

공공 재활용 쓰레기통의 폐기물 분류 수준 최적화: 위치 및 시각적 가이드의 영향

Optimizing waste classification levels in public recycling bins: Impact of location and visual guide

최재원 박사 삼성전자
전덕빈 교수 KAIST경영대학
박성호 교수 서울대학교
박진환 박사 KISDI
신규용 대표 (주)그레이트퍼즐

Introduction

분리배출 인프라가 꼭 필요한 이유!

(가로변 쓰레기통 등)



• 공공 재활용 쓰레기통(가로변 쓰레기통)



- 공공 쓰레기통에 버려지는 재활용 자원들은 일반 폐기물과 같이 처리(소각/매립)됩니다.(이유 : 혼합배출)
- 쓰레기통 부족 등의 사유로 무단투기 되는 국내 재활용 자원(0.95억원)과 처리비(소각/매립)은 연간 약 1.2조원이 낭비되고 있고, 수거하기 위한 공공일자리 비용이 약 1조원 이상 비효율적으로 낭비되고 있습니다.

• 배출 단계에서의 폐기물 분류 수준



Hypotheses and Research Question

Experimental Design

- 실험 기간
2022년 9월 ~ 2022년 11월 (12주)
- 실험 장소
두 개의 야외 장소(L1, L2)에서 실험이 진행되었습니다.
두 장소는 약 400m 떨어져 있습니다.
- L1: 아파트 단지, 공원 시설, 카페 등으로 둘러싸인 지역
- L2: 상업 지구 입구에 위치하며, 지하철 인근의 카페/식당/편의점으로 둘러싸인 지역



경기도 시흥시 변화가(400m 구간)



• 주요 개입 사항

1. 위치 변경



2. 시각적 안내문 설치

- 실험 6주차에 각 분리수거함의 투입구에 폐기물 종류를 대표하는 이미지가 담긴 포스터를 부착
- 플라스틱 컵과 같이 배출되는 플라스틱 킵 홀더(종이)에 대한 시각적 안내문 부착



Methods

- 폐기물 수집 및 기록
- 주 2회 폐기물 수거
- 9가지 종류로 폐기물 분류함
- 일반 폐기물, 플라스틱, PET, 캔, 유리, 종이, 상자, 비닐, 담배꽂초(한국 기준)
- 액체 잔여물은 계량 과정 전에 제거되었습니다(Leeabai et al., 2021).
- 각 삽입 슬롯에 버려진 각 폐기물 카테고리, 개수와 무게를 측정함

- 통계 분석 방법
- 이 연구는 가설을 테스트하기 위해 로지스틱 회귀를 사용함
- 개별 폐기물 속성에 따라 폐기물 분리 동작이 어떻게 달라지는지 자세히 분석할 수 있습니다.
- 종이 슬리브에 대한 시각적 프롬프트 효과는
- Welch의 t-검정을 통해 조사되었습니다.

Results

• 예비 분석

Table. Descriptive Statistics of Variables used in the Study

Variable	Mean	St. dev.
Correctly disposed or not	0.718	0.450
Bin type		
Bin-2	0.168	0.374
Bin-4	0.221	0.415
Bin-6	0.290	0.454
Bin-8	0.321	0.467
Location		
L1	0.423	0.494
L2	0.577	0.494
Visual guide	0.531	0.499
Waste type		
Plastic	0.209	0.407
PET	0.041	0.197
Can	0.038	0.192
Glass	0.018	0.133
Paper	0.173	0.378
Carton	0.077	0.266
Vinyl	0.110	0.312
Cigar butt	0.077	0.267
General	0.258	0.437

