

# MIMIC 기반 기존 연구 리뷰 및 재현 보고서

## Appendix

2024404060 강민혁

### 1 기흉이란

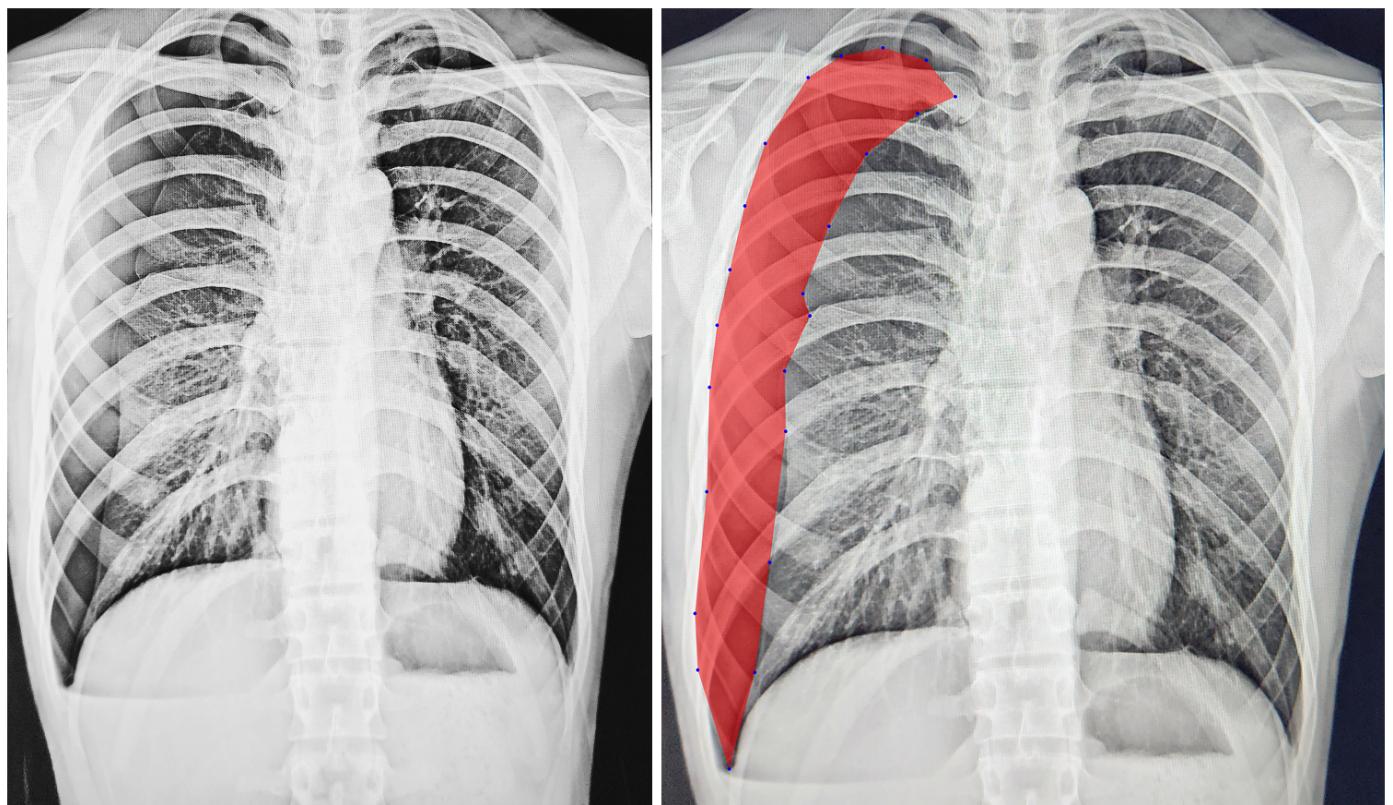


Figure 1: Pneumothorax X-ray with Visualization

폐에 여러 원인으로 구멍이 생겨 새어나온 공기가 흉강에 차서, 폐를 압박해 찌그러뜨리는 질환이며, 외상성 기흉은 외부의 물리적 충격으로 인해 폐나 흉벽이 손상되어 발생하는 기흉이다.

