

# 칼럼

## 어뢰배트 도입 효과 추정

어뢰배트 도입 효과 추정

1. 어뢰배트란?
2. 어뢰 배트와 기존 배트 비교 시뮬레이션 연구
3. 어뢰배트 사용 사례 분석
  - 물리적 지표 분석
  - 기술적 지표 분석
  - 커널 밀도 추정 그래프
  - 히트맵
  - 카이제곱 검정
  - 이중차분법 회귀 모델
4. 몬테카를로 시뮬레이션
  - 몬테카를로 시뮬레이션의 흐름 한 눈에 보기
  - 물리량 계산
  - 시뮬레이션 시각화
  - 결과표
  - 상세분석
5. 결론 및 한계

### 1. 어뢰배트란?

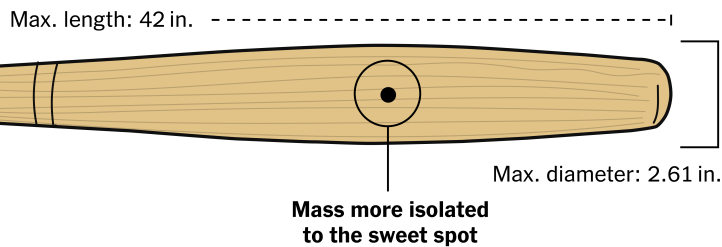
#### 개요

'Torpedo bat', 일명 어뢰 배트는 MLB에서 2025 시즌 초에 등장하여 많은 이들의 이목을 끌었다.

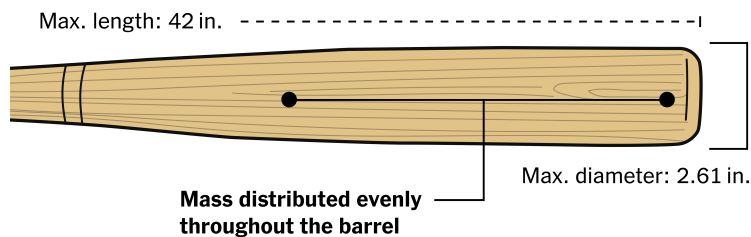
어뢰 배트는 기존 배트와 다르게 가장 효과적으로 타격할 수 있는 위치인 스위트 스팟 부분을 가장 두껍게 만들어 어뢰, 혹은 볼링 핀 모양에 가까운 모습을 하고 있다.

### MLB Bats: Standard vs. "torpedo"

#### "Torpedo" bat



#### MLB standard bat



A

출처: [Torpedo bats are making a lot of noise — but they've been quietly in MLB for a few years - The Athletic](#)

양키스가 2025시즌 개막 첫 주 밀워키 브루어스를 상대로 타선이 불을 뿜었고 3월 29일에는 첫 세 타석에서만 3연속 홈런을 기록, 총 9 홈런이라는 대기록을 작성했다.

이 9홀런 게임에서 몇몇 양키스 선수들이 사용하는 모습이 포착되어 주목받게 되었다.

### 어뢰 배트의 탄생

MIT에서 물리학 박사 학위를 수료한 리안하르트 교수, 그 마이너리그 타격 코디네이터로 재직하며 정량적 정보를 경기에 활용하고, 분석 부서와 메이저리그 코칭 스태프를 연결하는 역할을 하였다. 양키스의 타자들과 코치들은 도움을 요청하였고, 리안하르트와 선수들이 공을 맞히려는 위치가 가장 두꺼운 부분이 아니라는 것을 깨달은 순간이 어뢰 배트 개발의 시작점이 되었다.

## 2. 어뢰 배트와 기존 배트 비교 시뮬레이션 연구

(원본: [The Physics of the Torpedo Bat | FanGraphs Baseball](#))

2000년 11월 *American Journal of Physics* article, "[Dynamics of the Baseball-Bat Collision](#),"에서 언급된 바에 따르면 출구 속도(Exit Velocity)의 공식은

$EV = q * (\text{pitch speed}) + (1+q) * (\text{bat speed})$  으로 나타낼 수 있다.

여기서  $q$ 는 충돌 효율을 의미하는데, 이는 배트가 투구를 얼마나 효율적으로 회전시키고 고속으로 내보내는지를 나타내는 수치이다. 충돌 효율성은 BBCOR(볼-배트 복원계수, 일종의 반발계수),  $r$ (반동 계수)에 따라 좌우된다. 이때 BBCOR은 야구공, 배트의 굽힘 진동 모두에서 일어날 수 있는 에너지 소산과 관련이 있다. BBCOR이 클수록 에너지가 적게 소산되며, 출구 속도가 커진다. BBCOR이 작으면 반대의 결과가 일어난다.  $r$ 은 배트의 MOI(관성 모멘트)의 역수에 대략적으로 비례한다. 배트가 가벼우면 MOI가 낮아 공에 더 많은 에너지가 전달되어 충돌 효율이 낮고 EV가 낮아진다. 배트가 무거울 때는 그 반대이다. 다만 여기서 MOI가 스윙 속도에도 영향을 준다는 점도 고려하여야 한다. MOI가 높을수록 배트 스윙 속도가 떨어지고 낮을 때는 그 반대이다. 그래서 두 효과 중 어느 쪽이 더 큰 영향을 미치는지 따져볼 필요가 있다. 익명의 출처를 통해 특정 메이저리그 타자가 사용한 일반 배트와 어뢰 배트의 정보를 얻어 MOI를 계산해볼 수 있었는데, 두 배트가 동일한 결과가 나왔기에 스윙 속도나 배트 민첩성, 반동 계수 면에서 동일하다고 보았다. 따라서 출구 속도에 기여할 수 있는 요인은 BBCOR일 것으로 예상하였다.

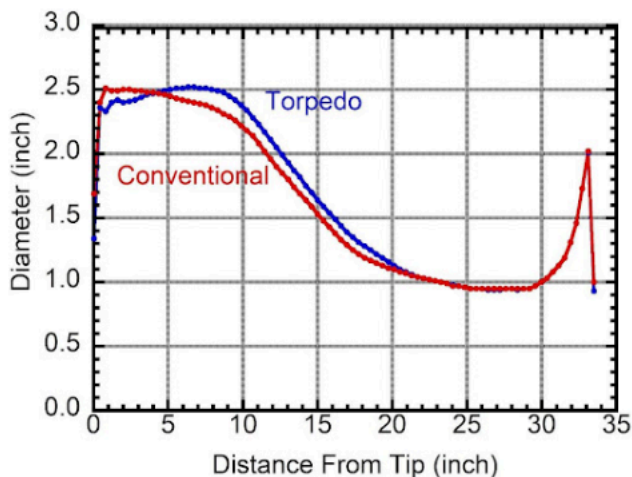


그림 1: 연구에 사용된 배트의 직경 프로파일.

