

4절 차수

- 아래 두 알고리즘 중에서 어떤 알고리즘 선택?
  - 알고리즘 A의 시간 복잡도:  $100n$
  - 알고리즘 B의 시간 복잡도:  $0.01n^2$
- $0.01n^2$  과  $100n$  중에 누구의 복잡도가 더 커보임?

- 정답:  $n$ 의 크기에 따라 달라짐.
  - $n \leq 10,000$ : 알고리즘 B 선택
  - $n > 10,000$ : 알고리즘 A 선택

- 이유:

$$\begin{aligned} 0.01n^2 > 100n &\iff n^2 > 10000n \\ &\iff n > 10000 \end{aligned}$$

## "궁극적으로 더 빠름"

- ' $n > 10,000$ 인 임의의 양의 정수  $n$ 에 대해  $0.01n^2$ 이  $100n$ 보다 크다'를 다르게 표현하면 다음과 같음.
  - $0.01n^2$ 이  $100n$ 보다 궁극적으로 크다
- 다음 성질을 갖는 정수  $N \geq 0$ 이 존재할 때  $f(n)$ 이  $g(n)$ 보다 궁극적으로 크다 라고 말함:
  - $n > N$ 인 임의의 양의 정수  $n$ 에 대해  $f(n) > g(n)$ .

- 시간 복잡도의 기준으로 볼 경우:

- $g(n)$ 이  $f(n)$  보다 궁극적으로 빠르다  $\iff f(n)$ 이  $g(n)$  보다 궁극적으로 크다

차수( $\Theta$ , 세타)의 직관적 이해

**$\Theta(n)$ : 1차 시간 복잡도**

$100n,$      $0.001n + 100,$     ...

**$\Theta(n^2)$ : 2차 시간 복잡도**

$$5n^2, \quad 0.1n^2 + n + 100, \quad \dots$$



**$\Theta(n^3)$ : 3차 시간 복잡도**

$$7n^3, \quad n^3 + 5n^2 + 100n + 2, \quad \dots$$

## 고차항의 지배력

- 예제:  $0.1n^2 + n + 100$ 에서 2차 항  $0.1n^2$ 이 함수 전체를 지배함

$n$	$0.1n^2$	$0.1n^2 + n + 100$
10	10	120
20	40	160
50	250	400
100	1,000	1,200
1,000	100,000	101,100

## 복잡도 카테고리의 직관적 이해

- 1차, 2차, 3차 등의 시간복잡도를 갖는 함수들의 집합을 복잡도 카테고리라고 함.

**매우 효율적인 알고리즘의 복잡도 예제**

**$\Theta(1)$ : 상수 복잡도**

1, 17, 1000, 1000000, ...