### 2 소프트웨어 환경 및 버전

### 3 수식 정의

#### 3.1 산소화 지수 (Oxygenation Index)

주요 예측 인자인 Oxygenation Index의 산출 공식은 다음과 같다.

$$\text{Oxygenation Index} = \frac{\text{FiO}_2 \times \text{MAP}}{\text{PaO}_2} \times 100 \quad (1)$$

#### 3.2 복합 목적 함수 (Composite Objective Function)

하이퍼파라미터 최적화를 위해 AUROC에 재현율 가중치를 결합한 목적 함수를 다음과 같이 구성하였다.

$$\text{Score} = \text{AUROC} + \alpha \times \text{Recall} \quad (2)$$

Table 1: Environment and Key Library Versions

Software / Library	Version
Python	3.12.12
CUDA	13.0
Pandas	2.3.3
NumPy	2.3.4
SciPy	1.16.3
Matplotlib	3.10.8
Seaborn	0.13.2
Statsmodels	0.14.5
Scikit-learn	1.7.2
XGBoost	3.1.2
SHAP	0.48.0

### 3.3 제약 조건 기반 임계값 최적화

모델의 최종 예측 단계에서 임상적 안전성을 보장하기 위한 제약 조건은 다음과 같다.

$$\text{Recall}(t) \geq 0.45 \quad (3)$$

$$\text{Accuracy}(t) \geq 0.85 \quad (4)$$

## 4 예측 모델에 사용된 변수 정의

Table 2: Definitions of the 12 Key Variables Selected for the Predictive Model

Variable	Unit	Description
pH	-	Indicator of the acid-base status of the blood
Hemoglobin	g/dL	Protein concentration reflecting the oxygen-carrying capacity of the blood
PaO <sub>2</sub>	mmHg	Partial pressure of arterial oxygen; reflects dissolved oxygen tension
Lactate	mmol/L	Marker of tissue hypoxia and anaerobic metabolism
Oxygenation Index	-	Calculated index assessing the severity of respiratory failure
SpO <sub>2</sub>	%	Peripheral oxygen saturation; percentage of oxygen-bound hemoglobin
Base Excess	mEq/L	Measure of metabolic acid-base status, independent of respiratory factors
Heart Rate	bpm	Number of heartbeats per minute
PaCO <sub>2</sub>	mmHg	Partial pressure of arterial carbon dioxide; indicator of alveolar ventilation
Systolic BP	mmHg	Arterial blood pressure during ventricular contraction
Diastolic BP	mmHg	Arterial blood pressure during ventricular relaxation
Respiratory Rate	breaths/min	Number of breaths per minute

Note: PaO<sub>2</sub>, partial pressure of oxygen; SpO<sub>2</sub>, peripheral oxygen saturation; PaCO<sub>2</sub>, partial pressure of carbon dioxide; BP, blood pressure.

Table 3: Baseline Model XGBoost Hyperparameter Search Range and Optimal Values

Hyperparameter	Symbol	Search Range	Optimal Value
Number of Estimators	$M$	{100, 200, 300}	100
Max Depth	$d_{\max}$	{3, 5, 7}	5
Learning Rate	$\eta$	{0.01, 0.05, 0.1}	0.05
Subsample Ratio	$r_{\text{sub}}$	{0.8, 1.0}	0.8
Column Subsample Ratio	$r_{\text{col}}$	{0.8, 1.0}	1.0
Min Child Weight	$w_{\min}$	{1, 3, 5}	1
Min Split Loss	$\gamma$	{0, 0.1, 0.2}	0.2

Table 4: Proposed Model XGBoost Hyperparameters via Bayesian Optimization

Hyperparameter	Symbol	Optimal Value
Number of Estimators	$M$	327
Max Depth	$d_{\max}$	10
Learning Rate	$\eta$	0.0117
Subsample Ratio	$r_{\text{sub}}$	0.959
Column Subsample Ratio	$r_{\text{col}}$	0.627
Min Child Weight	$w_{\min}$	2
Min Split Loss	$\gamma$	0.0096
L1 Regularization	$\alpha_{\text{reg}}$	0.0029
L2 Regularization	$\lambda_{\text{reg}}$	$3.22 \times 10^{-8}$

