Technical Note https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2017.15.1.91

Evaluation of Canister Weld Flaw Depth for Concrete Storage Cask

콘크리트 저장용기의 캐니스터 용접부 결함깊이 평가

Tae-Chul Moon[1]*, Chun-Hyung Cho[1], Sung-Hun Jung[2], Young-Oh Lee[2], and In-su Jung[2]
[1]Korea Radioactive Waste Agency, 168, Gajung-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea
[2]Korea Nuclear Engineering & Service Corp, 341-4 Jangdae-dong, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

문태철[1]*, 조천형[1], 정성훈[2], 이영오[2], 정인수[2]
[1]한국원자력환경공단, 대전시 유성구 가정로 168
[2]㈜코네스코퍼레이션, 대전시 유성구 장대동 341-4

(Received November 8, 2016 / Revised November 29, 2016 / Approved December 8, 2016)

Domestically developed concrete storage casks include an internal canister to maintain the confinement integrity of radioactive materials. In this study, we analyzed the depth of flaws caused by loads that propagate canister weld cracks under normal, off-normal and accident conditions, and evaluated the maximum allowable weld flaw depth needed to secure the structural integrity of the canister weld and to reduce the welding time of the internal canister lid of the concrete storage cask. Structural analyses for normal, off-normal and accident conditions were performed using the general-purpose finite element analysis program ABAQUS; the allowable flaw depth was assessed according to ASME B&PV Code Section XI. Evaluation results revealed an allowable canister weld flaw depth of 18.75 mm for the concrete storage cask, which satisfies the critical flaw depth recommended in NUREG-1536.

Keywords: Concrete storage cask, Flaw depth, Stress ratio, Flow stress, Welding

*Corresponding Author.
Tae-Chul Moon, Korea Radioactive Waste Agency, E-mail: tcmoon@korad.or.kr, Tel: +82-42-601-5344

ORCID

Tae-Chul Moon	http://orcid.org/0000-0003-0739-691X	Chun-Hyung Cho	http://orcid.org/0000-0001-5258-6646
Sung-Hun Jung	http://orcid.org/0000-0002-3229-1215	Young-Oh Lee	http://orcid.org/0000-0002-5434-4509
In-su Jung	http://orcid.org/0000-0002-5002-1374		

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

국내에서 개발중인 콘크리트 저장용기는 방사성 물질의 격납 건전성을 유지하기 위하여 내부에 캐니스터를 포함하고 있다. 본 논문에서는 콘크리트 저장용기 내부 캐니스터의 뚜껑 용접시, 용접시간 저감과 이에 따른 캐니스터 용접부의 구조적 건전성을 확보하기 위한 방안으로, 정상, 비정상 및 사고조건에서 캐니스터 용접부 균열을 진전시키는 하중에 의해 발생되는 균열 깊이를 분석하여, 용접부의 최대 허용결함깊이를 평가하였다. 정상, 비정상 및 사고조건에서의 구조해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며, 허용결함깊이는 ASME B&PV Code Section XI에 따라 막응력과 조합하중에 대해 평가하였다. 평가결과 콘크리트 저장용기의 캐니스터 용접부의 허용결함깊이는 18.75 mm로 평가되었으며, 이는 NUREG-1536에서 권고하고 있는 임계결함깊이를 만족하고 있는 것으로 나타났다.

중심단어: 콘크리트 저장용기, 결함깊이, 응력비, 유동응력, 용접

1. 서론

원자력발전소에서 연소이력을 겪은 핵연료는 사용후핵연료로 분류된다. 이러한 사용후핵연료는 일정기간 동안 원자력 발전소 내의 습식 저장조에 임시 저장되며, 일정기간 동안 습식 냉각후 다양한 방식으로 소내외에서 저장된다. 국외에서 상용화된 건식 저장방식으로 콘크리트 저장용기가 있으며, 콘크리트 저장용기는 구조 및 방사선 차폐 건전성을 보장하는 콘크리트 기반의 용기본체와 방사성 물질의 격납 건전성을 유지하는 캐니스터로 구성된다.

