

국부충돌해석에 의한 SC벽체의 국부손상 평가

우동인* · 정철현**

Woo, Dong In*, Chung, Chul Hun**

Evaluation of Local Damage of SC Wall using Local Collision Simulation

ABSTRACT

The structural safety of nuclear power plant against impact from aircraft crash has been performed so far in two viewpoints such as local behavior and global behavior, and the local behavior has been evaluated using local damage evaluation formulas suggested based on the results of experimental data of RC (Reinforcement Concrete) wall. However, few data have been collected from recent research to evaluate the local behavior and damage of SC (Steel plate reinforced Concrete) wall, which is recently applied to the newly designed nuclear power plant. In this study, local damages of SC wall and RC wall against an idealized aircraft engine projectile impact are evaluated through FE simulation analyses with various wall thicknesses and steel ratio. Through analysis of local collision simulation results of SC and RC wall, the penetration depth of SC wall and RC wall are compared.

Key words : SC (Steel plate reinforced Concrete) wall, RC (Reinforcement Concrete) wall, Local collision simulation, Engine projectile, Local damage, Penetration depth

초 록

지금까지 항공기 충돌에 대한 안전성 검토는 국부거동 및 전반거동으로 나뉘어 검토되어 왔으며, 이 중 국부거동의 평가는 RC (Reinforcement Concrete)벽체를 대상으로 실험에 기초하여 제시된 국부손상 평가식을 사용하여 검토되었다. 그러나 최근 적용이 시작된 SC (Steel plate reinforced Concrete)벽체의 항공기 충돌에 대한 국부적인 거동 및 손상을 평가할 수 있는 자료는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 연성 충격 체인 이상화된 항공기 엔진을 대상으로 콘크리트 벽체의 두께 및 강관의 강재비를 변수로 충돌해석을 수행하여 SC벽체 및 RC벽체의 국부손상을 평가하였다. SC벽체 및 RC벽체에 대한 충돌해석결과로부터 국부손상에서 나타나는 관입깊이를 상호 비교분석하였다.

검색어 : SC벽체, RC벽체, 국부충돌해석, 엔진충격체, 국부손상, 관입깊이

1. 서론

원자력 발전소 시설의 안전성 평가는 지난 수십 년간 다양한 관점에서 수행되어 왔으며, 해석기술의 발전에 힘입어 현재에는 다양한 하중 작용시의 구조 거동을 어느 정도는 정밀하게 평가할 수 있는 수준에 이르렀다. 원자력 발전소의 설계수명동안 잠재적으로 발생할 가능성이 있는 인위적 또는 자연재해적 사고 가운데 항공기 충돌은 원자력 발전소 운영 중 안전에 적지 않은 영향을 줄 수 있는 최대의 가상사고 중 하나로 볼 수 있으며, 2001년 9월 세계무역센터 테러 이후 그 안전성에 대한 검토의 필요성 및 중요성이 대단히 높아졌다(KINS, 2005).

* 정회원 · 교신저자 · 단국대학교 토목환경공학과 박사과정 (Corresponding Author · Dankook University · diwoo64@hanmail.net)

** 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사 (Dankook University · chchung5@dankook.ac.kr)

Received July 7, 2014/ revised August 12, 2014/ accepted January 22, 2015

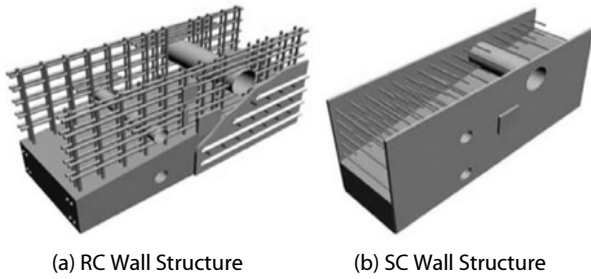


Fig. 1. Structural Characteristics of RC Wall and SC Wall

지금까지 항공기 충돌에 대한 안전성 검토는 국부거동 및 전반거동으로 나뉘어 검토되어 왔으며, 이 중 국부거동의 평가는 RC (Reinforcement Concrete)벽체를 대상으로 실험에 기초하여 제시된 국부손상 평가식을 사용하여 검토되었다. 그러나 최근 적용이 시작되고 있는 SC (Steel plate reinforced Concrete)벽체에 대한 국부손상 평가식은 제시된 예가 없어 설계시 어려움을 겪고 있는 실정이다.

현재 원전구조물에 주로 적용되는 RC벽체는 Fig. 1(a)와 같은 단면형태를 갖고 있으나, 이를 대체하는 SC벽체는 Fig. 1(b)와 같이 무근 콘크리트 양측에 일정한 두께의 강판을 배치한 단면형태를 갖는다. SC벽체는 배면에 배치된 강판의 영향으로 RC벽체에 비해 항공기 충돌에 보다 효과적인 구조로 알려져 있다(Mizuno et al., 2005). 그러나 지금까지 수행된 국부손상과 관련된 충돌실험이나 제안된 평가식들은 RC벽체를 대상으로 한 것들이 대부분이며, 철근량 및 강판의 영향을 효과적으로 반영하지 못하였다(Sliter, 1980; Kojima, 1991; Sugano et al., 1993a; Li and Chen, 2003). Walter et al. (1984) and Morikawa et al. (1999)은 강판이 배치된 RC벽체의 관통두께 평가식을 제안하기도 하였으나 이러한 기존 연구들은 강성 충격체에 대한 관통 및 스캐빙에 대한 연구가 대부분이며, 항공기 충돌과 같은 연성 충격체에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 연성 충격체인 이상화된 항공기 엔진을 대상으로 콘크리트 벽체의 두께 및 강판의 강재비를 변수로 충돌해석을 수행하여 SC벽체의 국부손상을 평가하였으며, 관입깊이 관점에서 SC벽체 강재비와 동일한 철근비를 갖는 RC벽체와 비교분석하였다.

2. 국부충돌해석

본 연구에서는 동적유한요소 프로그램인 LS-DYNA(LSTC, 2007)를 이용하여 충돌해석을 수행하였으며, 해석에 사용된 유한요소모델, 재료모델 및 주요 입력변수들은 기존 연구결과(Choi, et al., 2011)를 참고하였다. Choi, et al. (2011)은 RC 슬래브에 대해 수행된 충돌실험(Kojima, 1991)의 시험체들을 대상으로

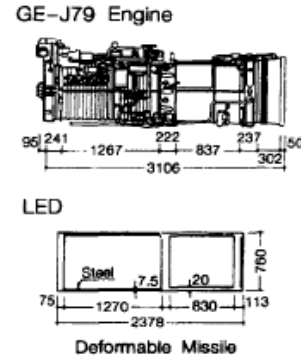


Fig. 2. View of the Deformable Missile (Sugano et al., 1993b)

LS-DYNA (LSTC, 2007)를 이용한 충돌해석을 수행하였으며, 해석결과로부터, 충돌해석을 통해서도 충격체의 충돌에 따른 국부손상평가가 가능함을 확인하였다.

