

예비분석과 기계학습을 이용하여 선별적으로 정확하게 정적 분석

허기홍

서울대학교

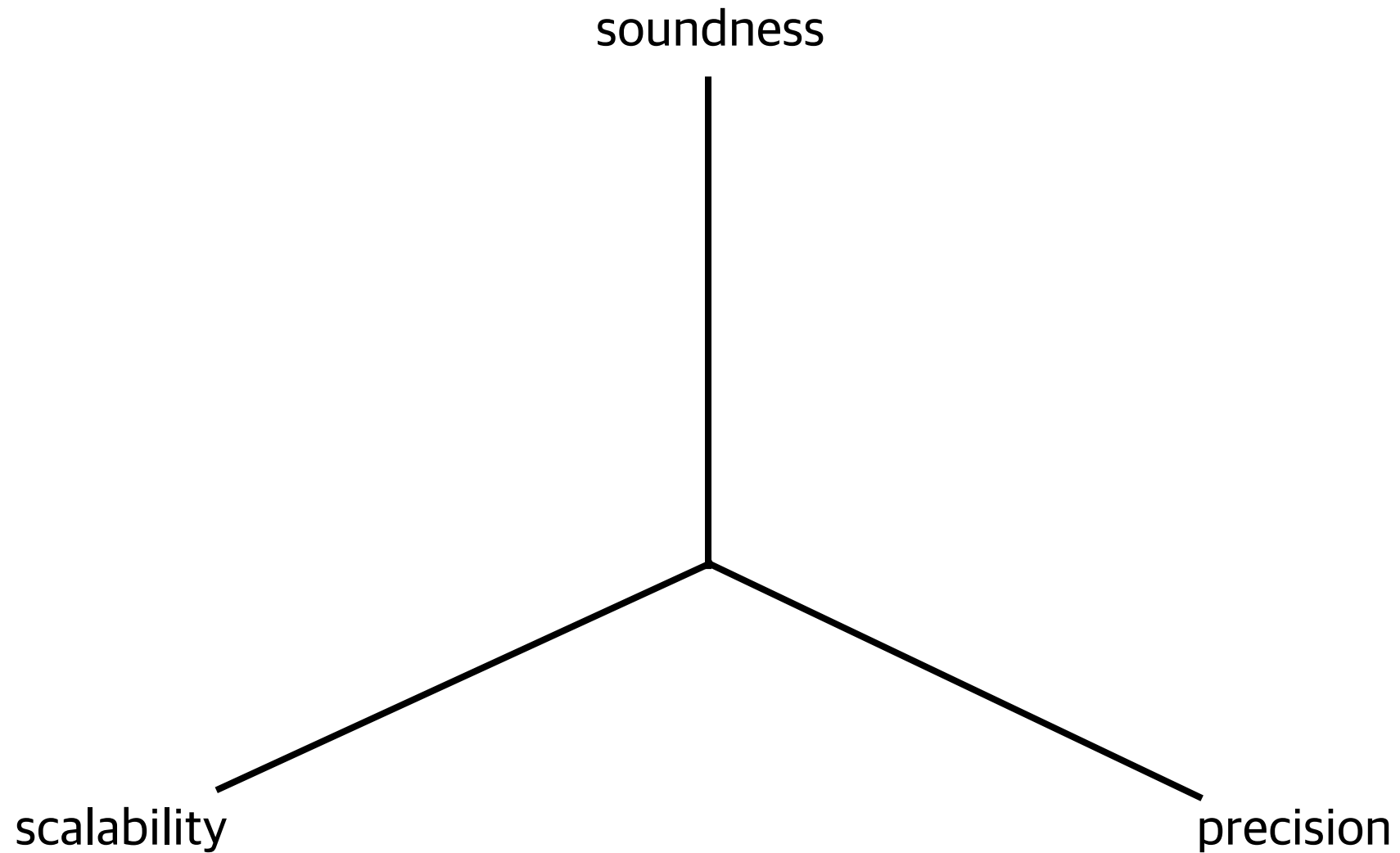
(오학주, 이원찬, 양홍석, 이광근)

2017. 2. 20 @ Codemind



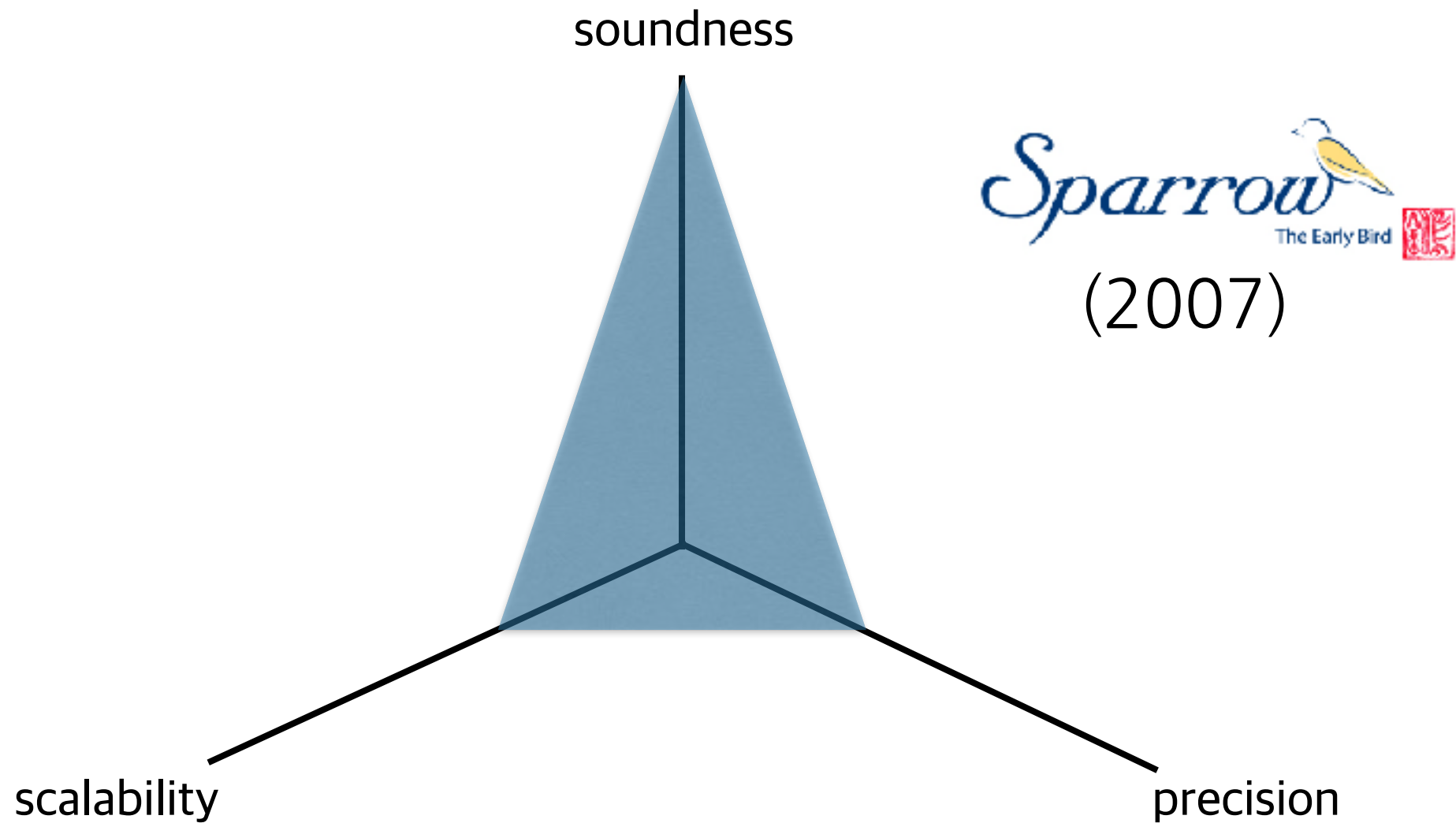
목표

- Sound, precise yet scalable static analysis



목표

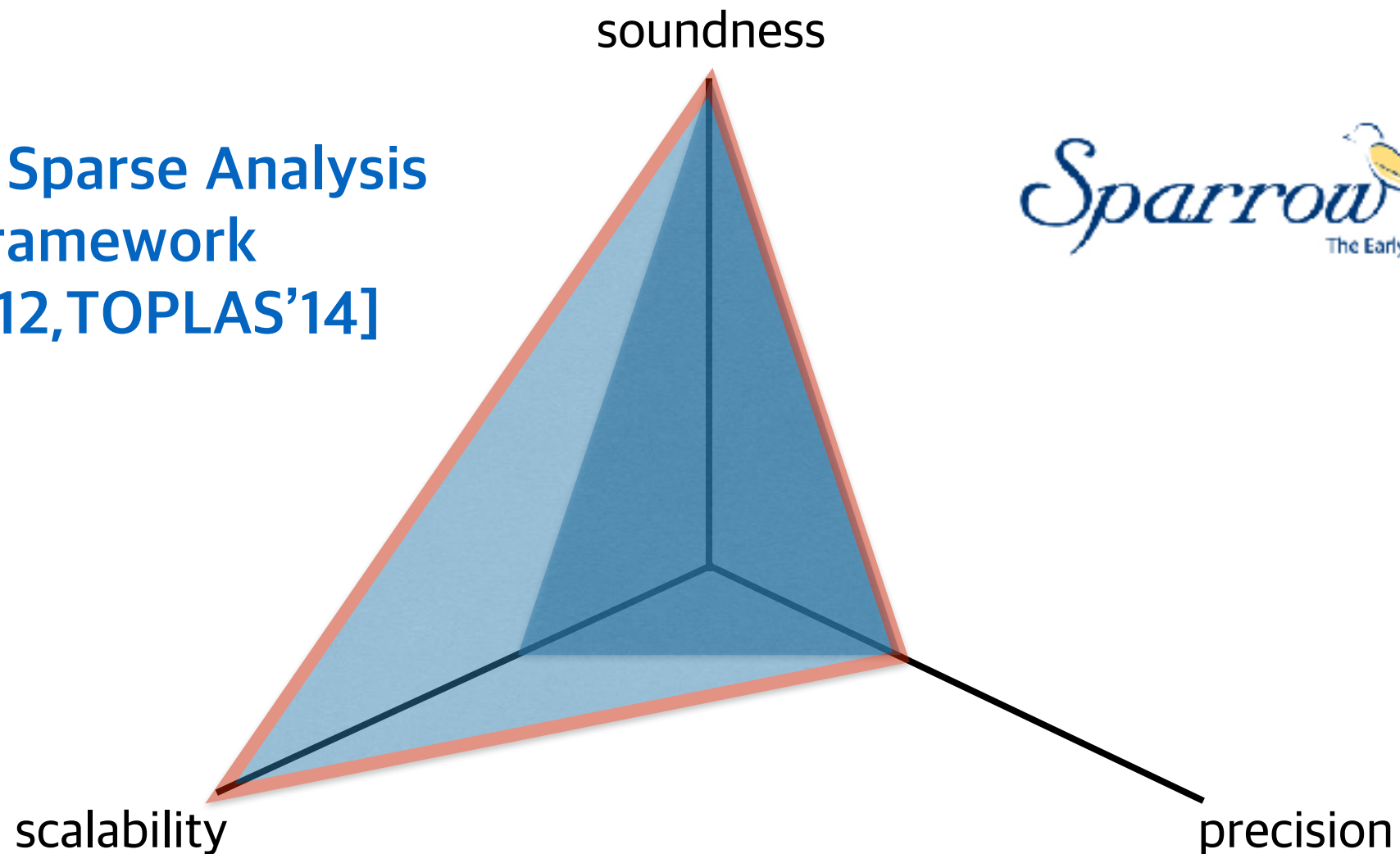
- Sound, precise yet scalable static analysis



목표

- Sound, precise yet scalable static analysis

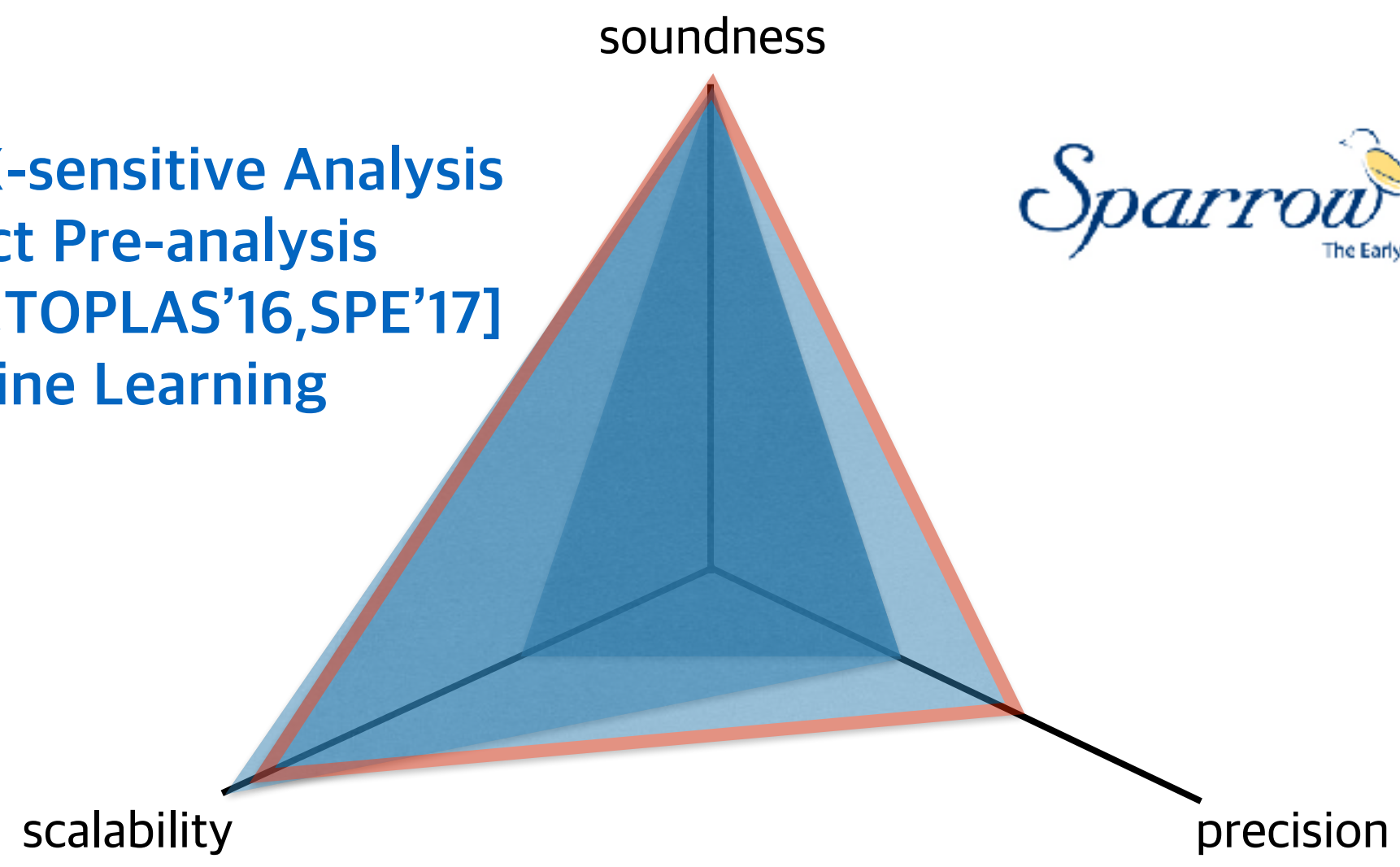
General Sparse Analysis
Framework
[PLDI'12, TOPLAS'14]



목표

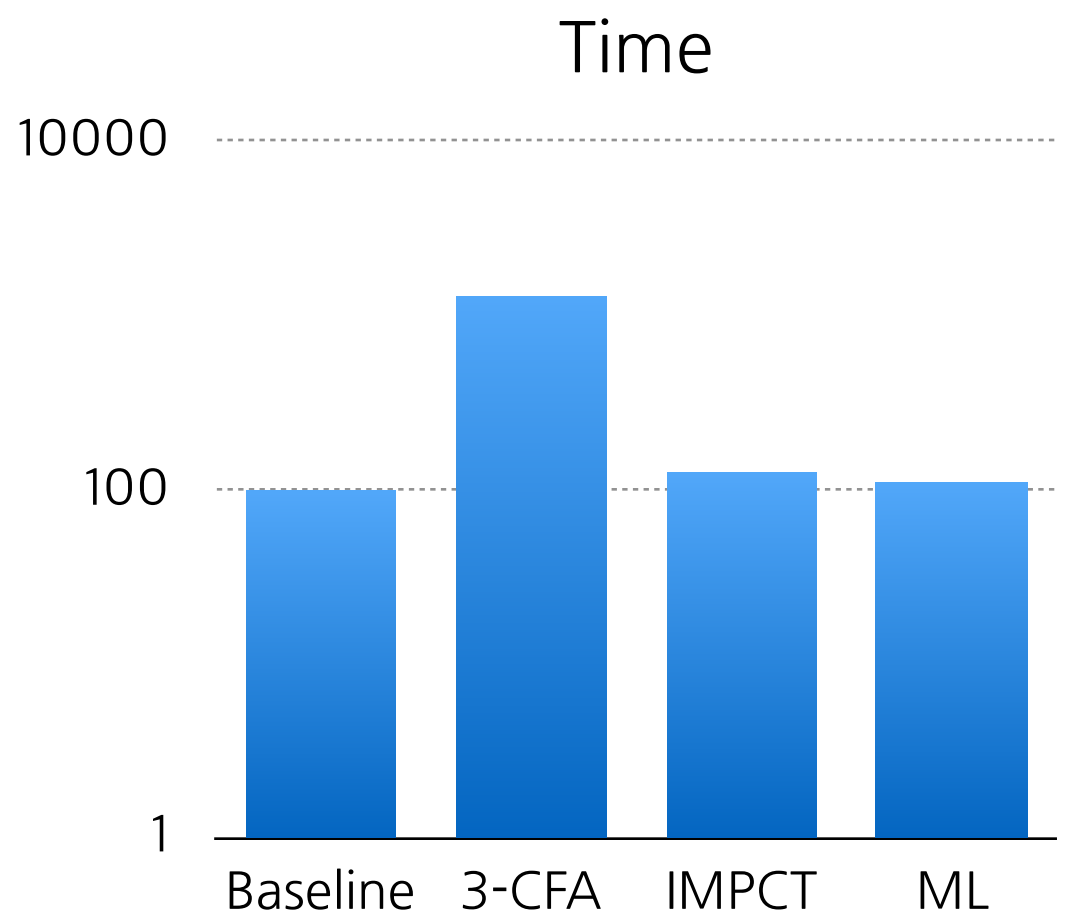
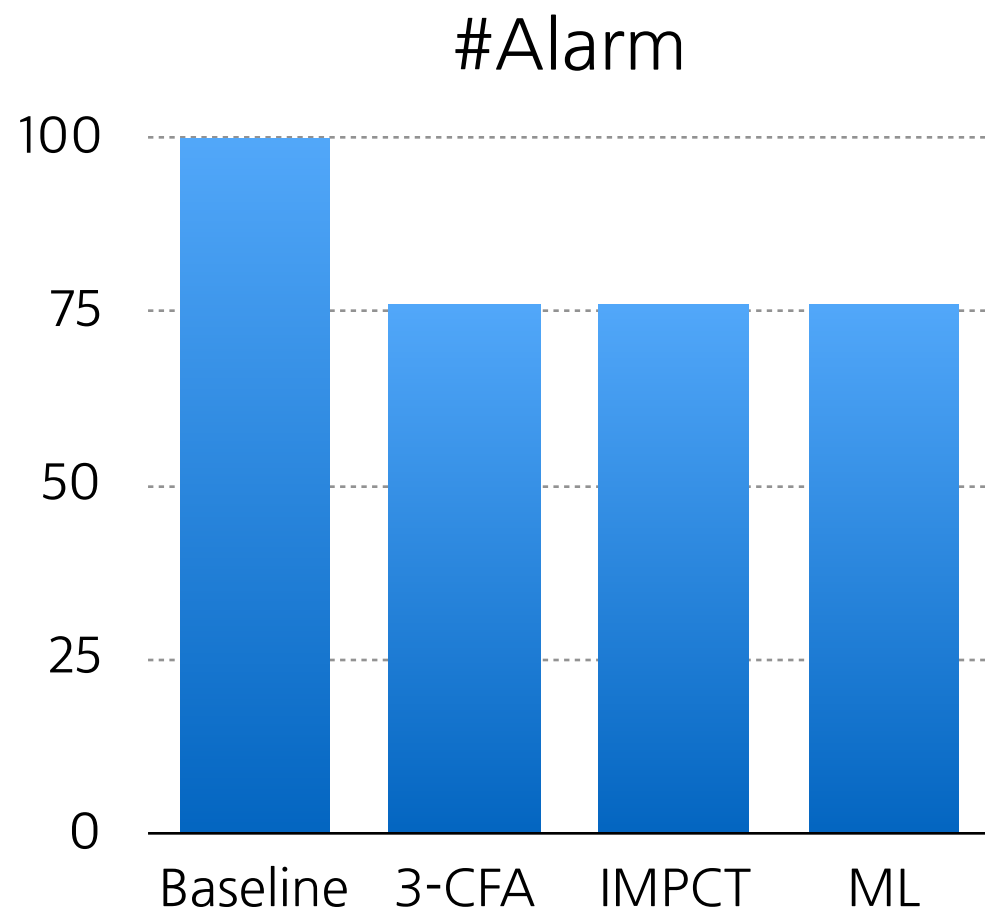
- Sound, precise yet scalable static analysis

- Selective X-sensitive Analysis**
- by Impact Pre-analysis
[PLDI'14, TOPLAS'16, SPE'17]
 - by Machine Learning
[SAS'16]



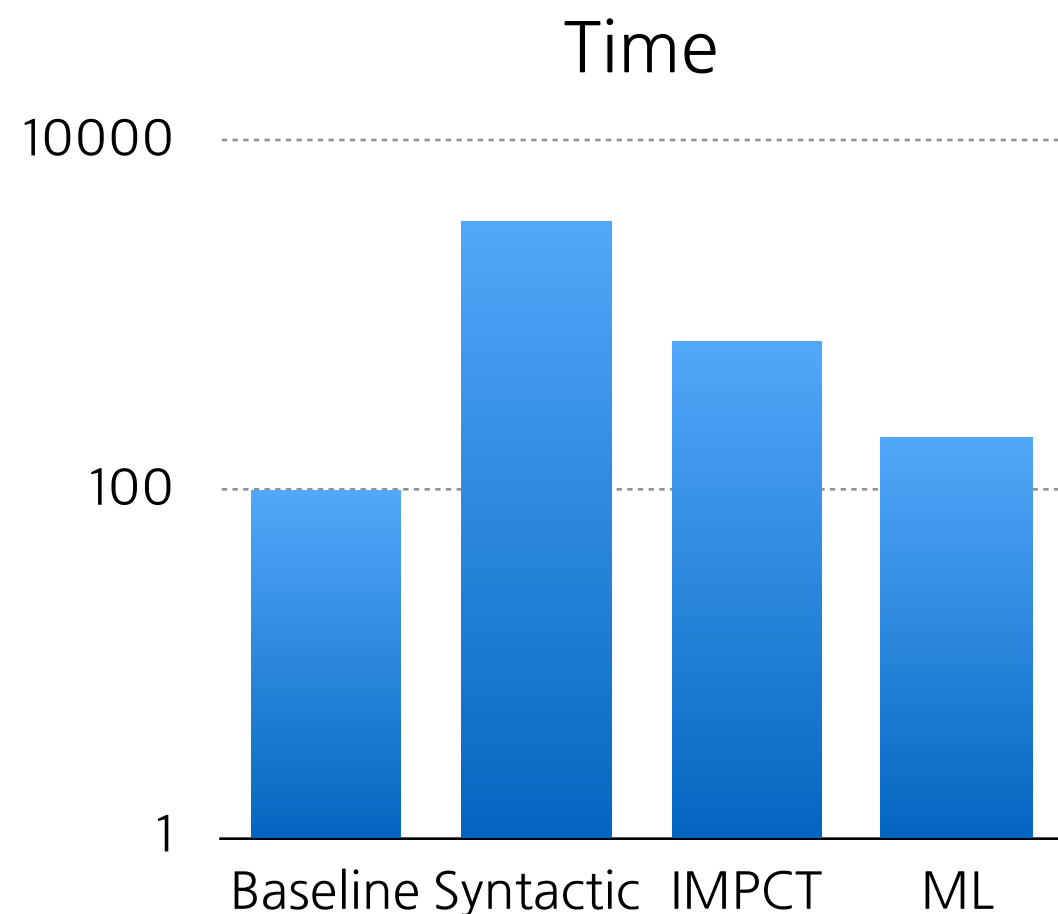
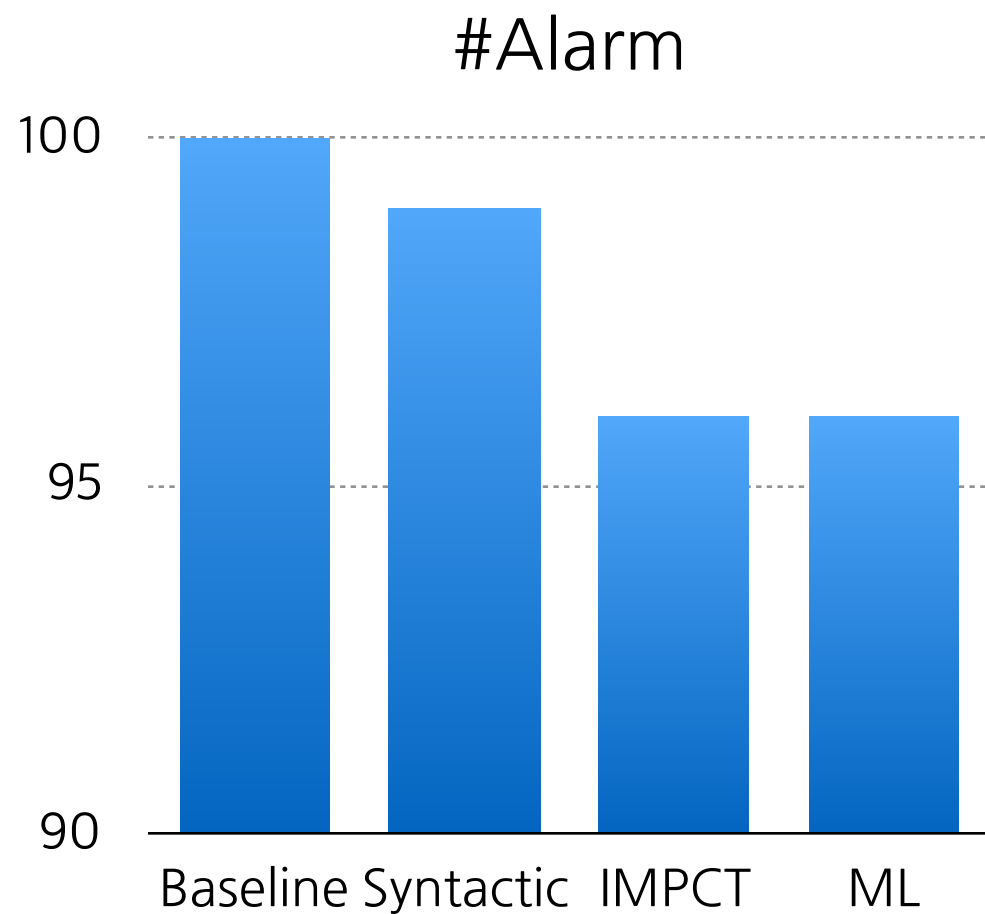
실험 결과

