7주차 Virtual Memory Management pt.1

가상 메모리 관리

- 가상 메모리(기억장치)
    - Non-continuous allocation
        - 사용자 프로그램을 block으로 분할하여 적재/실행
    - Paging/Sementation system
- 가상 메모리 관리의 목적
    - 가상 메모리 시스템 **성능 최적화**
        - cost model - 성능을 표현하기 위한 지표
        - 다양한 최적화 기법

Cost Model for Virtual Memory System

- Page fault frequency (발생 빈도)
- Page fault rate (발생률)
- page fault가 발생하면 오버헤드가 큼 ⇒ cost가 큼 ⇒ Page fault rate를 최소화 할 수 있도록 전략들을 설계해야 함
  - Context switch 및 Kernel 개입을 최소화
  - 시스템 성능 향상
- 용어
  - Page reference string (d) ⇒ 효율적인 알고리즘을 설계할 때 평가하기 위한 기준으로 사용 가능
    - 프로세스의 수행 중 참조한 페이지 번호 순서

$$\omega = r_1 r_2 \cdots r_k \cdots r_T$$

- r_i = 페이지 번호, $r_i \in \{0, 1, 2, \cdots, N-1\}$
- **N** : 프로세스의 페이지 수 (0 ~ N-1)

  - Page fault rate = F(w)

$$F(\omega) = \frac{Num.of\ page\ faults\ during\ \omega}{|\omega|}$$

    - |w| = page reference string의 길이 = 참조한 페이지의 수
    - 전체 참조 개수 중에 몇 번 page fault가 발생했는가

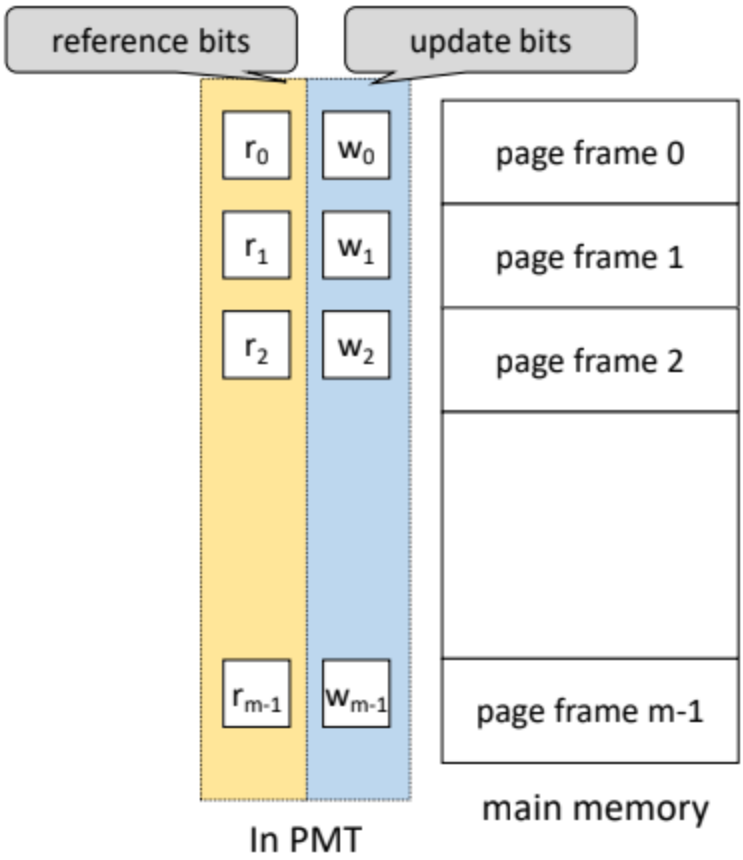
Hardware Components

- Address translation device (주소 사상 장치)
  - 주소 사상을 효율적으로 수행하기 위해 사용
    - TLB (associated memories), Dedicated page-table register, Cache memories