## 5 하이퍼파라미터 설정

### 5.1 베이스라인 모델

### 5.2 제안 모델

## 6 상세 실험 결과

### 6.1 제약 조건 기반 임계값 최적화 결과

제안 모델에서 제약 조건 기반 임계값 최적화를 수행한 결과, 최적 임계값은 0.650으로 결정되었다. 이는 최소 민감도 제약( $\text{Recall} \geq 0.45$ )과 최소 정확도 제약( $\text{Accuracy} \geq 0.85$ )을 동시에 만족하면서 F1-score를 최대화하는 지점이다.

Table 5: Cross-Validation Results at Optimized Threshold (0.650)

Metric	Value (Mean $\pm$ Std)
AUROC	$0.904 \pm 0.040$
AUPRC	$0.704 \pm 0.095$
Accuracy	$0.883 \pm 0.034$
F1 Score	$0.668 \pm 0.083$
Precision	$0.650 \pm 0.116$
Recall	$0.700 \pm 0.100$
Specificity	$0.920 \pm 0.038$
PPV	$0.650 \pm 0.116$
NPV	$0.939 \pm 0.019$

### 6.2 베이스라인 대비 성능 개선

Table 6: Performance Comparison: Baseline vs. Recall-Optimized Model

Metric	Baseline	Proposed	Change
AUROC	0.910	0.904	-0.006
AUPRC	0.764	0.704	-0.060
Accuracy	0.885	0.883	-0.002
F1 Score	0.557	0.668	+0.111
Precision	0.779	0.650	-0.129
Recall	0.442	0.700	+0.258

### 6.3 SHAP 변수 중요도 분석

Table 7: Top 10 Feature Importance by SHAP Values (Recall-Optimized Model)

Rank	Feature	Mean  SHAP
1	Hemoglobin	0.628
2	MAP	0.447
3	PaO <sub>2</sub>	0.404
4	Lactate	0.395
5	SpO <sub>2</sub>	0.379
6	Oxygenation Index	0.351
7	FiO <sub>2</sub>	0.350
8	Base Excess	0.332
9	Systolic BP	0.301
10	Heart Rate	0.242