- 선별적으로 문맥을 구분하는 분석
(Selective Context-sensitive Analysis)



실험 결과

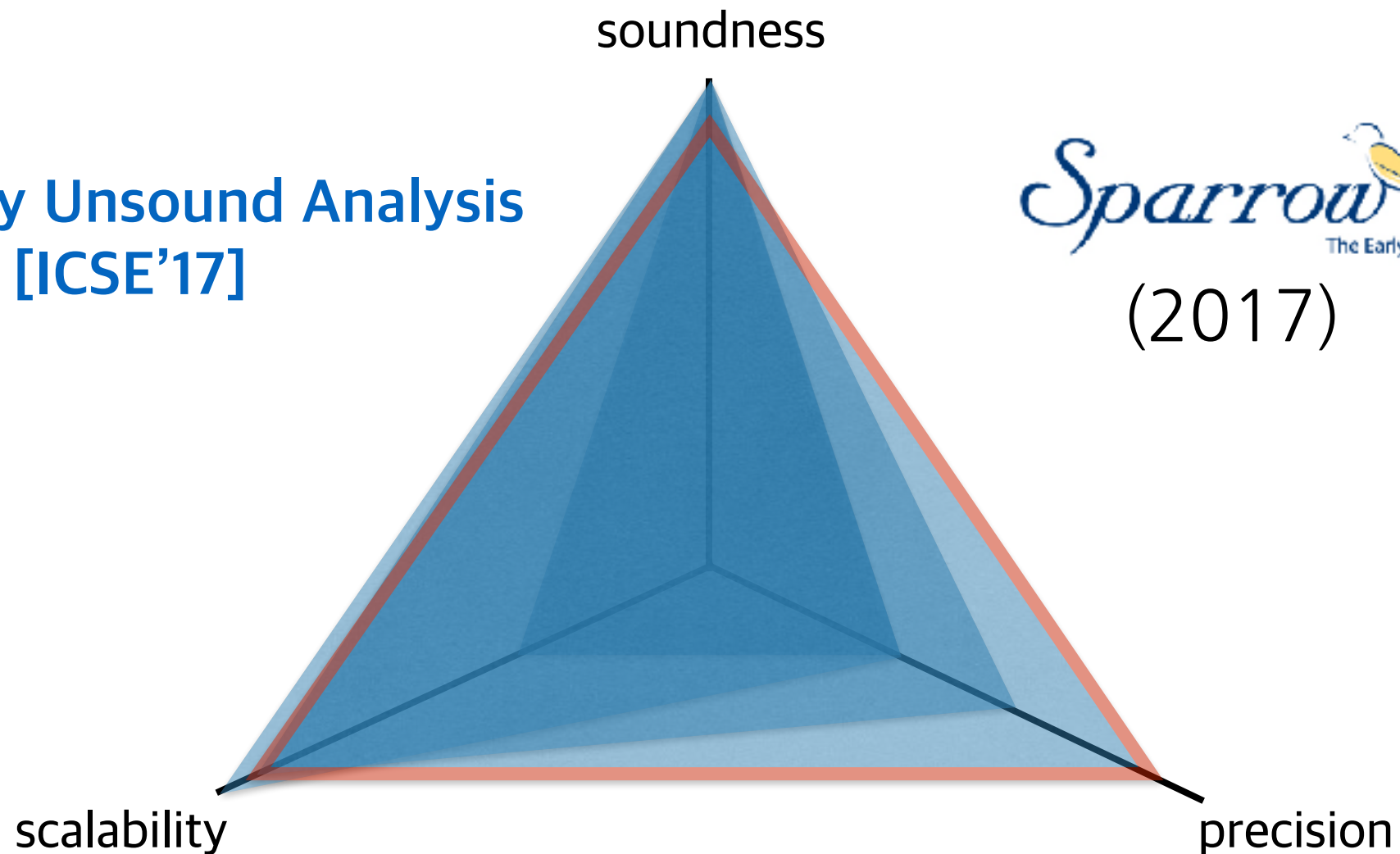
- 선별적으로 변수 관계를 추적하는 분석 (Selective Relational Analysis)



목표

- Sound, precise yet scalable static analysis

Selectively Unsound Analysis
[ICSE'17]

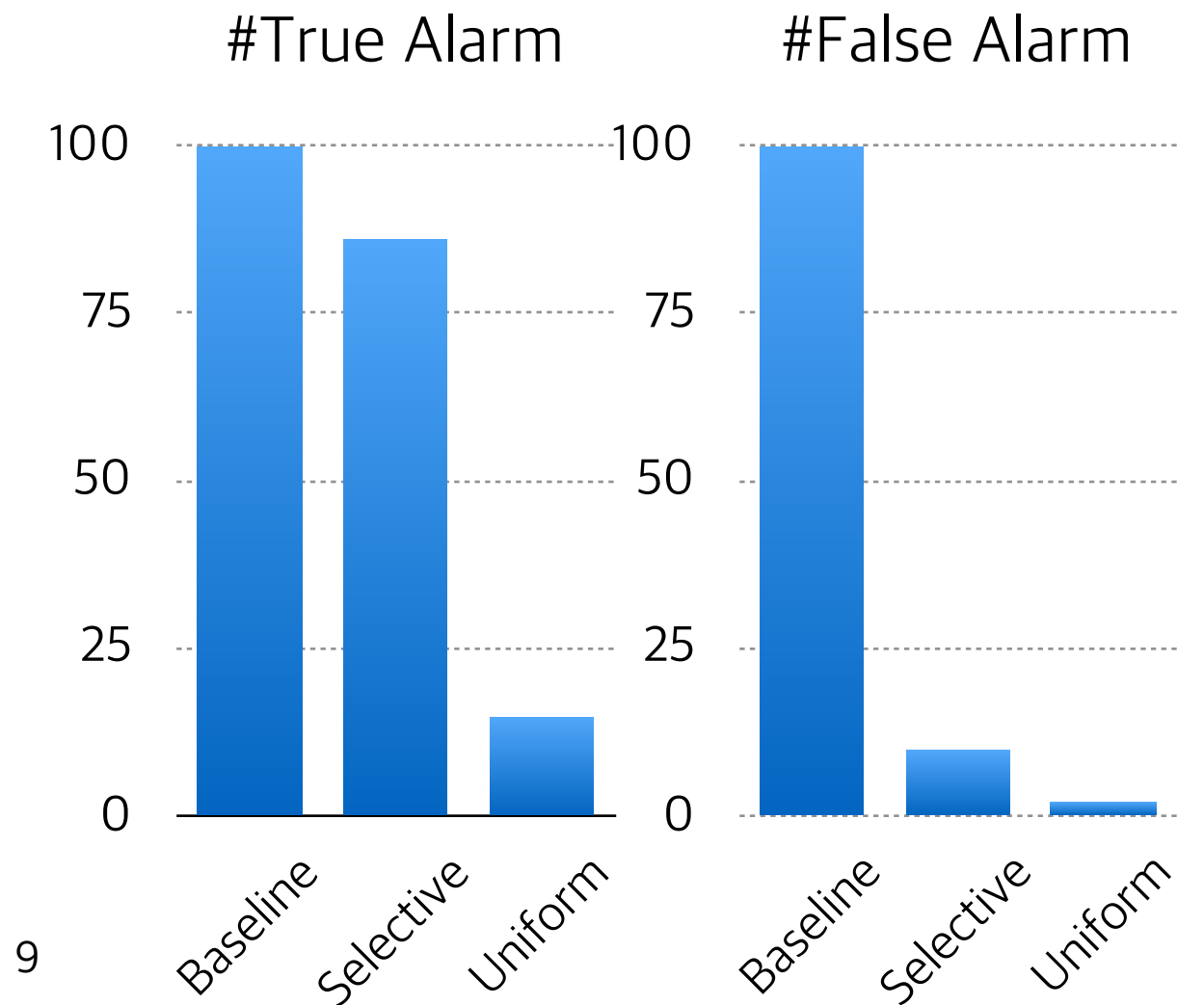
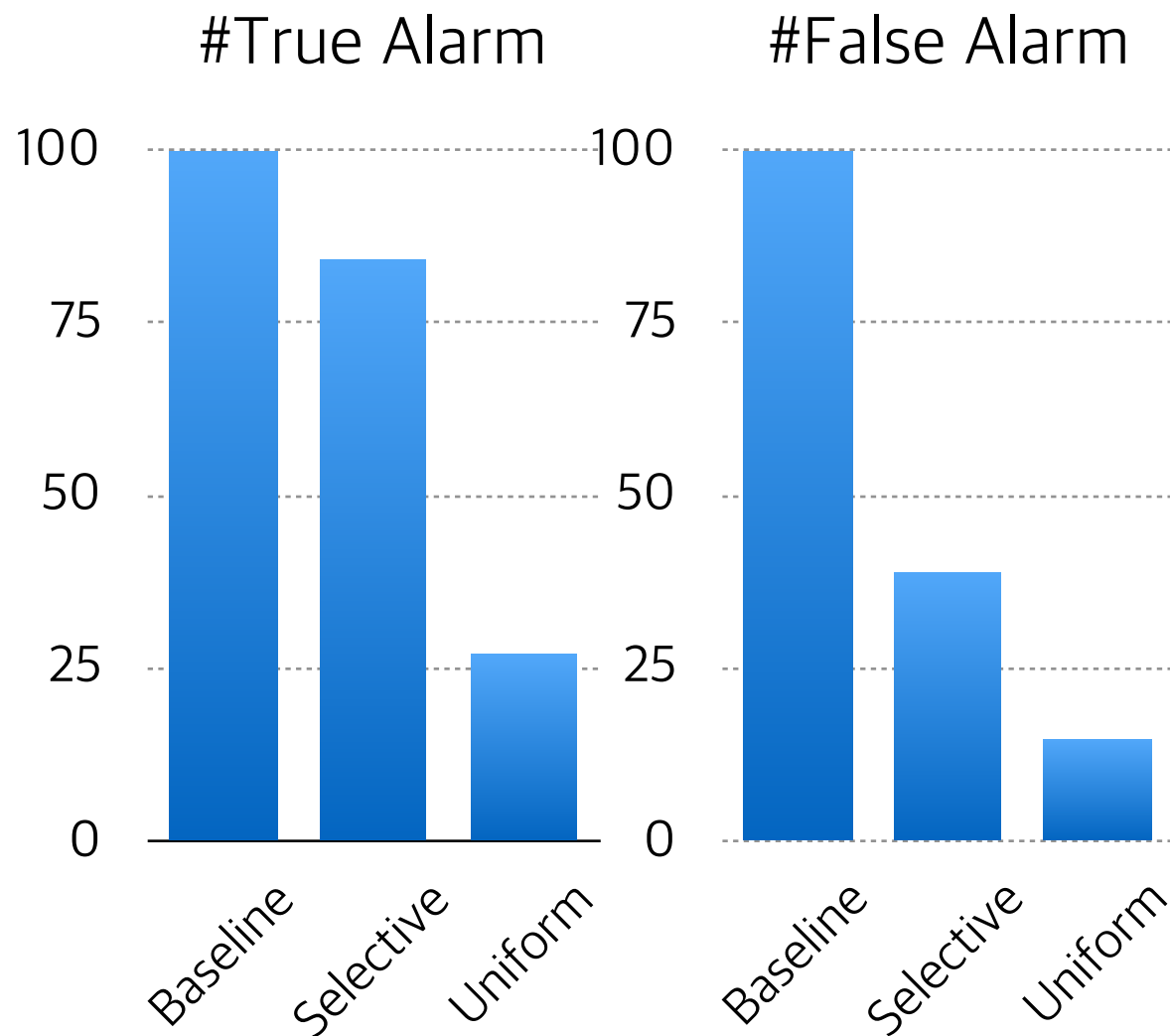


실험 결과

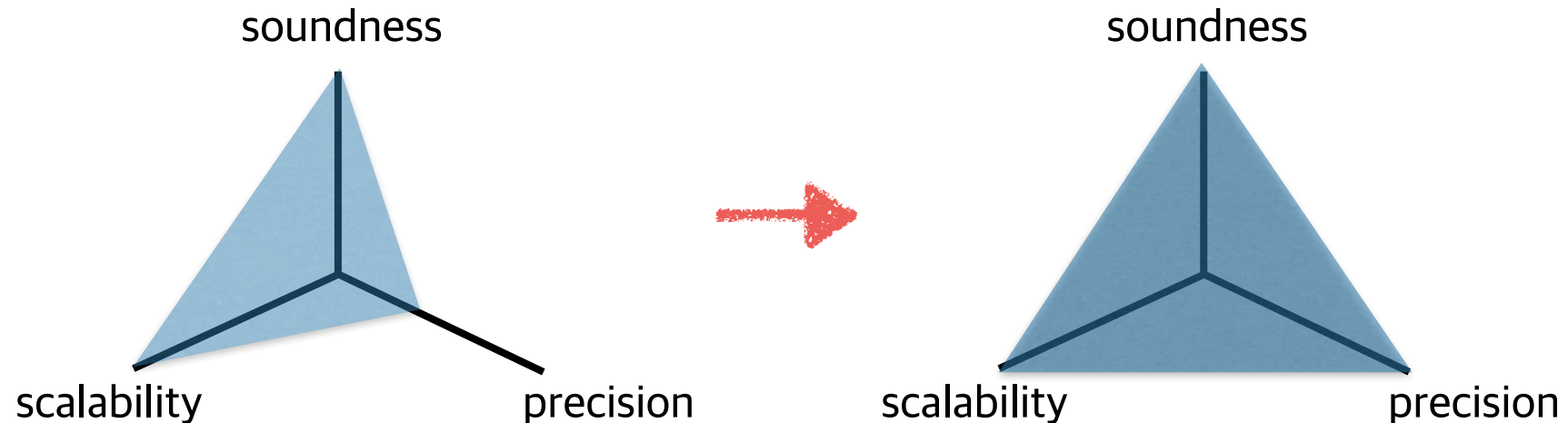
- 선별적으로 안전한 분석 (loop, lib call 안전성 조절)

Buffer Overrun Analysis

Taint Analysis



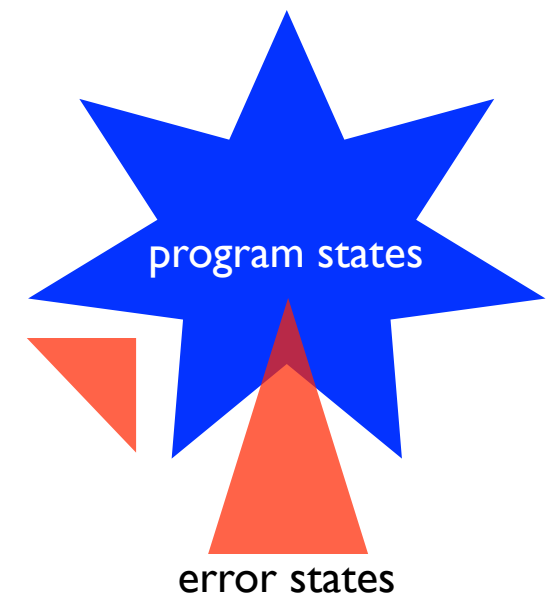
핵심 기술



$$F \in Pgm \times \underline{\Pi} \rightarrow \mathcal{A}$$

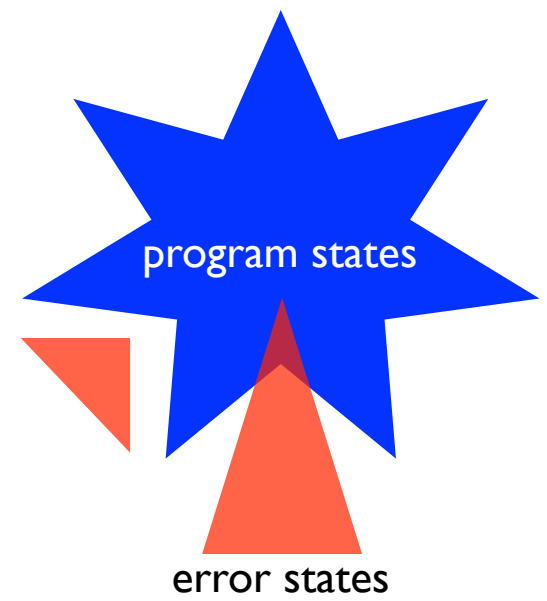
- 효율적인 정적 분석을 위해 적절한 요약을 찾기
- 정적 분석 이론 기반 (예비 분석) / 통계 기반 (기계 학습)
- 대상: 변수 관계, 문맥 (context), 흐름 (flow), 안전성 (soundness), 등

핵심 기술

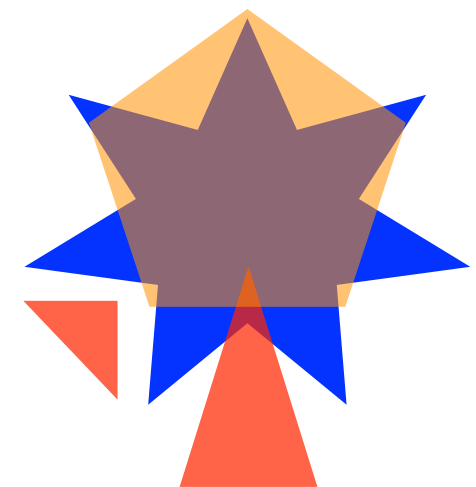
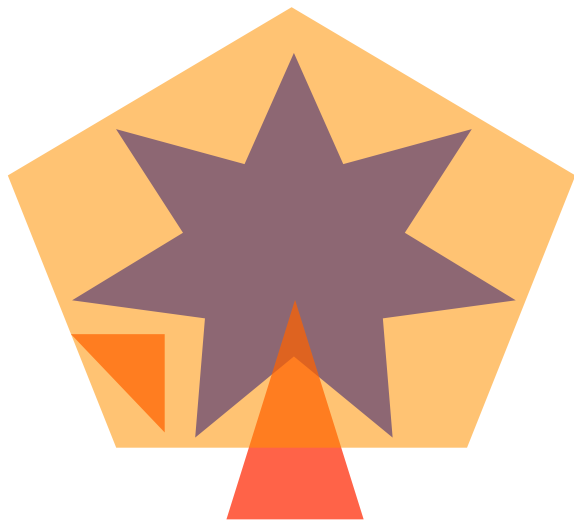


- 효율적인 정적 분석을 위해 적절한 요약을 찾기

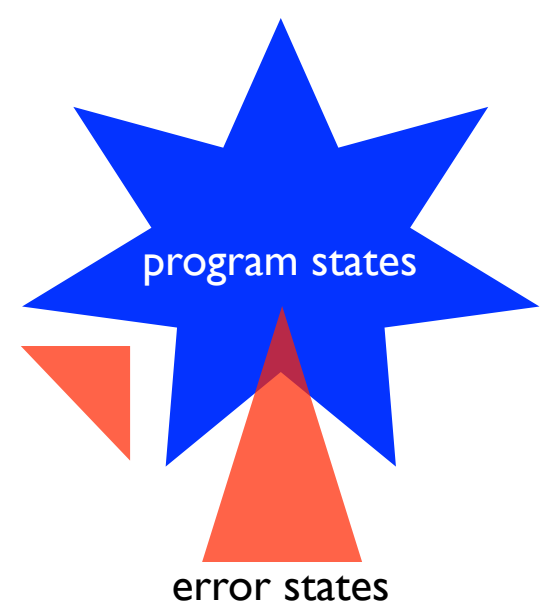
핵심 기술



- 효율적인 정적 분석을 위해 적절한 요약을 찾기



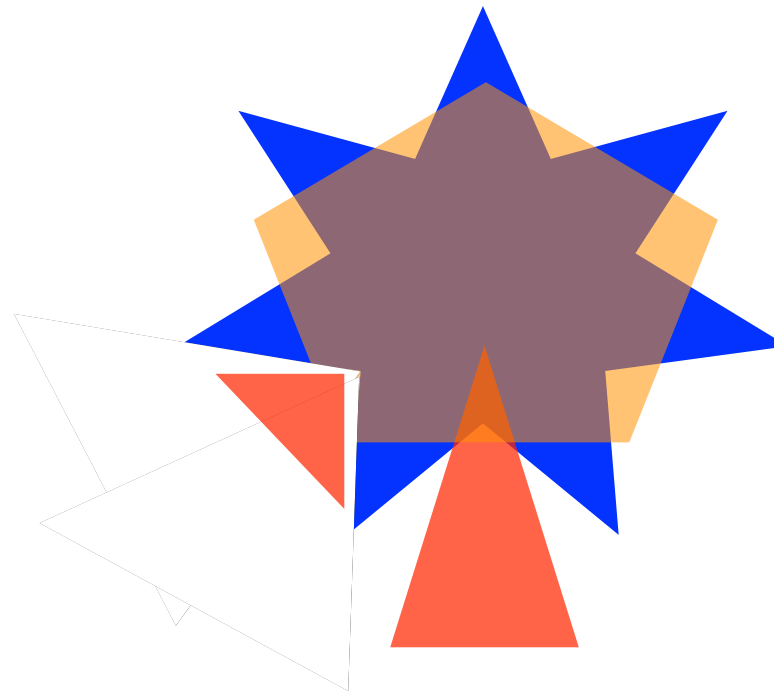
핵심 기술



- 효율적인 정적 분석을 위해 적절한 요약을 찾기



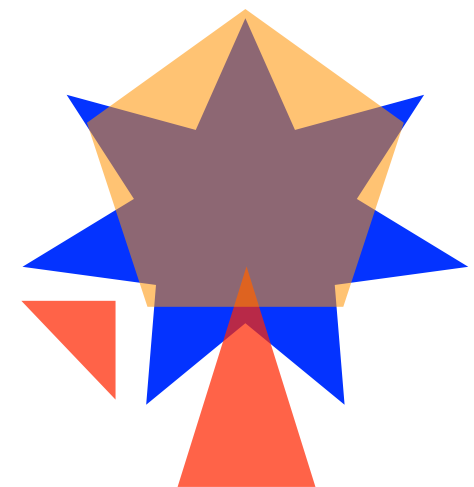
sound analysis



selective analysis



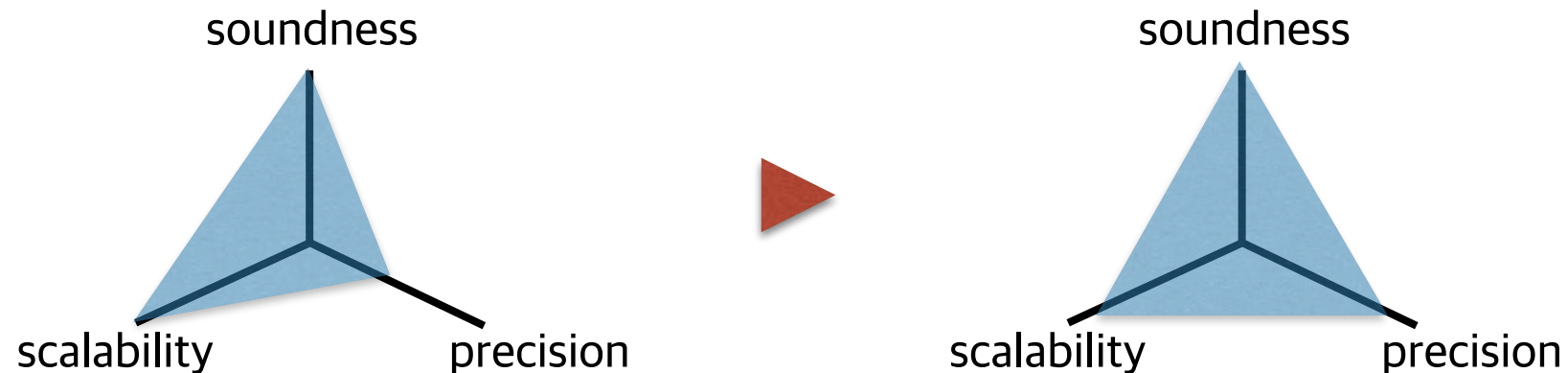
sound & precise analysis



unsound analysis

예비 분석을 이용하여 선별적으로 정확하게 정적 분석

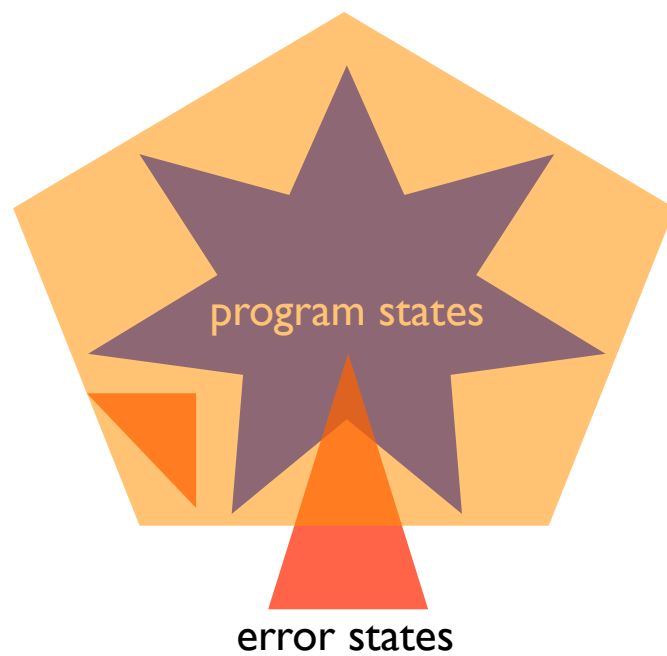
(Selective X-sensitive Analysis by Impact Pre-analysis)