캐니스터는 격납경계를 이루고 있으므로 ASME B&PV Code Section III Division 1 Subsection NB의 요건을 적용하였다. 따라서, 캐니스터 용접부는 완전용입용접(Full Penetration Weld)되어야 하며, 비파괴검사(Nondestructive Inspection, NDE)로 육안 비파괴검사(Visual Testing, VT), 방사선 비파괴검사(Radiographic Testing, RT) 또는 초음파 비파괴검사(Ultrasonic Testing, UT) 및 침투 비파괴검사(Liquid Penetrant Testing, PT)를 수행해야 한다[1]. 그러나, 캐니스터 뚜껑의 두께는 230 mm이고, 내부에 사용후핵연료가 장전되어있는 조건등을 고려할 때 여건상 완전용입용접을 할 수 없으므로, NUREG-1536에 따라 부분용입용접(Partial Penetration Weld)되며, 구조 및 운영특성상 초음파 비파괴검사(UT) 적용이 어려울 수 있다[2]. 이를 위해 ASME B&PV Code의 대안으로 NUREG-1536은 캐니스터 뚜껑과 쉘 용접의 비파괴검사에 대해 초음파 비파괴검사(UT) 또는 다층 침투 비파괴검사(Multi-Pass PT)를 권고하고 있다. 실제 미국 AZZ WSI사에서는 2014년도에 미국 Zion 원전의 제염조에서 Holtec MPC-18 용기의 캐니스터 뚜껑, 포트와 Closure ring 용접에 자동용접장치를 이용하여 수행하였으며, 여기에 2~3회에 걸쳐 육안 비파괴검사(VT)와 침투 비파괴검사(PT)를 수행한 적이 있다. 이외에도 캐니스터 뚜껑부, 포트와 Closure ring 용접에 다양한 캐니스터 타입의 용기에 대한 여러 사례가 있다.

제염조(Decontamination Pit)에서 모든 용접 층(Layer)에 대하여 침투 비파괴검사(PT)를 수행할 경우 많은 시간을 필요로 하게 되며, PT 검사자의 피폭선량도 비례하여 증가하게 된다. PT 검사자의 연 방사선 피폭선량이 규정되어 있고, PT 검사인원도 제한적이기 때문에 PT 검사자의 피폭선량과 캐니스터 뚜껑 용접부 전체 용접시간을 줄이고, 이에 따른 캐니스터 용접부의 구조적 건전성을 확보하기 위한 방안이 필요하다.

이에 본 논문에서는 콘크리트 저장용기의 정상, 비정상 및 사고조건에서 캐니스터 용접부 균열을 진전시키는 하중에 의해 발생되는 균열깊이를 평가하여 PT를 최소한으로 수행하기 위한 허용결함깊이를 평가하고자 한다.

2. 콘크리트 저장용기 개요

콘크리트 용기본체는 사용후핵연료가 장전된 캐니스터를 저장하기 위한 원통형 쉘(Shell)구조물로써 내외부의 탄소강 쉘 사이에 차폐기능 역할을 하는 콘크리트가 채워지며, 용기본체의 상하부에는 사용후핵연료로부터 발생되는 붕괴열을 자연대류에 의한 공기순환방식으로 제거하기 위하여

공기 흡배기구가 설치된다. 사용후핵연료를 장전하기 위한 캐니스터는 용접된 원통형 쉘 구조물로써 콘크리트 저장용기에 대한 격납경계(Confinement Boundary)를 제공하며, 용접부 두께는 25~30 mm이다. 캐니스터는 사용후핵연료 집합체 21다발을 장전하기 위한 21개의 정방형 셀(Cell)을 갖는 바스켓집합체(Basket Assembly) 구조물이 설치되고, 캐니스터 내부에 헬륨을 충진하여 장기간 저장 시 사용후핵연료의 건전성이 유지되도록 한다.

