 보인 조합들의 근거는 feature 중요도에서 확인할 수 있다. STAIR/ACC에서 가장 중요한 feature는 stride period, cadence 주파수, 자세 동요였다. 짧은 계단 과제에서 얻은 신호이지만, 이들은 보행을 직접 나타내는 지표이다(상위 세 feature가 양의 중요도의 52%). 즉 짧은 노력 과제에서 환자가 각 보폭을 어떻게 조절하고 안정적으로 딛는지가 6분 보행 거리의 상당 부분을 설명한다. TUG/ACC에서는 중요도가 cadence, 자세 동요, 측별 가속도에 고르게 나뉘어, 앞기-서기·보행·회전으로

이어지는 TUG의 다단계 구조와 일치한다. TUG와 gait analysis의 fusion에서는 HR 반응 feature(Δ HR, HR slope)가 상위에 올라, 심박 반응 정보가 보행 운동학이 담지 못하는 부분을 보완함을 시사한다.

ECG 단독 모델은 어떤 검사에서도 안정적인 양의 예측을 보이지 못하였다. 이는 균일한 beta-blocker 복용(99%)이 HR의 범위와 반응 폭을 좁히고, 구간이 짧아 저주파 HRV를 추정하기 어려우며, 단일 유도 흉부 기록이 파형 형태 기반 feature를 제한하기 때문으로 보인다. 음의 이상치(STAIR/ECG, $\rho = -0.26$)는 거의 전적으로 단일 feature인 Δ HR에서 비롯되었다. 고정된 계단 과제에서 HR이 더 크게 오른다는 것은 같은 작업에 드는 상대적 노력이 크다는 뜻, 즉 기능적 예비능이 낮음을 의미하므로 6MWT 거리와 반대 방향의 연관관을 보인다. 다만 Random Forest에서는 같은 조합이 비유의한 양의 경향($\rho = +0.17$)을 보였다. 따라서 이 방향은 모델에 따라 달라지며, 일반화할 수 있는 예측이라기보다 생리적으로 타당한 단일 feature 신호로 해석되어야 한다.

여섯 개 VELO 조합 모두에서 예측이 전혀 이루어지지 않은 것은 의미 있는 negative finding이다. cycling은 체중을 싣지 않는 운동인 반면, 보행은 지속적인 체중 이동과 자세 제어, 양쪽 다리의 협응을 요구한다. 부하를 점점 높이는 cycling은 이러한 보행 요소에 대한 직접적인 신호를 주지 못한다. cycling 기반 운동검사가 cardiac rehabilitation에서 흔히 쓰이지만, 본 결과는 그 신호가 이 집단에서 보행 기능을 대신 보여주는 지표가 되지 못함을 시사한다.

임상적으로는, 단일 흉부 웨어러블로 측정한 90초 TUG나 짧은 계단 오르기 신호가 6MWT 거리와 중등도 수준의 상관($\rho = 0.36$)을 보였다는 점에 주목할 만하다. 통증, 균형 장애, 공간 제약 때문에 전체 6MWT를 시행하기 어려운 환자에서, 짧고 구조화된 검사의 웨어러블 측정치가 보완적인 기능 정보를 제공할 가능성을 시사한다. 또한 본 표본에서는 fusion이 단일 modality보다 유의하게 나은 성능을 보이지 못하였으므로, 1차 기능 선별을 목적으로 할 경우 ACC 신호만으로도 유사한 성능을 기대할 수 있어, 장치 구성을 단순화할 가능성이 있다고 보여진다. 종합하면, 짧은 운동검사 중 얻은 ACC 신

호는 노인 심장재활 환자의 6MWT 거리를 해석 가능한 방식으로 추정할 가능성을 보였다.

V. 결 론

본 연구는 노인 open-heart surgery 환자에서 단시간 운동검사 중 측정한 웨어러블 ACC 신호가 6MWT 거리를 예측함을 보였다. STAIR, TUG, gait analysis의 ACC 신호는 통계적으로 유의한 예측력을 제공하였다. ECG와의 fusion은 검사에 따라 효용이 달랐으며, gait analysis에서 가장 뚜렷하였다. 반면 VELO 신호는 보행 능력으로 전이되지 않았다. 예측을 주도한 feature는 stride period와 cadence 등 해석 가능한 보행 운동학 지표였다. 본 결과는 6MWT 시행이 어려운 환자에서 짧은 검사와 웨어러블 측정이 기능 평가를 보완할 가능성을 보였다. 다만 예측 수준이 중등도에 머무르므로, 임상 적용을 위해서는 추가 검증이 필요하다.

