항공기 충돌에 의해 발생하는 쉘 격납건물의 거동*

The Behaviour of Shell Containment Building induced by Aircraft Impact

이 상 진*
Lee, Sang Jin

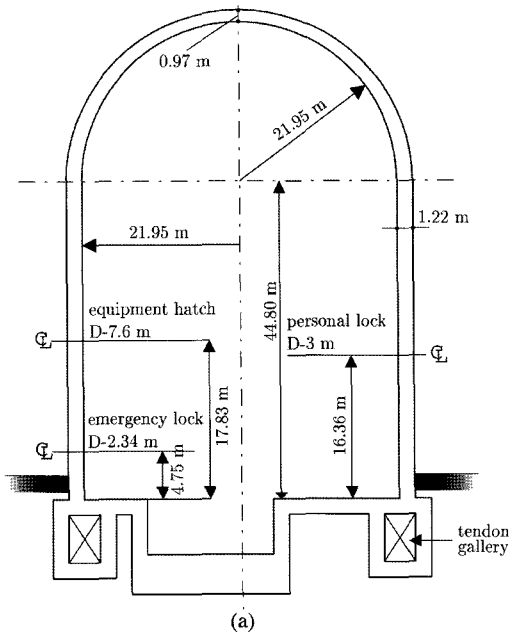
1. 서 언

원자력발전소의 쉘 격납건물은 방사능 물질이 외부로 누출되지 않게 하고 외부의 위협으로부터 내부기기와 시스템을 보호하는 역할을 한다. 따라서 사고 발생시 격납건물 내부에서 발생하는 압력과 지진 또는 항공기충돌과 같은 하중에 의한 격납건물의 구조적 저항성능을 분석하고 평가하는 것은 현재 가동 중인 원전이나 앞으로 건설될 원전의 안전성을 보장하기 위해 매우 중요하다.

특히 세계무역센터에 대한 항공기 테러이후에 항공기 충돌과 같은 외부하중에 의한 쉘 격납건물의 거동에 그 관심이 증폭되고 있다. 쉘 격납건물의 항공기 충돌에 대한 거동을 예측하기 위해서는 크게 충돌하중에 대한 정의, 수치해석에 사용되는 구조재료모델, 유한요소, 해석알고리듬에 대한 적절한 정의가 필요하다. 본고에서는 항공기 충돌 유한요소해석을 위해 필요한 요소기술과 이를 이용하여 도출한 격납건물의 거동에 대하여 소개하고자 한다. 특히 본 고에 소개된 해석결과는 저차고체요소를 이용하고 Riera방식[2]으로 계산된 충돌하중함수를 이용하여 소성변형을 고려한 쉘 격납건물의 충돌해석에 관한 내용이다.

2. 격납건물의 제원

원전의 격납건물은 <그림 1>에 도시된 바와 같이 기초슬래브를 제외하면 상부의 돔과 하부의 실린더



〈그림 1〉 격납건물의 제원

* 이 기사는 연구논문[1]의 내용을 재구성하여 기술함.
* 정회원, 경상대학교 공과대학 건축학부 조교수

벽체로 이루어진 쉘 구조물이다. 철근콘크리트 격납건물 벽체의 내벽에 부착된 강판은 구조재로서의 역할을 하기보다는 내압의 증가에 따른 방사능 누출을 방지하기 위한 차폐기능을 한다. 따라서 강판을 제외한 철근콘크리트 벽체를 구조재로 간주한다. 벽체는 콘크리트와 철근으로 이루어져 있으며 벽체의 중앙에 프리스트레스력을 가하기 위하여 텐돈이 지나가는 관이 위치한다. 격납건물의 벽체에 존재하는 주요 불연속지점으로는 <그림 1>에 표시된 3개의 주요 가용개구부가 있다.