콘크리트 저장용기의 콘크리트 용기본체는 캐니스터를 외부환경으로부터 보호하여 사용후핵연료의 건전성을 유지할 수 있도록 하고, 캐니스터는 사용후핵연료를 장전하고 있으며 격납경계를 유지하고 있다. 콘크리트 저장용기의 전체 중량은 약 145 ton이고, 직경은 3,266 mm, 높이는 6,030 mm이다. 캐니스터를 포함한 내부 구성요소의 전체 중량은 약 33.7 ton이고, 직경은 1,686 mm, 높이는 4,580 mm이다. 콘크리트 저장용기는 다음과 같은 부품으로 구성되며, 세부명칭은 Fig. 1과 같다.

- 용기본체 : 금속 원통형 쉘 내부에 콘크리트가 채워진 용기본체와 용기뚜껑
- 캐니스터 : 격납경계를 유지하고 있는 원통형 용기본체와 용기뚜껑
- 캐니스터 내부 구성요소 : 바스켓 집합체, 디스크, 지지봉 및 중성자흡수체

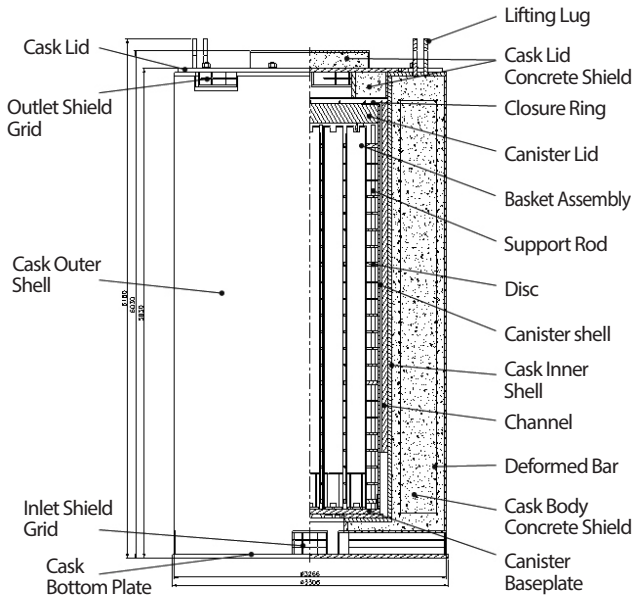

Fig. 1. Cross-section of concrete storage cask general arrangement.

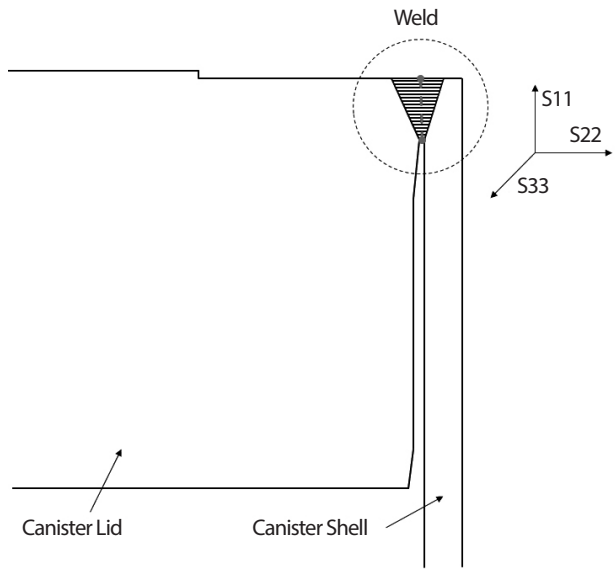

Fig. 2. Location of the section used to obtain linearized stress.