**$\Theta(\lg n)$ : 로그 복잡도**

$$\lg n, \quad 2 \lg n, \quad \frac{1}{2} \cdot \lg n + 3, \quad \dots$$

**$\Theta(n)$ : 1차 복잡도**

$$n, \quad 100n, \quad 0.001n + 10000, \quad \dots$$

**$\Theta(n \lg n)$ : 엔 로그 엔( $n \log n$ ) 복잡도**

$$n \lg n, \quad 2n \lg n, \quad \frac{1}{2}n \lg n + \lg n + 3, \quad \dots$$



**경우에 따라 관측은 알고리즘의 복잡도 예제**

**$\Theta(n^2)$ : 2차 복잡도**

$$n^2, \quad 5n^2, \quad 0.1n^2 + n + 100, \quad \dots$$

**$\Theta(n^3)$ : 3차 복잡도**

$$n^3, \quad 0.001n^3 + 5n^2 + 2n + 7, \quad 100n^3 + n + 100, \quad \dots$$

**사실상 사용할 수 없는 알고리즘의 복잡도 예제**

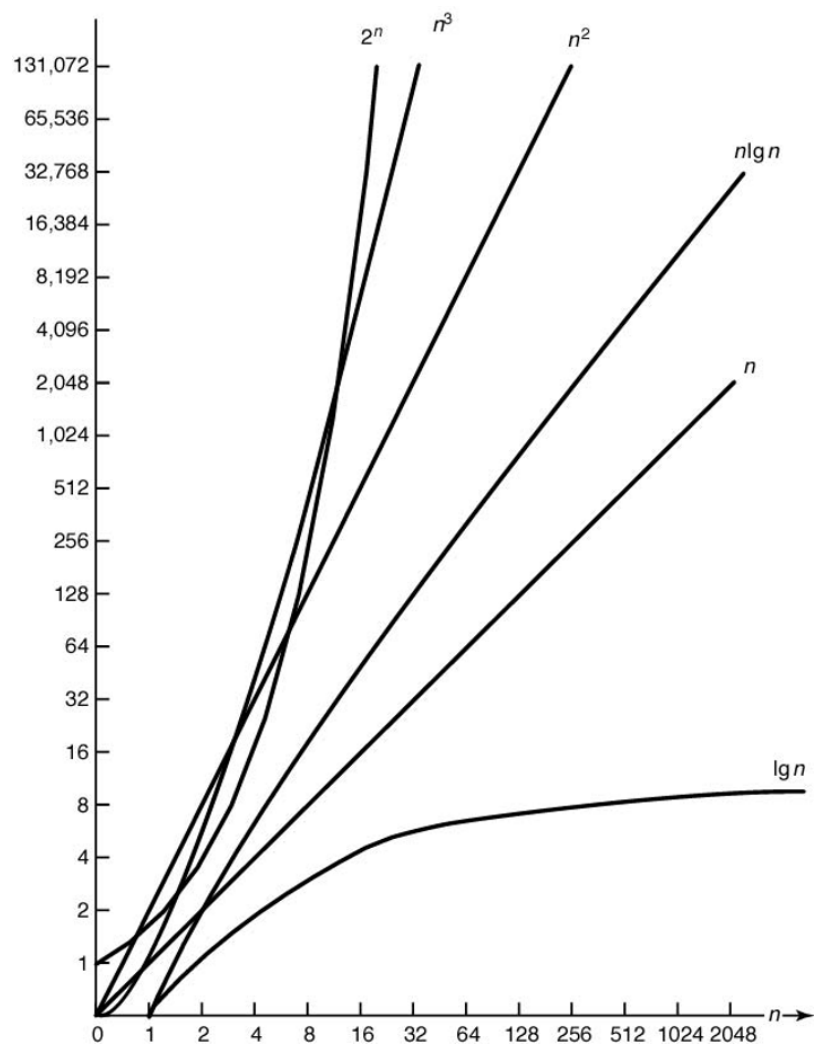
**$\Theta(2^n)$ : 지수 복잡도**

$$2^n, \quad 0.001 \cdot 2^n + 5n^3 + 2n + 7, \quad 3 \cdot 2^n + 100n^3 + n + 100, \quad \dots$$

**$\Theta(n!)$ : 팩토리얼 복잡도**

$$n!, \quad 2 \cdot n! + 5 \cdot 2^n + 5n^3 + 2n + 7, \quad 0.01n! + 3 \cdot 2^n + 100n^3 + n + 100, \quad \dots$$

## 복잡도 함수의 증가율



## 시간복잡도별 실행시간 비교

- 가정: 단위연산 실행시간 = 1 ns (원서 오류 주의: **약 0.230 초**)

$n$	$\lg n$	$n$	$n \lg n$	$n^2$	$n^3$	$2^n$
10	$0.003 \mu s$	$0.01 \mu s$	$0.033 \mu s$	$0.10 \mu s$	$1.0 \mu s$	$1 \mu s$
20	$0.004 \mu s$	$0.02 \mu s$	$0.086 \mu s$	$0.40 \mu s$	$8.0 \mu s$	1 ms
30	$0.005 \mu s$	$0.03 \mu s$	$0.147 \mu s$	$0.90 \mu s$	$27.0 \mu s$	1 초
40	$0.005 \mu s$	$0.04 \mu s$	$0.213 \mu s$	$1.60 \mu s$	$64.0 \mu s$	18.3 분
50	$0.006 \mu s$	$0.05 \mu s$	$0.282 \mu s$	$2.50 \mu s$	$125.0 \mu s$	13 일
$10^2$	$0.007 \mu s$	$0.10 \mu s$	$0.664 \mu s$	$10.00 \mu s$	1.0 ms	$4 \times 10^{13}$ 년



