

항공기 충돌에 대한 격납건물의 동적거동에 대한 연구

A Study on the Dynamic Behaviour of Containment Building subjected to Aircraft Impact

이상진, 이영정, 서정문
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

이 논문은 저차 고체요소를 이용하여 항공기가 격납건물에 충돌할 경우에 발생하는 원전 격납건물의 동적거동을 분석하고 그 결과를 기술하였다. Drucker-Prager항복기준을 바탕으로 콘크리트 재료의 항복면과 파괴면을 형성하였으며 콘크리트의 소성변형이 누적 되면 이들이 가변하는 것으로 가정하였다. 철근은 변형도에 의존적인 탄성/점소성모델을 도입하여 재료적 특성을 모사하였다. 동적 시간이력해석을 수행하기 위하여 안정적인 수렴성을 나타내는 암시적인 Newmark법을 도입하였으며 균열변형률의 수준과 충돌항공기 종류에 따른 격납건물의 동적거동에 대한 해석결과를 정량적으로 제시하였다.

Abstract

The main purpose of this study is to investigate the dynamic behaviour of containment building in nuclear power plant excited by aircraft impact loading using a lower order 8-node solid element. The yield and failure surfaces for concrete material model are formulated on the basis of Drucker-Prager yield criteria and those are assumed to be varied by taking account of the visco-plastic energy dissipation. The implicit Newmark method is adopted to guarantee the numerical stability during the analysis. Finally, the effect of different levels of cracking strain and several types of aircraft loading are examined on the dynamic behaviour of containment building and the numerical results are provided in this paper.

1. 서 론

원자력발전소의 격납건물은 사고시 발생하는 내압과 지진 또는 항공기충돌과 같은 외부하중으로부터 방사능 물질이 외부로 누출되지 않게 하고 또한 내부기기와 시스템을 보호하는 역할을 한다. 따라서 내압 또는 외부하중에 대한 격납건물의 구조적 저항성능을 분석하고 평가하는 것은 가동중인 원전이나 앞으로 건설될 원전의 안전성을 위해 매우 중요하다. 항공기 충돌에 대한 격납건물의 거동특성을 예측하기 위해서는 다양한 기술의 축적이 필요하다. 특히 항공기충돌에 대한 충돌함수의 유도가 필요하며 거대구조물의 동적해석을 수행하기 위해 저차요소의 개발이 요구된다. 또한 항공기 충돌에 대한 철근콘크리트 재료의 거동특성을 적절히 표현할 수 있는 재료모델이 필요하다.

항공기 충돌에 대한 격납건물의 거동해석은 문헌상에서 고차의 고체요소^{1),2),3)}나 고차의 셸요소^{4),5)}를 이용한 결과는 찾아볼 수 있으나 저차고체요소를 이용하여 소성변형을 고려한 격납건물의 항공기 충돌해석결과는 그 예를 찾아보기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 저차고체요소를 도입하여 항공기 충돌하중을 받는 한국원전 격납건물의 동적거동을 분석하고 그 결과를 기술하고자한다. 본 연구에서는 충돌하중함수를 도출하기 위하여 비교적 보수적인 값을 도출하는 Riera방식⁶⁾을 이용하였으며 동적비선형해석을 통하여 균열 변형도의 수준과 항공기의 종류에 따른 격납건물의 동적거동을 정량적으로 제시하였다.

2. 콘크리트 재료모델

2.1 항복면과 파괴면

본 연구에서는 Drucker-Prager의 항복기준⁷⁾을 바탕으로 다음과 같이 정의한 항복면과 파괴면을 이용하였다⁸⁾.

$$\begin{aligned} F_o(I_1, J_2, \sigma_o) &= aI_1 + \sqrt{(aI_1^2 + 3\beta J_2)} - \sigma_o = 0 \\ F_f(I_1, J_2, \sigma_f) &= aI_1 + \sqrt{(aI_1^2 + 3\beta J_2)} - \sigma_f = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 I_1 와 J_2 는 각각 첫번째와 두번째 응력불변항을 나타낸다. σ_o 과 σ_f 는 항복응력값과 파괴응력값을 나타내며 콘크리트의 일축압축실험으로부터 구할 수 있다. 참고로 식(1)은 매개변수의 값이 $\alpha=0.1775$ 와 $\beta=1.355$ 이면 Kupfer의 실험결과⁹⁾와 유사한 응력포락선을 형성한다. 콘크리트의 손상이 누적되면 항복면과 파괴면이 가변하는 것으로 가정하였는데 이는 식(1)을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} F_o(I_1, J_2, \sigma_o(W_p, k)) &= 0 \\ F_f(I_1, J_2, \sigma_f(W_p)) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)을 정의하는 주된 요소는 콘크리트에 누적되는 손상의 양을 측정하기 위해서 도입되는 점소성 일의 항 W_p 이며 이를 정의하면 다음과 같다.