- **Bit Vectors**
  - Page 사용 상황에 대한 정보를 기록하는 비트들
  - Reference bits (참조 비트, used bits)
  - Update bits (갱신 비트, modified bits, write bits, **dirty bits**)

Bit Vectors

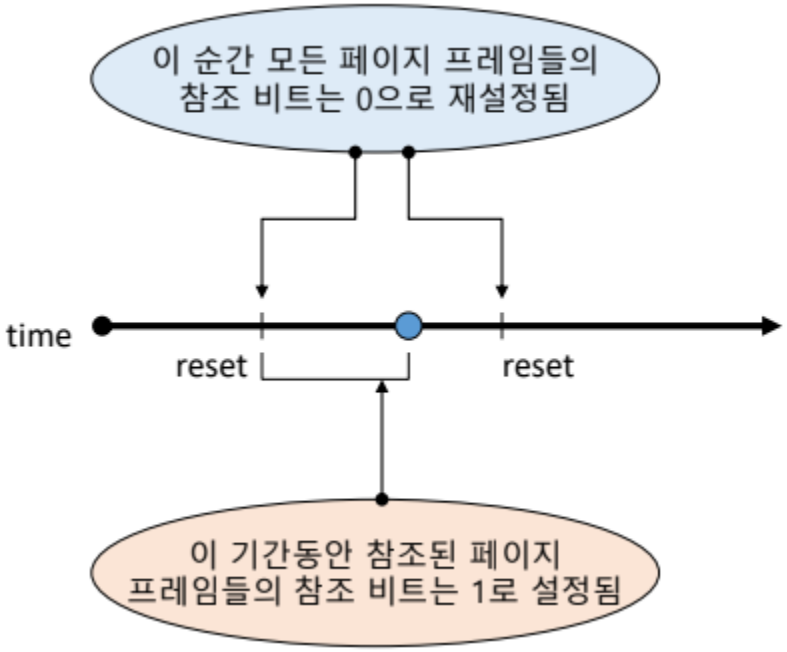
- page frame 하나 당 reference bit와 update bit도 하나씩 있다.
- reference bits와 update bits는 벡터



- Reference bit vector
  - 메모리에 적재된 각각의 page가 최근에 참조 되었는지를 표시
  - 운영

1. 프로세스에 의해 참조되면 해당 page의 Ref. bit를 1로 설정
2. 주기적으로 모든 reference bit를 0으로 초기화

- Reference bit를 확인함으로서 최근에 참조된 page들을 확인 가능



- Update bit vector
  - Page가 메모리에 적재된 후, 프로세스에 의해 수정 되었는지를 표시 ⇒ 메모리에서는 값이 바뀌지만 swap device에서는 값이 그대로이기 때문에 데이터의 무결성을 유지하기 위해 표시
  - 주기적 초기화 없음, 메모리에서 나올 때 초기화
  - Update bit = 1
    - 해당 page의 (Main memory 상 내용) =/= (Swap device의 내용)
    - 해당 page에 대한 Write-back (to swap device)이 필요

Software Components

- 가상 메모리 성능 향상을 위한 관리 기법들
  - Allocation strategies (할당 기법)

- Fetch strategies
- Placement strategies (배치 기법)
- Replacement strategies (교체 기법)
- Cleaning strategies (정리 기법)
- Load control strategies (부하 조절 기법)

Allocation Strategies

- 각 프로세스에게 메모리를 얼마 만큼 줄 것인가?
  - Fixed allocation (고정 할당) : 프로세스의 실행 동안 고정된 크기의 메모리 할당, 페이지 프레임의 수를 고정해서 준다.
  - Variable allocation (가변 할당) : 프로세스의 실행 동안 할당하는 메모리의 크기가 유동적, 페이지 프레임의 수가 가변적이다.
- 고려사항
  - 프로세스 실행에 필요한 메모리 양을 예측해야 함
  - 너무 큰 메모리 할당 (Too much allocation) ⇒ 메모리가 낭비 됨
  - 너무 적은 메모리 할당 (Too small allocation) ⇒ Page fault rate 올라감 ⇒ 시스템 성능 저하