$n$	$\lg n$	$n$	$n \lg n$	$n^2$	$n^3$	$2^n$
$10^3$	$0.010 \mu s$	$1.00 \mu s$	$9.966 \mu s$	$1.00 \text{ ms}$	$1.0 \text{ 초}$	
$10^4$	$0.013 \mu s$	$10.00 \mu s$	$130.000 \mu s$	$100.00 \text{ ms}$	$16.7 \text{ 분}$	
$10^5$	$0.017 \mu s$	$0.10 \text{ ms}$	$1.670 \text{ ms}$	$10.00 \text{ 초}$	$11.6 \text{ 일}$	
$10^6$	$0.020 \mu s$	$1.00 \text{ ms}$	$19.930 \text{ ms}$	$16.70 \text{ 초}$	$31.7 \text{ 년}$	
$10^7$	$0.023 \mu s$	$0.01 \text{ 초}$	$0.230 \text{ 초}$	$1.16 \text{ 일}$	$31,709 \text{ 년}$	
$10^8$	$0.027 \mu s$	$0.10 \text{ 초}$	$2.660 \text{ 초}$	$115.70 \text{ 일}$	$3.17 \times 10^7 \text{ 년}$	
$10^9$	$0.030 \mu s$	$1.00 \text{ 초}$	$29.900 \text{ 초}$	$31.70 \text{ 년}$		

차수 정의

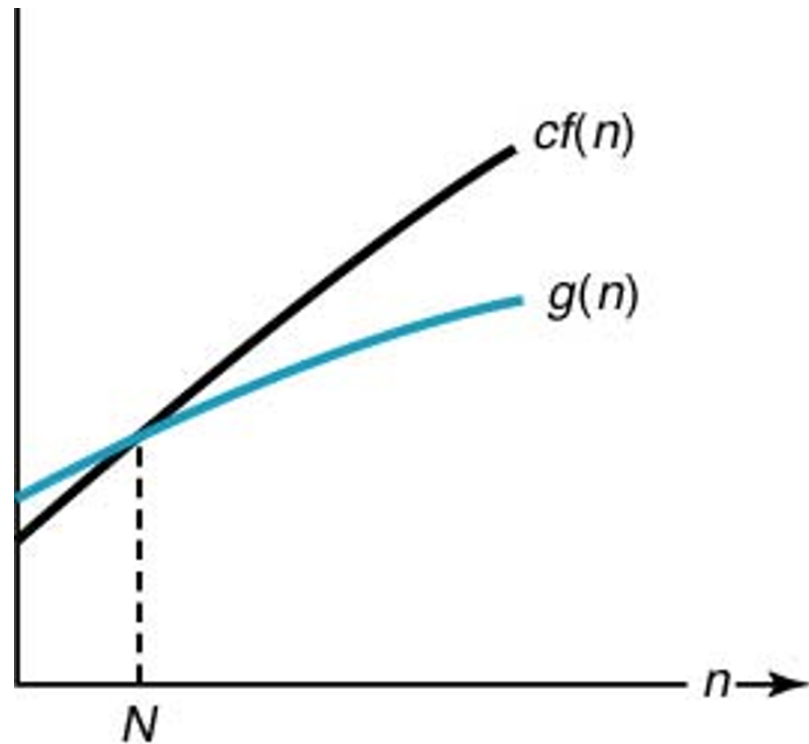
- 차수( $\Theta$ )를 엄밀하게 정의하려면 "큰  $O$ (big  $O$ )"와 " $\Omega$ (Omega, 오메가)" 개념 필요

## '큰 $O$ ' 표기법

- 다음 성질을 갖는 양의 실수  $c$ 와 음이 아닌 정수  $N$ 이 존재할 때  $g(n) \in O(f(n))$  성립:
  - $n \geq N$ 인 임의의 정수  $n$ 에 대해  $g(n) \leq c \cdot f(n)$

- $g(n) \in O(f(n))$  읽는 방법:
  - $g(n)$ 은  $f(n)$ 의 큰  $O$ 이다.
  - $g(n)$ 의 점근적 상한은  $f(n)$ 이다.

- 의미: 입력크기  $n$ 에 대해 시간 복잡도  $g(n)$ 의 수행시간은 궁극적으로  $f(n)$ 보다 나쁘지는 않다.