3. 결함깊이 평가 방법

콘크리트 저장용기의 캐니스터 용접부 결함깊이는 상용 유한요소 해석 프로그램을 이용한 구조해석과 결함깊이 계산에 의한 평가를 수행하였다. 캐니스터 용접부에서 발생하는 응력은 Fig. 2의 측정 위치에서 평가하였으며, 용접부에 발생하는 응력 중 균열에 의해 발생하는 결함은 캐니스터 본체의 휨변형에 의해 반경방향(Fig. 2의 S22 방향) 막응력(P_m) 및 조합하중(P_m+P_b)이 가장 크게 발생하여 결함을 지배적으로 진전시키게 된다. 구조해석에서 구한 용접부의 응력을 기준으로 ASME B&PV Code Section XI, Division 1, Appendix C에 따라 결함깊이 계산을 수행하였으며, 이를 통해 캐니스터 용접부의 허용결함깊이를 평가하였다[3].

4. 콘크리트 저장용기 구조해석

콘크리트 저장용기의 캐니스터 용접부에서 발생하는 응력을 평가하기 위해 범용 유한요소 해석프로그램인

Table 1. Load combinations

Load Combination	Dead Load	Live Load	Handling Load	Pressure	Thermal	Wind Load	Seismic /Flood	Cask Drop /Tip-over
Normal Condition								
1	D	L		P	T			
2	D		H	P	T			
Off-Normal Condition								
3	D	L		P	To	W		
4	D		H	Po	To			
Accident Condition								
5	D		H	Po	Ta			
6	D	L		Po	T		E	
7	D	L		Po	T			Ad
8	D	L		Po	T			At
9	D		H	Pa	To			
10	D	L		Po	T		F	

D	: Dead Load	To	: Off-normal Thermal
L	: Live Load	Ta	: Accident Thermal
H	: Handling Load	W	: Wind Load
P	: Normal Pressure	E	: Seismic
Po	: Off-Normal Pressure	F	: Flood
Pa	: Accident Pressure	Ad	: Cask Drop
T	: Normal Thermal	At	: Tip-over

ABAQUS 6.10을 사용하여 구조해석을 수행하였다[4]. 구조해석은 정상, 비정상 및 사고조건에서 각 하중에 대하여 하중조합을 적용함으로써, 용접부의 결함깊이를 평가하기 위한 최대응력을 구하였다.

4.1 하중조합

콘크리트 저장용기의 캐니스터 용접부에 대한 응력평가를 수행하기 위해 각 하중에 대한 구조해석을 수행하였다. 콘크리트 저장용기에 대한 하중조합은 NUREG-1536, ANSI/ANS 57.9 및 ACI 349 기준에 따라 설정하였다[2, 5, 6]. 하중조합은 콘크리트 저장용기에 대한 정상, 비정상 및 사고조건으로 구분하였으며 Table 1과 같다.

4.2 재료의 역학적 특성

콘크리트 저장용기 본체는 콘크리트와 탄소강으로 구성되며, 용기본체 이외의 부재는 스테인레스강으로 제작된다. 캐니스터는 저장조건에서 외부 환경에 의한 염해 저항성을 증가시키기 위하여 SA-240 316L 재질을 사용하였으며, 내부구성요소는 SA-240(479) 304 재질을 사용하였다. 콘크리트 저장용기의 구조해석에 사용한 재료의 역학적 특성은 ASME B&PV Code Section II, Part A, D를 참조하여 적용하였으며, Table 2에 요약하여 나타내었다[7, 8].

Table 2. Material properties of concrete storage cask

Components		Materials	Elastic Modulus (MPa)	Density ($kg \cdot m^{-3}$)	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Poisson's Ratio
Concrete Cask	Concrete Shield	Concrete	28,577	2,500	30	-	0.17
	Cask Body	SA-36	202,000	7,750	250	400	0.3
	Cask Lid	SA-36	202,000	7,750	250	400	0.3
	Side Channel	SA-36	202,000	7,750	250	400	0.3
	Bottom Channel	SA-36	202,000	7,750	250	400	0.3
	Cask Lid bolt	SA-540 B23	191,000	7,750	965	1070	0.3
Canister Assembly	Lifting Lug	SA-537 CL2	202,000	7,750	415	550	0.3
	Canister Body	SA-240 316L	195,000	8,030	170	485	0.3
	Canister Lid	SA-240 316L	195,000	8,030	170	485	0.3
	Basket	SA-240 304	195,000	8,030	205	515	0.3
	Disc	SA-240 304	195,000	8,030	205	515	0.3
	Support Rod	SA-479 304	195,000	8,030	205	515	0.3
	Fuel Support	SA-240 304	195,000	8,030	205	515	0.3

