비부착텐던 PSC 격납건물에 대한 구조건전성시험 및 수치해석 II

노 상 훈^{1*} · 정 래 영² · 이 병 수¹ · 임 상 준¹

¹한국수력원자력(주) 중앙연구원, ²한국원자력안전기술원 구조부지평가실

The Structural Integrity Test for a PSC Containment with Unbonded Tendons and Numerical Analysis II

Sanghoon Noh^{1*}, Raeyoung Jung², Byungsoo Lee¹ and Sang-Jun Lim¹

¹Central Research Institute, Korea Hydro and Nuclear Power Co. LTD, Daejeon, 34101, Korea

²Structural Systems and Site Evaluation Dept., Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon, 34142, Korea

Abstract

A reactor containment acts as a final barrier to prevent leakage of radioactive material due to the possible reactor accidents into external environment. Because of the functional importance of the containment building, the SIT(Structural Integrity Test) for containments shall be performed to evaluate the structural acceptability and demonstrate the quality of construction. In this paper, numerical analyses are presented, which simulate the results obtained from the SIT for a prestressed concrete(PSC) structure. A sophisticated structural analysis model is developed to simulate the structural behavior during the SIT properly based on various preliminary analysis results considering contact condition among structural elements. From the comparison of the analysis and test results based on the acceptance criteria of ASME CC-6000, it can be concluded that the construction quality of the containment has been well maintained and the acceptable performance of new design features has been verified.

Keywords : tendon, containment structure, prestressed concrete, structural integrity, internal pressure

1. 서 론

원자로 격납건물의 구조건전성을 확인하기 위해 격납건물 시공 후 실증 시험을 수행하는데, 이를 구조건전성시험(structural integrity test, SIT)이라 한다(ACI-ASME joint technical committee, 1998).

SIT에 대한 보다 상세한 내용은 2편으로 구성된 본 논문의 I편(Noh *et al.*, 2015)을 참조바라며, 본 II편에서는 SIT 수행 시 예측된 변위와 이를 예측하고 평가하기 위한 해석모델 구성 및 해석결과에 대한 과정 및 결과를 중점으로 기술하였다.

SIT 수행 당시, SIT 거동을 예측하기 위해 개발된 해석모델(KHNP TR, 2013)에 따라 산정된 변위와 예측된 변위를 비교한 결과, 일부 위치에서 반경 혹은 직경 방향 변위

의 경향이 해석과 계측에 있어 상이하게 나타났다. 특히, 텐던(tendon)을 정착하기 위하여 단면이 크게 보강된 부벽(buttrass)의 강성 증가 효과가 해석결과 대비 실제 계측에서는 작은 것으로 분석되었다.

이러한 해석모델의 한계를 개선하기 위한 연구를 통해 해석모델과 실제 구조물의 주요 차이점을 분석하여 개선하고자 하였다. 해당 연구의 결과는 2편의 논문으로 정리되었으며, I편(Noh *et al.*, 2015)에서는 SIT 계측결과와 초기 해석모델에 따른 해석결과(KHNP TR, 2013) 비교 분석 및 초기 해석모델 개선 방안을 파악하기 위한 예비 해석결과 등을 제시하였다. 본 II편에서는 1편의 예비 해석결과 및 개선 방안을 토대로 SIT 예측을 위한 해석 모델링 구성 시 보다 상세하고 신중하게 고려해야 할 인자들을 최대한 해석모델에 반영하여 해석을 수행한 결과를 제시하고 있다. 해석에 따른

* Corresponding author:

Tel: +82-42-870-5843; E-mail: sanghoon.noh@khnp.co.kr

Received July 7 2015; Revised September 10 2015;

Accepted September 11 2015

©2015 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

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.

변위는 실제 SIT 시험을 통해 계측된 결과와 상당히 근접한 결과를 도출함을 확인하였다

2. 본 론

이 장에서는 SIT 거동을 모사하기 위한 수치해석 모델의 모델링 과정을 상세히 기술하고, SIT 시 계측된 변위 결과와 비교 검토하였다.

2.1 해석 모델링 구성 방안

I편에서 분석된 해석 모델링 시의 주요 고려사항을 반영하기 위해 Table 1에서와 같이 초기 해석모델((KHNP TR, 2013)을 개선하고자 하였다.