• 폐기물 분리성능

Dependent Variable: 1 if correctly disposed, 0 if incorrectly disposed (COR _i)		
Model: Logistic Regression		
Independent Variables	Estimate	
Bin type	Baseline	
Bin-2	0.219***	
Bin-4	0.352***	
Bin-6	0.179**	
Bin-8	Baseline	
L1	-0.348***	
L2	0.129**	
Visual guide	Baseline	
Waste type	Baseline	
Plastic	-0.967***	
PET	0.609***	
Can	0.973***	
Glass	-1.371***	
Paper	-0.869***	
Carton	-0.195**	
Vinyl	0.371***	
Cigar butt	0.808***	
General	1.079***	
Intercept	-4.783.76	
Log-likelihood	9.595.53	
AIC	0.1055	
Pseudo R-squared	0.1055	
Number of Observation	8,995	

- 폐기물 분리 성능은 Bin-6이 가장 높았고 -4, -8, -2가 그 뒤를 이었습니다.
- 폐기물 분류 수준과 분리 성능 사이의 관계는 거꾸로 된 U자형을 보여줍니다.
- 분리 성능은 L1에 비해 L2에서 크게 감소하는 것으로 나타났습니다.
- 시각 가이드를 설치하면 폐기물 분리 행동이 강화되었습니다.
- 캔, 유리, 담배꽂초, 일반 폐기물의 분리는 플라스틱 폐기물에 비해 훨씬 효과적 이었지만, PET, 종이, 상자 폐기물은 덜 효과적으로 분리되었습니다.

• 폐기물 분리성능

Dependent Variable: 1 if correctly disposed, 0 if incorrectly disposed (COR _i)						
Model: Logistic Regression						
Independent Variables	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
Bin type × Location	Bin-2 × L2	Baseline				Baseline
	Bin-4 × L2	-0.273				-0.286*
	Bin-6 × L2	-0.014				0.025
	Bin-8 × L2	0.584***				0.578***
Bin type × Visual guide	Bin-2 × Visual guide	Baseline				Baseline
	Bin-4 × Visual guide	-0.107				-0.085
	Bin-6 × Visual guide	0.271*				0.230
	Bin-8 × Visual guide	-0.106				0.099
Location × Visual guide	L2 × Visual guide		-0.090			-0.158
Location × Waste type	L2 × Plastic			Baseline		Baseline
	L2 × PET			-0.248		-0.268
	L2 × Can			0.146		0.086
	L2 × Glass			-0.367		-0.477
	L2 × Paper			-0.274*		-0.268*
	L2 × Carton			-0.609***		-0.580***
	L2 × Vinyl			-0.437**		-0.480**
	L2 × Cigar butt			0.091		0.028
	L2 × General			-0.970***		-0.976***
Visual guide × Waste type	Visual guide × Plastic			Baseline		Baseline
	Visual guide × PET			0.190		0.128
	Visual guide × Can			-0.727**		-0.785**
	Visual guide × Glass			0.679		0.581
	Visual guide × Paper			0.065		-0.002
	Visual guide × Carton			0.162		0.042
	Visual guide × Vinyl			0.257		0.166
	Visual guide × Cigar butt			0.200		0.198
	Visual guide × General			0.130		-0.009
Bin type / Location / Visual guide / Waste type dummies				Yes		
Intercept	1.503***	1.081***	1.053***	0.892***	1.123***	0.938***
Log-likelihood	-4.762.89	-4.778.66	-4.783.40	-4.765.78	-4.778.20	-4.733.96
AIC	9.559.77	9.591.32	9.596.80	9.570.56	9.600.40	9.541.92
Pseudo R-squared	0.1094	0.1065	0.1056	0.1094	0.1066	0.1148
Number of Observation				8,995		

- ✓ 위치와 폐기물 유형 간에 유의미한 상호작용 효과가 관찰되었습니다.
- ✓ 종이, 상자, 비닐, 일반 폐기물을 포함한 폐기물 유형은 L1에서 L2로 위치가 변경됨에 따라 분리 성능 감소에 더 큰 취약성을 보이는 것으로 나타났습니다.
- ✓ 이 네 가지 폐기물 유형은 일반적으로 적절한 분리를 위해 상당한 노력과 시간 투자가 필요합니다.
- ✓ 종이, 상자, 비닐은 본질적으로 낮은 분리 성능을 보이는 재활용 폐기물 유형입니다.
- ✓ 일반 폐기물은 높은 분리 효율을 보이지만 폐기 과정이 재활용품과 달라 더 많은 시간과 노력이 필요합니다.
- ✓ 사람들은 종종 L2에서 폐기물을 처리할 수 있는 시간이 상대적으로 제한되어 이러한 폐기물을 분리할 때 더 많은 성능 저하를 초래합니다.

