

(12) 특허협력조약에 의하여 공개된 국제출원

(19) 세계지식재산권기구
국제사무국

(43) 국제공개일

2021년 5월 14일 (14.05.2021)



WIPO | PCT



(10) 국제공개번호

WO 2021/091031 A1

(51) 국제특허분류:

G06F 30/23 (2020.01)

G01M 5/00 (2006.01)

G06F 17/10 (2006.01)

MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI
(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML,
MR, NE, SN, TD, TG).

(21) 국제출원번호:

PCT/KR2020/004168

(22) 국제출원일:

2020년 3월 27일 (27.03.2020)

공개:

— 국제조사보고서와 함께 (조약 제21조(3))

(25) 출원언어:

한국어

(26) 공개언어:

한국어

(30) 우선권정보:

10-2019-0141392 2019년 11월 7일 (07.11.2019) KR

(71) 출원인: 세종대학교산학협력단 (INDUSTRY ACADEMY COOPERATION FOUNDATION OF SEJONG UNIVERSITY) [KR/KR]; 05006 서울시 광진구 능동로 209, Seoul (KR).

(72) 발명자: 김종성 (KIM, Jong Sung); 06280 서울시 강남구 삼성로51길 37, 108동 1201호, Seoul (KR).

(74) 대리인: 배정일 (BAE, Jung Il); 06132 서울시 강남구 논현로 503 1302호, Seoul (KR).

(81) 지정국 (별도의 표시가 없는 한, 가능한 모든 종류의 국내 권리의 보호를 위하여): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) 지정국 (별도의 표시가 없는 한, 가능한 모든 종류의 역내 권리의 보호를 위하여): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 유라시아 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 유럽 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK,

(54) Title: SIMPLE ELASTO-PLASTIC ANALYSIS METHOD FOR STRAIN-BASED STRUCTURAL INTEGRITY EVALUATION OF SAFETY GRADE EQUIPMENT, METAL CONTAINMENT VESSEL, AND CORE SUPPORT STRUCTURE IN NUCLEAR POWER PLANT UNDER SERVICE LEVEL D EARTHQUAKE OR BEYOND DESIGN BASIS EARTHQUAKE

(54) 발명의 명칭: 운전수준 D 지진 또는 설계기준초과 지진 하의 원전 안전등급 기기, 금속 격납용기 및 노심지지구조물에 대한 변형률 기반 구조 건전성 평가를 위한 단순 탄소성 해석 방법

(57) Abstract: A simple elasto-plastic analysis method for the strain-based structural integrity evaluation of safety grade equipment, a metal containment vessel, and a core support structure in a nuclear power plant under a service level D earthquake or beyond design basis earthquake according to an embodiment of the technical idea of the present invention comprises the steps of: calculating penalty factor K_e ; calculating penalty factor K_v ; calculating penalty factor K_n ; calculating alternating stress intensity S_{alt} using penalty factors K_e , K_v , K_n ; and calculating alternating equivalent strain ϵ_{alt} .

(57) 요약서: 본 발명의 기술적 사상에 의한 일 실시예에 따른, 운전수준 D 지진 또는 설계기준초과 지진 하의, 원전 안전등급 기기, 금속 격납용기 또는 노심지지구조물의 변형률 기반 구조 건전성 평가를 위한 단순 탄소성 해석 방법은, 페널티 팩터 K_e 를 계산하는 단계; 페널티 팩터 K_v 를 계산하는 단계; 페널티 팩터 K_n 을 계산하는 단계; 페널티 팩터 K_e , K_v 및 K_n 을 이용하여 교변응력강도 S_{alt} 를 계산하는 단계; 및 교변 등가 변형률 ϵ_{alt} 를 계산하는 단계를 포함할 수 있다.

WO 2021/091031 A1

명세서

발명의 명칭: 운전수준 D 지진 또는 설계기준초과 지진 하의 원전 안전등급 기기, 금속 격납용기 및 노심지지구조물에 대한 변형률 기반 구조 건전성 평가를 위한 단순 탄소성 해석 방법

기술분야

- [1] 본 발명은 운전수준 D 지진 또는 설계기준초과 지진 하의 원전 안전등급 기기, 금속 격납용기 및 노심지지구조물에 대한 변형률 기반 구조 건전성 평가를 위한 단순 탄소성 해석 방법에 관한 것이다.

배경기술

- [2] 원전 안전등급 기기, 금속 격납용기, 노심지지구조물 설계 기술기준인 ASME B&PV Code, Sec.III 및 Code Case N-779에서는 운전수준 A와 B의 천이상태 하의 원전 안전등급 기기, 금속 격납용기 및 노심지지구조물에 대한 응력 기반 구조 건전성 평가를 위한 단순 탄소성 해석 절차만 제시하고 있다.
- [3] 또한, 운전수준 D의 지진과 관련하여서는 ASME B&PV Code, Code Case N-XXX (아직 정식으로 발간되지 못한 상태로 현재 ASME B&PV Code Committee 최종 승인단계에 있음, 기록 번호 R13-1438)에서 운전수준 D 지진 하의 원전 안전등급 배관의 변형률 기반 구조 건전성 평가 절차를 제시하고 있을 뿐이다.
- [4] 즉, ASME B&PV Code에서는 운전수준 D 지진과 설계기준초과 지진 하의 원전 안전등급 기기, 금속 격납용기 및 노심지지구조물의 변형률 기반 구조 건전성 평가를 위한 단순 탄소성 해석 절차를 제시하지 않고 있는바, 변형률 기반 구조 건전성 평가를 위한 단순 탄소성 해석절차의 필요성이 대두되고 있다.
- [5] 또한, ASME B&PV Code, Code Case N-XXX (아직 정식으로 발간되지 못한 상태로 현재 ASME B&PV Code Committee 최종 승인단계에 있음, 기록 번호 R13-1438)의 변형률 허용기준을 적용하기 위해서는 등가 소성변형률이 필요하지만, 이에 대한 계산 절차가 제시되어 있지 않다.
- [6] 등가 소성변형률을 얻기 위하여는 상세 유한요소 탄소성 해석을 수행하여야 하나, 이러한 해석에는 과도한 계산시간이 소요되는 문제점이 존재한다.
- [7] 반면에, 탄성 기반 수식들을 이용한 배관 응력 계산 또는 탄성 해석의 경우에는 상대적으로 적은 시간이 소요되는바, 탄성 해석 결과를 이용하여 저주기 피로영역에서의 소성변형률 증대효과를 용이하게 고려할 수 있는 단순 탄소성 해석 절차를 도출한다면, 운전수준 D 지진과 설계기준초과 지진 하의 원전 안전등급 기기, 금속 격납용기 및 노심지지구조물의 변형률 기반 구조 건전성 평가가 빠르고 정확하게 이루어질 수 있을 것이다.

