(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0094064
(43) 공개일자 2024년06월25일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
*G21C 17/10* (2006.01) *G06F 17/18* (2006.01)
*G06N 7/00* (2023.01)
(52) CPC특허분류
*G21C 17/10* (2013.01)
*G06F 17/18* (2013.01)
(21) 출원번호 10-2022-0157066
(22) 출원일자 2022년11월22일
심사청구일자 2022년11월22일

(71) 출원인
**세종대학교산학협력단**
서울특별시 광진구 능동로 209 (군자동, 세종대학교)
(72) 발명자
**정우식**
경기도 남양주시 다산순환로 333 다산아이파크 2404동 804호
(74) 대리인
**이상민**

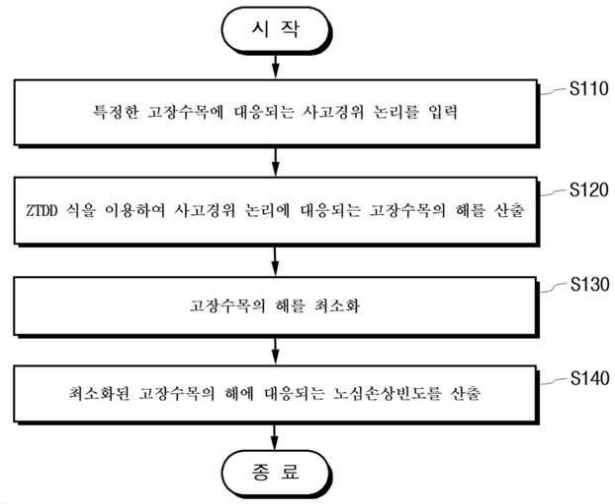
전체 청구항 수 : 총 12 항

(54) 발명의 명칭 **ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 노심손상빈도 산출 방법 및 장치**

## (57) 요 약

본 발명에 따른 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 노심손상빈도 산출 방법은 상기 확률론적안전성평가를 위하여 특정한 고장수목에 대응되는 사고경위 논리를 입력받는 단계; 기본사건 x에 관한 불리안 식을 x를 포함하는 부분, /x를 포함하는 부분 및 x와 /x를 포함하지 않는 부분으로 구분하여 변환하는 ZTDD(Zero-suppressed Ternary Decision Diagram) 식을 이용하여, 상기 사고경위 논리에 대응되는 고장수목의 해를 산출하는 단계; 상기 고장수목의 해를 최소화하는 단계; 및 상기 최소화된 고장수목의 해에 대응되는 노심손상빈도를 산출하는 단계를 포함한다.

*대 표 도* - 도1



(52) CPC특허분류
*G06N 7/005* (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1075001518
과제번호 2204017-0122-SB110
부처명 원자력안전위원회
과제관리(전문)기관명 (재단)한국원자력안전재단
연구사업명 원자력안전규제검증기술고도화
연구과제명 L2/L3 PSA 정량화 불확실성 해소를 위한 방법론 및 규제 코드 개발
기 여 율 1/1
과제수행기관명 세종대학교 산학협력단
연구기간 2022.04.01 ~ 2022.12.31

# 명 세 서

## 청구범위

### 청구항 1

원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가를 위해 노심손상빈도를 산출하는 방법에 있어서,

상기 확률론적안전성평가를 위하여 특정한 고장수목에 대응되는 사고경위 논리를 입력받는 단계;

기본사건 x에 관한 불리안 식을 x를 포함하는 부분, /x를 포함하는 부분 및 x와 /x를 포함하지 않는 부분으로 구분하여 변환하는 ZTDD(Zero-suppressed Ternary Decision Diagram) 식을 이용하여, 상기 사고경위 논리에 대응되는 고장수목의 해를 산출하는 단계;

상기 고장수목의 해를 최소화하는 단계; 및

상기 최소화된 고장수목의 해에 대응되는 노심손상빈도를 산출하는 단계

를 포함하는 것을 특징으로 하는 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 노심손상빈도 산출 방법.

### 청구항 2

원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가를 위해 노심손상빈도를 산출하는 방법에 있어서,

상기 확률론적안전성평가를 위하여 특정한 고장수목에 대응되는 사고경위 논리를 입력받는 단계;

기본사건 x에 관한 불리안 식을 x를 포함하는 부분, /x를 포함하는 부분 및 x와 /x를 포함하지 않는 부분으로 구분하여 변환하는 ZTDD 식 및 상기 ZTDD 식 간의 DTA(Delete-term approximation) 연산을 이용하여, 상기 사고경위 논리에 대응되는 고장수목의 근사해를 산출하는 단계;

상기 고장수목의 근사해를 최소화하는 단계; 및

상기 최소화된 고장수목의 근사해에 대응되는 노심손상빈도를 산출하는 단계

를 포함하는 것을 특징으로 하는 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 노심손상빈도 산출 방법.

### 청구항 3

제1항 또는 제2항에 있어서,

상기 ZTDD 식은

수학식 1과 같이 정의되는 것을 특징으로 하는 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 노심손상빈도 산출 방법.

[수학식 1]

$$xL + /xR + N = \langle x, L, R, N \rangle_{ZTDD}$$

여기서, x는 기본사건이고, /x는 x의 Boolean complement이고, L, R, N은 x를 포함하지 않는 불리안 식이다.

### 청구항 4

제3항에 있어서,

상기 고장수목의 해를 산출하는 단계는

$G(x) = \langle x, L_1, R_1, N_1 \rangle_{ZTDD}$ 및 $H(y) = \langle y, L_2, R_2, N_2 \rangle_{ZTDD}$ 로 나타낸 ZTDD 식을 서로 결합할 때, 수학식 2를 이용하는 것을 특징으로 하는 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 노심손상빈도 산출 방법.

[수학식 2]

$$
\begin{aligned}
&G(x) \bullet H(x) = \langle x, (L_1L_2 + L_1N_2 + N_1L_2), (R_1R_2 + R_1N_2 + N_1R_2), N_1N_2 \rangle_{ZTDD} \\
&G(x) + H(x) = \langle x, (L_1 + L_2), (R_1 + R_2), (N_1 + N_2) \rangle_{ZTDD} \\
&G(x) \bullet H(y) = \langle x, L_1H, R_1H, N_1H \rangle_{ZTDD} \\
&G(x) + H(y) = \langle x, L_1, R_1, (N_1 + H) \rangle_{ZTDD} \\
&x < y
\end{aligned}
$$

여기서, x와 y는 기본사건이고, x<y는 x가 y보다 ZTDD에서 더 높이 위치하는 것을 의미한다.

**청구항 5**

제3항에 있어서,

상기 고장수목의 해를 산출하는 단계는

ZTDD 식의 Boolean complement를 계산할 때, 수학식 3을 이용하는 것을 특징으로 하는 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 노심손상빈도 산출 방법.

[수학식 3]

$$
\begin{aligned}
&/\langle x, L, R, N \rangle_{ZTDD} = \langle x, /L/N, /R/N, 0 \rangle_{ZTDD} = \langle x, /(L+N), /(R+N), 0 \rangle_{ZTDD} \\
&/(xL + /xR + N) \\
&= (/x + /L)(x + /R)/N \\
&= x/L/N + /x/R/N + /L/R/N \\
&= x/L/N + /x/R/N + (x + /x)/L/R/N \\
&= x(/L/N + /L/R/N) + /x(/R/N + /L/R/N) \\
&= x/L/N + /x/R/N
\end{aligned}
$$

**청구항 6**

제3항에 있어서,

상기 고장수목의 해를 최소화하는 단계는

수학식 4를 이용하여 최소화하는 것을 특징으로 하는 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 노심손상빈도 산출 방법.

[수학식 4]

$$
\begin{aligned}
&Subsume(G(x), H(y)) = G(x) \backslash H(y) \\
&= \begin{cases}
G \backslash N_2 & , x > y \\
< x, L_1 \backslash H, R_1 \backslash H, N_1 \backslash H >_{ZTDD} & , x < y \\
< x, L_1 \backslash (L_2 \text{ or } N_2), R_1 \backslash (R_2 \text{ or } N_2), N_1 \backslash N_2 >_{ZTDD} & , x = y
\end{cases}
\end{aligned}
$$

**청구항 7**

원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가를 위해 노심손상빈도를 산출하는 장치에 있어서,

상기 확률론적안전성평가를 위한 특정한 고장수목에 대응되는 사고경위 논리를 입력받는 입력부;

기본사건 x에 관한 불리안 식을 x를 포함하는 부분, /x를 포함하는 부분 및 x와 /x를 포함하지 않는 부분으로 구분하여 변환하는 ZTDD 식을 이용하여, 상기 사고경위 논리에 대응되는 고장수목의 해를 산출하는 해산출부;

상기 고장수목의 해를 최소화하는 해최소화부; 및

상기 최소화된 고장수목의 해에 대응되는 노심손상빈도를 산출하는 노심손상빈도산출부;

를 포함하는 것을 특징으로 하는 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 노심손상빈도 산출 장치.

**청구항 8**

원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가를 위해 노심손상빈도를 산출하는 장치에 있어서,

상기 확률론적안전성평가를 위하여 특정한 고장수목에 대응되는 사고경위 논리를 입력받는 입력부;

기본사건 x에 관한 불리안 식을 x를 포함하는 부분, /x를 포함하는 부분 및 x와 /x를 포함하지 않는 부분으로 구분하여 변환하는 ZTDD 식 및 상기 ZTDD 식 간의 DTA 연산을 이용하여, 상기 사고경위 논리에 대응되는 고장수목의 근사해를 산출하는 근사해산출부;

상기 고장수목의 근사해를 최소화하는 해최소화부; 및상기 최소화된 고장수목의 근사해에 대응되는 노심손상빈도를 산출하는 노심손상빈도산출부

를 포함하는 것을 특징으로 하는 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 노심손상빈도 산출 장치.

**청구항 9**

제7항 또는 제8항에 있어서,

상기 ZTDD 식은

수학식 5와 같이 정의되는 것을 특징으로 하는 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 노심손상빈도 산출 장치.

[수학식 5]

$$xL + /xR + N = \langle x, L, R, N \rangle_{ZTDD}$$

여기서, x는 기본사건이고, /x는 x의 Boolean complement이고, L, R, N은 x를 포함하지 않는 불리안 식이다.