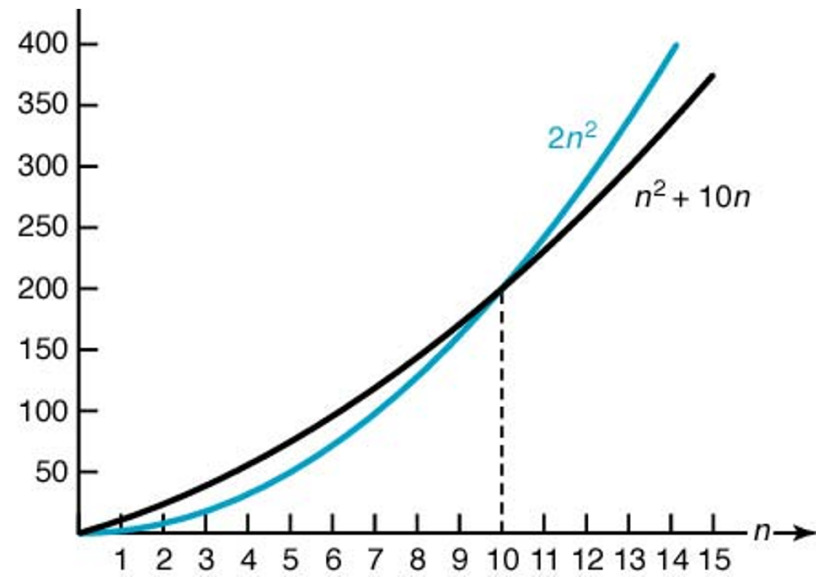


(a)  $g(n) \in O(f(n))$

'큰  $O$ ' 표기법 예제

- $n^2 + 10n \in O(n^2)$ 
  - $n \geq 10$ 인 경우:
$$n^2 + 10n \leq 2n^2$$
  - 그러므로  $c = 2$ 와  $N = 10$  선택





- $5n^2 \in O(n^2)$ 
  - $n \geq 0$ 인 경우:  
 $5n^2 \leq 5n^2$
  - 그러므로  $c = 5$ 와  $N = 0$  선택

- $\frac{n(n-1)}{2} \in O(n^2)$

- $n \geq 0$ 인 경우:

$$n(n-1)/2 \leq \frac{n^2}{2}$$

- 그러므로  $c = 1/2$ 과  $N = 0$  선택

- $n^2 \in O(n^2 + 10n)$ 
  - $n \geq 0$ 인 경우:
$$n^2 \leq 1 \times (n^2 + 10n)$$
  - 그러므로  $c = 1$ 과  $N = 0$  선택

- $n \in O(n^2)$ 
  - $n \geq 1$ 인 경우:  
$$n \leq 1 \times n^2$$
  - 그러므로  $c = 1$ 과  $N = 1$  선택

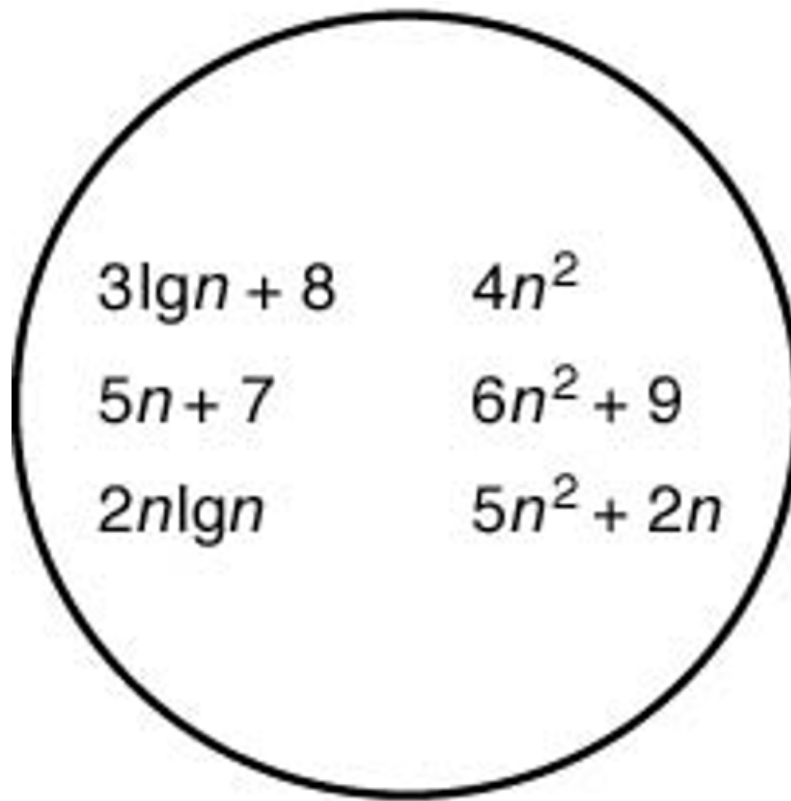
- $n^3 \notin O(n^2)$

- $c$ 와  $N$ 을 아무리 크게 지정하더라도,  $N$  보다 큰 어떤 수  $n$ 에 대해 다음이 성립:

$$n^3 > c \cdot n^2$$

- 예를 들어,  $n > c$ 로 잡으면 됨.