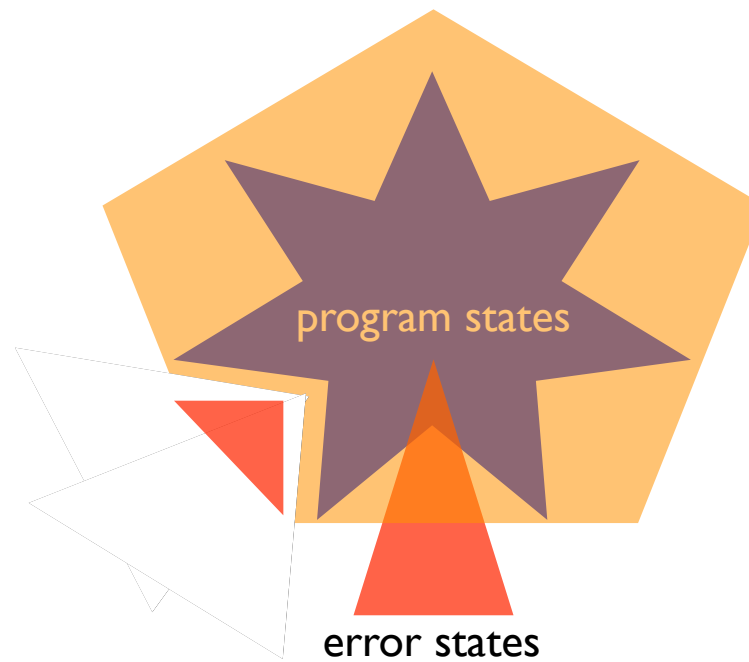
- Selective Context-Sensitivity Guided by Impact Pre-Analysis, PLDI'14
- Selective X-Sensitive Analysis Guided by Impact Pre-Analysis, TOPLAS'16
- Selective Conjunction of Context-sensitivity and Octagon Domain toward Scalable and Precise Global Static Analysis, SPE'17

선별적으로 정확한 분석

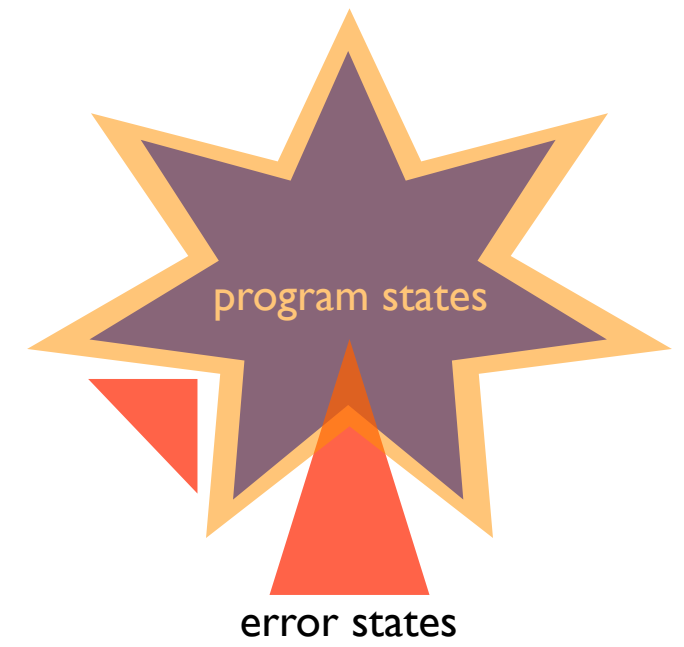
- 특정 X 를 필요한 곳에서만 정확하게 분석하는 방법
- X : 문맥, 관계 등 정확성을 높이지만 비싼 기술



부정확한 분석



선별적으로 정확한 분석



정확한 분석

관계 분석

- 변수 사이의 관계를 특정한 형태로 분석
 - e.g.) octagon analysis : $(\pm x) - (\pm y) \leq c$

```
1 int a = b;
2 int c = input();           // User input
3 for (i = 0; i < b; i++) {
4     assert (i < a);        // Query 1
5     assert (i < c);        // Query 2
6 }
```

	a	b	c	i
a	0	∞	∞	∞
b	∞	0	∞	∞
c	∞	∞	0	∞
i	∞	∞	∞	0

{a, b, c, i}

*Consider $x-y \leq c$ only,
for simplicity

관계 분석

- 변수 사이의 관계를 특정한 형태로 분석
 - e.g.) octagon analysis : $(\pm x) - (\pm y) \leq c$

```
1  int a = b;  
2  int c = input(); // User input  
3  for (i = 0; i < b; i++) {  
4      assert (i < a); // Query 1  
5      assert (i < c); // Query 2  
6  }
```

	a	b	c	i
a	0	0	∞	∞
b	0	0	∞	∞
c	∞	∞	0	∞
i	∞	∞	∞	0

{a, b, c, i}

관계 분석

- 변수 사이의 관계를 특정한 형태로 분석
 - e.g.) octagon analysis : $(\pm x) - (\pm y) \leq c$

```
1 int a = b;
2 int c = input();           // User input
3 for (i = 0; i < b; i++) {
4     assert (i < a);        // Query 1
5     assert (i < c);        // Query 2
6 }
```

	a	b	c	i	
a	0	0	∞	∞	$c - a \leq \infty$
b	0	0	∞	∞	$c - b \leq \infty$
c	∞	∞	0	∞	$a - c \leq \infty$
i	∞	∞	∞	0	$b - c \leq \infty$

{a, b, c, i}

관계 분석

- 변수 사이의 관계를 특정한 형태로 분석
 - e.g.) octagon analysis : $(\pm x) - (\pm y) \leq c$

```
1 int a = b;
2 int c = input(); // User input
3 for (i = 0; i < b; i++) {
4     assert (i < a); // Query 1
5     assert (i < c); // Query 2
6 }
```

	a	b	c	i
a	0	0	∞	∞
b	0	0	∞	-1
c	∞	∞	0	∞
i	∞	∞	∞	0

$$i - b \leq -1$$

{a, b, c, i}

관계 분석

- 변수 사이의 관계를 특정한 형태로 분석
 - e.g.) octagon analysis : $(\pm x) - (\pm y) \leq c$

```
1 int a = b;
2 int c = input();           // User input
3 for (i = 0; i < b; i++) {
4     assert (i < a);       // Query 1
5     assert (i < c);       // Query 2
6 }
```

	a	b	c	i
a	0	0	∞	-1
b	0	0	∞	-1
c	∞	∞	0	∞
i	∞	∞	∞	0

$i - a \leq -1$

{a, b, c, i}

관계 분석

- 변수 사이의 관계를 특정한 형태로 분석
 - e.g.) octagon analysis : $(\pm x) - (\pm y) \leq c$

```
1 int a = b;
2 int c = input();           // User input
3 for (i = 0; i < b; i++) {
4     assert (i < a);        // Query 1
5     assert (i < c);       // Query 2
6 }
```

	a	b	c	i
a	0	0	∞	-1
b	0	0	∞	-1
c	∞	∞	0	∞
i	∞	∞	∞	0

$i - c \leq \infty$

{a, b, c, i}

관계 분석

- 변수 사이의 관계를 특정한 형태로 분석

- e.g.) octagon analysis : $(\pm x) - (\pm y) \leq c$

```
1 int a = b;
2 int c = input();           // User input
3 for (i = 0; i < b; i++) {
4     assert (i < a);        // Query 1
5     assert (i < c);        // Query 2
6 }
```

	a	b	c	i
a	0	0	∞	-1
b	0	0	∞	-1
c	∞	∞	0	∞
i	∞	∞	∞	0

{a, b, c, i}

c가 필요한가?



선별적 관계 분석

- 선별적으로 변수사이의 관계를 분석
- 같은 묶음 (cluster) 안에 있는 변수 사이 관계만

```
1 int a = b;
2 int c = input();           // User input
3 for (i = 0; i < b; i++) {
4     assert (i < a);         // Query 1
5     assert (i < c);         // Query 2
6 }
```

	a	b	i
a	0	0	-1
b	0	0	-1
i	∞	∞	0

+

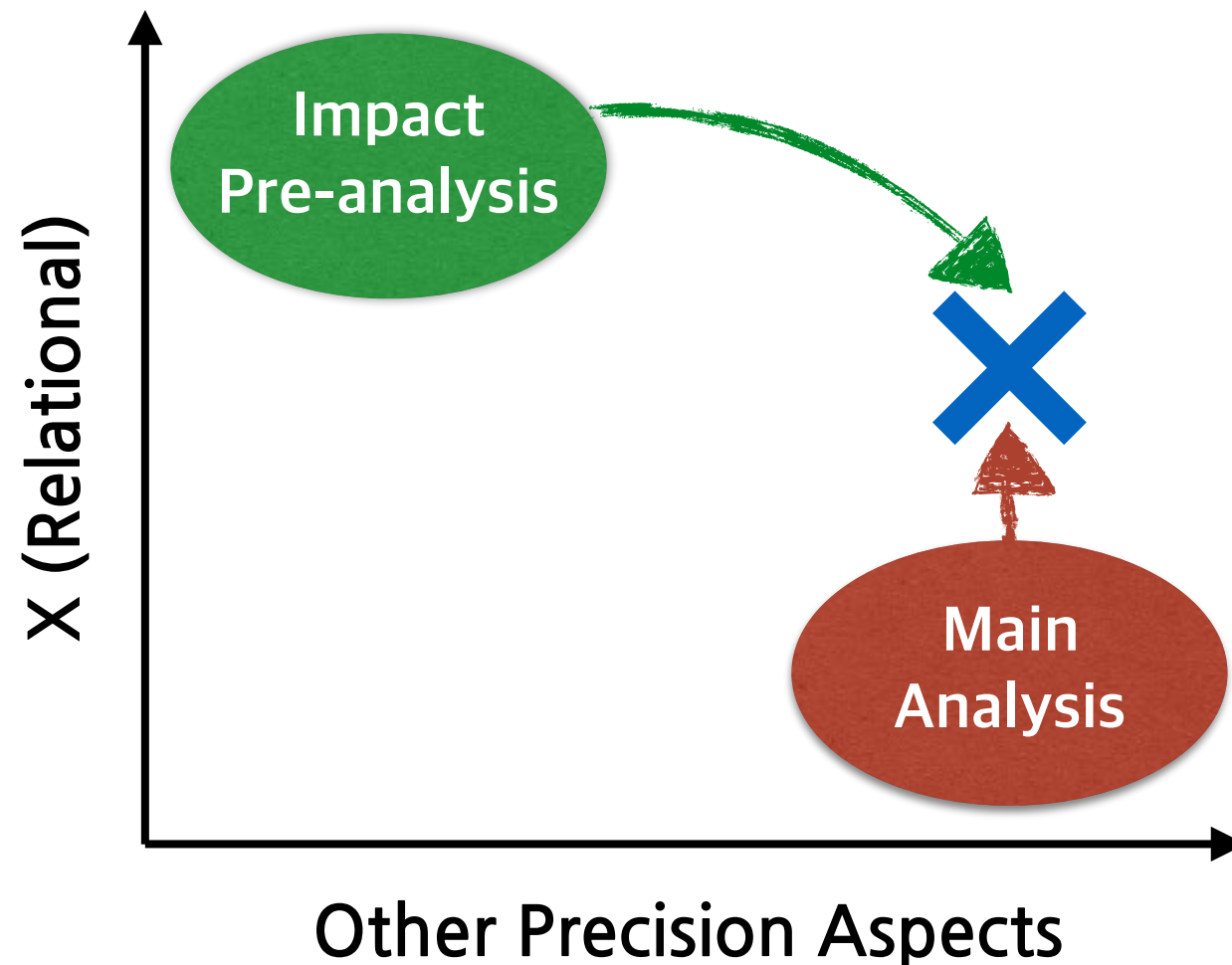
$-\infty \leq c \leq +\infty$

{a,b,i}

{c}

예비 분석

- X의 효과를 가늠하는 정적 분석
 - X는 가장 정확하게 + 나머지는 과감히 요약



예비 분석

- 예) octagon analysis :
모든 변수의 관계 추적 + 차이는 과감히 요약

```
1: int a = b;  
2: int c = input();  
3: for (i = 0; i < b; i ++) {  
4:   assert (i < a);  
5:   assert (i < c);  
6: }
```

$i - a \leq \star$

$i - c \leq T$

	a	b	c	i
a	★	★	T	★
b	★	★	T	★
c	T	T	★	T
i	T	T	T	★

T 무한할 수도 ($\mathbb{Z} \cup \{+\infty\}$)
|
★ 반드시 유한 (\mathbb{Z})

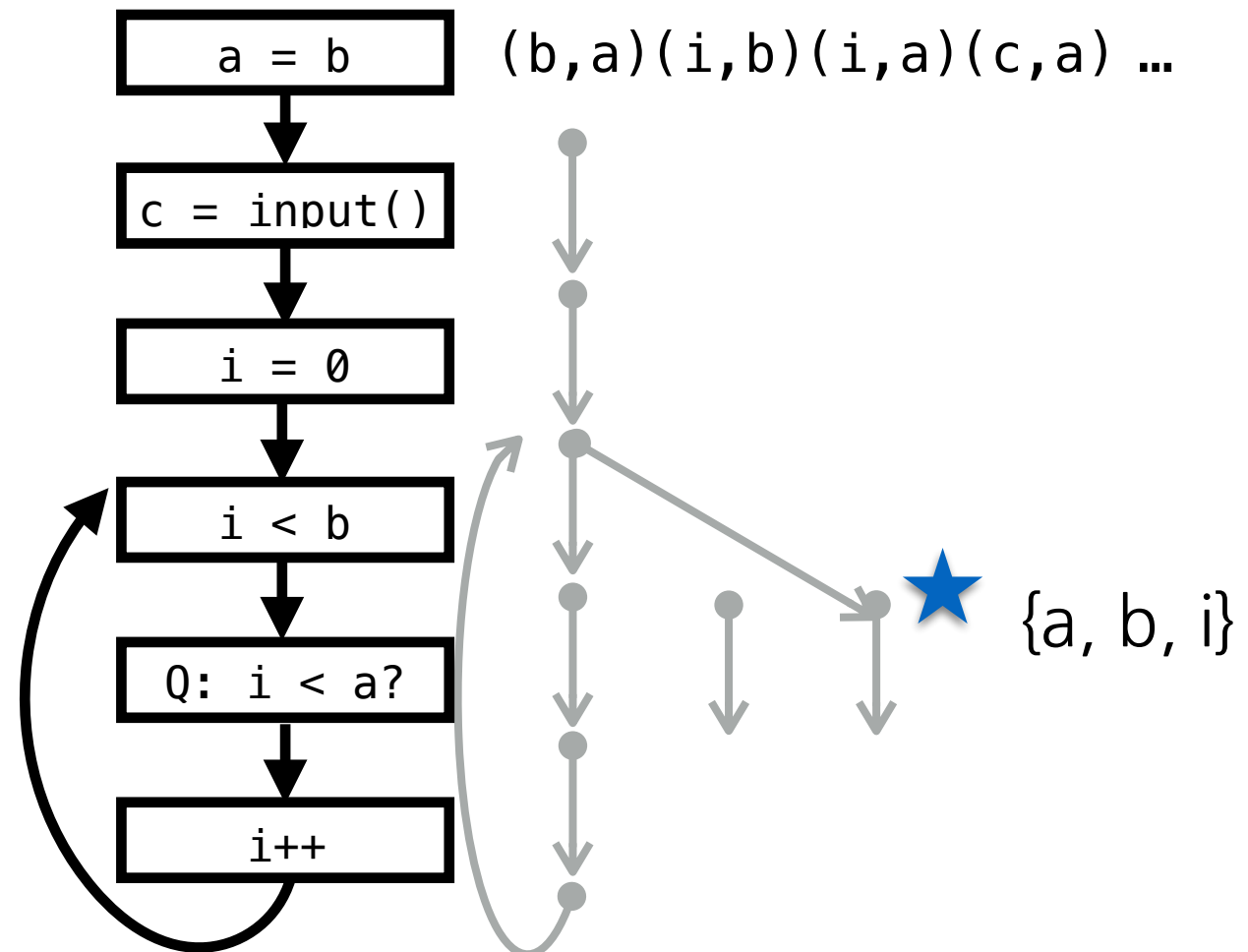
변수 묶음

- 묶음: ★ 을 만드는데 기여한 변수 묶음
 - 변수 의존관계를 따라 간단히 계산 가능

```
1: int a = b;  
2: int c = input();  
3: for (i = 0; i < b; i ++ ) {  
4:   assert (i < a);  
5:   assert (i < c);  
6: }
```

$i - a \leq \star$

$i - c \leq T$



실험 결과

- 선별적 관계 분석
 - 기존 기술 대비, 쿼리 3배 많이 증명, 분석 시간 81% 절감
 - cf.) 모든 관계 분석 (fully relational)은 2KLOC 까지

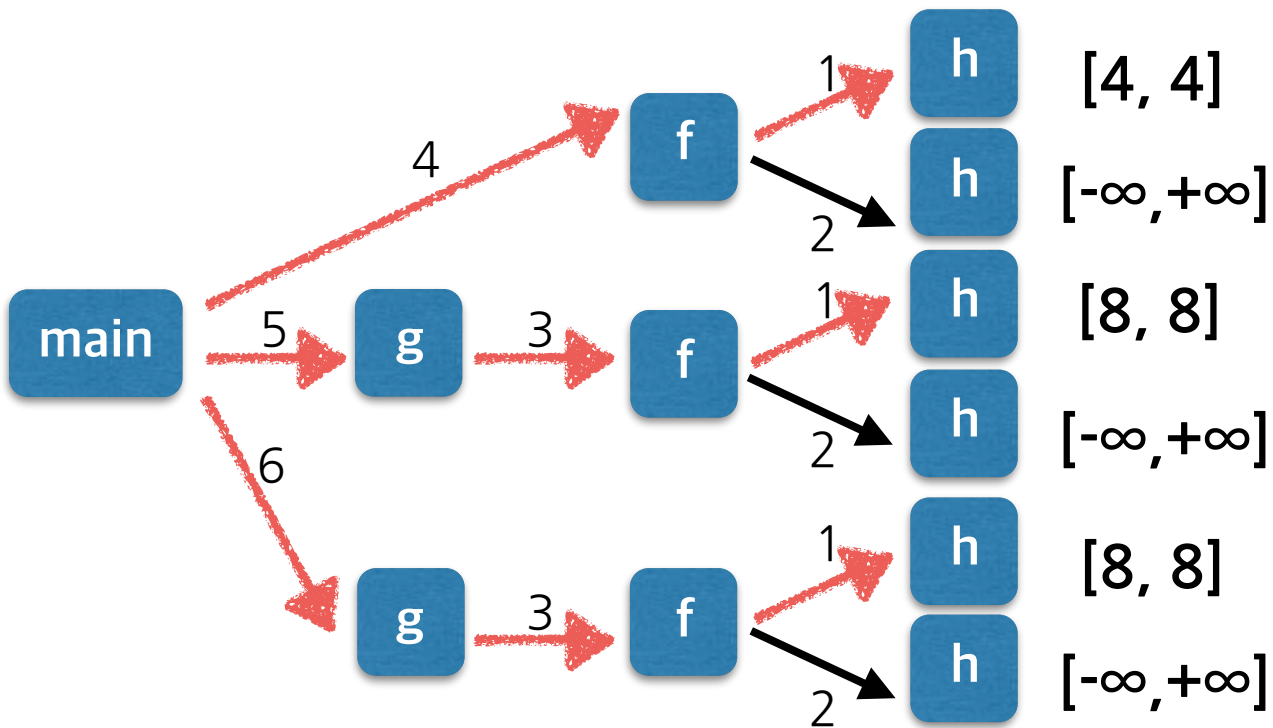
Program	LOC	#Variable	#Query	Syntactic Packing Approach				Our Selective Relational Analysis						Comparison	
				proven	time	mem	pack	proven	pre	main	total	mem	pack	Precision	Time
calculator-1.0	298	197	10	2	0.3	63	18 (7.3)	10	0.1	0.1	0.2	52	3 (3.6)	+8	-33.3%
spell-1.0	2,213	531	16	1	4.8	109	119 (7.7)	16	1.7	0.7	2.4	63	6 (11.0)	+15	-50.0%
barcode-0.96	4,460	2,002	37	16	11.8	221	276 (8.1)	37	12.2	18.3	30.5	100	12 (25.0)	+21	158.5%
httptunnel-3.3	6,174	1,908	28	16	26.0	220	454 (7.0)	26	10.8	4.5	15.3	105	8 (5.8)	+10	-41.2%
bc-1.06	13,093	2,194	10	2	247.1	945	606 (7.8)	9	82.3	35.0	117.3	212	4 (4.0)	+7	-52.5%
tar-1.17	20,258	5,332	17	7	1,043.2	1,311	1,259 (7.5)	17	598.5	63.3	661.8	384	7 (3.9)	+10	-36.6%
less-382	23,822	4,482	13	0	3,031.5	1,439	1,017 (6.3)	13	2,253.2	596.2	2,849.4	955	8 (6.3)	+13	-6.0%
a2ps-4.14	64,590	16,531	11	0	29,479.3	2,304	2,608 (7.8)	11	2,223.5	518.2	2,741.7	909	6 (6.7)	+11	-90.7%
Total	135,008	33,177	142	44	33,840.3	6,611		139	5,182.3	1,236.3	6,418.6	2,780		+95	-81.0%

예) 문맥 구분 (Context-sensitivity)

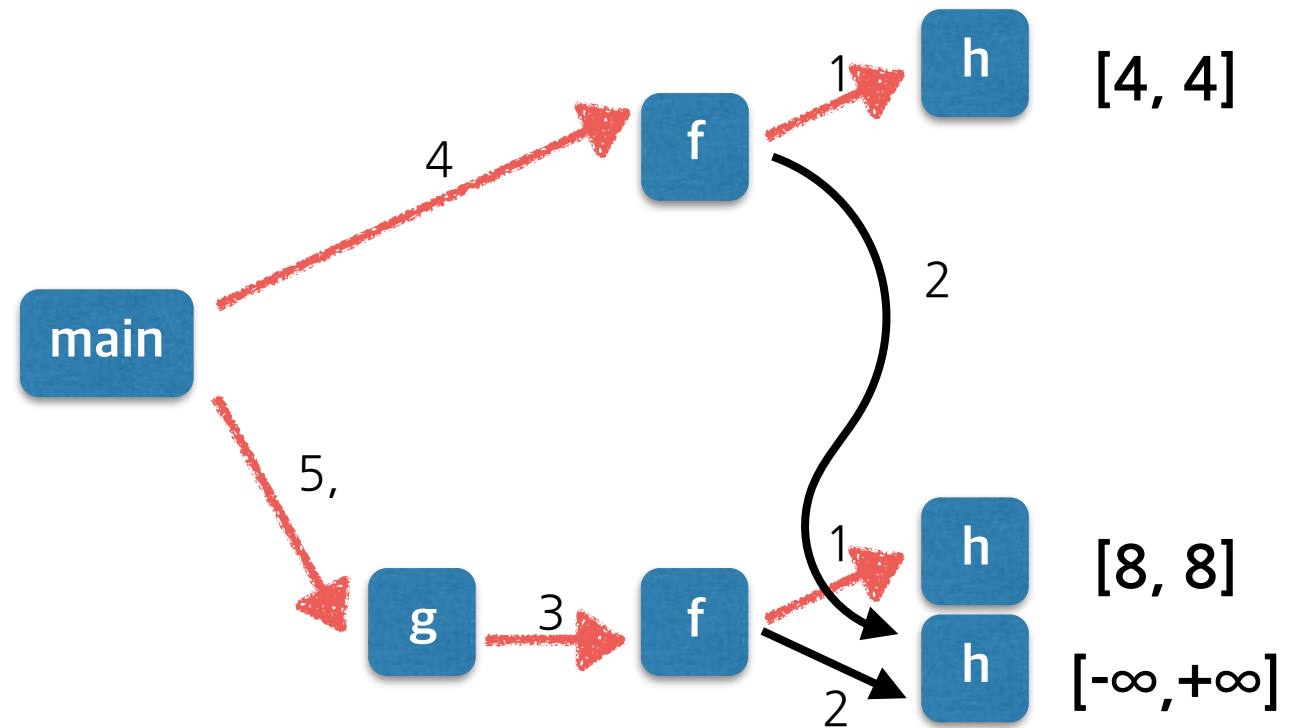
```

int h(n) { return n; }
void f(s) {
1:   p = h(s);
    assert(p > 1);    // Q1
2:   q = h(input());
    assert(q > 1);    // Q2
}
3: void g() { f(8); }
void main(){
4:   f(4);
5:   g();
6:   g();
}