Economic Impact

- 단순화된 비용-편익 분석 : 각 쓰레기통 유형에서 발생하는 경제적 효과 비교
 - 혜택 : 재활용 가능 폐기물의 재활용 혜택만 고려되었습니다.
 - 비용 : 폐기물 분리와 관련된 직원 비용만 고려되었습니다.
- 이 연구에서는 재료 회수 시설(MRF)에서 수집된 폐기물을 처리하는 동안 발생하는 분리 비용을 추정하는 보다 정교한 방법을 제안합니다.
- 분리 비용은 재활용 폐기물의 분류율에 따라 결정됩니다.
- 분류율을 계산하는 기존의 방법은 폐기물의 총량만을 기준으로 합니다.
- kg/1인당 ·hr, kg/일 (캘리커버리 및 피어 컨설파트, 1993)
- 쓰레기통 사용자의 높은 분리 성능이 재활용 쓰레기 분류율에 미치는 긍정적인 영향을 고려하지 못함
- 우리는 MRF에서 분리 비용을 정확하게 계산하기 위해 정보 이론에서 일반적으로 사용되는 엔트로피 개념을 활용할 것을 제안합니다

$$Entropy = - \sum p_i \times \log_2 p_i$$

- 엔트로피는 각 쓰레기 봉투 내에서 다양한 유형의 폐기물이 혼합된 수준을 나타내는 척도로 사용됩니다.

• 분리 난이도 점수를 다음과 같이 정의했습니다:

$$Separation\ Difficulty\ Score = Entropy \times Number\ of\ waste$$

1. 쓰레기 봉투 안에 폐기물 혼합물이 다양할수록 폐기물을 분리하는 데 더 오랜 시간이 걸립니다
2. 쓰레기 봉투 내 폐기물의 양이 많을수록 폐기물을 분리하는 데 더 오랜 시간이 걸립니다