Fetch Strategies

- 특정 page를 메모리에 언제 적재할 것인가? (swap device에서 memory로 언제 가져올 것인가)
  - Demand fetch (demand paging)
    - 프로세스가 참조하는 페이지들만 적재
    - Page fault overhead
  - Anticipatory fetch (pre-paging)
    - 참조될 가능이 높은 page 예측
    - 가까운 미래에 참조될 가능성이 높은 page를 미리 적재

        - 예측 성공 시, page fault overhead가 없음
        - Prediction overhead (Kernel의 개입), Hit ratio(예상 적중 확률)에 민감함
- 실제 대부분의 시스템은 Demand fetch 기법 사용
    - 일반적으로 준수한 성능을 보여 줌
    - Anticipatory fetch
        - Prediction overhead, 잘못된 예측 시 자원 낭비가 금

Placement Strategies

- Page/segment를 어디에 적재할 것인가?
- Paging system에는 불필요
- Segmentation system에서의 배치 기법
    - First-fit
    - Best-fit
    - Worst-fit
    - Next-fit

Replacement Strategies

- 새로운 page를 어떤 page와 교체할 것인가? (빈 page frame이 없는 경우)
    - Fixed allocation
        - MIN(OPT, B0) algorithm
        - Random algorithm
        - FIFO(First In First Out) algorithm
        - LRU(Least Recently Used) algorithm
        - LFU(Least Frequently Used) algorithm
        - NUR(Not Used Recently) algorithm
        - Clock algorithm

        - Second chance algorithm
    - Variable allocation
        - VMIN(Variable MIN) algorithm
        - WS(Working Set) algorithm
        - PFF(Page Fault Frequency) algorithm
- 밑에서 자세히 설명