```



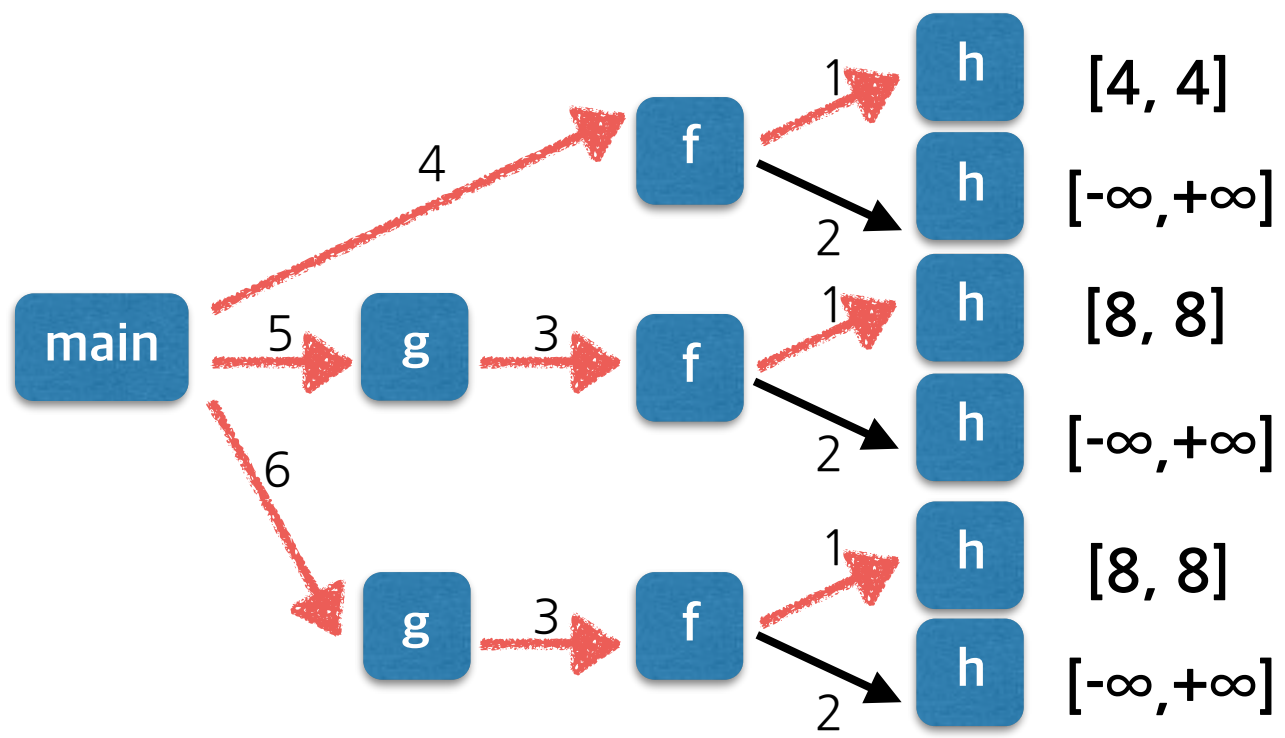
모든 문맥 구분 분석



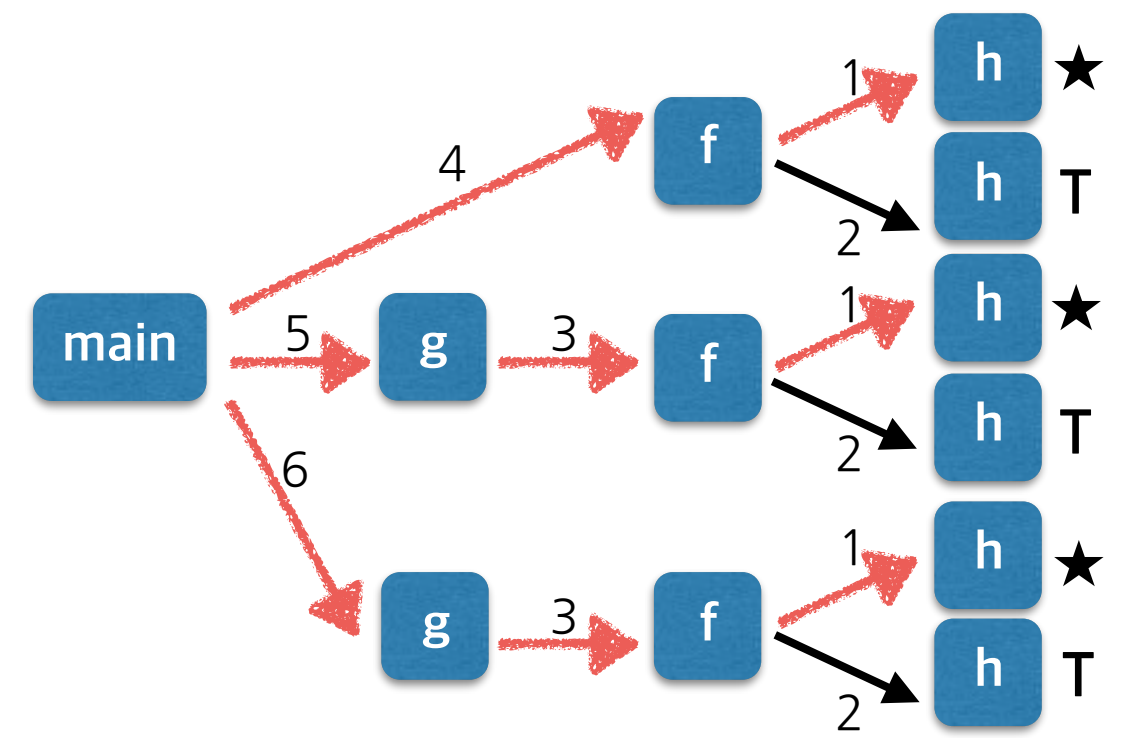
선별적 문맥 구분 분석

예) 문맥을 위한 예비 분석

T 모든 인터벌
 ↓
★ 음이 아닌 인터벌 (e.g. [1,5], [0, ∞])



모든 문맥 구분 분석



예비 분석

실험 결과

- 선별적 문맥 구분 분석
 - 거짓경보 24% 감소, 분석 시간 28% 증가
 - cf.) 3-CFA : 같은 정확도, 분석시간 1300% 증가

Program	LOC	Proc	Context-Insensitive		Our Selective Context-Sensitive Analysis						Alarm reduction	Overhead	
			#alarm	time	#alarm	pre	main	total	#selected call-sites	~>		pre	main
spell-1.0	2,213	31	58	0.6	30	0.1	0.8	0.9	25 / 124 (20.2 %)	3	48.3%	16.7%	33.3%
bc-1.06	13,093	134	606	14.0	483	1.9	14.3	16.2	29 / 777 (3.7 %)	2	20.3%	13.6%	2.1%
tar-1.17	20,258	222	940	42.1	799	5.4	41.8	47.2	51 / 1213 (4.2 %)	3	15.0%	12.8%	-0.7%
less-382	23,822	382	654	123.0	562	3.3	163.1	166.4	51 / 1,522 (3.4 %)	4	14.1%	2.7%	32.6%
sed-4.0.8	26,807	294	1,325	107.5	1,238	7.4	110.2	117.6	25 / 868 (2.9 %)	3	6.6%	6.9%	2.5%
make-3.76	27,304	191	1,500	84.4	1,028	7.1	99.1	106.2	67 / 1,050 (6.4 %)	3	31.5%	8.4%	17.4%
grep-2.5	31,495	153	735	12.1	653	2.4	13.5	15.9	33 / 530 (6.2 %)	3	11.2%	19.8%	11.6%
wget-1.9	35,018	434	1,307	69.0	942	12.5	69.6	82.1	79 / 1,973 (4.0 %)	5	27.9%	18.1%	0.9%
a2ps-4.14	64,590	980	3,682	118.1	2,121	29.5	148.2	177.7	237 / 2,450 (9.7 %)	9	42.4%	25.0%	25.5%
bison-2.5	101,807	1,427	1,894	136.3	1,742	34.6	138.8	173.4	173 / 2,038 (8.5 %)	4	8.0%	25.4%	1.8%
Total	346,407	4,248	12,701	707.1	9,598	104.2	799.4	903.6	770 / 12,545 (6.1 %)		24.4%	14.7%	13.1%

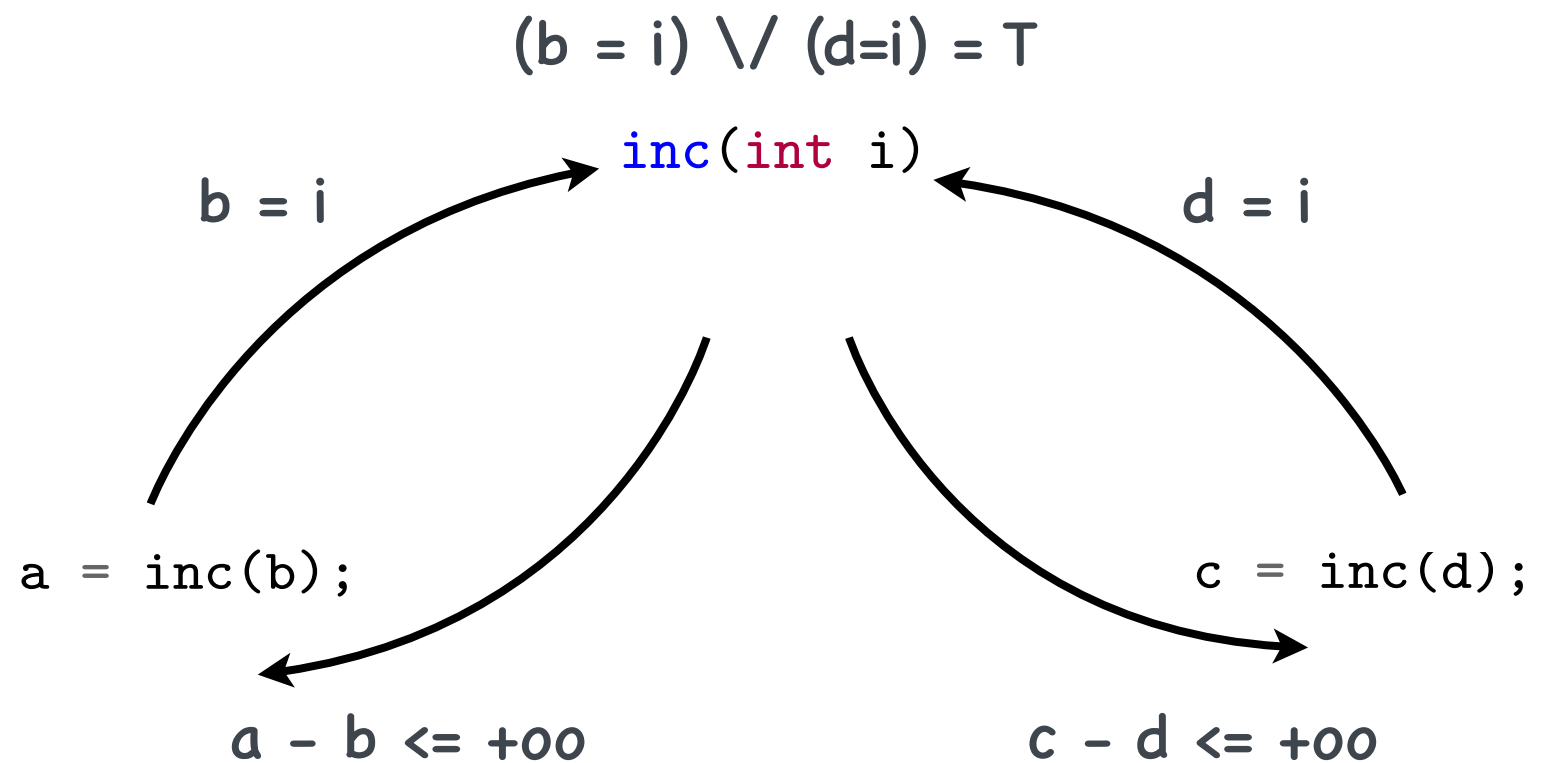
여러 X가 동시에 필요하다면?



문제

- 관계과 문맥이 동시에 필요한 경우

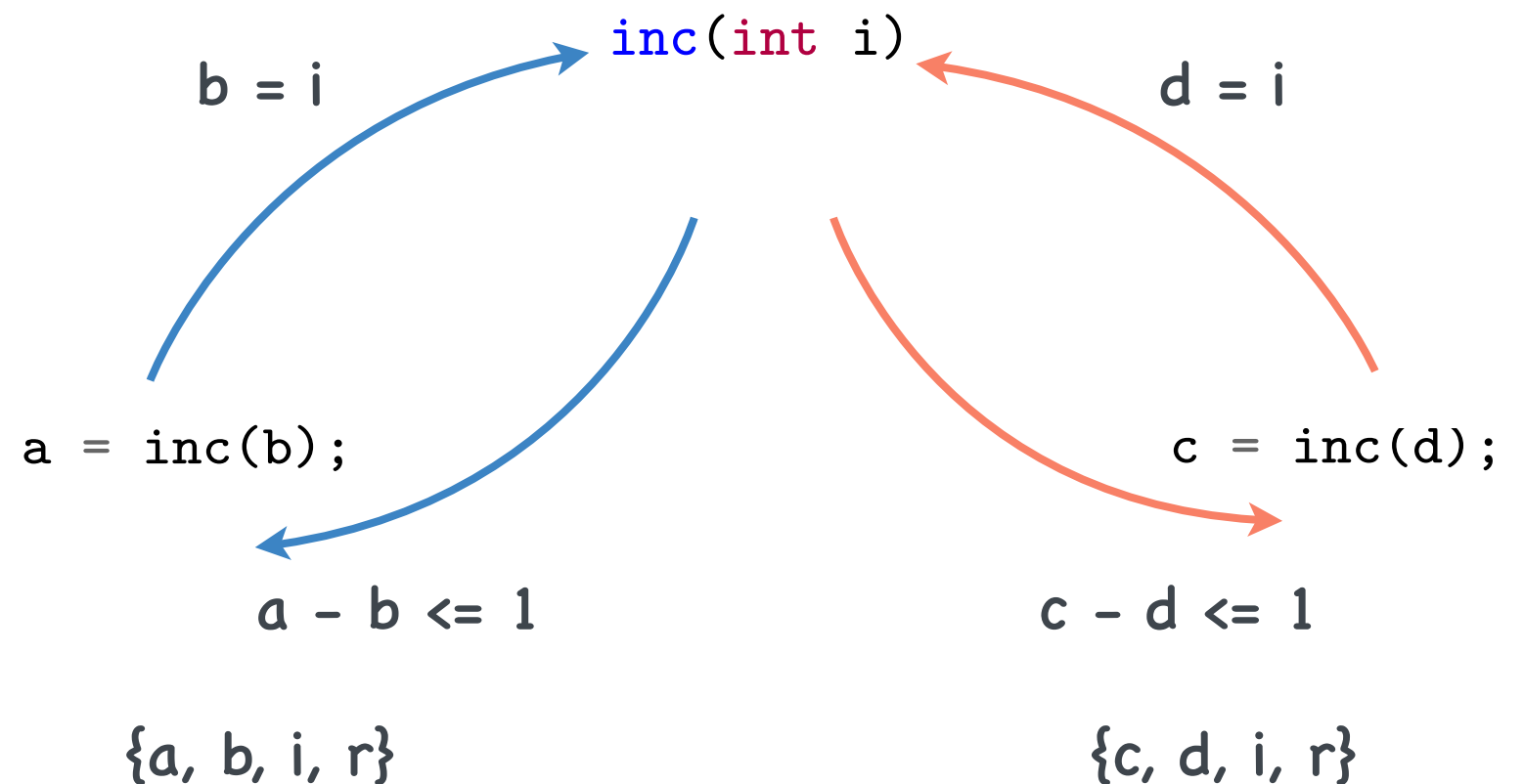
```
1  int inc(int i) { r = i + 1; return r; }
2
3  void f(int x, int y){
4      n = input();
5      if(n >= y){
6          y = n + 64;
7          x = y;
8      }
9      assert(n < x); // Query 1
10 }
11
12 void g(int z){
13     n = input();
14     assert(n < z); // Query 2
15 }
16
17 void main(){
18     a = inc(b);
19     c = inc(d);
20     f(a, b);
21     f(c, d);
22     g(a);
23     g(c);
24 }
```



목표

- 필요한 관계와 문맥을 같이 유추하는 예비 분석

```
1  int inc(int i) { r = i + 1; return r; }
2
3  void f(int x, int y){
4      n = input();
5      if(n >= y){
6          y = n + 64;
7          x = y;
8      }
9      assert(n < x); // Query 1
10 }
11
12 void g(int z){
13     n = input();
14     assert(n < z); // Query 2
15 }
16
17 void main(){
18     a = inc(b);
19     c = inc(d);
20     f(a, b);
21     f(c, d);
22     g(a);
23     g(c);
24 }
```



해결책

- 전체 변수의 관계와 모든 문맥을 구분하는 예비 분석
 - 값 도메인은 본분석보다 훨씬 요약
 - 개별 (modular) 분석을 이용해 효율적으로
 - 각 함수의 입출력을 따로 요약하고 조립
- 정확도 향상이 있을 부분에서 필요한 관계, 문맥 추출

예

```
dstrsplit(char** list, int* length){  
    *list = malloc(length);  
}
```

```
a_find_input_ranges(...){  
    dstrsplit(&list1, &length1);  
    i = 0;  
    while(i < length1){  
        list1[i] = ...  
    }  
}
```

{list1, length1, list, length}

```
find_field(...){  
    dstrsplit(&list2, &length2);  
    i = 0;  
    while(i < length2){  
        list2[i] = ...  
    }  
}
```

{list2, length2, list, length}

*from combine-0.3.3

예

```
void str_add_char(str* str, char c){
    str->len++;
    if (str->len >= str->mem){
        str->mem = str->len + 64;
        str->str = xrealloc(str->str, str->mem);
    }
    str->str[str->len - 1] = c;
}
```

```
void f(){
    // str1->str1.size = str1->mem > str1->len
    str_add_char(str1, c1);
}
```

{str1->str, str1->len, str1->mem}

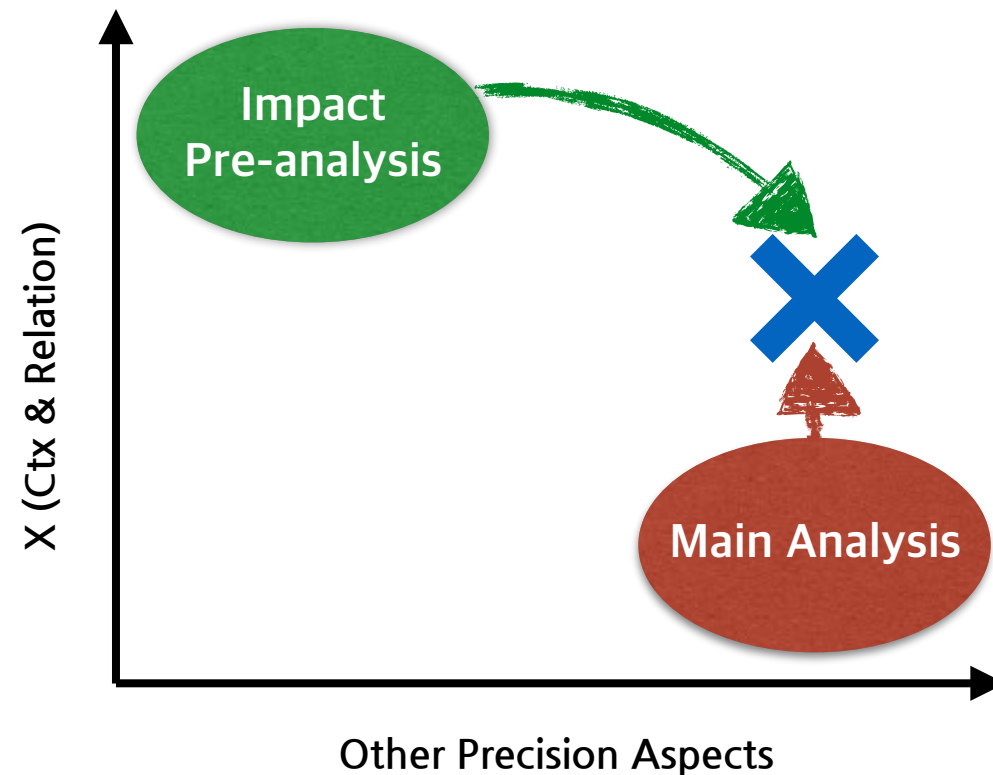
```
void g(){
    // str2->str2.size = str2->mem > str2->len
    str_add_char(str2, c2);
}
```

{str2->str, str2->len, str2->mem}

*from spell-1.0

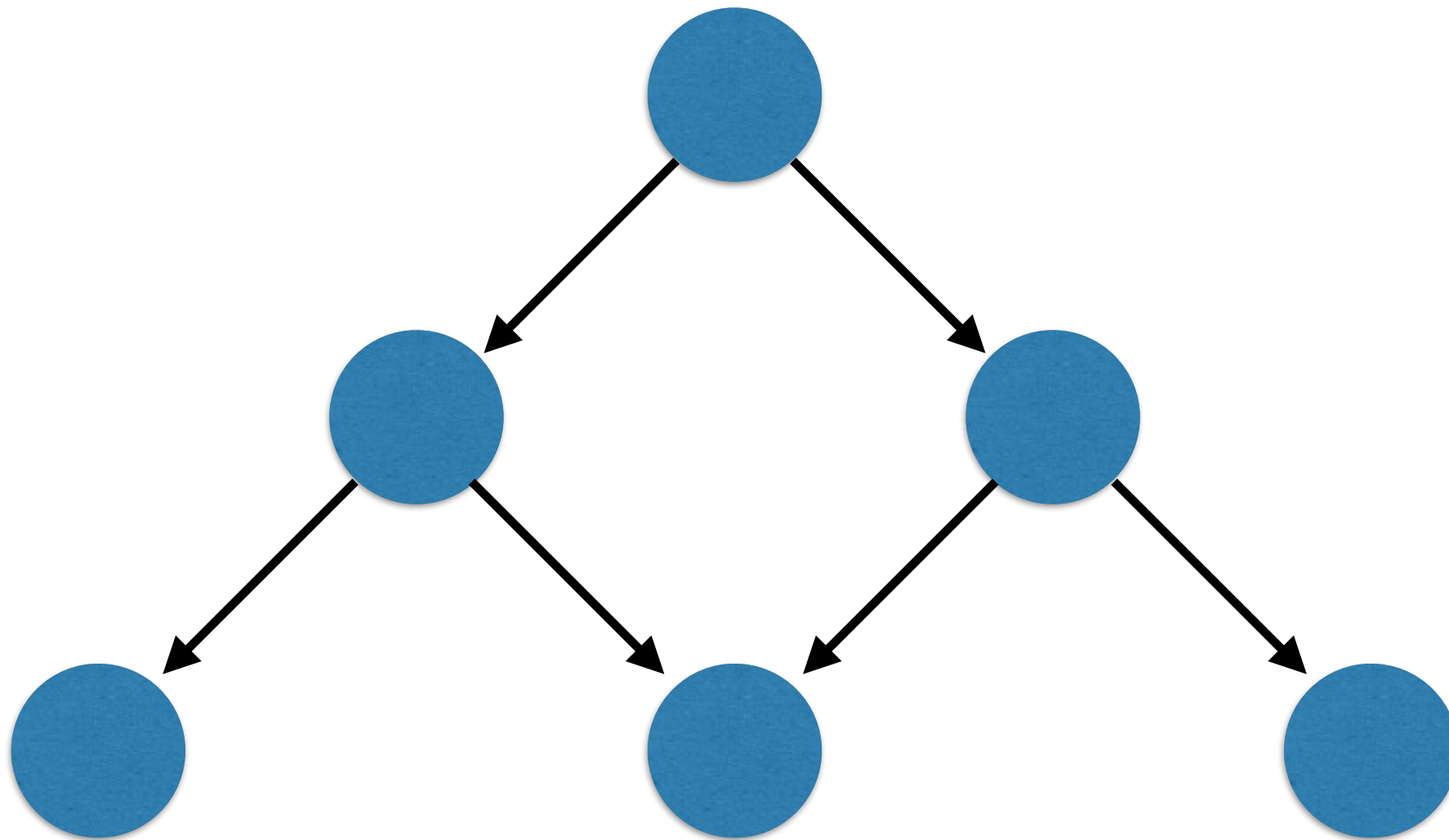
예비 분석

- 모든 문맥과 모든 변수 관계를 고려하는 분석
- 값은 기존처럼 요약 : 무한할 수도 / 반드시 유한
- 문제점: 기존방식으로는 예비분석조차 불가능