**청구항 10**

제9항에 있어서,

상기 해산출부는

$G(x) = \langle x, L_1, R_1, N_1 \rangle_{ZTDD}$ 및 $H(y) = \langle y, L_2, R_2, N_2 \rangle_{ZTDD}$ 로 나타낸 ZTDD 식을 서로 결합할 때, 수학식 6을 이용하는 것을 특징으로 하는 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 노심손상빈도 산출 장치.

[수학식 6]

$$G(x) \bullet H(x) = \langle x, (L_1L_2 + L_1N_2 + N_1L_2), (R_1R_2 + R_1N_2 + N_1R_2), N_1N_2 \rangle_{ZTDD}$$
$$G(x) + H(x) = \langle x, (L_1 + L_2), (R_1 + R_2), (N_1 + N_2) \rangle_{ZTDD}$$
$$G(x) \bullet H(y) = \langle x, L_1H, R_1H, N_1H \rangle_{ZTDD}$$
$$G(x) + H(y) = \langle x, L_1, R_1, (N_1 + H) \rangle_{ZTDD}$$
$$x < y$$

여기서, x와 y는 기본사건이고, x<y는 x가 y보다 ZTDD에서 더 높이 위치하는 것을 의미한다.

**청구항 11**

제9항에 있어서,

상기 해산출부는

ZTDD 식의 Boolean complement를 계산할 때, 수학식 7을 이용하는 것을 특징으로 하는 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 노심손상빈도 산출 장치.

[수학식 7]

$$/\langle x, L, R, N \rangle_{ZTDD} = \langle x, /L/N, /R/N, 0 \rangle_{ZTDD} = \langle x, /(L+N), /(R+N), 0 \rangle_{ZTDD}$$
$$/(xL + /xR + N)$$
$$= (/x + /L)(x + /R)/N$$
$$= x/L/N + /x/R/N + /L/R/N$$
$$= x/L/N + /x/R/N + (x + /x)/L/R/N$$
$$= x(/L/N + /L/R/N) + /x(/R/N + /L/R/N)$$
$$= x/L/N + /x/R/N$$

**청구항 12**

제9항에 있어서,

상기 해최소화부는

수학식 8을 이용하여 최소화하는 것을 특징으로 하는 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 노심손상빈도 산출 장치.

[수학식 8]

$$Subsume(G(x), H(y)) = G(x) \backslash H(y)$$
$$= \begin{cases} G \backslash N_2 & , x > y \\ < x, L_1 \backslash H, R_1 \backslash H, N_1 \backslash H >_{ZTDD} & , x < y \\ < x, L_1 \backslash (L_2 \text{ or } N_2), R_1 \backslash (R_2 \text{ or } N_2), N_1 \backslash N_2 >_{ZTDD} & , x = y \end{cases}$$

## *발명의 설명*

### *기 술 분 야*

[0001] 본 발명은 ZTDD 알고리즘을 이용하여 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가(Probabilistic

safety assessment, PSA)에서 노심손상빈도(Core damage frequency, CDF)를 보다 높은 정확도로 산출하는 방법 및 장치에 관한 것이다.

## 배 경 기 술

[0002] 원자력발전소의 확률론적안전성평가(PSA)에서는 노심손상(Core damage)에 이르는 사고경위 논리들(Accident sequence logics)을 표현하는 사건수목들을 작성하고 노심손상 고장수목으로 변환한다. 노심손상 고장수목에 있는 사고경위 논리들은 안전계통의 고장을 표현하는 논리 게이트와 안전계통의 성공을 표현하는 Complement된 논리 게이트의 조합으로 이루어진다. 이 노심손상 고장수목에서 최소단절집합(Minimal cut set, MCS)들을 계산하고, MCS들을 가지고 노심손상빈도(CDF)를 계산한다.

[0003] 종래 사고경위 논리들을 표현하는 MCS들은 Delete-term approximation(DTA)를 이용하여 근사적으로 노심손상 고장수목으로부터 계산하여 왔다. 그러나 고장수목에 비희귀 사건들(Nonrare events)이 많을 때 노심손상빈도(CDF)가 DTA에 의해 극도로 과평가된다는 단점이 알려져 있다.

[0004] 따라서, 이러한 노심손상빈도(CDF)의 과평가를 피할 수 있는 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서 노심손상빈도를 산출하는 방법 및 장치에 대한 필요성이 대두되고 있다.

## 발명의 내용

### 해결하려는 과제

[0005] 상술한 문제점을 해결하기 위해 본 발명은 노심손상빈도(CDF)의 과평가를 피할 수 있는 ZTDD 알고리즘에 기반하는 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서 노심손상빈도의 산출 방법 및 장치를 제공하고자 한다.

### 과제의 해결 수단

[0006] 상술한 목적을 달성하기 위한 본 발명의 일 실시예에 따른 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 노심손상빈도 산출 방법은 상기 확률론적안전성평가를 위하여 특정한 고장수목에 대응되는 사고경위 논리를 입력받는 단계; 기본사건 x에 관한 불리안 식을 x를 포함하는 부분, /x를 포함하는 부분 및 x와 /x를 포함하지 않는 부분으로 구분하여 변환하는 ZTDD(Zero-suppressed Ternary Decision Diagram) 식을 이용하여, 상기 사고경위 논리에 대응되는 고장수목의 해를 산출하는 단계; 상기 고장수목의 해를 최소화하는 단계; 및 상기 최소화된 고장수목의 해에 대응되는 노심손상빈도를 산출하는 단계를 포함한다.

[0007] 또한, 상술한 목적을 달성하기 위한 본 발명의 일 실시예에 따른 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 노심손상빈도 산출 방법은 상기 확률론적안전성평가를 위하여 특정한 고장수목에 대응되는 사고경위 논리를 입력받는 단계; 기본사건 x에 관한 불리안 식을 x를 포함하는 부분, /x를 포함하는 부분 및 x와 /x를 포함하지 않는 부분으로 구분하여 변환하는 ZTDD 식 및 상기 ZTDD 식 간의 DTA(Delete-term approximation) 연산을 이용하여, 상기 사고경위 논리에 대응되는 고장수목의 근사해를 산출하는 단계; 상기 고장수목의 근사해를 최소화하는 단계; 및 상기 최소화된 고장수목의 근사해에 대응되는 노심손상빈도를 산출하는 단계를 포함한다.

[0008] 바람직하게는, 상기 ZTDD 식은 수학식 1과 같이 정의될 수 있다.

[0009] [수학식 1]

$$xL + /xR + N = \langle x, L, R, N \rangle_{ZTDD}$$

[0010]

[0011] 여기서, x는 기본사건이고, /x는 x의 Boolean complement이고, L, R, N은 x를 포함하지 않는 불리안 식이다.

[0012] 바람직하게는, 상기 고장수목의 해를 산출하는 단계는 $G(x) = \langle x, L_1, R_1, N_1 \rangle_{ZTDD}$ 및 $H(y) = \langle y, L_2, R_2, N_2 \rangle_{ZTDD}$ 로 나타낸 ZTDD 식을 서로 결합할 때, 수학식 2를 이용할 수

있다.

[0013] [수학식 2]

$$G(x) \bullet H(x) = \langle x, (L_1L_2 + L_1N_2 + N_1L_2), (R_1R_2 + R_1N_2 + N_1R_2), N_1N_2 \rangle_{ZTDD}$$
$$G(x) + H(x) = \langle x, (L_1 + L_2), (R_1 + R_2), (N_1 + N_2) \rangle_{ZTDD}$$
$$G(x) \bullet H(y) = \langle x, L_1H, R_1H, N_1H \rangle_{ZTDD}$$
$$G(x) + H(y) = \langle x, L_1, R_1, (N_1 + H) \rangle_{ZTDD}$$
$$x < y$$

[0014]

[0015] 여기서, x와 y는 기본사건이고, x<y는 x가 y보다 ZTDD에서 더 높이 위치하는 것을 의미한다.

[0016] 바람직하게는, 상기 고장수목의 해를 산출하는 단계는 ZTDD 식의 Boolean complement를 계산할 때, 수학식 3을 이용할 수 있다.

[0017] [수학식 3]

$$/\langle x, L, R, N \rangle_{ZTDD} = \langle x, /L/N, /R/N, 0 \rangle_{ZTDD} = \langle x, /(L+N), /(R+N), 0 \rangle_{ZTDD}$$
$$/(xL + /xR + N)$$
$$= (/x + /L)(x + /R)/N$$
$$= x/L/N + /x/R/N + /L/R/N$$
$$= x/L/N + /x/R/N + (x + /x)/L/R/N$$
$$= x(/L/N + /L/R/N) + /x(/R/N + /L/R/N)$$
$$= x/L/N + /x/R/N$$

[0018]

[0019] 바람직하게는, 상기 고장수목의 해를 최소화하는 단계는 수학식 4를 이용하여 최소화할 수 있다.

[0020] [수학식 4]

$$Subsume(G(x), H(y)) = G(x) \backslash H(y)$$
$$= \begin{cases} G \backslash N_2 & , x > y \\ < x, L_1 \backslash H, R_1 \backslash H, N_1 \backslash H >_{ZTDD} & , x < y \\ < x, L_1 \backslash (L_2 \text{ or } N_2), R_1 \backslash (R_2 \text{ or } N_2), N_1 \backslash N_2 >_{ZTDD} & , x = y \end{cases}$$

[0021]

[0022] 또한, 상술한 목적을 달성하기 위한 본 발명의 일 실시예에 따른 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 노심손상빈도 산출 장치는 상기 확률론적안전성평가를 위한 특정한 고장수목에 대응되는 사고경위 논리를 입력받는 입력부; 기본사건 x에 관한 불리안 식을 x를 포함하는 부분, /x를 포함하는 부분 및 x와 /x를 포함하지 않는 부분으로 구분하여 변환하는 ZTDD 식을 이용하여, 상기 사고경위 논리에 대응되는 고장수목의 해를 산출하는 해산출부; 상기 고장수목의 해를 최소화하는 해최소화부; 및 상기 최소화된 고장수목의 해에 대응되는 노심손상빈도를 산출하는 노심손상빈도산출부를 포함한다.