발명의 상세한 설명

기술적 과제

- [8] 본 발명의 기술적 사상에 따른, 운전수준 D 지진 또는 설계기준초과 지진 하의 원전 안전등급 기기, 금속 격납용기 및 노심지지구조물에 대한 변형률 기반 구조 건전성 평가를 위한 단순 탄소성 해석 방법이 이루고자 하는 기술적 과제는, 탄성 해석 결과를 이용하여 저주기 피로영역에서의 소성변형률 증대효과를 용이하게 고려할 수 있는 단순 탄소성 해석 방법을 제공하는 것이다.
- [9] 본 발명의 기술적 사상에 따른 단순 탄소성 해석 방법이 이루고자 하는 기술적 과제는 이상에서 언급한 과제로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 과제는 아래의 기재로부터 통상의 기술자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제 해결 수단

- [10] 본 발명의 기술적 사상에 의한 일 실시예에 따른, 운전수준 D 지진 또는 설계기준초과 지진 하의, 배관을 제외한 원전 안전등급 기기, 금속 격납용기 또는 노심지지구조물의 변형률 기반 구조 건전성 평가를 위한 단순 탄소성 해석 방법은,
- [11] (a) 하기 식을 이용하여 페널티 팩터 K_e 를 계산하는 단계;
- [12]
$$K_e = 1.0 \text{ (for } S_n \leq 3S_m)$$

$$= 1.0 + [(1-n)/n(m-1)](S_n/3S_m - 1) \text{ (for } 3S_m < S_n < 3mS_m)$$

$$= 1/n \text{ (for } S_n \geq 3mS_m)$$
- [13] (b) 하기 식을 이용하여 프와송 비 (Poisson's ratio) 효과에 대한 페널티 팩터 K_v 를 계산하는 단계;
- [14]
$$K_v = 1.4 \text{ (for } S_p > 3S_m \text{ and } S_{p-sb-sl} \geq 3S_m)$$

$$= 1.0 + 0.4(S_p - 3S_m)/S_{sb+sl} \text{ for } S_p > 3S_m \text{ and } S_{p-sb-sl} < 3S_m$$

$$= 1.0 \text{ for } S_p \leq 3S_m \text{ and } K_v \leq K_e$$
- [15] (c) 하기 식을 이용하여 국부 불연속에서의 소성 변형률 재분배에 대한 페널티 팩터 K_n 을 계산하는 단계;
- [16]
$$K_n = 1.0 + \left[\left(\frac{S_{p-sl}}{S_n} \right)^{\frac{1-n}{1+n}} - 1 \right] \left[\frac{S_{p-sl} - 3S_m}{S_{p-sl}} \right] \text{ for } S_{p-sl} > 3S_m$$

$$= 1.0 \text{ for } S_{p-sl} \leq 3S_m \text{ and } K_n K_v \leq K_e$$
- [17] (d) 교변응력강도 S_{alt} 를 하기 식으로 계산하는 단계; 및
- [18]
$$S_{alt} = \frac{1}{2} [K_e(S_{p-sb-sl}) + K_n K_v S_{sb} + K_v S_{sl}]$$
- [19] (e) 교변 등가 변형률 ε_{alt} 를 하기 식으로 계산하는 단계
- [20]
$$\varepsilon_{alt} = S_{alt}/E$$
- [21] 를 포함할 수 있다. 여기서, S_n 은 일차 응력강도와 이차 응력강도의 합의

범위이고, S_m 은 설계응력강도이며, n 은 변형률 경화지수이고, m 은 재질별로 결정되는 상수이며, S_p 는 전체 응력강도 범위이고, $S_{p-sb-sl}$ 은 이차 굽힘응력과 이차 국부응력을 제외한 전체 응력강도 범위이며, S_{sb+sl} 은 이차 굽힘응력과 이차 국부 응력의 합의 응력강도 범위이고, S_{p-sl} 은 이차 국부 응력을 제외한 전체 응력강도 범위이며, S_{sb} 는 이차 굽힘 응력강도 범위이고, S_{sl} 은 이차 국부 응력강도 범위이며, E 는 탄성계수이다.

- [22] 본 발명의 기술적 사상에 의한 일 실시예에 따른, 운전수준 D 지진 또는 설계기준초과 지진 하의, 배관의 변형률 기반 구조 건전성 평가를 위한 단순 탄소성 해석 방법은,
- [23] (a) 하기 식을 이용하여 페널티 팩터 K_e 를 계산하는 단계;
- [24]
$$K_e = 1.0 \text{ (for } S_n \leq 3S_m)$$

$$= 1.0 + [(1-n)/n(m-1)](S_n/3S_m - 1) \text{ (for } 3S_m < S_n < 3mS_m)$$

$$= 1/n \text{ (for } S_n \geq 3mS_m)$$
- [25] (b) 하기 식을 이용하여 프와송 비 (Poisson's ratio) 효과에 대한 페널티 팩터 K_v 를 계산하는 단계;
- [26] $K_v = 1.4$ 와 K_e 중 작은 값
- [27] (c) 하기 식을 이용하여 국부 불연속에서의 소성 변형률 재분배에 대한 페널티 팩터 K_n 을 계산하는 단계;
- [28]
$$K_n = 1.0 + \left[\left(\frac{S_p - S_{sl}}{S_n + S_{sb}} \right)^{\frac{1-n}{1+n}} - 1 \right] \left[\frac{S_p - S_{sl} - 3S_m}{S_p - S_{sl}} \right] \text{ and } K_n K_v \leq K_e$$
- [29]
$$S_p = K_1 C_1 \frac{P_D D_o}{2t} + K_2 C_2 \frac{D_o}{2I} (M_i + 2M_E + M_{AM})$$

$$+ K_3 C_3 \left[\frac{2F_{AM}}{A_M} + E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| \right]$$

$$+ K_3 \frac{E\alpha |\Delta T_1|}{2(1-\nu)} + \frac{E\alpha |\Delta T_2|}{1-\nu}$$
- [30]
$$S_n = C_1 \frac{P_D D_o}{2t} + C_2 \frac{D_o}{2I} (M_i + 2M_E) + C_3 \left[\frac{2F_{AM}}{A_M} + E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| \right]$$
- [31]
$$S_{sl} = \frac{E\alpha |\Delta T_2|}{1-\nu}$$
- [32]
$$S_{sb} = K_2 C_2 \frac{D_o}{2I} M_{AM} + K_3 \frac{E\alpha |\Delta T_1|}{2(1-\nu)}$$
- [33] (d) 최종 교변응력강도 S_{alt} 를 하기 식으로 계산하는 단계; 및

$$[34] \quad S_{alt} = \frac{1}{2} [K_e (S_{p-sb-sl}) + K_n K_v S_{sb} + K_v S_{sl}]$$

$$[35] \quad S_{p-sb-sl} = K_1 C_1 \frac{P_D D_o}{2t} + K_2 C_2 \frac{D_o}{2I} (M_i + 2M_E) + K_3 C_3 \left[\frac{2F_{AM}}{A_M} + E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| \right]$$

[36] (e) 교번 등가 변형률 ε_{alt} 를 하기 식으로 계산하는 단계

$$[37] \quad \varepsilon_{alt} = S_{alt} / E$$

[38] 를 포함할 수 있다. 여기서, K_1, K_2, K_3 는 국부 응력지수이고, C_1, C_2, C_3 는 이차 응력지수이며, P_D 는 내압이고, D_o 는 외경이며, t 는 두께이고, I 는 관성모멘트이며, M_i 는 하나의 운전하중과 다른 운전하중 사이에 발생하는 결과적인 모멘트 범위이고, M_E 는 지진 및 지진 외의 리버싱 타입(reversing type) 동적 사건 및 무게에 의한 관성하중에 기인하는 결과적인 모멘트 진폭이며, F_{AM} 은 지진 및 지진 외의 리버싱 타입 동적 사건에 기인하는 앵커 모션에 의한 길이방향 하중 진폭이고, M_{AM} 은 지진 및 지진 외의 리버싱 타입 동적 사건에 기인하는 앵커 모션에 의한 결과적인 모멘트 범위이며, A_M 은 배관 벽내 금속의 횡단면적이고, E_{ab} 는 상온에서 전체 구조 불연속 또는 재료 불연속의 양쪽 면 (a면과 b면)에서의 평균 탄성계수이며, α_a 는 전체 구조 불연속 또는 재료 불연속의 a면에서의 상온 열팽창계수이고, α_b 는 전체 구조 불연속 또는 재료 불연속의 b면에서의 상온 열팽창계수이며, T_a 는 전체 구조 불연속 또는 재료 불연속의 a면에서의 평균 온도 범위이고, T_b 는 전체 구조 불연속 또는 재료 불연속의 a면에서의 평균 온도 범위이며, E 는 상온에서의 탄성계수이고, α 는 상온에서의 평균 열팽창계수이며, ν 는 Poisson Ratio이고, $|\Delta T_1|$ 는 모멘트를 발생시키는 등가 선형 온도 분포에서 배관 외표면 온도와 내표면 온도 사이의 절대 차이이며, $|\Delta T_2|$ 는 $|\Delta T_1|$ 를 포함시키지 않는 벽두께를 통해 비선형 열 구배 범위의 절대 값이며, $S_{p-sb-sl}$ 은 이차 굽힘응력과 이차 국부응력을 제외한 전체 응력강도 범위이고, S_{sb} 는 이차 굽힘 응력강도 범위이며, S_{sl} 은 이차 국부 응력강도 범위이고, S_n 은 일차 막/굽힘 응력과 이차 막응력과 열팽창 응력의 합의 응력강도의 범위이며, S_m 은 설계응력강도이고, n 은 변형률 경화지수이며, m 은 재질별 결정되는 상수이고, S_p 는 전체 응력강도 범위이다.