실물 배트가 없기에 두 배트의 굽힘 강성은 동일하다고 가정하였고, 배트 프로파일, 밀도까지 고정된 상태로 충돌 효율을 계산할 수 있다. EV를 결정하기 위해 투구 속도를 86mph(138.4kph)로 가정하였고, 스윙 속도에 관련해 실험 데이터에 근거하여 배트가 손잡이 끝부분에서 2.5인치 떨어진 배트 축 상의 한 점을 중심으로 회전한다고 가정하였다.

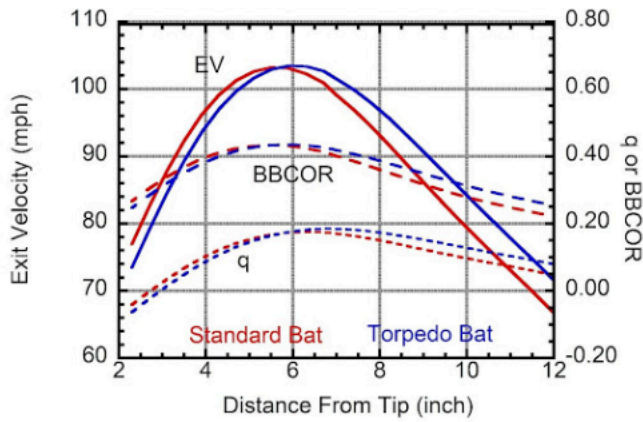


그림 2: 충격 위치에 따른 출구 속도 EV, 충돌 효율 q, BBCOR. 빨간색과 파란색 곡선은 각각 표준 배트와 어뢰 배트를 나타냄.

## 시뮬레이션 결론

**최대 타구 속도:** 두 배트가 비슷함.

**상대적 성능:** 어뢰 배트는 표준 배트와 비교했을 때, 배트 끝부분에 갈수록 성능이 떨어지지만 손잡이에 가까울수록 성능이 더 좋음, 손잡이 쪽에서 얻는 이득이 끝부분에서의 손실을 훨씬 능가함.

**스위트 스팟의 폭:** 연구에서 임의로 '타구 속도 100mph(160.934kph)를 넘는 구간'으로 정의한 스위트 스팟의 폭은 어뢰 배트가 더 넓음.

**BBCOR(볼-배트 복원계수), q(충돌 효율):** EV와 BBCOR 모두 스위트 스팟에서 정점을 찍으며, 진동 에너지 또한 최소화되는 지점임. q는 스위트 스팟에서 손잡이 쪽으로 약 1인치 떨어진 곳에서 정점을 찍음.

**질량 분포의 중요성:** 두 배트의 강성이 동일하다고 가정했을 때, BBCOR의 차이를 만드는 진동 특성의 차이는 질량 분포의 차이에서 기인한 것이 분명함. 어뢰 배트의 강성을 조정하여 진동 주파수를 일반 배트와 동일하게 맞춘 별도의 계산도 수행해 보았으나, 결과는 거의 변하지 않았음

### • 종합-

구분	표준 배트 (Standard)	어뢰 배트 (Torpedo)
외형	끝으로 갈수록 굵어짐	스위트 스팟이 가장 굵음
최대 EV	약 100~105 mph	비슷함 (약간의 차이)
스위트 스팟 폭	상대적으로 좁음	현저히 넓음 (안쪽 타구 보완)
에너지 손실	진동으로 인한 손실 발생	질량 분포를 조정하여 손실 감소

- 어뢰 배트는 배트 끝 부분에서 표준 배트에 비해 약한 성능을 보이지만, 손잡이 쪽에서 얻는 이득이 그 손실을 상회함.
- 그래프에서 볼 수 있듯이 어뢰 배트가 표준 배트에 비해 타구속도 100mph(160.934kph)를 넘는 구간(스위트 스팟)의 면적이 넓음.
- 질량이 어디에 분포하느냐에 따라 진동 에너지가 제어되고, 더 효율적인 에너지 전달이 가능해진다는 것을 시뮬레이션으로 확인함.

## 3. 어뢰배트 사용 사례 분석

분석 대상

- Elly De La Cruz(엘리 데 라 크루즈), 신시내티 레즈
- Anthony Volpe(앤서니 볼피), 뉴욕 양키스

선수 선택 이유: 앤서니 볼피는 컨택 및 기술형의 타자, 엘리 데 라 크루즈는 파워 및 피지컬형의 타자로 2025시즌 MLB에서 어뢰 배트를 사용한 대표적인 타자들임.

두 타자들이 2025 시즌 내내 어뢰 배트를 사용하였음을 가정하고 분석을 진행하였음.

pybaseball 라이브러리를 이용해 2024시즌과 2025시즌의 MLB statcast 데이터를 수집하여 비교 분석함.

## 물리적 지표 분석

--- 선수별/배트별 평균 물리 지표 ---

		bat_speed	launch_speed
Elly	Standard	74.050665	84.035303
	Torpedo	72.932372	84.453080
Volpe	Standard	68.309804	82.052528
	Torpedo	71.436444	84.310214