$$W_p = \int_0^t \sigma^T \epsilon_{vp}^{\square} dt \quad (3)$$

여기서 점소성 변형률 ϵ_{vp}^{\square} 는 다음과 같다.

$$\epsilon_{vp}^{\square} = \gamma \left\langle \frac{F_o}{a_1 f_c} \right\rangle \frac{\partial f}{\partial \sigma} \quad (4)$$

여기서 $\langle \rangle$ 기호는 점소성플로우가 $F_o > 0$ 일때만 유효한 것을 의미하며 유동성 파라메타 γ 는 다음과 같다.

$$\gamma = a_o \left(\sqrt{\frac{3J_2}{(1+\nu)^2}} \right)^{a_1} \quad (5)$$

여기서 a_o 와 a_1 은 실험데이터로부터 그 값이 정해진다. 또한 재료의 손상정도에 따른 콘크리트 재료의 연성부분에서 발생하는 점소성일에 대한 밀도는 다음과 같이 정의된다.

$$k = W_p - W_p^f = \int_{t_f}^t \sigma^T \epsilon_{vp}^{\square} dt \quad (6)$$

여기서 t_f 는 응력이 파괴면에 도달하는 시간을 나타낸다.

따라서 콘크리트의 항복응력 σ_o 은 지수함수의 형태로 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} \sigma_o(W_p, k) &= a_1 f_c & W_p \leq W_p^f \\ \sigma_o(W_p, k) &= a_1 f_c \exp(-\alpha_c k) & W_p > W_p^f \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 α_1 은 탄성거동의 한계치를 나타내고, α_c 는 파괴이후의 성능저하를 고려하는 매개변수이다. 그리고 f_c 은 콘크리트의 압축강도를 나타낸다.

또한 파괴응력값 σ_f 은 다음과 같이 정의하였다.

$$\sigma_f(W_p) = \beta_o f_c \exp(1 - \beta_1 W_p) \quad 0 < W_p \leq W_p^f \quad (8)$$

여기서 β_o 와 β_1 는 실험데이터^{10),11)}로부터 그 값이 결정된다.

2.2 균열기준

본 연구에서는 콘크리트의 최대 주응력이 한계값을 초과하면 주응력방향의 직각인 면에 균열이 생기는 것으로 가정하였다. 균열이 생기면 콘크리트는 이방성재료로 간주되며 이방성재료의 국부 좌표계는 주응력의 방향과 일치하는 것으로 가정하였다. 그리고 균열의 방향은 균열이 생긴 후 고정되는 것으로 가정하였으며 각 적분점에 최대 두 개의 균열을 허용하였다. 즉 첫번째 균열이 생기면 그 방향을 계산한 뒤 고정시키고 고정된 균열에 평행한 면의 최대응력을 계산한다. 계산 시에는 균열에 평행한 면의 수직응력과 전단응력만을 고려하였다. 계산된 최대응력이 주어진 한계값을 초과할 때 두번째 균열이 첫번째 균열의 직각방향으로 생긴다고 가정하였다.

2.3 변형도연화

본 연구에서는 콘크리트의 변형도연화를 지수함수의 형태로 다음과 같이 고려하였다.

$$\sigma = E_o \varepsilon_f (\exp(-(\varepsilon - \varepsilon_f)/\alpha)) \quad (9)$$

여기서 ε_f 는 균열변형도를 나타내며 연성매개변수는 $\alpha = G_f/f_t' \ell_c$ 이다. 각 적분점에서의 유효 길이 ℓ_c 는 $(dV)^{1/3}$ 로 정의되며 dV 는 유한요소 적분점에서의 콘크리트의 부피를 나타낸다. 이때 균열을 발생시키는 파괴에너지는 다음과 같이 정의하였다.

$$G_f = \int_0^\infty \sigma dw \quad (10)$$

여기서 σ 는 균열면에 수직인 응력이고 w 는 균열폭을 나타낸다.