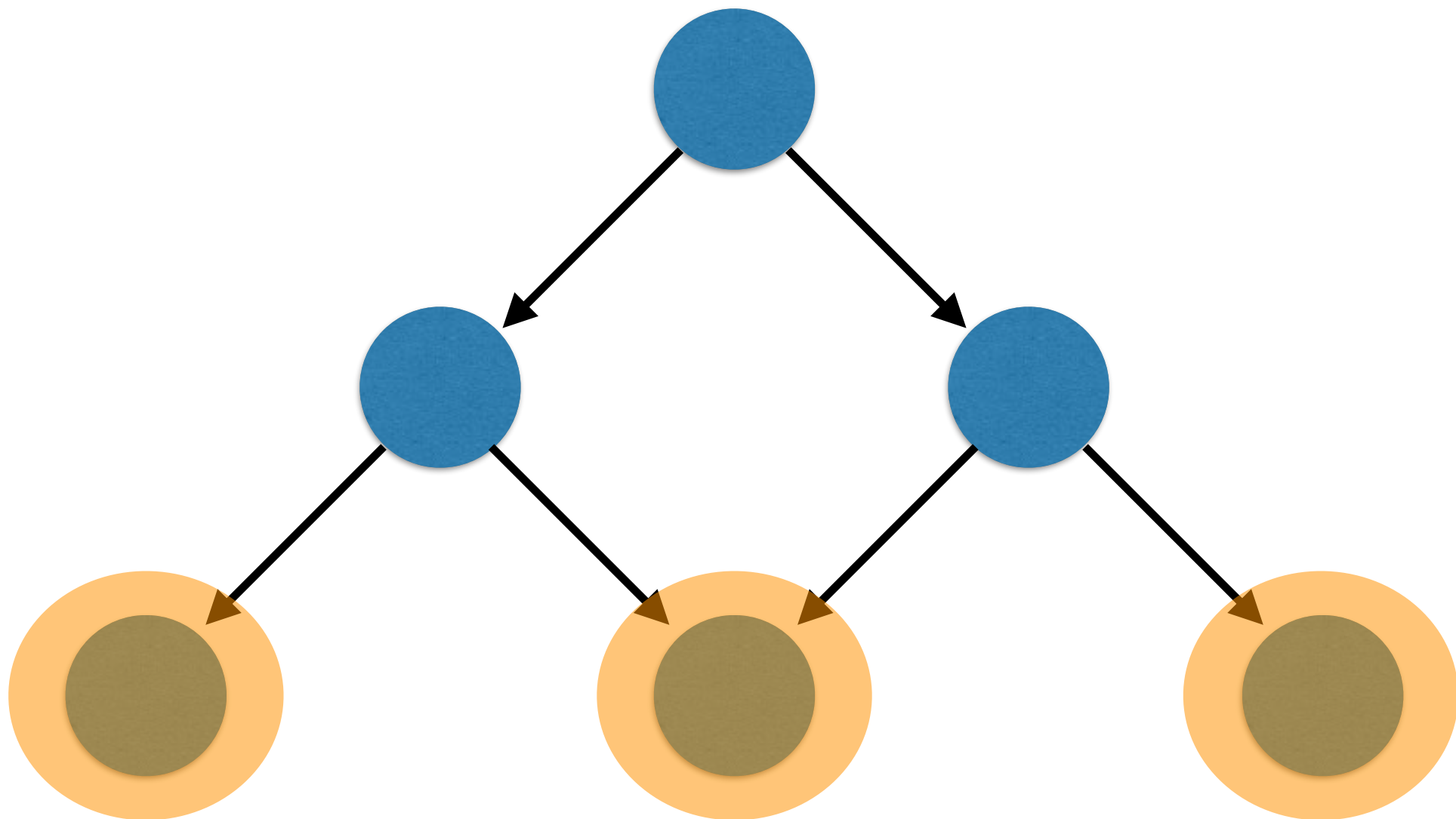
개별 분석 (modular analysis)

- 큰 프로그램을 각 부분(주로 함수)을 따로 분석 + 조합



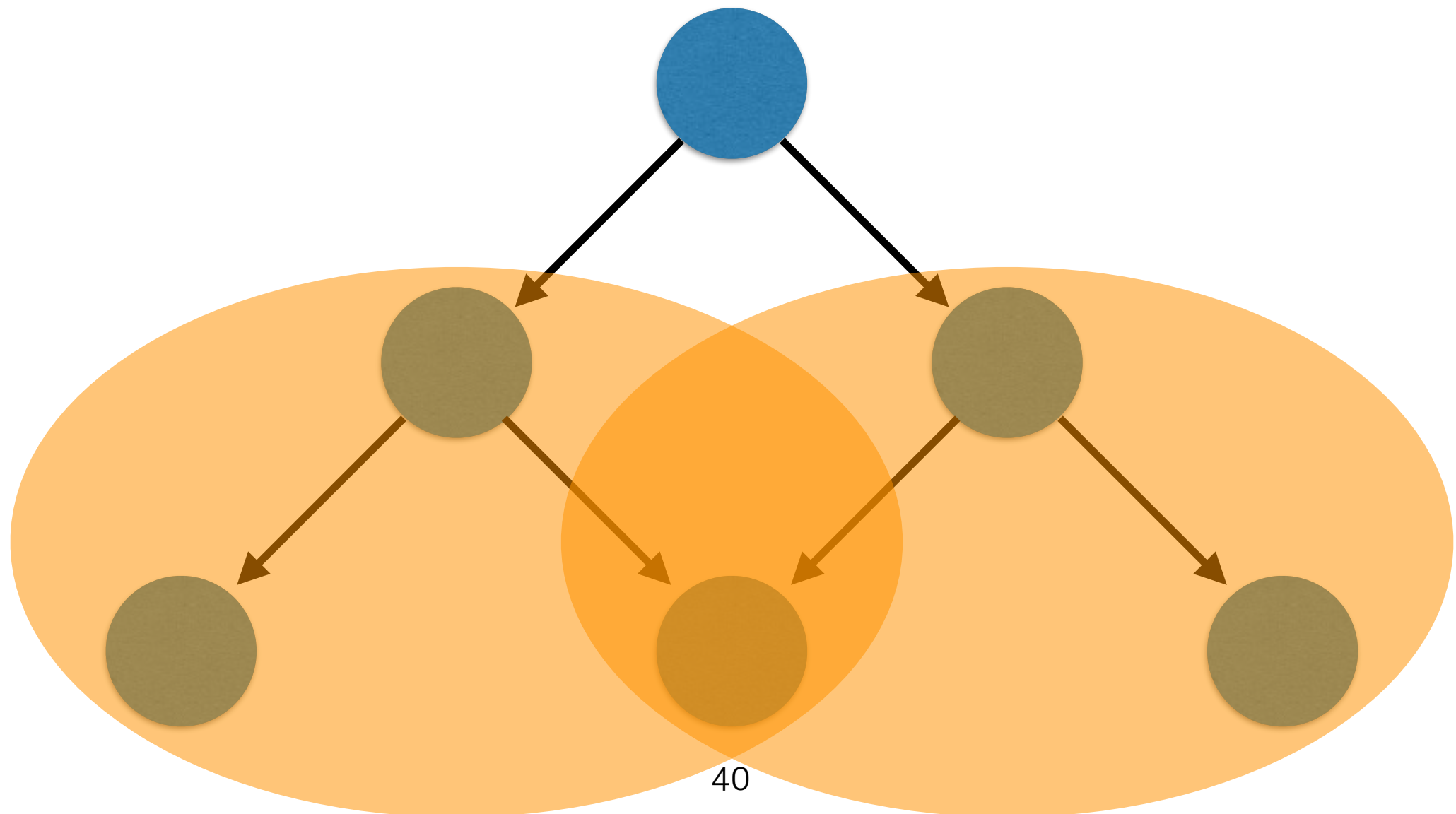
개별 분석 (modular analysis)

- 큰 프로그램을 각 부분(주로 함수)을 따로 분석 + 조합



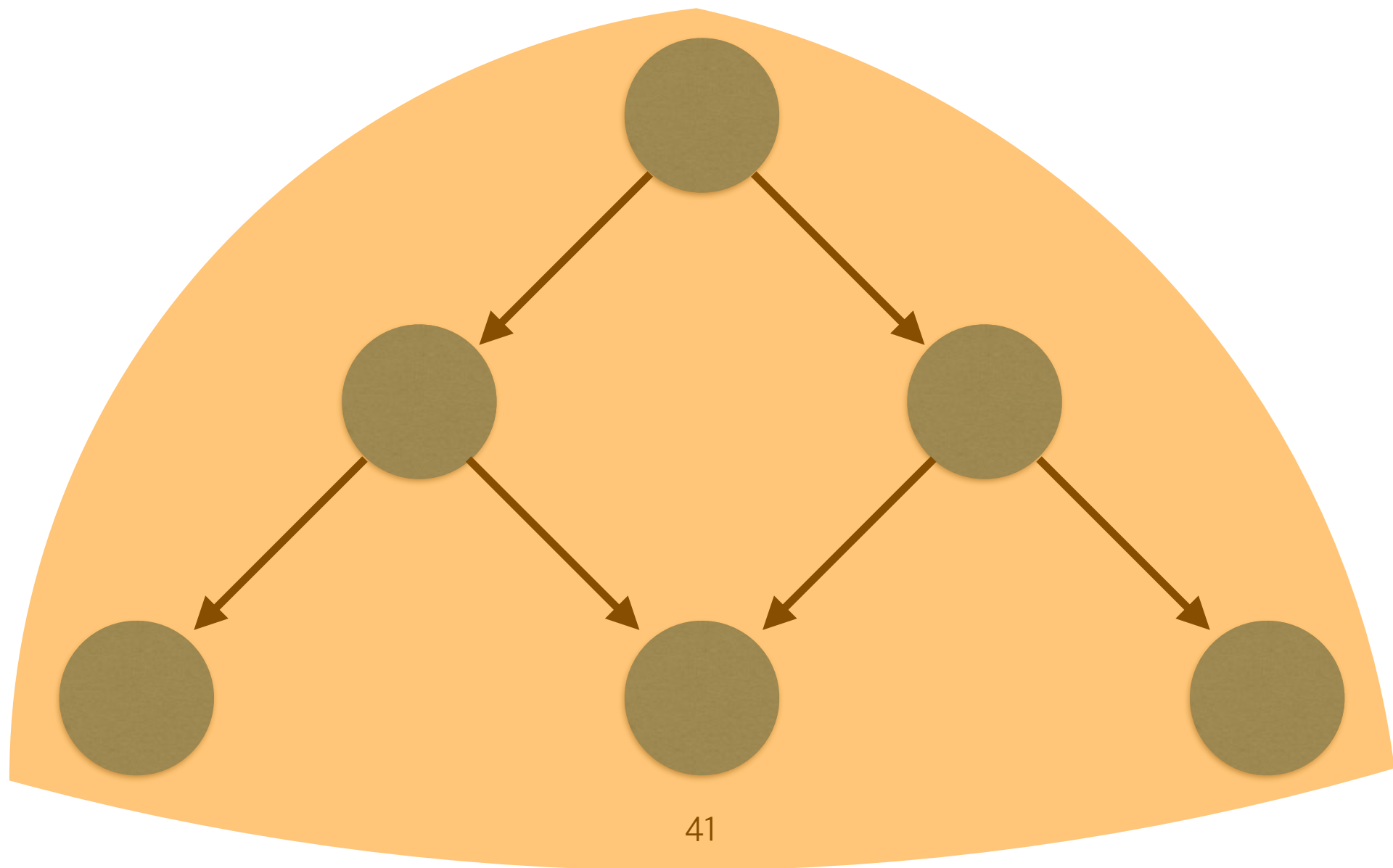
개별 분석 (modular analysis)

- 큰 프로그램을 각 부분(주로 함수)을 따로 분석 + 조합



개별 분석 (modular analysis)

- 큰 프로그램을 각 부분(주로 함수)을 따로 분석 + 조합



개별 분석 (modular analysis)

- 각 함수마다 입출력, 쿼리 정보를 요약해놓고 조립

```

1  int inc(int i) { r = i + 1; return r; }
2
3  void f(int x, int y){
4      n = input();
5      if(n >= y){
6          y = n + 64;
7          x = y;
8      }
9      assert(n < x); // Query 1
10 }
11
12 void g(int z){
13     n = input();
14     assert(n < z); // Query 2
15 }
16
17 void main(){
18     a = inc(b);
19     c = inc(d);
20     f(a, b);
21     f(c, d);
22     g(a);
23     g(c);
24 }

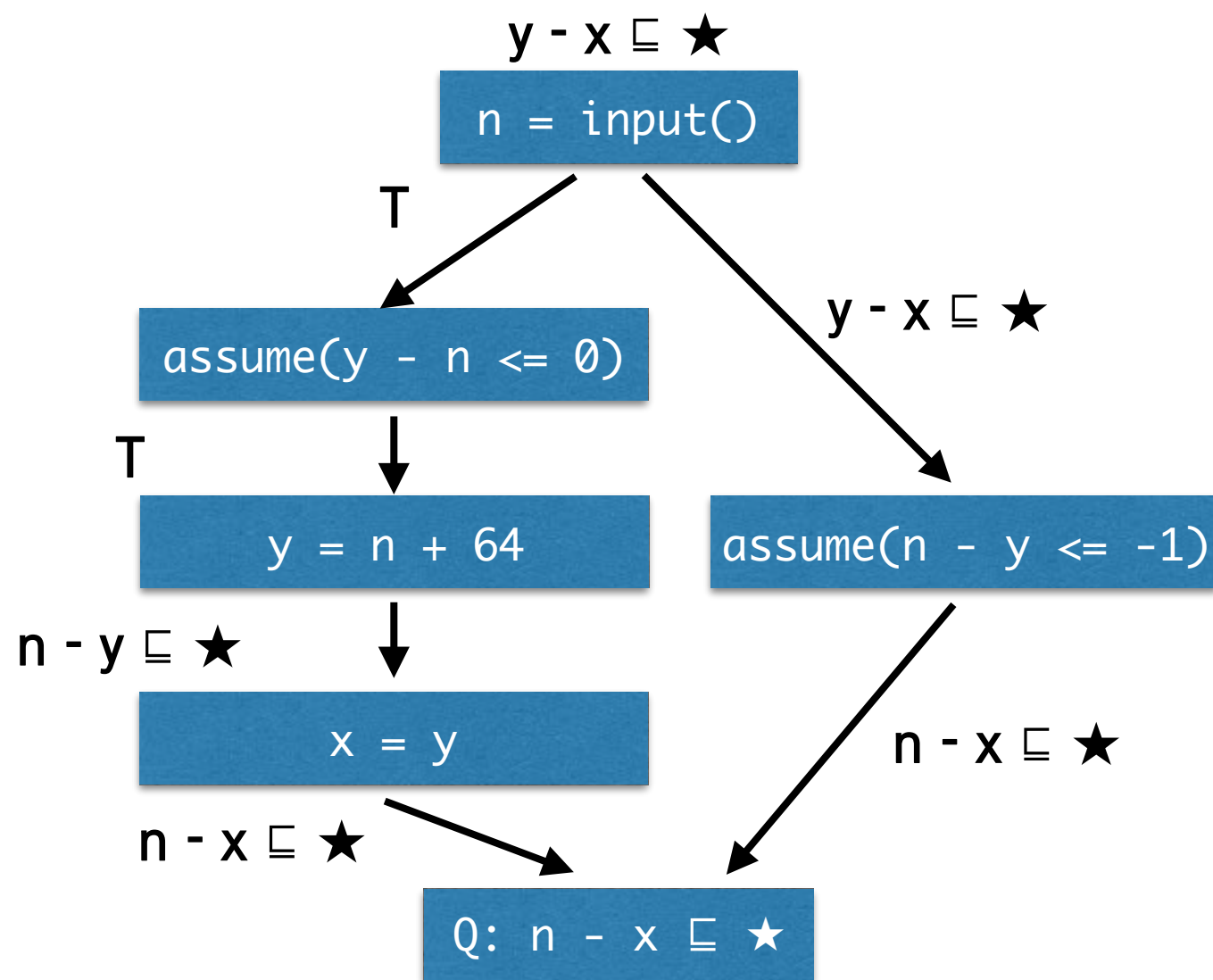
```

Function	Pre	Post	Query
inc	\top	$i - r \sqsubseteq \star \wedge r - i \sqsubseteq \star$	\emptyset
f	\top	\top	\emptyset
	$y - x \sqsubseteq \star$	$n - x \sqsubseteq \star \wedge \dots$	$\{1\}$
g	\top	\top	\emptyset
main	\top	$a - b \sqsubseteq \star \wedge \dots$	$\{1\}$

후진 분석

- 각 쿼리를 선택하기 위한 충분 조건 유추 (뒤로)

```
3 void f(int x, int y){  
4   n = input();  
5   if(n >= y){  
6     y = n + 64;  
7     x = y;  
8   }  
9   assert(n < x); // Query 1  
10 }
```



전진 분석

- 유추한 입력과 알수 없는 입력에 대한 출력을 유추 (앞으로)

```

1  int inc(int i) { r = i + 1; return r; }
2
3  void f(int x, int y){
4      n = input();
5      if(n >= y){
6          y = n + 64;
7          x = y;
8      }
9      assert(n < x); // Query 1
10 }
11

```

Function	Pre	Post
inc	\top	$i - r \sqsubseteq \star \wedge r - i \sqsubseteq \star$
f	\top	\top
	$y - x \sqsubseteq \star$	$n - x \sqsubseteq \star \wedge \dots$

요약과 조립

- 각 함수의 요약은 함수호출문의 의미로 사용

Function	Pre	Post
inc	\top	$i - r \sqsubseteq \star \wedge r - i \sqsubseteq \star$

\top

`a = inc(b);`



$a - b \sqsubseteq \star \wedge b - a \sqsubseteq \star$

`c = inc(d);`

$c - d \sqsubseteq \star \wedge d - c \sqsubseteq \star$

...

요약과 조립

- 각 입력이 만족되면 선택할 쿼리를 기록
 - 최종 목표 : 알수 없는 입력이 main 에 들어온 경우 선택할 쿼리

```

1  int inc(int i) { r = i + 1; return r; }
2
3  void f(int x, int y){
4      n = input();
5      if(n >= y){
6          y = n + 64;
7          x = y;
8      }
9      assert(n < x); // Query 1
10 }
11
12 void g(int z){
13     n = input();
14     assert(n < z); // Query 2
15 }
16
17 void main(){
18     a = inc(b);
19     c = inc(d);
20     f(a, b);
21     f(c, d);
22     g(a);
23     g(c);
24 }
    
```

Function	Pre	Post	Query
inc	\top	$i - r \sqsubseteq \star \wedge r - i \sqsubseteq \star$	\emptyset
f	\top	\top	\emptyset
	$y - x \sqsubseteq \star$	$n - x \sqsubseteq \star \wedge \dots$	$\{1\}$
g	\top	\top	\emptyset
main	\top	$a - b \sqsubseteq \star \wedge \dots$	$\{1\}$

필요한 관계와 문맥 유추

- 정확한 값 (★)을 만드는데 기여하는 변수와 문맥

```
int inc(int i) {  
    r = i + 1;  
    return r;  
}
```

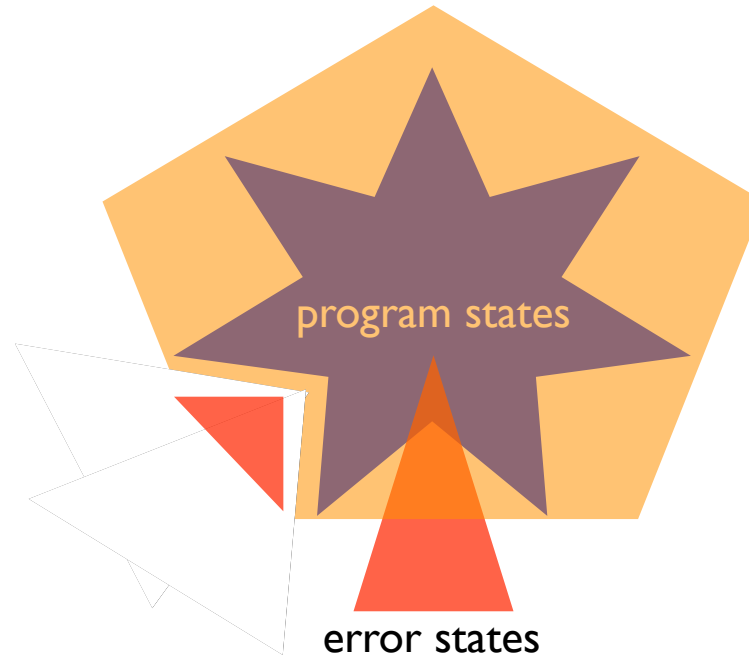
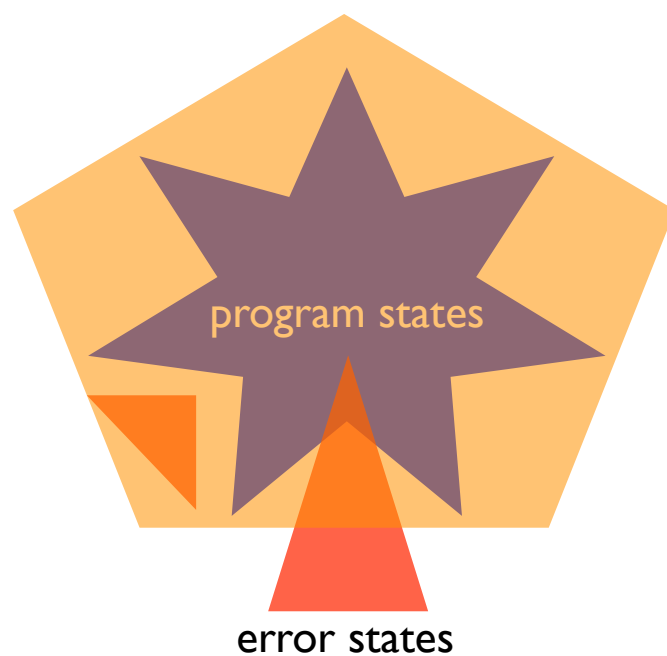
```
18: a = inc(b);
```

$r - i \sqsubseteq \star : (\{r, i\}, \{\})$ $i - r \sqsubseteq \star : (\{r, i\}, \{\})$
--

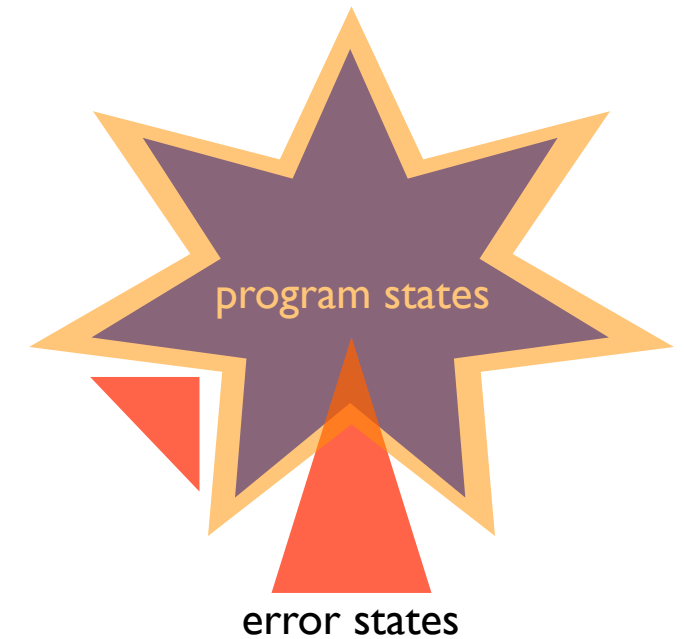
$a - b \sqsubseteq \star : (\{a, b, r, i\}, \{18\})$ $b - a \sqsubseteq \star : (\{a, b, r, i\}, \{18\})$
--

정리

- 예비 분석: 정확도 상승 기술 X가 필요한 부분을 가늠
 - 원칙: X는 최대한 정확하게, 나머지는 과감히 요약
- 본 분석: 예비 분석의 결과에 따라 선별적으로 정확하게

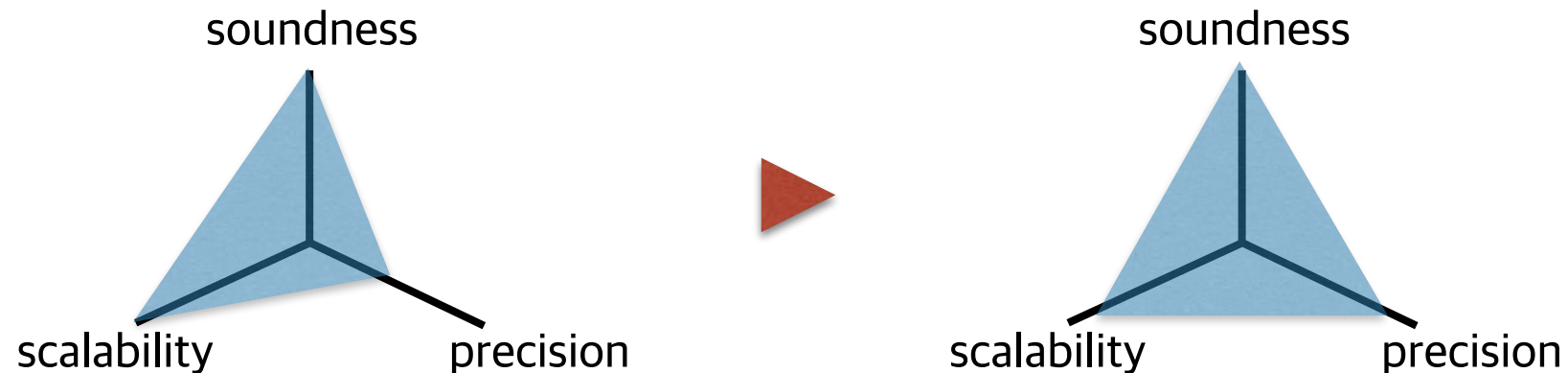


선별적 분석






기계 학습을 이용하여 선별적으로 정확하게 정적 분석

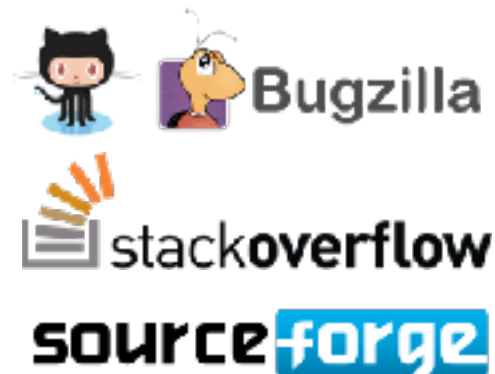
(Selective X-sensitive Analysis by Machine Learning)



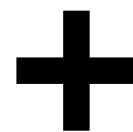
- Learning a Variable-Clustering Strategy for Octagon from Labeled Data Generated by a Static Analysis, SAS'16

목표

- 많은 데이터를 공부하며 스스로 진화하는 분석기
 - 데이터 : 비슷한 코드, 이전 버전, 사용자 피드백, 버그 리포트, 테스트 결과 등
- 다른 분야에서는 이미 성숙 :    ...