2.1 유한요소모델

충돌해석 시 충격체는 항공기 엔진 충격체를 적용하였다. 대형 민항기 엔진의 정확한 설계도면 입수가 불가능하여 대안으로 Sugano et al. (1993b)이 GE-J79 엔진을 강성이 같도록 강재로 치환하여 제안한 이상화된 항공기 엔진을 모델링하였다. Sugano et al. (1993b)은 실제 F-4D 항공기 엔진 충돌실험에서 사용한 GE-J79 엔진을 세 개의 집중질량과 두 개의 스프링으로 치환한 후, 정적 비선형 좌굴해석을 통해 도출된 강성과 유사하도록 강판의 두께를 결정하여 강재로 모델링하였다. Fig. 2는 GE-J79 엔진의 실제 크기와 Sugano et al. (1993b)이 제안한 이상화된 연성 충격체의 형상 ($d=760\text{mm}$, $W=1,463\text{kgf}$)이며, 본 연구에서는 8절점 SOLID 요소를 사용하여 모델링하였다.

타기인 콘크리트 벽체는 8절점 SOLID 요소를 사용하여 모델링하였으며, 경계조건은 콘크리트 벽체 하면의 단부 가장자리 4곳을 고정지점으로 하였다. 콘크리트 벽체의 길이 및 폭은 예비해석을 통해 전체적인 국부손상을 모사할 수 있도록 14,000mm로 결정하였다. SC벽체의 강판은 8절점 SOLID 요소로 모델링하였으며, 콘크리트 벽체와 완전부착으로 가정하였다. Fig. 1(b)에 나타난 것 같이 SC벽체는 내부에 타이바가 설치되지만 모델링 시 타이바를 고려하지 않았다. 따라서 해석에서의 SC벽체의 충돌저항성능은 다소 감소될 것으로 예상된다. 본 연구에서는 SC벽체에 항공기 엔진 충격체가 충돌할 경우, 벽체의 두께 및 강재비에 따른 영향과 RC벽체와의 비교분석을 위해 SC벽체 15개, RC벽체 15개 총 30개의 모델에 대해 충돌해석을 수행하였다. 예비해석을 통해 강재비 $\rho_p = 1.0\%$ 에서 상부강판이 파괴되지 않는 콘크리트 벽체의 최소두께를 800mm로 결정하였으며, 예비해석 결과에 근거하여 콘크리트 벽체 두께에 따른 영향 파악을 위한 콘크리트 벽체의

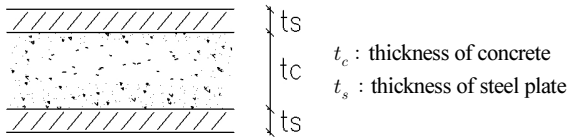
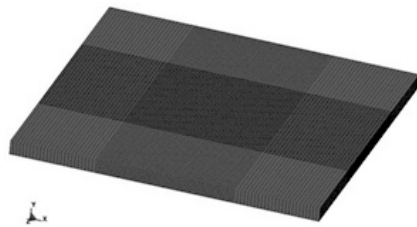


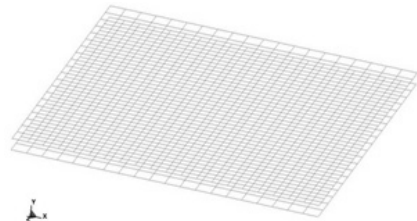
Fig. 3. Typical Section of SC Wall

Table 1. Main Characteristics of the Analysis Model

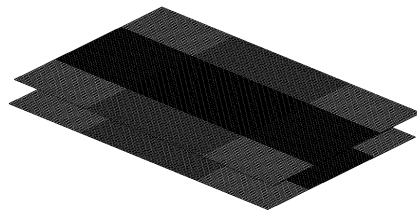
SC_tc800mm_1.0%	
Type of Structures	Steel Ratio
SC : SC Structure,	Thickness of Concrete Wall
RC : RC Structure	



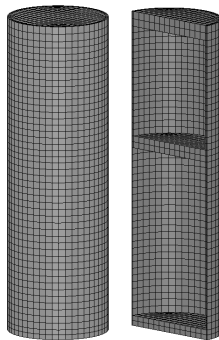
(a) Concrete



(b) Rebar



(c) Steel Plate



(d) Deformable Missile

Fig. 4. Finite Element Model

두께는 800mm, 940mm, 1,220mm 3가지를 변수로 하였다. Fig. 3 및 Eq. (1)에 따라 각 벽체 두께별로 강제비를 $\rho_p = 1.0\% \sim 3.0\%$ 의 범위로 모델링하여 해석을 수행하였다. SC벽체와의 비교를 위한 RC벽체에 사용된 철근은 TRUSS 요소로 모델링 하였으며, 실제 BNPP에 사용되는 #14철근($d = 43.0mm$, $A = 1,452mm^2$)을 RC벽체의 수직, 수평 각 단면에서 SC벽체의 강제비와 동일한 철근비가 되도록 벽체 상, 하부에 격자 배근하였다(Fig. 4 참조). 충격체의 충돌속도는 150m/sec를 적용하였으며, 최대 충돌해석시간은 100msec으로 하였다. 각 해석모델의 명칭은 Table 1과 같다.

$$\rho_p = \frac{2A_p}{(2t_s + t_c) \cdot b} \quad (1)$$

여기서, A_p : 한쪽면의 강판 면적

2.2 재료모델

2.2.1 콘크리트

콘크리트 재료모델은 LS-DYNA에서 콘크리트의 비선형 재료 거동을 모사할 수 있는 CSCM (Continuous Surface Cap Model) Concrete 모델을 사용하였다. CSCM Concrete 모델은 콘크리트의 항복/파괴거동 및 변형률 속도 효과(strain rate effect)의 고려가 가능하도록 되어 있으며, 충돌해석 시 콘크리트에 대한 변형률 속도증가에 따른 강성 증가 효과를 Eqs. (2) and (3)과 같이 고려하였다. LS-DYNA에서 CSCM Concrete 모델의 콘크리트 응력-변형률 관계 및 탄성계수 등 콘크리트 재료특성은 CEB-FIP CODE (1993)에 의해 계산된다. 충돌해석에 사용한 벽체 콘크리트의 설계 기준 압축강도는 RC벽체 및 SC벽체 모두 40MPa이다.