수치해석에 사용된 프로그램은 범용코드인 ABAQUS 6.10이며, 본 논문에서는 요소의 속성을 기술함에 있어 ABAQUS 상에서의 해석요소 명칭을 병기하였다.

Table 1의 각 항목(Item)은 I편 본문의 2.4.1 (A)절 부터 (F)절까지의 고려사항에 대응되는 사항이다.

Table 1의 (A)항과 관련하여, Fig. 11에서와 같이 부벽과 돔 부위의 상호간 절점이 일치하지 않고, 접촉요소간의 접촉면 벡터방향이 상이함에 따라 접합면에 발생하는 구속을 모델 개선을 통하여 제거하였다.

(B)항과 관련하여, Fig. 12(b)에서와 같이 콘크리트 내면 절점을 그대로 사용하여 라이너플레이트 요소를 구성하였다.

Table 1 Improvable Items from the initial analysis model

Item	Description	Consideration or Not
(A)	Remove or minimize contact definitions among concrete elements with different surface vectors by improving node-connectivities	○
(B)	Replace the contact between concrete and liner with composing liner elements with concrete nodes at the inner surface on concrete	○
(C)	Embed rebar elements in the concrete elements to connect nodes of concrete elements and rebar elements.	Keep (same as the initial model)
(D)	Consider whether the contact tendon and concrete are proper or not	△ (partially considered)
(E)	Consider Uncertainty and Randomness of material properties	X
(F)	Consider loss of stiffness due to ducts and other local effects	△ (partially considered)

Fig. 1 Concrete element mesh models comparison

Fig. 2 Concrete and liner models in improved model

(C)항과 관련하여, 철근을 트러스 요소를 이용한 초기 해석모델의 방법을 그대로 적용하여 Fig. 4(b)에서의 철근 모델과 유사 수준의 요소 크기 및 간격을 고려하여 해석을 수행하였다.

(D)항과 관련하여, 텐던과 덕트의 밀착되지 않는 부분에 대한 고려를 반영하였다. 텐던이 덕트와 밀착되지 않는 부분을 상세히 반영하기 위해서는, 개별 텐던과 덕트의 시공위치를 모두 고려하여야 하나 대형 개구부 부근에서 덕트의 설치가 매우 복잡하므로 이를 모두 고려하는 것은 현실적으로 쉽지 않다.

개선 모델에서는 텐던과 덕트의 밀착이 명확하게 구현되지 않는 부벽의 부위에서의 효과만을 반영하였다.

즉, 원환 방향의 텐던이 부벽에 정착하기 위해 정착부에 이르는 직선구간(tangent line)의 텐던이 덕트와 밀착되지

않음을 반영하고자 하였다. 그 외에도 장비반입구 및 작업자 출입구 등의 대형 관통부 곡률 변화 부위(변곡점) 등에서 텐던이 덕트와 밀착되지 않을 것으로 판단되나, 그 정도가 명확하지 않아 본 연구에서는 해당 부위의 영향은 우선 배제하였다.

(E)항과 관련하여, 구조 재료적 불확실성이나 임의성 등은 파악하기 쉽지가 않다. 이에 따라 개선 모델 시에도 별도로 고려하지 않았다. 다만, 해석 결과 분석 과정에서 재료적 불확실성과 임의성 등이 있음을 염두에 두고 분석하고자 하였다.

(F)항과 관련하여, 2.4.2절에서 논의한 바와 같이 덕트의 무강성 영향은 위치별로 변위에 미치는 효과가 차이가 있다. 특히, 휨 거동이 발현되는 부분에서 변위 증가에 미치는 효과는 크다. 이를 고려하기 위해서 I편의 3차원 예비 해석에서 적용한 방법론을 동일하게 적용하였다.

Fig. 3 Concrete and duct models for wall and buttress

즉, 벽체 부위의 덕트는 Fig. 3(a)의 벽체 및 부벽 모델 구성 시에 Fig. 3(b)와 같이 별도로 설정되었다. 콘크리트 요소와 덕트 요소는 절점들이 상호간에 연속적으로 연결되도록 모델링하였다.

덕트 요소는 등가의 직육면체 요소로 고려하여, 감차 적분 고체요소(8절점 육면체, C3D8R)를 사용하여 모델링하였다. 보다 상세한 모델링 방법론은 I편의 3차원 예비 해석 과정을 참고할 수 있다.