3. 저차고체유한요소

3.1 위치벡터와 변위장

본 고에서 기술된 쉘 격납건물의 거동해석은 등매개변수법을 사용하여 형성된 저차고체요소를 사용하였다. 고체요소의 위치벡터와 변위장은 다음과 같이 표현된다.

$$\boldsymbol{x}(\xi_1,\xi_2,\xi_3)=\sum_{a=1}^{8} N_a(\xi_1,\xi_2,\xi_3)\ \boldsymbol{x}^a \tag{1}$$

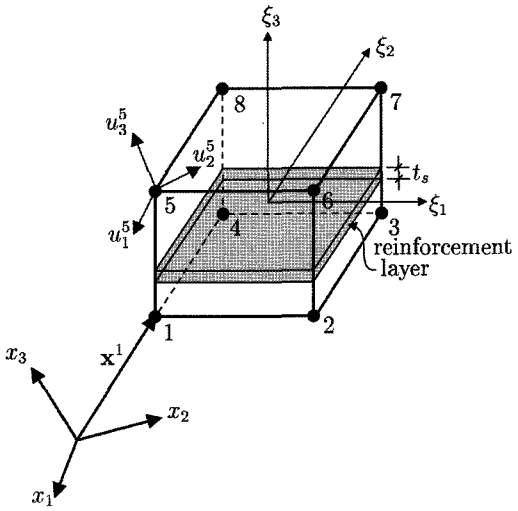
$$\boldsymbol{u}(\xi_1,\xi_2,\xi_3)=\sum_{a=1}^{8} N_a(\xi_1,\xi_2,\xi_3)\ \boldsymbol{u}^a \tag{2}$$

여기서 a는 절점번호를 나타내며 요소의 형상함수 N_a는 다음과 같다.

$$N_a=\frac{1}{8}(1-\xi_1\xi_1^a)(1-\xi_2\xi_2^a)(1-\xi_3\xi_3^a)\quad (a=1,8) \tag{3}$$

여기서 ξ_1^a,ξ_2^a,ξ_3^a는 절점 a의 자연좌표값이다. 절점의 위치는 <그림 2>에 도시하였으며 각 절점은 3개의 병진변위를 가진다.

고체요소내부의 철근층(t_s)은 <그림 2>에 도시된 바와 같이 구조물의 두께방향이 자연좌표계 ξ_3와 일치할 경우 철근층은 $\xi_1-\xi_2$면에 평행하게 놓여진 것으로 가정하였다. 철근의 방향성은 자연좌표계와 철근이 이루는 각도를 이용하여 철근층의 강성행렬을 형성할 때 고려하였다.



〈그림 2〉 8절점 고체요소

3.2 변형률

변형률항은 변위성분의 미분값을 사용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\varepsilon_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{4}$$

여기서 고체요소의 경우 변형률은 6개의 성분 ϵ_{11}, $\epsilon_{22},\epsilon_{33},\epsilon_{12},\epsilon_{23},\epsilon_{13}$을 가진다.

이산화된 유한요소영역에서 변형률-변위행렬은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\mathbf{B}^a=\mathbf{L}\ [\epsilon] \tag{5}$$

여기서 미분연산부호 $\mathbf{L}$ 은 다음과 같다.

$$\mathbf{L}^{\mathrm{T}}=\{\partial/\partial \mathrm{u}_1^a,\partial/\partial \mathrm{u}_2^a,\partial/\partial \mathrm{u}_3^a\} \tag{6}$$

그리고 절점 a와 연관한 행렬 $\mathbf{B}^a$는 다음과 같다.

$$\mathbf{B}^a=\begin{matrix} N_{a,1} & 0 & 0 \\ 0 & N_{a,2} & \\ 0 & 0 & N_{a,3} \\ N_{a,2} & N_{a,1} & \\ 0 & N_{a,3} & N_{a,2} \\ N_{a,3} & 0 & N_{a,1} \end{matrix} \tag{7}$$

여기서 $(N_{a,i=2}N_a/\partial x_i)$는 절점 a에 연관한 형상함수를 좌표 x_i에 대하여 미분한 값을 나타낸다. 본고에서는 위의 식이 수정된 Hughes가 제시한 B bar법[3]을 이용하였다.

3.3 강성 및 질량행렬

절점 a, b에 연관된 요소의 강성행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{K}^{ab(e)} = \int_{\Omega^{(e)}} [\mathbf{B}^a]^{\mathrm{T}} \mathbf{D}^* \mathbf{B}^b \mathrm{d}\Omega \tag{8}$$

여기서 $\mathbf{B}^a$는 절점 a와 연관된 변형률-변위 관계의 행렬을 나타내며 물성행렬 $\mathbf{D}^*$는 사용되는 재료에 준하여 형성된다.

