

## 9. 대칭키 암호 운영모드

- ① 평문 길이가 암호 알고리즘의 블록 크기보다 클 때는 어떻게 암호화 할 것인가?  
→ 방법은, 평문을 암호 알고리즘의 블록 크기로 **분할**해서 암호화 하는 것이다.
- ② 긴 평문을 암호화하기 위한 여러 유형의 적절한 운영 방식이 있다.  
→ 이런 운영 방식들을 "암호 알고리즘의 **운영모드**"라 한다.

// 운영모드

모드	설 명
ECB 모드	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Electric CodeBook mode(전자 부호표 모드)</li> <li>• 가장 <b>단순</b>한 모드이다. 평문을 n개의 블록으로 분할한다.</li> <li>• 평문 크기가 블록 크기의 배수가 아니면, 마지막 블록은 덧붙이기가 필요</li> </ul>
CBC 모드	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cipher Block Chaining mode(암호 블록 연쇄 모드)</li> <li>• 암호문 블록을 <b>체인</b>처럼 연결시키는 방식이다.</li> </ul>
CFB 모드	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cipher-FeedBack mode(암호 피드백 모드)</li> <li>• 이전 단계의 <b>암호문 블록</b>을 암호 알고리즘의 입력으로 사용한다.</li> </ul>
OFB 모드	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Output-FeedBack mode(출력 피드백 모드)</li> <li>• 암호 알고리즘의 <b>출력</b>이 암호 알고리즘의 입력으로 사용된다.</li> </ul>
CTR 모드	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CounTeR mode(카운터 모드)</li> <li>• 증가하는 <b>카운터</b>를 암호화해서 키 스트림을 생성하는 스트림 암호이다.</li> </ul>

- ECB, CBC, CFB, OFB 모드는 DES에 적용할 목적으로 개발되었고
- CTR 모드는 2001년에 AES에 적용하기 위해 개발되었다.

// 암호 알고리즘의 수식 표현

암호화 :  $C = E_K(P)$

복호화 :  $P = D_K(C)$

P	평문(plaintext)
C	암호문(ciphertext)
$E_K$	비밀키 K를 적용한 암호 알고리즘
$D_K$	비밀키 K를 적용한 복호 알고리즘



탐구

운영모드 정리 - 한국정보보호진흥원 TTA저널 참조

모드	암호화, 복호화 수식 표현	특징
ECB	암호화 : $C_i = E_K(P_i)$ 복호화 : $P_i = D_K(C_i)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 평문을 N개의 블록으로 분할</li> <li>• 각 암호화를 하는데 <b>같은 키</b>를 사용한다.</li> </ul>
CBC	암호화 : $C_i = E_K(P_i \oplus C_{i-1})$ 복호화 : $P_i = D_K(C_i) \oplus C_{i-1}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 평문 블록을 이전 암호문 블록과 <b>xor</b> 연산</li> <li>• 그리고, 암호화를 실시한다.</li> </ul>
CFB	암호화 : $C_i = P_i \oplus E_K(C_{i-1})$ 복호화 : $P_i = C_i \oplus E_K(C_{i-1})$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 실제 암호화를 위하여 <b>xor</b> 연산 사용</li> <li>• 블록보다 작은 단위로 암호화가 가능하다.</li> </ul>
OFB	암호화 : $C_i = P_i \oplus E_K(S_{i-1})$ 복호화 : $P_i = C_i \oplus E_K(S_{i-1})$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CFB 모드와 매우 유사하다.</li> <li>• 암호문의 각 비트는 이전 암호문 블록과는 독립적</li> </ul>
CTR	암호화 : $C_i = P_i \oplus E_K(N_i)$ 복호화 : $P_i = C_i \oplus E_K(N_i)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 카운터를 암호화한 후에 평문 블록과 <b>xor</b> 연산</li> <li>• 카운터는 <b>초기 벡터값</b>으로 사용된다.</li> </ul>

(주)  $P_i$ 는 평문,  $C_i$ 는 암호문,  $E_K(P_i)$ 는 암호화,  $D_K(C_i)$ 는 복호화를 의미한다.

- ECB, CBC, CTR은 **긴 메시지** 파일을 암호화 하는데 사용될 수 있고
- CFB, OFB는 **작은 데이터**를 암호화 하는데 사용될 수 있다.(Forouzan 참조. 240쪽)
- CFB, OFB, CTR은 복호화 연산 없이 **암호화 연산만** 사용된다.
- 즉, 복호화 과정에서 복호화 연산이 적용되지 않고 암호화 연산이 적용된다.