[39] 본 발명의 기술적 사상에 의한 일 실시예에 따른, 컴퓨터에 운전수준 D 지진 또는 설계기준초과 지진 하의, 배관을 제외한 원전 안전등급 기기, 금속 격납용기 또는 노심지지구조물의 변형률 기반 구조 건전성 평가를 위한 단순 탄소성 해석 방법을 실행시키기 위한 프로그램을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 매체는,

[40] (a) 하기 식을 이용하여 페널티 팩터 K_e 를 계산하는 단계;

- [41] $K_e = 1.0$ (for $S_n \leq 3S_m$)
 $= 1.0 + [(1-n)/n(m-1)](S_n/3S_m - 1)$ (for $3S_m < S_n < 3mS_m$)
 $= 1/n$ (for $S_n \geq 3mS_m$)
- [42] (b) 하기 식을 이용하여 프와송 비 (Poisson's ratio) 효과에 대한 페널티 팩터 K_v 를 계산하는 단계;
- [43] $K_v = 1.4$ (for $S_p > 3S_m$ and $S_{p-sb-sl} \geq 3S_m$)
 $= 1.0 + 0.4(S_p - 3S_m)/S_{sb+sl}$ for $S_p > 3S_m$ and $S_{p-sb-sl} < 3S_m$
 $= 1.0$ for $S_p \leq 3S_m$ and $K_v \leq K_e$
- [44] (3) 하기 식을 이용하여 국부 불연속에서의 소성 변형률 재분배에 대한 페널티 팩터 K_n 을 계산하는 단계;
- [45]
$$K_n = 1.0 + \left[\left(\frac{S_{p-sl}}{S_n} \right)^{\frac{1-n}{1+n}} - 1 \right] \left[\frac{S_{p-sl} - 3S_m}{S_{p-sl}} \right]$$
 for $S_{p-sl} > 3S_m$
 $= 1.0$ for $S_{p-sl} \leq 3S_m$ and $K_n K_v \leq K_e$
- [46] (4) 교변응력강도 S_{alt} 를 하기 식으로 계산하는 단계; 및
- [47]
$$S_{alt} = \frac{1}{2} [K_e (S_{p-sb-sl}) + K_n K_v S_{sb} + K_v S_{sl}]$$
- [48] (5) 교변 등가 변형률 ε_{alt} 를 하기 식으로 계산하는 단계
- [49] $\varepsilon_{alt} = S_{alt}/E$
- [50] 를 실행시키기 위한 프로그램을 기록할 수 있다.
- [51] 본 발명의 기술적 사상에 의한 일 실시예에 따른, 운전수준 D 지진 또는 설계기준초과 지진 하의, 배관의 변형률 기반 구조 건전성 평가를 위한 단순 탄소성 해석 방법을 실행시키기 위한 프로그램을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 매체는,
- [52] (a) 하기 식을 이용하여 페널티 팩터 K_e 를 계산하는 단계;
- [53] $K_e = 1.0$ (for $S_n \leq 3S_m$)
 $= 1.0 + [(1-n)/n(m-1)](S_n/3S_m - 1)$ (for $3S_m < S_n < 3mS_m$)
 $= 1/n$ (for $S_n \geq 3mS_m$)
- [54] (b) 하기 식을 이용하여 프와송 비 (Poisson's ratio) 효과에 대한 페널티 팩터 K_v 를 계산하는 단계;
- [55] $K_v = 1.4$ 와 K_e 중 작은 값
- [56] (c) 하기 식을 이용하여 국부 불연속에서의 소성 변형률 재분배에 대한 페널티 팩터 K_n 을 계산하는 단계;

$$[57] \quad K_n = 1.0 + \left[\left(\frac{S_p - S_{sl}}{S_n + S_{sb}} \right)^{\frac{1-n}{1+n}} - 1 \right] \left[\frac{S_p - S_{sl} - 3S_m}{S_p - S_{sl}} \right] \quad \text{and } K_n K_v \leq K_e$$

$$[58] \quad S_p = K_1 C_1 \frac{P_D D_o}{2t} + K_2 C_2 \frac{D_o}{2I} (M_i + 2M_E + M_{AM}) \\ + K_3 C_3 \left[\frac{2F_{AM}}{A_M} + E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| \right] \\ + K_3 \frac{E\alpha |\Delta T_1|}{2(1-\nu)} + \frac{E\alpha |\Delta T_2|}{1-\nu}$$

$$[59] \quad S_n = C_1 \frac{P_D D_o}{2t} + C_2 \frac{D_o}{2I} (M_i + 2M_E) + C_3 \left[\frac{2F_{AM}}{A_M} + E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| \right]$$

$$[60] \quad S_{sl} = \frac{E\alpha |\Delta T_2|}{1-\nu}$$

$$[61] \quad S_{sb} = K_2 C_2 \frac{D_o}{2I} M_{AM} + K_3 \frac{E\alpha |\Delta T_1|}{2(1-\nu)}$$

[62] (d) 최종 교변응력강도 S_{alt} 를 하기 식으로 계산하는 단계; 및

$$[63] \quad S_{alt} = \frac{1}{2} [K_e (S_{p-sb-sl}) + K_n K_v S_{sb} + K_v S_{sl}]$$

$$[64] \quad S_{p-sb-sl} = K_1 C_1 \frac{P_D D_o}{2t} + K_2 C_2 \frac{D_o}{2I} (M_i + 2M_E) \\ + K_3 C_3 \left[\frac{2F_{AM}}{A_M} + E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| \right]$$

[65] (e) 교변 등가 변형률 ε_{alt} 를 하기 식으로 계산하는 단계

$$[66] \quad \varepsilon_{alt} = S_{alt} / E$$

[67] 를 실행시키기 위한 프로그램을 기록할 수 있다.

발명의 효과

[68] 본 발명의 기술적 사상에 의한 실시예들에 따른, 운전수준 D 지진 또는 설계기준초과 지진 하의 원전 안전등급 기기, 금속 격납용기 및 노심지지구조물에 대한 변형률 기반 구조 건전성 평가를 위한 단순 탄소성 해석 방법은 탄성 해석 결과를 이용하여 저주기 피로영역에서의 소성변형률 증대효과를 용이하게 고려할 수 있는 단순 탄소성 해석 방법을 제공할 수 있다.

