문자열 알고리즘

최백준 choi@startlink.io

문자열 매칭 알고리즘

문자열 매칭 알고리즘

String Matching Algorithm

- 문자열 S에서 패턴 P를 찾는 알고리즘
- S에서 가장 먼저 나타나는 P를 찾아야 함

- S = “ABCABDABCABEABC”
- P = “ABCABE”
- S[6]부터 P가 나타남!

문자열 매칭 알고리즘

String Matching Algorithm

- O(|S| |P|)
- 모든 경우를 다 해보는 알고리즘
- https://gist.github.com/Baekjoon/7ad611f0c4dfe6f88017

KMP

KMP

String Matching Algorithm

- KMP는 왜 KMP일까?
- https://www.acmicpc.net/problem/2902

- 만든 사람의 성이 Knuth, Morris, Prett이라서

KMP

String Matching Algorithm

- KMP는 pi 배열을 이용해야 한다

- pi[i]

- P의 i까지 부분 문자열에서 prefix == suffix가 될 수 있는 부분 문자열 중에서 가장 긴 것의 길이
- 이 때, prefix가 i까지 부분 문자열과 같으면 안된다.

Prefix

String Matching Algorithm

- P = ABCABE

- Prefix
- A
- AB
- ABC
- ABCA
- ABCAB
- ABCABE

Suffix

String Matching Algorithm

- P = ABCABE

- Suffix
- E
- BE
- ABE
- CABE
- BCABE
- ABCABE

KMP

String Matching Algorithm

- ABCABE 의 pi[]

i	부분 문자열	pi[i]
0	A	0
1	AB	0
2	ABC	0
3	**A**BC**A**	1
4	**AB**C**AB**	2
5	ABCABE	0

KMP

String Matching Algorithm

- ABCABDABCABEABC 의 pi

i	부분 문자열	pi[i]
0	A	0
1	AB	0
2	ABC	0
3	**A**BC**A**	1
4	**AB**C**AB**	2
5	ABCABD	0
6	**A**BCABD**A**	1

KMP

String Matching Algorithm

- ABCABDABCABEABC 의 pi

i	부분 문자열	pi[i]
7	**AB**CABD**AB**	2
8	**ABC**ABD**ABC**	3
9	**ABCA**BD**ABCA**	4
10	**ABCAB**D**ABCAB**	5
11	ABCABDABCABE	0
12	**A**BCABDABCABE**A**	1
13	**AB**CABDABCABE**AB**	2
14	**ABC**ABDABCABE**ABC**	3

KMP

String Matching Algorithm

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p[i]	A	B	A	C	A	B	A	B	A	C
pi[i]										

KMP

String Matching Algorithm

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p[i]	A	B	A	C	A	B	A	B	A	C
pi[i]	0									

A

KMP

String Matching Algorithm

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p[i]	A	B	A	C	A	B	A	B	A	C
pi[i]	0	0								

AB

KMP

String Matching Algorithm

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p[i]	A	B	A	C	A	B	A	B	A	C
pi[i]	0	0	1							

ABA

KMP

String Matching Algorithm

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p[i]	A	B	A	C	A	B	A	B	A	C
pi[i]	0	0	1	0						

ABAC

KMP

String Matching Algorithm

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p[i]	A	B	A	C	A	B	A	B	A	C
pi[i]	0	0	1	0	1					

ABACA

KMP

String Matching Algorithm

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p[i]	A	B	A	C	A	B	A	B	A	C
pi[i]	0	0	1	0	1	2				

ABACAB

KMP

String Matching Algorithm

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p[i]	A	B	A	C	A	B	A	B	A	C
pi[i]	0	0	1	0	1	2	3			

ABACABA

KMP

String Matching Algorithm

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p[i]	A	B	A	C	A	B	A	B	A	C
pi[i]	0	0	1	0	1	2	3			

ABACABAB

KMP

String Matching Algorithm

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p[i]	A	B	A	C	A	B	A	B	A	C
pi[i]	0	0	1							

ABA

KMP

String Matching Algorithm

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p[i]	A	B	A	C	A	B	A	B	A	C
pi[i]	0	0	1	0	1	2	3			

ABACABAB

ABACABAB

KMP

String Matching Algorithm

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p[i]	A	B	A	C	A	B	A	B	A	C
pi[i]	0	0	1	0	1	2	3	2		

ABACABAB

ABACABAB

ABACABAB

KMP

String Matching Algorithm

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p[i]	A	B	A	C	A	B	A	B	A	C
pi[i]	0	0	1	0	1	2	3	2	3	

ABACABABA

KMP

String Matching Algorithm

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p[i]	A	B	A	C	A	B	A	B	A	C
pi[i]	0	0	1	0	1	2	3	2	3	4

ABACABABAC

KMP

String Matching Algorithm

- https://gist.github.com/Baekjoon/aea48836f93633e83920

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- pi[4] = 2라는 것은
- p[0…1] == p[3...4] 라는 것을 의미
- **AB**C**AB**

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- pi[4] = 2라는 것은
- p[0…1] == p[3...4] 라는 것을 의미
- ABCABCABE에서 ABCABE를 찾을 때
- ABCABCABE
- **AB**C**AB**E

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- pi[4] = 2라는 것은
- p[0…1] == p[3...4] 라는 것을 의미
- ABCABCABE에서 ABCABE를 찾을 때
- ABCABCABE
- **AB**C**AB**E (앞의 2개를 건너뛰고 비교를 이어가도 된다)
- **AB**C**AB**E

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- 문자열 ABCABDABCABCABEF 에서 패턴 ABCABE를 찾아보기

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- 문자열 ABCABDABCABCABEF 에서 패턴 ABCABE를 찾아보기

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S	A	B	C	A	B	D	A	B	C	A	B	C	A	B	E	F
P																

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- 문자열 ABCABDABCABCABEF 에서 패턴 ABCABE를 찾아보기
- S[i] == P[j]를 비교하기 (i = 0, j = 0)

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S	A	B	C	A	B	D	A	B	C	A	B	C	A	B	E	F
P	A	B	C	A	B	E										

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- 문자열 ABCABDABCABCABEF 에서 패턴 ABCABE를 찾아보기
- S[i] == P[j]를 비교하기 (i = 1, j = 1)

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S	A	B	C	A	B	D	A	B	C	A	B	C	A	B	E	F
P	A	B	C	A	B	E										

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- 문자열 ABCABDABCABCABEF 에서 패턴 ABCABE를 찾아보기
- S[i] == P[j]를 비교하기 (i = 2, j = 2)

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S	A	B	C	A	B	D	A	B	C	A	B	C	A	B	E	F
P	A	B	C	A	B	E										

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- 문자열 ABCABDABCABCABEF 에서 패턴 ABCABE를 찾아보기
- S[i] == P[j]를 비교하기 (i = 3, j = 3)

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S	A	B	C	A	B	D	A	B	C	A	B	C	A	B	E	F
P	A	B	C	A	B	E										

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- 문자열 ABCABDABCABCABEF 에서 패턴 ABCABE를 찾아보기
- S[i] == P[j]를 비교하기 (i = 4, j = 4)

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S	A	B	C	A	B	D	A	B	C	A	B	C	A	B	E	F
P	A	B	C	A	B	E										

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- 문자열 ABCABDABCABCABEF 에서 패턴 ABCABE를 찾아보기
- S[i] == P[j]를 비교하기 (i = 5, j = 5) 다르기 때문에 j = pi[j-1]로 이동한다

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S	A	B	C	A	B	D	A	B	C	A	B	C	A	B	E	F
P	A	B	C	A	B	E										

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- 문자열 ABCABDABCABCABEF 에서 패턴 ABCABE를 찾아보기
- S[i] == P[j]를 비교하기 (i = 5, j = 2) 다르기 때문에 j = pi[j-1]로 이동한다

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S	A	B	C	A	B	D	A	B	C	A	B	C	A	B	E	F
P				A	B	C	A	B	E							

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- 문자열 ABCABDABCABCABEF 에서 패턴 ABCABE를 찾아보기
- S[i] == P[j]를 비교하기 (i = 5, j = 0) 다른데, j = 0이므로 다음으로 넘어간다

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S	A	B	C	A	B	D	A	B	C	A	B	C	A	B	E	F
P						A	B	C	A	B	E					

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- 문자열 ABCABDABCABCABEF 에서 패턴 ABCABE를 찾아보기
- S[i] == P[j]를 비교하기 (i = 6, j = 0)

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S	A	B	C	A	B	D	A	B	C	A	B	C	A	B	E	F
P							A	B	C	A	B	E				

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- 문자열 ABCABDABCABCABEF 에서 패턴 ABCABE를 찾아보기
- S[i] == P[j]를 비교하기 (i = 7, j = 1)

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S	A	B	C	A	B	D	A	B	C	A	B	C	A	B	E	F
P							A	B	C	A	B	E				

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- 문자열 ABCABDABCABCABEF 에서 패턴 ABCABE를 찾아보기
- S[i] == P[j]를 비교하기 (i = 8, j = 2)

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S	A	B	C	A	B	D	A	B	C	A	B	C	A	B	E	F
P							A	B	C	A	B	E				

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- 문자열 ABCABDABCABCABEF 에서 패턴 ABCABE를 찾아보기
- S[i] == P[j]를 비교하기 (i = 9, j = 3)

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S	A	B	C	A	B	D	A	B	C	A	B	C	A	B	E	F
P							A	B	C	A	B	E				

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- 문자열 ABCABDABCABCABEF 에서 패턴 ABCABE를 찾아보기
- S[i] == P[j]를 비교하기 (i = 10, j = 4)

