

원전 격납건물의 Steel Fiber 적용성 평가를 위한 지진취약도 분석

Seismic Fragility Analysis for Steel Fiber Applicability Assessment for Containment Structure of Nuclear Power Plant

김민규† 박준희* 전영선** 최인길**
Kim, Min Kyu Park, Junhee Choun, Young-Sun Choi, In-Kil

요 지

본 연구에서는 Steel Fiber를 원전 격납건물에 적용하기 위한 적용성 평가를 위해서 Steel Fiber가 삽입된 격납건물에 대한 지진위험도 평가를 수행하였다. Steel Fiber를 콘크리트에 삽입함으로써 콘크리트의 구조적 성능에서 취약점인 인장성을 향상시킬 수 있고, 압축강도 및 전단강도도 증가시킬 수 있는 장점이 있기 때문이다. 그러나 아직까지 원전 격납건물에 Steel Fiber를 적용하기 위한 노력은 진행되고 있지 않다. 재료적 우수성에도 불구하고 원전에 적용하기 위해서는 좀 더 많은 사용경험과 성능검증이 이루어져야 가능할 것이다. 따라서 본 연구에서는 원자력발전소 격납건물에 Steel Fiber를 사용하였을 경우, 격납건물의 지진안전성의 변화를 살펴보기 위하여 기존의 실험자료를 이용하여 취약도 평가를 수행하였다. 분석결과 Steel Fiber의 함유로 인하여 전단성능과 연성능력이 증가하여 지진취약도의 향상으로 나타났다. Steel Fiber함유량이 1.0%인 경우 지진내력이 10%가량 증가하는 효과를 얻을 수 있었다. 그러나 본 연구의 결과는 제한된 기존의 실험결과를 이용한 예비해석이므로 Steel Fiber의 실제 적용성을 정확하게 분석하기 위해서는 Steel Fiber가 함유된 다양한 콘크리트 부재실험을 통하여 그 물성의 변화를 파악하여야 할 것이다.

핵심용어 : Steel Fiber, 격납건물, 지진안전성, 취약도 평가

Abstract

In this study, a seismic risk analysis performed for an applicability assessment of steel fiber in containment structures. Steel fiber can increase tensile properties of concrete structures moreover compressive and shear capacity. But many of researches about steel fiber reinforced concrete structures are now only focused in axial load condition. Also it is very difficult to find an effort for application to containment structures in NPP. Therefore, in this study, seismic fragility assessment for a steel fiber reinforced concrete containment structure. As a result, a seismic fragility capacity improved according to increase of shear and ductile capacity of concrete. In the case of 1.0% of steel fiber volume fraction, seismic capacity increases as 10%. But very limited previous experimental results were used in this study, so various element tests were needed for more accurate investigation.

Keywords : steel fiber, containment structure, seismic safety, fragility analysis

1. 서 론

콘크리트재료의 재료적 성능개선을 위해서 Steel Fiber를 콘크리트구조물에 적용하기 위한 많은 노력들이 진행되고 있다. Steel Fiber를 콘크리트에 삽입함으로써 콘크리트의 구조적 성능에서 취약점인 인장성을 향상시킬 수 있고, 압축강도 및 전단강도도 증가시킬 수 있는 장점이 있기 때문이

다. 그러나 아직까지 원전 격납건물에 Steel Fiber를 적용하기 위한 노력은 진행되고 있지 않다. 재료적 우수성에도 불구하고 원전에 적용하기 위해서는 좀 더 많은 사용경험과 성능검증이 이루어져야 가능할 것이다. 따라서 본 연구에서는 원자력발전소 격납건물에 Steel Fiber를 사용하였을 경우, 격납건물의 지진안전성의 변화를 살펴보기 위하여 기존의 실험자료를 이용하여 위험도 평가를 수행하였다. Fiber Rein-

† 책임저자, 정회원 · 한국원자력연구원 종합안전평가부 책임연구원
Tel: 042-868-8790 ; Fax: 042-888-8256

E-mail: minkyu@kaeri.re.kr

* 정회원 · 한국원자력연구원 종합안전평가부 박사후연구원

** 정회원 · 한국원자력연구원 종합안전평가부 책임연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2012년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2013년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

forced Concrete(FRC)에 대한 많은 연구가 있지만, 재료적 특성분석에 연구가 치중되어 있으며, 구조물 거동예측을 위한 기반연구는 부족한 것이 현실이다. 따라서 본 연구에서는 적용가능한 기존의 실험결과를 이용하여 FRC 격납건물의 지진취약도를 평가하여 FRC의 적용성을 평가하였다.

Steel Fiber를 콘크리트에 삽입하여 그 구조적 성능을 개선하고자 하는 연구는 많이 진행되어 왔다. 국내에서도 Steel Fiber를 사용한 콘크리트 구조물의 인장거동에 대한 연구들이 과거에 다수 진행된 바 있다(강수태 등, 2009; 곽효경 등, 2009; 홍창우 등, 1999). 그러나 많은 연구들이 철근콘크리트 거동의 취약점인 인장거동을 보완하기 위한 부분에 집중되어 있는 것을 알 수 있다. 반면 실제적으로 steel fiber를 격납건물에 삽입하여 지진거동의 변화를 파악하기 위해서는 전단성능에 대한 분석이 이루어져야 하는데, 그러한 기존의 연구는 전세계적으로도 널리 이루어지고 있지 않은 것이 현실이다.