4.3 구조해석 모델

콘크리트 저장용기 구조해석에 사용한 유한요소 해석모델은 ABAQUS 유한요소 해석프로그램을 이용하여 구성하였으며, 하나의 구조모델을 모델링 한 후 초기조건과 경계조건을 달리 적용하여 모든 구조해석에 사용하였다. 해석모델은 용기의 대칭성을 고려하여 1/2 모델(용기의 180° 부분만 나타냄)로 구성하였다. 해석모델은 809,046개의 절점(Node)과 556,905개의 솔리드요소(Solid Element)로 구성하였다. 해석에 사용한 솔리드요소는 ABAQUS에서 제공하는 사각형 8절점 요소(C3D8R)를 사용하였다. 콘크리트 저장용기는 전체모델에 접촉하는 조건으로 General Contact 조건을

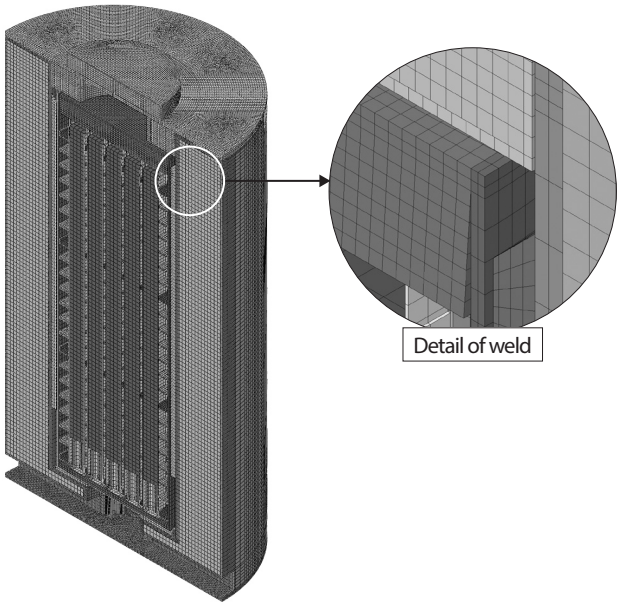

Fig. 3. 1/2 Analysis model of concrete storage cask.

사용하였고, 단위는 mm, ton, sec, ℃를 사용하였다. 해석모델의 전체 형상 및 용접부 상세는 Fig. 3과 같다. 모든 구성요소들은 중심에 위치하는 것으로 가정하였다. 용기뚜껑은 뚜껑축이 용기의 축에 일치하도록 위치시켰고, 뚜껑볼트는 정확히 볼트구멍의 중심에 위치시켰다.

4.4 하중 및 경계조건

콘크리트 저장용기 구조해석을 위한 하중조건은 NUREG-1536에 따라 적용하였으며, 각 조건에 적용한 하중은 '콘크리트 저장용기 특정기술주제보고서' 에 상세히 기술되어있다[9]. 정상 및 비정상조건의 정적해석은 해당 조건에서 요구되는 하중을 용기에 가하였으며, 1/2 대칭 경계조건을 용기의 단면에 적용하였다. 또한 용기본체의 일부를 완전 고정하여 해석을 수행하였다.