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S	A	B	C	A	B	D	A	B	C	A	B	C	A	B	E	F
P							A	B	C	A	B	E				

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- 문자열 ABCABDABCABCABEF 에서 패턴 ABCABE를 찾아보기
- S[i] == P[j]를 비교하기 (i = 11, j = 5) 다르기 때문에, j = pi[j-1]로 이동한다

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S	A	B	C	A	B	D	A	B	C	A	B	C	A	B	E	F
P							A	B	C	A	B	E				

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- 문자열 ABCABDABCABCABEF 에서 패턴 ABCABE를 찾아보기
- S[i] == P[j]를 비교하기 (i = 11, j = 2)

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S	A	B	C	A	B	D	A	B	C	A	B	C	A	B	E	F
P										A	B	C	A	B	E	

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- 문자열 ABCABDABCABCABEF 에서 패턴 ABCABE를 찾아보기
- S[i] == P[j]를 비교하기 (i = 12, j = 3)

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S	A	B	C	A	B	D	A	B	C	A	B	C	A	B	E	F
P										A	B	C	A	B	E	

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- 문자열 ABCABDABCABCABEF 에서 패턴 ABCABE를 찾아보기
- S[i] == P[j]를 비교하기 (i = 13, j = 4)

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S	A	B	C	A	B	D	A	B	C	A	B	C	A	B	E	F
P										A	B	C	A	B	E	

KMP

String Matching Algorithm

- 패턴 ABCABE의 pi

i	0	1	2	3	4	5
p[i]	A	B	C	A	B	E
pi[i]	0	0	0	1	2	0

- 문자열 ABCABDABCABCABEF 에서 패턴 ABCABE를 찾아보기
- S[i] == P[j]를 비교하기 (i = 14, j = 5) 찾았다!

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S	A	B	C	A	B	D	A	B	C	A	B	C	A	B	E	F
P										A	B	C	A	B	E	

KMP

String Matching Algorithm

- pi 배열 구하는데 걸리는 시간 O(M)

- 문자열 매칭하는데 걸리는 시간 O(N+M)

찾기

https://www.acmicpc.net/problem/1786

- 문자열 T가 주어졌을 때 P가 몇 번 등장하는지 구하는 문제

찾기

https://www.acmicpc.net/problem/1786

- https://gist.github.com/Baekjoon/8d3e2a1b93e59879011f

광고

https://www.acmicpc.net/problem/1305

- 광고판의 크기: L
- 광고 문구의 길이: N

- 광고 문구: aaba
- 광고판의 크기: 5
- 인 경우

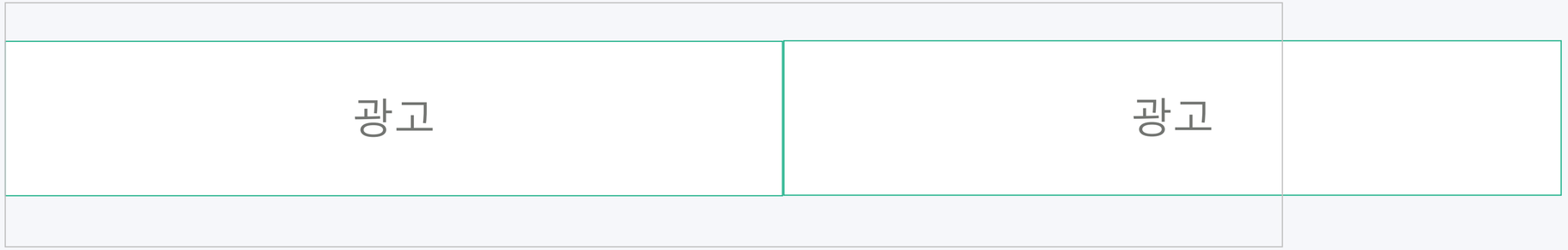
- aabaa -> abaaa -> baaab -> aaaba -> …

광고

https://www.acmicpc.net/problem/1305

- 어느 순간 광고 문구가 주어졌을 때
- 가능한 광고의 길이 중 가장 짧은 것 구하기

- 가능한 광고

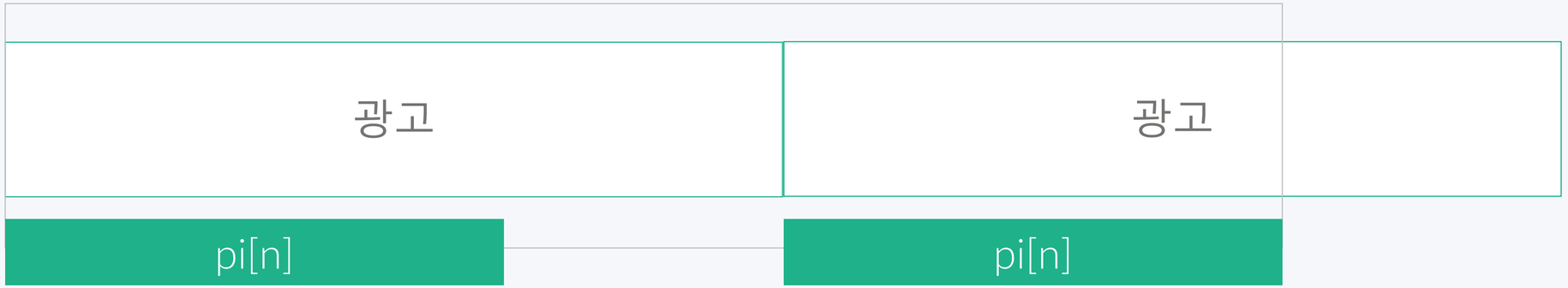


광고

https://www.acmicpc.net/problem/1305

- 어느 순간 광고 문구가 주어졌을 때
- 가능한 광고의 길이 중 가장 짧은 것 구하기

- 가능한 광고



광고

https://www.acmicpc.net/problem/1305

- 정답은 N – pi[N] 이 된다.

광고

https://www.acmicpc.net/problem/1305

- https://gist.github.com/Baekjoon/14ee96b26281eaba09a3

Cubeditor

https://www.acmicpc.net/problem/1701

- 소문자 5,000개 이하로 구성된 문자열 S가 주어진다
- S의 부분 문자열은 연속된 일부분
- 두 번 이상 등장하는 부분 문자열 중에서 가장 긴 것의 길이?

Cubeditor

https://www.acmicpc.net/problem/1701

- 모든 부분 문자열은
- 어딘가에서 시작해서 어딘가에서 끝난다

	부분 문자열	

Cubeditor

https://www.acmicpc.net/problem/1701

- 모든 부분 문자열은
- 어딘가에서 시작해서 어딘가에서 끝난다
- 어떤 suffix의 prefix 이다.

- 원래 문자열에서 KMP를 돌리면, 모든 pi에는
- 가장 처음부터 얼만큼이 같은지 저장되어 있다

	부분 문자열	

Cubeditor

https://www.acmicpc.net/problem/1701

- 따라서, 모든 부분 문자열 S[i..N]에 대해서 pi를 구하고, 그 중의 최대값을 구하면 된다.

	부분 문자열	

Cubeditor

https://www.acmicpc.net/problem/1701

- https://gist.github.com/Baekjoon/aa688a990d1acb00fd8d

Trie

Trie

Trie

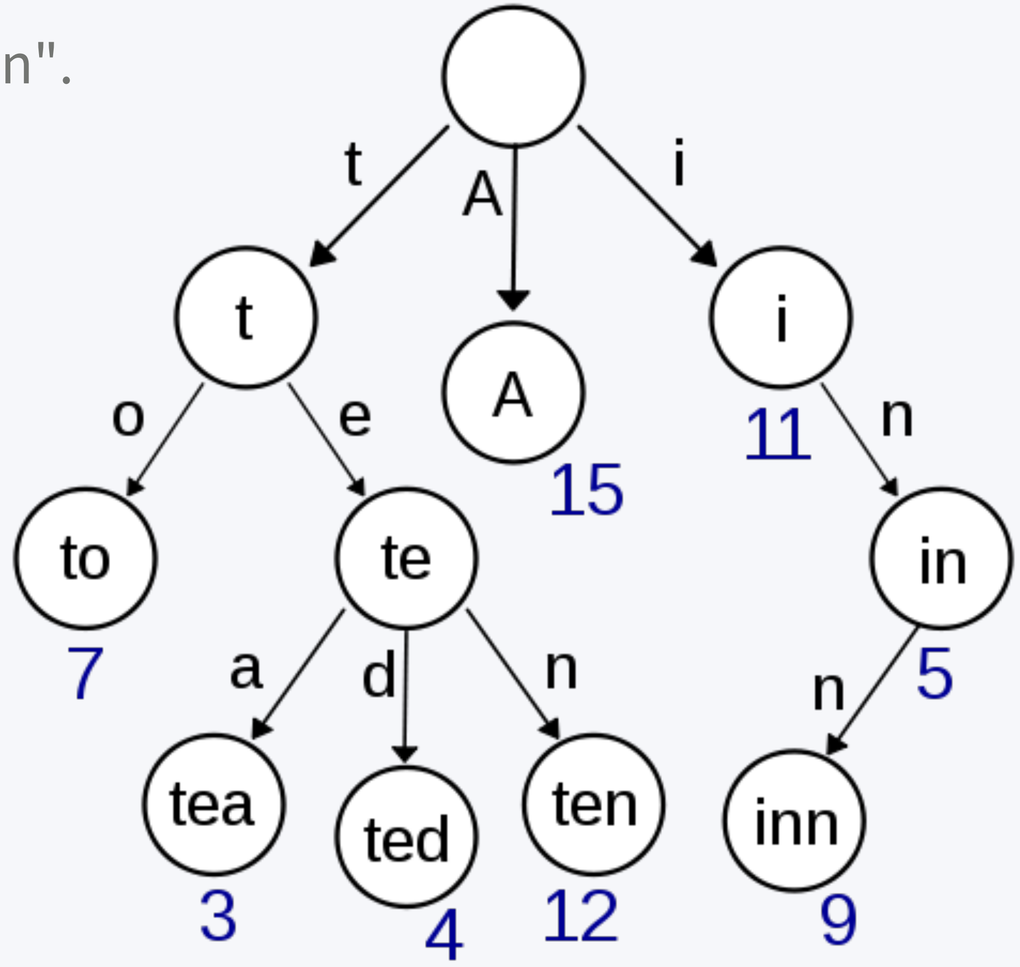
- 숫자 비교는 O(1) 이지만
- 문자열 비교는 최대 O(길이) 가 걸린다.