현실적으로 원전 격납건물과 같은 전단벽 구조에 대한 전단거동을 제시해 줄 수 있는 실험모델을 찾는 것은 쉽지 않다. 가장 정확한 해석 모델을 결정하기 위해서는 Steel Fiber 함유량에 따른 전단벽구조의 전단거동 실험을 통해서 그 모델을 결정하는 것이라고 할 수 있다. 그러나 아직까지 실험을 수행하지 못하였으므로 본 연구에서는 기존 연구결과중에서 최적의 결과를 제시할 수 있는 기둥구조물의 전단거동 실험결과를 바탕으로 모델을 작성하고, 이를 이용한 격납건물

모델을 이용하여 지진취약도 평가를 수행하였다. 평가결과 Steel Fiber 함유에 따라서 격납건물의 1차모드 고유진동수의 변화는 발생하지 않지만 취약도 성능은 크게 개선되는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구의 결과를 통하여 향후 Steel Fiber를 포함한 격납건물의 거동을 예측하는 기초자료로 사용할 수 있으며, 향후 전단벽에 대한 전단거동 실험을 수행하여 그 결과를 활용한 재평가를 수행한다면 좀 더 정확한 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

2. FRC 격납건물의 동적 이력모델 도출

Fiber Reinforced Concrete(FRC)를 이용한 구조물의 동적 모델은 현재로서는 다양한 구조형태에 대하여 개발되어 있지 않다. 정확한 모델을 도출하기 위해서는 목표로 하는 부재에 대한 다양한 실험을 수행해야 한다. 그러나 현재로서는 적용가능한 모델이 없으므로 Lee(2007)가 FRC 기둥에 대하여 실험을 통하여 전단강도와 변위와의 관계를 도출한 결과를 이용하였다. Lee는 Steel Fiber가 포함된 콘크리트 기둥을 대상으로 Fiber의 체적비(Fiber volume fraction, Vf)에 따른 전단력-변위 관계를 실험을 통하여 도출하였다. 이 실험에서는 Fiber의 체적비에 따라 각각 한 개씩의 실험 모델을 제작하여 실험을 수행하였다. Lee의 실험에서 Fiber의 체적비에 따라 구해진 전단력과 변위에 대한 이력곡선은 그림 1과 같다.