도입된 연화모델은 순수콘크리트재료의 변형도연화만을 고려하였고 철근의 부착으로 인해 발생하는 인장경화현상(tension stiffening effect)은 고려하지 않았다. 그러나 인장경화효과는 일반콘크리트보다 철근콘크리트에 대한 파괴에너지를 높게 가정함으로써 구현하였다. 그리고 다른 적분점에서의 균열로 인한 응력의 재분배는 이미 발생한 균열을 부분적으로 또는 완전히 닫히게 할 수 있는 것으로 가정하였다. 현재의 변형도가 균열에 수직인 최대인장 변형도로 기록된 ε_{ref} 보다 작다면 균열에 수직인 응력 σ 는 다음식으로 계산할 수 있다.

$$\sigma = \frac{\sigma_{ref}}{\varepsilon_{ref}} \varepsilon \quad (11)$$

여기서 σ_{ref} 는 변형도 ε_{ref} 에 상응하게 보간된 응력값이다. 균열의 재개는 변형도 ε_{ref} 값을 초과할 때까지 같은 경로를 따른다.

2.4 균열면에서의 전단

콘크리트는 균열발생이후에도 균열면을 따라서 상당한 양의 전단응력을 전달할 수 있다. 콘크리트의 전단력 이동체계가 골재의 맞물림 작용에 의해 주도되므로 골재의 크기와 입도가 주요변수로 작용한다. 그리고 철근콘크리트에서는 다우얼(dowel)작용이 중요 하므로 철근비, 철근의 크기 그리고 균열과 철근사이의 각도등이 중요한 역할을 한다. 이러한 물리적 현상은 삼입균열모델에 직접 포함하기 어려우며 따라서 균열면에 대한 전단계수를 감소시킴으로써 전단전달체계를 구현하였다.

본 연구에서는 다음과 같이 전단감소계수를 정의하였다.

$$G_c = \beta G_o \quad (12)$$

여기서 G_o 는 균열이 발생하지 않은 콘크리트의 전단계수이고 β 는 감소계수이다. 감소계수는 일반적으로 상수값을 사용하는 경우도 있으나 본 연구에서는 감소계수 β 값을 다음과 같이 정의하였다.

$$\beta = 1 - (\varepsilon_n/0.005)^\phi \quad (13)$$

여기서 ε_n 은 균열면에 수직인 인장변형도이고 매개변수 ϕ 는 일반적으로 0.3에서 0.9사이의 값을

가진다.

2.5 압쇄기준

콘크리트의 압쇄강도는 비속(rate)에 의존하나 압쇄변형도는 비속에 의존하지 않는 것으로 간주한다. 본 연구에서는 사용한 압쇄조건은 다음과 같다.

$$3\dot{J}_2 = \epsilon_u^2 \quad (14)$$

여기서 \dot{J}_2 는 두번째 편차변형도불변항이고 ϵ_u 는 일축압축실험으로부터 구한 극한압축변형도이다.

3 철근모델

철근은 길이 방향으로 일축재료적 성질을 가진다고 가정한다.

$$\epsilon_{vps}^{\square} = \pm \gamma \frac{(|\sigma_s| - f_y)}{f_y} \quad (15)$$

여기서 σ_s 는 철근의 현재응력수준이고 f_y 는 철근의 항복응력을 나타낸다. 그리고 유동성 파라메타는 식(5)와 같이 정의하며 그 계수는 실험데이터¹²⁾로부터 결정된다. 콘크리트 내부에 배근되어 있는 철근을 표현하기 위하여 본 연구에서는 삽입법(smear method)¹³⁾을 이용하였다.

4 격납건물 동적해석

4.1 격납건물의 제원 및 유한요소해석모델

원전의 격납건물은 그림 1에 도시된 바와 같이 기초슬래브를 제외하면 상부의 돔과 하부의 실린더 벽체로 이루어진 쉘 구조물이다. 격납건물의 벽체 내벽에 부착된 강판은 구조재로서의 역할을 하기 보다는 방사능 누출을 방지하기 위한 차폐기능을 담당하므로 본 연구에서는 강판을 제외한 철근콘크리트 벽체를 구조재로 간주한다. 그리고 해석대상구조물의 복잡성을 줄이고 수치적으로 구해지는 해를 참고해로 제시하기 위하여 실구조물의 구조적인 성능을 크게 훼손하지 않는 범위 내에서 유한요소모델을 이상화하였다. 그림 1(우)에 도시된 바와 같이 생성된 유한요소모델은 기초슬래브 부분을 제외한 뒤 고정지지 된 것으로 처리하였다. 또한 격납건물의 정점부분에 가상의 개구부¹⁴⁾를 도입함으로써 유한요소의 이산화율을 용이하게 하였다. 유한요소해석에는 격납건물의 반쪽만을 이용하였으며 150개의 8절점 고체요소로 격납건물을 이산화 하였다.

