

# PPE Detection 모델 학습 결과 보고서

프로젝트: Safety Vision AI - 건설현장 안전장비 착용 감지 모델: YOLOv8n (Nano) 훈련일자: 2025년 11월 21일 GPU: RunPod A100 (80GB) 훈련시간: 54.4분 (100 epochs)

## Executive Summary

건설현장 개인보호구(PPE) 착용 감지를 위한 3-Class 객체 탐지 모델을 성공적으로 훈련했습니다. 기존 2-Class 시스템(helmet, vest)에서 헬멧 미착용 상태(head)를 감지할 수 있는 3-Class 시스템으로 전환하여, 안전 모니터링 능력을 크게 향상시켰습니다.

## 핵심 성과

- mAP@0.5: 93.7% (목표 90% 초과 달성)
- Helmet-Head 혼동률: 0.45% (거의 완벽한 구분)
- 전체 정확도: 92.2%, 재현율: 87.2%
- 과적합 없는 안정적 학습 달성

## 1. 탐지 클래스 정의

클래스 ID	클래스명	설명	색상
0	helmet	헬멧 착용 <span style="color: green;">✓</span>	파란색
1	head	헬멧 미착용 <span style="color: yellow;">⚠</span>	빨간색
2	vest	안전조끼 착용 <span style="color: green;">✓</span>	노란색

## 2. 데이터셋 구성

### 2.1 데이터 분포

구분	이미지 수	비율	객체 수
Train	9,999	64.5%	39,267
Val	2,750	17.7%	10,842
Test	2,751	17.7%	10,882
합계	<b>15,500</b>	100%	<b>60,991</b>

### 2.2 클래스별 객체 분포

클래스	객체 수	비율	특징
helmet	39,163	64.2%	가장 많음
head	5,783	9.5%	데이터 불균형
vest	16,045	26.3%	적절한 수준

## 3. 최종 성능 지표

### 3.1 전체 성능

지표	결과	목표	달성 여부
mAP@0.5	93.7%	$\geq 90\%$	 초과 달성 (+3.7%p)
mAP@0.5:0.95	69.0%	$\geq 70\%$	 근접 (-1.0%p)
Precision	92.2%	$\geq 88\%$	 초과 달성 (+4.2%p)

지표	결과	목표	달성 여부
Recall	87.2%	≥ 85%	✓ 달성 (+2.2%p)

### 3.2 클래스별 성능 (Validation Set)

클래스	AP@0.5	AP@0.5:0.95	Precision	Recall
helmet	95.1%	70.8%	93.0%	90.0%
head	92.2%	63.5%	90.0%	87.0%
vest	94.4%	72.5%	93.5%	82.0%

## 4. 훈련 과정 분석

### 4.1 Loss 감소 추이

#### Train Loss

Loss 종류	초기값	최종값	감소율	해석
box_loss	1.50	0.82	45%	위치 예측 개선
cls_loss	1.75	0.41	77%	클래스 구분 우수
dfl_loss	1.38	0.99	28%	분포 학습 안정

#### Validation Loss

Loss 종류	초기값	최종값	감소율	해석
box_loss	2.50	0.95	62%	일반화 우수
cls_loss	5.50	0.49	91%	클래스 구분 탁월

Loss 종류	초기값	최종값	감소율	해석
dfl_loss	3.00	1.04	65%	안정적 수렴

## 4.2 수렴 패턴

- **Early Convergence**: 50 epoch에서 성능 85% 도달
- **Stable Plateau**: 80-100 epoch 구간 안정화
- **No Overfitting**: Train/Val loss 간격 유지
- **Optimal Point**: 80-90 epoch 권장

## 4.3 훈련 곡선 시각화

Training Results

그림 1: 100 Epochs 훈련 과정 - Loss 감소 및 성능 지표 변화

위 그래프는 훈련 과정에서의 Loss 감소와 성능 지표 향상을 보여줍니다: - **상단 좌측**: Box/Classification/DFL Loss의 안정적 감소 - **상단 우측**: Precision과 Recall의 꾸준한 향상 - **하단**: Validation Loss의 수렴으로 과적합 없음 확인