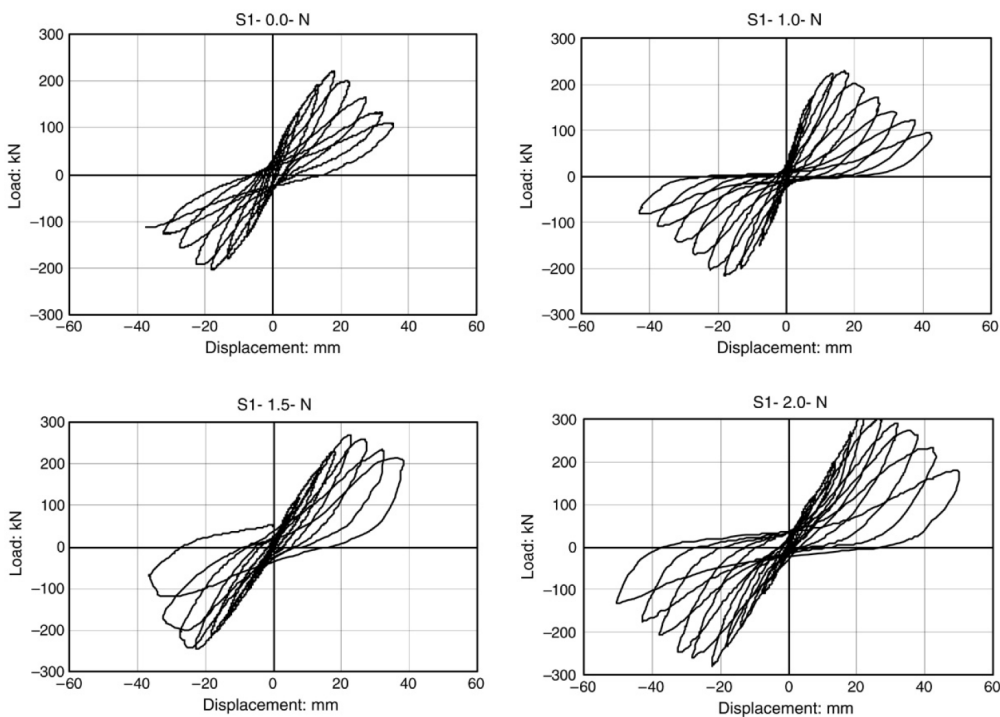


그림 1 Fiber 체적비에 따른 전단력-변위 이력곡선

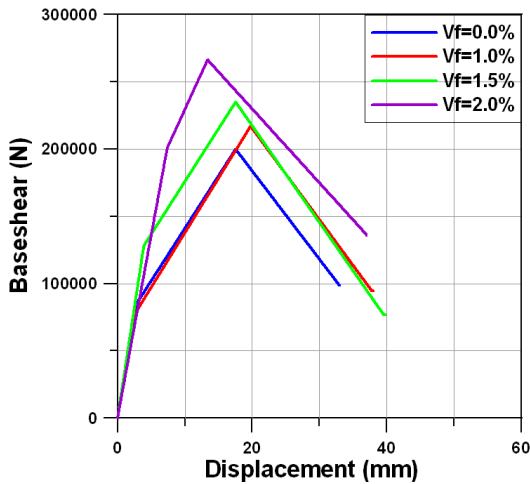


그림 2 Fiber 체적비에 따른 하중-변위관계

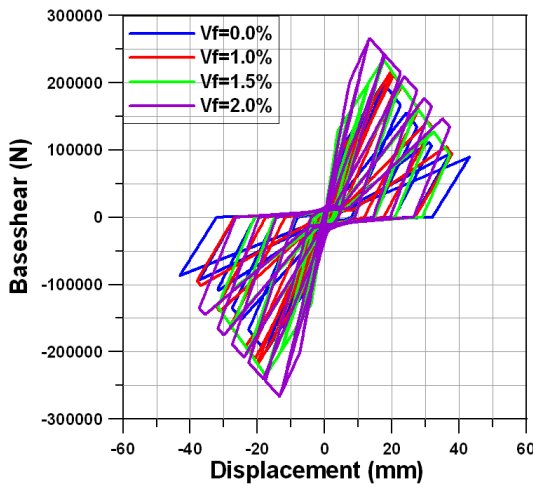


그림 3 FRC 기둥의 하중-변위 이력거동

그림 1에서의 하중-변위관계를 이용하여 상용프로그램인 OpenSEES를 사용하여 실험모델인 기둥에 대한 수치해석 모델을 작성하여 Pushover 해석을 수행하여 변위와 전단력과의 관계를 도출하여 그림 2에 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 Fiber의 함유 여부가 초기강성에는 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. Fiber 0%와 1.0%의 항복강도가 거의 유사하게 나타나고 있으나 전체적으로는 Fiber의 체적비가 증가함에 따라서 항복강도와 극한강도가 증가하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 그림 3에서는 위의 동일한 모델에 대하여 cyclic 하중에 의한 하중-변위관계의 이력모델을 도출하였다.

위의 결과를 이용하여 Fiber 체적비에 따른 균열전단강도, 초기균열 변위, 최대전단강도, 그리고 연성도를 도출하여 표 1에 정리하였다. 또한 각각의 경우 Fiber를 사용하지 않은 경우를 기준으로 한 비율을 표시하여 Fiber의 함유량에 따른 변화를 알 수 있도록 하였다. 균열전단강도와 초기균열변위, 최대전단강도, 최대전단강도에서의 변위는 그림 2에서 도출

표 1 Fiber 체적비에 따른 재료물성 비교

Vf	전단균열강도 (kN)	강도비	초기균열변위 (mm)	변위비
0.0%	84.8	1.00	2.70	1.00
1.0%	78.9	0.93	2.50	0.93
1.5%	129.2	1.52	3.68	1.36
2.0%	199.2	2.35	7.24	2.68
Vf	최대전단강도 (kN)	강도비	연성도(μ)	연성도비
0.0%	200	1.00	1.43	1.00
1.0%	218	1.09	1.76	1.23
1.5%	239	1.20	2.02	1.41
2.0%	262	1.31	2.38	1.66

하였으며, 연성도를 구하기 위한 항복점은 기둥의 초기강성이 변하는 지점으로 설정하였다. 이력모델의 항복점에서 기둥은 균열이 발생하므로 이때의 강도를 전단균열강도로 표현하였으며, 변위를 초기균열변위로 표현하였다. 극한변위는 Priestley 등(1987)의 제안을 따라서 최대강도의 80%에서의 변위로 설정하였다.

표 1에서 보는 바와 같이 Fiber 체적비의 증가에 따라서 전반적으로 전단강도와 연성이 증가하는 것을 알 수 있다. Fiber 체적비(Volume fraction, Vf)가 2.0%인 경우 전단균열강도는 2.35배 그리고 연성도는 1.66배 증가하는 것을 알 수 있다.