사고조건 중 낙하해석 시 발생하는 낙하충격은 콘크리트 저장용기가 콘크리트 패드에 충돌할 때 발생하게 된다. 낙하높이에 따른 변수해석으로부터 최대 인양높이를 산정하였으며 60 cm로 평가되었다. 해석에서 실제 낙하높이 60 cm와 동일하게 콘크리트 저장용기와 콘크리트 패드 사이의 거리를 적용하여 자유낙하 해석을 수행할 경우 해석 시간적인 측면에서 효율적이지 못하게 된다. 따라서 본 해석에서는 용기의 에너지 보존법칙을 이용하여 60 cm에서 낙하한 것과 동일한 효과를 주기 위해 3,431 mm · s^{-1}의 속도를 콘크리트 저장용기가 콘크리트 패드와 충격이 발생하는 시점의 초기속도로 적용하였다. 전체모델의 1/2 대칭 경계조건을 단면에 적용하였으며, 콘크리트 패드는 충격 시 변위와 자유도에 대한 변화가 없도록 완전 고정하였고, 캐니스터 및 내부구성요소는 충격면 방향으로 이동하여 접촉시켰다. 전도해석은 에너지 보존법칙을 이용하여 충격시점의 각속도인 1,488 rad · sec^{-1}를 콘크리트 패드에 충격이 발생하는 시점의 초기각속도로 적용하였다.

4.5 구조해석

콘크리트 저장용기의 캐니스터 용접부 허용결함깊이를 평가하기 위하여 Table 1의 각 하중조건에서 구조해석을 수행하였다. 구조해석 결과는 Fig. 2의 응력 측정위치에서 각 방향에 대한 응력성분 중 반경방향의 막응력 및 조합하중을 평가하였다. 각 하중에 대하여 하중조합을 수행한 해석결과는 Table 3과 같다. 해석결과 비정상조건의 경우 비정상 내부압력이 고려된 LC 3에서, 사고조건은 캐니스터 상부에 충격이 직접적으로 발생하는 전도조건에서 가장 큰 응력이 발생하였다. 각 조건에서의 최대 응력은 결함깊이 평가를 위한 초기 응력으로 적용하였다.

5. 허용결함깊이 평가

콘크리트 저장용기의 캐니스터 용접부 결함깊이는 ASME B&PV Code Section XI, Division 1, Appendix C에 따라 평가하였으며, 다음과 같은 가정사항을 적용하였다.

- 캐니스터 뚜껑과 쉘의 부분용접부(Partial Weld)에 360° 방향의 결함 발생
- 캐니스터 뚜껑 용접방법은 GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)

결함깊이를 평가하기 위하여 ASME B&PV Code Section XI, Division 1, Appendix C에서는 모재의 종류에 따라

Table 3. Results of structural analysis

Condition	Load Combination	Stress	S22 (MPa)
Normal	1	P_m	0.06
		P_m+P_b	0.22
	2	P_m	0.57
		P_m+P_b	2.01
Off-normal	3	P_m	0.60
		P_m+P_b	2.05
	4	P_m	0.09
		P_m+P_b	0.22
Accident	5	P_m	0.60
		P_m+P_b	2.05
	6	P_m	0.52
		P_m+P_b	11.84
	7	P_m	-2.26
		P_m+P_b	9.94
	8	P_m	24.95
		P_m+P_b	30.73
	9	P_m	0.97
		P_m+P_b	2.51
	10	P_m	-0.55
		P_m+P_b	-0.96

평가방법을 구분하고 있으며, 캐니스터의 경우 오스테나이트계 재질이므로 Figure C-4210-1에 따라 해석방법을 선정하였다[3]. 콘크리트 저장용기의 캐니스터는 단련제품(Wrought product)이고, 용접재료에서 결함이 발생하며, 플럭스를 사용하지 않는 용접부이므로 C-5000에 따라 평가를 수행하여야 한다. C-5000은 극한하중 기준의 완전소성 파괴 결함평가를 사용한 결함깊이 평가방법으로, 조합하중에 의한 결함깊이 평가는 운전한계에 따라 C-5310-1~4를 적용하였으며, 1차 막응력에 의한 결함깊이 평가는 C-5310-5를 적용하였다. 막응력과 조합하중에 의한 결함깊이 평가 시

Table 4. Flow stress

Condition	Thermal (℃)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	σ_f (MPa)
Normal	200	121.0	429.0	275.0
Off-normal	200	121.0	429.0	275.0
Accident	300	109.0	426.0	267.5

응력비와 결함길이의 관둘레에 대한 비가 필요하며 다음과 같이 계산하였다.