$$f_c^{dynamic} = f_c + E\dot{\epsilon}\eta_c \quad (2)$$

$$f_t^{dynamic} = f_t + E\dot{\epsilon}\eta_t \quad (3)$$

η_c : 압축에 대한 변형률 속도에 따른 입력 변수(=0.78)

η_t : 인장에 대한 변형률 속도에 따른 입력 변수(=0.48)

$\dot{\epsilon}$: 변형률 속도(/sec)

$$= \sqrt{\frac{2}{3} \{ (\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_v)^2 + (\dot{\epsilon}_y - \dot{\epsilon}_v)^2 + (\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_v)^2 + \dot{\epsilon}_{xy}^2 + \dot{\epsilon}_{xz}^2 + \dot{\epsilon}_{yz}^2 \}}$$

$\dot{\epsilon}_v$: 체적변형률 속도(/sec)

f_c : 일축 압축강도(MPa)

f_t : 일축 인장강도(MPa)

E : 콘크리트 탄성계수(MPa)

또한, CSCM Concrete 모델은 요소의 응력상태에 따라 일정한 기준에 의해 요소를 삭제시키는 eroding 기능을 가지고 있으며, 적절한 damage parameter를 정의하여 인장 및 압축파괴 현상을 모사할 수 있다. 본 해석에서는 기존 연구결과(KINS, 2011)를 참고하여 damage parameter를 최대 주변형률의 140% 수준이 되는 시점에서 요소가 삭제되는 것으로 정의하였다.

2.2.2 강재

철근과 충격체는 PLASTIC KINEMATIC 모델을 적용하였으며, 완전 탄소성 거동을 보인다고 가정하였다. RC벽체의 철근 및 SC벽체에 사용된 강관의 재료특성을 정리하면 Fig. 5 and Table 2와 같다. 변형률 속도 증가에 따른 강도증가 효과는 Cowper-Symonds (Su et al., 1995)가 제안한 Eq. (4)를 적용하였다. Eq. (4)에서 C와 p는 각각 일반 구조강재에 대해서 제안된 $40s^{-1}$, 5를 적용하였다(Su et al., 1995). 충돌해석 시 적용된 충격체의 재료특성은 Fig. 5(c) and Table 2와 같으며, 충격체의 탄성계수 및 항복강도는 Sugano et al. (1993b)이 제안한 이상화된 항공기 엔진 모델의 값을 사용하였다.

$$\frac{f_y^d}{f_y^s} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/p} \quad (4)$$

- f_y^s, f_y^d : 정적, 동적 하중시의 항복강도(MPa)
- $\dot{\epsilon}$: 변형률 속도(sec)
- C, p : 재료상수

3. 해석결과

3.1 손상 모드

충돌시간 100msec에서의 SC벽체 및 RC벽체에 대한 각 모델의 충돌 단면 및 충돌 바닥면에서의 변형 형상을 Figs. 6 and 7에 나타내었다. SC벽체의 손상모드는 벽체 후면의 강관에 의해 바닥면 콘크리트의 스캐빙이 방지되어 관입으로 나타났으며, 모든 경우에 있어서 하부 강관의 파괴는 발생하지 않았다. 각 모델의 내부 콘크리트 단면에서는 shear cone 형상의 손상이 발생하였으며, 벽체의 강성이 증가할수록 즉, 콘크리트 벽체의 두께 및 강재비가 증가할수록 단면의 shear cone 현상과 하부 강관의 변형정도 및 변형범위는 감소하는 경향을 보였다. 특히, SC벽체 중 벽체 콘크리트의 두께가 가장 두꺼운 SC_1,220mm는 강재비 $\rho_p = 1.0\%$ 인 경우에서도 단면의 손상 및 하부 강관의 변형이 거의 발생하지 않았으며, 처짐 또한 크게 나타나지 않았다. 따라서 벽체 콘크리트의 두께가 어느 일정수준 이상으로 확보 된다면 강재비가 국부손상에 미치는 영향이 상대적으로 감소하는 경향을 보였다.

RC벽체에서는 SC벽체와 달리 단면에서의 shear cone 형상의 손상이 발생하지 않고 벽체 후면의 콘크리트 회복이 탈락하는 스캐빙이 발생하였다. 스캐빙은 충격체 충돌 초기에 발생하였으며, 벽체 콘크리트 후면의 스캐빙 발생 범위는 철근비가 증가할수록, 벽체의 두께가 증가할수록 감소하는 경향을 보였으나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 기존 연구결과에서 철근 직경 및 철근비가 일정 값 이상이 되면 상부 철근에 의한 충격체의 속도 감소효과가 증가하여 후면 콘크리트의 탈락면적은 수렴하는 경향을 보이는 것으로 확인되었다(Choi et al., 2011). 또한, RC벽체의 변형은

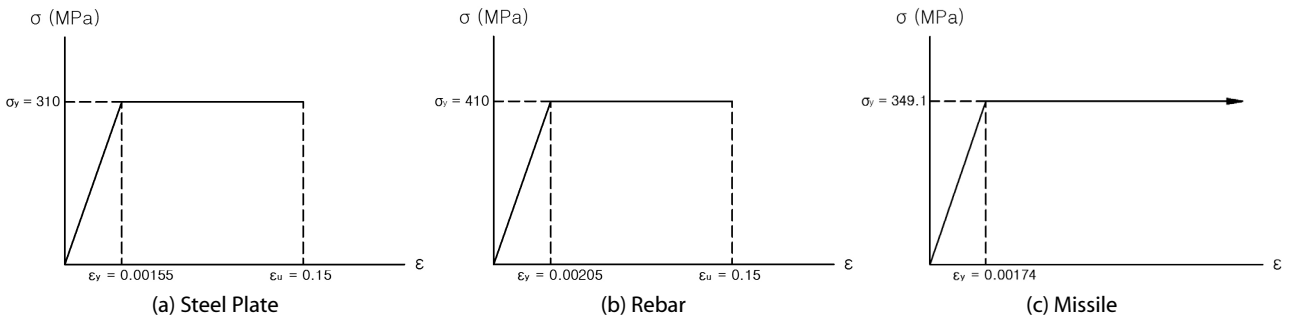


Fig. 5. Stress-Strain Curve for Various Steels

Table 2. Material Properties of Various Steels

	Modulus of elasticity (MPa)	Poisson's ratio	Yield strength (MPa)	Failure strain
Steel plate	200,000	0.3	310.0	0.15
Rebar	200,000	0.3	410.0	0.15
Missile	201,000	0.3	349.1	0.00