[69] 다만, 본 발명의 일 실시예에 따른 단순 탄소성 해석 방법이 달성할 수 있는 효과는 이상에서 언급한 것들로 제한되지 않으며, 언급하지 않은 또 다른 효과들은 아래의 기재로부터 통상의 기술자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

발명의 실시를 위한 형태

- [70] 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 실시예를 가질 수 있는 바, 특정 실시예들을 도면에 예시하고, 이를 상세한 설명을 통해 상세히 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명을 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명은 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.
- [71] 본 발명을 설명함에 있어서, 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 그 상세한 설명을 생략한다.
- [72] 이하, 본 발명의 기술적 사상에 의한 실시예들을 차례로 상세히 설명한다.
- [73] 본 발명의 기술적 사상에 따른, 운전수준 D 지진 또는 설계기준초과 지진 하의 원전 안전등급 기기, 금속 격납용기 및 노심지지구조물에 대한 변형률 기반 구조 건전성 평가를 위한 단순 탄소성 해석 방법은 배관을 제외한 원전 안전등급 기기, 금속 격납용기 또는 노심지지구조물에 대한 단순 탄소성 해석 방법과 배관에 대한 단순 탄소성 해석 방법으로 구분될 수 있다.
- [74] 먼저, 배관을 제외한 원전 안전등급 기기, 금속 격납용기 또는 노심지지구조물에 대한 단순 탄소성 해석 방법에 대하여 설명한다. 본 방법은 운전수준 D 지진 또는 설계기준초과 지진 조건에 대하여 이루어지는 것으로서, 탄성 해석에 의해 얻어진 각 응력 성분에 페널티 팩터들을 곱함으로써, Time History 탄소성 해석이 없이도 소성 효과를 반영할 수 있게 된다.
- [75] 응력 성분들은 살펴보면, 지진 등과 같은 리버싱 타입(Reversing Type) 동적 하중은 일차 응력 성분은 관성하중에 의해 발생하는 응력이며, 이차 응력 성분은 앵커 모션에 의해 발생하는 응력이다. 무게, 압력, 기계적 하중, 관성 하중과 같은 하중 제어 조건에 의해 발생하는 응력 성분은 일차 응력 성분들이며, 열응력, 앵커 모션과 같은 변위 제어 조건에 의해 발생하는 응력 성분은 이차 응력 성분들이다. 하기 식들의 부호들은 ASME B&PV Code에 정의된 것들로서, 본 명세서에 설명되지 않은 부분은 ASME B&PV Code에서 정의된 내용을 참조할 수 있다.
- [76] 먼저, 하기 식(1)을 이용하여 페널티 팩터 K_e 를 계산하는 단계가 수행될 수 있다. K_e 는 일차 응력에 대한 페널티 팩터이다.
- [77]
- [78] [식 1]
- [79]
$$K_e = 1.0 \text{ (for } S_n \leq 3S_m)$$

$$= 1.0 + [(1-n)/n(m-1)](S_n/3S_m - 1) \text{ (for } 3S_m < S_n < 3mS_m)$$

$$= 1/n \text{ (for } S_n \geq 3mS_m)$$
- [80] 여기서, S_n 은 일차 응력강도와 이차 응력강도의 합의 범위이고, S_m 은

설계응력강도이며, n 은 변형률 경화지수이고, m 은 재질별로 결정되는 상수이다.

[81]

[82] 다음으로, 하기 식(2)를 이용하여 페널티 팩터 K_v 를 계산하는 단계가 수행될 수 있다. K_v 는 프와송 비(Poisson's Ratio) 효과를 고려하기 위한 페널티 팩터이다.

[83]

[84] [식 2]

$$\begin{aligned}
 [85] \quad K_v &= 1.4 \quad (\text{for } S_p > 3S_m \text{ and } S_{p-sb-sl} \geq 3S_m) \\
 &= 1.0 + 0.4(S_p - 3S_m)/S_{sb+sl} \quad \text{for } S_p > 3S_m \text{ and } S_{p-sb-sl} < 3S_m \\
 &= 1.0 \quad \text{for } S_p \leq 3S_m \quad \text{and } K_v \leq K_e
 \end{aligned}$$

[86]

[87] 여기서, S_p 는 전체 응력강도 범위이고, $S_{p-sb-sl}$ 은 이차 굽힘응력과 이차 국부응력을 제외한 전체 응력강도 범위이며, S_{sb+sl} 은 이차 굽힘응력과 이차 국부 응력의 합의 응력강도 범위이며, S_p 는 전체 응력강도 범위이다.

[88]

[89] 다음으로, 하기 식(3)을 이용하여 페널티 팩터 K_n 을 계산하는 단계가 수행될 수 있다. K_n 은 노치로 인한 변형률 집중을 고려하기 위한 페널티 팩터이다.

[90]

[91] [식 3]

$$\begin{aligned}
 [92] \quad K_n &= 1.0 + \left[\left(\frac{S_{p-sl}}{S_n} \right)^{\frac{1-n}{1+n}} - 1 \right] \left[\frac{S_{p-sl} - 3S_m}{S_{p-sl}} \right] \quad \text{for } S_{p-sl} > 3S_m \\
 &= 1.0 \quad \text{for } S_{p-sl} \leq 3S_m \quad \text{and } K_n K_v \leq K_e
 \end{aligned}$$

[93]

[94] 여기서, S_{p-sl} 은 이차 국부 응력을 제외한 전체 응력강도 범위이다.

[95] 다음으로, 페널티 팩터들을 교변응력강도 성분들에 곱하여 구조 건전성 평가시 설계피로선도에 입력할 최종 교변응력강도 S_{alt} 를 하기 식(4)으로 계산하는 단계가 수행될 수 있다. 배관을 제외한 원전 안전등급 기기, 금속 격납용기 또는 노심지지구조물의 경우, 교변응력강도 성분들은 유한요소해석과 같은 해석에 의해 얻어질 수 있다.

[96]

[97] [식 4]

$$[98] \quad S_{alt} = \frac{1}{2} [K_e(S_{p-sb-sl}) + K_n K_v S_{sb} + K_v S_{sl}]$$

[99]

[100] 여기서, S_{sb} 는 이차 굽힘 응력강도 범위이고, S_{sl} 은 이차 국부 응력강도

범위이다.

[101] 다음으로, 교번 등가 변형률 ε_{alt} 를 하기 식(5)으로 계산하는 단계가 수행될 수 있다.

[102]

[103] [식 5]

$$[104] \quad \varepsilon_{alt} = S_{alt} / E$$

[105]

[106] 여기서, E는 탄성계수이다. 하기 식(6)과 같이 교번 등가 변형률 ε_{alt} 에 2를 곱하면 등가 변형률 범위 ε_{range} 를 얻을 수 있다.

[107]

[108] [식 6]

$$[109] \quad \varepsilon_{range} = 2\varepsilon_{alt} = 2S_{alt} / E$$

[110]

[111] 다음으로, 운전수준 D 지진 또는 설계기준초과 지진 하의, 배관의 변형률 기반 구조 건전성 평가를 위한 단순 탄소성 해석 방법에 대하여 설명한다. 본 방법은 운전수준 D 지진 또는 설계기준초과 지진 조건에 대하여 이루어지는 것으로서, 탄성 해석에 의해 얻어진 각 응력 성분에 페널티 팩터들을 곱함으로써, Time History 해석을 통한 소성 해석이 없이도 소성 효과를 반영할 수 있게 된다.

[112]

[113] 먼저, 하기 식(7)을 이용하여 페널티 팩터 K_e 를 계산하는 단계를 수행할 수 있다.