5.1 조합하중에 의한 결함깊이 평가

5.1.1 응력비

ASME Code C-5310-1~4를 사용한 조합하중에 의한 결함깊이 평가 시 응력비는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{Stress Ratio} = \frac{\sigma_m + \sigma_b}{\sigma_f} \quad (1)$$

여기서, σ_m : 1차 막응력 (운전한계 A, B : $\sigma_m \leq 0.2\sigma_f$ 일 때 유효, 운전한계 C : $\sigma_m \leq 0.3\sigma_f$ 일 때 유효, 운전한계 D : $\sigma_m \leq 0.4\sigma_f$ 일 때 유효)

σ_b : 1차 굽힘응력

σ_f : 유동응력(Flow stress)으로 ASME B&PV Section XI, Division 1, Appendix C-8000에 따라 적용

5.1.2 유동응력

유동응력은 운전온도에서 측정된 항복강도 및 극한 인장강도로 계산되어지며 오스테나이트(Austenite)계 재료의 경우 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\sigma_f = \frac{S_y + S_u}{2} \quad (2)$$

여기서, S_y : 항복강도(Yield strength)

S_u : 인장강도(Tensile strength)

콘크리트 저장용기의 캐니스터의 각 조건에서 온도와 해당온도에서의 응력 및 유동응력은 Table 4와 같다.

5.1.3 결함길이의 관둘레에 대한 비

콘크리트 저장용기의 캐니스터 용접부의 결함은 '5. 허용결함깊이 평가' 에서 쉘의 부분용접부에 360° 방향의 원주방향 결함이 발생하는 것으로 가정하였으므로 $l_f/\pi D=1$ 이다.

5.2 막응력에 의한 결함깊이 평가

5.2.1 응력비

ASME C-5310-5를 사용한 막응력에 의한 결함깊이 평가시 응력비는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{Stress Ratio} = \frac{SF_m\sigma_m}{\sigma_f} \quad (3)$$

여기서, SF_m : 원주방향결함의 1차 막응력에 대한 안전계수로써, ASME B&PV Section XI, Division 1, Appendix C-2621에 따라 적용(Table 5)

σ_m : 1차 막응력

σ_f : 유동응력(Flow stress)으로 ASME B&PV Section XI, Division 1, Appendix C-8000에 따라 적용

Table 5. Safety factor for circumferential flaws (membrane stress)

Service Level	A	B	C	D
SF_m	2.7	2.4	1.8	1.3

5.2.2 유동응력

막응력에 의한 결함깊이 평가에 사용한 유동응력은 '5.1.2 유동응력' 에서 평가한 결과와 같다.

5.2.3 결함길이의 관둘레에 대한 비

콘크리트 저장용기의 캐니스터 용접부의 결함은 '5. 허용결함깊이 평가' 에서 쉘의 부분용접부에 360° 방향의 원주이다.

5.3 결함깊이 해석결과

ASME B&PV Code Section XI, Division 1, Appendix C, C-5000에 따라 막응력과 조합하중에 대하여 결함깊이를 평가하였으며, 평가결과는 Table 6과 같다. 해석결과 모든 하중조건에서 표면결함 및 내부결함의 허용결함깊이는 18.75 mm로 평가되었다. 또한 NUREG-1536에서 권고하고 있는 대부분의 구조물 뚜껑 용접부에서의 임계결함깊이 9.5 mm를 만족하고 있다.