Fig. 3(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 부벽에서나 일반 벽체 단면의 덕트는 실제 시공 위치에 상응하도록 구성하여 배치하였다. 그러나 장비반입구나 작업자 출입구 보강 부위를 지나는 덕트의 실제 기하학적 배치는 복잡하며, 이러한 배치를 해석에 그대로 일일이 고려하는 것은 상당한 어려움을 수

반한다. 이러한 난관을 고려하여, 본 연구에서는 (F)항의 효과를 Fig. 3(b)와 같이 부벽 및 일반 벽체 부위에서만 반영하고, 기하학적 형상이 복잡한 구역에 대해서는 후속 연구를 통해 그 방안을 찾을 예정이다. 다만, 본 연구의 해석결과 분석 과정에서 기하학적 형상이 복잡한 구역에 대한 덕트의 무강성 효과를 정성적으로 고찰하고자 하였다.

2.2 해석 모델의 구성

해석 대상 원자로건물의 주요 형상 치수 및 재료 제원은 Table 2와 같다.

Table 2 Geometric dimensions and material properties

Parameter			Designed Value	
Inner diameter(radius) [ft]			150(75)	
Wall/Dome thickness [ft]			4 /3.5	
Design pressure(psig)			60	
C o n c r e t e	Compressive strength, MPa(psi)	Wall and Dome	41.37(6,000)	
		Foundation	27.58(4,000)	
	Elastic modulus, GPa(ksi)	Wall and Dome	30.44(4,415)	
		Foundation	24.86(3,605)	
	Poisson ratio		0.17	
	Shrinkage strain, (×10 ⁻⁶)		120	
R e b a r	L i n e r	Yield strength, Mpa(psi)	Rebar	413.6(60,000)
			Liner_wall	206.8(30,000)
			Liner_sleeve	262.0(38,000)
	Elastic Modulus, GPa(ksi)		200.0(29,000)	
	Poisson ratio		0.3	
T e n d o n	Yield strength, MPa(psi)		1,675(243,000)	
	Elastic Limit, MPa(psi)		1,303(189,000)	
	Elastic Modulus, GPa(ksi)		193.0(28,000)	
	Poisson ratio		0.3	

콘크리트 요소는 크게 돔 부위, 일반 벽체 부위, 부벽 부위, 장비반입구 등의 관통부 부위의 4가지로 구분할 수 있다.

Fig. 4에서와 같이 돔 부위는 콘크리트 벽체 두께방향으로 4개 층, 부벽 부위는 3개 층, 원환방향 2.2° 간격을 기준으로 요소(mesh)를 나누어, 부벽을 포함하여 총 27,466개의 감차 적분 고체요소(8절점 육면체, C3D8R)로 구성하였으며, 덕트의 무강성 효과는 별도로 고려하지 않았다.

일반 벽체와 부벽 부위는 수직 및 수평 텐던의 덕트 무강성 효과를 고려하기 위해, 돔 부위에 비해 요소 구성을 상당히 세분화하였다. 즉 일반 벽체 부위는 두께방향으로 5~9개 층, 원환방향으로 0.9°간격을 기준으로 요소를 세분화하였으며, 수직 및 수평 덕트가 지나는 위치는 덕트의 무강성 효과를 반영하여, 총 588,679개의 감차 적분 고체요소(8절점 육면체, C3D8R)로 구성하였다.

Fig. 4 Concrete element meshes

부벽 부위의 수평 텐던의 덕트는 높이 90.5ft(27.58m)에서 254.5ft(77.57m)에 이르기까지 Fig. 5에서와 같이 1ft(0.3m)간격으로 상이하게 교차 배치되며, 3ft(0.9m)간격으로 배치 형태가 반복된다.

Fig. 5 Arrangement of horizontal tendons at buttress

이러한 기하학적 배치를 해석요소(mesh) 구성 시에 반영하기 위해 부벽에서의 콘크리트 요소의 수평 단면을 Fig. 6에서와 같이 세분화하였다. 해석요소 한변 길이 0.5ft(0.15m) 크

기를 기준으로 기하학적 형태가 복잡한 구역은 보다 작은 크기로 요소를 구성하였다. 이에 따라 두께방향으로 부벽 6개층 및 벽체 8개층 이상, 원환방향으로 0.5°간격 내외, 높이 방향 0.5ft(0.15m) 간격 기준으로 요소를 세분화하였으며, 수직 및 수평 덕트가 지나는 위치는 덕트의 무강성 효과를 반영하여, 3개의 부벽 부위에 대해 총 825,443개의 8절점 육면체 혹은 6절점 오면체 요소(C3D8R 혹은 C3D6)로 구성하였다.