## 7 결과 시각화

### 7.1 교차 검증 메트릭 비교

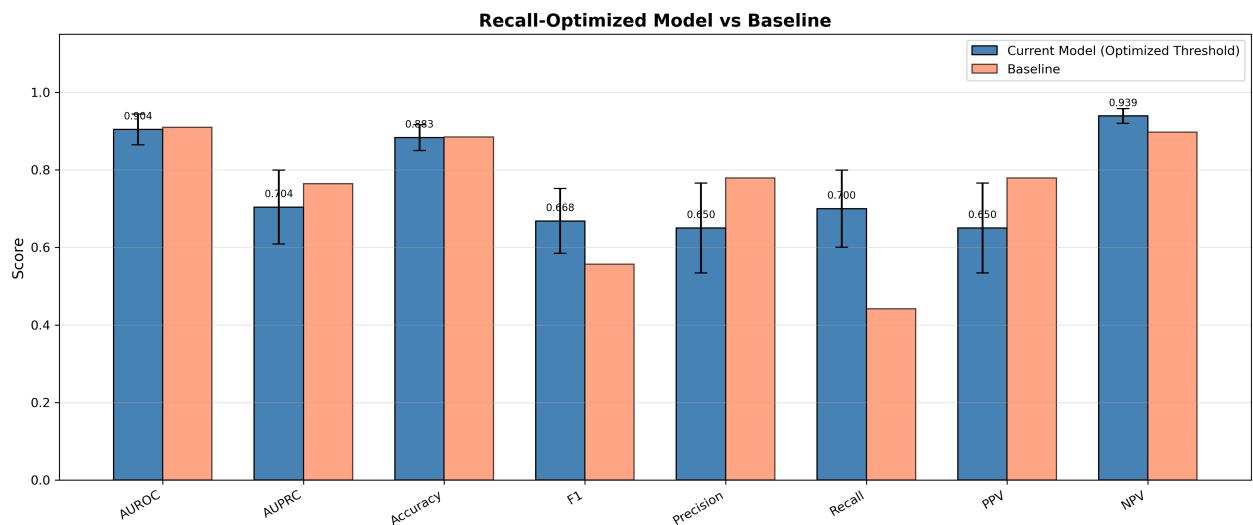


Figure 2: Cross-Validation Metrics Comparison. Comparison of key performance metrics between baseline model and recall-optimized proposed model across 5-fold cross-validation.

## 7.2 SHAP 분석 결과

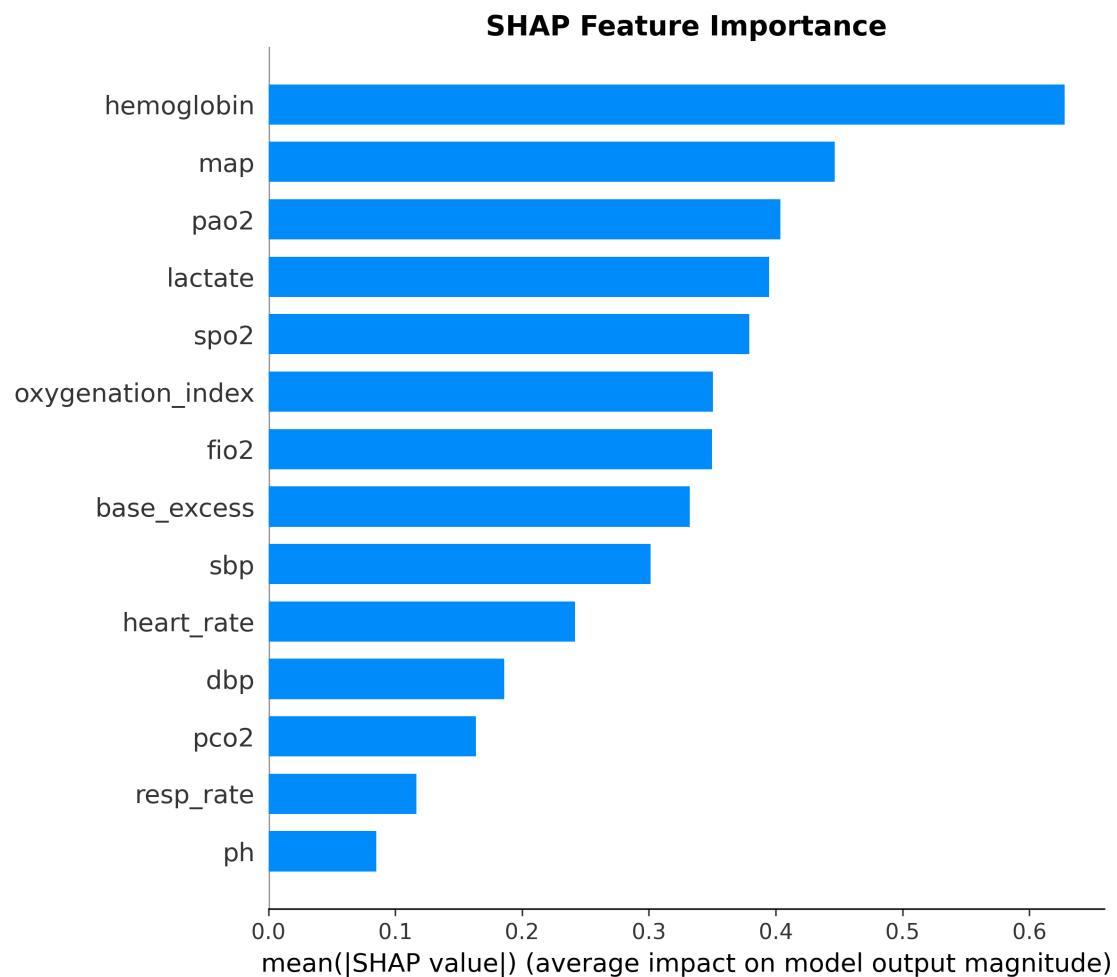


Figure 3: SHAP Feature Importance. Bar plot showing the mean absolute SHAP values for each feature, indicating their relative contribution to model predictions.