[114]

[115] [식 7]

$$[116] \quad \begin{aligned} K_e &= 1.0 \text{ (for } S_n \leq 3S_m) \\ &= 1.0 + [(1-n)/n(m-1)](S_n/3S_m - 1) \text{ (for } 3S_m < S_n < 3mS_m) \\ &= 1/n \text{ (for } S_n \geq 3mS_m) \end{aligned}$$

[117]

[118] 여기서, S_n 은 일차 막/굽힘 응력과 이차 막응력과 열팽창 응력의 합인 응력강도의 범위이고, S_m 은 설계응력강도이며, n은 변형률 경화지수이고, m은 재질별 결정되는 상수이다.

[119] 다음으로, 하기 식(8)을 이용하여 페널티 팩터 K_v 를 계산하는 단계가 수행될 수 있다.

[120]

[121] [식 8]

$$[122] \quad K_v = 1.4 \text{와 } K_e \text{ 중 작은 값}$$

[123]

[124] 다음으로, 하기 식(9) 내지 식(13)을 이용하여 페널티 팩터 K_n 을 계산하는 단계가 수행될 수 있다.

[125]

[126] [식 9]

[127]

$$K_n = 1.0 + \left[\left(\frac{S_p - S_{sl}}{S_n + S_{sb}} \right)^{\frac{1-n}{1+n}} - 1 \right] \left[\frac{S_p - S_{sl} - 3S_m}{S_p - S_{sl}} \right] \quad \text{and } K_n K_v \leq K_e$$

[128]

[129] [식 10]

[130]

$$\begin{aligned} S_p = & K_1 C_1 \frac{P_D D_o}{2t} + K_2 C_2 \frac{D_o}{2I} (M_i + 2M_E + M_{AM}) \\ & + K_3 C_3 \left[\frac{2F_{AM}}{A_M} + E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| \right] \\ & + K_3 \frac{E\alpha |\Delta T_1|}{2(1-\nu)} + \frac{E\alpha |\Delta T_2|}{1-\nu} \end{aligned}$$

[131]

[132] [식 11]

[133]

$$S_n = C_1 \frac{P_D D_o}{2t} + C_2 \frac{D_o}{2I} (M_i + 2M_E) + C_3 \left[\frac{2F_{AM}}{A_M} + E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| \right]$$

[134]

[135] [식 12]

[136]

$$S_{sl} = \frac{E\alpha |\Delta T_2|}{1-\nu}$$

[137]

[138] [식 13]

[139]

$$S_{sb} = K_2 C_2 \frac{D_o}{2I} M_{AM} + K_3 \frac{E\alpha |\Delta T_1|}{2(1-\nu)}$$

[140]

[141] 여기서, K_1, K_2, K_3 는 국부 응력지수이며, C_1, C_2, C_3 는 이차 응력지수이고, P_D 는 내압이며, D_o 는 외경이고, t 는 두께이며, I 는 관성모멘트이고, M_i 는 하나의 운전하중과 다른 운전하중 사이에 발생하는 결과적인 모멘트 범위이며, M_E 는 지진, 리버싱 타입(reversing type) 동적 사건 및 무게에 의한 관성하중에 기인하는 결과적인 모멘트 진폭이고, F_{AM} 은 지진 및 리버싱 타입 동적 사건에 기인하는 앵커 모션에 의한 길이방향 하중 진폭이며, M_{AM} 은 지진 및 리버싱 타입 동적 사건에 기인하는 앵커 모션에 의한 결과적인 모멘트 범위이고, A_M 은 배관 벽내

금속의 횡단면적이며, E_{ab} 는 상온에서 전체 구조 불연속 또는 재료 불연속의 양쪽 면 (a면과 b면)에서의 평균 탄성계수이고, α_a 는 전체 구조 불연속 또는 재료 불연속의 a면에서의 상온 열팽창계수이며, α_b 는 전체 구조 불연속 또는 재료 불연속의 b면에서의 상온 열팽창계수이고, T_a 는 전체 구조 불연속 또는 재료 불연속의 a면에서의 평균 온도 범위이며, T_b 는 전체 구조 불연속 또는 재료 불연속의 a면에서의 평균 온도 범위이고, E 는 상온에서의 탄성계수이며, α 는 상온에서의 평균 열팽창계수이고, ν 는 Poisson Ratio이며, $|\Delta T_1|$ 는 모멘트를 발생시키는 등가 선형 온도 분포에서 배관 외표면 온도와 내표면 온도 사이의 절대 차이이고, $|\Delta T_2|$ 는 $|\Delta T_1|$ 를 포함시키지 않는 벽두께를 통해 비선형 열 구배 범위의 절대 값이며, S_{sb} 는 이차 굽힘 응력강도 범위이고, S_{sl} 은 이차 국부 응력강도 범위이다.

[142]

[143] 다음으로, 페널티 팩터들을 교번응력강도 성분들에 곱하여 구조 건전성 평가시 설계피로선도에 입력할 최종 교번응력강도 S_{alt} 를 하기 식(14) 및 식(15)로 계산하는 단계가 수행될 수 있다. 배관의 경우, 교번응력강도 성분들은 위에서 설명된 바와 같이 식(10) 내지 식(13)에 의해 얻어질 수 있게 된다.

[144]

[145] [식 14]

$$[146] \quad S_{alt} = \frac{1}{2} [K_e (S_{p-sb-sl}) + K_n K_\nu S_{sb} + K_\nu S_{sl}]$$

[147]

[148] [식 15]

$$[149] \quad S_{p-sb-sl} = K_1 C_1 \frac{P_D D_o}{2t} + K_2 C_2 \frac{D_o}{2I} (M_i + 2M_E) \\ + K_3 C_3 \left[\frac{2F_{AM}}{A_M} + E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| \right]$$

[150]

[151] 여기서, $S_{p-sb-sl}$ 은 이차 굽힘응력과 이차 국부응력을 제외한 전체 응력강도 범위이다.

[152]

[153] 다음으로, 교번 등가 변형률 ε_{alt} 를 하기 식(16)으로 계산하는 단계가 수행될 수 있다.

[154]

[155] [식 16]

$$[156] \quad \varepsilon_{alt} = S_{alt} / E$$

[157] 여기서, E는 탄성계수이다. 하기 식(17)과 같이 교변 등가 변형률 ε_{alt} 에 2를 곱하면 등가 변형률 범위 ε_{range} 를 얻을 수 있다.

[158]

[159] [식 17]

$$[160] \quad \varepsilon_{range} = 2\varepsilon_{alt} = 2S_{alt}/E$$

[161]

[162] 본 발명의 실시예들에 따른 운전수준 D 지진 또는 설계기준초과 지진 하의 원전 안전등급 기기, 금속 격납용기 및 노심지지구조물에 대한 변형률 기반 구조 건전성 평가를 위한 단순 탄소성 해석 방법은 정보처리 능력을 가진 컴퓨터 시스템에 의해 자동으로 수행될 수도 있으며, 프로그램의 형태로 프로그램 기록 매체에 저장될 수도 있다.

[163] 본 발명의 일 실시예에 따른, 운전수준 D 지진 또는 설계기준초과 지진 하의, 배관을 제외한 원전 안전등급 기기, 금속 격납용기 또는 노심지지구조물의 변형률 기반 구조 건전성 평가를 위한 단순 탄소성 해석 방법을 실행시키기 위한 프로그램을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 매체에는 식(1)을 이용하여 페널티 팩터 K_e 를 계산하는 단계, 식(2)를 이용하여 페널티 팩터 K_v 를 계산하는 단계, 식(3)을 이용하여 페널티 팩터 K_n 을 계산하는 단계, 식(4)를 이용하여 최종 교변응력장도 S_{alt} 를 계산하는 단계, 식(5)를 이용하여 교변 등가 변형률 ε_{alt} 를 계산하는 단계가 기록될 수 있다.