Fig. 6 Concrete meshes at buttress ; Horizontal section

전반적으로 8절점 감차적분 고체요소(C3D8R)로 구성하고자 하였으나, 기하학적 복잡함에 따라 일부 불가피한 구역에는 6절점 삼각기둥 요소(C3D6)로 구성하였다.

장비반입구 및 작업자 출입구 등의 관통부 부위는 관통부를 우회하는 텐던 및 덕트가 밀집되고, 그 위치도 우회되는 등 덕트의 무강성 효과를 고려하기 위한 해석요소 구성이 상당히 어렵다. 이에 따라 관통부 부위의 덕트의 무강성 효과는 본 논문에서는 반영하지 못하였으며, 후속 연구를 통해 보완해 갈 예정이다.

Fig. 7 Concrete meshes near penetrations

Fig. 7에서와 같이 관통부 부위는 콘크리트 벽체 두께방향으로 4개 층, 보강 부위방향으로 4개 층, 원환방향 2.2° 간격을 기준으로 요소를 나누어, 총 4,808개의 감차 적분 고체요소(8절점 육면체, C3D8R)로 구성하였으며, 덕트의 무강성 효과는 별도로 고려하지 않았다.

라이너 플레이트 요소는 Fig. 2(b)와 같은 구성으로 관통

부 슬리브 보강철판 및 장비반입구 해치 커버 등을 포함하여 총 107,215개의 쉘요소(S4R)로 구성하였다.

철근요소는 47,200개의 트리스 요소(T3D2)로, 텐던요소는 48,740개의 트리스 요소(T3D2)로 Fig. 8과 같이 구성하였다. 돔 부분의 철근은 돔 부부의 덕트에 따른 강성 저감 효과를 별도로 고려하지 못한 관계로, 돔부위의 강성을 상당히 과대 평가할 우려가 있어, 돔 부위의 철근은 해석 시 반영하지 않음을 통해 실제 구조물의 강성에 보다 가깝도록 고려하였다.

Fig. 8 Rebar and tendon meshes

2.3 해석 과정 및 결과 분석

2.1절 및 2.2절의 해석 모델링 및 요소 간 연결 방법을 활용하여, SIT 최대가압 압력인 69psig(0.47MPa)의 압력까지 원자로 건물 내부에 가압하는 해석을 수행하였다.

동일한 해석요소로 구성된 해석모델에서 텐던 요소의재료 물성치와 텐던의 매입 여부를 변수로 하여, (2) 덕트 무강성 효과 미고려 및 텐던 전체 매입 (3) 덕트 무강성 효과 고려 및 텐던 전체 매입 (4)덕트 무강성 효과 고려 및 텐던 일부 매입을 고려한 세가지 경우에 대한 해석을 수행하였고, 그 결과를 Table 3의 (1) SIT 수행 시의 측정변위와 같이 정리하였다.

Fig. 9에는 최대가압 단계에서의 콘크리트 요소 및 라이너 플레이트 요소의 300배 확대된 변형 형상을 나타내고 있다.

Table 4에는 Table 3에서의 (2) 덕트 무강성 효과 미고려 및 텐던 전체 매입 (3) 덕트 무강성 효과 고려 및 텐던 전체 매입 (4)덕트 무강성 효과 고려 및 텐던 일부 매입을 고려한 세가지 경우에 대한 해석 간의 결과만을 상대적으로 비교하기 위해 총 21개의 변위 측정 위치 중 대표적으로 총

Table 3 Maximum displacement comparison(at 69psig)
(inch)