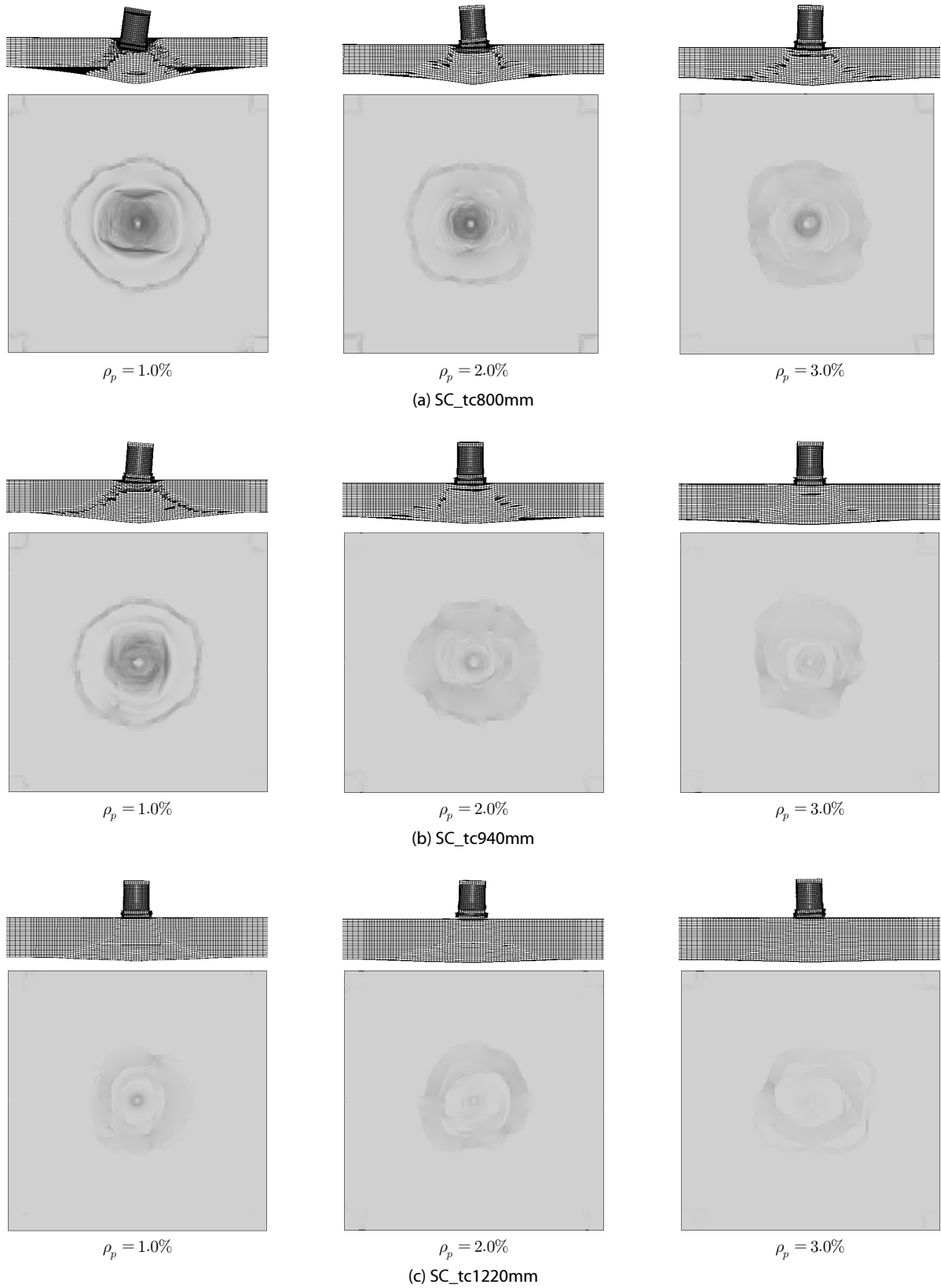


Fig. 6. Local Damage of SC Walls for Various Thickness

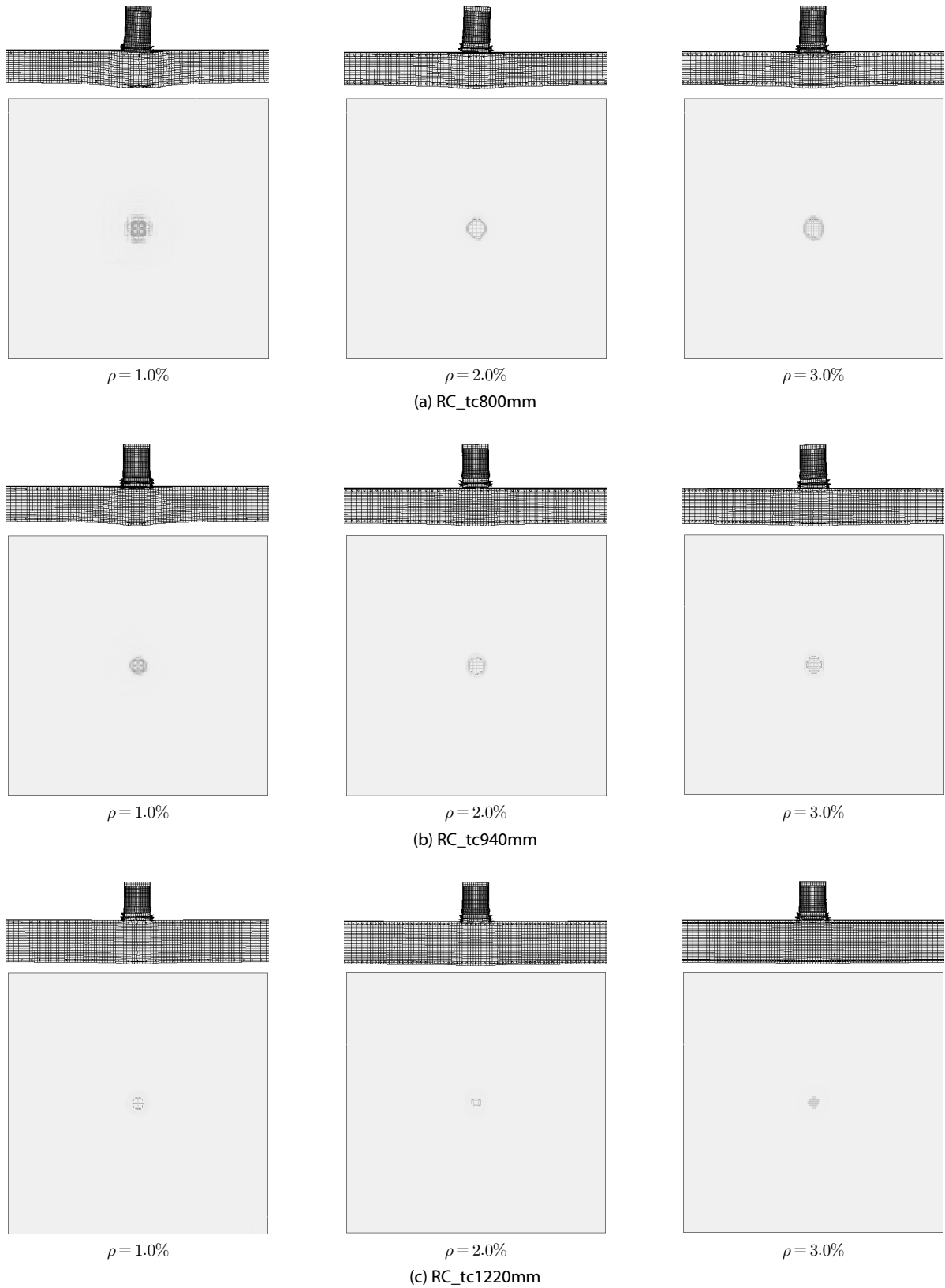


Fig. 7. Local Damage of RC Walls for Various Thickness

SC벽체에 비해 훨씬 적게 나타났다. 이러한 현상은 벽체의 두께가 비교적 얇은 경우에 크게 나타나는데, 이것은 Fig. 6에서도 나타났듯이 벽체의 강성이 작은 SC벽체에서는 내부 콘크리트 손상이 큰 반면, RC벽체에서는 상부철근의 충격체 속도 감소효과에 의해 벽체 내부에서의 콘크리트 손상이 거의 발생하지 않기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 관입 깊이

관입이란 충돌 전면의 손상으로 전면에 콘크리트 파편 및 패인 구멍이 형성되는 현상을 의미하므로 본 연구에서는 충격체가 벽체에 삽입된 깊이를 관입깊이로 하였다.

SC벽체와 RC벽체의 벽체 콘크리트 두께 및 강재비에 따른 관입깊이를 비교하면 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 보면, SC벽체는 RC벽체에 비해 벽체의 두께증가에 따라 관입깊이가 크게 감소되어 벽체의 두께, 즉 벽체의 강성에 보다 민감한 반응을 보이는 것으로 나타났으며, 동일한 콘크리트 벽체 두께 및 강재비를 갖는 경우, RC벽체가 SC벽체에 비해 관입깊이가 적게 나타났다. 이러한 현상은 강재비가 서로 동일하더라도 국부적인 충돌면 위치에서는 SC벽체의 강관 두께가 RC벽체의 철근지름에 비해 얇기 때문에 상대적으로 SC벽체의 초기 충돌하중에 대한 충돌속도 감소효과가 부족하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 SC_tc1220mm에서와 같이 SC벽체의 콘크리트 벽체 두께가 두꺼워지면 동일한 콘크리트 벽체 두께를 갖는 RC벽체의 관입깊이에 근접한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 관입깊이 관점에서는 SC벽체의 벽체 두께가

어느 일정수준 이상으로 확보된다면 최소의 강재 사용으로 RC벽체와 유사한 수준의 성능 확보가 가능할 수 있을 것으로 판단된다.