• Sub-Experiment

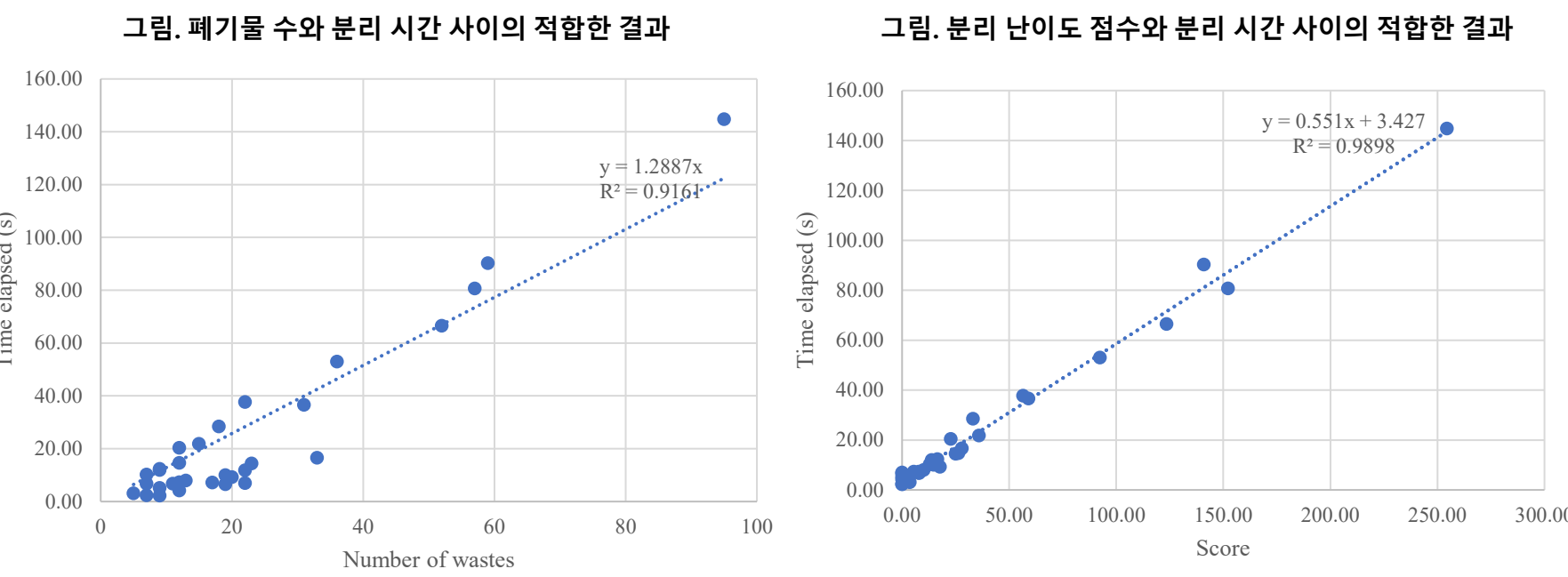
- 분리 비용 계산을 위해 폐기물 수 대신 난이도 점수를 사용하는 것에 대한 정당성을 확립하기 위해 노력합니다.
- 두 명의 참가자가 다양한 조건에서 쓰레기 봉투 내 폐기물을 분리하는 데 필요한 시간을 측정했습니다.
- 총 31회 실시
- 상관 계수가 0.9829로 두 참가자 간의 높은 수준의 평가자 간 신뢰도.
- 두 참가자가 측정한 평균 시간을 분리 시간으로 사용했습니다.
- 상관 계수 개선

	Between	Between	Improvement
Number of wastes & Separation time	Separation Difficulty Score & Separation time		
	0.9546	0.9949	4.22%

Table. Monetary Values generated by Bin type				
Bin type	Benefit	Cost	Net Benefit	NB Improvement (%)
Bin-2	9,590,330	1,223,200	8,367,130	Baseline
Bin-4	16,973,870	1,235,300	15,738,470	88.1
Bin-6	19,704,110	1,257,230	18,446,880	120.5
Bin-8	19,532,440	1,315,650	18,216,790	117.7

- 분석 결과, Bin-6이 가장 높은 순편익을 창출한 것으로 나타났습니다.
- 한국의 일반적으로 존재하는 공공 길거리 쓰레기통인 Bin-2와 비교했을 때, Bin-6은 +120.5%의 추가 금전적 가치를 창출했습니다.
- 이 연구는 폐기물 분리 성능과 금전적 가치 창출 관점 모두에서 Bin-6이 가장 이상적인 형태의 공공 재활용 쓰레기통임을 확인합니다.

• Fitted results by linear regression



- 그 결과 R제곱이 0.8654에서 0.9898로 크게 개선된 것으로 나타났습니다.
- 따라서 분리 난이도 점수가 분리 시간을 더 잘 나타내는 것을 확인했습니다.
- MRF에서 분리 비용을 계산할 때 이 척도를 사용하기로 결정했습니다

Conclusion

리투아니아 사례
(RVM 설치 & 보증금반환정책 시행 재활용률 변화)

2016

2017

2018

- 시민의식이 문제가 아니라 인프라 부재가 가장 큰 문제라는 뜻으로 해석이 가능함
- 또한, 리투아니아 사례와 같이 적응 기간이 있을 경우, BIN-6에 대한 성능보다 BIN-8과 같이 복잡한 분리배출 레벨과 직관적인 안내문이 부착된 분리수거함의 성능이 더 좋아 질 가능성이 있음(사례 : 일본 카미카스 마을 제로웨이스트 센터 48종 분류, 재활용률 80% ↑)