그러나 본 연구의 코호트는 소규모($n = 80$) 단일 기관이며 EFS ≥ 4 인 open-heart surgery 환자로 한정되어, 더 넓은 집단으로 일반화하려면 외부 검증이 필요하다. 균일한 beta-blocker 사용은 약물 사용이 적은 집단에서 기대할 수 있는 ECG feature의 예측력을 과소평가하게 하며, 단일 흉부 장치는 사지별·좌우 비대칭 feature를 배제한다. 또한 피험자·검사당 단일 구간만 사용하였고, RidgeCV가 STAIR 조합에서 산출한 극단적 예측 이상치 때문에 MAE는 Random Forest 기준으로만 보고하고 Spearman ρ 를 1차 효과크기로 삼았다.

이후 연구에서는 독립 코호트에서의 외부 검증(건강 대조군과 더 넓은 frailty 범위 포함), 후속 임상 사건(재입원, 낙상, 사망)을 대상으로 한 연구 설계, 집계 feature가 놓치는 단계별 신호를 드러낼 구간 내 분석, 그리고 다중 functional 결과(6MWT 거리, TUG 시간, EFS 구성 요소)의 multi-task 공동 예측 등이 진행되어야 할 것이다.

References

- [1] American Thoracic Society Committee on Proficiency Standards for Clinical Pulmonary

- Function Laboratories, "ATS statement: guidelines for the six-minute walk test", American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, Vol. 166, No. 1, pp. 111-117, Jul. 2002. <https://doi.org/10.1164/ajrccm.166.1.at1102>
- [2] D. B. Rolfson, S. R. Majumdar, R. T. Tsuyuki, A. Tahir, and K. Rockwood, "Validity and reliability of the Edmonton Frail Scale", Age and Ageing, Vol. 35, No. 5, pp. 526-529, Sep. 2006. <https://doi.org/10.1093/ageing/af1041>.
- [3] M. Butkuvienė, E. Tamulevičiūtė-Prascienė, A. Beigienė, V. Barasaitė, D. Sokas, R. Kubilius, and A. Petrėnas, "Wearable-based assessment of frailty trajectories during cardiac rehabilitation after open-heart surgery", IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, Vol. 26, No. 9, pp. 4426-4435, Sep. 2022. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2022.3181738>.
- [4] D. Sokas, E. Tamulevičiūtė-Prascienė, A. Beigienė, V. Barasaitė, J. Marozas, R. Kubilius, R. Bailón, and A. Petrėnas, "Wearable-based assessment of heart rate response to physical stressors in patients after open-heart surgery with frailty", IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, Vol. 27, No. 4, pp. 1825-1834, Apr. 2023. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2023.3244005>.
- [5] Wearable-based signals during physical exercises from patients with frailty after open-heart surgery, PhysioNet: <https://doi.org/10.13026/mp8k-7p27>. [accessed: Jun. 01, 2026]
- [6] A. L. Goldberger, L. A. N. Amaral, L. Glass, J. M. Hausdorff, P. C. Ivanov, R. G. Mark, J. E. Mietus, G. B. Moody, C. K. Peng, and H. E. Stanley, "PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: components of a new research resource for complex physiologic signals", Circulation, Vol. 101, No. 23, pp. e215-e220, Jun. 2000. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.101.23.e215>.
- [7] D. Podsiadlo and S. Richardson, "The timed 'Up & Go': a test of basic functional mobility for frail

elderly persons", Journal of the American Geriatrics Society, Vol. 39, No. 2, pp. 142-148, Feb. 1991. <https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.1991.tb01616.x>.

- [8] Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology, "Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use", Circulation, Vol. 93, No. 5, pp. 1043-1065, Mar. 1996. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.93.5.1043>.

저자소개

오 승 준 (SeungJun Oh)



2021년 8월 : 상명대학교
스포츠ICT융합학과(공학박사)
2021년 11월 ~ 2022년 11월 :
University of Maryland
Post-doctoral Researcher
2024년 9월 ~ 현재 : 상명대학교
스포츠ICT융합학과 조교수

관심분야 : 인공지능, 데이터사이언스, 생체신호분석,
운동역학