6. 결론

본 연구에서는 ASME B&PV Code Section XI에 따라 콘크리트 저장용기의 캐니스터 뚜껑 용접부의 허용결함깊이를 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

Table 6. Assessment results of canister weld flaw depth

	Conditions	Load Combination	S22 (MPa)	SF_m	Stress Ratio	a/t	Subsurface Flaws		Surface Flaws	
							Weld Thickness 2t (mm)	Flaw Depth 2a (mm)	Weld Thickness t (mm)	Flaw Depth a (mm)
Combined Load	Normal	D+H+P	0.57	2.7	0.0056	0.75	25.0	18.75	25.0	18.75
	Off-normal	D+H+Po	0.60	2.4	0.0052	0.75	25.0	18.75	25.0	18.75
	Accident	D+L+Po+At	24.95	1.3	0.1213	0.75	25.0	18.75	25.0	18.75
Membrane	Normal	D+H+P	2.01	-	0.0073	0.75	25.0	18.75	25.0	18.75
	Off-normal	D+H+Po	2.05	-	0.0074	0.75	25.0	18.75	25.0	18.75
	Accident	D+L+Po+At	30.73	-	0.1148	0.75	25.0	18.75	25.0	18.75

해석결과 콘크리트 저장용기의 캐니스터 용접부에서의 허용결함깊이는 18.75 mm로 평가되었다. 평가된 허용결함깊이는 NUREG-1536에서 권고하고 있는 임계결함깊이를 만족하고 있는 것으로 나타나 캐니스터 용접부 허용결함깊이를 9.5 mm로 적용 가능하다. 허용결함깊이를 고려하지 않는 조건에서 캐니스터 용접부 30 mm 용접 시 매 층(Layer)마다 용접을 수행하여야 하며, 1회(pass) 둘레 용접량을 3 mm로 가정하였을 때 최소 10회의 침투 비파괴검사(PT)를 수행하여야 한다. 그러나, 캐니스터 용접부의 허용결함깊이를 9.5 mm로 적용하고 첫 번째 층 용접두께를 1 mm로 가정하였을 때, 침투 비파괴검사(PT)를 총 5회 수행할 수 있으며, 18.75 mm를 허용결함깊이로 할 경우 ISG-4에서 정하고 있는 최소 3회의 침투 비파괴검사(PT)를 수행할 수 있다[10].

따라서 본 연구에서 수행한 허용결함깊이 평가를 통해 구조적 건전성을 유지하면서 침투 비파괴검사(PT) 횟수 감소에 따른 작업시간 및 작업자 피폭선량을 줄일 수 있다. 또한, 다른 용기 뚜껑 용접부 허용결함깊이 평가를 통해 기초자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No.201171020001A).

REFERENCES

[1] American Society of Mechanical Engineers (ASME) Boiler and Pressure Vessel Code Section III, Division 1, Subsection NB - Class 1 components (2010).

[2] NUREG-1536, Revision 1, Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems at a General License Facility (2010).

[3] American Society of Mechanical Engineers (ASME) Boiler and Pressure Vessel Code Section XI - Rules for In-service Inspection of Nuclear Power Plant Components, Division 1, Appendix C (2010).

[4] DASSAULT SIMULIA, ABAQUS 6.10 Documentation (2010).

[5] ANSI/ANS 57.9, American National Standard Design Criteria for an Independent Spent Fuel Storage Installation - Dry Storage Type (1984).

[6] American Concrete Institute (ACI) 349R-01, Code Requirements for Nuclear Safety related Concrete Structures (2001).

[7] American Society of Mechanical Engineers (ASME) Boiler and Pressure Vessel Code Section II, Part A – Ferrous Material Specifications (2010).

[8] American Society of Mechanical Engineers (ASME) Boiler and Pressure Vessel Code Section II, Part D – Properties (Customary) (2010).

[9] Korea Radioactive Waste Agency, Concrete Storage Cask Technical Report, 14220-P1-N-TR-37 (2014).

[10] Interim Stall Guidance (ISG) -4, Revision 1, Cask Closure Weld Inspections (2014).