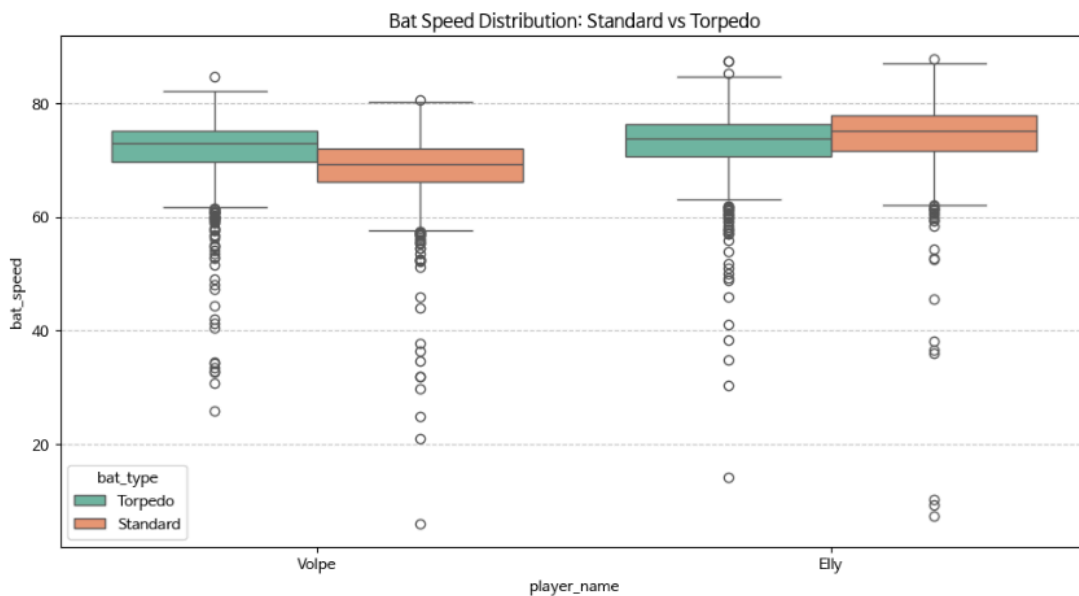
물리적 지표인 배트 스피드, 타구 속도를 수집한 결과, 엘리의 경우, 어뢰 배트를 사용하였을 때 배트 스피드는 감소하였지만 타구 속도는 증가하였음을 알 수 있음. 볼피의 경우, 배트 스피드와 타구 속도가 모두 증가하였음을 알 수 있음.

#### === Volpe 물리적 지표 분석 결과 ===

[bat\_speed] 68.31 -> 71.44 (상승) | p-value: 0.0000 (유의미함)  
 [launch\_speed] 82.05 -> 84.31 (상승) | p-value: 0.0009 (유의미함)  
 [swing\_efficiency] 1.21 -> 1.19 (감소) | p-value: 0.0266 (유의미함)

#### === Elly 물리적 지표 분석 결과 ===

[bat\_speed] 74.05 -> 72.93 (감소) | p-value: 0.0017 (유의미함)  
 [launch\_speed] 84.04 -> 84.45 (상승) | p-value: 0.6134 (유의미하지 않음)  
 [swing\_efficiency] 1.14 -> 1.16 (상승) | p-value: 0.0553 (유의미하지 않음)



본 분석에서는 배트 스피드와 타구 속도 데이터를 활용해, 타구 속도를 배트 스피드로 나눈 값을 산출하였다.

이 지표는 동일한 스윙 속도 대비 얼마나 빠른 타구를 만들어냈는지를 보여주며, 정타 여부 및 스윙 효율성의 척도로 해석할 수 있다.

어뢰 배트 사용 전·후의 변화를 검증하기 위해 배트 스피드, 타구 속도, 스윙 효율성 각각에 대해 유의수준 5% 기준의 t-검정을 수행하였다.

#### 결과 요약

- 앤서니 볼피의 경우 배트 스피드, 타구 속도, 스윙 효율성 모두에서 p-value가 0.05보다 작게 나타남. 이는 어뢰 배트가 세 지표 모두에 통계적으로 유의미한 상승 효과를 미쳤음을 의미함
- 엘리 데 라 크루즈의 경우 어뢰 배트 사용 이후 배트 스피드가 감소 해당 변화의 p-value는 0.0017로, 배트 스피드 감소는 통계적으로 유의미함. 반면 타구 속도와 스윙 효율성은 상승했으나 p-value가 0.05를 초과하여 어뢰 배트가 이 두 지표에 유의미한 영향을 미쳤다고 보기는 어려움

볼피는 어뢰 배트 사용 이후 모든 물리적 지표에서 유의미한 상승을 보였음. 이를 통해 볼피는 어뢰 배트를 통해 **순수 파워를 보강하고, 장타 생산력을 실질적으로 개선했다고** 해석할 수 있음.

반면 엘리는 배트 스피드는 감소했지만, 타구 속도와 스윙 효율성은 상승하는 경향을 보였음. 이는 **더 적은 힘으로도 효율적인 타구를 만들어냈다는** 의미로 해석할 수 있으며, 이미 충분한 파워를 갖춘 타자의 경우 어뢰 배트가 스피드 손실을 최소화하는 선에서 **타구의 질을 안정화시키는 역할**을 했다고 볼 수 있.

## 기술적 지표 분석

타구 속도와 발사 각도를 조합하여 타구의 질을 1~6단계로 분류한 값을 launch\_speed\_angle, xBA, 투구 결과, 타석 결과의 데이터를 수집하였으며, 어뢰 배트가 타자의 정교함과 생산성에 미친 영향을 입증하기 위해 기술적 지표를 분석하였음.

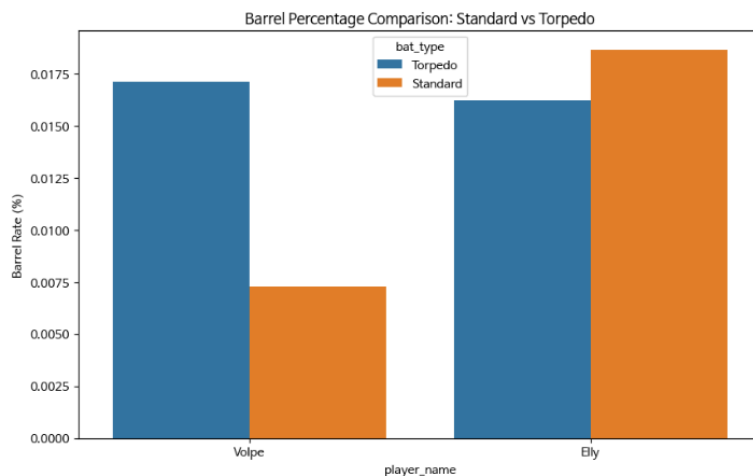
수집한 데이터를 바탕으로 배럴 타구 여부(is\_barrel), 헛스윙 여부(is\_whiff), 스윙 여부(is\_swing) 지표를 생성하였음. 각각의 지표는 launch\_speed\_angle이 6인 경우, 투구 결과 항목 중 swinging\_strike, foul\_tip 등 헛스윙한 경우, 타자가 방망이를 휘두른 모든 경우를 추출하여 생성함.