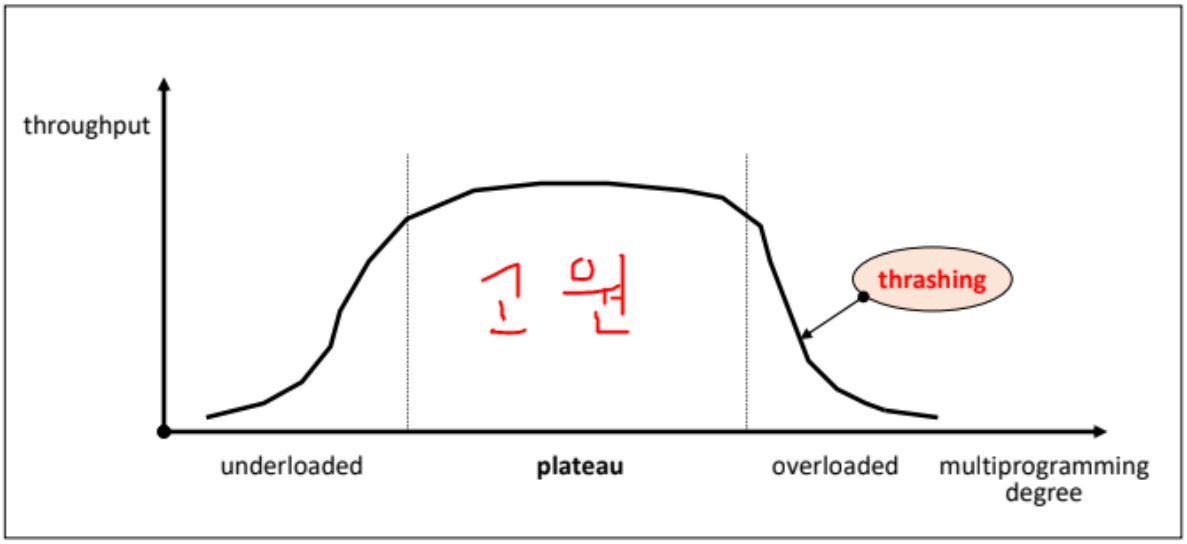
Cleaning Strategies

- 변경된 page를 언제 write-back 할 것인가? (update-bit(dirty-bit)를 언제 치울 것인가)
    - write-back : 변경된 내용을 swap device에 반영
    - Demand cleaning
        - 해당 page에 메모리에서 내려올 때 write-back
    - Anticipatory cleaning (pre-cleaning)
        - 더 이상 변경될 가능성이 없다고 판단 할 때, 미리 write-back
        - Page 교체 시 발생하는 write-back 시간 절약
        - Write-back 이후, page 내용이 수정되면, overhead
- 실제 대부분의 시스템은 Demand cleaning 기법 사용
    - 일반적으로 준수한 성능을 보여 줌
    - Anticipatory cleaning
        - Prediction overhead, 잘못된 예측 시 자원 낭비가 큼

Load Control Strategies

- 시스템의 multi-programming degree 조절
    - multi-programming degree : 시스템에 들어온 프로세스의 수
    - Allocation strategies와 연계됨
- 적정 수준의 multi-programming degree를 유지해야 함

- Plateau(고원) 영역으로 유지
- 저부하 상태 (Under-loaded)
  - 시스템 자원 낭비, 성능 저하
- 고부하 상태 (Over-loaded)
  - 자원에 대한 경쟁 심화, 성능 저하
  - Thrashing (스레싱) 현상 발생 : 과도한 page fault가 발생하는 현상

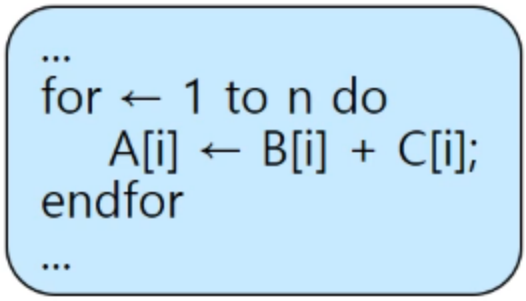


Replacement Strategies

Locality

- 프로세스가 프로그램/데이터의 특정 영역을 집중적으로 참조하는 현상
- 원인
  - Loop structure in program
  - Array, structure 등의 데이터 구조
- 공간적 지역성 (Spatial locality)
  - 참조한 영역과 인접한 영역을 참조하는 특성
- 시간적 지역성 (Temporal locality)

    - 한 번 참조한 영역을 곧 다시 참조하는 특성
- 예시
    - 가정
        - Paging system
        - Page size = 1000 words
        - Machine instruction size = 1 word
        - 주소 지정은 word 단위로 이루어짐
        - 프로그램은 4번 page에 continuous allocation 됨
        - n = 1000



Memory address	Machine code
4000	(R1) ← ONE
4001	(R2) ← n
4002	compare R1, R2
4003	branch greater 4009
4004	(R3) ← B(R1)
4005	(R3) ← (R3) + C(R1)
4006	A(R1) ← (R3)
4007	(R1) ← (R1) + 1
4008	branch 4002
...	...
6000-6999	storage for array A
7000-7999	storage for array B
8000-8999	storage for array C
9000	storage for ONE
9001	storage for n

```
...
for ← 1 to n do
   A[i] ← B[i] + C[i];
endfor
...
```