3. FRC 격납건물의 지진응답해석

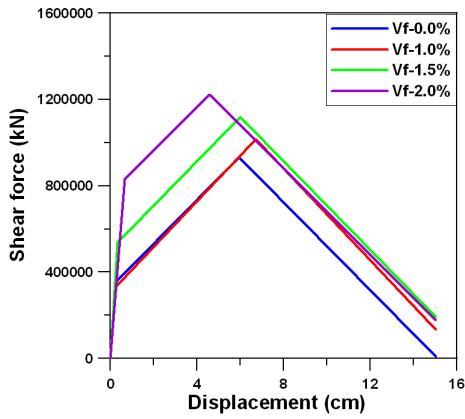
FRC 격납건물의 해석모델 구축을 위하여 FRC 기둥의 재료물성을 이용하여 FRC 격납건물의 벽체부분과 돔부분에서 극한전단강도(V_u)는 Ogaki 등(최인길 등, 2001)이 제안한 식 (1)을 사용하여 산정하였다.

$$V_u = \frac{v_U \cdot \pi \cdot D_c \cdot t_w}{\alpha} \tag{1}$$

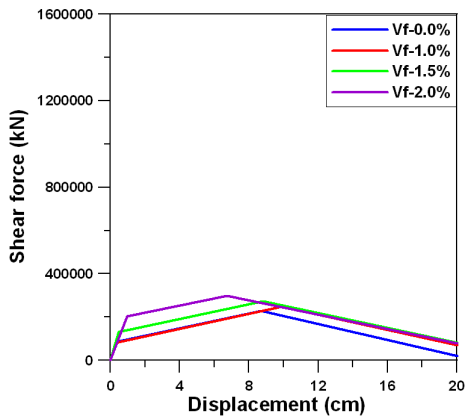
여기서, v_U 는 극한전단응력을 나타내며, $\pi D_c t_w / \alpha$ 는 유효전단면적을 나타낸다. D_c 및 t_w 는 각각 벽체 중앙까지의 직경 및 벽체의 두께를 나타내며, α 는 전체 단면적을 유효 전단면적으로 변환하기 위한 계수를 나타낸다. 극한전단응력을 나타내는 v_U 는 다음 식 (2)로 구할 수 있다.

$$v_U = 0.8 \sqrt{f'_c} + (\rho\sigma_y)_{AVER} \tag{2}$$

여기서, $(\rho\sigma_y)_{AVER}$ 는 수평 및 수직방향의 유효철근비와 항복응력을 곱한 값의 평균으로 격납건물의 극한 전단강도 중 철



(a) 하부벽체



(b) 돔

그림 4 FRC 격납건물 부재의 비선형이력모델

근 및 프리스트레싱 텐돈 등이 부담하는 부분을 나타낸다. 이러한 방법으로 격납건물 벽체와 돔부분에 대한 비선형 하중-변위 모델을 작성하여 그림 4에 제시하였다.

격납건물의 지진해석을 위해서 국내 원전중 가장 많은 형태인 경수로형 원전의 격납건물을 선택하였으며, 대상 호기로는 울진 56호기의 격납건물을 선택하였다. 수치해석을 위한 모델은 집중질량모델을 이용하여 그림 5와 같이 작성하였다. 집중질량 모델은 격납건물의 설계를 위해서 실무적으로 가장 널리 사용하고 있는 방법으로 작성된 모델의 검증은 위해서는 실제의 형상대로 모형화되어 있는 3차원 모형과의 검증이 필요하다. 3차원 모델과의 검증을 위해 최인길 등 (2006)의 연구에서 상용프로그램인 ABAQUS로 3차원 해석모델을 작성하여 해석한 결과 및 상용프로그램 TDAP으로 집중질량모델을 작성하고 해석한 결과와 비교하여 그 결과를 표 2에 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이 본 연구에서 작성한 격납건물의 집중질량 모델은 격납건물의 동적거동을 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 집중질량 모델에 대한 지진응답해석은 재료비선형 해석이 가능한 상용프로그램인 OpenSEES(Mazzoni 등, 2006)를 사용하여 수행하였다.

Fiber의 함유량에 따른 구조물의 동적거동을 비교하기 위

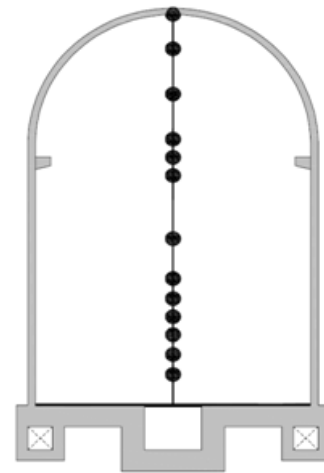


그림 5 격납건물 모형의 집중질량 모델

표 2 집중질량 모델과 3D 모델의 고유진동수 비교 (단위: Hz)

프로그램	집중질량 모델		3D 모델
	OpenSEES (본연구)	TDAP (기존연구)	ABAQUS (기존연구)
수평	4.56	4.56	4.48
수직	12.18	12.17	12.65

표 3 Fiber 함유량에 따른 FRC 격납건물의 고유진동수 비교

	Vf-0.0%	Vf-1.0%	Vf-1.5%	Vf-2.0%
수평	4.557	4.562	4.699	4.397
수직	12.18	12.18	12.18	12.18

해 작성된 집중질량모델을 사용하여 고유진동수 분석을 하였다. 분석결과는 표 3에 Fiber의 체적비와 고유진동수와의 관계를 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이 Fiber의 체적비와 격납건물의 고유진동수와는 큰 상관관계가 없는 것으로 나타나고 있다. 1차모드 고유진동수는 탄성구간의 초기강성에 의해서 결정되기 때문에 그림 4에서 보는 바와 Fiber 함유량에 따라서 초기 강성의 차이가 발생하지 않고 극한 강도만 차이가 나타나므로 이러한 결과가 나타나고 있는 것으로 판단된다. 따라서 Fiber를 이용하여 격납건물을 건설할 경우 구조물의 동특성에 큰 변화없이 강도증가와 연성증가 효과를 추구할 수 있을 것이다.