[0023] 또한, 상술한 목적을 달성하기 위한 본 발명의 일 실시예에 따른 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 노심손상빈도 산출 장치는 상기 확률론적안전성평가를 위하여 특정한 고장수목에 대응되는 사고경위 논리를 입력받는 입력부; 기본사건 x에 관한 불리안 식을 x를 포함하는 부분, /x를 포함하는 부분 및 x와 /x를 포함하지 않는 부분으로 구분하여 변환하는 ZTDD 식 및 상기 ZTDD 식 간의 DTA 연산을 이용하여, 상기 사고경위 논리에 대응되는 고장수목의 근사해를 산출하는 근사해산출부; 상기 고장수목의 근사해를 최소화하는 해최소화부; 및 상기 최소화된 고장수목의 근사해에 대응되는 노심손상빈도를 산출하는 노심손상빈도산출부

[0024] 를 포함한다.

[0025] 바람직하게는, 상기 ZTDD 식은 수학식 5와 같이 정의될 수 있다.

[0026] [수학식 5]

$$xL+/xR+N=\ \langle x,L,R,N\rangle_{ZTDD}$$

[0027]

[0028] 여기서, x는 기본사건이고, /x는 x의 Boolean complement이고, L, R, N은 x를 포함하지 않는 불리안 식이다.

[0029] 바람직하게는, 상기 해산출부는 $G(x)=\langle x,L_1,R_1,N_1\rangle_{ZTDD}$ 및 $H(y)=\langle y,L_2,R_2,N_2\rangle_{ZTDD}$ 로 나타낸 ZTDD 식을 서로 결합할 때, 수학식 6을 이용할 수 있다.

[0030] [수학식 6]

$$\begin{aligned}
&G(x)\bullet H(x)=\langle x,(L_1L_2+L_1N_2+N_1L_2),(R_1R_2+R_1N_2+N_1R_2),N_1N_2\rangle_{ZTDD}\\
&G(x)+H(x)=\langle x,(L_1+L_2),(R_1+R_2),(N_1+N_2)\rangle_{ZTDD}\\
&G(x)\bullet H(y)=\langle x,L_1H,R_1H,N_1H\rangle_{ZTDD}\\
&G(x)+H(y)=\langle x,L_1,R_1,(N_1+H)\rangle_{ZTDD}\\
&x<y
\end{aligned}$$

[0031]

[0032] 여기서, x와 y는 기본사건이고, x<y는 x가 y보다 ZTDD에서 더 높이 위치하는 것을 의미한다.

[0033] 바람직하게는, 상기 해산출부는 ZTDD 식의 Boolean complement를 계산할 때, 수학식 7을 이용할 수 있다.

[0034] [수학식 7]

$$\begin{aligned}
&/\langle x,L,R,N\rangle_{ZTDD}=\langle x,/L/N,/R/N,0\rangle_{ZTDD}=\langle x,/(L+N),/(R+N),0\rangle_{ZTDD}\\
&/(xL+/xR+N)\\
&=(/x+/L)(x+/R)/N\\
&=x/L/N+/x/R/N+/L/R/N\\
&=x/L/N+/x/R/N+(x+/x)/L/R/N\\
&=x(/L/N+/L/R/N)+/x(/R/N+/L/R/N)\\
&=x/L/N+/x/R/N
\end{aligned}$$

[0035]

[0036] 바람직하게는, 상기 해최소화부는 수학식 8을 이용하여 최소화할 수 있다.

[0037] [수학식 8]

$$Subsume(G(x),H(y)) = G(x)\backslash H(y)$$
$$= \begin{cases} G\backslash N_2 & , x > y \\ < x, L_1\backslash H, R_1\backslash H, N_1\backslash H >_{ZTDD} & , x < y \\ < x, L_1\backslash (L_2 \text{ or } N_2), R_1\backslash (R_2 \text{ or } N_2), N_1\backslash N_2 >_{ZTDD} & , x = y \end{cases}$$

[0038]

## 발명의 효과

[0039] 본 발명에 따른 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서 노심손상빈도의 산출 방법 및 장치는 종래 고장수목에 비희귀사건이 다수 포함된 경우 DTA에 의해서 노심손상빈도(CDF)가 과평가되어 산출되는 문제를 해결할 수 있는 효과가 있다.

## 도면의 간단한 설명

[0040] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 새롭게 제시하는 노심손상빈도 산출 방법의 흐름도이다.

도 2는 본 발명의 다른 실시예에 따른 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 DTA를 이용한 노심손상빈도 산출 방법의 흐름도이다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 새롭게 제시하는 노심손상빈도 산출 장치의 블록도이다.

도 4는 본 발명의 다른 실시예에 따른 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 DTA를 이용한 노심손상빈도 산출 장치의 블록도이다.

도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 ZTDD 알고리즘과 종래의 알고리즘들과의 관계를 설명하기 위한 도면이다.

도 6 내지 10은 본 발명의 일 실시예에 따른 DTA없는 ZTDD 알고리즘을 설명하기 위한 도면이다.

도 11은 본 발명의 일 실시예에 따른 DTA를 이용한 ZTDD 알고리즘을 설명하기 위한 도면이다.

## 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0041] 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 실시예를 가질 수 있는 바, 특정 실시예들을 도면을 참조하여 상세하게 설명하도록 한다. 그러나 이는 본 발명을 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다. 각 도면을 설명하면서 유사한 참조부호를 유사한 구성요소에 대해 사용하였다.

[0042] 제1, 제2, A, B 등의 용어는 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안된다. 상기 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다. 예를 들어, 본 발명의 권리범위를 벗어나지 않으면서 제1 구성요소는 제2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성요소도 제1 구성요소로 명명될 수 있다. 및/또는 이라는 용어는 복수의 관련된 기재 항목들의 조합 또는 복수의 관련된 기재 항목들 중의 어느 항목을 포함한다.

[0043] 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "연결되어" 있다거나 "접속되어" 있다고 언급될 때에는 그 다른 구성요소에 직접적으로 연결되어 있거나 또는 접속되어 있을 수도 있지만, 중간에 다른 구성요소가 존재할 수도 있다고 이해되어야 할 것이다. 반면에, 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "직접 연결되어" 있다거나 "직접 접속되어" 있다고 언급된 때에는, 중간에 다른 구성요소가 존재하지 않는 것으로 이해되어야 할 것이다.

[0044] 본 출원에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 출원에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부

품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

[0045] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥 상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.

[0046] 명세서 및 청구범위 전체에서, 어떤 부분이 어떤 구성 요소를 포함한다고 할때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성 요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성 요소를 더 포함할 수 있다는 것을 의미한다.

[0047] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명에 대해 상세하게 설명한다.

[0048] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 새롭게 제시하는 노심손상빈도 산출 방법의 흐름도이다.

[0049] 단계 S110에서는, 노심손상빈도 산출 장치가 확률론적안전성평가를 위하여 특정한 고장수목에 대응되는 사고경위 논리를 입력받는다.

[0050] 여기서, 고장수목(Fault Tree)은 원자력발전소의 각 안전계통의 고장을 나타내는 것으로, 고장수목에 포함된 사고경위 논리들(Accident sequence logics) 은 안전계통의 고장을 표현하는 논리 게이트와 안전계통의 성공을 표현하는 Complement된 논리 게이트의 조합으로 구성된다.

[0051] 일반적으로 사고경위 논리 $G_3G_4\cdots/G_7/G_8\cdots$와 $G_3G_4\cdots/(G_7+G_8+\cdots)$는 동일한 불리안 식이기 때문에, $G_1=G_3G_4\cdots$과 $G_2=G_7+G_8+\cdots$을 이용하여 $G_1/G_2$로 표현될 수 있다.

[0052] 예컨대, 사고경위 논리 $G_1/G_2$는 아래의 수학식 1과 같은 형태일 수 있다.

[0053] [수학식 1]

$$G_1/G_2$$
$$G_1=b(a+c+e)$$
$$G_2=b(c+d)$$

[0054]

[0055] 여기서, $G_1$은 안전계통의 고장을 의미하는 고장수목이고, $/G_2$는 안전계통의 성공을 의미하는 Complement된 고장수목이다.

[0056] 단계 S120에서는, 노심손상빈도 산출 장치가 기본사건 x에 관한 불리안 식을 x를 포함하는 부분, /x를 포함하는 부분 및 x와 /x를 포함하지 않는 부분으로 구분하여 변환하는 ZTDD(Zero-suppressed Ternary Decision Diagram) 식을 이용하여, 그 사고경위 논리에 대응되는 고장수목의 해를 산출한다.

[0057] 이때, 노심손상빈도 산출 장치는 ZTDD 식을 이용하여 사고경위 논리 $G_1/G_2$ 에 대응되는 고장수목의 해를 산출할 수 있다. 즉, 노심손상빈도 산출 장치는 아래의 수학식 2, 4 및 5를 이용하여 ZTDD 식을 결합하거나 ZTDD 식의 Boolean Complement를 계산해 나가면서, $G_1/G_2$ 에 대응되는 고장수목의 해를 산출할 수 있다.

[0058] 보다 구체적으로, 노심손상빈도 산출 장치는 $G_1$과 $G_2$의 ZTDD 식을 각각 계산하고, $/G_2$의 ZTDD 식을 계산하고, $G_1$과 $/G_2$의 ZTDD 식을 결합하여 $G_1/G_2$ 에 대응되는 고장수목의 해를 산출할 수 있다.

[0059] 다른 실시예에서는, ZTDD 식은 수학식 2와 같이 정의될 수 있다.

[0060] [수학식 2]

$$xL+/xR+N= \langle x,L,R,N\rangle_{ZTDD}$$

[0061]

[0062] 여기서, x는 기본사건이고, /x는 x의 Boolean complement이고, L, R, N은 x를 포함하지 않는 불리안 식이다.

[0063] 이때, ZTDD 식은 If-then-else connective(ITE)들이 상하로 연결된 불리안 식으로, 기본사건 x를 가진 불리안 식(xL), /x를 가진 불리안 식(/xR), x와 /x가 없는 불리안 식(N)으로 세가지 불리안 식이 그대로 인코딩된다.

[0064] 한편, 수학식 2의 ZTDD 식은 아래의 수학식 3과 같이 이미 알려진 BDD(Binary decision diagram) 식 또는 두 개의 연결된 ZBDD(Zero-suppressed binary decision diagram) 식으로 변환될 수 있으며, BDD 식 및 ZBDD 식에 관한 구체적인 설명은 생략한다. 여기서, 수학식 2 및 3을 비교해 보면, ZTDD 식이 BDD 식 및 ZBDD 식보다 더 직관적이고 간단함을 알 수 있다.