[164] 본 발명의 다른 실시예에 따른, 운전수준 D 지진 또는 설계기준초과 지진 하의, 배관의 변형률 기반 구조 건전성 평가를 위한 단순 탄소성 해석 방법을 실행시키기 위한 프로그램을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 매체에는 식(7)을 이용하여 페널티 팩터 K_e 를 계산하는 단계, 식(8)을 이용하여 페널티 팩터 K_v 를 계산하는 단계, 식(9) 내지 식(13)을 이용하여 페널티 팩터 K_n 을 계산하는 단계, 식(14) 및 식(15)를 이용하여 최종 교변응력장도 S_{alt} 를 계산하는 단계, 및 식(16)을 이용하여 교변 등가 변형률 ε_{alt} 를 계산하는 단계가 기록될 수 있다.

[165] 이상 본 명세서에서 설명한 기능적 동작과 본 주제에 관한 실시형태들은 본 명세서에서 개시한 구조들 및 그들의 구조적인 등가물을 포함하여 디지털 전자 회로나 컴퓨터 소프트웨어, 펌웨어 또는 하드웨어에서 혹은 이들 중 하나 이상의 조합에서 구현 가능하다.

[166] 본 명세서에서 기술하는 주제의 실시형태는 하나 이상의 컴퓨터 프로그램 제품, 다시 말해 데이터 처리 장치에 의한 실행을 위하여 또는 그 동작을 제어하기 위하여 유형의 프로그램 매체 상에 인코딩되는 컴퓨터 프로그램 명령에 관한 하나 이상의 모듈로서 구현될 수 있다. 유형의 프로그램 매체는 전파형 신호이거나 컴퓨터로 판독 가능한 매체일 수 있다. 전파형 신호는

컴퓨터에 의한 실행을 위하여 적절한 수신기 장치로 전송하기 위한 정보를 인코딩하기 위하여 생성되는 예컨대 기계가 생성한 전기적, 광학적 혹은 전자기 신호와 같은 인공적으로 생성된 신호이다. 컴퓨터로 판독 가능한 매체는 기계로 판독 가능한 저장장치, 기계로 판독 가능한 저장 기판, 메모리 장치, 기계로 판독 가능한 전파형 신호에 영향을 미치는 물질의 조합 혹은 이들 중 하나 이상의 조합일 수 있다.

- [167] 컴퓨터 프로그램(프로그램, 소프트웨어, 소프트웨어 어플리케이션, 스크립트 혹은 코드로도 알려져 있음)은 컴파일되거나 해석된 언어나 선험적 혹은 절차적 언어를 포함하는 프로그래밍 언어의 어떠한 형태로도 작성될 수 있으며, 독립형 프로그램이나 모듈, 컴포넌트, 서브루틴 혹은 컴퓨터 환경에서 사용하기에 적합한 다른 유닛을 포함하여 어떠한 형태로도 전개될 수 있다.
- [168] 컴퓨터 프로그램은 파일 시스템의 파일에 반드시 대응하는 것은 아니다. 프로그램은 요청된 프로그램에 제공되는 단일 파일 내에, 혹은 다중의 상호 작용하는 파일(예컨대, 하나 이상의 모듈, 하위 프로그램 혹은 코드의 일부를 저장하는 파일) 내에, 혹은 다른 프로그램이나 데이터를 보유하는 파일의 일부(예컨대, 마크업 언어 문서 내에 저장되는 하나 이상의 스크립트) 내에 저장될 수 있다.
- [169] 컴퓨터 프로그램은 하나의 사이트에 위치하거나 복수의 사이트에 걸쳐서 분산되어 통신 네트워크에 의해 상호 접속된 다중 컴퓨터 또는 하나의 컴퓨터 상에서 실행되도록 전개될 수 있다.
- [170] 본 명세서에서 기술하는 프로세스와 논리 흐름은 입력 데이터 상에서 동작하고 출력을 생성함으로써 기능을 수행하기 위하여 하나 이상의 컴퓨터 프로그램을 실행하는 하나 이상의 프로그래머블 프로세서에 의하여 수행 가능하다.
- [171] 컴퓨터 프로그램의 실행에 적합한 프로세서는, 예컨대 범용 및 특수 목적의 마이크로프로세서 양자 및 어떤 종류의 디지털 컴퓨터의 어떠한 하나 이상의 프로세서라도 포함한다. 일반적으로, 프로세서는 읽기 전용 메모리나 랜덤 액세스 메모리 혹은 양자로부터 명령어와 데이터를 수신할 것이다.
- [172] 컴퓨터의 핵심적인 요소는 명령어와 데이터를 저장하기 위한 하나 이상의 메모리 장치 및 명령을 수행하기 위한 프로세서이다. 또한, 컴퓨터는 일반적으로 예컨대 자기, 자기광학 디스크나 광학 디스크와 같은 데이터를 저장하기 위한 하나 이상의 대량 저장 장치로부터 데이터를 수신하거나 그것으로 데이터를 전송하거나 혹은 그러한 동작 둘 다를 수행하기 위하여 동작가능 하도록 결합되거나 이를 포함할 것이다. 그러나, 컴퓨터는 그러한 장치를 가질 필요가 없다.
- [173] 본 기술한 설명은 본 발명의 최상의 모드를 제시하고 있으며, 본 발명을 설명하기 위하여, 그리고 당업자가 본 발명을 제작 및 이용할 수 있도록 하기 위한 예를 제공하고 있다. 이렇게 작성된 명세서는 그 제시된 구체적인 용어에 본 발명을 제한하는 것이 아니다.

- [174] 따라서, 상술한 예를 참조하여 본 발명을 상세하게 설명하였지만, 당업자라면 본 발명의 범위를 벗어나지 않으면서도 본 예들에 대한 개조, 변경 및 변형을 가할 수 있다.

청구범위

[청구항 1] 운전수준 D 지진 또는 설계기준초과 지진 하의, 배관을 제외한 원전 안전등급 기기, 금속 격납용기 또는 노심지지구조물의 변형률 기반 구조 건전성 평가를 위한 단순 탄소성 해석 방법에 있어서,

(a) 하기 식을 이용하여 페널티 팩터 K_e 를 계산하는 단계;

$$\begin{aligned} K_e &= 1.0 \text{ (for } S_n \leq 3S_m) \\ &= 1.0 + [(1-n)/n(m-1)](S_n/3S_m - 1) \text{ (for } 3S_m < S_n < 3mS_m) \\ &= 1/n \text{ (for } S_n \geq 3mS_m) \end{aligned}$$

(b) 하기 식을 이용하여 페널티 팩터 K_v 를 계산하는 단계;

$$\begin{aligned} K_v &= 1.4 \text{ (for } S_p > 3S_m \text{ and } S_{p-sb-sl} \geq 3S_m) \\ &= 1.0 + 0.4(S_p - 3S_m)/S_{sb+sl} \text{ for } S_p > 3S_m \text{ and } S_{p-sb-sl} < 3S_m \\ &= 1.0 \text{ for } S_p \leq 3S_m \text{ and } K_v \leq K_e \end{aligned}$$

(c) 하기 식을 이용하여 페널티 팩터 K_n 을 계산하는 단계; 및

$$\begin{aligned} K_n &= 1.0 + \left[\left(\frac{S_{p-sl}}{S_n} \right)^{\frac{1-n}{1+n}} - 1 \right] \left[\frac{S_{p-sl} - 3S_m}{S_{p-sl}} \right] \text{ for } S_{p-sl} > 3S_m \\ &= 1.0 \text{ for } S_{p-sl} \leq 3S_m \text{ and } K_n K_v \leq K_e \end{aligned}$$

(d) 교변응력강도 S_{alt} 를 하기 식으로 계산하는 단계

$$S_{alt} = \frac{1}{2} [K_e(S_{p-sb-sl}) + K_n K_v S_{sb} + K_v S_{sl}]$$

를 포함하는 것을 특징으로 하는 단순 탄소성 해석 방법

(여기서,

S_n 은 일차 응력강도와 이차 응력강도의 합의 범위

S_m 은 설계응력강도

n 은 변형률 경화지수

m 은 재질별로 결정되는 상수

S_p 는 전체 응력강도 범위

$S_{p-sb-sl}$ 은 이차 굽힘응력과 이차 국부응력을 제외한 전체 응력강도 범위

S_{sb+sl} 은 이차 굽힘응력과 이차 국부 응력의 합의 응력강도 범위

S_{p-sl} 은 이차 국부 응력을 제외한 전체 응력강도 범위

S_{sb} 는 이차 굽힘 응력강도 범위

S_{sl} 은 이차 국부 응력강도 범위).