Fiber의 함유량에 따른 격납건물의 지진응답을 분석하기 위하여 각 모델에 대하여 그림 6과 같이 US NRC Reg1.60 설계응답스펙트럼(US NRC, 1973)을 이용하여 생성된 인공지진파를 이용하여 지진응답해석을 수행하였다. 가속도 응답과 변위응답을 비교하여 그림 7과 그림 8에 도시하였다. 최대지반가속도를 0.4g, 0.6g, 0.8g 그리고 1.0g로 변화하여 해석을 수행한 결과 입력지진동이 낮은 수준에서는 Fiber의 유무에 따라서 큰 변화가 없으나, 입력지진동이 증가하면서 비선형 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 가속도 시간이력을 제시한 그

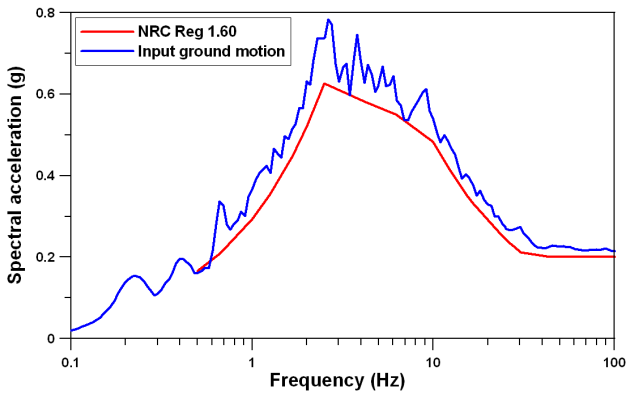
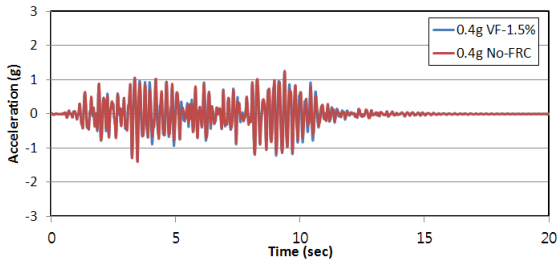
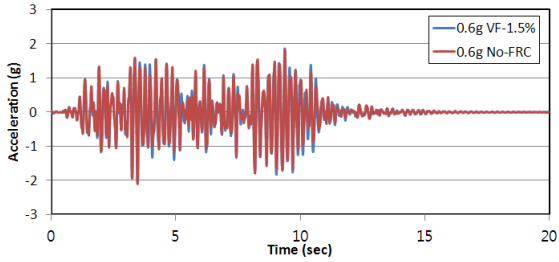