- 문자열 N개를 담고있는 BST에서 검색하는데 걸리는 시간은 O(lgN)이 아니고 O(길이 * lgN)이다.

Trie

Trie

- "A", "to", "tea", "ted", "ten", "i", "in", and "inn".
- 로 만든 Trie



Boggle

https://www.acmicpc.net/problem/9202

- 가능한 모든 단어를 미리 다 만들어보고 단어 사전에 들어있는 단어를 모두 찾아보는 방법
- 가능한 단어의 개수: 673108개

Boggle

https://www.acmicpc.net/problem/9202

- https://gist.github.com/Baekjoon/6101e355b8e861c432c5

- 8초 정도 걸린다

Boggle

https://www.acmicpc.net/problem/9202

- Trie 구현!

- https://gist.github.com/Baekjoon/9f1f0da10059257fa338

전화번호 목록

https://www.acmicpc.net/problem/5052

- 한 번호가 다른 번호의 접두어이면 안되다

- Trie = Prefix Tree

- https://gist.github.com/Baekjoon/cfd92ab423a2f3d3a894
- https://gist.github.com/Baekjoon/925e8e0f691b75506b7b

Aho-corasick

Aho-corasick

Aho-corasick

- KMP에서의 pi를
- Trie에서도 구현하는 것

- pi[node] = node가 나타내는 문자열 s의 suffix이면서 trie에 포함된 가장 긴 문자열

Aho-corasick

Aho-corasick

- S = “ABCDEABABABABCD”
- 에서
- “ABAB”,”AD”,”ABC”,”BCD”,”ABABC”가 몇 개 인지 찾는 문제

- KMP를 총 5번 돌린다?

Aho-corasick

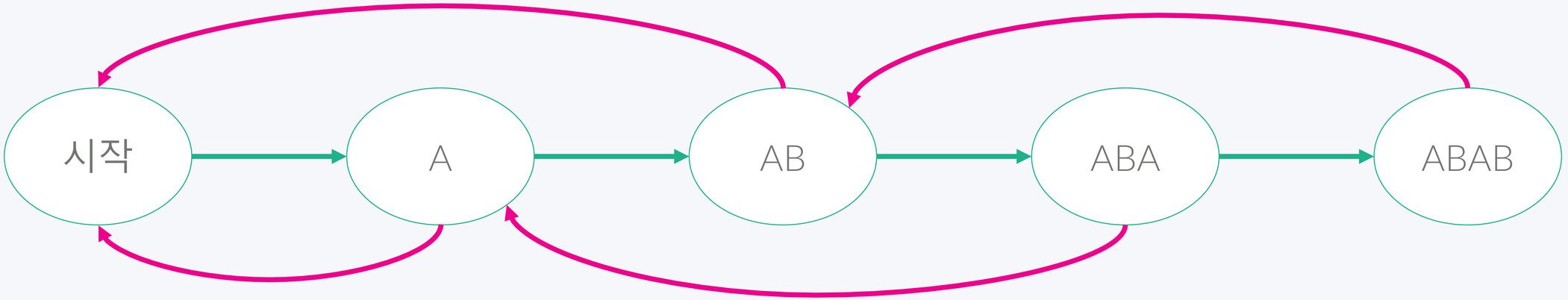
Aho-corasick

- S = “ABCDEABABABABCD”
- 에서
- “ABAB”,”AD”,”ABC”,”BCD”,”ABABC”가 몇 개 인지 찾는 문제
- KMP를 총 5번 돌린다?