[0065] [수학식 3]

$$xL+/xR+N=xL+\ /xR+(x+/x)N=\langle x,L+N,R+N\rangle_{BDD}$$
$$xL+/xR+N=\langle x,L,\langle x_{not},R,N\rangle\rangle_{ZBDD} \text{ 여기에서 } x_{not}=/x$$

[0066]

[0067] 또 다른 실시예에서는, 노심손상빈도 산출 장치가 $G(x)=\langle x,L_1,R_1,N_1\rangle_{ZTDD}$ 및 $H(y)=\langle y,L_2,R_2,N_2\rangle_{ZTDD}$ 로 나타낸 ZTDD 식을 서로 결합할 때, 수학식 4를 이용할 수 있다.

[0068] [수학식 4]

$$G(x)\bullet H(x)=\langle x,(L_1L_2+L_1N_2+N_1L_2),(R_1R_2+R_1N_2+N_1R_2),N_1N_2\rangle_{ZTDD}$$
$$G(x)+H(x)=\langle x,(L_1+L_2),(R_1+R_2),(N_1+N_2)\rangle_{ZTDD}$$
$$G(x)\bullet H(y)=\langle x,L_1H,R_1H,N_1H\rangle_{ZTDD}$$
$$G(x)+H(y)=\langle x,L_1,R_1,(N_1+H)\rangle_{ZTDD}$$
$$x<y$$

[0069]

[0070] 여기서, x와 y는 기본사건이고, x < y는 x가 y보다 ZTDD에서 더 높이 위치하는 것을 의미한다.

[0071] 이때, 노심손상빈도 산출 장치가 Bottom-up 방법으로 고장수목의 해를 계산하기 위해서는 ZTDD 식들을 논리적으로 결합하여야 한다. 노심손상빈도 산출 장치는 $G(x)=\langle x,L_1,R_1,N_1\rangle_{ZTDD}$ 및 $H(y)=\langle y,L_2,R_2,N_2\rangle_{ZTDD}$ 두 개의 ZTDD 식을 수학식 4를 이용하여 결합할 수 있다. 즉, 노심손상빈도 산출 장치는 수학식 4를을 이용하여 Bottom-up 방법으로 Coherent와 Noncoherent 고장수목의 ZTDD 식을 계산할 수 있다.

[0072] 또 다른 실시예에서는, 노심손상빈도 산출 장치가 ZTDD 식의 Boolean complement를 계산할 때, 수학식 5를 이용할 수 있다.

[0073] [수학식 5]

$$
\begin{aligned}
&/\langle x,L,R,N\rangle_{ZTDD} = \langle x,/L/N,/R/N,0\rangle_{ZTDD} = \langle x,/(L+N),/(R+N),0\rangle_{ZTDD} \\
&/(xL+/xR+N) \\
&= (/x+/L)(x+/R)/N \\
&= x/L/N+/x/R/N+/L/R/N \\
&= x/L/N+/x/R/N+(x+/x)/L/R/N \\
&= x(/L/N+/L/R/N)+/x(/R/N+/L/R/N) \\
&= x/L/N+/x/R/N
\end{aligned}
$$

[0074]

[0075] 즉, ZTDD식의 Boolean complement는 수학식 5와 같이 유도될 수 있다.

[0076] 단계 S130에서는, 노심손상빈도 산출 장치가 고장수목의 해를 최소화한다.

[0077] 여기서, 노심손상빈도 산출 장치가 Bottom-up 방식을 통해 고장수목의 해를 산출하면, ZTDD 식에 Minimal한 해 Super set과 Non-minimal한 해 Sub set이 동시에 존재하는 경우가 발생할 수 있다. 이때, 이러한 Non-minimal 해는 부분집합이므로 삭제되어야 할 수 있다.

[0078] 보다 구체적으로, ZTDD 식은 $\langle \alpha,L,R,N\rangle_{ZTDD} = \alpha L+/\alpha R+N$ 로 정의되기 때문에, Minimal한 해는 N에 존재하고 Non-minimal한 해는 L 혹은 R에 존재할 수 있다. 따라서, 노심손상빈도 산출 장치는 이러한 Non-minimal한 해를 삭제하여 고장수목의 해를 최소화할 수 있다.

[0079] 다른 실시예에서는, 노심손상빈도 산출 장치가 수학식 6을 이용하여 고장수목의 해를 최소화할 수 있다.

[0080] [수학식 6]

$$
\begin{aligned}
&Subsume(G(x),H(y)) = G(x)\backslash H(y) \\
&= \begin{cases} G\backslash N_2 & ,x>y \\ <x,L_1\backslash H,R_1\backslash H,N_1\backslash H>_{ZTDD} & ,x<y \\ <x,L_1\backslash(L_2 \text{ or } N_2),R_1\backslash(R_2 \text{ or } N_2),N_1\backslash N_2>_{ZTDD} & ,x=y \end{cases}
\end{aligned}
$$

[0081]

[0082] 여기서, $G(x) = \langle x,L_1,R_1,N_1\rangle_{ZTDD}$ 이고, $H(y) = \langle y,L_2,R_2,N_2\rangle_{ZTDD}$ 이다.

[0083] 즉, 노심손상빈도 산출 장치는 $Subsume(L,N)$ 과 $Subsume(R,N)$ 알고리즘으로 Non-minimal한 해를 제거하여, 고장수목의 해를 최소화할 수 있다.

[0084] 마지막으로 단계 S140에서는, 노심손상빈도 산출 장치가 그 최소화된 고장수목의 해에 대응되는 노심손상빈도를 산출한다.

[0085] 이때, 노심손상빈도 산출 장치는 다양한 방법을 통해 그 최소화된 고장수목의 해에 대응되는 노심손상빈도를 산출할 수 있다.

[0086] 첫번째로, 노심손상빈도 산출 장치는 아래의 수학식 7을 이용하여 ZTDD 식의 아래(낮은 곳)에서부터 위(높은 곳)로 재귀적으로 확률을 계산하여 Prime implicant 혹은 최소단절집합(Minimal cut set, MCS) 확률들의 합을 산출할 수 있다.

[0087] 이때, Prime implicant는 Noncoherent 고장수목의 정점 사건을 유발하는 기본사건들과 Complement된 기본사건

들의 최소한의 조합을 의미할 수 있다. 또한, 원자력발전소의 확률론적안전성평가(PSA)에서는 MCS들과 Prime implicant들을 구분 없이 MCS로 통칭할 수 있다.

[0088] [수학식 7]

[0089] $$p(f)=p_x\times p(L)+(1-p_x)\times p(R)+p(N)$$

[0090] 여기서, $p(f)$ 는 f에 대응되는 ZTDD 식의 발생확률이고, $p_x$ 는 기본사건 x의 발생확률이다.

[0091] 두번째로, 노심손상빈도 산출 장치는 ZTDD 식에서 모든 해를 탐색하여 최소단절상한(Min-cut-upper bound, MCUB) 확률을 계산할 수 있다.

[0092] 세번째로, 노심손상빈도 산출 장치는 ZTDD 식을 BDD 식으로 변환하여 BDD 식으로부터 정확한 확률을 산출할 수 있다.

[0093] 도 2는 본 발명의 다른 실시예에 따른 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 DTA를 이용한 노심손상빈도 산출 방법의 흐름도이다.

[0094] 단계 S210에서는, 노심손상빈도 산출 장치가 확률론적안전성평가를 위하여 특정한 고장수목에 대응되는 사고경위 논리를 입력받는다.

[0095] 단계 S220에서는, 노심손상빈도 산출 장치가 기본사건 x에 관한 불리안 식을 x를 포함하는 부분, /x를 포함하는 부분 및 x와 /x를 포함하지 않는 부분으로 구분하여 변환하는 ZTDD 식 및 상기 ZTDD 식 간의 DTA 연산을 이용하여, 그 사고경위 논리에 대응되는 고장수목의 근사해를 산출한다.

[0096] 이때, 노심손상빈도 산출 장치는 그 사고경위 논리에 대응되는 고장수목의 근사해를 산출하기 위하여 DTA(Delete-term approximation)를 이용할 수 있다. 보다 구체적으로, 노심손상빈도 산출 장치는 아래 수학식 8의 Subsume 연산을 위해 앞서 언급한 수학식 6을 이용하여 DTA 계산을 수행할 수 있다. 즉, 노심손상빈도 산출 장치는 Minimal한 해가 $G_2$에 존재하고 Non-minimal 해는 $G_1$에 존재하는 경우에, $G_1$의 Non-minimal 해를 삭제할 수 있다.

[0097] [수학식 8]

[0098] $$G_1/G_2\approx G_1^{'}=Delterm(G_1,G_2)=Subsume(G_1,G_2)$$

[0099] 단계 S230에서는, 노심손상빈도 산출 장치가 고장수목의 근사해를 최소화한다.

[0100] 이때, 노심손상빈도 산출 장치는 수학식 6을 이용하여 고장수목의 근사해를 최소화할 수 있다. 보다 구체적으로, 노심손상빈도 산출 장치는 $Subsume(L,N)$ 과 $Subsume(R,N)$ 알고리즘으로 Non-minimal한 해를 제거하여, 고장수목의 해를 최소화할 수 있다.

[0101] 마지막으로 단계 S240에서는, 노심손상빈도 산출 장치가 고장수목의 근사해에 대응되는 노심손상빈도를 산출한다.

[0102] 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 ZTDD 알고리즘과 종래의 알고리즘들(BDD 알고리즘, ZBDD 알고리즘)과의 관계를 설명하기 위한 도면이다.

[0103] ZTDD, BDD 및 ZBDD 알고리즘으로 $G_1/G_2$ 의 해를 계산하는 방법은 여러 가지가 있다. 첫째로, 수학식 4의 ZTDD 알고리즘과 수학식 5의 Boolean complement로 $G_1/G_2$ 의 ZTDD를 계산할 수 있다. 이 ZTDD를

BDD로 변환하면 $G_1/G_2$ 에서 직접 계산되는 BDD와 동일하다. 둘째로, 수학식 4의 ZTDD 알고리즘과 수학식 8의 DTA를 사용하여 $G_1/G_2$ 의 ZTDD를 계산할 수 있다. 이 ZTDD를 ZBDD로 변환하면 $G_1/G_2$ 에서 직접 계산되는 ZBDD와 동일하다.