ID NO.	El. [ft]	(1) MD*	(2) NDH_AE**	(3) DH_AE***	(4) DH_PE****	(5) [(1)/(4)]
R1	107.5	0.236	0.231	0.244	0.244	0.97
R2	108.3	0.211	0.244	0.259	0.259	0.82
R3	109.0	0.329	0.271	0.286	0.286	1.15
R4	106.9	0.205	0.165	0.174	0.177	1.16
R5	143.0	0.265	0.246	0.259	0.259	1.02
R6	142.0	0.242	0.280	0.295	0.294	0.82
R7	143.0	0.305	0.337	0.350	0.350	0.87
R8	143.0	0.280	0.244	0.256	0.261	1.07
R9	161.0	0.166	0.280	0.295	0.295	0.56
R10	162.6	0.254	0.289	0.303	0.305	0.83
R11	164.8	0.295	0.288	0.298	0.298	0.99
R12	162.3	0.267	0.223	0.236	0.240	1.11
D1	200.0	0.351	0.364	0.383	0.387	0.91
D2	206.5	0.482	0.440	0.467	0.471	1.02
D3	204.0	0.298	0.406	0.432	0.436	0.68
D4	212.0	0.355	0.370	0.393	0.396	0.90
D5	217.5	0.492	0.431	0.457	0.461	1.07
D6	219.8	0.308	0.400	0.426	0.43	0.72
D7	228.8	0.350	0.368	0.391	0.394	0.89
D8	229.0	0.459	0.415	0.440	0.444	1.03
D9	232.0	0.315	0.390	0.415	0.418	0.75

* MD : Measured Displacements

** NDH_AE : No Duct Hole and All Tendons Embedded

*** DH_AE : Duct Hole and All Tendons Embedded

**** DH_PE : Duct Hole and Tendons Embedded Partially

Fig. 9 Deformed shape(X 300, DH_PE)

Table 4 Displacements comparison among analyses
(inch)

ID NO.	(2) NDH_AE**	(3) DH_AE***	(4) DH_PE****	(6) [(3)/(2)]	(7) [(4)/(2)]
R1	0.231	0.244	0.244	1.056	1.056
R2	0.244	0.259	0.259	1.061	1.061
R3	0.271	0.286	0.286	1.055	1.055
R4	0.165	0.174	0.177	1.055	1.073

4개소(R1~R4)에서의 위치에서 해석간의 결과를 별도로 정리하였다.

Table 4의 (2)과 (3)의 경우를 비교해 보면, 덕트의 무강성 효과를 고려할 경우의 수평방향 변위가 각 위치에서 약 5.5~6% 정도 큰 것으로 나타났다.

이는 본 논문 I편의 3차원 예비해석의 경우에 있어서 덕트의 무강성 효과가 6~7% 수준이었음에 비해 다소 낮은 경향이다. 이러한 차이는 3차원 예비해석의 경우는 철근을 고려하지 않은 반면, 본 해석에서는 철근을 고려하여 해석 시 콘크리트 요소에 매입함에 따라 각 위치 벽체단면 강성에서 덕트에 의해 감소되는 강성 정도가 상대적으로 낮음에 따른 현상이다.

Table 4의 (3)의 해석에서는 텐던의 모두 매입하도록 설정한 반면, (4)의 해석에서는 Fig. 5의 수평텐던 정착부에 이르는 직선구간(tangent line)을 매입하지 않도록 설정하였다.

Table 4의 (3)과 (4) 해석결과에서 수평방향 변위를 비교 보면, 부벽 위치를 제외하고는 거의 동일하다. 부벽의 위치(R4)에서는 (4)의 해석결과가 (3)의 해석결과 대비 2% 가량 증가되었다. 이는 수평텐던 정착부에 이르는 직선구간의 수평 텐던이 매입되지 않음에 따른 영향이다.

Table 4의 (2)와 (4) 해석결과에서 R3와 R4 위치에서의 (4)의 해석결과는 (2)의 결과대비 5.5%, 7.3% 증가되었는데, 이는 Table 3에서와 같이 측정 변위와의 차이를 그만큼 줄이게 되었다.

Table 3의 (1)SIT 수행 시의 측정 변위와 (4)덕트 무강성 효과 고려 및 텐던 일부 매입을 고려한 해석의 변위 경향을 쉽게 비교하기 위해서 Table 5에 Table 3의 측정(MD) 변위와 해석(DH_PE)변위의 비율의 분포를 정리하였다.

Table 5에서 확인할 수 있는 바와 같이 반경 방향 12개소(R1~R12) 및 직경 방향 9개소(D1~D9) 등 총 21개 계측 위치 중에서 2/3 수준인 14개소의 위치에서 측정변위가 해석 변위의 80%~110% 범위 내인 것으로 평가되었다.