- ABAB: 0 0 1 2
- AD: 0 0
- ABC: 0 0 0
- BCD: 0 0 0
- ABABC: 0 0 1 2 0

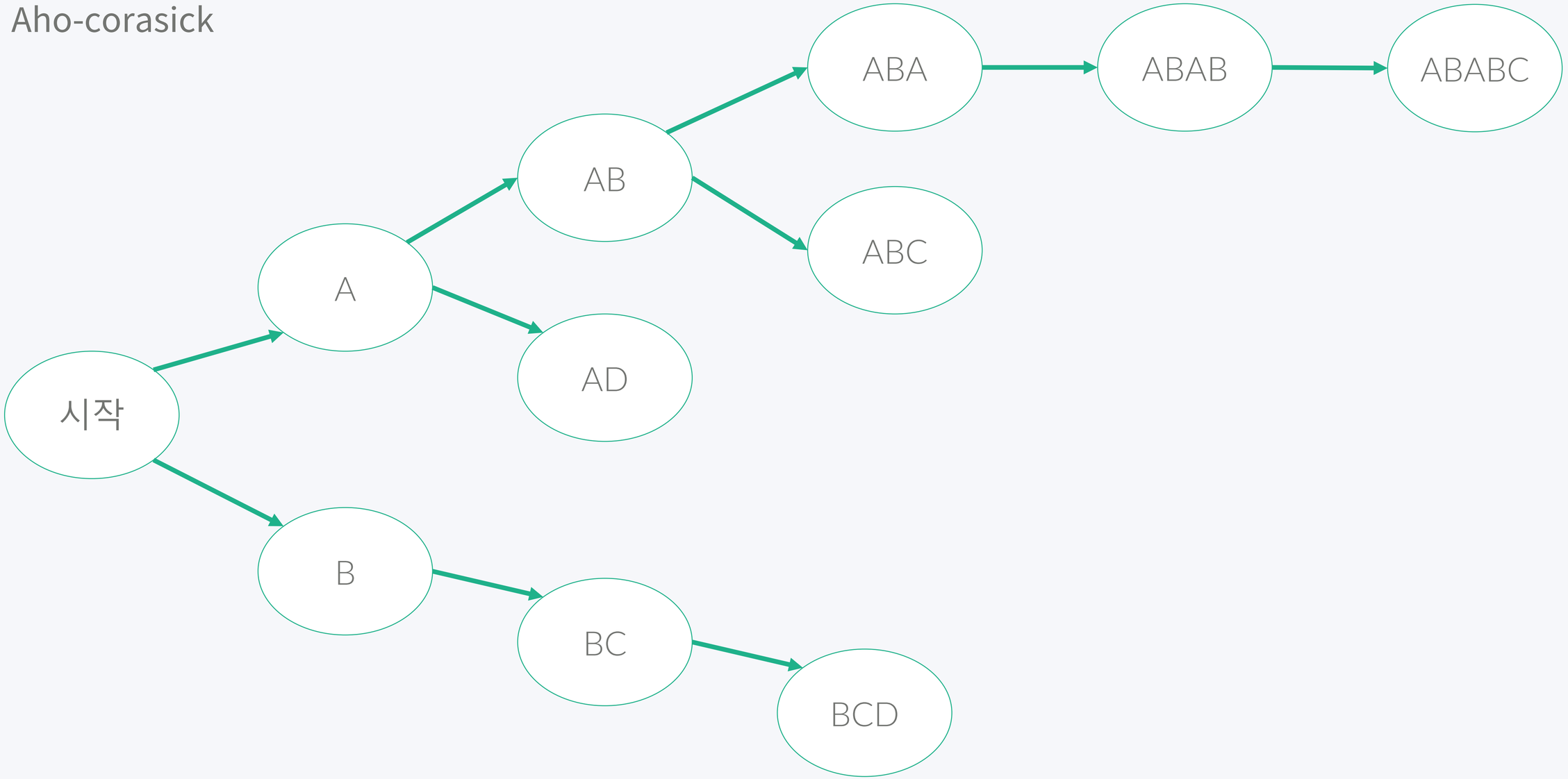
Aho-corasick

Aho-corasick



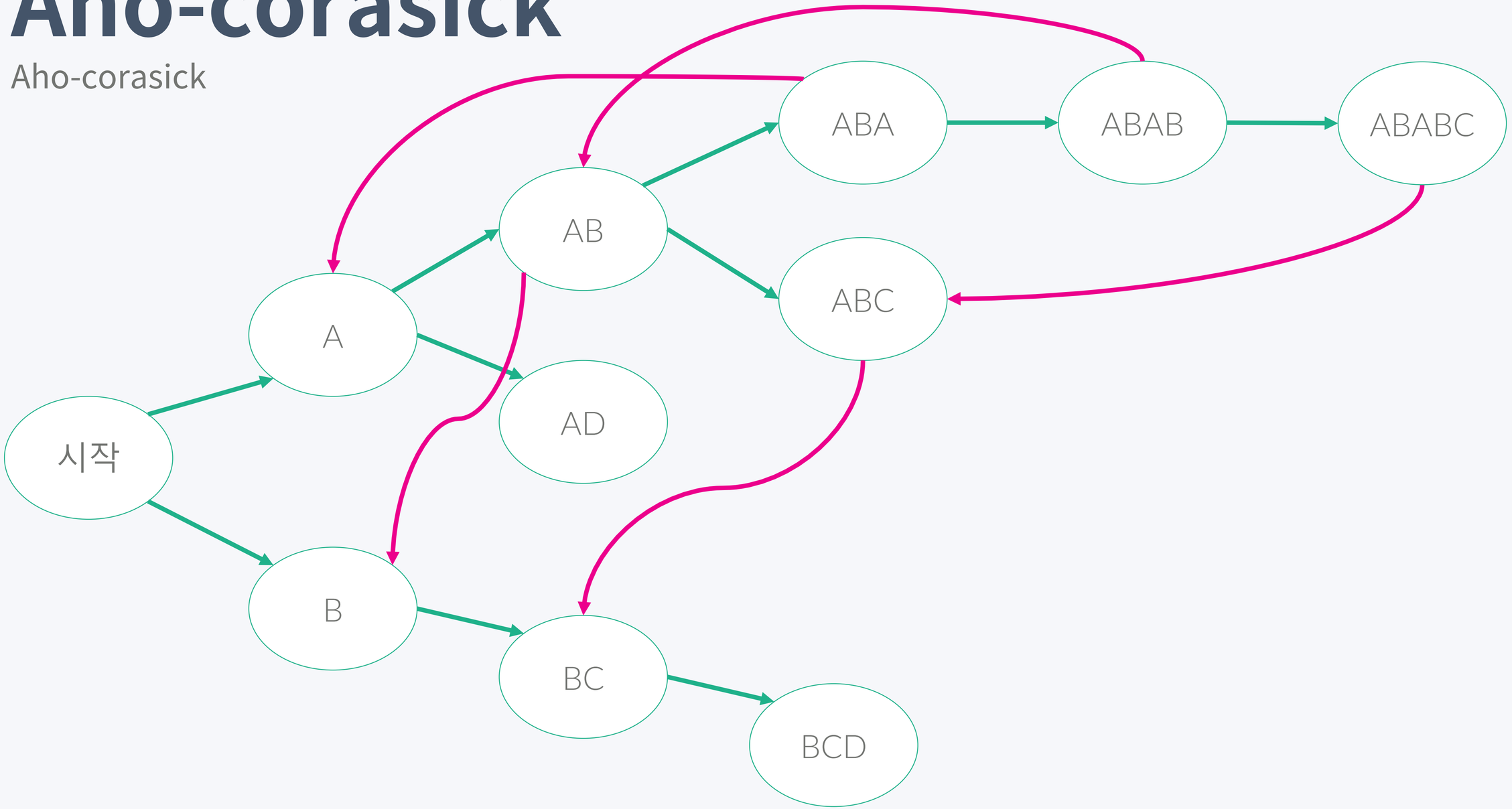
Aho-corasick

Aho-corasick



Aho-corasick

Aho-corasick



Aho-corasick

Aho-corasick

- https://gist.github.com/Baekjoon/6561c788d5b8feee7f26
- https://gist.github.com/Baekjoon/d3ffd37864ec4616a45a

문자열 집합 판별

https://www.acmicpc.net/problem/9250

- https://gist.github.com/Baekjoon/e45c2335848ca781a8dd

돌연변이

https://www.acmicpc.net/problem/10256

- https://gist.github.com/Baekjoon/e2aab198a5990b55553a

Suffix Array

Prefix

Prefix

- baekjoon의 Prefix

1. b
2. ba
3. bae
4. baek
5. baekj
6. baekjo
7. baekjoo
8. baekjoon

Suffix

Suffix

- baekjoon의 Suffix

1. baekjoon
2. aekjoon
3. ekjoon
4. kjoon
5. joon
6. oon
7. on
8. n

접미사 배열

Suffix Array

- 문자열 S의 모든 접미사를 구해서 사전순으로 정렬한 자료구조

접미사 배열

Suffix Array

- aekjoon
- baekjoon
- ekjoon
- joon
- kjoon
- n
- on
- oon

접미사

Suffix

- 접미사는 정수로 나타낼 수 있다.
- i번 접미사: i번째 글자에서 시작하는 접미사

접미사 배열

https://www.acmicpc.net/problem/11656

- 문자열 S의 모든 접미사를 구하는 문제

접미사 배열

https://www.acmicpc.net/problem/11656

- 정렬할 때, 매번 부분 문자열을 만들지 않기 위해 strcmp를 사용했다

```
vector<int> a(n);
for (int i=0; i<n; i++) {
    a[i] = i;
}
sort(a.begin(), a.end(), [&s](int u, int v) {
    return strcmp(s.c_str()+u, s.c_str()+v) < 0;
});
```

접미사 배열

https://www.acmicpc.net/problem/11656

- C++: https://gist.github.com/Baekjoon/34ecd3cd0bd1a59d205c6a16f73ff634
- C++11: https://gist.github.com/Baekjoon/931ed853aebbdb8afed0c66dfe84b4ff

접미사 배열

https://www.acmicpc.net/problem/11656

- 길이가 N인 문자열 S의 접미사는 총 N개가 있다.
- 따라서, N개를 정렬하는데 걸리는 시간은 O(NlgN)이다?

접미사 배열

https://www.acmicpc.net/problem/11656

- 길이가 N인 문자열 S의 접미사는 총 N개가 있다.
- 따라서, N개를 정렬하는데 걸리는 시간은 O(NlgN)이다?
- 아니다. 문자열을 비교하는데 걸리는 시간이 O(N)이기 때문에, O(N^2lgN)이다.

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

- 접미사 배열 SA가 주어졌을 때, 그러한 접미사 배열을 만드는 문자열 S를 만드는 문제
- 이 때, S에 포함된 서로 다른 문자의 개수가 최소가 되어야 한다

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

- 접미사 배열 SA가 주어졌을 때, 그러한 접미사 배열을 만드는 문자열 S를 아무거나 만들어 보자

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

- SA[i]번째에서 시작하는 접미사는 SA[i+1]번째에 시작하는 접미사보다 사전순으로 앞서야 한다
- SA[i]번째 접미사와 SA[i+1]번째 접미사를 비교한다고 하면
- 먼저, S[SA[i]]와 S[SA[i+1]]을 비교해야 한다
- S[SA[i]] > S[SA[i+1]] 은 절대로 일어날 수 없다

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

- 각각의 i에 대해서, S[SA[i]] < S[SA[i+1]]가 되게 S를 만들 수 있다.
- SA = (2, 3, 1, 0) 인 경우에
- SA[0] = 2 이기 때문에, S[2] = a를 넣고
- SA[1] = 3 이기 때문에 , S[3] = b를 넣고
- SA[2] = 1 이기 때문에, S[1] = c를 넣고
- SA[3] = 0 이기 때문에, S[0] = d를 넣는다.

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

- S[SA[i]] <= S[SA[i+1]] 인 경우에 문제를 풀어본다
- SA[0]은 아무 제약 조건이 없기 때문에, 그냥 S[SA[0]] = a를 넣는다
- SA[1]은 두 가지 경우가 가능하다
- S[SA[0]] < S[SA[1]] 또는 S[SA[0]] == S[SA[1]]

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

- 두 문자열의 비교는 앞에서 부터 한 글자씩 비교를 한다

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

- 두 접미사의 비교는 문자 하나와 접미사 비교로 바꿀 수 있다

i번 접미사:	S[i]	S[i+1]			...
j번 접미사:	S[j]	S[j+1]			...

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

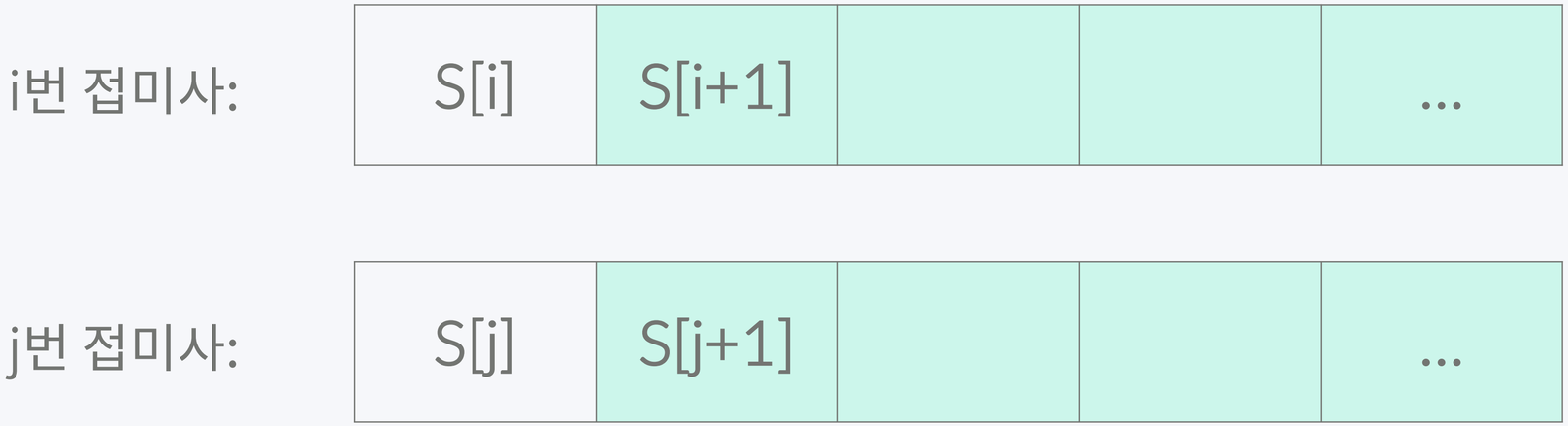
- 두 접미사의 비교는 문자 하나와 접미사 비교로 바꿀 수 있다
- S[i]와 S[j]를 비교한다

i번 접미사:	S[i]	S[i+1]			...
j번 접미사:	S[j]	S[j+1]			...