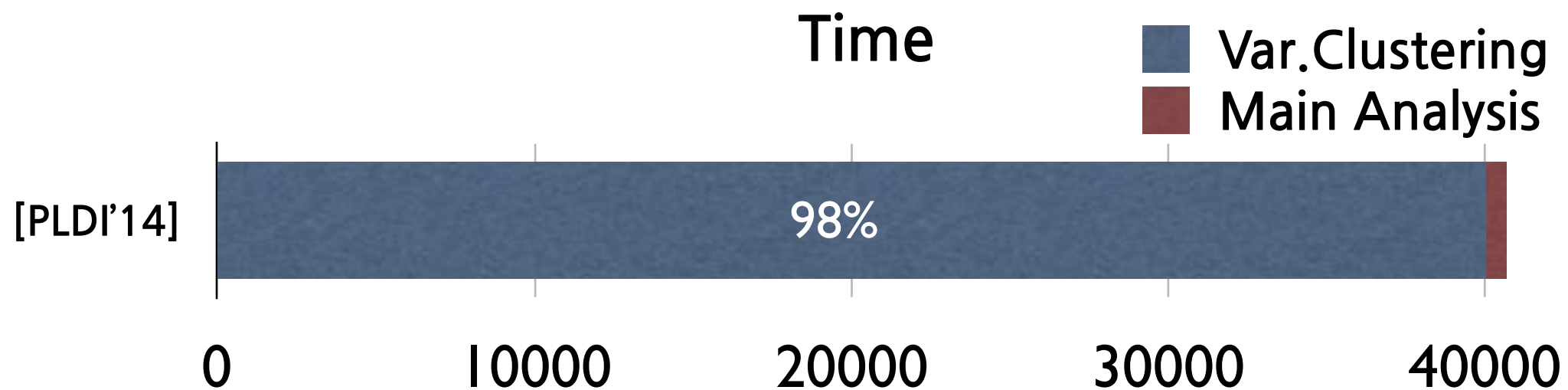
Big Data



Static Analyzer

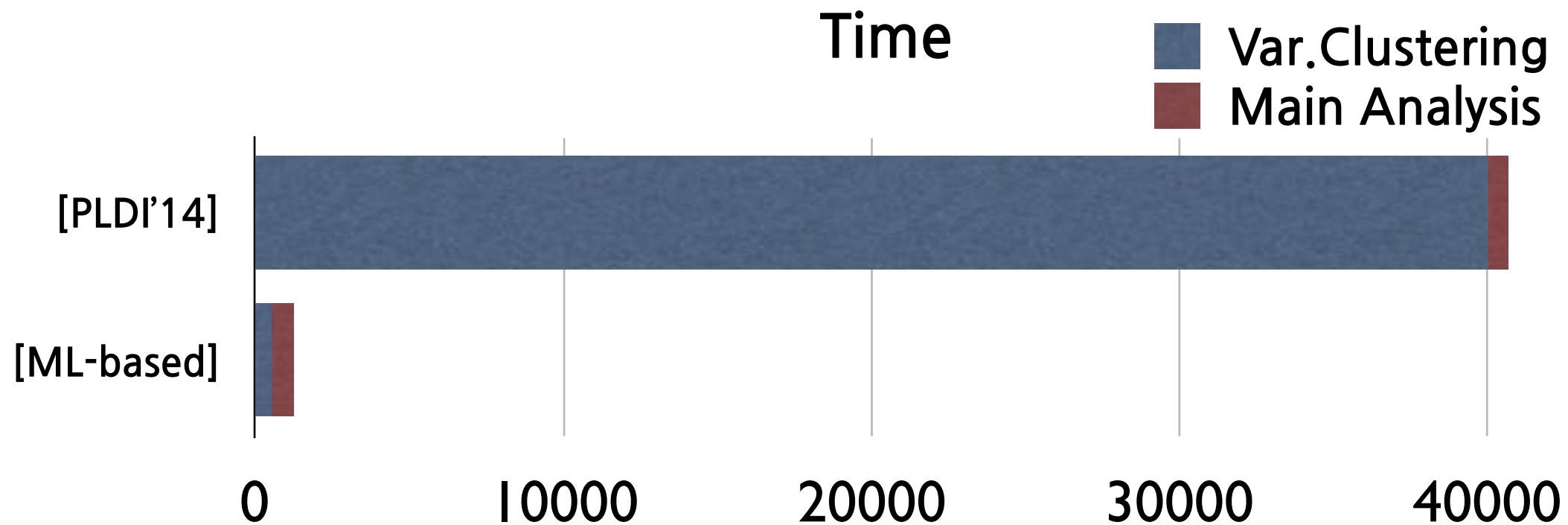
문제

- 예비 분석도 여전히 버거운 상황 (예. 관계 분석)
 - 모든 관계를 추적하는 예비 분석: **online estimator**
 - e.g.) 17 open source benchmarks (~100KLOC)



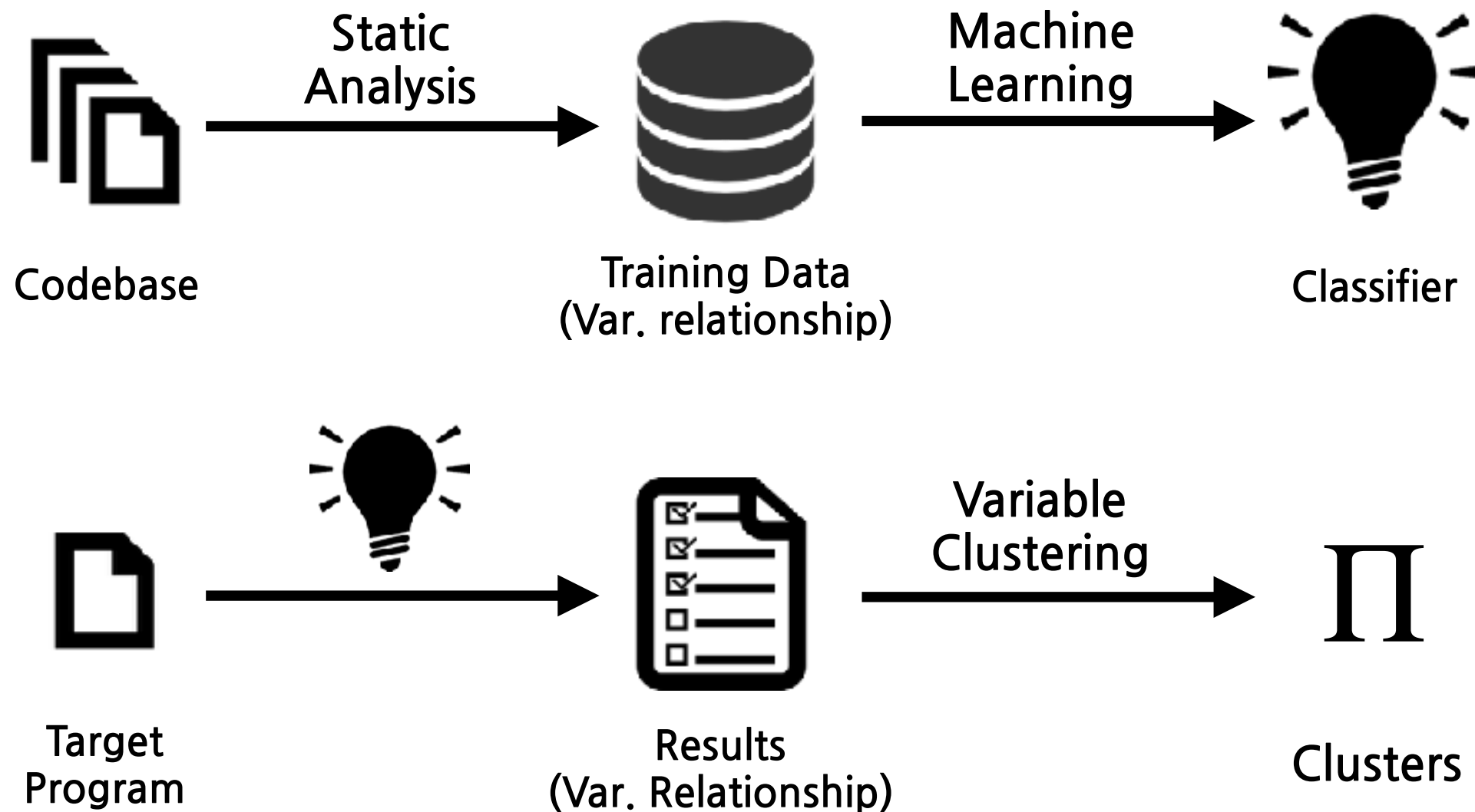
해결책

- 빅데이터로부터 필요한 변수 관계를 선별하는 전략 학습
 - 모든 관계를 추적하는 예비 분석: **offline teacher**
 - 33 배 빠르고 정확도는 비슷



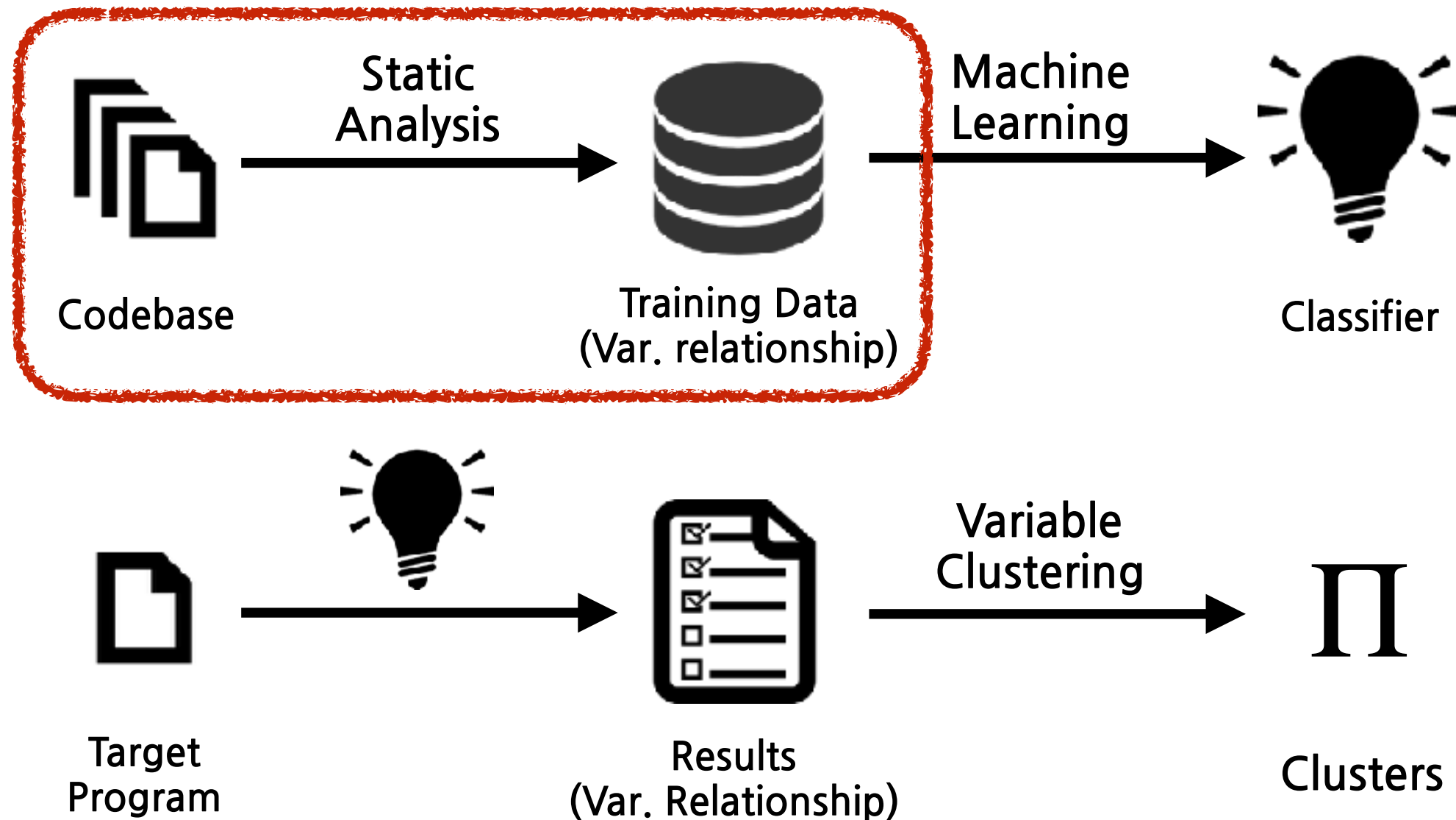
큰 그림

- 빅데이터로부터 필요한 변수 관계를 선별하는 전략 학습



큰 그림

- 빅데이터로부터 필요한 변수 관계를 선별하는 전략 학습



학습 데이터

- 꼬리표 $\{\oplus, \ominus\}$ 가 붙은 변수 쌍
- \oplus : 정확 ($< +\infty$), \ominus : 부정확 ($= +\infty$)

```
1 int a = b;
2 int c = input();           // User input
3 for (i = 0; i < b; i++) {
4     assert (i < a);         // Query 1
5     assert (i < c);         // Query 2
6 }
```

	a	b	c	i
a	0	0	∞	-1
b	0	0	∞	-1
c	∞	∞	0	∞
i	∞	∞	∞	0

$\oplus : \{(a,b), (a,i), (b,a) \dots\}$

$\ominus : \{(a,c), (b,c), (c,a) \dots\}$

Octagon Analysis

학습 데이터

- 예비 분석 결과로부터 자동 생성 [PLDI'14]
- 모든 관계 분석, 본 분석보다는 적은 비용

```

1  int a = b;
2  int c = input();           // User input
3  for (i = 0; i < b; i++) {
4      assert (i < a);        // Query 1
5      assert (i < c);        // Query 2
6  }

```

	a	b	c	i
a	0	0	∞	-1
b	0	0	∞	-1
c	∞	∞	0	∞
i	∞	∞	∞	0

Octagon Analysis

$$\gamma(\star) = \mathbb{Z}$$

$$\gamma(\top) = \mathbb{Z} \cup \{+\infty\}$$

$$\oplus : \{(a,b), (a,i), (b,a) \dots\}$$

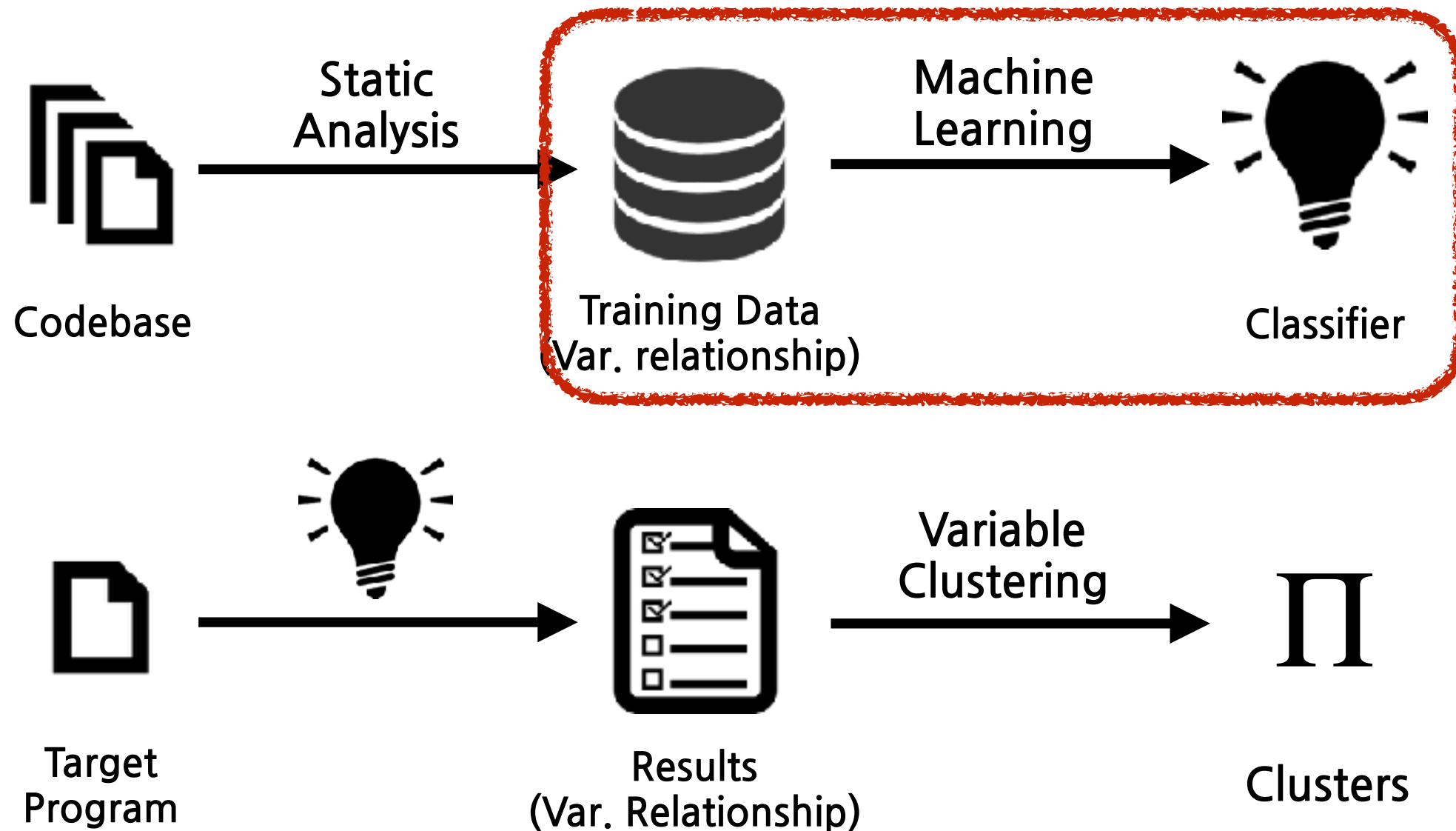
$$\ominus : \{(a,c), (b,c), (c,a) \dots\}$$

	a	b	c	i
a	★	★	T	★
b	★	★	T	★
c	T	T	★	T
i	T	T	T	★

Impact Pre-analysis

큰 그림

- 빅데이터로부터 필요한 변수 관계를 선별하는 전략 학습



특질 (feature)

- 프로그램 P 안에 있는 변수 쌍 (x, y) 에 관한 30가지 특질

(Positive situations for Octagon)

- $x=y+k$ or $y=x+k$
- $x \leq y+k$ or $y \leq x+k$
- $x=\text{malloc}(y)$ or $y=\text{malloc}(x)$
- $x[y]$ or $y[x]$
- ...

(Negative situations for Octagon)

- $x=cy$ or $y=cx$ ($c \neq 1$)
- $x=yz$ or $y=xz$
- $x=y/z$ or $y=x/z$
- ...

(General syntactic features)

- x or y is a field
- x and y represent sizes of arrays
- x or y is the size of a const string
- x or y is a global variable
- ...

(General semantic features)

- x or y has a finite interval
- x or y is a local var in a recursive function
- x, y are not accessed in the same function
- ...

특질 (feature)

- 특질의 중요도 (Gini Index 로 측정)
- 부정 & 보편 > 긍정 & 특수

(Positive situations for Octagon)

- $x=y+k$ or $y=x+k$
- $x\leq y+k$ or $y\leq x+k$
- $x=\text{malloc}(y)$ or $y=\text{malloc}(x)$
- $x[y]$ or $y[x]$
- ...

(Negative situations for Octagon)

- $x=cy$ or $y=cx$ ($c \neq 1$)
- $x=yz$ or $y=xz$
- $x=y/z$ or $y=x/z$
- ...

(General syntactic features)

- x or y is a field
- x and y represent sizes of arrays
- x or y is the size of a const string
- x or y is a global variable
- ...

(General semantic features)

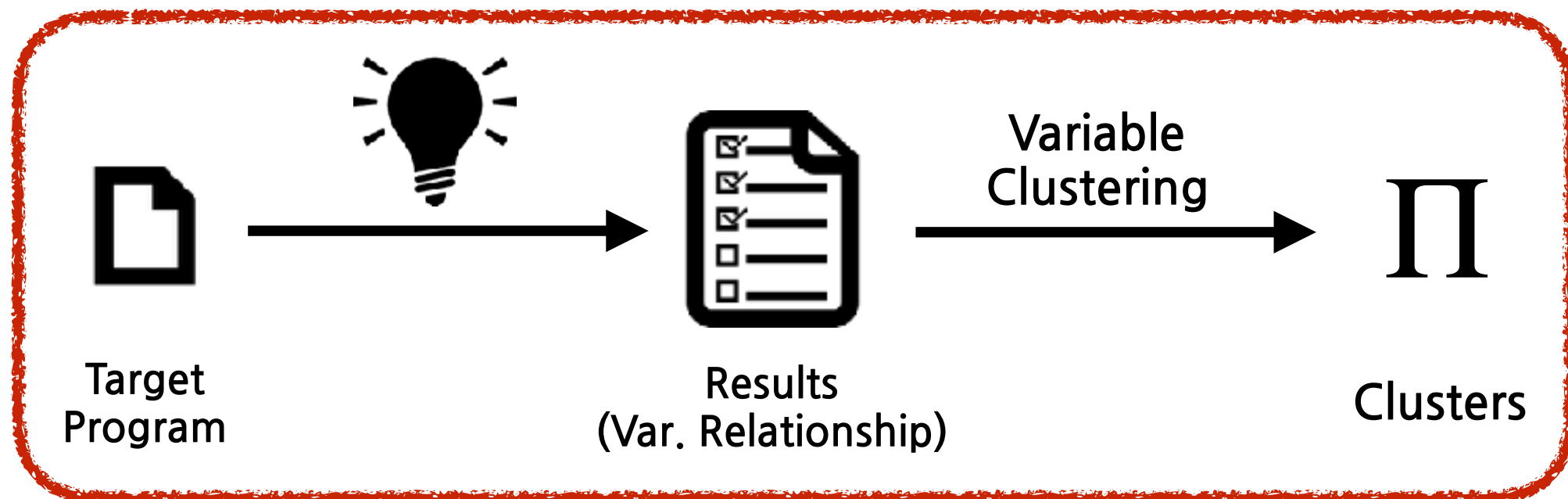
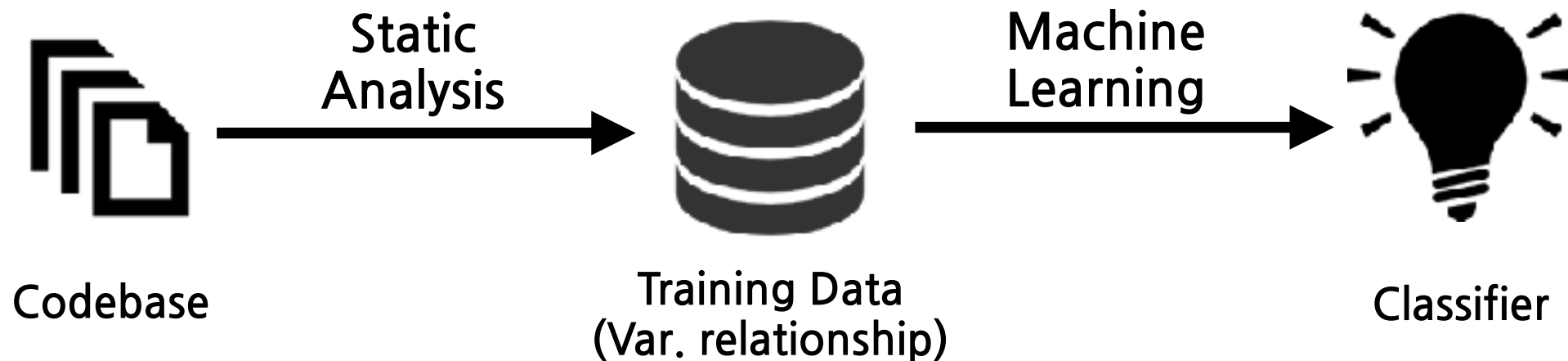
- x or y has a finite interval
- x or y is a local var in a recursive function
- x, y are not accessed in the same function
- ...