또한, SC벽체 및 RC벽체 모두 콘크리트 벽체가 두꺼워질수록, 강재비가 클수록 관입깊이는 감소하는 경향을 보였다. 그러나 SC_tc1220mm에서와 같이 SC벽체의 경우에서는 콘크리트 벽체의 두께가 일정두께 이상이 되면 관입깊이가 강재비의 증가에 관계없이 일정하게 나타났다. 이것은 콘크리트 벽체의 두께가 두꺼워지면 벽체 자체의 강성으로 충격하중에 저항하는 내충격력이 충분하여 상대적으로 강재의 충격 저항 효과가 미비하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 9에 나타난 것 같이 콘크리트 벽체 두께 tc=1220mm이지만 강재가 배치되지 않은 무근 콘크리트에서는 벽체 전면에서의 충격체 관입은 크게 발생하지 않지만 벽체 내부 및 후면에서는 콘크리트가 탈락하는 큰 손상이 발생하는 것으로 나타났다. Figs. 6(c) and 9를 비교해 보면, 강재비의 영향이 크지 않은 벽체 두께(tc=1220mm)를 갖는 경우에도 강재 배치 유무에 따라 벽체 콘크리트의 손상 정도가 매우 큰 차이를 보인다. 따라서 콘크리트 벽체가 두껍다고 하더라도 벽체의 내부 손상을 감소시키기 위해서는 최소한의 강재가 반드시 필요하다. 이와 같이 벽체 후면에 배치된 강관은 벽체 후면의 콘크리트 파편을 보유하여 스캐밍 손상을 방지할 뿐만 아니라 벽체 내부 콘크리트의 손상을 크게 감소시킨다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8에 나타난 해석결과의 회귀분석을 통해 강재비 및 콘크리트 벽체 두께에 따른 SC벽체 및 RC벽체의 관입깊이를 예측식을 Eq. (5)와 같이 제안하였다. Eq. (5)는 콘크리트 강도, 충격체의 중량 및 형상 등 다양한 변수가 고려되어 도출된 식이 아니기 때문에 SC벽체의 설계에 적용하기에는 다소 무리가 있지만 콘크리트 설계기준강도가 $f_{ck} = 40MPa$ 이고 연성충격체의 충돌속도가 $v = 150m/sec$ 인 제한적인 충격체에 대해서 강재비 및 콘크리트 벽체 두께에 따른 SC벽체 및 RC벽체의 관입깊이를 예측할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 10은 충돌해석결과 및 제안된 식을 비교한 그림이며, 실선으로 표현된 것은 제안된 관입깊이 Eq. (5)에 의해 도출된 결과이다.