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

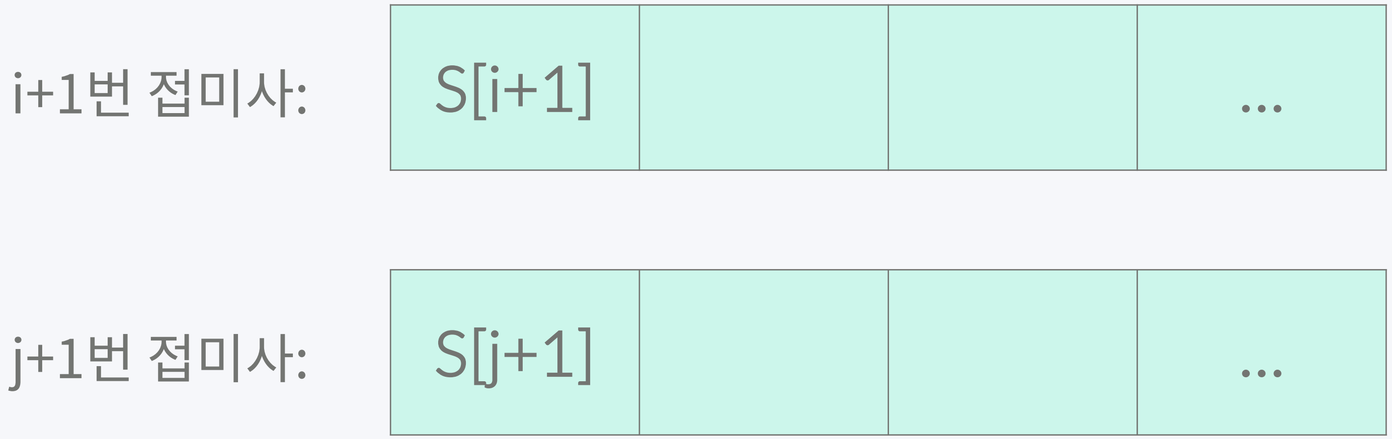
- 두 접미사의 비교는 문자 하나와 접미사 비교로 바꿀 수 있다
- i+1번 접미사와 j+1번 접미사



접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

- 두 접미사의 비교는 문자 하나와 접미사 비교로 바꿀 수 있다
- i+1번 접미사와 j+1번 접미사



접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

- 각각의 i에 대해서
- S[SA[i]] < S[SA[i+1]] 이면 새로운 문자를 추가해야 하는 것 이기 때문에
- 되도록
- S[SA[i]] = S[SA[i+1]] 을 많이 사용하는 것이 좋다.

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

- 각각의 i에 대해서
- S[SA[i]] < S[SA[i+1]] 을 최소로 하는 것은
- S[SA[i+1]] = S[SA[i]] + 1 을 최소로 하는 것과 같기 때문에
- 사전 순으로 앞서는 문자열을 만들 수 있게 된다

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

- S[SA[i]] == S[SA[i+1]] 인 경우

- i번째 접미사와 i+1번째 접미사를 비교하는 것은
- i번째 문자와 i+1번째 글자를 비교하고 같은 경우에는
- i+1번째 접미사와 i+2번째 접미사를 비교하는 것과 같다

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

- S[SA[i]] == S[SA[i+1]] 인 경우

- i번째 접미사와 i+1번째 접미사를 비교하는 것은
- i번째 문자와 i+1번째 글자를 비교하고 같은 경우에는
- i+1번째 접미사와 i+2번째 접미사를 비교하는 것과 같다

- 지금 S[SA[i]] == S[SA[i+1]] 인 경우라는 것은 i번째 문자와 i+1번째 글자가 같다는 것이기 때문에
- i+1번째 접미사와 i+2번째 접미사를 비교해야 한다

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

- 그런데
- 우리는 이미 접미사 배열을 가지고 있다
- 즉, 접미사 배열에서 i+1이 i+2보다 앞에 있으면 된다

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
접미사 배열:	7	4	8	6	1	5	2	9	3	0
문자열 S:								a		

- 7번 접미사가 제일 앞서야 한다.
- S의 7번째 글자는 a라고 할 수 있다

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
접미사 배열:	7	4	8	6	1	5	2	9	3	0
문자열 S:					a			a		

- 7번 접미사 < 4번 접미사
- 4번째 글자를 a라고 하면 8번 접미사와 5번 접미사를 비교해야 한다
- 8번 접미사의 위치: 2, 5번 접미사의 위치: 5
- 4번째 글자가 a여도 7번 접미사 < 4번 접미사이다

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
접미사 배열:	7	4	8	6	1	5	2	9	3	0
문자열 S:					a			a	a	

- 4번 접미사 < 8번 접미사
- 8번째 글자를 a라고 하면 5번 접미사와 9번 접미사를 비교해야 한다
- 5번 접미사의 위치: 5, 9번 접미사의 위치: 7
- 8번째 글자가 a여도 4번 접미사 < 8번 접미사이다

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
접미사 배열:	7	4	8	6	1	5	2	9	3	0
문자열 S:					a		b	a	a	

- 8번 접미사 < 6번 접미사
- 6번째 글자를 a라고 하면 9번 접미사와 7번 접미사를 비교해야 한다
- 9번 접미사의 위치: 7, 7번 접미사의 위치: 0
- 6번째 글자가 a이면 8번 접미사 < 6번 접미사가 될 수 없다. 따라서, 6번째 글자는 b이다

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
접미사 배열:	7	4	8	6	1	5	2	9	3	0
문자열 S:		b			a		b	a	a	

- 6번 접미사 < 1번 접미사
- 1번째 글자를 b라고 하면 7번 접미사와 2번 접미사를 비교해야 한다
- 7번 접미사의 위치: 0, 2번 접미사의 위치: 6
- 1번째 글자가 b여도 6번 접미사 < 1번 접미사이다

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
접미사 배열:	7	4	8	6	1	5	2	9	3	0
문자열 S:		b			a	c	b	a	a	

- 1번 접미사 < 5번 접미사
- 5번째 글자를 b라고 하면 2번 접미사와 6번 접미사를 비교해야 한다
- 2번 접미사의 위치: 6, 6번 접미사의 위치: 3
- 5번째 글자가 b이면 1번 접미사 < 5번 접미사가 될 수 없다. 따라서, 5번째 글자는 c이다

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
접미사 배열:	7	4	8	6	1	5	2	9	3	0
문자열 S:		b	c		a	c	b	a	a	

- 5번 접미사 < 2번 접미사
- 2번째 글자를 c라고 하면 6번 접미사와 3번 접미사를 비교해야 한다
- 6번 접미사의 위치: 3, 3번 접미사의 위치: 8
- 2번째 글자가 c여도 5번 접미사 < 2번 접미사이다

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
접미사 배열:	7	4	8	6	1	5	2	9	3	0
문자열 S:		b	c		a	c	b	a	a	d

- 2번 접미사 < 9번 접미사
- 9번째 글자를 c라고 하면 3번 접미사와 10번 접미사를 비교해야 한다
- 3번 접미사의 위치: 8, 10번 접미사는 존재하지 않는다
- 9번째 글자가 c이면 2번 접미사 < 9번 접미사가 될 수 없다. 따라서, 9번째 글자는 d이다

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
접미사 배열:	7	4	8	6	1	5	2	9	3	0
문자열 S:		b	c	d	a	c	b	a	a	d

- 9번 접미사 < 3번 접미사
- 3번째 글자를 d라고 하면 10번 접미사와 4번 접미사를 비교해야 한다
- 10번 접미사는 존재하지 않고, 4번 접미사의 위치: 1
- 3번째 글자가 d여도 9번 접미사 < 3번 접미사이다

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
접미사 배열:	7	4	8	6	1	5	2	9	3	0
문자열 S:	d	b	c	d	a	c	b	a	a	d

- 3번 접미사 < 0번 접미사
- 0번째 글자를 d라고 하면 4번 접미사와 1번 접미사를 비교해야 한다
- 4번 접미사의 위치: 1, 1번 접미사의 위치: 4
- 0번째 글자가 d여도 3번 접미사 < 0번 접미사이다

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13013

- C/C++: https://gist.github.com/Baekjoon/165da3bd0a0c42a4a7beb998c8fd017b

접미사 배열 1

https://www.acmicpc.net/problem/13012

- C/C++: https://gist.github.com/Baekjoon/308be99526e44da099db0fb1dacd616c

접미사 배열

Suffix Array

- O(N(lgN)^2) 방법이 있다.
- 길이 1로 정렬
- 길이 2로 정렬
- 길이 4로 정렬
- …

접미사 배열

Suffix Array

0: abcdabcabb

1: bcdabcabb

2: cdabcabb

3: dabcabb

4: abcabb

5: bcabb

6: cabb

7: abb

8: bb

9: b

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:										

접미사 배열

Suffix Array

- 1글자를 기준으로 정렬하자

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	1	2	3	0	1	2	0	1	1

```
0 | 4: abcabb
  | 0: abcdabcabb
  | 7: abb
1 | 1: bcdabcabb
  | 8: bb
  | 5: bcabb
  | 9: b
2 | 2: cdabcabb
  | 6: cabb
3 | 3: dabcabb
```