[청구항 2] 제 1 항에 있어서, 단순 탄소성 해석 방법은

(e) 교번 등가 변형률 ε_{alt} 를 하기 식으로 계산하는 단계

$$\varepsilon_{alt} = S_{alt} / E \text{ (여기서, E는 탄성계수)}$$

를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 단순 탄소성 해석 방법.

[청구항 3]

운전수준 D 지진 또는 설계기준초과 지진 하의, 배관의 변형률 기반 구조 건전성 평가를 위한 단순 탄소성 해석 방법에 있어서,

(a) 하기 식을 이용하여 페널티 팩터 K_e 를 계산하는 단계;

$$\begin{aligned} K_e &= 1.0 \text{ (for } S_n \leq 3S_m) \\ &= 1.0 + [(1-n)/n(m-1)](S_n/3S_m - 1) \text{ (for } 3S_m < S_n < 3mS_m) \\ &= 1/n \text{ (for } S_n \geq 3mS_m) \end{aligned}$$

$K_v = 1.4$ 와 K_e 중 작은 값

(c) 하기 식을 이용하여 페널티 팩터 K_n 을 계산하는 단계; 및;

$$K_n = 1.0 + \left[\left(\frac{S_p - S_{sl}}{S_n + S_{sb}} \right)^{\frac{1-n}{1+n}} - 1 \right] \left[\frac{S_p - S_{sl} - 3S_m}{S_p - S_{sl}} \right] \text{ and } K_n K_v \leq K_e$$

$$\begin{aligned} S_p &= K_1 C_1 \frac{P_D D_o}{2t} + K_2 C_2 \frac{D_o}{2I} (M_i + 2M_E + M_{AM}) \\ &\quad + K_3 C_3 \left[\frac{2F_{AM}}{A_M} + E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| \right] \\ &\quad + K_3 \frac{E\alpha |\Delta T_1|}{2(1-\nu)} + \frac{E\alpha |\Delta T_2|}{1-\nu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_n &= C_1 \frac{P_D D_o}{2t} + C_2 \frac{D_o}{2I} (M_i + 2M_E) \\ &\quad + C_3 \left[\frac{2F_{AM}}{A_M} + E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| \right] \end{aligned}$$

$$S_{sl} = \frac{E\alpha |\Delta T_2|}{1-\nu}$$

$$S_{sb} = K_2 C_2 \frac{D_o}{2I} M_{AM} + K_3 \frac{E\alpha |\Delta T_1|}{2(1-\nu)}$$

(d) 최종 교번응력강도 S_{alt} 를 하기 식으로 계산하는 단계

$$S_{alt} = \frac{1}{2} [K_e (S_{p-sb-sl}) + K_n K_v S_{sb} + K_v S_{sl}]$$

$$\begin{aligned} S_{p-sb-sl} &= K_1 C_1 \frac{P_D D_o}{2t} + K_2 C_2 \frac{D_o}{2I} (M_i + 2M_E) \\ &\quad + K_3 C_3 \left[\frac{2F_{AM}}{A_M} + E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| \right] \end{aligned}$$

를 포함하는 것을 특징으로 하는 단순 탄소성 해석 방법

(여기서,

K_1, K_2, K_3 는 국부 응력지수

C_1, C_2, C_3 는 이차 응력지수

P_D 는 내압

D_o 는 외경

t 는 두께

I 는 관성모멘트

M_i 는 하나의 운전하중과 다른 운전하중 사이에 발생하는 결과적인 모멘트 범위

M_E 는 지진 및 지진 외의 리버싱 타입(reversing type) 동적 사건 및 무게에 의한 관성하중에 기인하는 결과적인 모멘트 진폭

F_{AM} 은 지진 및 지진 외의 리버싱 타입 동적 사건에 기인하는 앵커 모션에 의한 길이방향 하중 진폭

M_{AM} 은 지진 및 지진 외의 리버싱 타입 동적 사건에 기인하는 앵커 모션에 의한 결과적인 모멘트 범위

A_M 은 배관 벽내 금속의 횡단면적

E_{ab} 는 상온에서 전체 구조 불연속 또는 재료 불연속의 양쪽 면 (a면과 b면)에서의 평균 탄성계수

α_a 는 전체 구조 불연속 또는 재료 불연속의 a면에서의 상온 열팽창계수

α_b 는 전체 구조 불연속 또는 재료 불연속의 b면에서의 상온 열팽창계수

T_a 는 전체 구조 불연속 또는 재료 불연속의 a면에서의 평균 온도 범위

T_b 는 전체 구조 불연속 또는 재료 불연속의 b면에서의 평균 온도 범위

α 는 상온에서의 평균 열팽창계수

ν 는 프와송 비

$|\Delta T_1|$ 는 모멘트를 발생시키는 등가 선형 온도 분포에서 배관 외표면 온도와 내표면 온도 사이의 절대 차이

$|\Delta T_2|$ 는 $|\Delta T_1|$ 를 포함시키지 않는 벽두께를 통해 비선형 열 구배 범위의 절대 값

$S_{p-sb-sl}$ 은 이차 굽힘응력과 이차 국부응력을 제외한 전체 응력강도 범위

S_{sb} 는 이차 굽힘 응력강도 범위

S_{sl} 은 이차 국부 응력강도 범위

S_n 은 일차 막/굽힘 응력과 이차 막응력과 열팽창 응력의 합의 응력강도의 범위

S_m 은 설계응력강도

n 은 변형률 경화지수

m은 재질별 결정되는 상수

S_p 는 전체 응력강도 범위).

[청구항 4]

제 3 항에 있어서, 단순 탄소성 해석 방법은

(e) 교번 등가 변형률 ε_{alt} 를 하기 식으로 계산하는 단계

$$\varepsilon_{alt} = S_{alt} / E$$

(여기서, E는 상온에서의 탄성계수)

를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 단순 탄소성 해석 방법.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/KR2020/004168

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 30/23(2020.01)i, G06F 17/10(2006.01)i, G01M 5/00(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06F 30/23; G01M 7/02; G01M 99/00; G06Q 10/04; G06F 17/10; G01M 5/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Korean utility models and applications for utility models: IPC as above

Japanese utility models and applications for utility models: IPC as above

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

eKOMPASS (KIPO internal) & Keywords: service level, earthquake, nuclear power plant, metal containment, core support structure, strain, safety class, simplified elastic-plastic, structural integrity, assessment