- $O(n^2)$ : 특정 양의 실수  $c$ 에 대해  $c n^2$  보다 궁극적으로 작은 값을 가지는 함수들의 집합



(a)  $O(n^2)$

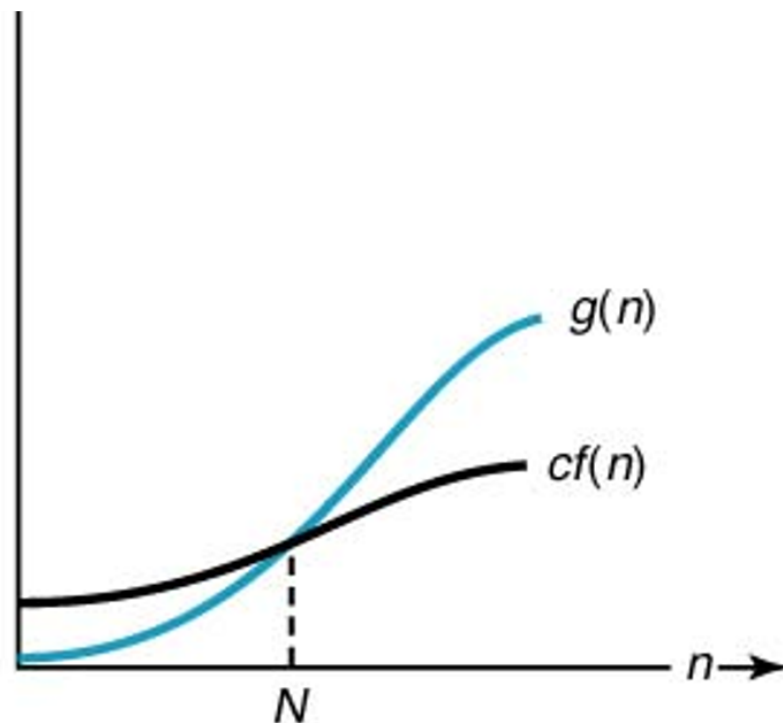
## $\Omega$ 표기법

- 다음 성질을 갖는 양의 실수  $c$ 와 음이 아닌 정수  $N$ 이 존재할 때  $g(n) \in \Omega(f(n))$  성립:
  - $n \geq N$ 인 임의의 정수  $n$ 에 대해  $g(n) \geq c \cdot f(n)$



- $g(n) \in \Omega(f(n))$  읽는 방법:
  - $g(n)$ 은  $f(n)$ 의 오메가이다.
  - $g(n)$ 의 점근적 하한은  $f(n)$ 이다.

- 의미: 입력크기  $n$ 에 대해 시간 복잡도  $g(n)$ 의 수행시간은 궁극적으로  $f(n)$ 보다 효율적이지 못하다.



(b)  $g(n) \in \Omega(f(n))$

## $\Omega$ 표기법 예제

- $n^2 + 10n \in \Omega(n^2)$

- $n \geq 0$ 인 경우:

$$n^2 + 10n \geq n^2$$

- 그러므로  $c = 1$ 과  $N = 0$  선택

- $5n^2 \in \Omega(n^2)$

- $n \geq 0$ 인 경우:

$$5n^2 \geq 1 \cdot n^2$$

- 그러므로,  $c = 1$ 과  $N = 0$  선택

- $\frac{n(n-1)}{2} \in \Omega(n^2)$

- $n \geq 2$ 인 경우:

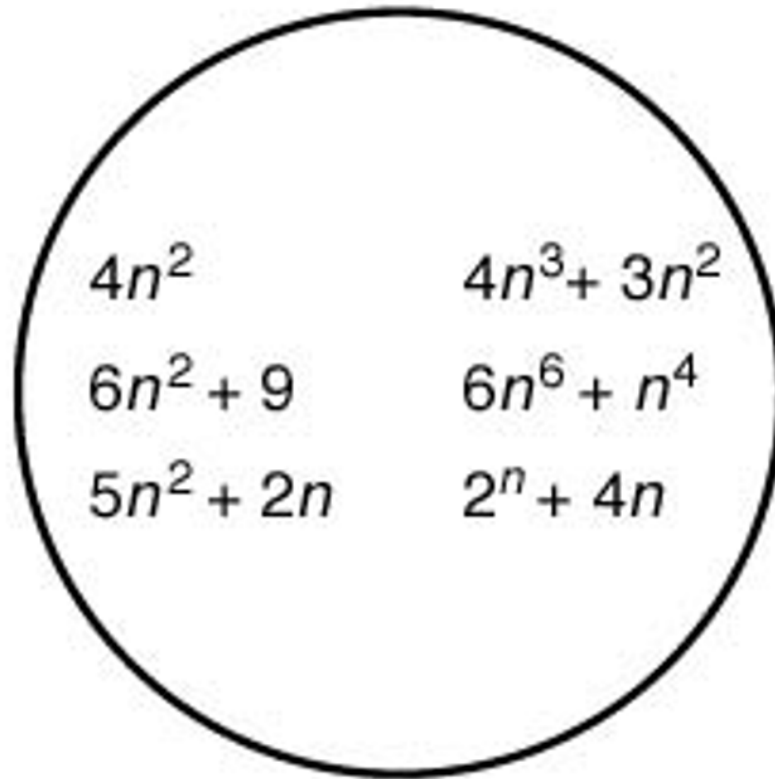
$$\frac{n(n-1)}{2} \geq \frac{1}{4}n^2$$

- 그러므로  $c = 1/4$ 과  $N = 2$  선택

- $n^3 \in \Omega(n^2)$ 
  - $n \geq 1$ 인 경우:  $n^3 \geq 1 \cdot n^2$
  - 그러므로,  $c = 1$ 과  $N = 1$  선택

- $n \notin \Omega(n^2)$ 
  - $c$ 를 아무리 작게,  $N$ 을 아무리 크게 지정하더라도,  $n \leq c \cdot n^2$ 을 만족시키는  $n \geq N$ 이 존재.
  - 예를 들어,  $n \geq 1/c$ 로 잡으면 됨.

- $\Omega(n^2)$ : 특정 양의 실수  $c$ 에 대해  $c n^2$  보다 궁극적으로 큰 값을 가지는 함수들의 집합



(b)  $\Omega(n^2)$

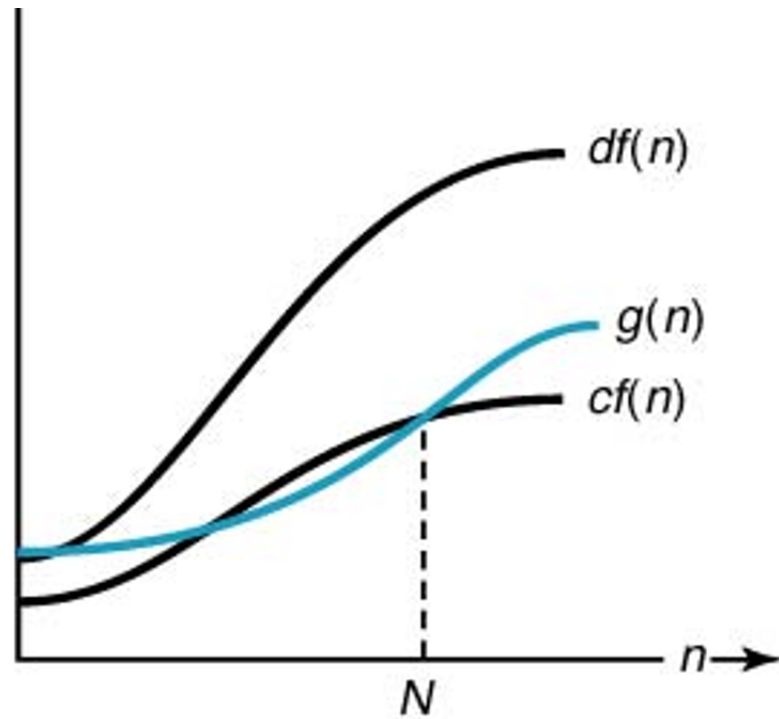


## Θ 표기법

$$\Theta(f(n)) = O(f(n)) \cap \Omega(f(n))$$

- 즉, 다음 성질을 갖는 양의 실수  $c$ 와  $d$ , 그리고 음이 아닌 정수  $N$ 이 존재할 때  $g(n) \in \Theta(f(n))$  성립:
  - $n \geq N$ 인 임의의 정수  $n$ 에 대해  $c \cdot f(n) \leq g(n) \leq d \cdot f(n)$

- $g(n) \in \Theta(f(n))$  읽는 방법:
  - $g(n)$ 의  $f(n)$ 의 차수이다.