격납건물에 사용된 콘크리트의 재료특성치는 탄성계수 $E_c = 2 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, 프와송비 $\nu = 0.17$, 압축강도 $f_c = 350 \text{ kg/cm}^2$, 극한압축변형도 $\epsilon_{cu} = 0.0035$, 재료밀도 $\rho = 0.245 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$, 파괴에너지 $G_f = 0.2 \text{ kg/cm}$ 이다. 그리고 콘크리트 재료모델에 사용된 매개변수는 연성매개변수 $\alpha = 1.0$, 유동성매개변수 $\alpha_o = 0.3055$ 와 $\alpha_1 = 0.76$, 연성매개변수 $\alpha_c = 10$, 파괴면매개변수 $\beta_o = 1.84$ 와 $\beta_1 = 1.09$ 이다. 철근의 재료특성치와 재료모델의 매개변수값은 탄성계수 $E_s = 2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, 프와송비 $\nu = 0.2$, 항복강도

$f_y = 4218 \text{ kg/cm}^2$, 유동성매개변수 $a'_0 = 1.539$ 와 $a'_1 = 0.971$ 이다. 철근은 그림 1(좌)에 도시한 위치에 격자형태로 배근되어 있으며 철근비는 2%이다. 콘크리트 재료모델에 사용된 매개변수는 참고문헌 13),14),15)의 값들을 도입하였다.

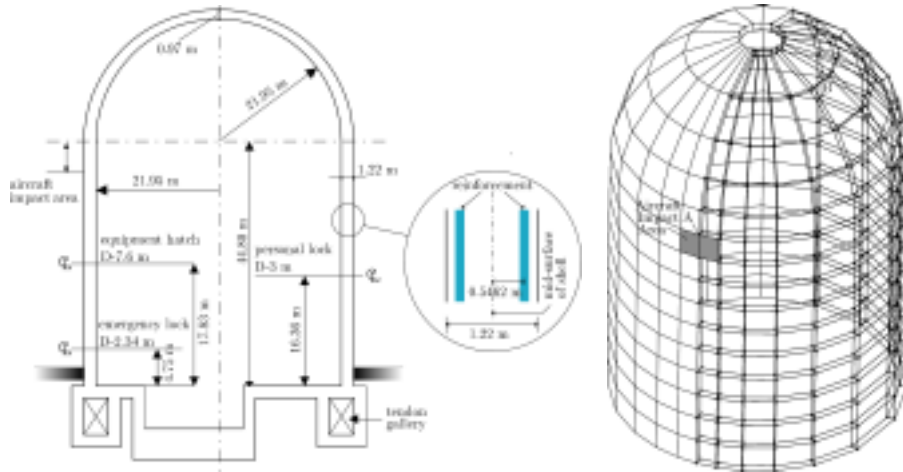


그림 1 (좌) 격납건물의 제원과 (우) 유한요소 모델

본 연구에서는 시간이력해석을 위하여 암시적인 Newmark법을 도입하였으며 적분에는 격납건물 기본주기의 약 1/160인 시간간격 $\Delta t = 0.00125 \text{ sec}$ 를 사용하였다. Newmark법의 안전성을 확보하기 위해 $\beta = 0.25$ 와 $\delta = 0.5$ 의 매개변수를 택하였으며 본 연구에서는 감쇠를 고려하지 않았다.