분류기 (Classifier)

- 변수 쌍 분류기 $\mathcal{C} : Var \times Var \rightarrow \{\oplus, \ominus\}$ 학습
 - 잘 알려진 ML 알고리즘 (decision tree)
 - 선형 모델보다 훨씬 풍부한 표현력
 - c.f.) logistic regression 으로 학습: 10~12x 느림

큰 그림

- 빅데이터로부터 필요한 변수 관계를 선별하는 전략 학습



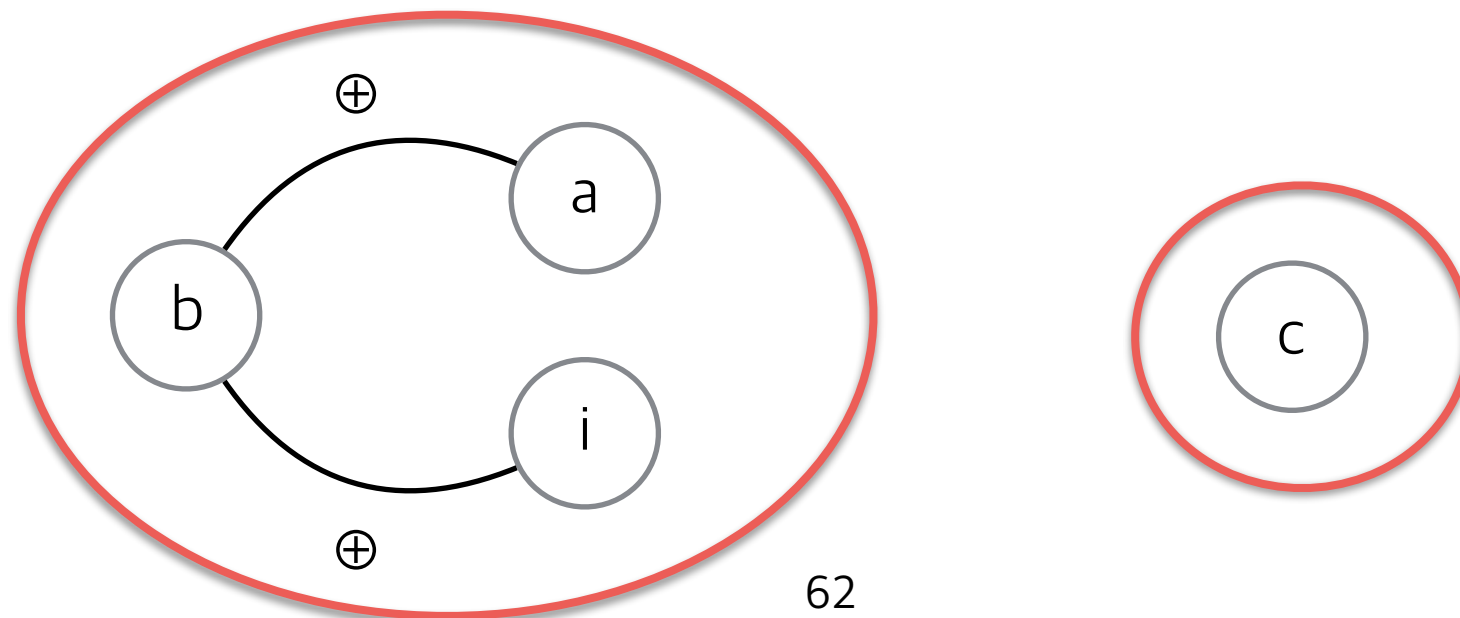
변수 묶음 전략

- \oplus -표 변수쌍을 같은 묶음에
- transitive 관계도 자연스럽게 포함

```

1 int a = b;
2 int c = input();           // User input
3 for (i = 0; i < b; i++) {
4     assert (i < a);        // Query 1
5     assert (i < c);        // Query 2
6 }
    
```

	C(x,y)
(a,b)	\oplus
(a,i)	\ominus
(b,i)	\oplus
(a,c)	\ominus
...	...



실험 결과

- Effectiveness (leave-one-out cross validation)

Program	LOC	#Abs.Loc.	# Alarms			Time(s)		
			Itv	Impt	ML	Itv	Impt	ML
brutefir	103	54	4	0	0	0	0	0
consol	298	165	20	10	10	0	0	0
id3	512	527	15	6	6	0	0	1
spell	2,213	450	20	8	17	0	1	1
mp3rename	2,466	332	33	3	3	0	1	1
irmp3	3,797	523	2	0	0	1	2	3
barcode	4,460	1,738	235	215	215	2	9	6
httptunnel	6,174	1,622	52	29	27	3	35	5
e2ps	6,222	1,437	119	58	58	3	6	3
bc	13,093	1,891	371	364	364	14	252	16
less	23,822	3,682	625	620	625	83	2,354	87
bison	56,361	14,610	1,988	1,955	1,955	137	4,827	237
pies	66,196	9,472	795	785	785	49	14,942	95
icecast-	68,564	6,183	239	232	232	51	109	107
raptor	76,378	8,889	2,156	2,148	2,148	242	17,844	345
dico	84,333	4,349	402	396	396	38	156	51
lsh	110,898	18,880	330	325	325	33	139	251
Total			7,406	7,154	7,166	656	40,677	1,207

실험 결과

- Effectiveness (leave-one-out cross validation)

Program	LOC	#Abs.Loc.	# Alarms			Time(s)		
			Itv	Impt	ML	Itv	Impt	ML
brutefir	103	54	4	0	0	0	0	0
consol	298	165	20	10	10	0	0	0
id3	512	527	15	6	6	0	0	1
spell	2,213	450	20	8	17	0	1	1
mp3rename	2,466	332	33	3	3	0	1	1
irmp3	3,797	523	2	0	0	1	2	3
barcode	4,460	1,738	235	215	215	2	9	6
httptunnel	6,174	1,622	52	29	27	3	35	5
e2ps	6,222	1,437	119	58	58	3	6	3
bc	13,093	1,891	371	364	364	14	252	16
less	23,822	3,682	625	620	625	83	2,354	87
bison	56,361	14,610	1,988	1,955	1,955	137	4,827	237
pies	66,196	9,472	795	785	785	49	14,942	95
icecast-	68,564	6,183	239	232	232	51	109	107
raptor	76,378	8,889	2,156	2,148	2,148	242	17,844	345
dico	84,333	4,349	402	396	396	38	156	51
lsh	110,898	18,880	330	325	325	33	139	251
Total			7,406	7,154	7,166	656	40,677	1,207

-252
64

-240

실험 결과

- Effectiveness (leave-one-out cross validation)

Program	LOC	#Abs.Loc.	# Alarms			Time(s)		
			Itv	Impt	ML	Itv	Impt	ML
brutefir	103	54	4	0	0	0	0	0
consol	298	165	20	10	10	0	0	0
id3	512	527	15	6	6	0	0	1
spell	2,213	450	20	8	17	0	1	1
mp3rename	2,466	332	33	3	3	0	1	1
irmp3	3,797	523	2	0	0	1	2	3
barcode	4,460	1,738	235	215	215	2	9	6
httptunnel	6,174	1,622	52	29	27	3	35	5
e2ps	6,222	1,437	119	58	58	3	6	3
bc	13,093	1,891	371	364	364	14	252	16
less	23,822	3,682	625	620	625	83	2,354	87
bison	56,361	14,610	1,988	1,955	1,955	137	4,827	237
pies	66,196	9,472	795	785	785	49	14,942	95
icecast-	68,564	6,183	239	232	232	51	109	107
raptor	76,378	8,889	2,156	2,148	2,148	242	17,844	345
dico	84,333	4,349	402	396	396	38	156	51
lsh	110,898	18,880	330	325	325	33	139	251
Total			7,406	7,154	7,166	656	40,677	1,207

-252
65

-240

실험 결과

- Effectiveness (leave-one-out cross validation)

Program	LOC	#Abs.Loc.	# Alarms			Time(s)		
			Itv	Impt	ML	Itv	Impt	ML
brutefir	103	54	4	0	0	0	0	0
consol	298	165	20	10	10	0	0	0
id3	512	527	15	6	6	0	0	1
spell	2,213	450	20	8	17	0	1	1
mp3rename	2,466	332	33	3	3	0	1	1
irmp3	3,797	523	2	0	0	1	2	3
barcode	4,460	1,738	235	215	215	2	9	6
httptunnel	6,174	1,622	52	29	27	3	35	5
e2ps	6,222	1,437	119	58	58	3	6	3
bc	13,093	1,891	371	364	364	14	252	16
less	23,822	3,682	625	620	625	83	2,354	87
bison	56,361	14,610	1,988	1,955	1,955	137	4,827	237
pies	66,196	9,472	795	785	785	49	14,942	95
icecast-	68,564	6,183	239	232	232	51	109	107
raptor	76,378	8,889	2,156	2,148	2,148	242	17,844	345
dico	84,333	4,349	402	396	396	38	156	51
lsh	110,898	18,880	330	325	325	33	139	251
Total			7,406	7,154	7,166	656	40,677	1,207
							x62	x2

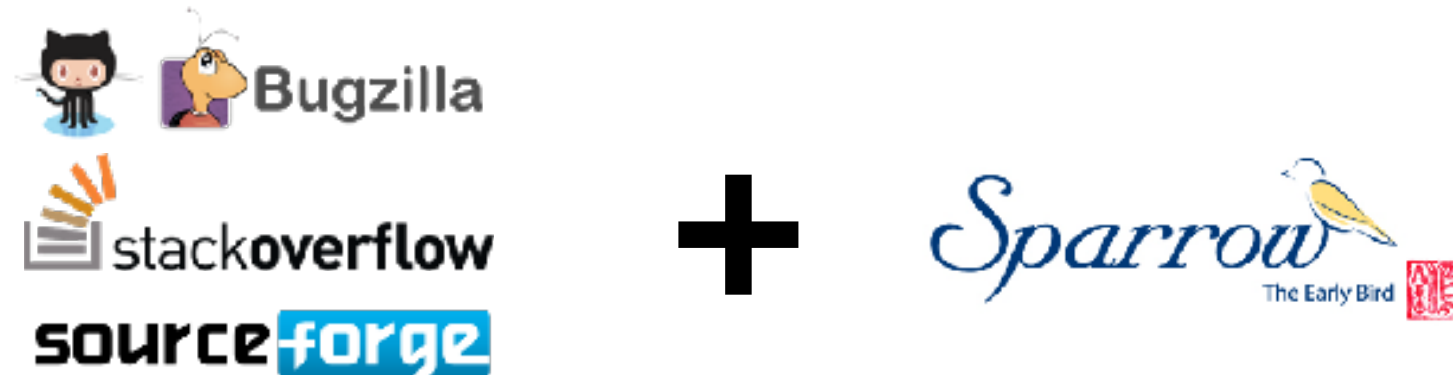
실험 결과

- Generalization : 작은 프로그램으로만 (<60KLOC) 학습

Program	LOC	Abs. Loc.	# Alarms			Time(s)		
			Itv	All	Small	Itv	All	Small
pies	66,196	9,472	795	785	785	49	95	98
icecast-	68,564	6,183	239	232	232	51	113	99
raptor	76,378	8,889	2,156	2,148	2,148	242	345	388
dico	84,333	4,349	402	396	396	38	61	62
lsh	110,898	18,880	330	325	325	33	251	251
Total			7,406	3,886	3,886	413	865	898

+4%

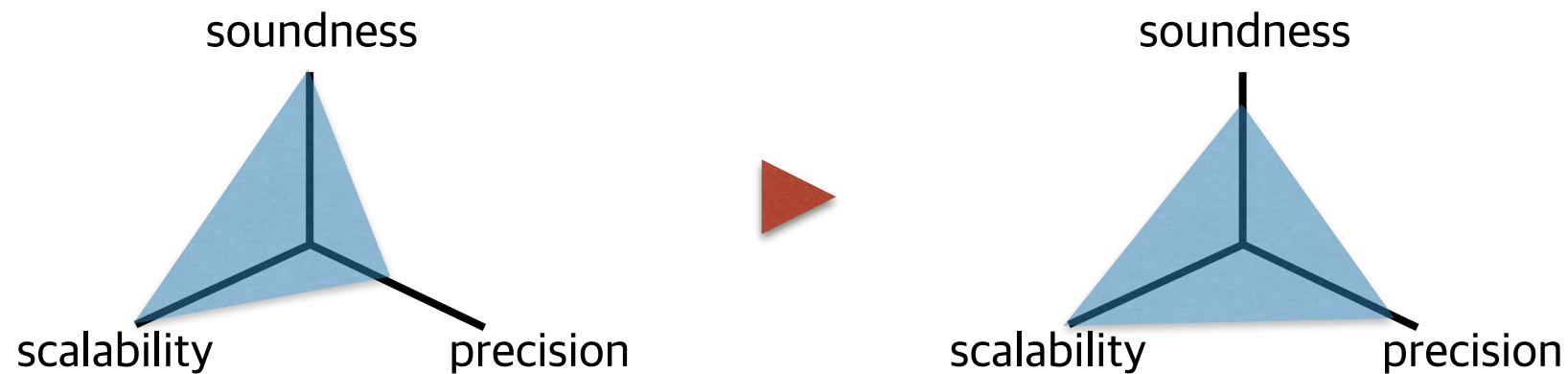
정리



- 선별적 관계 분석을 더욱 유연하게
 - **기계학습** (학생) + **정적분석** (선생님)
- 예비분석만 이용하는 기술보다 33배 빠른 결과

기계 학습을 이용하여 선별적으로 안전하게 정적 분석

(Selectively Unsound Analysis by Machine Learning)



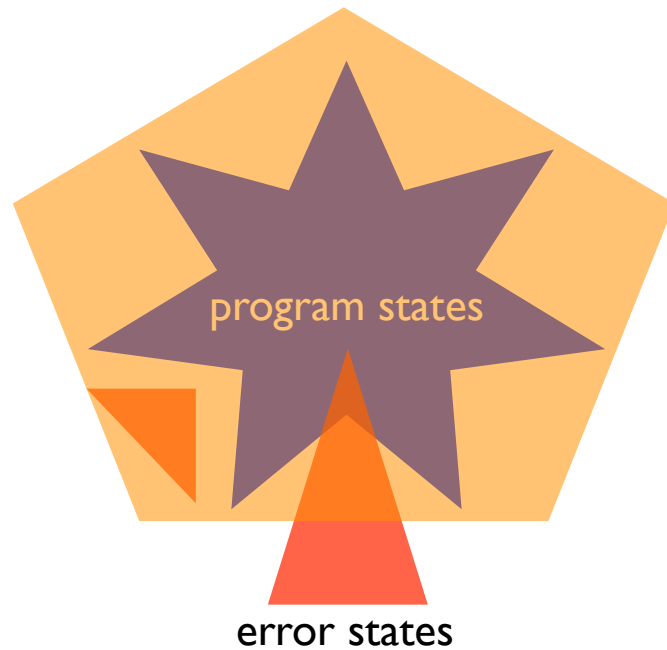
- Machine-Learning-Guided Selectively Unsound Static Analysis, ICSE'17

선별적으로 안전한 분석

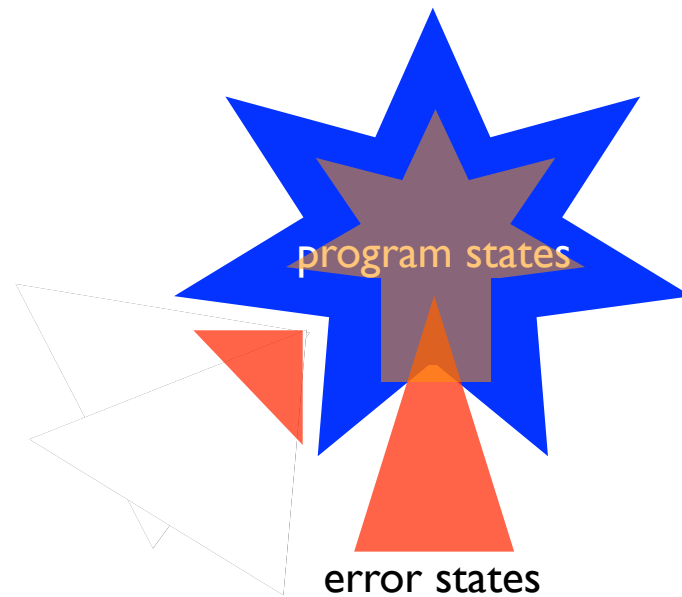
- 안전성을 포기하는 전략을 조심스럽게 선별적으로
- 예) 순환문 해체, 명령어 무시

`while(e){ C }` ▶ `if(e){ C }`

`A;lib(C);B;` ▶ `A;B;`



sound



selectively unsound
70



unsound

예제

- (완전히) 안전한 버퍼 오버런 분석기
- interval domain + standard widening



```
str = "hello world";
for(i=0; !str[i]; i++) // buffer access 1
    skip;

size = positive_input();
for(i=0; i<size; i++)
    skip;

... = str[i];           // buffer access 2
```

예제

- (완전히) 안전한 버퍼 오버런 분석기
- interval domain + standard widening

```
str = "hello world";  
for(i=0; !str[i]; i++) // buffer access 1   
    skip;  
  
size = positive_input();  
for(i=0; i<size; i++)  
    skip;  
  
... = str[i]; // buffer access 2 
```

str.size: [12, 12]

i: [0, +∞]

size: [0, +∞]

i: [0, +∞]

예제

- 획일적으로 안전성을 포기하는 버퍼 오버런 분석기
 - 모든 순환문을 획일적으로 해체

```
str = "hello world";  
i = 0;  
if (!str[i])           // buffer access 1  
    skip;  
  
size = positive_input();  
i = 0;  
if (i < size)  
    skip;  
  
... = str[i];         // buffer access 2
```

예제

- 획일적으로 안전성을 포기하는 버퍼 오버런 분석기
 - 모든 순환문을 획일적으로 해체

```
str = "hello world";  
i = 0;  
if (!str[i]) // buffer access 1  
    skip;  
  
size = positive_input();  
i = 0;  
if (i < size)  
    skip;  
  
... = str[i]; // buffer access 2
```

i: [0, 0]

i: [0, 0]

예제

- 선별적으로 불필요한 안전성을 포기하는 버퍼 오버런 분석기

```
str = "hello world";  
i = 0;  
if(!str[i])           // buffer access 1  
    skip;  
  
size = positive_input();  
for(i = 0; i < size; i++)  
    skip;  
  
... = str[i];         // buffer access 2
```

i: [0, 0]

i: [0, +∞]

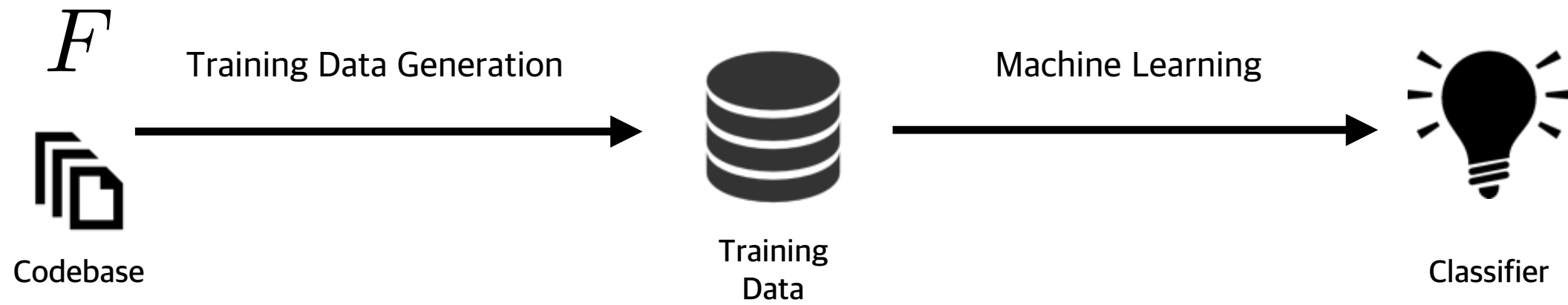


목표

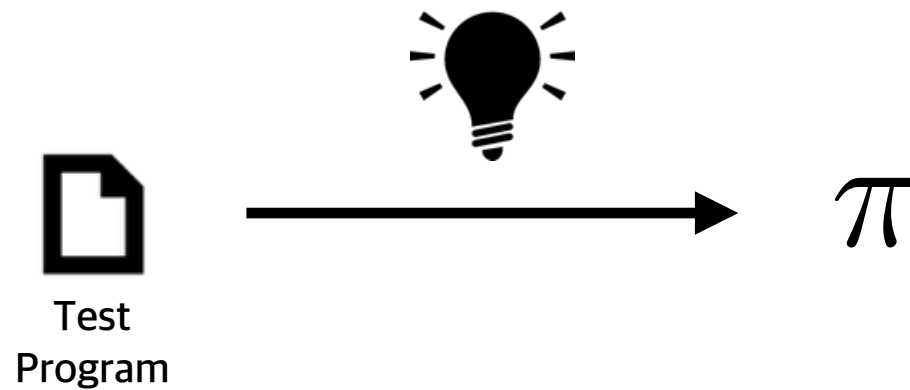
$$F \in Pgm \times \Pi \rightarrow \mathcal{A}$$

- 선별적으로 안전성을 포기하는 전략 $\pi \in \Pi$ 찾기
 - 안전하게 분석할 순환문 ($\Pi = 2^{Loop}$)
 - 안전하게 분석할 라이브러리 호출 ($\Pi = 2^{Lib}$)
- p 에만 선별적으로 안전성을 포기하는 전략 적용 ($p \notin \pi$)
 - 예) `while(e){ C }` ▶ `if(e){ C }`
`A;lib();B;` ▶ `A;B;`

큰 그림



Training Harmless Unsoundness



Inferring Harmless Unsoundness

학습 데이터 생성

- 준비물 : 버그 위치가 알려져 있는 프로그램
- 안전성을 포기할 시 정확도는 상승하지만 버그는 놓치지 않는 부품
 - 예) 순환문, 라이브러리 호출

Algorithm 1 Training data generation

```
1:  $\mathbf{T} := \emptyset$ 
2: for all  $(P_i, B_i) \in \mathbf{P}$  do
3:    $A_i = F(P_i, \mathbf{1})$ 
4:    $(A_t, A_f) := (A_i \cap B_i, A_i \setminus B_i)$ 
5:   for all  $j \in \mathbb{J}_{P_i}$  do
6:      $A'_i = F(P_i, \mathbf{1} \setminus \{j\})$ 
7:      $(A'_t, A'_f) = (A'_i \cap B_i, A'_i \setminus B_i)$ 
8:     if  $|A'_t| = |A_t| \wedge |A'_f| < |A_f|$  then
9:        $\mathbf{T} := \mathbf{T} \cup \{f(j)\}$ 
10:    end if
11:  end for
12: end for
```

학습 데이터 생성

- 준비물 : 버그 위치가 알려져 있는 프로그램
- 안전성을 포기할 시 정확도는 상승하지만 버그는 놓치지 않는 부품
 - 예) 순환문, 라이브러리 호출

Algorithm 1 Training data generation

```
1:  $\mathbf{T} := \emptyset$ 
2: for all  $(P_i, B_i) \in \mathbf{P}$  do
3:    $A_i = F(P_i, \mathbf{1})$ 
4:    $(A_t, A_f) := (A_i \cap B_i, A_i \setminus B_i)$ 
5:   for all  $j \in \mathbb{J}_{P_i}$  do
6:      $A'_i = F(P_i, \mathbf{1} \setminus \{j\})$ 
7:      $(A'_t, A'_f) = (A'_i \cap B_i, A'_i \setminus B_i)$ 
8:     if  $|A'_t| = |A_t| \wedge |A'_f| < |A_f|$  then
9:        $\mathbf{T} := \mathbf{T} \cup \{f(j)\}$ 
10:    end if
11:  end for
12: end for
```

(프로그램, 버그 위치)

학습 데이터 생성

- 준비물 : 버그 위치가 알려져 있는 프로그램
- 안전성을 포기할 시 정확도는 상승하지만 버그는 놓치지 않는 부품
 - 예) 순환문, 라이브러리 호출