모드	유형(type)	초기 벡터	오류전파	암호 병행처리	복호 병행처리	덧붙이기
ECB	<b>블록 암호</b>	불필요(none)	No	가능	가능	사용
CBC	<b>블록 암호</b>	필요(yes)	<b>Yes</b>	<b>불가</b>	가능	사용
CFB	비동기 스트림 암호	필요(yes)	<b>Yes</b>	<b>불가</b>	가능	미사용
OFB	동기 스트림 암호	필요(yes)	No	<b>불가</b>	<b>불가</b>	미사용
CTR	동기 스트림 암호	필요-카운터	No	가능	가능	미사용

- 오류 전파 기준은 암호문의 특정 비트가 전송 도중에 **변조(손상, 오류)**된 경우이다.
- 오류 전파는 암호문의 특정 비트가 **손실(누락)**된 기준이 아니다.
- CFB는 재전송 공격에 취약점을 가진다.

**기출문제 분석**

1. 블록암호 알고리즘의 운영모드로 옳지 않은 것은? [2015년 국가 7급]

- ① ECB(Electronic Codebook)
- ② CBC(Cipher Block Chaining)
- ③ CFB(Cipher Feedback)
- ④ ECC(Error Correction Code)

☞ 대칭키 암호 운영모드

• ECB, CBC, CFB, OFB, CTR 모드 → ECC는 없다.

정답 : ④

2. 대칭키 블록 암호 알고리즘의 운영모드 중에서 한 평문 블록의 오류가 다른 평문 블록의 암호 결과에 영향을 미치는 오류 전이(error propagation)가 발생하지 않는 모드만을 묶은 것은?(단, ECB: Electronic Code Book, CBC: Cipher Block Chaining, CFB: Cipher Feedback, OFB: Output Feedback) [2018년 국가 9급]

- ① CFB, OFB                      ② ECB, OFB
- ③ CBC, CFB                      ④ ECB, CBC

☞ 대칭키 암호 운영모드

• 오류 전이(error propagation)가 발생하지 않는 모드는 ECB, OFB, CTR이다.

모드	유형(type)	초기 벡터(initialization vector)	오류 전파
ECB	블록 암호	필요 없음(none)	No
CBC	블록 암호	필요함(yes)	<b>Yes</b>
CFB	스트림 암호	필요함(yes)	<b>Yes</b>
OFB	스트림 암호	필요함(yes)	No
CTR	스트림 암호	필요함(yes) - 카운터	No

- 오류 전파 기준은 암호문의 특정 비트가 전송 도중에 변조(손상, 오류)된 경우이다.
- 오류 전파는 암호문의 특정 비트가 손실(누락)된 기준이 아니다.

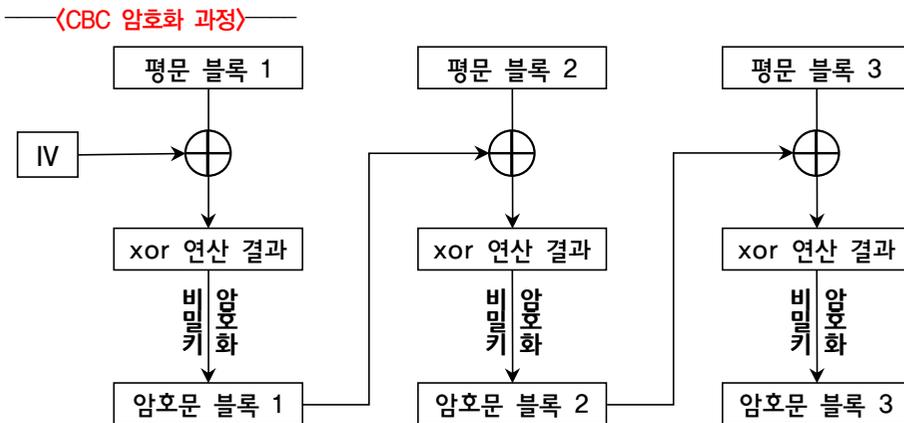
정답 : ②

3. 블록암호 알고리즘 운영모드에 대한 설명으로 가장 옳지 않은 것은? [2020년 서울 7급]

- ① CBC 모드는 현재의 평문 블록을 암호키로 암호화한 후 바로 직전의 암호블록과 XOR 연산을 수행한다.
- ② CFB 모드 동작에서는 평문 블록 내에 한 비트의 오류가 발생하면 모든 암호문에 영향을 미치게 된다.
- ③ OFB 모드는 전송 중에 비트 오류가 전파되지 않는 동기식 스트림 암호이다.
- ④ CTR 모드는 패딩이 필요 없고 암호화 및 복호화의 사전 준비를 할 수 있어 병렬처리가 가능하다.