4.2 항공기에 의한 충돌하중

항공기의 충돌은 그 충돌위치에 따라 격납건물의 파괴나 손상도가 달라질 수 있다. 일반적으로 실린더벽체 높이의 1/2지점, 벽체와 돔의 접합부 그리고 상부돔의 정점부등이 취약한 부분¹⁵⁾으로 고려되어 왔다. 본 연구에서는 벽체와 돔의 접합부에 항공기가 충돌했을 때 나타나는 격납건물의 거동에 대해서만 조사하였다. 이때 항공기는 격납건물의 벽체에 직각인 방향으로 충돌하는 것으로 가정하였으며 충돌면은 그림 1(좌)에 도시된 바와 같이 격납건물의 돔과 실린더 접합부 아래에 위치한 28 m^2 부분이다. 항공기의 충돌에 대한 하중값은 참고문헌¹⁵⁾에서 제시된 충격하중-시간함수를 이용하였으며 도시하면 그림 2와 같다.

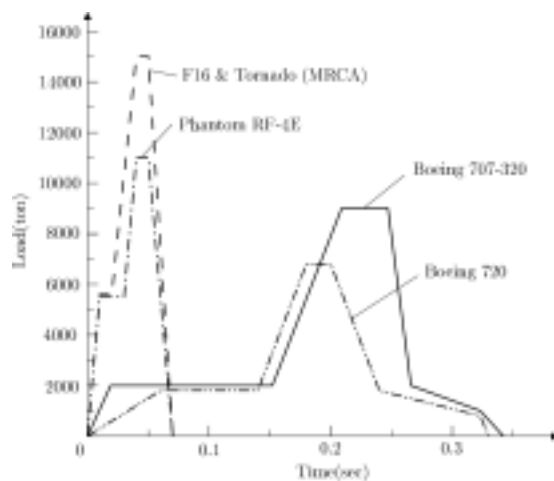


그림 2 충돌하중함수

4.3 유한요소해석

항공기 충돌에 의한 국내 원전 격납건물의 연속체 해석결과를 문헌상에서 찾기 어려워 General Electric사(미국)의 격납건물을 본 연구를 통하여 생성된 8절점 고체요소를 이용하여 해석하고 그 결과를 참고문헌^{2,3,5)}상의 결과와 비교하여 그림 3에 도시하였다. 수치해석결과로부터 본 연구를 통하여 도출된 결과는 참고문헌에서 제시된 해와 비교적 유사한 결과를 도출하였다. 특히 쉘요소를 사용하여 도출한 참고해와 매우 근접한 결과를 나타내었다.