=== Volpe 기술적 지표 분석 결과 ===

[헛스윙률] 22.8% -> 25.3% | 변화: 2.5%p  
[배럴비율] 2.2% -> 5.5% | 변화: 3.3%p  
[기대타율] 0.316 -> 0.308 | 변화: -0.007

=== Elly 기술적 지표 분석 결과 ===

[헛스윙률] 33.7% -> 31.7% | 변화: -1.9%p  
[배럴비율] 7.3% -> 5.8% | 변화: -1.5%p  
[기대타율] 0.354 -> 0.337 | 변화: -0.017

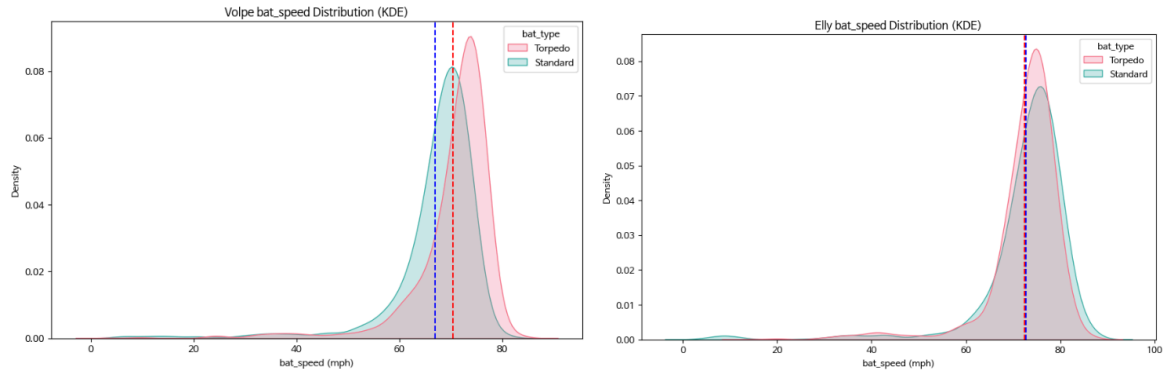


## 결과 요약

볼피의 경우 헛스윙률과 배럴 비율이 **모두 상승**하였음. 이는 물리적 지표에서 확인된 배트 스피드 및 타구 속도의 향상이 실제로 안타·홈런 확률이 가장 높은 **배럴 타구 생산**으로 이어졌음을 의미함. 헛스윙률 상승은 스윙 스피드를 끌어올리는 과정에서 발생한 일시적인 컨택 저하로 해석할 수 있음. 공격적인 스윙 메커니즘으로의 전환 과정에서 동반될 수 있는 자연스러운 현상으로 볼 수 있음.

엘리의 경우 헛스윙률과 배럴 비율이 **모두 감소**하였음. 헛스윙률 감소를 통해 물리적 지표 분석에서 나타난 배트 스피드 감소가 실제 컨택 정확도 향상으로 이어졌음을 확인할 수 있음. 배럴 비율 감소는 기대 타율 변화와 함께 해석할 때, 장타 지향적 타구보다는 타구의 기복을 줄이고 일관성을 확보하는 과정으로 볼 수 있음. 즉, 엘리는 어뢰 배트를 통해 폭발력보다는 **타구의 안정성**을 선택한 유형으로 해석 가능함.

## 커널 밀도 추정 그래프

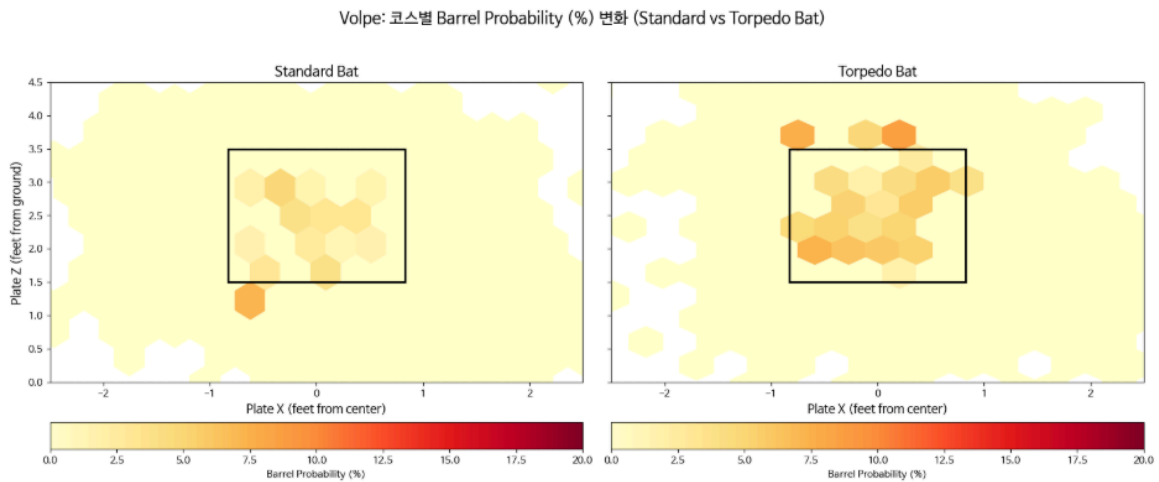


정타 비율의 분포 변화를 시각화하기 위하여 커널 밀도 추정 그래프를 생성함.

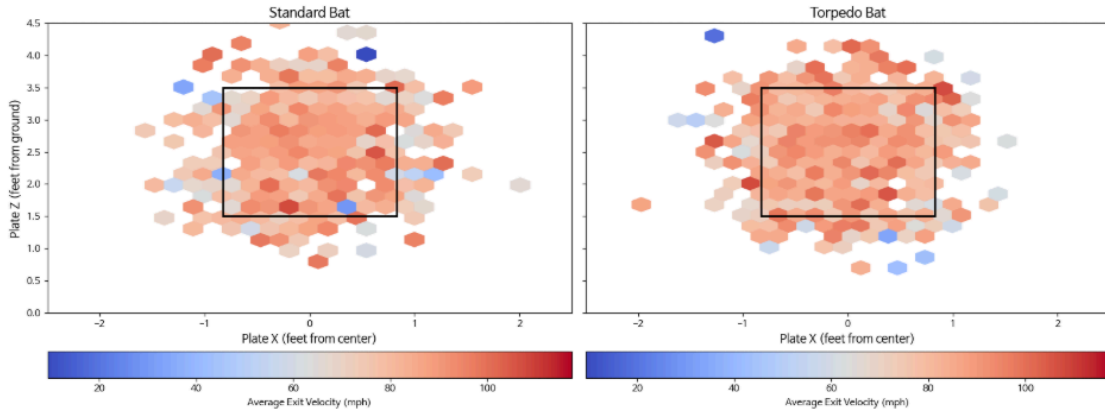
볼피의 경우 분포의 정점이 오른쪽으로 이동하였으며, 좁고 높게 형성되었음을 알 수 있음. 이를 통해 어뢰 배트를 사용하였을 때 스윙 속도가 상향 평준화되었으며, 평균적으로 더 빠른 스윙을 하게 되었고, 일관적으로 빠른 스윙을 하게 되었음을 알 수 있음.