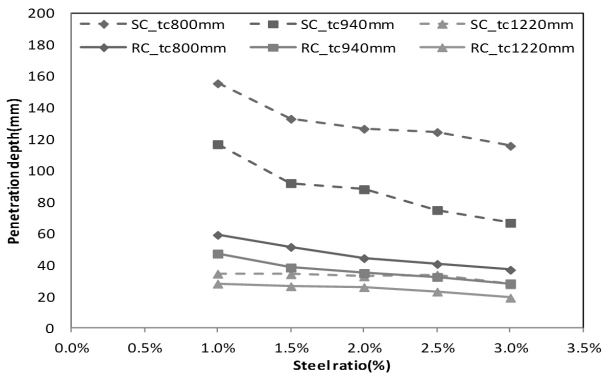


Fig. 8. Comparison of Penetration Depths for Different Thicknesses

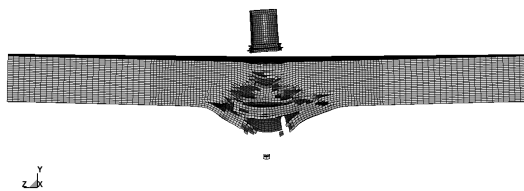


Fig. 9. Local Damage of Plain Concrete (tc=1220mm)

$$d_{p,sc} = 10^{11.4} \cdot \rho_p^{-0.31} \cdot t_c^{-3.37} \tag{5a}$$

$$d_{p,rc} = 10^{5.38} \cdot \rho^{-0.4} \cdot t_c^{-1.52} \tag{5b}$$

- 여기서, $d_{p,sc}$: SC벽체의 관입깊이(mm)
- $d_{p,rc}$: RC벽체의 관입깊이(mm)
- ρ_p : SC벽체의 강재비
- ρ : RC벽체의 철근비
- t_c : 콘크리트 벽체 두께(mm)

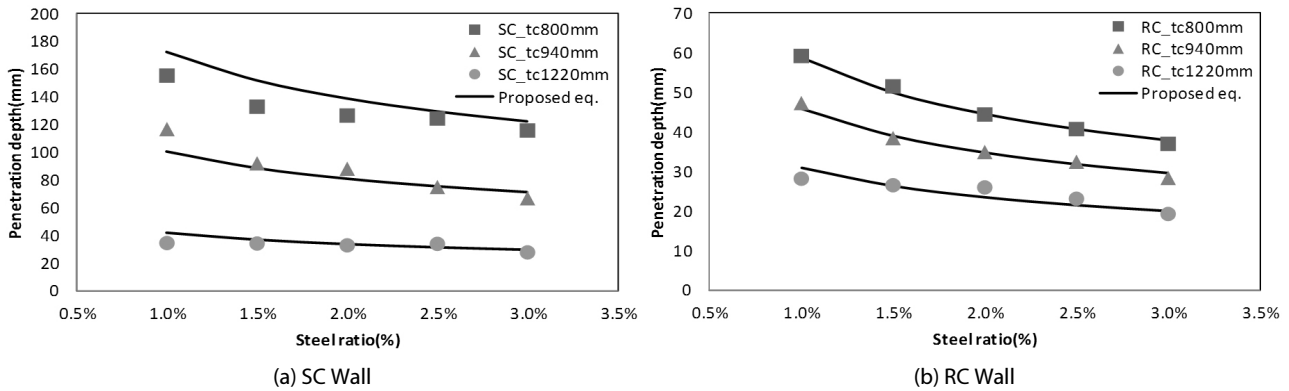


Fig. 10. Comparison of Analysis Results to Predicted Penetration Depths using Eq. (5)

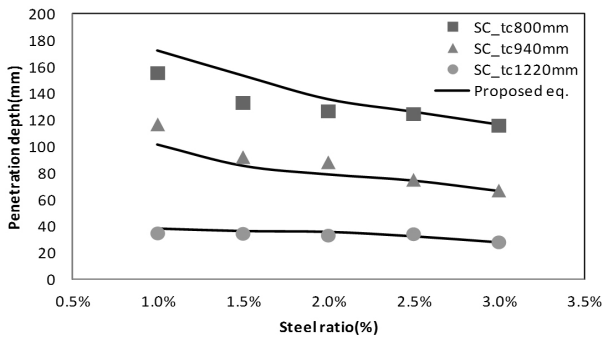


Fig. 11. Comparison of Analysis Results to Predicted Penetration Depths using Eq. (6)

해석결과 및 Eq. (5)로부터 SC벽체의 관입깊이와 RC벽체의 관입깊이에 대한 상호 관계식을 도출하면 Eq. (6)과 같으며, 해석결과와 제안된 식을 비교하면 Fig. 11과 같다. RC벽체의 관입깊이를 알고 있을 경우, Eq. (6)으로부터 SC벽체에 대한 관입깊이를 예측하여 RC벽체와의 상대적인 비교가 가능할 것으로 판단된다.

$$d_{p,sc} = 10^{6.92} \cdot d_{p,rc}^{0.83} \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho}\right)^{-0.54} \cdot t_c^{-2.12} \quad (6)$$

- 여기서, $d_{p,sc}$: SC벽체의 관입깊이(mm)
- $d_{p,rc}$: RC벽체의 관입깊이(mm)
- ρ_p : SC벽체의 강재비
- ρ : RC벽체의 철근비
- t_c : 콘크리트 벽체 두께(mm)

3.3 강판 변형률

Fig. 9에서 나타난 것 같이 SC벽체에서는 벽체 후면의 강판이 콘크리트 벽체의 내부 손상 감소 및 스캐빙 손상을 방지하는 역할을

하기 때문에 후면 강판의 거동이 중요하다고 할 수 있다. SC벽체 후면 강판의 벽체 두께별 강판비에 따른 변형률-시간이력을 Fig. 12에 나타내었다. 모든 경우에 있어서 강판의 변형률이 항복상태 ($\epsilon_y = 0.00155$)는 초과하였으나 파괴변형률($\epsilon_u = 0.15$)에는 도달하지 않아 강판의 파단은 발생하지 않았다. 강판의 변형이 가장 많이 발생하는 SC_tc800mm_1.0%에서도 파괴변형률까지는 충분한 여유가 있는 것으로 나타났다. 강판의 변형률은 강재비가 클수록, 벽체 콘크리트의 두께가 두꺼워질수록 감소하는 것으로 나타났으며, 이것은 벽체의 강성이 클수록 충격력에 의한 벽체의 변형이 적게 발생하기 때문이다. 강판의 변형량은 강판 자체의 두께뿐만 아니라 벽체의 강성과도 관련이 있으므로 벽체 콘크리트의 두께를 증가시키면 강판의 두께를 보다 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 최대 처짐