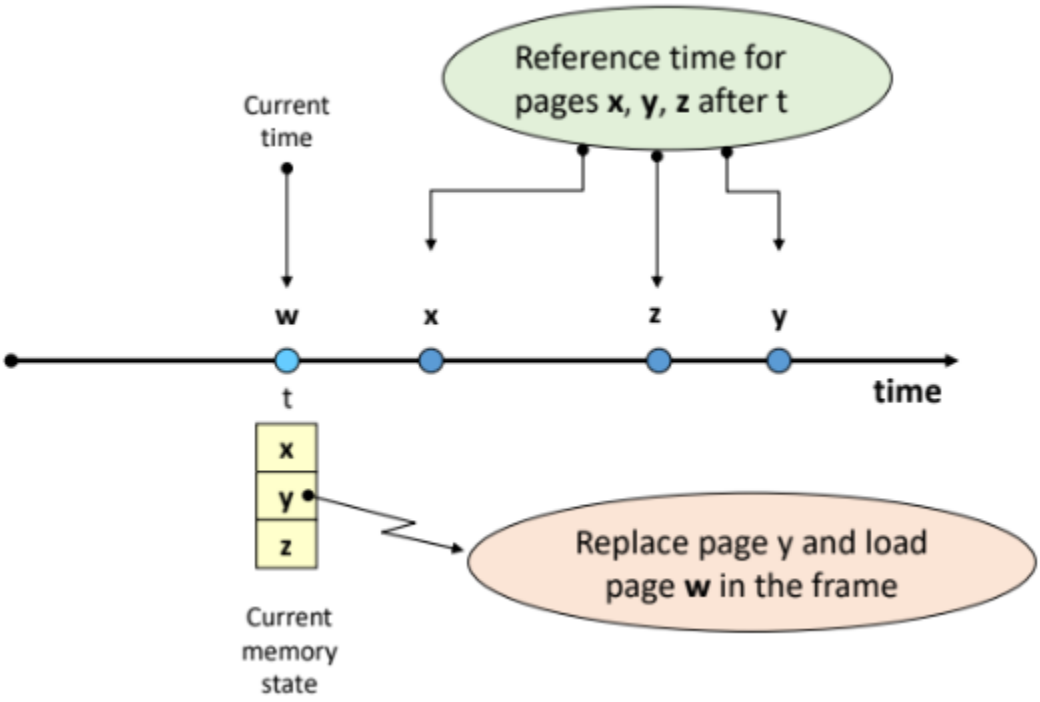
- $\omega = 494944(47484644)^{1000}$
- 9000번의 메모리 참조 중 5개의 page만을 집중적으로 접근하게 됨

Fixed allocation

- 각 프로세스에게 고정된 수의 page frame을 주는 것

Min Algorithm (OPT algorithm)

- 1966년 Belady에 의해 제시
- Minimize page fault frequency (proved)
  - Optimal solution - 최적의 솔루션으로 증명됨
- 기법
  - 앞으로 가장 오랫동안 참조되지 않을 page 교체
    - Tie-breaking rule(동점일 땐 어느 것을 선택할 것인지) : page 번호가 가장 큰/작은 페이지 교체
- 실현 불가능한 기법 (Unrealizable)
  - Page reference string을 미리 알고 있어야 함
- 배우는 이유? 교체 기법의 성능 평가 도구로 사용 됨



- Example
  - 4 page frames for the process, initially empty
  - ω = 1 2 6 1 4 5 1 2 1 4 5 6 4 5

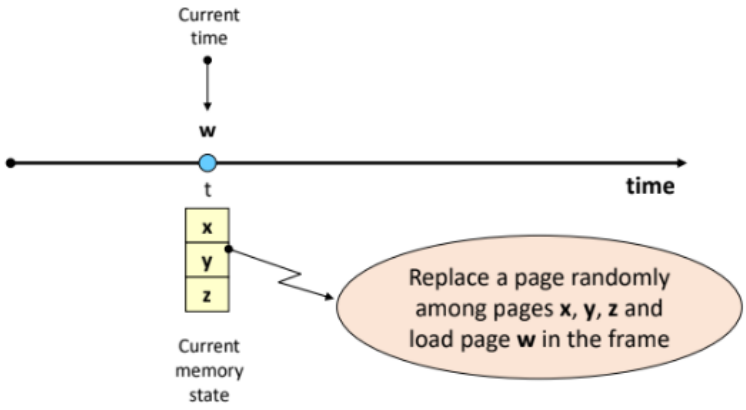
Time	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Ref. string	1	2	6	1	4	5	1	2	1	4	5	6	4	5
Memory state	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	6
		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
			6	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5
					4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Page fault	F	F	F		F	F						F		