엘리의 경우 분포의 정점이 왼쪽으로 이동하였지만, 좁고 높게 그래프가 형성되었고, 평균을 나타내는 점선이 거의 일치하는 모습을 볼 수 있음. 이는 어뢰 배트 사용 이후 엘리가 빠른 스윙 스피드를 손실 없이 거의 그대로 유지하고 있으며, 더 일관적으로 빠른 스윙을 하게 되었음을 알 수 있음.

## 히트맵



Elly: 코스별 Average Exit Velocity (mph) 변화 (Standard vs Torpedo Bat)



물리적, 기술적 지표를 분석하였을 때 볼피는 어뢰 배트 사용 후 타격의 질적 가치가 크게 변화였으므로 배럴 타구 비율에 초점 맞추어 히트맵을 그렸으며, 엘리는 배트 스피드가 감소하였지만 타구 속도는 소폭 상승하였으므로 이에 집중하여 타구 속도에 초점 맞추어 히트맵을 그림.

히트맵을 통해 볼피의 경우 기존 배트 사용 시에는 스트라이크 존 중앙 부근에 분포하던 배럴 타구 확률이, 어뢰 배트 사용 후 존의 중앙부터 상단까지 높은 확률을 가지게 되었음을 알 수 있음. 기존에는 거의 공략하지 못했던 스트라이크 존 상단 경계선 부근에서도 배럴 타구가 발생하기 시작했음을 볼 수 있는데 이는 어뢰 배트의 반발력이 볼피에게 높은 코스의 공을 장타로 연결할 수 있는 물리적 힘을 제공했음을 시사함.

엘리의 경우 기존 배트 사용 시에는 존 하단이나 외곽에서 파란색(낮은 속도) 육각형이 간헐적으로 보였으나, 어뢰 배트 사용 후에는 존 전반에 걸쳐 붉은색 계열(높은 속도)의 분포가 더 촘촘하고 균일해졌음을 볼 수 있음. 특히 존 중앙을 기준으로 좌우 외곽 코스에서도 타구 속도가 떨어지지 않고 유지되는 모습이 관찰되며, 이는 어뢰 배트의 설계가 빗맞은 타구에서도 일정한 타구 속도를 유지해 주는 스윙 스팟 확장 효과를 내고 있음을 보여줌. 배트 스피드가 감소했음에도 평균 타구 속도가 상승되었던 이유가 공간적 효율성 개선에 있음을 알 수 있음.

## 카이제곱 검정

### [ Volpe 통계적 유의성 검정 결과 ]

#### 1. 배럴 타구 비율 (Barrel %)

```
is_barrel  0  1
bat_type
Standard   1024  23
Torpedo    779  45
>> p-value: 0.0003
```

#### 2. 헛스윙률 (Whiff %)

```
is_whiff   0  1
bat_type
Standard   1117 330
Torpedo    896 304
>> p-value: 0.1413
```

### [ Elly 통계적 유의성 검정 결과 ]

#### 1. 배럴 타구 비율 (Barrel %)

```
is_barrel  0  1
bat_type
Standard   678  53
Torpedo    781  48
>> p-value: 0.2862
```

#### 2. 헛스윙률 (Whiff %)

```
is_whiff   0  1
bat_type
Standard   806 409
Torpedo    893 415
>> p-value: 0.3207
```

배트 유형에 따라 배럴타구, 헛스윙 빈도가 달라지는지 카이제곱 검정

귀무가설: 배트 종류, 배럴 발생 여부는 독립. 배트 종류, 헛스윙 여부는 독립.

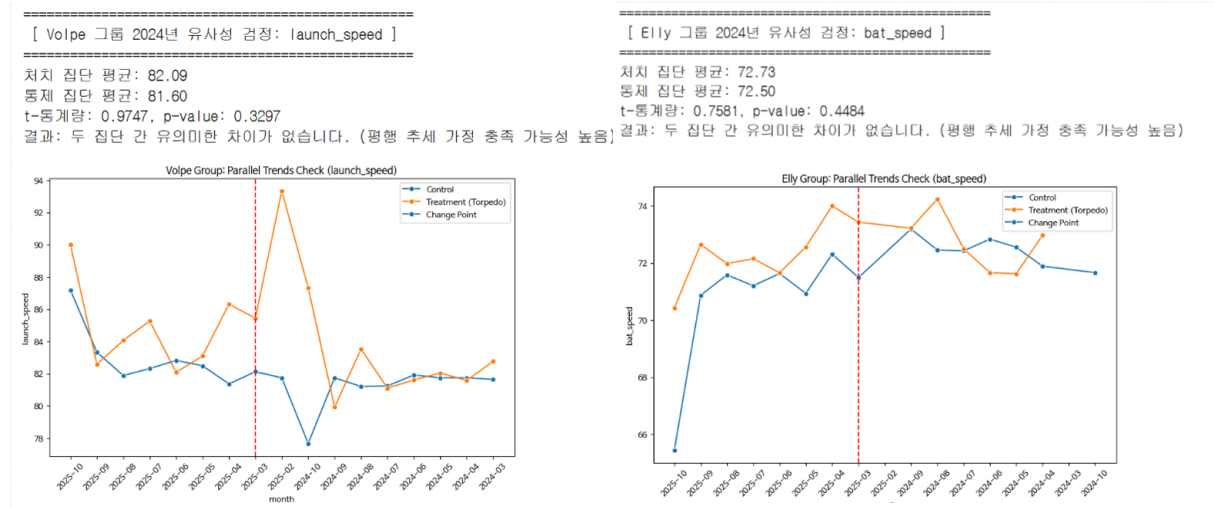
판단 기준: p-value<0.05 → 귀무가설 기각

## 이중차분법 회귀 모델

단순 전후 비교에서 발생할 수 있는 리그 전체의 환경적 요인을 배제하고, 어뢰 배트 도입에 따른 순수 인과 효과를 산출하기 위해 유사한 프로필을 가진 선수들을 통제군으로 설정한 이중차분법 회귀 모델을 적용

볼피 통제군 - Dansby Swanson(시카고 컵스), J.P. Crawford(시애틀 매리너스), Nico Hoerner(시카고 컵스), 김하성(애들랜트 브레이브스), Bryson Stott(필라델피아 필리스)

엘리 통제군 - Oneil Cruz(피츠버그 파이리츠), Bobby Witt Jr.(캔자스시티 로열스), C.J. Abrams(워싱턴 내셔널스), Corey Seager(텍사스 레인저스), Matt McLain(신시내티 레즈)



이중차분법의 핵심 전제 조건인 평행 추세 가정과 집단 간 유사성을 검증하기 위해 유의수준 5% 기준에서 t-검정을 수행함. 점선은 어뢰배트 도입 전후를 구분하고, t-검정은 2024 시즌 데이터만을 이용하여 수행하였음.