[0104] 한편, 도 5에서 (a)는 $G_1/G_2$ 의 해를 수학식 4 및 5의 Boolean complement로 계산하는 것을 나타내고, (b)는 $G_1/G_2$ 의 해를 수학식 4 및 8의 DTA로 계산하는 것을 나타내고, (c)는 $G_1/G_2$ 의 해를 BDD 알고리즘으로 계산하는 것을 나타내고, (d)는 $G_1/G_2$ 의 해를 ZBDD 알고리즘으로 계산하는 것을 나타내고, (e)는 수학식 3으로 ZTDD를 BDD로 변환하는 것을 나타내고, (f)는 수학식 3으로 ZTDD를 ZBDD로 변환하는 것을 나타낸다.

[0105] 도 6 내지 10은 본 발명의 일 실시예에 따른 DTA없는 ZTDD 알고리즘을 설명하기 위한 도면이다.

[0106] 이때, 도 6 내지 10은 수학식 1과 동일한 수학식 9의 고장수목의 해를 수학식 4 및 5를 이용하여 Bottom-up 방식으로 계산하는 방법을 설명하기 위한 도면일 수 있다.

[0107] [수학식 9]

$$
\begin{aligned}
G_0 &= G_1/G_2 \\
G_1 &= bG_3 \\
G_2 &= bG_4 \\
G_3 &= a+c+e \\
G_4 &= c+d
\end{aligned}
$$

[0108]

[0109] 이때, 각 논리 게이트의 ZTDD 식은 아래 수학식 10에 나타나 있다 또한, 도 6 내지 8은 각각 $G_1$(ab+bc+be), $G_2$(bc+bd) 및 /$G_2$(/b+/c/d)에 대한 ZTDD 구조를 나타낸다. 두 개의 ZTDD $G_1$과 /$G_2$를 결합하여 $G_0$에 대한 ZTDD를 계산(ab/c/d+b/c/de)하면 도 9와 같다. 또한, 도 9의 ZTDD를 BDD로 변환하면, 도 10의 BDD로 변환된다. 즉, ZTDD로부터 변환된 BDD는 $G_1/G_2$ 로부터 직접 계산되는 BDD(ab/c/d+/ab/c/de)와 동일함을 알 수 있다.

[0110] [수학식 10]

$$
\begin{aligned}
G_3 &= \langle a,1,0,\langle c,1,0,\langle e,1,0,0\rangle\rangle\rangle_{ZTDD} \\
G_4 &= \langle c,1,0,\langle d,1,0,0\rangle\rangle_{ZTDD} \\
G_1 &= \langle a,\langle b,1,0,0\rangle,0,\langle b,\langle c,1,0,\langle e,1,0,0\rangle\rangle,0,0\rangle\rangle_{ZTDD} \\
G_2 &= \langle b,\langle c,1,0,\langle d,1,0,0\rangle\rangle,0,0\rangle_{ZTDD} \\
/G_2 &= \langle b,\langle c,0,\langle d,0,1,0\rangle,0\rangle,1,0\rangle_{ZTDD} \\
a &< b < c < d < e
\end{aligned}
$$

[0111]

[0112] 이때, $a < b < c < d < e$ 는 ZTDD 우선순위를 나타낸다.

[0113] 도 11은 본 발명의 일 실시예에 따른 DTA를 이용한 ZTDD 알고리즘을 설명하기 위한 도면이다.

[0114] 수학식 6과 8의 DTA를 이용한 ZTDD 알고리즘으로 $G_1/G_2$ 를 계산한 ZTDD(ab+be)가 도 11에 나타나 있다. 이때, 도 11의 ZTDD는 $G_1/G_2$ 에서 직접 계산한 ZBDD와 동일함을 알 수 있다.

[0115] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 새롭게 제시하는 노심손상빈도 산출 장치의 블록도이다.

[0116] 도 3을 참조하면, ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 노심손상빈도 산출 장치(300)는 입력부(310), 해산출부(320), 해최소화부(330) 및 노심손상빈도산출부(340)를 포함한다.

[0117] 입력부(310)는 확률론적안전성평가를 위한 특정한 고장수목에 대응되는 사고경위 논리를 입력받는다.

[0118] 해산출부(320)는 기본사건 x에 관한 불리안 식을 x를 포함하는 부분, /x를 포함하는 부분 및 x와 /x를 포함하지 않는 부분으로 구분하여 변환하는 ZTDD 식을 이용하여, 그 사고경위 논리에 대응되는 고장수목의 해를 산출한다.

[0119] 다른 실시예에서는, ZTDD 식은 수학식 11과 같이 정의될 수 있다.

[0120] [수학식 11]

$$xL+/xR+N=\ \langle x,L,R,N\rangle_{ZTDD}$$

[0121]

[0122] 여기서, x는 기본사건이고, /x는 x의 Boolean complement이고, L, R, N은 x를 포함하지 않는 불리안 식이다.

[0123] 또 다른 실시예에서는, 해산출부(320)는 $G(x)=\langle x,L_1,R_1,N_1\rangle_{ZTDD}$ 및 $H(y)=\langle y,L_2,R_2,N_2\rangle_{ZTDD}$ 로 나타낸 ZTDD 식을 서로 결합할 때, 수학식 12를 이용할 수 있다.

[0124] [수학식 12]

$$\begin{aligned}
&G(x)\bullet H(x)=\langle x,(L_1L_2+L_1N_2+N_1L_2),(R_1R_2+R_1N_2+N_1R_2),N_1N_2\rangle_{ZTDD}\\
&G(x)+H(x)=\langle x,(L_1+L_2),(R_1+R_2),(N_1+N_2)\rangle_{ZTDD}\\
&G(x)\bullet H(y)=\langle x,L_1H,R_1H,N_1H\rangle_{ZTDD}\\
&G(x)+H(y)=\langle x,L_1,R_1,(N_1+H)\rangle_{ZTDD}\\
&x<y
\end{aligned}$$

[0125]

[0126] 여기서, x와 y는 기본사건이고, x<y는 x가 y보다 ZTDD에서 더 높이 위치하는 것을 의미한다.

[0127] 또 다른 실시예에서는, 해산출부(320)는 ZTDD 식의 Boolean complement를 계산할 때, 수학식 13을 이용할 수 있다.

[0128] [수학식 13]

$$
\begin{aligned}
&/\langle x,L,R,N\rangle_{ZTDD} = \langle x,/L/N,/R/N,0\rangle_{ZTDD} = \langle x,/(L+N),/(R+N),0\rangle_{ZTDD} \\
&/(xL+/xR+N) \\
&= (/x+/L)(x+/R)/N \\
&= x/L/N+/x/R/N+/L/R/N \\
&= x/L/N+/x/R/N+(x+/x)/L/R/N \\
&= x(/L/N+/L/R/N)+/x(/R/N+/L/R/N) \\
&= x/L/N+/x/R/N
\end{aligned}
$$

[0129]

[0130] 해최소화부(330)는 그 고장수목의 해를 최소화한다.

[0131] 다른 실시예에서는, 해최소화부(330)는 수학식 14를 이용하여 최소화할 수 있다.

[0132] [수학식 14]

$$
\begin{aligned}
&Subsume(G(x),H(y)) = G(x)\backslash H(y) \\
&= \begin{cases} G\backslash N_2 & ,x > y \\ < x, L_1\backslash H, R_1\backslash H, N_1\backslash H >_{ZTDD} & ,x < y \\ < x, L_1\backslash(L_2 \text{ or } N_2), R_1\backslash(R_2 \text{ or } N_2), N_1\backslash N_2 >_{ZTDD} & ,x = y \end{cases}
\end{aligned}
$$

[0133]

[0134] 도 4는 본 발명의 다른 실시예에 따른 ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 DTA를 이용한 노심손상빈도 산출 장치의 블록도이다.

[0135] 도 4를 참조하면, ZTDD 알고리즘을 이용한 원자력발전소의 화재 및 지진사건 확률론적안전성평가에서의 노심손상빈도 산출 장치(300)는 입력부(310), 근사해산출부(350) 및 노심손상빈도산출부(340)를 포함한다.

[0136] 입력부(310)는 확률론적안전성평가를 위하여 특정한 고장수목에 대응되는 사고경위 논리를 입력받는다.

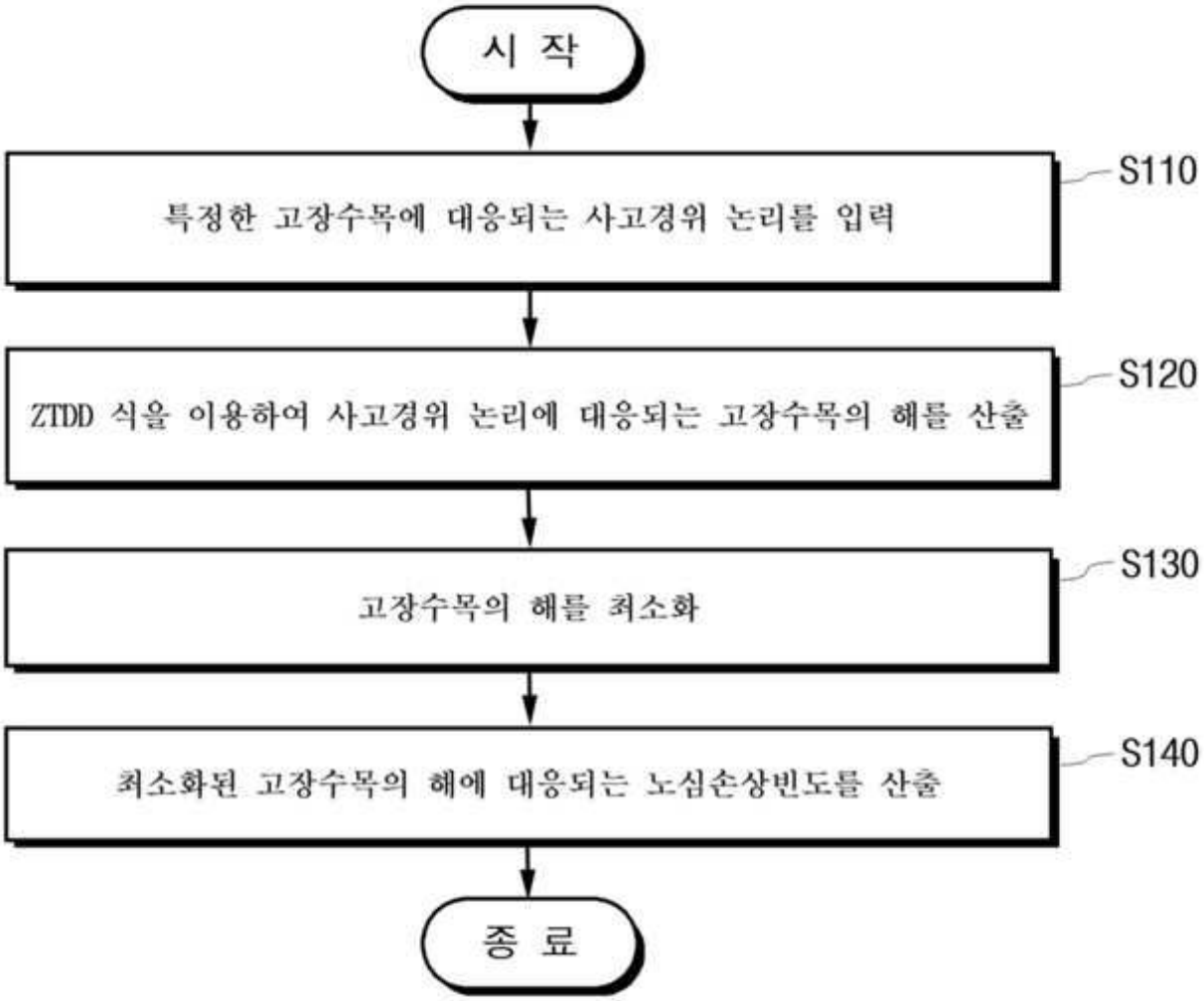
[0137] 근사해산출부(350)는 기본사건 x에 관한 불리안 식을 x를 포함하는 부분, /x를 포함하는 부분 및 x와 /x를 포함하지 않는 부분으로 구분하여 변환하는 ZTDD 식 및 상기 ZTDD 식 간의 Subsume 연산을 이용하여, 그 사고경위 논리에 대응되는 고장수목의 근사해를 산출한다.