Fig. 13은 벽체 후면 중앙부에서의 최대 처짐을 나타낸 그림이다. 여기서, RC벽체는 스캐빙에 의해 콘크리트가 탈락함에 따라 측정이 불가능하여 하부철근의 상대변위를 측정하였다. 관입깊이와 마찬가지로 RC벽체에 비해 SC벽체의 처짐량은 콘크리트 벽체 두께가 두꺼워질수록 급격하게 감소하는 것으로 나타났으며, 콘크리트 벽체 두께가 비교적 얇은 경우에는 강재비의 증가에 따라 비례적으로 감소하는 경향을 보였다. 그러나 관입깊이의 경우와 마찬가지로 SC_tc1220mm와 같이 콘크리트 벽체의 두께가 어느 일정 두께 이상이 되면 강판의 영향이 미비하여 처짐 역시 강재비에 관계없이 일정하게 나타났다. 이것은 Fig. 6의 충돌단면 형상에서 나타내었듯이 콘크리트 벽체의 두께가 비교적 얇은 경우에는 강재비의 증가에 따라 벽체의 shear cone 형상의 내부 손상이 크게 감소하여 비례적으로 처짐이 감소하는 반면, 벽체 두께가 두꺼운 경우에는 강재비의 증가 여부와 관계없이 내부 손상 정도의 차이가 크지 않기 때문에 처짐 역시 강재비에 따라 큰 차이가 없는 것으로

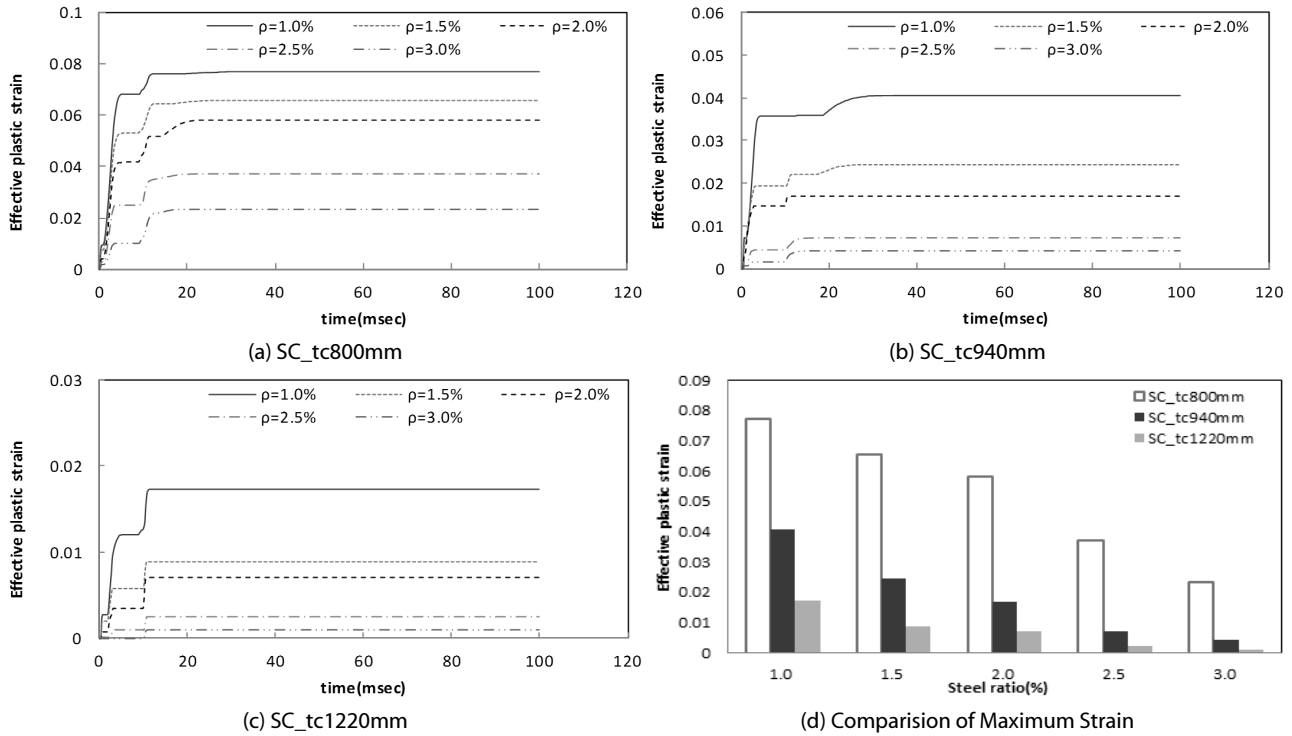


Fig. 12. Steel Strain-Time History of Back Face in SC Wall

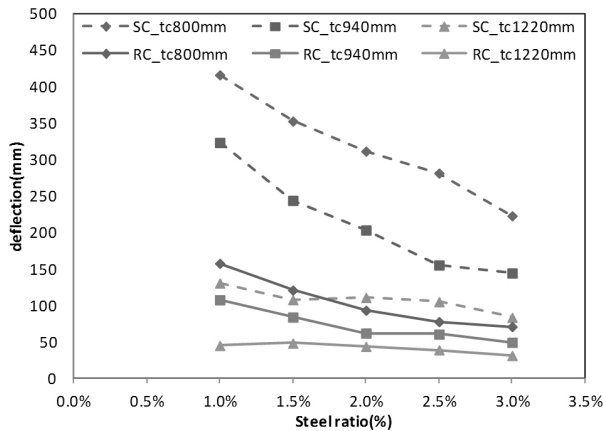


Fig. 13. Comparison of Maximum Displacement

판단된다. 또한, 동일한 콘크리트 벽체 두께 및 강재비를 갖는 경우, SC벽체는 RC벽체에 비해 훨씬 큰 처짐이 발생하는 것으로 나타났다. 이것 역시 RC벽체는 내부 손상이 거의 없는 반면, SC벽체는 내부 콘크리트의 shear cone 형상의 손상으로 인한 단면감소가 발생하기 때문이며, SC벽체는 RC벽체에 비해 초기 충돌속도의 감소효과가 부족하여 상대적으로 벽체 내부 전체에 걸쳐 비교적 큰 충격력이 전달되기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