[ Volpe - launch_speed 전략적 DID 분석 ( $\alpha=0.1$ ) ]						
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
Intercept	82.1230	0.221	372.161	0.000	81.690	82.556
is_post	0.7563	0.310	2.437	0.015	0.148	1.364
is_treated	0.3546	0.473	0.750	0.453	-0.572	1.281
interaction	1.3613	0.702	1.938	0.053	-0.016	2.738

>>> 분석 결과 (유의수준 10.0% 기준):  
통계적 유의성 확보: 어뢰 배트는 launch\_speed를 1.36만큼 향상시켰습니다.

[ Elly - bat_speed 전략적 DID 분석 ( $\alpha=0.1$ ) ]						
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
Intercept	73.1255	0.102	717.626	0.000	72.926	73.325
is_post	-0.8311	0.138	-6.008	0.000	-1.102	-0.560
is_treated	0.7623	0.226	3.380	0.001	0.320	1.204
interaction	0.0920	0.310	0.296	0.767	-0.516	0.700

>>> 분석 결과 (유의수준 10.0% 기준):  
경향성 확인 중: p-value(0.7669)가 0.1를 초과하여 확정적 결론은 유보합니다.  
(단, 계수값 0.0920의 방향성은 참고 가능)

야구 데이터의 높은 변동성과 한정된 표본 수를 고려하고 전략적 유의성을 확보하기 위해 유의수준 10%를 기준으로 삼아 분석하였음.

## 분석결과

볼피(기술형 타자)

타구 속도+1.36mph (유의수준 10% 유의)

→ 어뢰 배트의 파워 보완 효과 확인

데라크루즈(파워형 타자)

배트 스피드 +0.09mph(유의하지 않음)

→ 성능 저하 없이 스윙 안정성 유지

## 결론

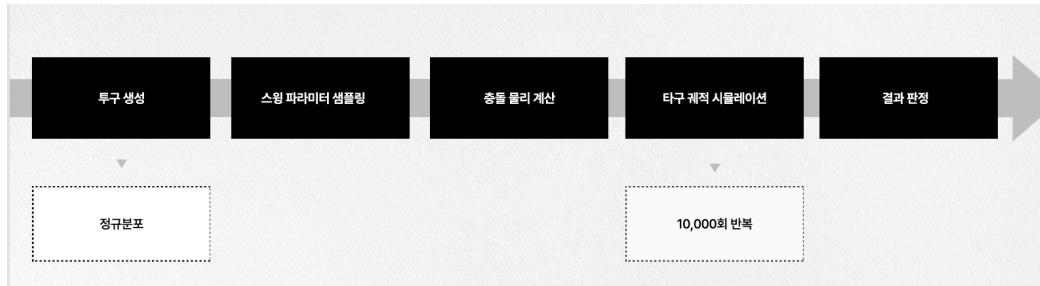
기술형 타자: 파워 향상

파워형 타자: 안정성 유지

## 4. 몬테카를로 시뮬레이션

몬테카를로 시뮬레이션의 흐름 한 눈에 보기





“리그 평균 구속 정도의 패스트볼이 한 가운데로 던져지는 상황”에서의 타격을 시뮬레이션 하고자 함.

- 각 선수들의 데이터는 23~25시즌 중 가장 잘했던 기록으로, 리그평균은 2025 KBO 타자 평균 채택
- 타구속도 및 발사각을 중심으로 시뮬레이션.
- 반발계수 등 수치 KBO 기준으로 고려

## 물리량 계산

### 1. 스윙 스피드 조정 (MOI 효과)

$$v_{\text{new}} = v_{\text{base}} \times (10,500 / \text{MOI}_{\text{bat}})^{0.28}$$

- 표준 배트 MOI:  $10,500 \text{ oz} \cdot \text{in}^2$
- 어뢰 배트 MOI:  $8,925 \text{ oz} \cdot \text{in}^2$  (약 15% 감소)
- 결과: 어뢰 배트 사용 시 스윙 스피드 약 4.7% 증가로 추정

### 2. 충돌 효율 함수 $q(z)$

배트 타입	스윙스팟 ( $z \leq 2"$ )	끝부분 ( $z > 2.5"$ )
표준	$q = 0.20 - 0.015z^2$	점진적 감소
어뢰	$q = 0.21 - 0.02z^2$	급격히 0.05로 감소

→ 어뢰 배트는 스윙스팟에서 더 효율적이지만, 끝부분은 "garbage zone"

### 3. 타구 속도 (Master Formula)

$$EV = q \times v_{\text{pitch}} + (1 + q) \times v_{\text{bat}}$$

배트 스피드 1mph 증가 → 타구 속도 약 1.2mph 증가함을 알 수 있음

### 4. 비거리 계산 (양력 포함)

코드에서 마그누스 효과(양력)를 반영한 궤적 시뮬레이션:

#### # 스핀량 추정 → 양력계수 계산

$$\text{spin\_rpm} = 500 + 70 \times \text{launch\_angle}$$

$$cl = \text{spin\_factor} / (1 + \text{spin\_factor})$$

#### # 운동방정식 (dt=0.01초 단위 적분)

$$a_x = -\text{drag} - \text{lift} \times (v_y/v)$$

$$a_y = -\text{gravity} - \text{drag} \times (v_y/v) + \text{lift} \times (v_x/v)$$

• --

#### ## 2. 몬테카를로 샘플링 구조

매 타석마다 다음 변수들을 확률분포에서 샘플링:

(실제 데이터에 따라 평균과 표준편차를 조금씩 다르게)

| 변수 | 분포 | 파라미터 |

|-----|-----|-----|

| 투구 속도 | 정규분포 |  $\mu=89.5\text{mph}$ ,  $\sigma=2.5$  |

| 하강각 | 정규분포 |  $\mu=-6.0^\circ$ ,  $\sigma=1.0$  |

| 배트 스피드 | 정규분포 | 선수별 base\_speed,  $\sigma=4.0$  |

| 어택 앵글 | 정규분포 | 선수별 mean,  $\sigma=5.0$  |

| 타격 오프셋 | 정규분포 |  $\mu=0$ ,  $\sigma=1.5 \times (1.1 - \text{contact\_accuracy})$  |

- 선수별 차이: 'contact\_accuracy'가 높을수록 분산이 작음 (정타 빈도↑)
- --

### ## 3. 결과 판정 로직 (발사각, 타구속도 위주로 판정)

...