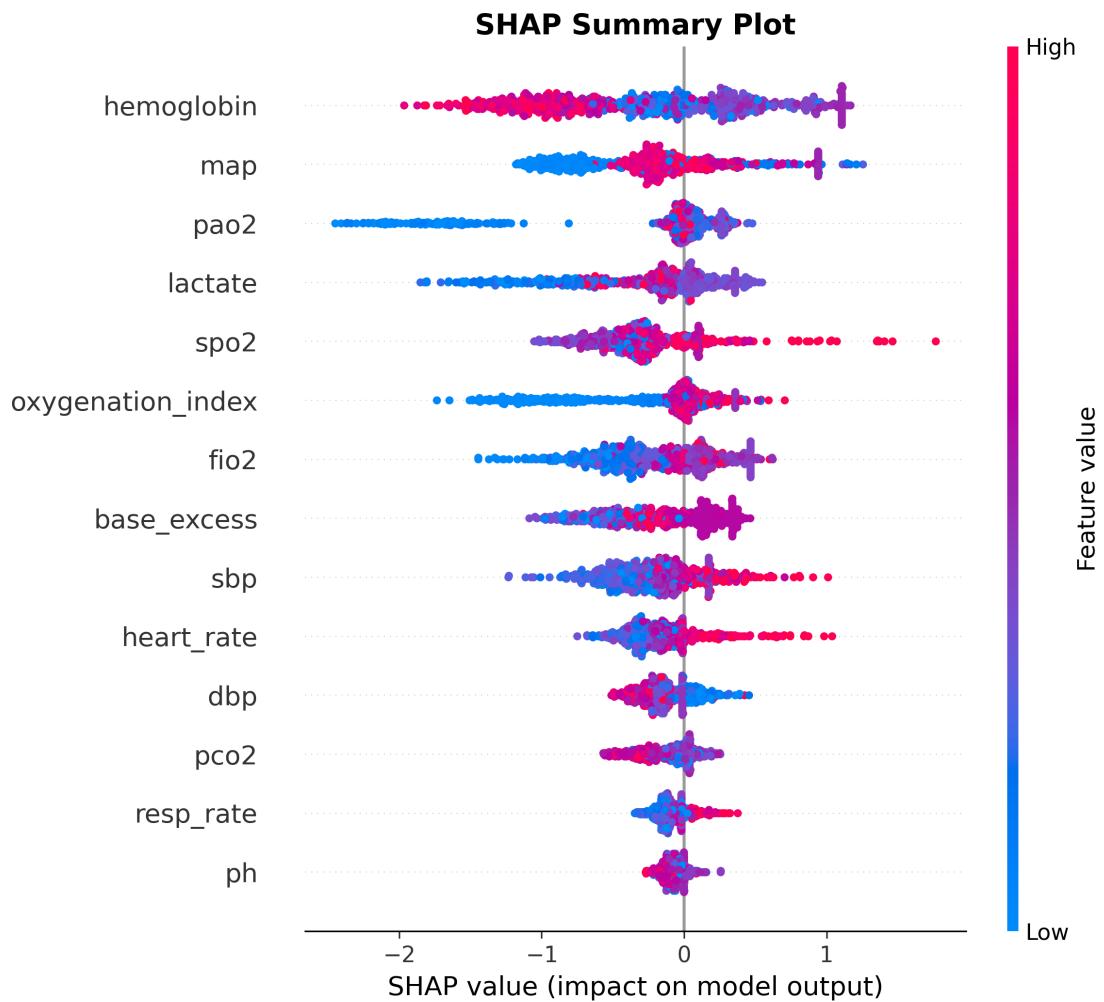


Figure 4: SHAP Summary Plot. Each point represents a patient sample; the color indicates the feature value (red=high, blue=low), and the horizontal position shows the SHAP value (positive=increased risk of pneumothorax progression).