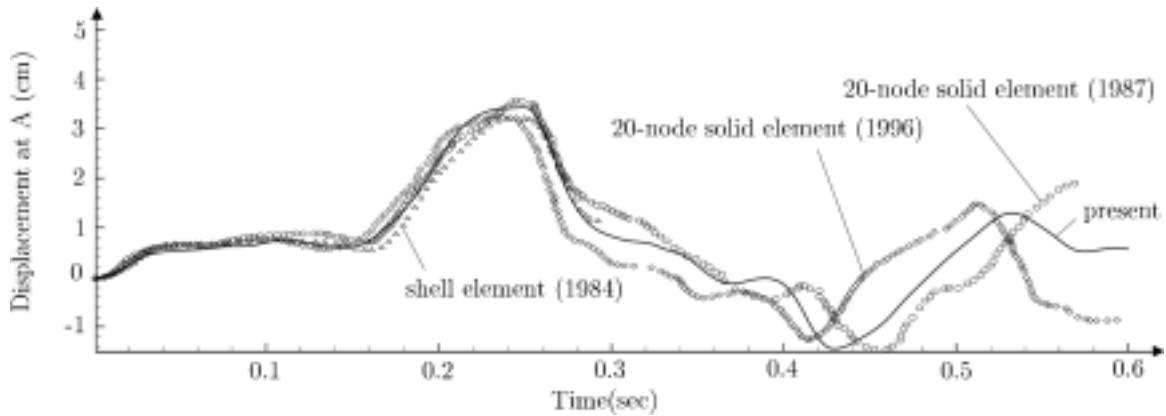


그림 3 격납건물의 변위이력

본 연구를 통하여 제시할 참고해를 도출하기 위하여 Boeing 707-320이 격납건물에 충돌할 경우의 시간이력해석을 콘크리트의 균열변형도값이 $\epsilon_t=0.00015, 0.00018, 0.00020$ 일 경우에 대해 각각 실시하였다. 시간이력해석결과로부터 충돌지점 A에서 나타나는 최대변위는 충격하중이 최대값을 통과한 직후 일어났으며 이때 각 균열변형도값이 클수록 최대변위값이 작았으며 도달시간 또한 짧았다. 동일한 충격하중에 대해 균열변형도의 값이 낮을수록 격납건물은 조기에 더 많은 양의 균열이 발생하였으며 이로 인해 격납건물의 강성의 저하가 빨리 나타났다. 이러한 강성의 저하는 궁극적으로 최대변위의 크기를 증가시키는 동시에 최대변위에 도달하는 시간을 지연하는 효과를 나타내었다. 그리고 충격하중이 작용하는 위치에서 발생하는 국부적인 변형을 제외하면 격납건물의 전체변형의 형태는 격납건물의 첫번째 고유모드¹⁶⁾에 지배적임을 알 수 있었다. 또한 항공기의 종류에 따른 격납건물의 시간이력해석을 균열변형도값 $\epsilon_t=0.00020$ 을 이용하여 수행하였다.

표1 균열변형도에 따른 A지점의 최대변위와 도달시간

균열변형도	최대변위값	도달시간
0.00015	3.662cm	0.24625sec
0.00018	3.387cm	0.24375sec
0.00020	3.157cm	0.23500sec

표 2 항공기종류에 따른 A지점의 최대변위와 도달시간

항공기	최대변위값	도달시간
F16 & Tornado	5.030cm	0.05875sec
PhantomRF-4E	3.295cm	0.05875sec
Boeing 720	1.915cm	0.20750sec

시간이력해석으로부터 계산된 변위는 항공기의 종류에 따른 충격하중함수의 특성을 충분히 반영한 이력값을 나타내었다. 특히 항공기의 종류에

무관하게 최대충격하중값이 적용된 직후에 격납건물은 최대 국소변형을 경험하였으며 점차 그 변형이 감소되었다. 각 항공기 충돌에 따른 격납건물의 최대변위와 그 도달시점은 표 2와 같다. 각 항공기에 대한 A지점과 B지점에서의 변위이력을 그림 4에 도시하였으며 이를 참고해로 제시하였다.