발사각  $< 0^\circ$  (땅볼) → 타구속도에 따라 OUT/1B 확률 배분

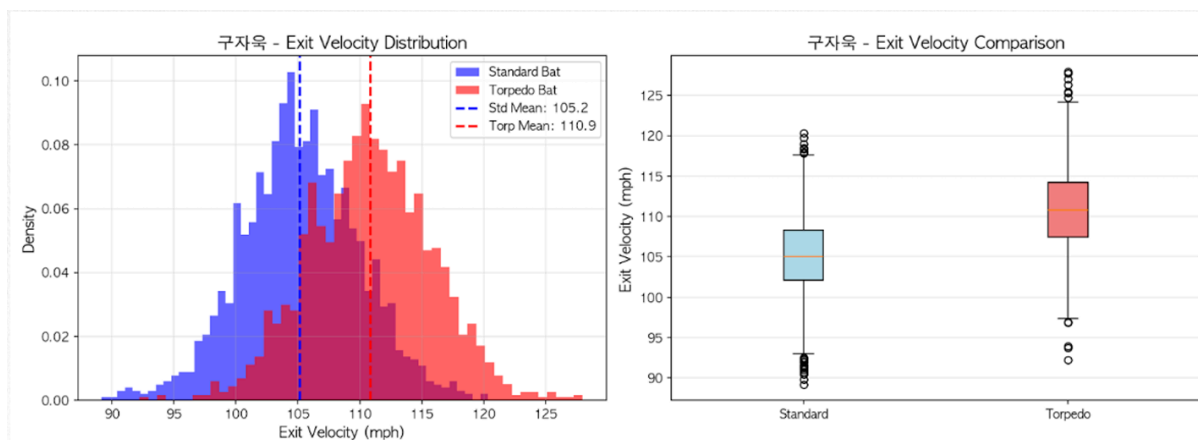
발사각  $0-10^\circ$  (라인드라이브) → 고속이면 안타 확률↑

발사각  $10-35^\circ$  (배럴존) → EV 98+ mph면 HR 확률 80%

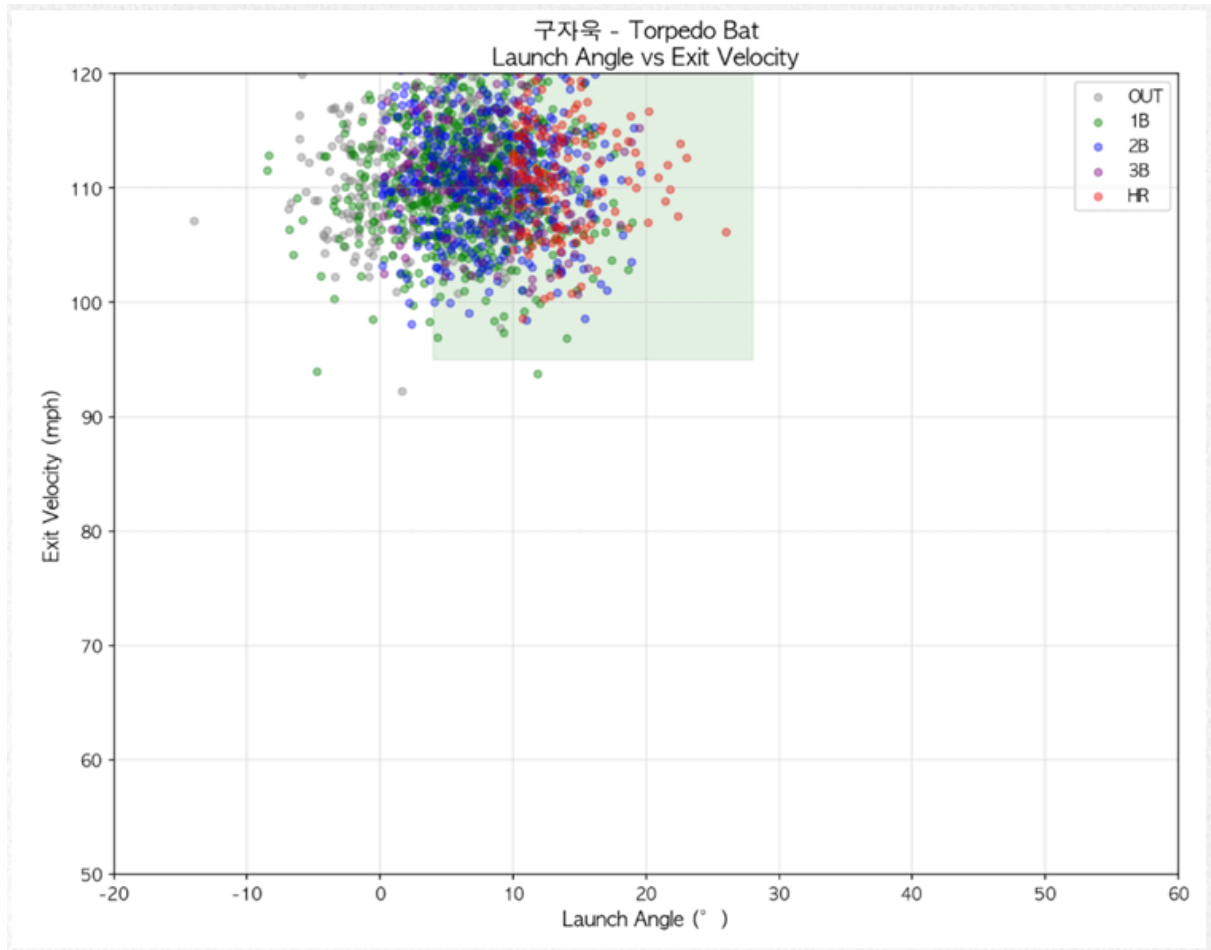
발사각  $35-50^\circ$  (플라이) → 대부분 OUT, EV 100+ 시 HR 10%

발사각  $> 50^\circ$  → OUT

### 시뮬레이션 시각화



파랑 = 일반 배트, 빨강 = 어뢰 배트, 변화하는 타구속도에 대한 분포의 시각화  
(다른 타자/평균도 분포가 유사함)