  - **Number of page faults = 6**

Random Algorithm

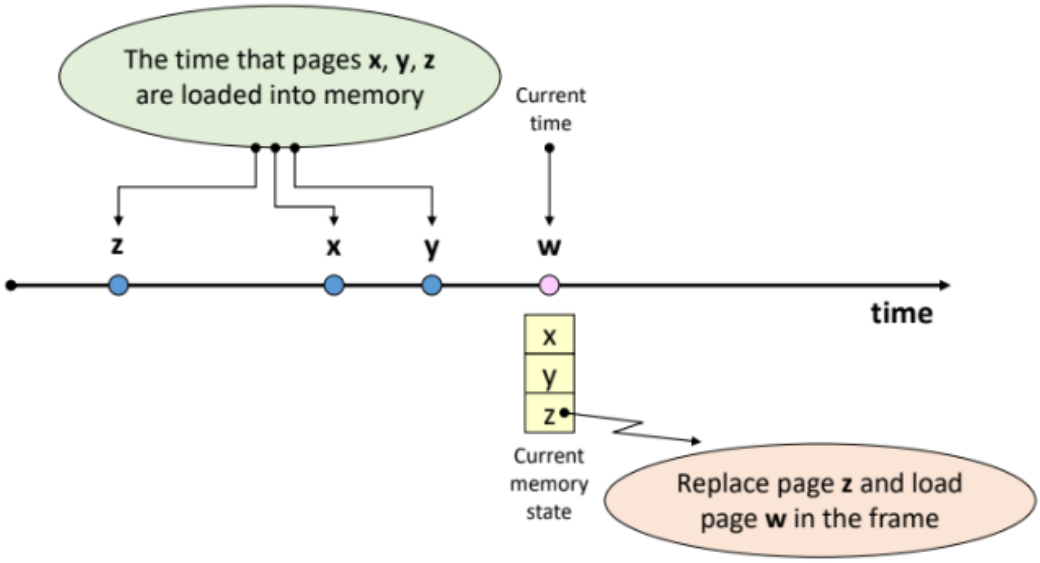
- 무작위로 교체할 page 선택
- Low overhead

- No policy



FIFO Algorithm

- First In First Out
  - 가장 오래된 page를 교체



- Page가 적재된 시간을 기억하고 있어야 함
- 자주 사용되는 page가 교체 될 가능성이 높음
  - Locality에 대한 고려가 없음

ω = 1 2 6 1 4 5 1 2 1 4 5 6 4 5

Time	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Ref. string	1	2	6	1	4	5	1	2	1	4	5	6	4	5
Memory state	1	1	1	1	1	5	5	5	5	5	5	5	4	4
		2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	5
			6	6	6	6	6	2	2	2	2	2	2	2
					4	4	4	4	4	4	4	6	6	6
Page fault	F	F	F		F	F	F	F				F	F	F

- **Number of page faults** = 10

- FIFO anomaly (Belady's anomaly)
  - FIFO 알고리즘의 경우, 더 많은 page frame을 할당 받음에도 불구하고 page fault의 수가 증가하는 경우가 있음

- ω = 1 2 3 4 1 2 5 1 2 3 4 5

Time	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ref. string	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Memory state	1	1	1	4	4	4	5	5	5	5	5	5
		2	2	2	1	1	1	1	1	3	3	3
			3	3	3	2	2	2	2	2	4	4
Page fault	F	F	F	F	F	F	F			F	F	