## 🔍 5. 혼동 행렬 분석

### 5.1 클래스별 탐지 성능 (Test Set)

클래스	정답 탐지	오분류	미탐지	정확도
helmet	6,304	37	696	90.0%
head	1,024	6	148	87.0%
vest	2,529	6	547	82.0%

## 5.2 클래스 간 혼동 상세

오분류 유형	건수	비율	심각도
helmet → head	29	0.4%	⚠ 중요
head → helmet	6	0.5%	⚠ 중요
helmet → vest	8	0.1%	낮음
vest → helmet	6	0.2%	낮음
<b>총 혼동</b>	<b>49</b>	<b>0.45%</b>	<b>매우 낮음</b>

## 5.3 False Positive 분석

배경 오탐	건수	원인 추정
background → helmet	477	안전모 유사 물체
background → head	91	사람 얼굴/머리
background → vest	200	노란색 물체
<b>총 FP</b>	<b>768</b>	-

## 5.4 혼동 행렬 시각화

Confusion Matrix

그림 2: 혼동 행렬 (절대값) - 클래스별 예측 결과

Confusion Matrix Normalized

그림 3: 정규화된 혼동 행렬 - 클래스별 정확도 비율

혼동 행렬 분석 결과: - **대각선 요소의 진한 색상**: 높은 정확도 (helmet 93%, head 90%, vest 92%) - **비대각선 요소의 옅은 색상**: 매우 낮은 클래스 간 혼동 (< 0.5%) - **핵심 발견**: Helmet ↔ Head 혼동이 0.45%로 거의 완벽한 구분

## 6. 성능 곡선 분석

### 6.1 Precision-Recall 곡선

클래스	AP (Area)	특징
helmet	0.951	최고 성능, 안정적
head	0.922	양호, 개선 필요
vest	0.944	우수한 성능
mAP	<b>0.939</b>	매우 우수

### 6.2 최적 Confidence Threshold

클래스	최적 Threshold	F1-Score	용도
helmet	0.40	0.90	일반 탐지
head	0.35	0.88	미탐지 방지
vest	0.45	0.88	균형 설정
전체	<b>0.443</b>	<b>0.90</b>	권장값

### 6.3 Confidence별 성능 변화

#### Precision-Confidence

- Conf 0.2에서 Precision 80% 달성
- Conf 0.5에서 Precision 95% 도달
- Conf 0.984에서 Precision 100%

#### Recall-Confidence

- Conf 0.0에서 Recall 97% (최대)
- Conf 0.5에서 Recall 75% 유지

- Conf 0.7 이후 급격한 하락

## 6.4 성능 곡선 시각화

PR Curve

그림 4: Precision-Recall 곡선 - 클래스별 AP 성능

F1 Curve

그림 5: F1-Confidence 곡선 - 최적 임계값 선택

Precision Curve

그림 6: Precision-Confidence 곡선 - Confidence 증가에 따른 정확도 향상

Recall Curve

그림 7: Recall-Confidence 곡선 - Confidence와 재현율의 Trade-off

성능 곡선 분석 요약: - **PR 곡선**: 모든 클래스가 좌상단에 근접하여 우수한 성능 입증 - **F1 곡선**: Confidence 0.443에서 최적 F1=0.90 달성 - **Precision 곡선**: Confidence 증가에 따라 안정적으로 상승 - **Recall 곡선**: Head 클래스가 높은 Confidence에서 급격히 하락 (주의 필요)

## 7. 훈련 환경 및 설정

### 7.1 하드웨어

항목	사양
GPU	NVIDIA A100 40GB
GPU Memory	40GB HBM2e
System RAM	128GB
Storage	NVMe SSD

## 7.2 하이퍼파라미터

파라미터	값	설명
Model	YOLOv8n.pt	Nano 버전
Epochs	100	충분한 학습
Batch Size	128	A100 최적화
Image Size	640×640	표준 크기
Optimizer	AdamW	가중치 감쇄 포함
Initial LR	0.01	초기 학습률
Final LR	0.0001	최종 학습률
Momentum	0.937	관성 계수
Weight Decay	0.0005	과적합 방지
Warmup	3 epochs	초기 안정화
AMP	Enabled	Mixed Precision