타구속도 & 발사각 시뮬레이션 시각화 (일부만 샘플링)  
 초록색 zone= 좋은 타격 (타구속도 높음 & 발사각 좋음)  
 Zone이 아니어도 안타는 생산되지만 주로 1루타 or Out

## 결과표

선수	팀	유형	표준_타율	어려_타율	타율_변화	표준_홈런	어려_홈런
김도영	KIA	gap	0.758	0.754	-0.004	144.000	157.000
노시환	한화	power	0.657	0.666	0.009	165.000	179.000
최형우	KIA	contact	0.701	0.754	0.053	46.000	73.000
구자욱	삼성	gap	0.758	0.771	0.013	119.000	135.000
손아섭	NC	contact	0.634	0.695	0.061	3.000	5.000
양의지	두산	gap	0.720	0.749	0.029	49.000	66.000
홍창기	LG	contact	0.577	0.608	0.031	0.000	0.000
신민재	LG	contact	0.389	0.440	0.051	0.000	0.000
박찬호	KIA	gap	0.678	0.720	0.042	22.000	32.000
안현민	KT	power	0.552	0.576	0.024	151.000	172.000
선수	팀	유형	표준_타율	어려_타율	타율_변화	표준_홈런	어려_홈런
김성윤	삼성	contact	0.693	0.734	0.041	34.000	53.000
김주원	NC	power	0.589	0.639	0.050	172.000	230.000
리그평균	KBO	-	0.623	0.649	0.026	65.000	87.000
전체평균	-	-	0.641	0.673	0.033	74.615	91.462
중앙값	-	-	0.657	0.695	0.031	49.000	73.000

- 홈런의 경우 숫자가 너무 커져서, 적당히 비교하기 쉬운 수치로 scaling(600타석 기준)
- 김주원의 경우, 수치상 발사각 + 배트스피드가 모두 높아 지나치게 결과가 좋게 나온 것으로 추정

#### • 전체 요약

지표	평균 변화
타율	<b>+0.033</b>
홈런 (600타석 기준)	<b>+16.4개</b>
OPS	<b>+0.162</b>
타구속도	<b>+5.5mph</b>

→ 어뢰 배트는 타구속도, 발사각만 보면 **모든 타자에게 긍정적** 효과 (김도영만 타율 -0.004로 미미한 손해)

## 상세분석

### 인사이트 1: 유형별 수해 패턴이 다르다

유형	타율 변화	홈런 변화	OPS 변화	해석
<b>Contact</b>	<b>+0.047</b>	+9.6	+0.189	타율↑, OPS↑ (가장 큰 타율 향상)
<b>Power</b>	+0.028	<b>+31.0</b>	+0.185	홈런 폭발적 증가
<b>Gap</b>	+0.020	+14.0	+0.110	상대적으로 수해 적음

#### • 왜 이런 차이가 발생할까?

##### Contact 타자 (최형우, 손아섭, 김성윤 등)

- 원래 contact\_accuracy가 높음 (0.80~0.90)
- 어뢰 배트의 **넓어진 스위트스팟**으로 정타 빈도 더욱 상승
- 기존에 담장 앞에서 잡히던 타구가 홈런으로 전환

##### Power 타자 (김주원, 안현민, 노시환)

- 이미 강한 스윙 → 스윙스피드 4.7% 증가가 **타구속도에 직결**
- 홈런 개수 증가가 압도적 (+31개 평균)
- 단, 노시환처럼 애초에 배트스피드가 빠르던 타자는 상대적 수해 적음

##### Gap 타자 (김도영, 구자욱)

- 이미 높은 배트 컨트롤 + 적절한 파워 보유
- 변화폭이 상대적으로 작음

### 인사이트2: 예상 최대 수해자

#### 1. 최형우 (KIA, Contact) - OPS +0.265, 홈런 +27개

특징: 낮은 배트스피드 (68mph), 높은 contact\_accuracy(0.80)

베테랑 특유의 배트 스피드 저하를 MOI 감소로 보정

즉, "에이징 커브 완화" 효과 실현

정교한 타격 + 회복된 스피드 = 시너지

#### 2. 손아섭 (NC, Contact) - 타율 +0.061 (타율 변화 1위)

특징: 가장 낮은 배트스피드(66mph), 가장 높은 contact\_accuracy(0.88)

타구속도 증가가 라인드라이브 안타 증가로 이어짐

홈런은 거의 안 치지만 (3→5개), 안타 생산 능력 상승

## 5. 결론 및 한계

### 5.1. 결론

아직 규정 때문에 어뢰 배트가 도입되지 않은 KBO에서 향후 주요 타자들의 타격에 어떤 영향이 있을지 추정해봄. 타구속도와 발사각을 중심으로, 물리량들을 최대한 정밀하게 계산해 정교하게 변화가 드러나도록 시뮬레이션 했다는 것에 의의가 있음.

특히, 관성모멘트, 충돌효율 함수, 마그누스 효과 등 구기종목에 물리학적인 접근을 할 때 필요한 계산들을 최대한 정확히 구현하려고 한 것과, 코드를 작성할 때 각 변수에 대해 선수마다 다른 데이터를 기반으로 평균과 분산 등 파라미터를 가정한 점은 시뮬레이션 결과를 합리적으로 볼 수 있게 해주는 부분임. 결과도 어느 정도는 직관과 부합하도록 도출되었음.

### 5.2. 한계

실제 야구라는 종목의 특성상 변수가 많아 시뮬레이션이 어렵다는 것을 감안하더라도, 이번 시뮬레이션은 투수에 대한 내용은 제외된 채 타자의 '타구속도, 발사각'을 위주로 진행되어서 근본적인 한계가 어느 정도 존재함. 일례로 김주원 선수의 경우 데이터상 발사각이 좋고 배트스피드도 굉장히 빠르기 때문에, 시뮬레이션 결과만 보면 어뢰배트의 도입시 굉장히 큰 수혜를 입을 것으로 예상되는데 이러한 결과의 신뢰도에 대한 의문이 남음.

이러한 맥락에서 선수들의 타격폼, 스윙 등에 대한 자세한 데이터가 있었다면 더욱 정밀하고 합리적인 시뮬레이션이 가능했을 거라는 점에서 아쉬움이 있음. 어뢰배트가 도입되었던 MLB만 보더라도 비슷한 컨택 유형의 선수 사이에서도 적응과정에서의 사소한 차이가, 성적에서도 다양한 양상을 보임.