[0138] 마지막으로 노심손상빈도산출부(340)는 그 고장수목의 근사해에 대응되는 노심손상빈도를 산출한다.

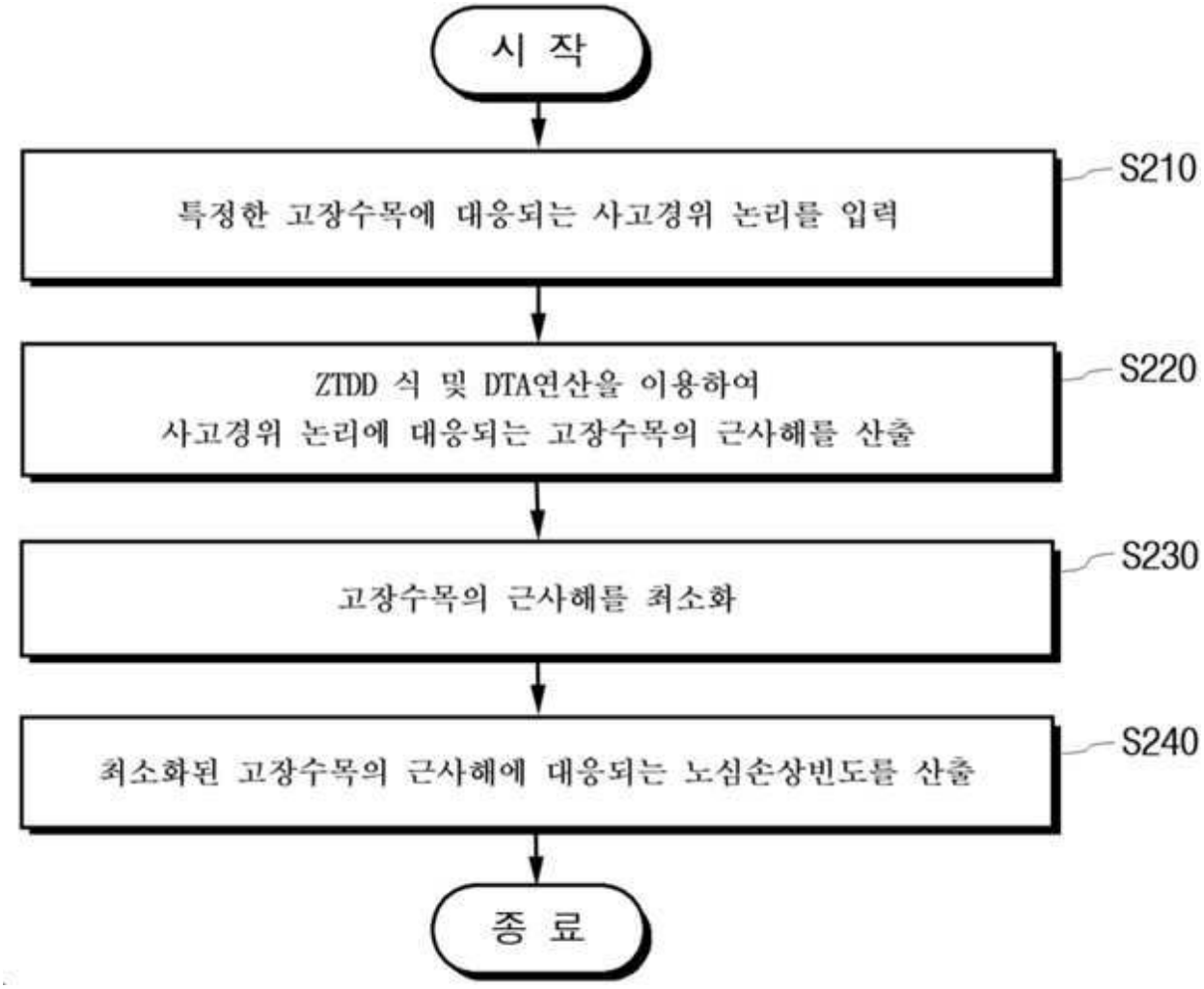
[0139] 이상의 설명은 본 발명의 기술 사상을 예시적으로 설명한 것에 불과한 것으로, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 사람이라면 본 발명의 본질적인 특성에서 벗어나지 않는 범위에서 다양한 수정 및 변형이 가능할 것이다. 따라서, 본 발명에 개시된 실시예들은 본 발명의 기술 사상을 한정하기 위한 것이 아니라 설명하기 위한 것이고, 이러한 실시예에 의하여 본 발명의 기술 사상의 범위가 한정되는 것은 아니다. 본 발명의 보호 범위는 아래의 청구범위에 의하여 해석되어야 하며, 그와 동등한 범위 내에 있는 모든 기술 사상은 본 발명의 권리범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

도면

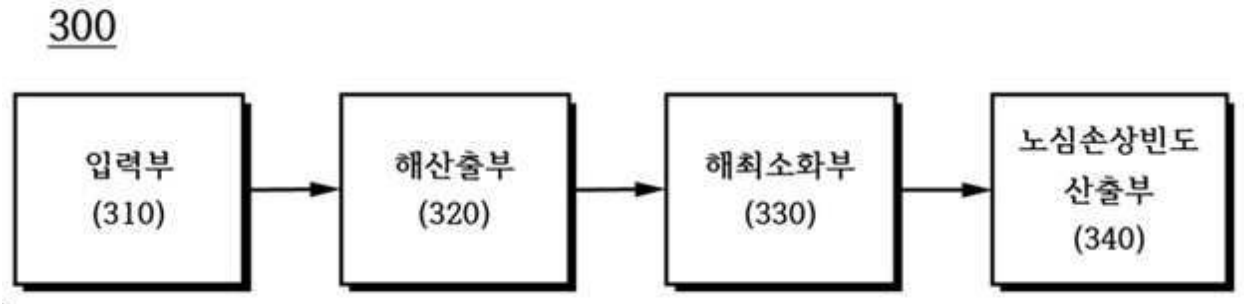
도면1


시 작
특정한 고장수목에 대응되는 사고경위 논리를 입력
S110
ZTDD 식을 이용하여 사고경위 논리에 대응되는 고장수목의 해를 산출
S120
고장수목의 해를 최소화
S130
최소화된 고장수목의 해에 대응되는 노심손상빈도를 산출
S140
종 료

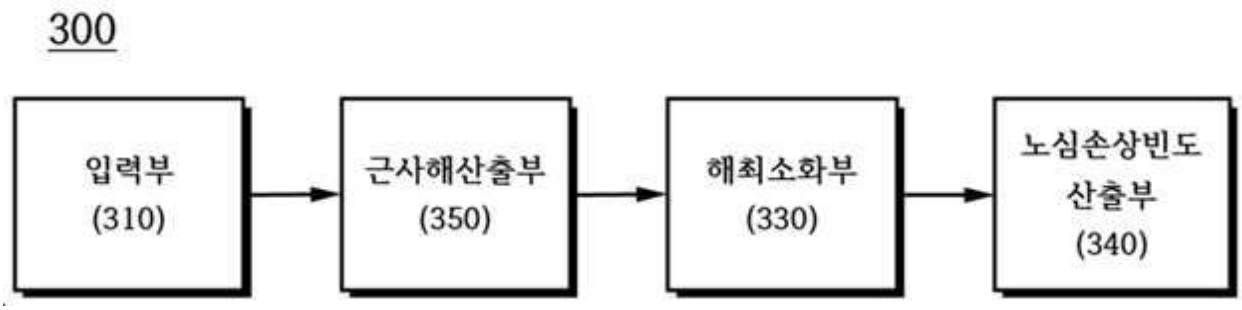
도면2


시 작
특정한 고장수목에 대응되는 사고경위 논리를 입력
S210
ZTDD 식 및 DTA연산을 이용하여
사고경위 논리에 대응되는 고장수목의 근사해를 산출
S220
고장수목의 근사해를 최소화
S230
최소화된 고장수목의 근사해에 대응되는 노심손상빈도를 산출
S240
종 료