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	1	2	3	0	1	2	0	1	1

- 1글자로 정렬이 모두 되어있는 상태이다
- 1글자로 정렬을 할 때는, 첫 번째 글자만 같으면 된다

```
0 | 4: a
  | 0: a
  | 7: a

1 | 1: b
  | 8: b
  | 5: b
  | 9: b

2 | 2: c
  | 6: c

3 | 3: d
```

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	1	2	3	0	1	2	0	1	1

- 2글자를 기준으로 정렬을 해보자

```
0 | 4: abcabb
  | 0: abcdabcabb
  | 7: abb
1 | 1: bcdabcabb
  | 8: bb
  | 5: bcabb
  | 9: b
2 | 2: cdabcabb
  | 6: cabb
3 | 3: dabcabb
```

접미사 배열

Suffix Array

- 문자열 S의 접미사의 접미사도 접미사이다

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	1	2	3	0	1	2	0	1	1

- 0
  - 4: abcabb
  - 0: abcdabcabb
  - 7: abb
- 1
  - 1: bcdabcabb
  - 8: bb
  - 5: bcabb
  - 9: b
- 2
  - 2: cdabcabb
  - 6: cabb
- 3
  - 3: dabcabb

- 2글자를 기준으로 정렬을 해보자
- 4번 접미사와 0번 접미사는 두 글자를 기준으로 정렬하면 누가 앞에 와야 할까?

4: abcabb

0: abcdabcabb

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	1	2	3	0	1	2	0	1	1

```
0 | 4: abcabb
  | 0: abcdabcabb
  | 7: abb
1 | 1: bcdabcabb
  | 8: bb
  | 5: bcabb
  | 9: b
2 | 2: cdabcabb
  | 6: cabb
3 | 3: dabcabb
```

- 2글자를 기준으로 정렬을 해보자
- 4번 접미사와 0번 접미사는 두 글자를 기준으로 정렬하면 누가 앞에 와야 할까?

```
4: ab
0: ab
```

- 같아야 한다
- 어떻게 알 수 있을까?

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	1	2	3	0	1	2	0	1	1

0
- 4: abcabb
- 0: abcdabcabb
- 7: abb

1
- 1: bcdabcabb
- 8: bb
- 5: bcabb
- 9: b

2
- 2: cdabcabb
- 6: cabb

3
- 3: dabcabb

- 2글자를 기준으로 정렬을 해보자
- 4번 접미사와 0번 접미사는 두 글자를 기준으로 정렬하면 누가 앞에 와야 할까?

4: abcabb

0: abcdabcabb

- 4번 접미사의 그룹 번호: 0
- 0번 접미사의 그룹 번호: 0

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	1	2	3	0	1	2	0	1	1

```
0 | 4: abcabb
  | 0: abcdabcabb
  | 7: abb
1 | 1: bcdabcabb
  | 8: bb
  | 5: bcabb
  | 9: b
2 | 2: cdabcabb
  | 6: cabb
3 | 3: dabcabb
```

- 2글자를 기준으로 정렬을 해보자
- 4번 접미사와 0번 접미사는 두 글자를 기준으로 정렬하면 누가 앞에 와야 할까?

```
5:  bcabb
1:  bcdabcabb
```

- 5번 접미사의 그룹 번호: 1
- 1번 접미사의 그룹 번호: 1

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	1	2	3	0	1	2	0	1	1

```
0 | 4: abcabb
  | 0: abcdabcabb
  | 7: abb
1 | 1: bcdabcabb
  | 8: bb
  | 5: bcabb
  | 9: b
2 | 2: cdabcabb
  | 6: cabb
3 | 3: dabcabb
```

- 2글자를 기준으로 정렬을 해보자
- 4번 접미사와 0번 접미사는 두 글자를 기준으로 정렬하면 누가 앞에 와야 할까?

```
4: abcabb
0: abcdabcabb
```

- 2글자를 기준으로 정렬했을 때
- 두 접미사의 그룹 번호는 같다

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	1	2	3	0	1	2	0	1	1

```
0 | 4: abcabb
  | 0: abcdabcabb
  | 7: abb
1 | 1: bcdabcabb
  | 8: bb
  | 5: bcabb
  | 9: b
2 | 2: cdabcabb
  | 6: cabb
3 | 3: dabcabb
```

- 2글자를 기준으로 정렬을 해보자
- 0번 접미사와 1번 접미사는 두 글자를 기준으로 정렬하면 누가 앞에 와야 할까?

```
0: abcdabcabb
1: bcdabcabb
```

- 0번 접미사의 그룹 번호: 0
- 1번 접미사의 그룹 번호: 1

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	1	2	3	0	1	2	0	1	1

```
0 | 4: abcabb
  | 0: abcdabcabb
  | 7: abb
1 | 1: bcdabcabb
  | 8: bb
  | 5: bcabb
  | 9: b
2 | 2: cdabcabb
  | 6: cabb
3 | 3: dabcabb
```

- 2글자를 기준으로 정렬을 해보자
- 0번 접미사와 1번 접미사는 두 글자를 기준으로 정렬하면 누가 앞에 와야 할까?

```
0: abcdabcabb
1: bcdabcabb
```

- 2글자를 기준으로 정렬했을 때
- 0번 접미사가 앞서야 한다

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	1	2	3	0	1	2	0	1	1

0
- 4: abcabb
- 0: abcdabcabb
- 7: abb

1
- 1: bcdabcabb
- 8: bb
- 5: bcabb
- 9: b

2
- 2: cdabcabb
- 6: cabb

3
- 3: dabcabb

- 2글자를 기준으로 정렬을 해보자
- 2번 접미사와 6번 접미사는 두 글자를 기준으로 정렬하면 누가 앞에 와야 할까?

2: cdabcabb

6: cabb

- 2번 접미사의 그룹 번호: 2
- 6번 접미사의 그룹 번호: 2

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	1	2	3	0	1	2	0	1	1

```
0 | 4: abcabb
  | 0: abcdabcabb
  | 7: abb
1 | 1: bcdabcabb
  | 8: bb
  | 5: bcabb
  | 9: b
2 | 2: cdabcabb
  | 6: cabb
3 | 3: dabcabb
```

- 2글자를 기준으로 정렬을 해보자
- 2번 접미사와 6번 접미사는 두 글자를 기준으로 정렬하면 누가 앞에 와야 할까?

```
3:  dabcabb
7:  abb
```

- 3번 접미사의 그룹 번호: 3
- 7번 접미사의 그룹 번호: 0

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	1	2	3	0	1	2	0	1	1

```
0 | 4: abcabb
  | 0: abcdabcabb
  | 7: abb
1 | 1: bcdabcabb
  | 8: bb
  | 5: bcabb
  | 9: b
2 | 2: cdabcabb
  | 6: cabb
3 | 3: dabcabb
```

- 2글자를 기준으로 정렬을 해보자
- 2번 접미사와 6번 접미사는 두 글자를 기준으로 정렬하면 누가 앞에 와야 할까?

```
2: cdabcabb
6: cabb
```

- 2글자를 기준으로 정렬했을 때
- 6번 접미사가 앞서야 한다

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	1	2	3	0	1	2	0	1	1

```
0 | 4: abcabb
  | 0: abcdabcabb
  | 7: abb
1 | 1: bcdabcabb
  | 8: bb
  | 5: bcabb
  | 9: b
2 | 2: cdabcabb
  | 6: cabb
3 | 3: dabcabb
```

- 2글자를 기준으로 정렬을 해보자
- 8번 접미사와 9번 접미사는 두 글자를 기준으로 정렬하면 누가 앞에 와야 할까?

```
8: bb
9: b
```

- 8번 접미사의 그룹 번호: 1
- 9번 접미사의 그룹 번호: 1

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	1	2	3	0	1	2	0	1	1

```
0 | 4: abcabb
  | 0: abcdabcabb
  | 7: abb
1 | 1: bcdabcabb
  | 8: bb
  | 5: bcabb
  | 9: b
2 | 2: cdabcabb
  | 6: cabb
3 | 3: dabcabb
```

- 2글자를 기준으로 정렬을 해보자
- 8번 접미사와 9번 접미사는 두 글자를 기준으로 정렬하면 누가 앞에 와야 할까?

```
9:   b
10:
```

- 9번 접미사의 그룹 번호: 1
- 10번 접미사의 그룹 번호: ?