### 7.3 임계값 분석

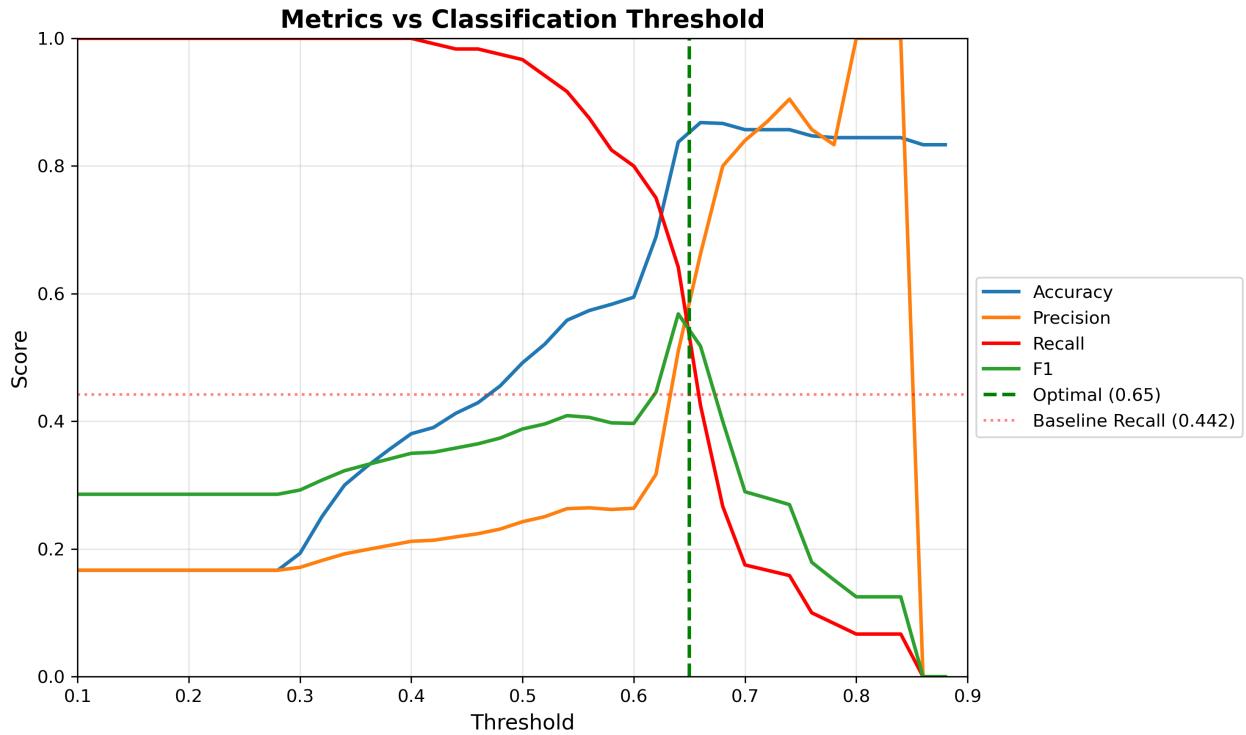


Figure 5: Threshold Analysis. Performance metrics (Accuracy, F1-Score, Precision, Recall) as a function of classification threshold. The optimal threshold (0.650) was selected to satisfy the recall constraint ( $\geq 0.45$ ) and accuracy constraint ( $\geq 0.85$ ) while maximizing F1-score.

## 8 주요 예측 인자에 따른 영상 비교

SHAP 분석 결과 Hemoglobin이 외상성 중증 기흉 예측에 가장 중요한 인자로 확인되었다. 이러한 결과의 임상적 타당성을 검증하기 위해 Figure 6와 같이 실험군 내에서 헤모글로빈 수치에 따른 상위 0.5%, 중위값(50%), 하위 0.5%에 해당하는 환자의 흉부 X선 영상을 비교 분석하였다.