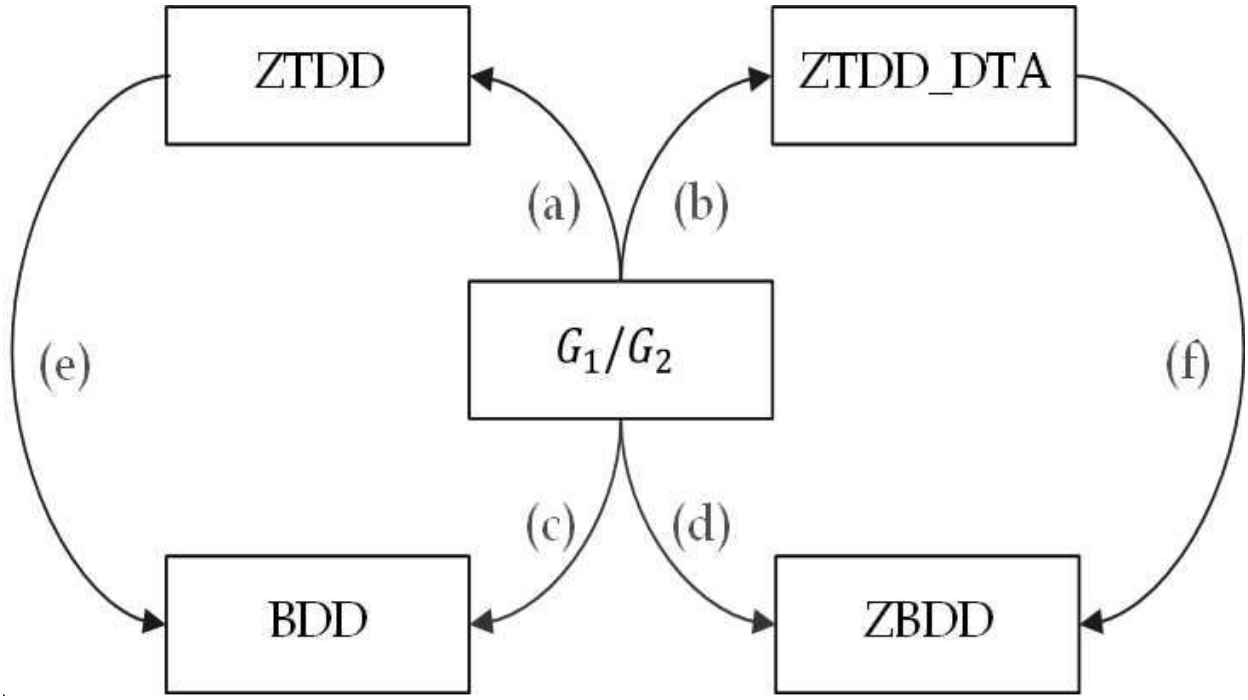
도면3


300
입력부
(310)
해산출부
(320)
해최소화부
(330)
노심손상빈도
산출부
(340)

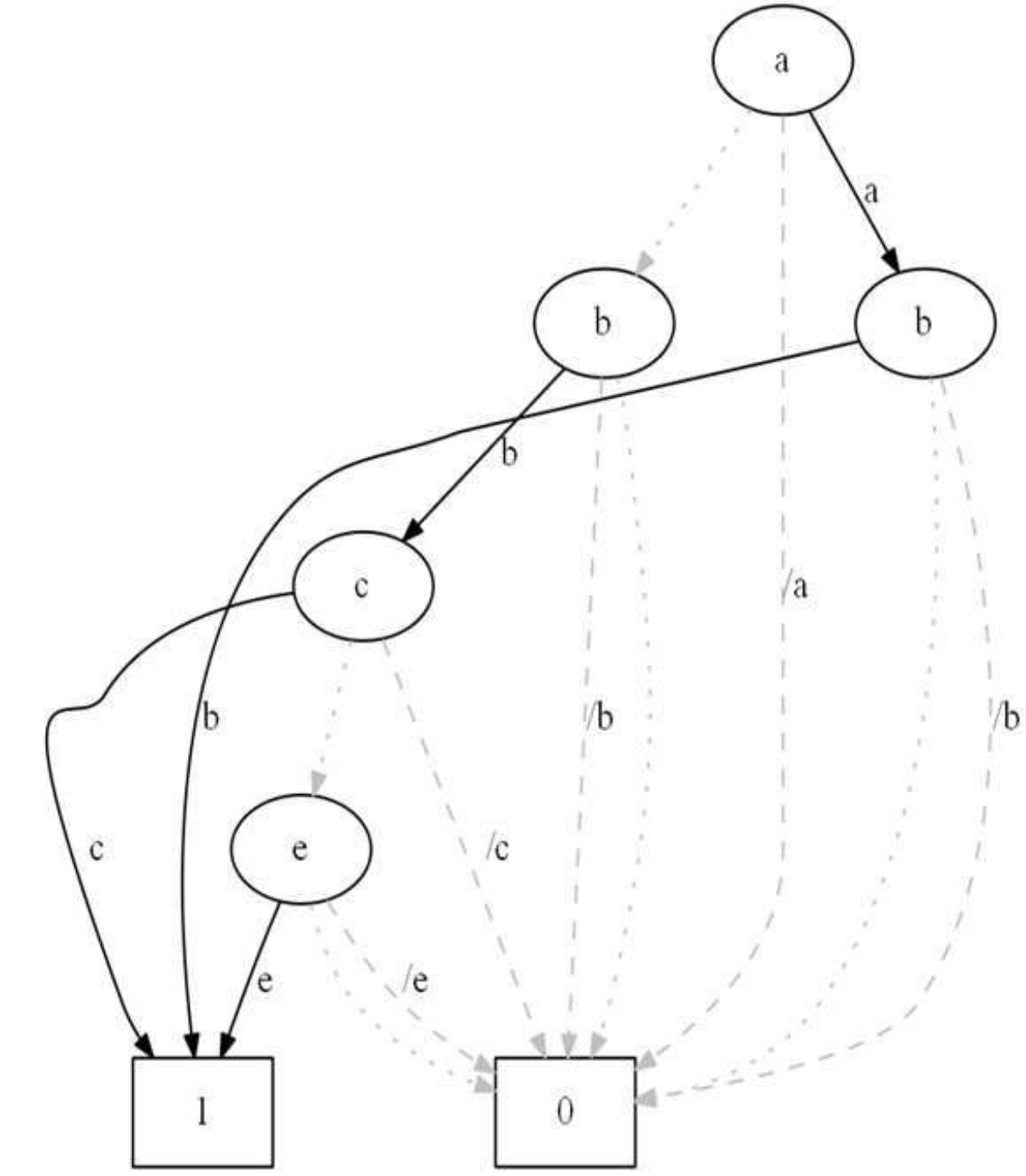
도면4


300
입력부
(310)
근사해산출부
(350)
해최소화부
(330)
노심손상빈도
산출부
(340)