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	1	2	3	0	1	2	0	1	1

```
0 | 4: abcabb
  | 0: abcdabcabb
  | 7: abb
1 | 1: bcdabcabb
  | 8: bb
  | 5: bcabb
  | 9: b
2 | 2: cdabcabb
  | 6: cabb
3 | 3: dabcabb
```

- 10번 접미사처럼 문자열의 길이를 넘어가는 경우가 존재할 수 있다
- 이 경우 길이가 n일 때, n번 접미사를 비교하는 일만 일어나기 때문에
- 즉, n+1번 이상 접미사를 비교하는 일이 없기 때문에
- group[n] = -1로 넣어논다

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	1	2	3	0	1	2	0	1	1

```
0 | 4: abcabb
  | 0: abcdabcabb
  | 7: abb
1 | 1: bcdabcabb
  | 8: bb
  | 5: bcabb
  | 9: b
2 | 2: cdabcabb
  | 6: cabb
3 | 3: dabcabb
```

- 2글자를 기준으로 정렬을 해보자
- 8번 접미사와 9번 접미사는 두 글자를 기준으로 정렬하면 누가 앞에 와야 할까?

```
9:   b
10:
```

- 9번 접미사의 그룹 번호: 1
- 10번 접미사의 그룹 번호: -1

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	1	2	3	0	1	2	0	1	1

```
0 | 4: abcabb
  | 0: abcdabcabb
  | 7: abb
1 | 1: bcdabcabb
  | 8: bb
  | 5: bcabb
  | 9: b
2 | 2: cdabcabb
  | 6: cabb
3 | 3: dabcabb
```

- 2글자를 기준으로 정렬을 해보자
- 8번 접미사와 9번 접미사는 두 글자를 기준으로 정렬하면 누가 앞에 와야 할까?

```
8: bb
9: b
```

- 2글자를 기준으로 정렬했을 때
- 9번 접미사가 앞서야 한다

접미사 배열

Suffix Array

0	4: abcabb
	0: abcdabcabb
	7: abb
1	9: b
2	8: bb
3	1: bcdabcabb
	5: bcabb
4	6: cabb
5	2: cdabcabb
6	3: dabcabb

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	3	5	6	0	3	2	0	2	1

- 2글자를 기준으로 정렬을 해보자

접미사 배열

Suffix Array

0	4: ab 0: ab 7: ab
1	9: b
2	8: bb
3	1: bc 5: bc
4	6: ca
5	2: cd
6	3: da

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	3	5	6	0	3	2	0	2	1

- 2글자를 기준으로 정렬이 되어있는 상태이다

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	3	5	6	0	3	2	0	2	1

- 4글자를 기준으로 정렬을 해보자

```
0 | 4: abcabb
  | 0: abcdabcabb
  | 7: abb
1 | 9: b
2 | 8: bb
3 | 1: bcdabcabb
  | 5: bcabb
4 | 6: cabb
5 | 2: cdabcabb
6 | 3: dabcabb
```

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	3	5	6	0	3	2	0	2	1

```
    | 4: abcabb
0   | 0: abcdabcabb
    | 7: abb
1   | 9: b
2   | 8: bb
    | 1: bcdabcabb
3   |
    | 5: bcabb
4   | 6: cabb
5   | 2: cdabcabb
6   | 3: dabcabb
```

- 4글자를 기준으로 정렬을 해보자
- 4번 접미사와 0번 접미사는 두 글자를 기준으로 정렬하면 누가 앞에 와야 할까?

```
4: abcabb
0: abcdabcabb
```

- 4번 접미사의 그룹 번호: 0
- 0번 접미사의 그룹 번호: 0

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	3	5	6	0	3	2	0	2	1

```
0 | 4: abcabb
  | 0: abcdabcabb
  | 7: abb
1 | 9: b
2 | 8: bb
3 | 1: bcdabcabb
  | 5: bcabb
4 | 6: cabb
5 | 2: cdabcabb
6 | 3: dabcabb
```

- 4글자를 기준으로 정렬을 해보자
- 4번 접미사와 0번 접미사는 두 글자를 기준으로 정렬하면 누가 앞에 와야 할까?

```
6:    cabb
2:    cdabcabb
```

- 6번 접미사의 그룹 번호: 2
- 2번 접미사의 그룹 번호: 5

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	0	3	5	6	0	3	2	0	2	1

```
    | 4: abcabb
0   | 0: abcdabcabb
    | 7: abb
1   | 9: b
2   | 8: bb
    | 1: bcdabcabb
3   |
    | 5: bcabb
4   | 6: cabb
5   | 2: cdabcabb
6   | 3: dabcabb
```

- 4글자를 기준으로 정렬을 해보자
- 4번 접미사와 0번 접미사는 두 글자를 기준으로 정렬하면 누가 앞에 와야 할까?

```
4: abcabb
0: abcdabcabb
```

- 2글자를 기준으로 정렬했을 때
- 4번 접미사가 앞서야 한다

접미사 배열

Suffix Array

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	2	6	8	9	1	5	7	0	4	3

```
0 | 7: abb
1 | 4: abcabb
2 | 0: abcdabcabb
3 | 9: b
4 | 8: bb
5 | 5: bcabb
6 | 1: bcdabcabb
7 | 6: cabb
8 | 2: cdabcabb
9 | 3: dabcabb
```

- 4글자를 기준으로 정렬을 해보자

접미사 배열

Suffix Array

```
0 | 7: abb
1 | 4: abca
2 | 0: abcd
3 | 9: b
4 | 8: bb
5 | 5: bcab
6 | 1: bcda
7 | 6: cabb
8 | 2: cdab
9 | 3: dabc
```

인덱스:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
문자열 S:	a	b	c	d	a	b	c	a	b	b
그룹 번호:	2	6	8	9	1	5	7	0	4	3

- 4글자를 기준으로 정렬이 되어있는 상태

접미사 배열

Suffix Array

- t글자를 기준으로 정렬되어 있다면, t*2글자를 기준으로도 정렬할 수 있다
- N개의 문자열을 정렬하는데 걸리는 시간: O(NlgN)
- 그런데, 문자열 비교가 아니고 정수 비교 2번으로 정렬할 수 있다.
- 따라서, O(N^2lgN)이 아니고 O(NlgN)
- 정렬은 총 lgN번 반복된다.
- 따라서, O(N(lgN)^2) 이다.

접미사 배열 2

https://www.acmicpc.net/problem/13264

- https://gist.github.com/Baekjoon/3bf266d04f7cf4244a48192cae079f89
- https://gist.github.com/Baekjoon/8f496d0648c97eb42d94e135e635f930

서로 다른 부분 문자열의 개수

https://www.acmicpc.net/problem/11478

- 모든 부분 문자열은 suffix의 prefix 이다.

- abcde의 서로 다른 부분 문자열은 몇 개일까?

서로 다른 부분 문자열의 개수

https://www.acmicpc.net/problem/11478

- 모든 부분 문자열은 suffix의 prefix 이다.

- abcd의 서로 다른 부분 문자열은 몇 개일까?
- 10개

- abcd
- bcd
- cd
- d

서로 다른 부분 문자열의 개수

https://www.acmicpc.net/problem/11478

- 모든 부분 문자열은 suffix의 prefix 이다.

- abcd의 서로 다른 부분 문자열은 몇 개일까?
- 10개

- abcd (a, ab, abc, abcd)
- bcd (b, bc, bcd)
- cd (c, cd)
- d (d)

서로 다른 부분 문자열의 개수

https://www.acmicpc.net/problem/11478

- 모든 부분 문자열은 suffix의 prefix 이다.

- abab의 서로 다른 부분 문자열은 몇 개일까?
- 7개

- ab (a, ab)
- abab (a, ab, aba, abab)
- b (b)
- bab (b, ba, bab)

서로 다른 부분 문자열의 개수

https://www.acmicpc.net/problem/11478

- prefix가 같은 것의 개수를 빼줘야 한다.
- suffix array는 사전순 정렬이기 때문에, 바로 인접한 것과 비교를 해야 한다.
- i와 i-1이 prefix가 몇개 까지 겹치는 지를 세어줘야 한다.

서로 다른 부분 문자열의 개수

https://www.acmicpc.net/problem/11478

- https://gist.github.com/Baekjoon/6db55d4083f0fb4c9226

LCP

Longest Common Prefix

- 가장 긴 prefix의 길이
- 앞에서 구한 P배열을 이용하면 LCP을 lgN만에 구할 수 있다.
- 두 suffix i와 i+1가 있을 때, 큰 k부터 1씩 감소해나가면서 비교할 수 있다.

서로 다른 부분 문자열의 개수 2

https://www.acmicpc.net/problem/11479

- LCP를 lgN만에 구하면 된다.

서로 다른 부분 문자열의 개수 2

https://www.acmicpc.net/problem/11479

- https://gist.github.com/Baekjoon/45770e6c00d4fd7009b7dd7f24a6f80e

기수 정렬

Radix Sort

- 낮은 자리수 부터 비교하면서 정렬해나가는 방법

기수 정렬

Radix Sort

- 260, 35, 25, 160, 8, 90, 33, 180, 23, 45, 10, 98을 정렬해보자

기수 정렬

Radix Sort

- 260, 35, 25, 160, 8, 90, 33, 180, 23, 45, 10, 98을 정렬해보자
- 0: 260, 160, 90, 180, 10
- 1:
- 2:
- 3: 33, 23
- 4:
- 5: 35, 25, 45
- 6:
- 7:
- 8: 8, 98
- 9:

기수 정렬

Radix Sort

- 0: 260, 160, 90, 180, 10
- 1:
- 2:
- 3: 33, 23
- 4:
- 5: 35, 25, 45
- 6:
- 7:
- 8: 8, 98
- 9:
- 결과: 260, 160, 90, 180, 10, 33, 23, 35, 25, 45, 8, 98

기수 정렬

Radix Sort

- 260, 160, 90, 180, 10, 33, 23, 35, 25, 45, 8, 98을 정렬해보자
- 0: 8
- 1: 10
- 2: 23, 25
- 3: 33
- 4: 45
- 5:
- 6: 260, 160
- 7:
- 8: 180
- 9: 90, 98

기수 정렬

Radix Sort

- 0: 8
- 1: 10
- 2: 23, 25
- 3: 33
- 4: 45
- 5:
- 6: 260, 160
- 7:
- 8: 180
- 9: 90, 98
- 결과: 8, 10, 23, 25, 33, 45, 260, 160, 180, 90, 98

기수 정렬

Radix Sort

- 8, 10, 23, 25, 33, 45, 260, 160, 180, 90, 98을 정렬해보자
- 0: 8, 10, 23, 25, 33, 45, 90, 98
- 1: 160, 180
- 2: 260
- 3:
- 4:
- 5:
- 6:
- 7:
- 8:
- 9:

기수 정렬

Radix Sort

- 0: 8, 10, 23, 25, 33, 45, 90, 98
- 1: 160, 180
- 2: 260
- 3:
- 4:
- 5:
- 6:
- 7:
- 8:
- 9:
- 결과: 8, 10, 23, 25, 33, 45, 90, 98, 160, 180, 260

기수 정렬

Radix Sort

- 기수 정렬의 시간 복잡도는 O(dN) 이다
- 여기서 N은 수의 개수, d는 수의 자리

접미사 배열

Suffix Array

- t글자를 기준으로 정렬되어 있다면, t*2글자를 기준으로도 정렬할 수 있다
- N개의 문자열을 기수 정렬하는데 걸리는 시간: O(N)
- 두 번 정렬해야 하기 때문에 O(N)
- 정렬은 총 lgN번 반복된다.
- 따라서, O(NlgN) 이다.