이러한 평가 결과는 측정변위가 예상변위를 130% 이내가 되도록 규정하는 ASME CC-6000(ACI-ASME joint technical

committee, 1998)을 충분히 만족하는 결과이다.

한편, 측정변위와 해석 변위간의 일치 정도의 관점에서 해석 변위의 80%~110% 범위 내인 결과는 본 해석에서 고려하지 못한 구조 재료적 불확실성이나 임의성 등을 고려할 경우, 근사한 결과로 판단하였다.

한편, 80% 이하인 경우나, 110% 이상인 경우에 대해서는 그 원인을 좀 더 정성적으로 파악하고 분석하고자 하였다. 80% 이하로 나타난 계측 위치 중 반경방향 변위 측정 위치(R9)는 방위각 28.5°, 높이 161ft(49.1m)의 위치이며, 직경방향 변위 측정 위치들(D3, D6, D9) 모두 2개의 LVDT 고정지점 중 한 지점은 방위각 29.0°, 높이는 각각 204ft(62.2m), 219.8ft(67.0m), 232ft(70.7m)이며, 180° 맞은편의 2번 부벽에 LVDT 반대쪽 고정지점이 위치하는 경우이다.

Fig. 10에는 방위각 30° 내외의 각 계측 위치를 도시하고 있다. 계측 위치의 기하학적 특징으로 같이 배관 관통부가 계측 위치 인근에 상당수 배치되어 있다. 해석 모델에서는 이러한 배관 관통부를 특별히 고려하지 않았다. 이는 해석 모델링 구성 시에 원형의 관통부를 일일이 다 고려할 경우, 해석 요소 구성에 어려움이 있음에 기인한다. 즉, 실제 구조물에서는 배관 관통부에서 관통부위 만큼의 강성도 없을뿐더러 압력하중도 작용하지 않지만, 해석모델에서는 해당 관통부위의 강성이 있고 압력하중이 작용하는 것으로 고려되었다.

Fig. 10에는 해석모델 시 고려되지 못한 주증기 배관 관통부를 도시하고 있는데, 도시된 주증기 배관 관통부 외에서 케이블 전선관 등 다수의 관통부가 실제 구조물에는 존재하

Fig. 10 Locations of measurement near azimuth=30°

Table 5 Displacement Ratio of MD and DH_PE

Ration of Displacement (DMD/DDH_PE)	Locations	No. of Locations
0.8 ↓	R9, D3, D6, D9	4
0.8~0.9	R2, R6, R7, R10, D7	5
0.9~1.0	R1, R11, D1, D4	4
1.0~1.1	R5, R8, D2, D5, D8	5
1.1~1.2	R3, R4, R12	3
Sum	-	21

나 해석모델에는 반영하지 못하였다.

따라서, 80% 이하로 나타난 계측 위치의 해석모델에 의한 예측값을 보다 실제에 가까운 조건으로 고려하기 위해서는 이러한 관통부의 영향을 고려할 필요가 있다.

다만, 이러한 관통부의 영향을 고려하는 것은 본 논문의 연구 범위에서는 우선 배제하고 후속 연구를 통해 보완해 갈 예정이다.

한편 110% 이상의 반경방향 변위차이를 보인 측정 위치

Fig. 11 Locations of measurement near equipment hatch I

Fig. 12 Locations of measurement near equipment hatch II

R3, R4, R12를 Fig. 12 및 Fig. 13에 도시하였다.

Fig. 11에서는 콘크리트 해석모델 상에 각 계측 위치를 도시하였고, Fig. 12에서는 라이너플레이트 및 텐던 모델 상에 각 계측 위치를 도시하였다.

Fig. 12에서는 계측지점 R12 인근의 장비반입구와 R3 및 R4 인근의 작업원 출입구 부근에서 관통부를 우회하기 위해 텐던이 밀집되어 있는 것을 확인할 수 있다. 본 연구의 해석모델에서는 Fig. 3(b)에서와 같이 장비반입구 및 작업원 출입구에서의 덕트의 무강성에 따른 강성 저하를 별도로 고려하지 못하였다. 이에 따라, 관통부 인근 부위에 위치한 R3, R4, R12의 해석결과로 도출된 변위가 실제 계측된 변위보다 11~16% 수준의 차이가 도출된 것으로 판단되며, 이러한 현상은 후속 연구를 통해 관통부에서의 덕트의 무강성 효과를 적절히 고려한다면 개선될 수 있으리라 사료된다.

