

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 ✓	파란색
1	head	헬멧 미착용 ⚠	빨간색
2	vest	안전조끼 착용 ✓	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	15,500	100%	60,991

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%	≥ 90%	✅ 초과 달성 (+3.7%p)
mAP@0.5:0.95	69.0%	≥ 70%	⚠️ 근접 (-1.0%p)
Precision	92.2%	≥ 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
df1_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
총 혼동	49	0.45%	매우 낮음

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
총 FP	768	-

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	0.939	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	0.443	0.90	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

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

8.2 한계점

- 데이터 불균형
- Head 클래스 9.5%로 가장 적음
- Vest Recall 82%로 상대적 저조
- 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 혼동률**을 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