접미사 배열

Suffix Array

- https://gist.github.com/Baekjoon/822fd97fb81ebce548854d76f19df933

접미사 배열

Suffix Array

- O(N)만에 접미사 배열을 구현할 수 있다
- https://github.com/kcm1700/algorithms/blob/master/string/suffix_array.cpp

Suffix Array

https://www.acmicpc.net/problem/9248

- 접미사 배열과 LCP 배열을 만드는 문제

Suffix Array

https://www.acmicpc.net/problem/9248

- LCP[i] = i번째 Suffix와 i-1번째 Suffix의 LCP 길이

Suffix Array

https://www.acmicpc.net/problem/9248

- https://gist.github.com/Baekjoon/f83f42df84084dffc7c610f54bc37c71

Cubeditor

https://www.acmicpc.net/problem/1701

- 소문자 5,000개 이하로 구성된 문자열 S가 주어진다
- S의 부분 문자열은 연속된 일부분
- 두 번 이상 등장하는 부분 문자열 중에서 가장 긴 것의 길이?

Cubeditor

https://www.acmicpc.net/problem/1701

- 모든 부분 문자열은
- Suffix의 Prefix이다

	부분 문자열	

Cubeditor

https://www.acmicpc.net/problem/1701

- 즉, 모든 접미사를 구하고 LCP 길이의 최대값이 정답이 된다

Cubeditor

https://www.acmicpc.net/problem/1701

- https://gist.github.com/Baekjoon/a393f18ad365de2e1274933cd2283d9d

공통 부분 문자열

https://www.acmicpc.net/problem/5582

- 두 문자열에 등장하는 부분 문자열 (연속) 중에서 가장 긴 것을 찾는 문제

- ABRACADABRA
- ECADADABRBCRDARA

공통 부분 문자열

https://www.acmicpc.net/problem/5582

- 두 문자열에 등장하는 부분 문자열 (연속) 중에서 가장 긴 것을 찾는 문제

- ABRAC**ADABR**A
- ECAD**ADABR**BCRDARA

공통 부분 문자열

https://www.acmicpc.net/problem/5582

- 두 문자열에 등장하는 부분 문자열 (연속) 중에서 가장 긴 것을 찾는 문제

- ABRAC**ADABR**A
- ECAD**ADABR**BCRDARA

- D[i][j] = D[i-1][j-1] + 1 (A[i] == A[j]) else 0

공통 부분 문자열

https://www.acmicpc.net/problem/5582

- A
- ABRA
- ABRACADABRA
- ACADABRA
- ADABRA
- BRA
- BRACADABRA
- CADABRA
- DABRA
- RA
- RACADABRA
- ABRBC
- ADABRBC
- ADADABRBC
- BC
- BRBC
- C
- CADADABRBC
- DABRBC
- DADABRBC
- ECADADABRBC
- RBC

공통 부분 문자열

https://www.acmicpc.net/problem/5582

- A의 suffix x에 대해서, s보다 크면서 가장 작은 B의 suffix y를 찾는다
- x와 y의 LCP가 공통 부분 문자열이 된다.
- 이 값 중에서 가장 큰 값을 찾으면 된다.

공통 부분 문자열

https://www.acmicpc.net/problem/5582

- 이 방법은 LCP를 구하는 것이 O(N) 이다

공통 부분 문자열

https://www.acmicpc.net/problem/5582

- 앞의 방법은 아래와 같이 두 문자열의 접미사 배열을 구하고 그것을 합친 것으로 볼 수 있다
- abc의 접미사 배열
- abc
- bc
- c
- bcd의 접미사 배열
- bcd
- cd
- d

공통 부분 문자열

https://www.acmicpc.net/problem/5582

- 앞의 방법은 아래와 같이 두 문자열의 접미사 배열을 구하고 그것을 합친 것으로 볼 수 있다
- abc의 접미사 배열
- abc
- bc
- c
- bcd의 접미사 배열
- bcd
- cd
- d
- abc와 bcd의 접미사 배열을 합친 결과
- abc
- bc
- bcd
- c
- cd
- d

공통 부분 문자열

https://www.acmicpc.net/problem/5582

- 이것은 두 문자열을 합친 다음 접미사 배열을 구한 결과와 같다

- abcbcd 의 접미사 배열
  - abcbcd
  - bcbcd
  - bcd
  - cbcd
  - cd
  - d
- abc와 bcd의 접미사 배열을 합친 결과
  - abc
  - bc
  - bcd
  - c
  - cd
  - d

공통 부분 문자열

https://www.acmicpc.net/problem/5582

- 정답은 두 문자열을 합친 다음, 접미사 배열의 LCP의 최댓값이 된다

공통 부분 문자열

https://www.acmicpc.net/problem/5582

- 반례가 존재한다
- A = AA
- B = AAA
- AAAAA의 접미사
- A
- AA
- AAA
- AAAA
- AAAAA

공통 부분 문자열

https://www.acmicpc.net/problem/5582

- 사이에 A와 B에 등장할 수 없는 문자를 추가하면 된다
- S = A + '#' + B

공통 부분 문자열

https://www.acmicpc.net/problem/5582

- https://gist.github.com/Baekjoon/3dc030c811c306c2636113534935eca9

Hidden Password

https://www.acmicpc.net/problem/3789

- 길이가 N인 문자열 S가 주어진다.
- 문자열 S의 가장 왼쪽 글자를 오른쪽에 붙여가면서 만들 수 있는 단어는 총 N개가 있다
- 예: S = alabala
- alabala
- labalaa
- abalaal
- balaala
- alaalab
- laalaba
- aalabal

Hidden Password

https://www.acmicpc.net/problem/3789

- 길이가 N인 문자열 S가 주어진다.
- 문자열 S의 가장 왼쪽 글자를 오른쪽에 붙여가면서 만들 수 있는 단어는 총 N개가 있다
- 이 때, 사전 순으로 가장 앞서는 단어를 찾는 문제

Hidden Password

https://www.acmicpc.net/problem/3789

- 글자의 길이를 2배로 한 다음, 접미사 배열을 만든다
- 접미사의 번호가 원래 문자열의 길이보다 작은 것 중 첫 번째가 정답이 된다.

Hidden Password

https://www.acmicpc.net/problem/3789

- `S = dbac, S*2 = dbacdbac`
- ac
- acdbac
- bac
- bacdbac
- c
- cdbac
- dbac
- dbacdbac

Hidden Password

https://www.acmicpc.net/problem/3789

- `S = baba, S*2 = bababa`
- a
- aba
- ababa
- abababa
- ba
- baba
- bababa
- babababa

Hidden Password

https://www.acmicpc.net/problem/3789

- 같을 때는, 인덱스가 뒤에 있는것을 먼저 오게 정렬하면 된다

Hidden Password

https://www.acmicpc.net/problem/3789

- https://gist.github.com/Baekjoon/ac8a8ad7295db9f42889113c2d4b74ca

가장 긴 팰린드롬 부분 문자열

https://www.acmicpc.net/problem/13275

- 문자열 S의 가장 긴 팰린드롬 부분 문자열을 찾는 문제

가장 긴 팰린드롬 부분 문자열

200

https://www.acmicpc.net/problem/13275

- 문자열 S와 S' (S를 뒤집은 것)을 만들고
- 공통 부분 문자열 문제와 비슷하게 풀면 된다

가장 긴 팰린드롬 부분 문자열

https://www.acmicpc.net/problem/13275

- 문자열 S와 S' (S를 뒤집은 것)을 만들고
- 공통 부분 문자열 문제와 비슷하게 풀면 된다

가장 긴 팰린드롬 부분 문자열

https://www.acmicpc.net/problem/13275

- S = banana
- S' = ananab
- S+'#'+S' = banana#ananab

가장 긴 팰린드롬 부분 문자열

https://www.acmicpc.net/problem/13275

- 6 #ananab
- 5 a#ananab (LCP = 0)
- 11 ab (LCP = 1)
- 3 ana#ananab (LCP = 1)
- 9 anab (LCP = 3)
- 1 anana#ananab (LCP = 3)
- 7 ananab (LCP = 5)
- 12 b (LCP = 0)
- 0 banana#ananab (LCP = 1)
- 4 na#ananab (LCP = 0)
- 10 nab (LCP = 2)
- 2 nana#ananab (LCP = 2)
- 8 nanab (LCP = 4)

가장 긴 팰린드롬 부분 문자열

https://www.acmicpc.net/problem/13275

- https://gist.github.com/Baekjoon/320400c05b01f4c890e8cdf5be5ee639