3. 결 론

본 연구에서는 APR1400 노형의 원자로격납건물에 대한 구조해석 모델 개발 시 고려해야 할 주요 인자와 이러한 인자가 해석결과에 미치는 영향을 분석하고 그 결과를 반영한 상세한 해석모델을 구축하였다.

특히, 비부착식 텐던으로 시공된 구조물에서 덕트관에 의한 강성 저감 효과 및 덕트관을 사이에 둔 텐던과 콘크리트 간의 밀착 여부에 따른 강성 영향을 적절히 고려하는 것이 중요함을 확인하였고, 이를 반영한 해석을 통해 계측값에 보다 더 가까운 결과를 얻게 되었다.

상기 사항들을 반영하여 최종적으로 구성된 모델(DH_PE)를 이용한 해석결과, 해석 변위 대비 측정 변위가 최대 116%로 연관 기술 기준인 ASME CC-6000항(ACI-ASME joint technical committee, 1998)에서 제시하는 130%값을 초과하지 않을 뿐만 아니라 전반적으로 10% 내외의 작은 차이를 보임을 확인하였다.

그러나 특정 방위각의 위치들에서는 측정값이 예측값 대비 20%이상 작게 나타나는 현상에 대해서는 명확한 배경을 확인하지 못하였다.

다만, 본 논문에서는 미처 반영하지 못한 다수의 배관 관통부 등에 대한 고려, 장비반입구 및 작업원출입구를 인근을 지나는 텐던의 덕트의 무강성 효과 및 텐던과 덕트의 밀착 여부 등을 실제 구조물과 유사하게 반영하여 해석을 수행한다면, 해석 구조물의 전체적인 강성 분포가 보다 실제 구조물에 가까워 질 수 있을 것으로 예상되며, 이에 대한 상세한 분석은 후속 연구를 통해 수행될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제 성과입니다(No.201451010169B).

References

ACI-ASME Joint Technical Committee (1998)
Code for Concrete Containments, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 2, *American Society of Mechanical Engineers*, New

York.

Jung, R.Y., Cho, H.I., Ahn, S.M. (2013) The Structural Integrity Test for the Shin-Kori Unit 3 Containment and Acceptance Criteria, Transactions, *SMiRT-22 Division VI*.

KHNP TR (2013) Structural Integrity Test Report Shin Kori 3, *Korea Hydro and Nuclear Power Co. Ltd.*

Noh, S.H., Jung, R.Y., Kim, S.T., Lim, S.J. (2015) The Structural Integrity Test for a PSC Containment with Unbonded Tendons and Numerical Analysis I, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 28(5), pp.523~533.

요 지

원자로 격납건물은 냉각재상실사고와 같이 내부의 과도한 압력이 유발되는 사고에 있어서도 방사성 물질이 외부로 누출되지 않도록 막는 최종의 방벽이다. 이러한 격납건물의 기능적 중요성에 기인하여, 건설 초기 구조건전성시험(SIT)을 수행한다. 이러한 SIT거동을 가장 실제와 가깝게 예측하기 위한 해석 연구를 수행하였다. 해당 연구의 결과는 2편의 논문으로 정리되었는데, 본 논문은 그 중 II편으로 I편의 해석모델 구성 시의 주요 고려사항의 분석 및 예비해석 결과를 반영한 상세 해석 모델의 구성 과정 및 해석 결과를 제시하고 있다. 특히 비부착식 텐던으로 시공된 구조물에서 덕트관에 의한 강성 저감 효과 및 덕트관을 사이에 둔 텐던과 콘크리트간의 밀착 여부에 따른 영향을 해석 시 최대한 고려하고자 하였다. 이러한 과정을 통해 구축된 해석 모델에 따른 변위과 신고리 3호기 SIT 측정변위를 비교한 결과, ASME CC-6000 기준을 충분히 만족시키는 결과가 나타남을 확인하였다.

핵심용어 : 텐던, 격납건물, 원자로 건물, 내압 해석, 프리스트레스트 콘크리트, 구조 건전성