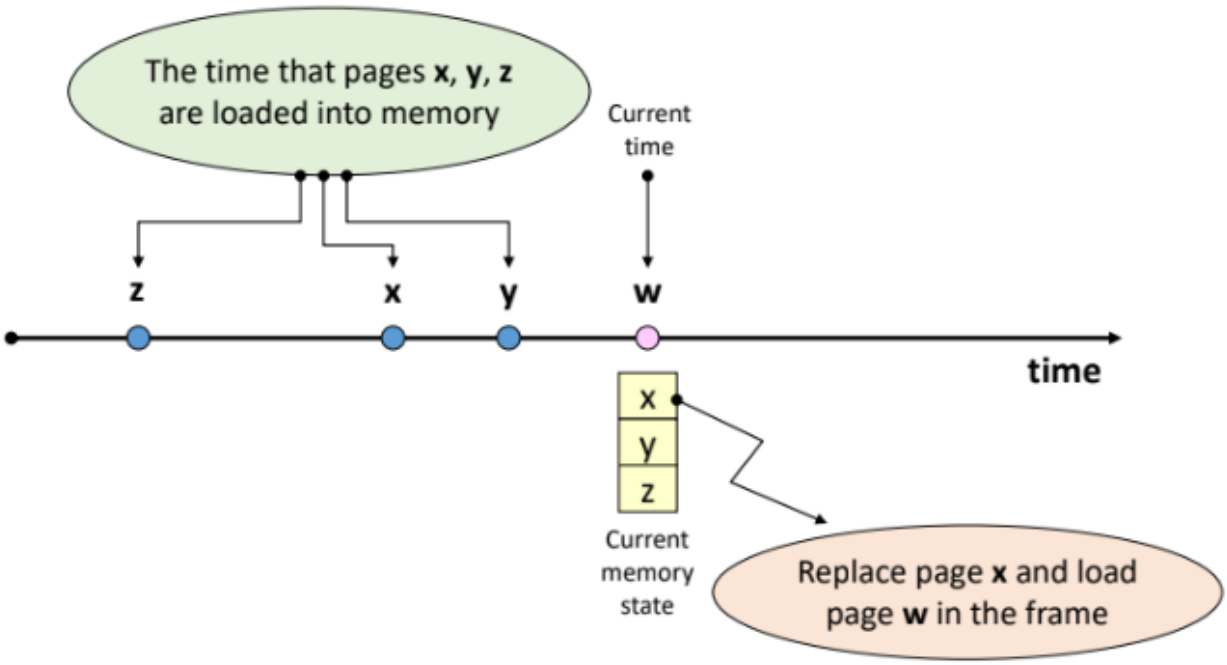
- **Number of page faults** = 9

Time	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ref. string	1	2	3	4	1	2	5	1	2	3	4	5
Memory state	1	1	1	1								
		2	2	2								
			3	3								
				4								
Page fault	F	F	F	F								

- **Number of page faults** = 10

LRU (Least Recently Used) Algorithm

- 가장 오랫동안 참조되지 않은 page를 교체
- Page 참조 시 마다 시간을 기록해야 함
- **Locality**에 기반을 둔 교체 기법
- MIN algorithm에 근접한 성능을 보여줌
- 실제로 가장 많이 활용되는 기법



- 단점
  - 참조 시 마다 시간을 기록해야 함 (Overhead)
    - 간소화된 정보 수집으로 해소 가능
      ex) 정확한 시간 대신, 순서만 기록
  - Loop 실행에 필요한 크기보다 작은 수의 page frame이 할당 된 경우, page fault 수가 급격히 증가함
    ex) loop를 위한 |Ref.string| = 4 / 할당된 page frame이 3개
    - Allocation 기법에서 해결 해야 함 (page frame을 4개로 늘려주면 됨)

- **Example**
  - 4 page frames for the process, initially empty
  - ω = 1 2 6 1 4 5 1 2 1 4 5 6 4 5

Time	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Ref. string	1	2	6	1	4	5	1	2	1	4	5	6	4	5
Memory state	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		2	2	2	2	5	5	5	5	5	5	5	5	5
			6	6	6	6	6	2	2	2	2	6	6	6
					4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Page fault	F	F	F		F	F		F				F		

  - **Number of page faults** = 7