☞ 운영모드

- CBC는 평문 블록과 이전 단계의 암호문 블록을 XOR 연산 후, 암호화를 수행한다.



// 운영모드 정리

모드	유형(type)	초기 벡터	오류 전파	암호 병행처리	복호 병행처리
ECB	블록 암호	필요 없음(none)	No	가능	가능
CBC	블록 암호	필요함(yes)	Yes	불가	가능
CFB	비동기식 스트림 암호	필요함(yes)	Yes	불가	가능
OFB	동기식 스트림 암호	필요함(yes)	No	불가	불가
CTR	동기식 스트림 암호	필요함 - 카운터	No	가능	가능

- 오류 전파 기준은 암호문의 특정 비트가 전송 도중에 변조(손상, 오류)된 경우이다.
- 오류 전파는 암호문의 특정 비트가 손실(누락)된 기준이 아니다.

4. 다음은 블록 암호의 운영모드 중 하나를 표현하고 있다. 해당 운영모드에 대해 추론할 수 있는 설명으로 옳은 것은? (단,  $i, j \geq 0, i \neq j$ 이다) [2022년 국가 7급]

$P_i$ : 평문 블록	$C_i = P_i \oplus O_i$
$C_i$ : 암호문 블록	$P_i = C_i \oplus O_i$
$E_k$ : 암호화 함수(키 $k$ 이용)	$O_i = E_K(I_i)$
$IV$ : 초기벡터(initial vector)	$I_i = O_{i-1}$ (단, $I_0 = IV$ )

- ①  $C_i$ 에 비트 오류가 발생하더라도 복호화된  $P_j$ 에 영향을 미치지 않는다.
- ②  $P_i$ 와  $P_j$ 가 동일할 경우  $C_i$ 와  $C_j$ 가 같아지는 문제점이 존재한다.
- ③ 고속의 암호화를 위해 별도의 전처리 없이 병렬처리가 가능하다.
- ④ 복호화에 사용되는  $IV$ 값은 암호화에 사용된  $IV$ 값과 다를 수 있다.

☞ 운영모드

// 먼저, 암호화 과정을 분석하면 다음과 같다.

$i = 0$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>C_0 = P_0 \oplus O_0 = P_0 \oplus E_K(I_0) = P_0 \oplus E_K(IV)</math></li> <li>• <math>P_0 = C_0 \oplus O_0 = C_0 \oplus E_K(I_0) = C_0 \oplus E_K(IV)</math></li> </ul>
$i = 1$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>C_1 = P_1 \oplus O_1 = P_1 \oplus E_K(I_1) = P_1 \oplus E_K(O_0) = P_1 \oplus E_K(E_K(I_0)) = P_1 \oplus E_K(E_K(IV))</math></li> <li>• <math>P_1 = C_1 \oplus O_1 = C_1 \oplus E_K(I_1) = C_1 \oplus E_K(O_0) = C_1 \oplus E_K(E_K(I_0)) = C_1 \oplus E_K(E_K(IV))</math></li> </ul>

- $i=0$ 이면  $IV$ 를 1번 암호한 것과 암호화 한다.
- $i=1$ 이면  $IV$ 를 2번 암호한 것과 암호화 한다.
- $i=2$ 이면  $IV$ 를 3번 암호한 것과 암호화 한다.
- $i=i$ 이면  $IV$ 를  $i+1$ 번 암호한 것과 암호화 한다.

- ①  $C_i$ 에 비트 오류가 발생하더라도 복호화된  $P_j$ 에 영향을 미치지 않는다.(○)
  - $C_i$ 와  $P_j$ 는 서로 아무런 **연관성 없이 암호화** 처리되므로( $i \neq j$ )
- ②  $P_i$ 와  $P_j$ 가 동일할 경우  $C_i$ 와  $C_j$ 가 같아지는 문제점이 존재한다.(×)
  - 같아지는 문제점이 존재하지 않는다.  $i \neq j$ 이므로
- ③ 고속의 암호화를 위해 별도의 전처리 없이 병렬처리가 가능하다.(×)
  - 병렬처리가 불가능하다. 이전에  $IV$ 를 암호 처리한 것이 필요하므로
- ④ 복호화에 사용되는  $IV$ 값은 암호화에 사용된  $IV$ 값과 다를 수 있다.(×)
  - $IV$ 값과 같아야 한다. 다르면 정상적으로 암호화가 될 수 없다.