(c)  $g(n) \in \Theta(f(n))$

## Θ 표기법 예제

- $\frac{n(n-1)}{2} \in \Theta(n^2)$ :

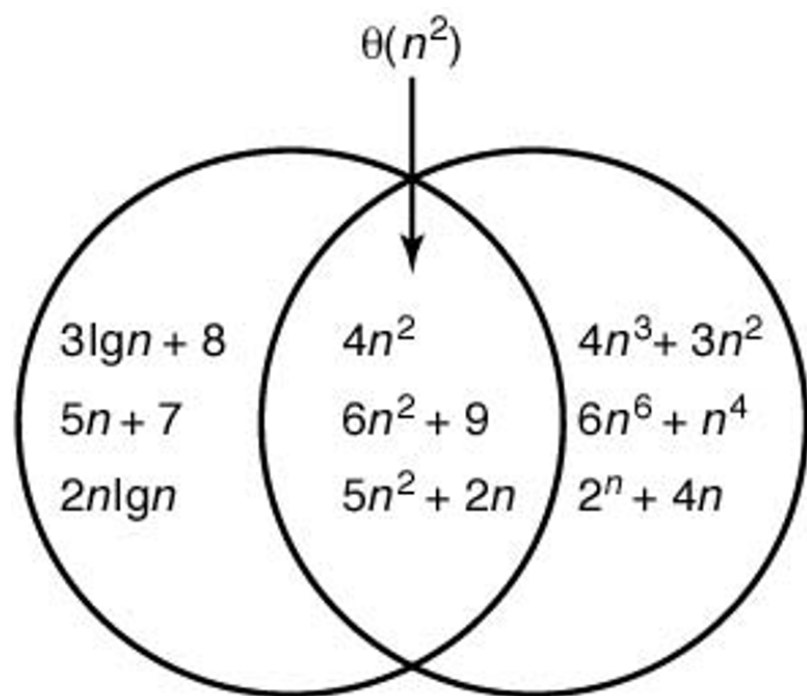
- $n \geq 2$ 인 경우:

$$\frac{n(n-1)}{2} \geq \frac{1}{4}n^2$$

- $n \geq 0$ 인 경우:

$$\frac{n(n-1)}{2} \leq \frac{1}{2}n^2$$

- 그러므로,  $c = \frac{1}{4}, d = \frac{1}{2}, N = 2$ .



(c)  $\theta(n^2) = O(n^2) \cap \Omega(n^2)$

## 작은 $o$ (small $o$ ) 표기법

- 임의의 양의 실수  $c$ 에 대해 다음 성질을 갖는 음이 아닌 정수  $N$ 이 존재할 때  $g(n) \in o(f(n))$  성립:
  - $n \geq N$ 인 임의의 정수  $n$ 에 대해  $g(n) \leq c \cdot f(n)$
- $g(n) \in o(f(n))$  읽는 방법:
  - $g(n)$ 은  $f(n)$ 의 '작은 오(small  $o$ )'이다.

- 의미

- $g(n)$ 이  $f(n)$ 에 비해 궁극적으로 하찮을 만큼 작다.
- 알고리즘 분석적 측면: 복잡도  $g(n)$ 이 복잡도  $f(n)$  보다 궁극적으로 훨씬 좋다.
  - 이유:  $c > 0$ 이 아무리 작더라도,  $n$ 이 충분히 크면  $g(n) < f(n)$  성립하기 때문.

## 큰 $O$ vs 작은 $o$

- 큰  $O$ : 하나의 양의 실수  $c$ 에 대해서 부등식 성립
- 작은  $o$ : 모든 양의 실수  $c$ 에 대해서 부등식 성립

### 작은 $o$ 표기법 예제

- $n \in o(n^2)$ 
  - $c > 0$ 가 주어졌을 때,  $n \geq 1/c$ 인 모든  $n$ 에 대해  $n \leq c \cdot n^2$  성립.



- $n \notin o(5n)$ 
  - $c < 1/5$ 인 경우, 임의의 음이 아닌 정수  $n$ 에 대해  $n > c \cdot 5n$  성립.