## 7.3 데이터 증강

증강 기법	값	효과
Mosaic	1.0	4개 이미지 조합
MixUp	0.0	미사용
HSV-H	0.015	색조 변화
HSV-S	0.7	채도 변화
HSV-V	0.4	명도 변화
Rotate	0°	회전 없음
Translate	0.1	10% 이동

증강 기법	값	효과
Scale	0.5	50% 크기 변화
Shear	0°	전단 없음
Flip-UD	0.0	상하 반전 없음
Flip-LR	0.5	좌우 반전 50%

## 💡 8. 주요 발견사항 (Key Findings)

### 8.1 성공 요인

1. 3-Class 전환 성공
2. Helmet-Head 혼동률 0.45%로 거의 완벽한 구분
3. 헬멧 미착용 감지 기능 성공적 구현
4. 안정적 학습
5. 100 epochs 동안 과적합 없음
6. Train/Val loss 간격 일정 유지
7. 균형잡힌 성능
8. 모든 클래스 AP > 0.92
9. Precision-Recall 균형 우수 (F1 = 0.90)

### 8.2 한계점

1. 데이터 불균형
2. Head 클래스 9.5%로 가장 적음
3. Vest Recall 82%로 상대적 저조
4. 바운딩 박스 정밀도

5. mAP@0.5:0.95 = 69% (목표 70% 미달)

6. 높은 IoU에서 성능 하락

## 7. False Positive

8. Background 오탐 768건

9. 복잡한 배경에서 오탐 발생

---

## 9.3 성능 모니터링 지표

지표	임계값	조치
mAP@0.5	< 85%	재훈련 검토
FP Rate	> 15%	Confidence 상향
Miss Rate	> 20%	Confidence 하향
Inference Time	> 50ms	모델 경량화

---

## 9. 검증 데이터 예측 결과

---

### 9.1 Ground Truth vs Predictions

Val Batch 0 Labels

그림 8: 검증 데이터 Batch 0 - 실제 라벨 (Ground Truth)

Val Batch 0 Predictions

그림 9: 검증 데이터 Batch 0 - 모델 예측 결과

Val Batch 1 Labels

그림 10: 검증 데이터 Batch 1 - 실제 라벨 (Ground Truth)

## Val Batch 1 Predictions

그림 11: 검증 데이터 Batch 1 - 모델 예측 결과

검증 데이터 시각화 분석: - **정확한 바운딩 박스**: 대부분의 객체를 정확히 탐지 - **클래스 구분 성공**: Helmet(파랑), Head(빨강), Vest(노랑) 명확히 구분 - **다양한 환경 대응**: 다양한 각도와 조명 조건에서도 안정적 탐지

---

## 10. 참고 자료

---

### 10.1 데이터셋 출처

#### 1. Hard Hat Detection Dataset

2. Source: [Kaggle](#)

3. Classes: helmet, head, person

4. Format: Pascal VOC

5. Images: 5,000

#### 6. Safety Helmet and Reflective Jacket Dataset

7. Source: [Kaggle](#)

8. Classes: Safety-Helmet, Reflective-Jacket

9. Format: YOLO

10. Images: 10,500

### 10.2 관련 연구

- YOLOv8: [Ultralytics Documentation](#)
  - Object Detection in Construction Sites: IEEE Access 2023
  - PPE Detection using Deep Learning: Safety Science 2024
-

## 11. 결론

---

3-Class PPE Detection 모델은 mAP@0.5 **93.7%**의 우수한 성능을 달성하였으며, 특히 **헬멧 착용/미착용** 구분에서 **0.45%**의 매우 낮은 혼동률을 보여 실무 적용이 가능한 수준입니다.

### 핵심 성과

- 헬멧 미착용 감지 기능 성공적 구현
- 목표 성능 지표 대부분 달성
- 안정적이고 재현 가능한 학습 결과
- 실시간 모니터링 시스템 적용 가능