이 연구에서는 충돌속도가 150m/sec인 F-4D의 이상화된 항공기 엔진을 대상으로 콘크리트 벽체의 두께 및 강재비를 변수로 충돌해석을 수행하였다. 해석결과로부터 SC벽체 및 RC벽체의 국부거동을 평가하였으며, SC벽체의 강재비와 동일한 철근비를 갖는 RC벽체와 비교분석하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) RC벽체에서는 벽체 후면의 콘크리트 파복이 탈락하는 스캐빙이 발생하였으나 SC벽체의 손상모드는 벽체 후면의 강판에 의해 콘크리트의 스캐빙이 방지되어 관입으로 나타났다. SC벽체의 후면에 배치된 강판은 벽체 후면 콘크리트 파편의 보유 역할 뿐만 아니라 벽체 콘크리트의 내부 손상을 크게 감소시키는 것을 확인하였다.
- (2) 콘크리트 벽체의 두께가 비교적 얇은 SC벽체의 경우는 유사한 조건의 RC벽체에 비해 관입 및 변형이 크게 나타났다. 이것은 상대적으로 강성이 작은 SC벽체의 내부 콘크리트 손상이 크게 발생하기 때문이다. 그러나 SC벽체는 벽체의 강성, 즉 벽체 두께의 영향을 많이 받기 때문에 RC벽체에 비해 벽체 두께가 증가함에 따라 관입깊이 및 처짐 등이 큰 폭으로 감소되는 것으로 나타났으며, 콘크리트 벽체의 두께가 어느 일정 두께

이상이 되면 강재비에 관계없이 일정하게 나타나는 경향을 보였다. 특히 관입깊이는 SC벽체의 콘크리트 벽체 두께가 두꺼워지면 동일한 콘크리트 벽체 두께를 갖는 RC벽체에 근접한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 관입깊이 관점에서는 콘크리트 벽체의 두께가 일정수준 이상으로 확보된다면 최소한의 강재 사용으로 RC벽체 수준의 성능 확보가 가능할 것으로 판단된다.

- (3) 충돌해석결과의 회귀분석을 통해 강재비와 벽체 두께에 따른 SC벽체와 RC벽체의 관입깊이 예측식 및 SC벽체와 RC벽체의 상호 관계식을 도출하였다. 제안된 식을 통해 콘크리트의 설계기준강도가 $f_{ck} = 40MPa$ 이고, 연성충격체의 충돌속도가 $v = 150m/sec$ 일 경우, 강재비와 벽체 두께에 따른 SC벽체 및 RC벽체의 관입깊이를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 이상의 결과에서 보면, 콘크리트 벽체 두께증가에 따라 SC벽체는 RC벽체 수준의 국부거동을 보일뿐만 아니라 SC벽체의 강관은 벽체 콘크리트의 스케빙을 방지하여 콘크리트 파편에 의한 내부 기기 손상 및 콘크리트의 균열에 의한 방사능 유출을 막을 수 있으므로 SC벽체는 국부충돌에 있어서 원자력 격납구조물로서 매우 효과적인 구조라고 판단된다.
- (5) 본 연구는 이상화된 항공기 엔진 충격체에 대한 국부충돌해석의 결과로서, 콘크리트 벽체 두께 및 강관의 강재비를 변수로 한 SC벽체의 국부손상 평가 및 관입깊이 관점에서 RC벽체와의 상대비교에 대한 내용이다. 향후 SC벽체에 대한 보다 합리적이고 정확한 국부거동 평가를 위해서는 SC벽체의 충돌실험을 통한 연구가 수반되어야 할 것으로 판단된다.

References

CEB (Comite Euro-international du Beton) (1993). *CEB-FIP Model Code*.

Choi, H., Chung, C. H., Yoo, H. K. and Kim, S. Y. (2011). "Effect of reinforcement ratio and impact velocity on local damage of RC slabs." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 31, No. 4A, pp. 311-321 (in Korean).

Korea Institute of Nuclear Safety (KINS) (2005). *Resistance ability evaluation of safety-related structures for the simulated aircraft accident*, KINS/HR-654 (in Korean).

Korea Institute of Nuclear Safety (KINS) (2011). *Validation of the aircraft crash assessment method using numerical simulation*, KINS/HR-1072 (in Korean).

Kojima, I. (1991). "An experimental study on local behaviour of reinforced concrete slabs to missile impact." *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 130, pp. 121-132.

Li, Q. M. and Chen X. W. (2003). "Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile." *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 28, No. 1, pp. 93-116.

Livemore Software Technology Corporation (LSTC) (2007). *LS-DYNA keyword user's manual*, California.

Mizuno, J., Koshika, N., Morikawa, H., Wakimoto, K., Kobayashi, K. and Fukuda, R. (2005). "Investigation on impact resistance of steel plate reinforced concrete barriers against aircraft impact: Part 2. Simulation Analyses of Scale Model Impact Tests." *Transactions of the 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology SMiRT-18*, Vol. J J05-2, pp. 2580-2590.

Morikawa, H., Mizuno, J., Momma, T., Fukuda, R., Tajeuchi, M. and Shikama Y. (1999). "Scale model tests of multiple barriers against aircraft impact: Part 2. Simulation Analyses of Scale Model Impact Tests." *Transactions of the 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology SMiRT-15*, Vol. 4, pp. 145-152.

Sliter, G. E. (1980). "Assessment of empirical concrete impact formulas." *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 106, No. 5, pp. 1023-1045.

Su, X. Y., Yu, T. X. and Reid, S. R. (1995). "Inertia-Sensitive impact energy-Absorbing structures Part II: Effect of Strain Rate." *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 673-689.

Sugano, T., Tsubota, H., Kasai, Y., Koshika, N., Orui, S., Riesemann von, W. A., Bickel, D. C. and Parks, M. B. (1993a). "Full-scale aircraft impact test for evaluation of impact force." *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 140, pp. 373-385.

Sugano, T., Tsubota, H., Kasai, Y., Koshika, N., Ohnuma, H., Riesemann von, W. A., Bickel, D. C. and Parks, M. B. (1993b). "Local damage to reinforced concrete structures caused by impact of aircraft engine missiles. Part 1. Test program, method and results." *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 140, pp. 387-405.

Walter, T. A. and Wolde-Tinsae, A. M. (1984). "Turbine missile perforation of reinforced concrete." *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 110, No. 10, pp. 2439-2455.