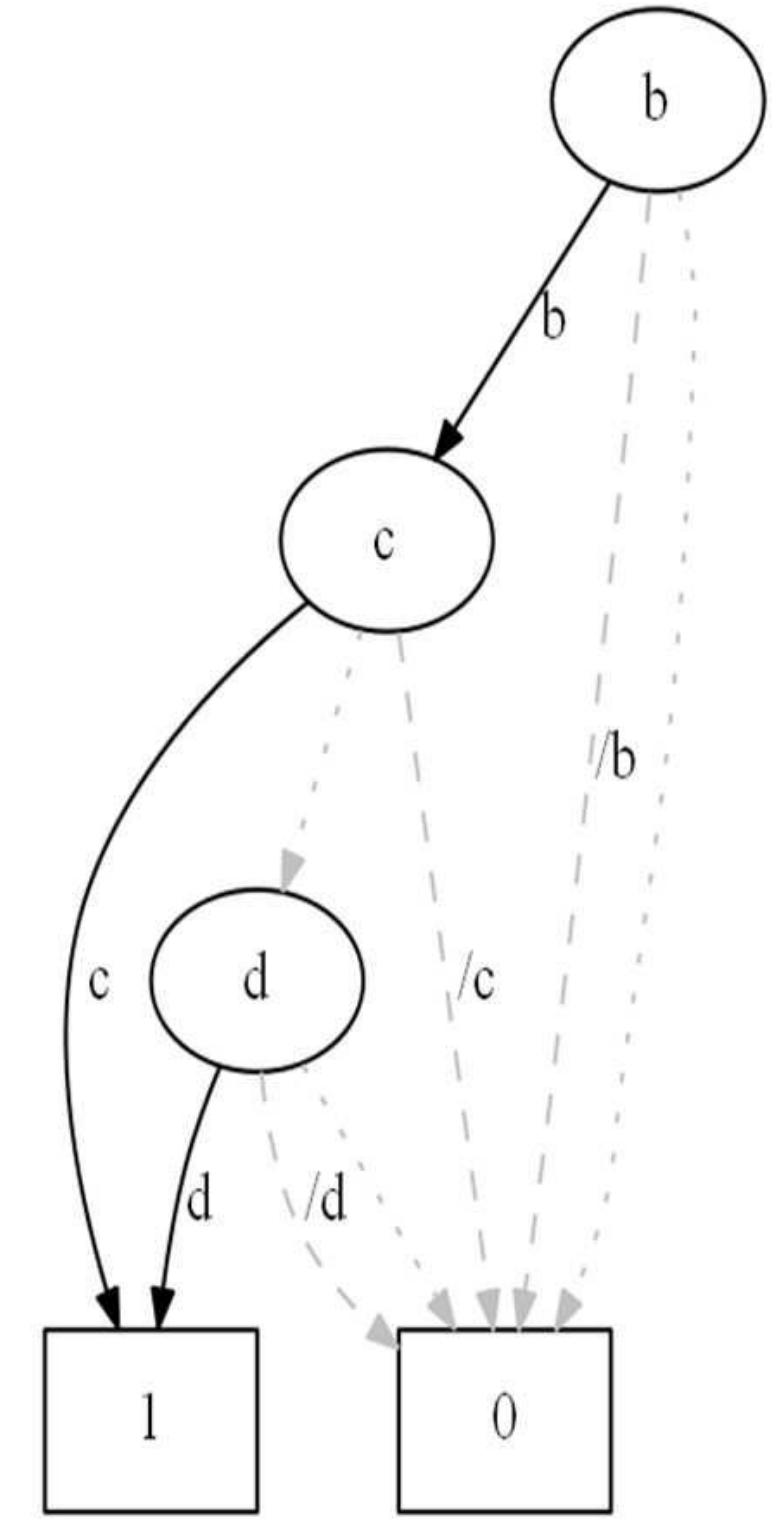
도면5


ZTDD
ZTDD_DTA
(a)
(b)
$G_1/G_2$
(e)
(f)
(c)
(d)
BDD
ZBDD

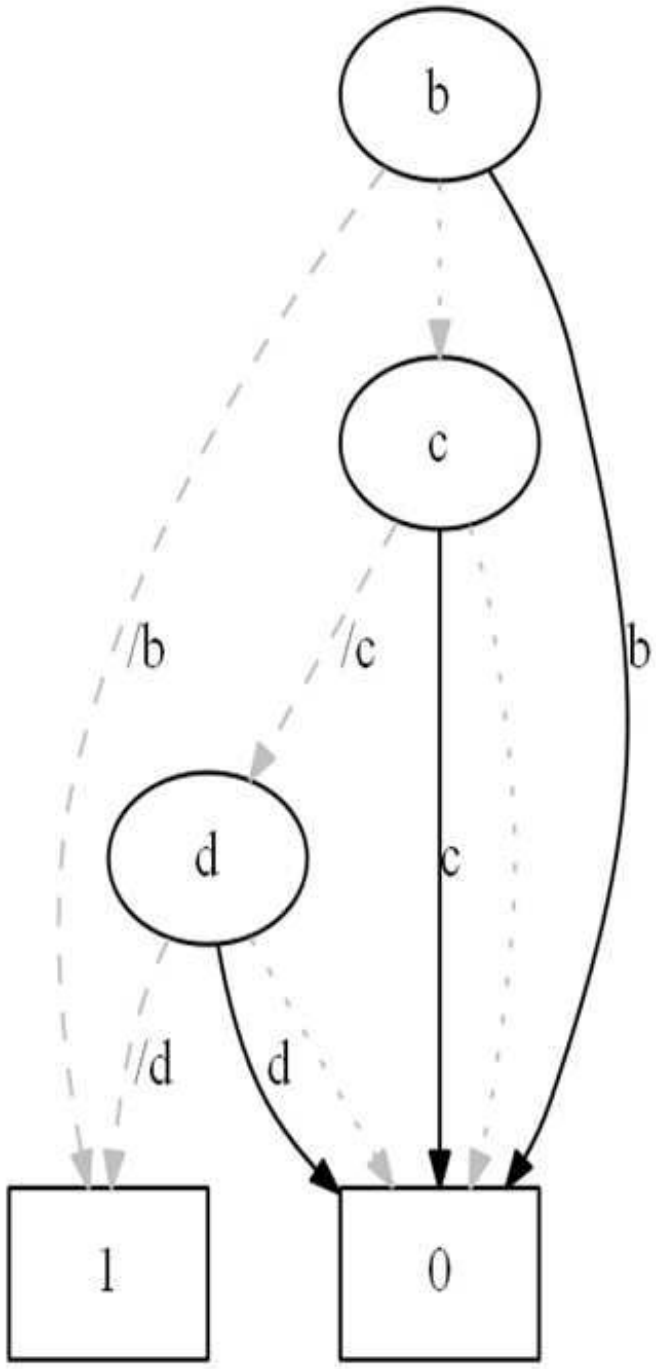
도면6



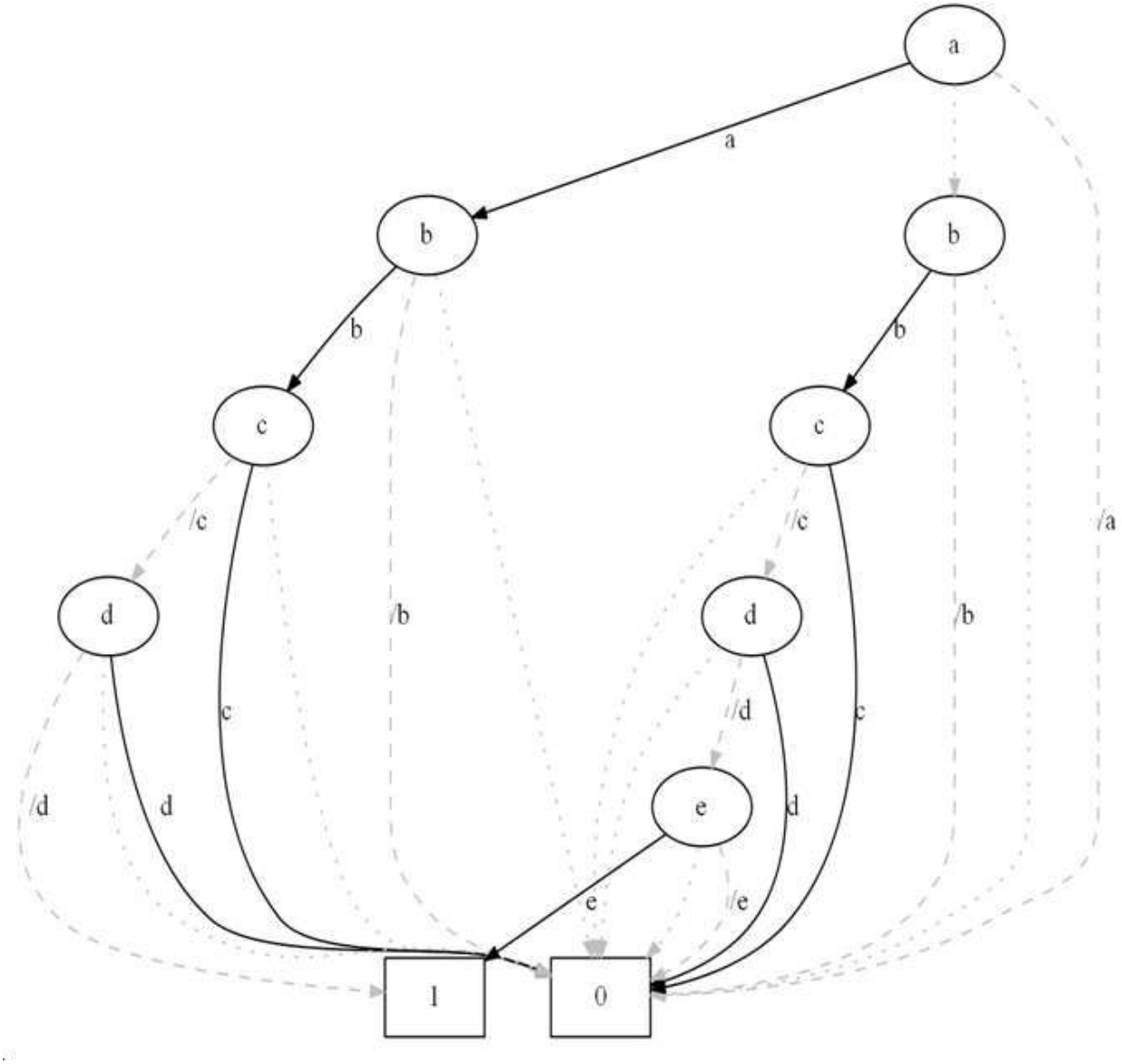
도면7



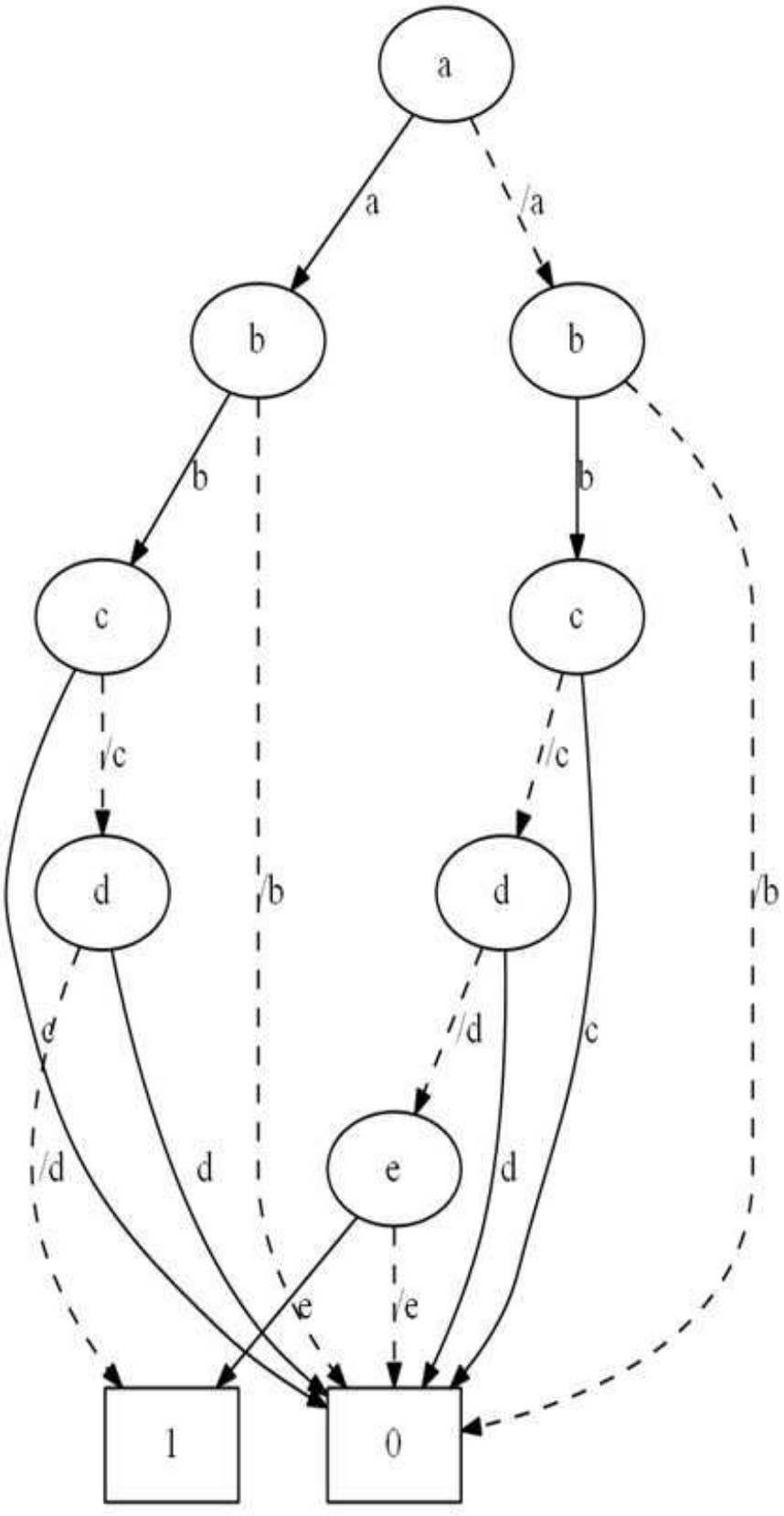
도면8



도면9



도면10



도면11