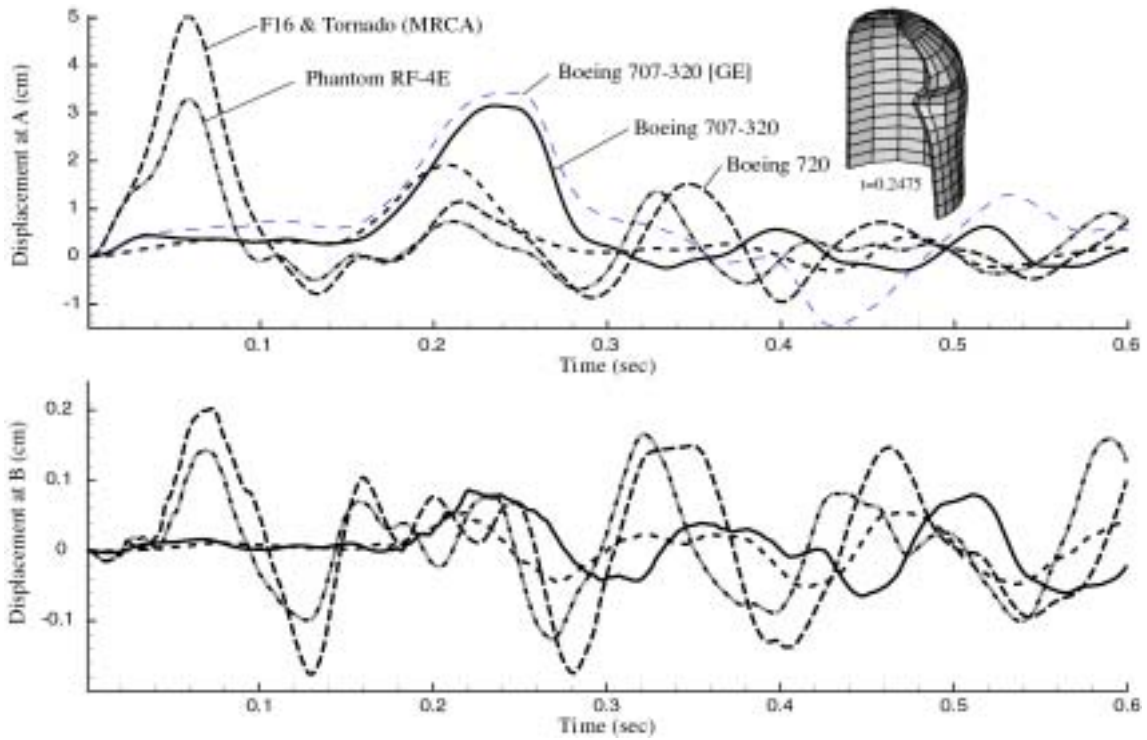


그림 4 항공기의 종류에 따른 변위이력 (좌) A 지점에서의 변위이력 (우) B 지점에서의 변위이력

5. 결론

본 연구에서는 8절점 저차 고체요소를 이용하여 철근콘크리트 셸 격납건물의 항공기 충돌해석을 수행하였다. 항공기 충돌에 의한 격납건물의 거동을 균열변형도의 수준과 항공기의 종류에 따라 분석하고 이를 정량적으로 제시하였다. 수치해석결과로부터 균열변형률값의 증가는 항공기 충돌지점의 최대변위값을 감소시켰으며 격납건물의 변위이력은 항공기 충돌함수의 특성을 충분히 반영하는 것으로 나타났다. 본 연구를 통하여 도출된 결과는 국내 원전 격납건물의 동적거동 분석을 위한 벤치마크 검사로 제시한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술부의 원자력 중장기연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] Rebora, B., Zimmerman Th. and Wolf J.P., "Dynamic rupture analysis of reinforced concrete shells," Nuclear Engineering & Design, Vol. 37, 1976, pp. 269~297
- [2] Cervera, M., Hinton, E. and Bicanic, N., "Dynamic rupture analysis of reinforced concrete structures subjected to impulsive loading," in Computational plasticity edited by D.R.J. Owen, E. Hinton and Onate, Pineridge Press, Swansea, UK, 1987
- [3] Abbas, H., Paul, D.K., Godbole, N. and Nayak, G.C., "Aircraft crash upon outer containment of nuclear power plant," Nuclear Engineering & Design, Vol. 160, 1996, pp. 13~50
- [4] Crutzen, Y. and Reyneu, J., "Disintegration of shell structures under violent dynamic loading condition," 7th SMIRT, Paper J7/1. 1983
- [5] Liu, G.Q. and Owen, D.R.J., "The dynamic nonlinear analysis of reinforced concrete plates and shells," in Numerical methods for transient and coupled problems edited by R.W. Lewis, E. Hinton, P. Bettess and B.A. Schrefler, Pineridge Press, Swansea, UK, 1984
- [6] Riera, J. D., "On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces," Nuclear Engineering & Design, Vol. 8, 1968, pp. 415~426
- [7] Hill, R., The mathematical theory of plasticity, Oxford University Press, Oxford, 1950
- [8] Bicanic, N and Zienkiewicz O.C., "Constitutive model for concrete under dynamic loading," Earthquake Eng. Struct. Dyn. Vol. 11, 1973 pp. 639~710
- [9] Kupfer, H., Hilsdirf, K.H. and Rush, H., "Behaviour of concrete under biaxial stresses," ACI Journal, Vol. 66, 1969, pp. 656~666
- [10] Hatano, T. and Tsutsumi, H., "Dynamic compressive deformation and failure of concrete under earthquake load," Proc. 2nd WCEE, Tokyo, Vol. 3. 1960, pp. 1963~1978
- [11] Hatano, T., "Relations between strength of failure, strain ability, elastic modulus and failure time of concrete," Central Research Institute of Electric Power Industry, C-6001, Tokyo. 1960
- [12] Albertini, N. and Montagnani, M., "Testing techniques based on the split Hopkinson bars," Proc. Conf. Mech. Properties of Material at high rates of strain, Oxford. 1974
- [13] 이상진, 서정문, "철근콘크리트 구조물의 비탄성해석을 위한 구절점 퇴화 쉘요소," 한국전산구조공학회 논문집, 14권 4호, 2002, pp. 481~494
- [14] 이상진, 이홍표, 서정문, "격납건물 FE모델의 정점개구부 유무에 따른 동적 특성분석," 대한토목학회 추계학술발표회, 2000, pp. 320~324
- [15] Bangash, M.Y.H., Concrete and concrete structures: Numerical Modelling and applications, Elsevier Applied Science, London and New York, 1989
- [16] Lee, S.J., Lee, Y.J. and Y.S. Choun, "On the evaluation of free vibration characteristics of containment building with a lower order solid finite element," 한국원자력학회 추계학술발표회 CD 논문집, 2002