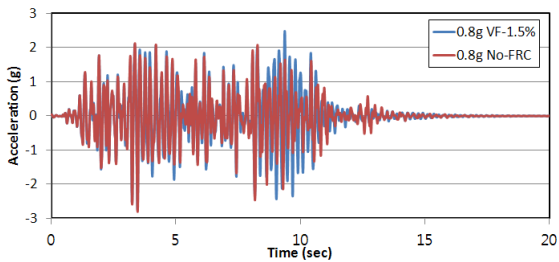
그림 6 입력지진 가속도스펙트럼



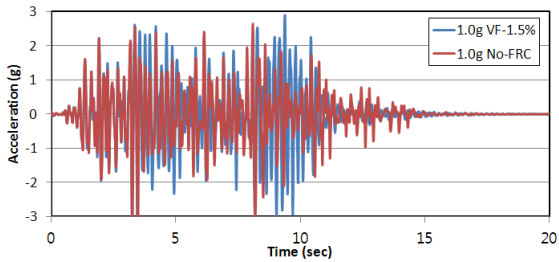
(a) 0.4g



(b) 0.6g

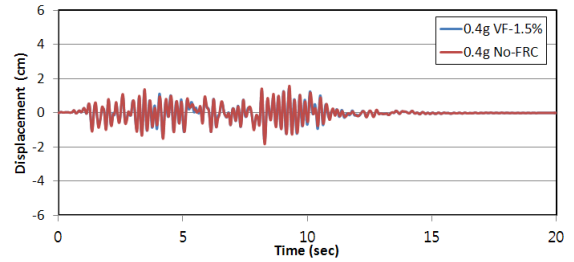


(c) 0.8g

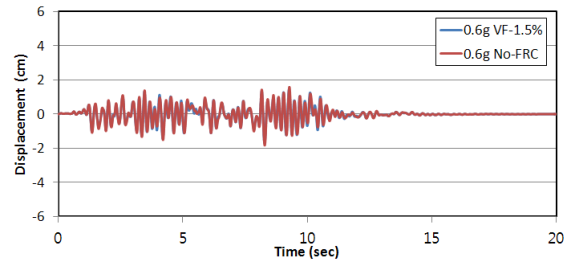


(d) 1.0g

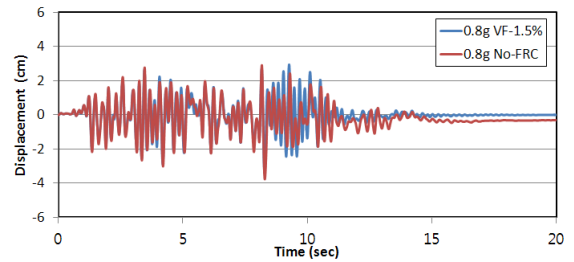
그림 7 FRC사용에 따른 격납건물의 가속도응답 비교



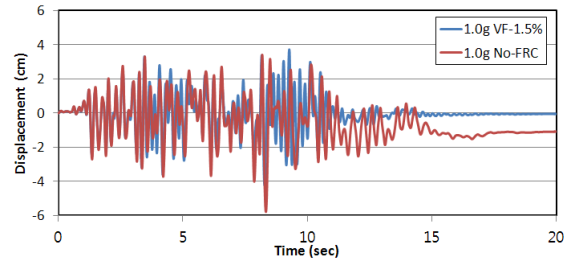
(a) 0.4g



(b) 0.6g



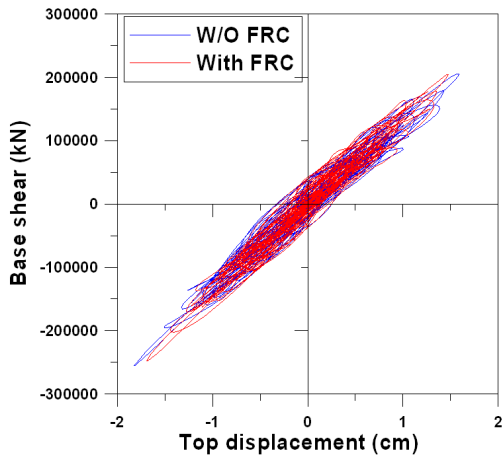
(c) 0.8g



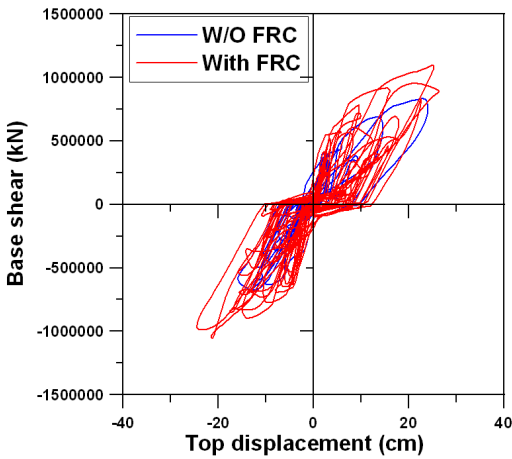
(d) 1.0g

그림 8 FRC사용에 따른 격납건물의 변위응답 비교

림 7의 결과를 통해서는 Fiber의 함유 여부에 따른 거동의 차이를 파악하기는 쉽지 않으나, Fiber의 함유량에 따른 격납건물 천단부에서의 변위 시간이력을 도시한 그림 8의 결과를 보면 Fiber의 사용에 따른 격납건물 전체 거동의 차이가 분명하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 구조물의 거동이 탄성거동을 하는 작은 지진수준의 해석에서는 Fiber 함유에 따른 거동 차이가 발생하지 않으나 지진동 수준이 증가하면서 Fiber를 사용함으로써 인해 격납건물의 영구변형이 Fiber를 사용하지 않은 경우에 비하여 억제되었고, 최대변위도 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 거동은 Fiber의 사용이 설계지진 수준을 넘어서는 강



(a) 0.4g



(b) 2.0g

그림 9 FRC사용에 따른 격납건물의 힘-변위 관계

진의 발생시 격납건물의 거동에 유리하게 작용할 수 있음을 보여준다고 할 수 있다.

그림 9에는 입력지진동의 크기와 Fiber의 함유량에 따른 격납건물의 이력거동을 제시하였다. 입력지진하중이 작을 경우 탄성 상태에서 Fiber에 의한 에너지 소산능력에는 큰 차이를 보이지 않지만, 지진하중이 큰 경우 Fiber를 함유한 격납건물은 균열의 발생이 억제되기 때문에 극한강도와 연성이 증가한다. 그 결과 입력지진의 에너지 소산능력이 그림 9와 같이 Fiber를 함유하지 않은 모델보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

4. 격납건물의 지진취약도 분석

구조물의 취약도 계산에서는 안전계수(factor of safety)로 불리는 일련의 랜덤변수를 이용하여 취약도를 산정할 수 있으며, 설계시의 SSE 수준 A_{SSE} 를 초과하는 지반운동 가속도 내력을 나타내는 안전계수 F 는 다음과 같이 나타낼 수

있다(최인길 등, 2001; 2002).