Algorithm 1 Training data generation

```
1:  $\mathbf{T} := \emptyset$ 
2: for all  $(P_i, B_i) \in \mathbf{P}$  do
3:    $A_i = F(P_i, \mathbf{1})$ 
4:    $(A_t, A_f) := (A_i \cap B_i, A_i \setminus B_i)$ 
5:   for all  $j \in \mathbb{J}_{P_i}$  do
6:      $A'_i = F(P_i, \mathbf{1} \setminus \{j\})$ 
7:      $(A'_t, A'_f) = (A'_i \cap B_i, A'_i \setminus B_i)$ 
8:     if  $|A'_t| = |A_t| \wedge |A'_f| < |A_f|$  then
9:        $\mathbf{T} := \mathbf{T} \cup \{f(j)\}$ 
10:    end if
11:  end for
12: end for
```

안전한 분석 결과 (알람 개수)

학습 데이터 생성

- 준비물 : 버그 위치가 알려져 있는 프로그램
- 안전성을 포기할 시 정확도는 상승하지만 버그는 놓치지 않는 부품
 - 예) 순환문, 라이브러리 호출

Algorithm 1 Training data generation

```
1:  $\mathbf{T} := \emptyset$ 
2: for all  $(P_i, B_i) \in \mathbf{P}$  do
3:    $A_i = F(P_i, \mathbf{1})$ 
4:    $(A_t, A_f) := (A_i \cap B_i, A_i \setminus B_i)$ 
5:   for all  $j \in \mathbb{J}_{P_i}$  do
6:      $A'_i = F(P_i, \mathbf{1} \setminus \{j\})$ 
7:      $(A'_t, A'_f) := (A'_i \cap B_i, A'_i \setminus B_i)$ 
8:     if  $|A'_t| = |A_t| \wedge |A'_f| < |A_f|$  then
9:        $\mathbf{T} := \mathbf{T} \cup \{f(j)\}$ 
10:    end if
11:  end for
12: end for
```

특정 부품에 대한 안전성을
하나씩 포기하며 분석

학습 데이터 생성

- 준비물 : 버그 위치가 알려져 있는 프로그램
- 안전성을 포기할 시 정확도는 상승하지만 버그는 놓치지 않는 부품
 - 예) 순환문, 라이브러리 호출

Algorithm 1 Training data generation

```
1:  $\mathbf{T} := \emptyset$ 
2: for all  $(P_i, B_i) \in \mathbf{P}$  do
3:    $A_i = F(P_i, \mathbf{1})$ 
4:    $(A_t, A_f) := (A_i \cap B_i, A_i \setminus B_i)$ 
5:   for all  $j \in \mathbb{J}_{P_i}$  do
6:      $A'_i = F(P_i, \mathbf{1} \setminus \{j\})$ 
7:      $(A'_t, A'_f) = (A'_i \cap B_i, A'_i \setminus B_i)$ 
8:     if  $|A'_t| = |A_t| \wedge |A'_f| < |A_f|$  then
9:        $\mathbf{T} := \mathbf{T} \cup \{f(j)\}$ 
10:    end if
11:  end for
12: end for
```

거짓 경보는 감소하고
버그는 여전히 다 찾는다면
학습 데이터 (“무해한” 부품)

무해한 부품

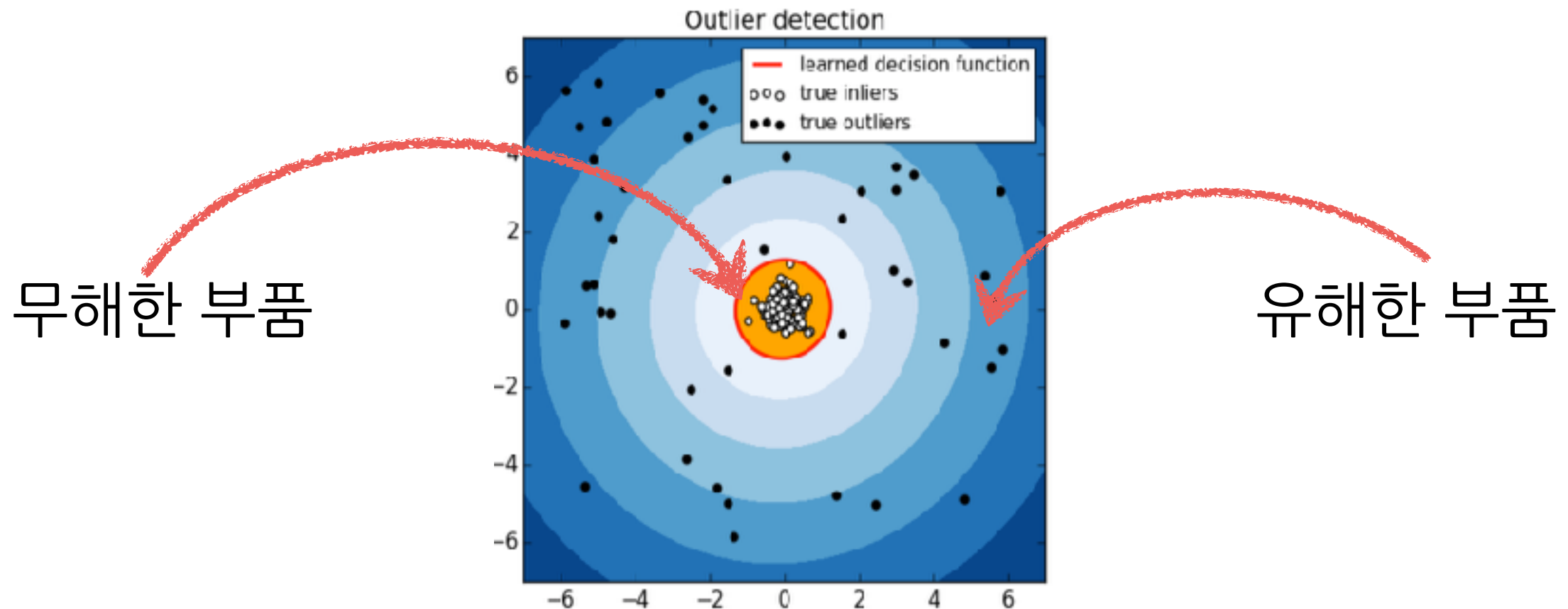
- 거짓 경보를 유발하는 부품: 전형적, 풍부
 - 프로그래밍 패턴, 분석기 도메인에 따른 특징
 - 거짓 경보 >> 실제 경보

• 예)

```
str = "hello world";  
for(i=0; !str[i]; i++)// buffer access 1  
    skip;  
  
size = positive_input();  
for(i=0; i<size; i++)  
    skip;  
  
... = str[i];           // buffer access 2
```

기계 학습

- 데이터의 전형적인 특징을 찾는데 특화된 알고리즘 사용
 - 대표적으로 one-class SVM



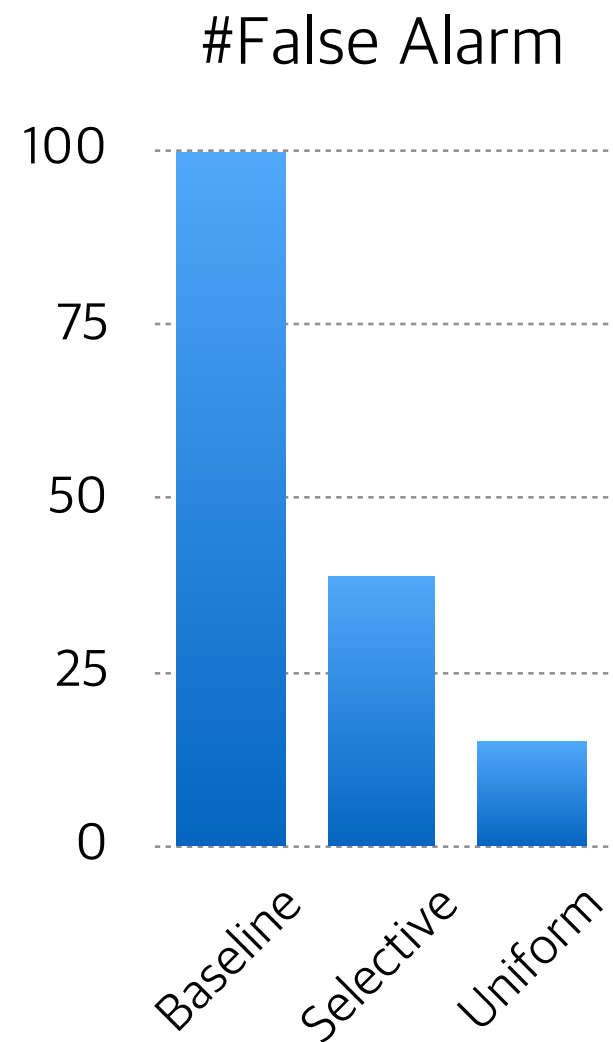
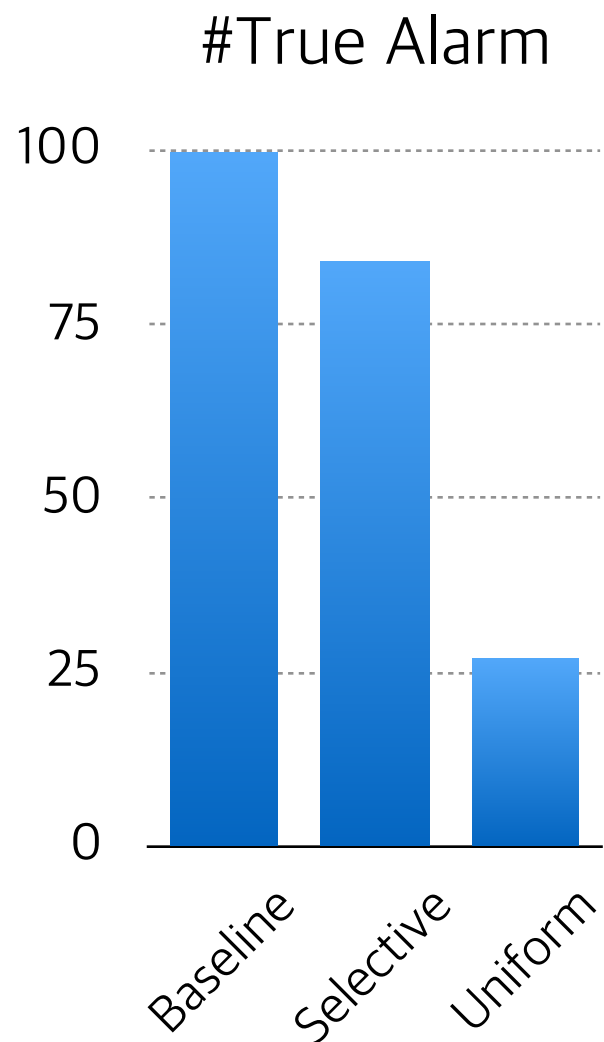
특질

- 22 가지 순환문 특질, 15 가지 라이브러리 호출 특질
 - 간단한 구문 + 의미 분석 결과 (숫자, 포인터, 문자열)

Target	Feature	Property	Type	Description
Loop	Null	Syntactic	Binary	Whether the loop condition contains nulls or not
	Const	Syntactic	Binary	Whether the loop condition contains constants or not
	Array	Syntactic	Binary	Whether the loop condition contains array accesses or not
	Conjunction	Syntactic	Binary	Whether the loop condition contains <code>&&</code> or not
	IdxSingle	Syntactic	Binary	Whether the loop condition contains an index for a single array in the loop
	IdxMulti	Syntactic	Binary	Whether the loop condition contains an index for multiple arrays in the loop
	IdxOutside	Syntactic	Binary	Whether the loop condition contains an index for an array outside of the loop
	InitIdx	Syntactic	Binary	Whether an index is initialized before the loop
	Exit	Syntactic	Numeric	The (normalized) number of exits in the loop
	Size	Syntactic	Numeric	The (normalized) size of the loop
	ArrayAccess	Syntactic	Numeric	The (normalized) number of array accesses in the loop
	ArithInc	Syntactic	Numeric	The (normalized) number of arithmetic increments in the loop
	PointerInc	Syntactic	Numeric	The (normalized) number of pointer increments in the loop
	Prune	Semantic	Binary	Whether the loop condition prunes the abstract state or not
	Input	Semantic	Binary	Whether the loop condition is determined by external inputs
	GVar	Semantic	Binary	Whether global variables are accessed in the loop condition
	FinInterval	Semantic	Binary	Whether a variable has a finite interval value in the loop condition
	FinArray	Semantic	Binary	Whether a variable has a finite size of array in the loop condition
	FinString	Semantic	Binary	Whether a variable has a finite string in the loop condition
	LCSIZE	Semantic	Binary	Whether a variable has an array of which the size is a left-closed interval
	LCOffset	Semantic	Binary	Whether a variable has an array of which the offset is a left-closed interval
	#AbsLoc	Semantic	Numeric	The (normalized) number of abstract locations accessed in the loop
Library	Const	Syntactic	Binary	Whether the parameters contain constants or not
	Void	Syntactic	Binary	Whether the return type is void or not
	Int	Syntactic	Binary	Whether the return type is int or not
	CString	Syntactic	Binary	Whether the function is declared in <code>string.h</code> or not
	InsideLoop	Syntactic	Binary	Whether the function is called in a loop or not
	#Args	Syntactic	Numeric	The (normalized) number of arguments
	DefParam	Semantic	Binary	Whether a parameter are defined in a loop or not
	UseRet	Semantic	Binary	Whether the return value is used in a loop or not
	UptParam	Semantic	Binary	Whether a parameter is update via the library call
	Escape	Semantic	Binary	Whether the return value escapes the caller
	GVar	Semantic	Binary	Whether a parameters points to a global variable
	Input	Semantic	Binary	Whether a parameters are determined by external inputs
	FinInterval	Semantic	Binary	Whether a parameter have a finite interval value
	#AbsLoc	Semantic	Numeric	The (normalized) number of abstract locations accessed in the arguments
	#ArgString	Semantic	Numeric	The (normalized) number of string arguments

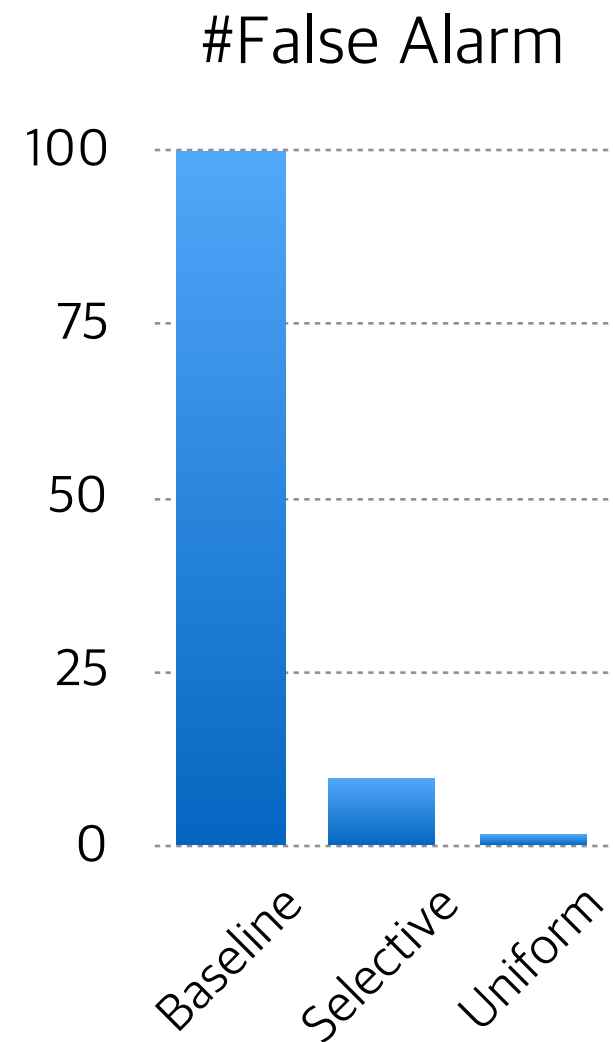
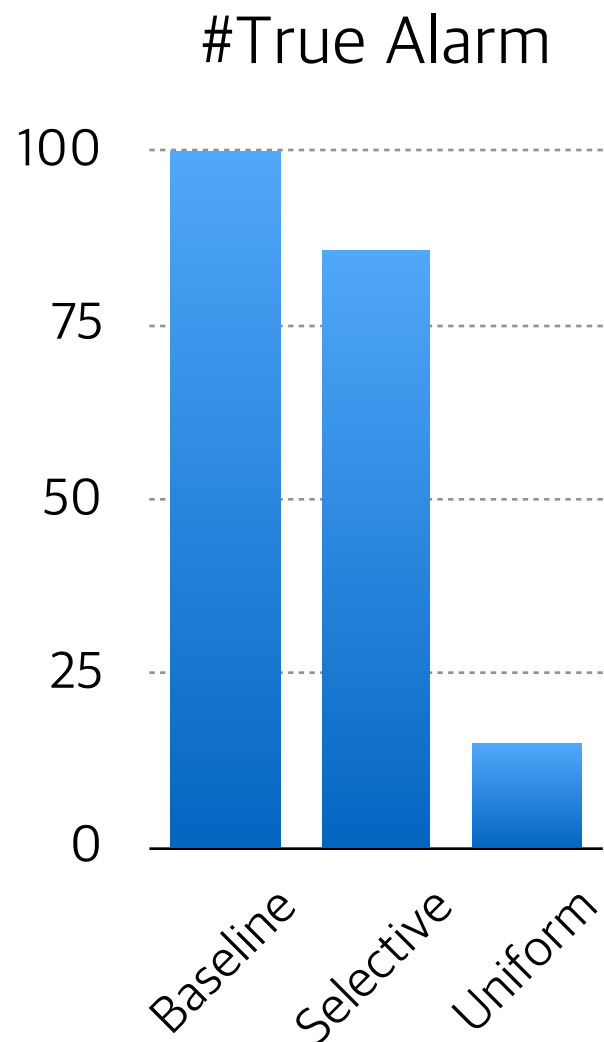
실험 결과

- 23 개 프로그램, 버퍼오버런 분석
- 대상 : 순환문, 라이브러리 호출



실험 결과

- 13 개 프로그램, 포맷 스트링 분석
- 대상 : 라이브러리 호출



후속 연구

- 기계 학습을 위한 특질 자동 생성
 - 아이디어: 해당 분석의 핵심을 드러내는 (작은) 프로그램

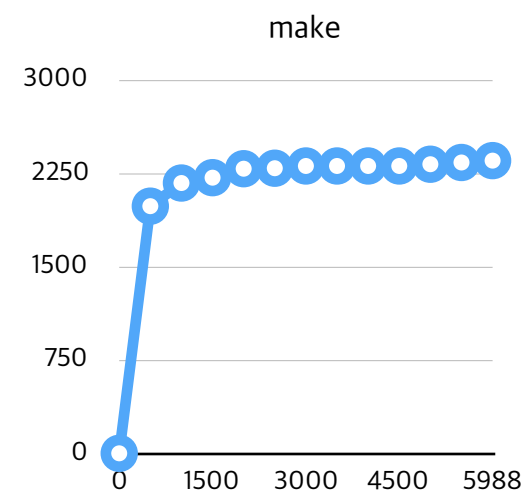
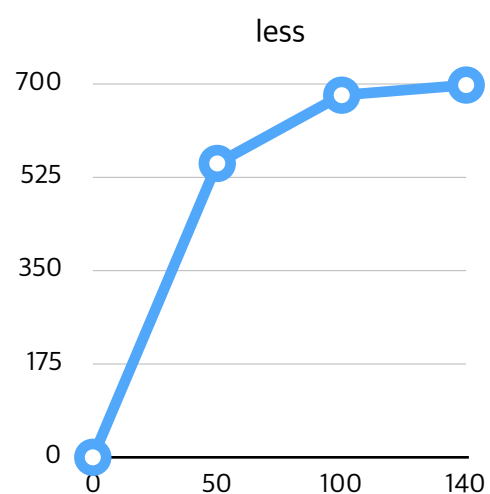
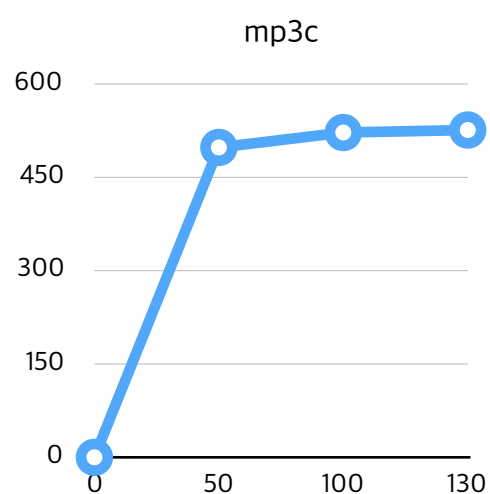
```
/* real code */
pos = 0;
path = malloc(temp);
path_len = tmp;
file = str_make(0);
if (*){
  while(pos < path_len){
    path[pos] = 1;
    str_add_char(path, pos);
    str_buf = nstr_to_str(path);
    pos++;
  }
}
```

≈

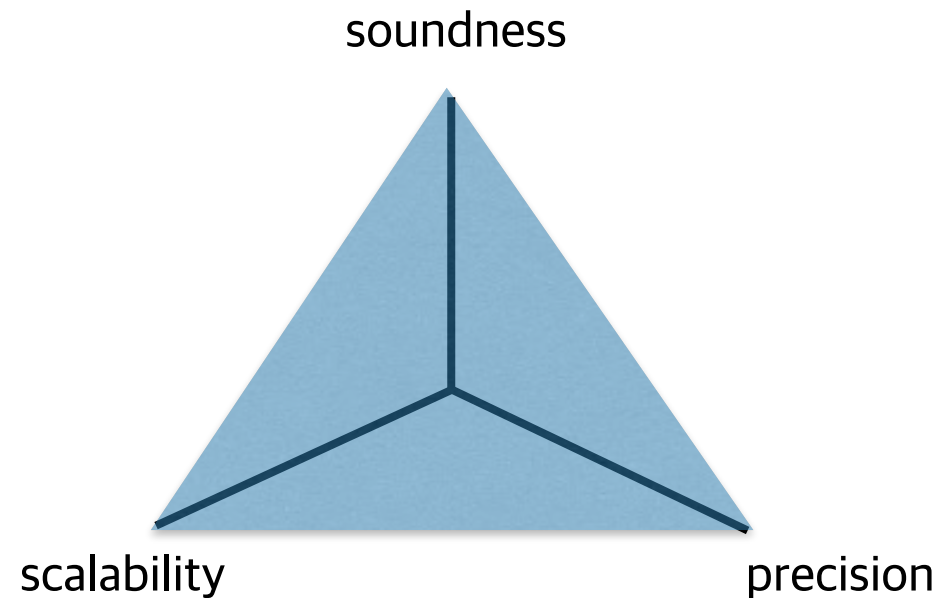
```
/* example */
arr = malloc(size);
i = 0;
while(i < size){
  arr[i] = 0;
  i++;
}
```


후속 연구

- 제한시간동안 최대한 선별적으로 정확하게 분석
 - 대부분은 “씩수”가 노란 알람 (초반에 발생해서 끝까지)
 - 아이디어: 분석중 알람이 난 부분은 그때그때 과감히 요약

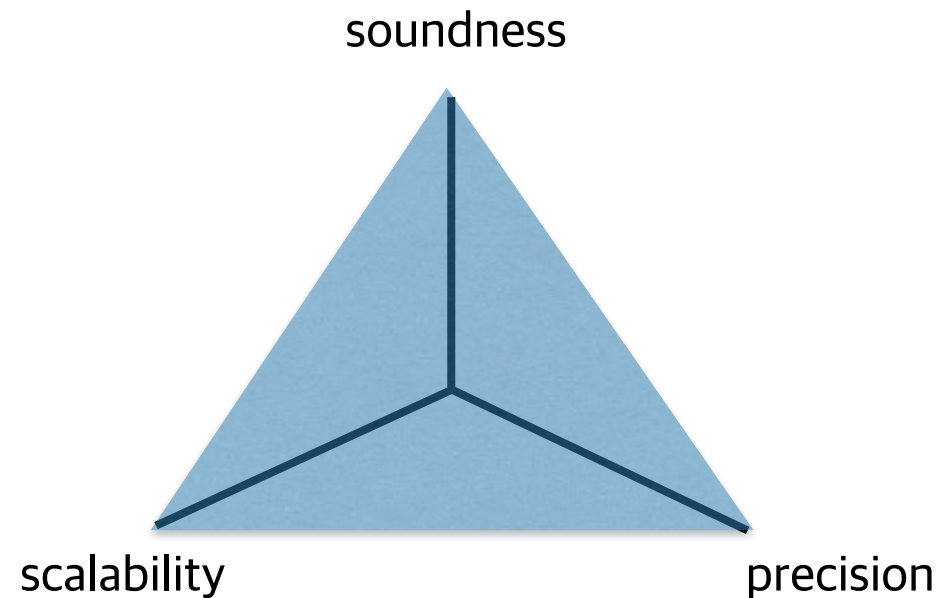


결론



- 안전, 정확, 빠른 정적 분석의 핵심: **선별적**
 - 예비 분석을 이용하여 **선별적**으로 정확하게 [PLDI'14, TOPLAS'16]
 - 기계 학습을 이용하여 **선별적**으로 정확하게 [SAS'16]
 - 기계 학습을 이용하여 **선별적**으로 안전하게 [ICSE'17]

결론



- 안전, 정확, 빠른 정적 분석의 핵심: **선별적**
 - 예비 분석을 이용하여 **선별적**으로 정확하게 [PLDI'14, TOPLAS'16]
 - 기계 학습을 이용하여 **선별적**으로 정확하게 [SAS'16]
 - 기계 학습을 이용하여 **선별적**으로 안전하게 [ICSE'17]

고맙습니다