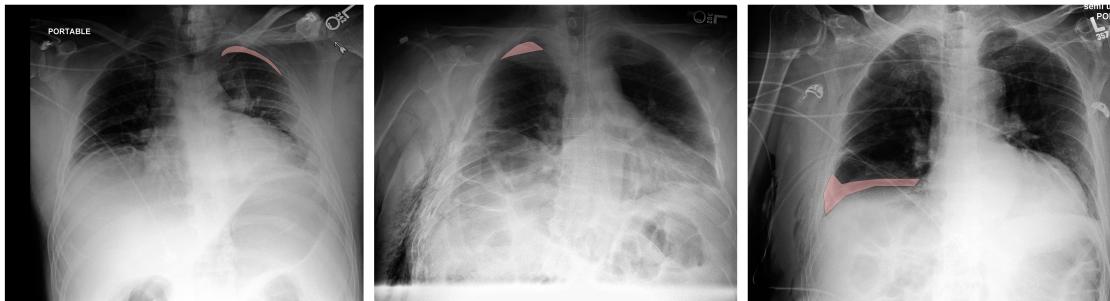


Figure 6: Chest X-ray Comparison by Hemoglobin Levels in Traumatic Pneumothorax Patients. Left: High hemoglobin (13.3 g/dL, top 0.5%), Center: Median hemoglobin (10.77 g/dL), Right: Low hemoglobin (7.15 g/dL, bottom 0.5%).

**상위 백분위수 환자 (헤모글로빈 13.3 g/dL)** LUL상단 용적이 감소한 것을 확인할 수 있다. 동시에 cardiomegaly가 확인되며, heart failure 치료를 위한 diuretics 사용으로 hemoconcentration가 일어나 헤모글로빈 수치가 상대적으로 높아진 것으로 파악된다.

**중위 백분위수 환자 (헤모글로빈 10.77 g/dL)** RUL상단 용적이 감수한 것을 확인할 수 있다. 우측 상복부에는 피하 기종이 파악되며, adynamic ileus가 예상된다. 헤모글로빈 수치 자체는 임상적으로 경도의 빈혈에 해당 하나, 본 데이터셋 내에서는 중위값에 해당한다. 즉, 외상성 기흉 환자군 전반에서 출혈에 따른 헤모글로빈 저하가 흔함을 확인할 수 있으며, 원인은 다양하게 나타남을 예상할 수 있다.

**하위 백분위수 환자 (헤모글로빈 7.15 g/dL)** multiple rib fractures 이후 산소포화도 저하와 산소 요구량 증가를 보인 환자이다. rib fractures로 인해 헤모글로빈 수치 감소가 되었음을 예상할 수 있으며, 이와같이 직접적인 외상으로 기흉, 정확히는, Hemo-pneumothorax가 발생함을 확인할 수 있었다.

**임상적 해석** 하위 백분위수 환자의 경우, multiple rib fractures과 같은 큰손상이 동반되었으며, 이에 따른 hemothorax로 인해 헤모글로빈 수치의 급격한 저하를 유발한 것으로 판단된다. 이는 헤모글로빈 수치가 외상성 기흉의 중증도와 직결되는 출혈량 및 손상 범위를 대변한다는 점을 시사한다. 반면, 상위 백분위수 환자군에서는 cardiomegaly가 확인되며, diuretics 사용으로 인해 hemoconcentration가 일어나 수치가 높게 측정된 것으로 예상되며, 기저 질환이 있는 환자군에서의 특이적 양상으로 해석할 수 있다.

SHAP에서 헤모글로빈이 최상위 예측 인자로 도출된 것은 외상으로 인한 직접적인 출혈과 환자의 기저 상태가 중증 기흉의 예후 및 양상을 결정짓는 핵심 요인으로 판단된다. 본 분석에서 사용된 샘플은 각 레벨에서의 하나의 Chest PA만을 가져온 것으로 일반화를 하기에는 한계가 존재하나, 헤모글로빈 수치가 외상성 기흉 환자의 중증도 분류 및 예후 예측에 있어 생리학적으로 타당한 지표임을 뒷받침할 수 있을 가능성을 시사한다.