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	KIM, Jong-Sung. Proposal of Simplified Elastic-Plastic Analysis Procedure for Strain Determination of Nuclear Safety Class I Components under Seismic Loads. Department of Nuclear Engineering, Sejong University. 12 June 2019 See slides 7-10. * The above document is a document declaring exceptions to lack of novelty in an earlier application that serves as a basis for claiming priority of the present international application..	1-4
A	JP 2012-013521 A (TAKENAKA KOMUTEN CO., LTD.) 19 January 2012 See paragraphs [0063]-[0104]; claim 1; and figures 5-7.	1-4
A	이석철 등, 설계초과지진 하의 원전 배관계에 대한 변형률 기반 평가의 안전여유도 분석, 대한기계학회 재료 및 파괴부문 2017년도 춘계학술대회 논문집, pp. 323-324, April 2017 (LEE, Seok Hyun et al. Safety Margin Analysis of the Strain Based Assessment on the Nuclear Piping System BDBE. Proceedings of 2017 Spring Conference on Material and Fracture of KSME(The Korean Society of Mechanical Engineers).) See pages 323-324.	1-4
A	JP 2007-093619 A (TAKENAKA KOMUTEN CO., LTD.) 12 April 2007 See paragraphs [0069]-[0087]; and figure 5.	1-4
A	한민수 등, 지진하중을 받는 배관구조물의 탄소성해석 적용 사례, 대한기계학회 창립 70주년 기념 학술대회, pp. 3398-3401, November 2015 (HAN, Min Su et al. Application of Elastic-plastic Analysis on the Piping Structure under Seismic Loading. 70th Anniversary Conference of KSME(The Korean Society of Mechanical Engineers).) See pages 3398-3401.	1-4



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

23 JULY 2020 (23.07.2020)

Date of mailing of the international search report

23 JULY 2020 (23.07.2020)

Name and mailing address of the ISA/KR

Korean Intellectual Property Office
Government Complex Daejeon Building 4, 189, Cheongsu-ro, Seo-gu,
Daejeon, 35208, Republic of Korea

Facsimile No. +82-42-481-8578

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/KR2020/004168

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	권형도, 지진하중에 대한 배관계통의 변형률기반 허용기준 비교, 대한기계학회 신뢰성부문 2019년도 춘계학술대회 논문집, p. 42, February 2019 (KWEON, Hyeong Do, Comparison of Strain-Based Acceptance Criteria of Piping System for Seismic Loads. Proceedings of 2019 Spring Conference on Reliability Engineering of KSME(The Korean Society of Mechanical Engineers).) See page 42.	1-4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.

PCT/KR2020/004168

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member	Publication date
JP 2012-013521 A	19/01/2012	JP 5424999 B2	26/02/2014
JP 2007-093619 A	12/04/2007	JP 4533369 B2	01/09/2010

A. 발명이 속하는 기술분류(국제특허분류(IPC)) G06F 30/23(2020.01)i, G06F 17/10(2006.01)i, G01M 5/00(2006.01)i		
B. 조사된 분야 조사된 최소문헌(국제특허분류를 기재) G06F 30/23; G01M 7/02; G01M 99/00; G06Q 10/04; G06F 17/10; G01M 5/00 조사된 기술분야에 속하는 최소문헌 이외의 문헌 한국등록실용신안공보 및 한국공개실용신안공보: 조사된 최소문헌란에 기재된 IPC 일본등록실용신안공보 및 일본공개실용신안공보: 조사된 최소문헌란에 기재된 IPC 국제조사에 이용된 전산 데이터베이스(데이터베이스의 명칭 및 검색어(해당하는 경우)) eKOMPASS(특허청 내부 검색시스템) & 키워드: 운전수준(service level), 지진(earthquake), 원전(nuclear power plant), 금속 격납용기(metal containment), 노심지지구조물(core support structure), 변형률(strain), 안전등급(safety class), 단순 탄소성(simplified elastic-plastic), 구조 건전성(structural integrity), 평가(assessment)		
C. 관련 문헌		
카테고리*	인용문헌명 및 관련 구절(해당하는 경우)의 기재	관련 청구항
X	JONG-SUNG KIM, `Proposal of Simplified Elastic-Plastic Analysis Procedure for Strain Determination of Nuclear Safety Class I Components under Seismic Loads`, Department of Nuclear Engineering, Sejong University, 2019.06.12 슬라이드 7-10 * 위 문헌은 본 국제출원의 우선권주장의 기초가 되는 선출원에서 `공지에외주장`된 문헌임.	1-4
A	JP 2012-013521 A (TAKENAKA KOMUTEN CO., LTD.) 2012.01.19 단락 [0063]-[0104]; 청구항 1; 및 도면 5-7	1-4
A	이석현 등, `설계초과지진 하의 원전 배관계에 대한 변형률 기반 평가의 안전여유도 분석`, 대한기계학회 재료 및 파괴부문 2017년도 춘계학술대회 논문집, 페이지 323-324, 2017.04 페이지 323-324	1-4
A	JP 2007-093619 A (TAKENAKA KOMUTEN CO., LTD.) 2007.04.12 단락 [0069]-[0087]; 및 도면 5	1-4
A	한민수 등, `지진하중을 받는 배관구조물의 탄소성해석 적용 사례`, 대한기계학회 창립 70주년 기념 학술대회, 페이지 3398-3401, 2015.11 페이지 3398-3401	1-4
☒ 추가 문헌이 C(계속)에 기재되어 있습니다. ☒ 대응특허에 관한 별지를 참조하십시오.		
* 인용된 문헌의 특별 카테고리: “A” 특별히 관련이 없는 것으로 보이는 일반적인 기술수준을 정의한 문헌 “D” 본 국제출원에서 출원인이 인용한 문헌 “E” 국제출원일보다 빠른 출원일 또는 우선일을 가지나 국제출원일 이후에 공개된 선출원 또는 특허 문헌 “L” 우선권 주장에 의문을 제기하는 문헌 또는 다른 인용문헌의 공개일 또는 다른 특별한 이유(이유를 명시)를 밝히기 위하여 인용된 문헌 “O” 구두 개시, 사용, 전시 또는 기타 수단을 언급하고 있는 문헌 “P” 우선일 이후에 공개되었으나 국제출원일 이전에 공개된 문헌 “T” 국제출원일 또는 우선일 후에 공개된 문헌으로, 출원과 상충하지 않으며 발명의 기초가 되는 원리나 이론을 이해하기 위해 인용된 문헌 “X” 특별한 관련이 있는 문헌. 해당 문헌 하나만으로 청구된 발명의 신규성 또는 진보성이 없는 것으로 본다. “Y” 특별한 관련이 있는 문헌. 해당 문헌이 하나 이상의 다른 문헌과 조합하는 경우로 그 조합이 당업자에게 자명한 경우 청구된 발명은 진보성이 없는 것으로 본다. “&” 동일한 대응특허문헌에 속하는 문헌		
국제조사의 실제 완료일 2020년 07월 23일 (23.07.2020)		국제조사보고서 발송일 2020년 07월 23일 (23.07.2020)
ISA/KR의 명칭 및 우편주소  대한민국 특허청 (35208) 대전광역시 서구 청사로 189, 4동 (둔산동, 정부대전청사) 팩스 번호 +82-42-481-8578		심사관 양정록 전화번호 +82-42-481-5709 

C (계속). 관련 문헌		
카테고리*	인용문헌명 및 관련 구절(해당하는 경우)의 기재	관련 청구항
A	권형도, ‘지진하중에 대한 배관계통의 변형률기반 허용기준 비교’, 대한기계학회 신뢰성부문 2019년도 춘계학술대회 논문집, 페이지 42, 2019.02 페이지 42	1-4

국제출원번호
PCT/KR2020/004168

국제조사보고서에서 인용된 특허문헌	공개일	대응특허문헌	공개일
JP 2012-013521 A	2012/01/19	JP 5424999 B2	2014/02/26
JP 2007-093619 A	2007/04/12	JP 4533369 B2	2010/09/01