5. 다음의 블록암호 운용모드 중, 암호 과정에서는 암호화 함수 E를, 복호 과정에서는 E와 다른 복호화 함수 D를 필요로 하는 것만을 모두 고르면? [2019년 국가 7급]

㉠. ECB    ㉡. CBC    ㉢. CFB    ㉣. OFB

- ① ㉠                      ② ㉠, ㉡  
 ③ ㉢, ㉣                ④ ㉠, ㉡, ㉣

♣ 운용모드

모드	암호화, 복호화 수식 표현	특징
ECB	암호화 : $C_i = E_K(P_i)$ 복호화 : $P_i = D_K(C_i)$	• 평문을 N개의 블록으로 분할 • 각 암호화 하는 데 <b>같은 키</b> 를 사용한다.
CBC	암호화 : $C_i = E_K(P_i \oplus C_{i-1})$ 복호화 : $P_i = D_K(C_i) \oplus C_{i-1}$	• 평문 블록을 이전 암호문 블록과 <b>xor</b> 연산 • 그리고, 암호화를 실시한다.
CFB	암호화 : $C_i = P_i \oplus E_K(C_{i-1})$ 복호화 : $P_i = C_i \oplus E_K(C_{i-1})$	• 실제 암호화를 위하여 <b>xor</b> 연산 사용 • 블록보다 작은 단위로 암호화가 가능하다.
OFB	암호화 : $C_i = P_i \oplus E_K(S_{i-1})$ 복호화 : $P_i = C_i \oplus E_K(S_{i-1})$	• CFB 모드와 매우 유사하다. • 암호문의 각 비트는 이전 암호문 블록과는 독립적
CTR	암호화 : $C_i = P_i \oplus E_K(N_i)$ 복호화 : $P_i = C_i \oplus E_K(N_i)$	• 카운터를 암호화한 후에 평문 블록과 <b>xor</b> 연산 • 카운터는 <b>초기 벡터값</b> 으로 사용된다.

(주)  $P_i$ 는 평문,  $C_i$ 는 암호문,  $E_K(P_i)$ 는 암호화,  $D_K(C_i)$ 는 복호화를 의미한다.

- ECB, CBC, CFB, OFB 모드는 DES에 적용할 목적으로 개발되었고
- CTR 모드는 2001년에 AES에 적용하기 위해 개발되었다.
- ECB, CBC, CTR은 긴 메시지 파일을 암호화 하는데 사용될 수 있고
- CFB, OFB는 작은 데이터를 암호화 하는데 사용될 수 있다.(Forouzan 참조. 240쪽)
- CFB, OFB, CTR은 복호화 연산 없이 암호화 연산만 사용된다.
- 즉, 복호화 과정에서 복호화 연산이 적용되지 않고 암호화 연산이 적용된다.
- 암호화 = 복호화 : CFB, OFB, CTR
- 암호화 ≠ 복호화 : ECB, CBC

6. 다음 내용에 해당하는 암호블록 운용모드를 바르게 나열한 것은? [2016년 지방 9급]

- ㄱ. 코드북(codebook)이라 하며, 가장 간단하게 평문을 동일한 크기의 평문 블록으로 나누고 키로 암호화하여 암호블록을 생성한다.
- ㄴ. 현재의 평문블록과 바로 직전의 암호블록을 XOR한 후 그 결과를 키로 암호화하여 암호블록을 생성한다.
- ㄷ. 각 평문블록별로 증가하는 서로 다른 카운터 값을 키로 암호화하고 평문 블록과 XOR하여 암호블록을 생성한다.

- ㉠ CBC    ECB    OFB
- ㉡ CBC    ECB    CTR
- ㉢ ECB    CBC    OFB
- ㉣ ECB    CBC    CTR

☞ 대칭키 암호 운용모드

모드	설 명
ECB 모드	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Electric CodeBook mode(전자 부호표 모드)</li> <li>• 가장 단순한 모드이다. 평문을 n개의 블록으로 분할한다.</li> <li>• 평문 크기가 블록 크기의 배수가 아니면, 마지막 블록은 덧붙이기가 필요</li> </ul>
CBC 모드	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cipher Block Chaining mode(암호 블록 연쇄 모드)</li> <li>• 암호문 블록을 체인처럼 연결시키는 방식이다.</li> </ul>
CFB 모드	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cipher-FeedBack mode(암호 피드백 모드)</li> <li>• 이전 단계의 암호문 블록을 암호 알고리즘의 입력으로 사용한다.</li> </ul>
OFB 모드	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Output-FeedBack mode(출력 피드백 모드)</li> <li>• 암호 알고리즘의 출력이 암호 알고리즘의 입력으로 사용된다.</li> </ul>
CTR 모드	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CounTeR mode(카운터 모드)</li> <li>• 증가하는 카운터를 암호화해서 키 스트림을 생성하는 스트림 암호이다.</li> </ul>

정답 : ㉣