$$F = \left\{ \frac{\text{Actual capacity}}{\text{Design response due to SSE}} \right\} \times \left\{ \frac{\text{Design response due to SSE}}{\text{Actual response due to SSE}} \right\} \quad (3)$$

이것을 구조물의 성능 및 응답관련 랜덤변수를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F = F_C F_{RS} \quad (4)$$

여기서, F_C 는 성능계수(Capacity Factor)이고, F_{RS} 는 응답계수이다. 구조물의 경우 성능관련 랜덤변수를 구조물의 강도 및 비선형 거동에 의한 비탄성 에너지 흡수계수로 분리하여 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$F = F_S F_\mu F_{RS} \quad (5)$$

여기서, F_S 는 강도계수(Strength Factor)로서 극한강도와 A_{SSE} 작용에 따른 산정된 응력과와의 비를 나타낸다. 또한 F_μ 는 구조물의 항복 후 비선형 거동에 의해 구조물의 응답을 감소시키는 효과를 고려하기 위한 비탄성 에너지 흡수계수를 나타낸다. 구조물의 응답계수인 F_{RS} 는 구조물의 응답에 영향을 미치는 각종 랜덤변수들에 대한 계수의 곱으로 나타낼 수 있으며 이를 식으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_{RS} = F_{SA} F_\delta F_M F_{MC} F_{EC} F_{HD} F_{SS} \quad (6)$$

여기서, F_{SA} : 스펙트럼 형상 계수

F_δ : 감쇠계수

F_M : 모델링계수

F_{MC} : 모드응답 조합 계수

F_{EC} : 지진성분 조합계수

F_{HD} : 수평지진 방향 계수

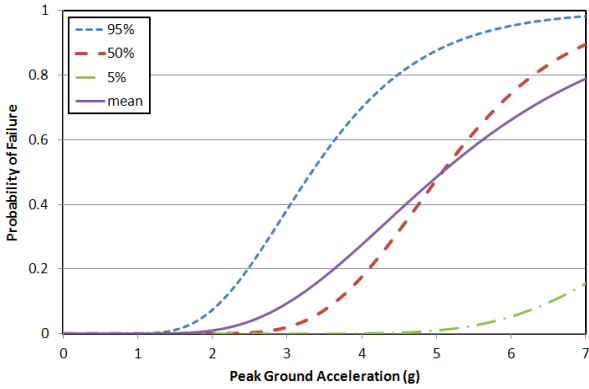
F_{SS} : 지반-구조물 상호작용 계수

각각의 응답관련 랜덤변수들의 불확실성 및 랜덤성에 대한 대수표준편차를 SRSS하여 불확실성 및 랜덤성에 대한 대수표준편차를 다음과 같이 구할 수 있다.

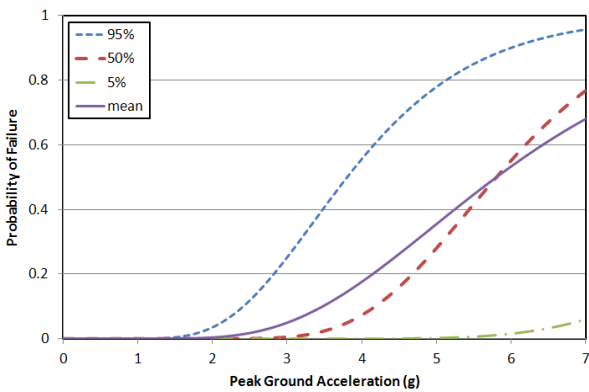
$$\beta_R = \left[\sum (\beta_{Ri})^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

표 4 Fiber 함유량에 따른 FRC 격납건물의 지진취약도 비교

V _f	A _m	β _r	β _u	HCLPF
0.0%	3.81	0.256	0.347	1.41
1.0%	4.26	0.256	0.348	1.57
1.5%	5.08	0.256	0.352	1.86
2.0%	5.80	0.256	0.355	2.12



(a) Fiber 1.5%



(b) Fiber 2.0%

그림 10 Fiber 함유량에 따른 FRC 격납건물의 지진취약도 비교

$$\beta_{V'} = \left[\sum (\beta_{V'_i})^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

FRC 격납건물의 지진취약도 분석을 통하여 지진시 RC 격납건물과의 내진성능의 차이를 분석하였다. 모델은 기존의 울진 56호기 격납건물과 동일한 제원으로 가정하였다. 표 4와 그림 10에 Fiber 함유량에 따른 지진취약도 변화를 제시하였다. 표와 그림에서 보는 바와 같이 Fiber 함유량에 따라서 격납건물의 지진취약도 성능이 향상되는 것을 알 수 있다. 이는 표 1에서 제시한 바와 같이 Fiber에 의해서 전단성능이 증가하고 연성능력이 향상되기 때문이다.