- $n^2 \notin o(5n)$

- 이유:

- $n \notin o(5n)$

## 작은 $o$ 특성

- 가정:

$$g(n) \in o(f(n))$$

- 다음 성립:

$$g(n) \in O(f(n)) - \Omega(f(n))$$

- 증명: 생략.

### 주의사항

- $o(f(n)) \neq O(f(n)) - \Omega(f(n))$
- 다음 함수  $g(n)$ 에 대해  $g(n) \in O(n) - \Omega(n)$ 이지만  $g(n) \notin o(n)$ 임:

$$g(n) = \begin{cases} n & \text{if } n\%2 = 0 \\ 1 & \text{if } n\%2 = 1 \end{cases}$$

## 차수의 특성

- $g(n) \in O(f(n)) \iff f(n) \in \Omega(g(n))$
- $g(n) \in \Theta(f(n)) \iff f(n) \in \Theta(g(n))$
- 임의의  $a, b > 1$ 에 대해

$$\log_a n \in \Theta(\log_b n)$$

즉, 로그 함수는 모두 동일한 복잡도 카테고리에 속함.

- $b > a > 0$ 이면 다음 성립:

$$a^n \in o(b^n)$$

즉, 지수 함수는 밑수가 다르면 다른 복잡도 카테고리에 속함.

- 임의의 양의 실수  $a$ 에 대해 다음 성립:

$$a^n \in o(n!)$$

즉,  $n!$ 은 어떠한 지수 복잡도함수보다 더 나쁘다(느리다).

- 많이 언급되는 복잡도 카테고리를 순서대로 나열하면 다음과 같음:

$$\Theta(\lg n) \quad \Theta(n) \quad \Theta(n \lg n) \quad \Theta(n^2) \quad \Theta(n^j) \quad \Theta(n^k) \quad \Theta(a^n) \quad \Theta(b^n) \quad \Theta(n!)$$

- 단,  $k > j > 2$ 이고  $b > a > 1$ 임.
- $g(n)$ 이  $f(n)$ 의 카테고리 보다 왼편에 위치한 카테고리에 속한 경우 다음 성립:

$$g(n) \in o(f(n))$$

- $c \geq 0, d > 0, g(n) \in O(f(n)), h(n) \in \Theta(f(n))$  인 경우 다음 성립:

$$c \cdot g(n) + d \cdot h(n) \in \Theta(f(n))$$



예제

$$\Theta(\log_4 n) \in \Theta(\lg n)$$

$$\lg n \in o(n)$$

$$n^{10} \in o(2^n)$$

$$2^n \in o(n!)$$

$$7n^2 \in \Theta(n^2)$$

$$10n \lg n + 7n^2 \in \Theta(n^2)$$

$$3 \lg n + 10n \lg n + 7n^2 \in \Theta(n^2)$$

$$5n + 3 \lg n + 10n \lg n + 7n^2 \in \Theta(n^2)$$

**극한(limit)을 이용하여 차수를 구하는 방법**

## 정리

- $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{g(n)}{f(n)}$  의 값이
  - 만약  $c > 0$  이면,  $g(n) \in \Theta(f(n))$ ,
  - 만약  $0$  이면,  $g(n) \in o(f(n))$ ,
  - 만약  $\infty$ , 즉, 발산하면,  $f(n) \in o(g(n))$ .

예제

- $\frac{n^2}{2} \in o(n^3)$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^2/2}{n^3} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2n} = 0$$

- $b$  일 때,  $a^n$  :  
 $> a \quad \in o$   
 $> 0 \quad (b^n)$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a^n}{b^n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{a}{b} \right)^n = 0$$

- $a > 0$ 일 때,  $a^n \in o(n!)$

- 증명 생략.

## 로피탈(L'Hopital)의 법칙

아래 조건이 성립한다고 가정하자.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(n) = \lim_{n \rightarrow \infty} g(n) = \infty$$

그러면 다음이 성립한다.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{g(n)}{f(n)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{g'(n)}{f'(n)}$$



## 예제

- 다음이 성립한다.

$$\lg n \in o(n)$$

- 이유

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\lg n}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{\frac{1}{n \ln 2}}{1} \right) = 0$$

## 예제

- 다음이 성립한다.

$$\log_a n \in \Theta(\log_b n)$$

- 이유

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\log_a n}{\log_b n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{\frac{1}{n \ln a}}{\frac{1}{n \ln b}} \right) = \frac{\log b}{\log a} > 0$$