그림 11에서는 Fiber 함유량에 따른 평균 지진취약도 곡선만을 비교하였으며, 그림 12에서는 HCLPF(고신뢰도저과손확률)값을 비교하였다. Fiber의 함유량이 증가함에 따라서 지진취약도 성능이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, Fiber

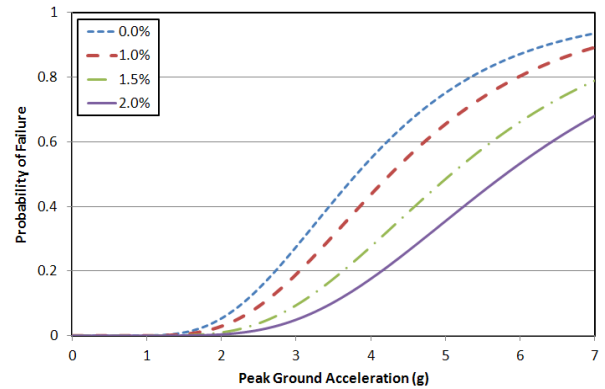


그림 11 Fiber 함유량에 따른 격납건물의 평균 지진취약도 성능 비교

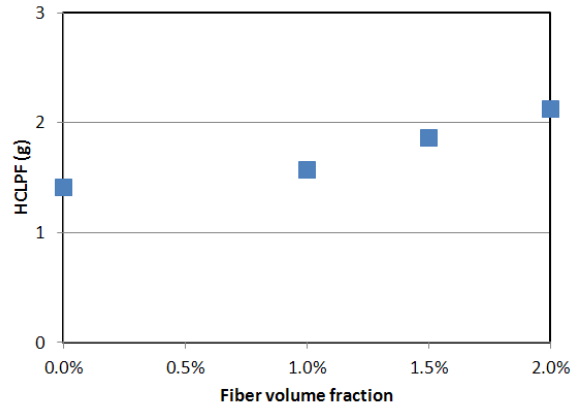


그림 12 Fiber 함유량에 따른 격납건물의 HCLPF 비교

함유량 2.0%인 경우는 내진성능이 50%가량 증가하는 것을 알 수 있다. 이로서 Steel Fiber를 사용한 격납건물의 내진성능이 기존의 격납건물에 비하여 우수한 것을 확인할 수 있다. 다만 본 결과는 제한적인 실험결과를 이용한 결과이므로 추가적인 실험을 통해 FRC의 성능에 대한 좀더 정확한 예측을 수행한 이후 정확한 비교가 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 원자력발전소의 Steel Fiber 적용성을 분석하기 위하여 Steel Fiber의 함유량에 따른 원전 격납건물의 지진취약도 분석을 수행하였다. 분석결과 Steel Fiber의 함유로 인하여 전단성능과 연성능력이 증가하여 지진취약도의 향상으로 나타났다. 분석결과 1%의 Fiber 사용으로 인하여 10%이상의 내진성능 향상효과를 가져오는 것으로 나타나고 있다. 그러나 본 연구의 결과는 제한된 기존의 실험결과를 이용한 예비해석이므로 Steel Fiber의 실제 적용성을 정확하게 분석하기 위해서는 Steel Fiber가 함유된 다양한 콘크리트 부재실험을 통하여 그 물성의 변화를 파악하여 그 결

과를 이용한 Fiber 함유 격납건물의 지진취약도 재평가가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (과제번호: 2010161010004K).

참 고 문 헌

강수태, 홍기남, 한상훈, 김성욱 (2009) 섬유혼입률이 강섬유 혼입률이 강섬유보강 초고강도 콘크리트의 인장연화거동에 미치는 영향, 한국콘크리트학회 논문집, 21(1), pp.13~20.

곽효경, 나채국, 김성욱, 강수태 (2009) 초고강도 강섬유보강 철근콘크리트의 인장강화 모델 및 적용, 대한토목학회논문집, 29(4A), pp.267~279.

최인길, 서정문 (2001) 확률론적 지진위험도 분석을 위한 원전 격납건물의비탄성에너지 흡수계수 평가, 한국지진공학회 논문집, 5(5), pp.47~56.

최인길, 서정문, 전영선 (2002) 원전 구조물 및 기기의 지진취약도 분석 기술 지침, KAERI/TR-2002.

최인길, 안성문, 전영선 (2006) 비선형 지진해석에 의한 PSC 격납건물의 지진취약도 분석, 한국지진공학회 논문집,

10(1), pp.63~74.

홍창우, 윤경구, 이정호, 박제선 (1999) 강섬유보강 고강도 철근콘크리트 부재의 인장강성모델 개발, 한국콘크리트학회 논문집, 11(6), pp.35~46.

Lee, H.H. (2007) Shear Strength and Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Columns under Seismic Loading, *Engineering Structures* 29, pp.1253 ~1262.

Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., Fenves, G. L., et al. (2006) Open System for Earthquake Engineering Simulation, User Command-Language Manual, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California.

Priestley MJN, Park R. (1987) Strength and Ductility of Concrete Bridge Columns under Seismic Loading, *ACI Structural Journal* 84(1), pp.69~76.

US NRC (1973) Regulatory Guide 1.60. Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants.

- 논문접수일 2012년 1월 11일
- 논문심사일
1차 2012년 1월 17일
2차 2012년 4월 2일
- 게재확정일 2012년 8월 7일