그리고 절점 a, b에 연관된 요소의 질량행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{M}^{ab(e)} = \int_{\Omega^{(e)}} \rho [\mathbf{N}^a]^{\mathrm{T}} \mathbf{N}^b \mathrm{d}\Omega \tag{9}$$

여기서 $\mathbf{N}^a$는 형상함수행렬을 나타낸다. 위에서 정의된 질량행렬은 Hinton등이 제안한 특별집중질량법[4]을 사용하여 대각질량행렬으로 형성하였다. 따라서 절점 a에 대한 질량행렬은 다음과 같다.

$$\mathbf{M}^{aa(e)} = \begin{matrix} m_{aa} & 0 & 0 \\ 0 & m_{aa} & 0 \\ 0 & 0 & m_{aa} \end{matrix} \tag{10}$$

여기서 질량행렬의 각 성분은 다음과 같다.

$$m_{aa} = \omega_a \int_{\Omega^{(e)}} \rho \, d\Omega \tag{11a}$$

$$\omega_a = \frac{\int_{\Omega^{(e)}} \rho N_a N_a d\Omega}{\sum_{k=1}^{8} \int_{\Omega^{(e)}} \rho N_k N_k d\Omega} \tag{11b}$$

그리고 ρ는 재료의 질량밀도를 나타내고 $\mathbf{N}^a$는 식(3)에 정의한 형상함수이다.

4. 콘크리트 재료모델

4.1 항복면과 파괴면

Drucker-Prager의 항복기준을 바탕으로 다음과 같이 정의한 항복면과 파괴면을 정의하였다.

$$\begin{aligned} F_o(I_1, J_2, \sigma_o) &= \alpha I_1 + \sqrt{(\alpha I_1^2 + 3\beta J_2)} - \sigma_o = 0 \\ F_f(I_1, J_2, \sigma_f) &= \alpha I_1 + \sqrt{(\alpha I_1^2 + 3\beta J_2)} - \sigma_f = 0 \end{aligned} \tag{12}$$

여기서 I_1와 J_2는 각각 첫번째와 두번째 응력불변항을 나타낸다. σ_o과 σ_f는 항복응력값과 파괴응력값을 나타내며 콘크리트의 일축압축실험으로부터 구할 수 있다.

콘크리트의 손상이 누적되면 항복면과 파괴면이 가변하는 것으로 가정하였는데 이는 식(12)를 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} F_o(I_1, J_2, \sigma_o(W_p, k)) &= 0 \\ F_f(I_1, J_2, \sigma_f(W_p)) &= 0 \end{aligned} \tag{13}$$

식(13)을 정의하는 주된 항은 콘크리트에 누적되는 손상의 양을 측정하기 위해서 도입되는 점소성일 W_p이며 이를 정의하면 다음과 같다.

$$W_p = \int_o^t \sigma^T \dot{\varepsilon}_{vp} dt \tag{14}$$

여기서 점소성변형율 $\dot{\epsilon}_{vp}$는 다음과 같다.

$$\dot{\varepsilon}_{vp} = \gamma \left\langle \frac{F_o}{\alpha_1 f_c'} \right\rangle \frac{\partial f}{\partial \sigma} \tag{15}$$

여기서 <>기호는 점소성플로우가 $F_o > 0$일때만 유효한 것을 의미하며 유동성 파라메타 γ는 다음과 같다.

$$\gamma = a_o \left(\sqrt{\frac{3J_2'}{(1+\nu)^2}} \right)^{a_1} \tag{16}$$

여기서 a_o와 a_1은 실험데이터로부터 그 값이 정해진다. 또한 재료의 손상정도에 따른 콘크리트 재료의 연성부분에서 발생하는 점소성일에 대한 밀도는 다음과 같이 정의된다.

$$k = W_p - W_p^f = \int_{t_f}^{t} \sigma^T \dot{\varepsilon}_{vp} dt \tag{17}$$

여기서 t_f는 응력이 파괴면에 도달하는 시간을 나타낸다.

따라서 콘크리트의 항복응력 σ_o은 지수함수의 형태로 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} \sigma_o(W_p, k) &= \alpha_1 f_c' & W_p \le W_p^f \\ \sigma_o(W_p, k) &= \alpha_1 f_c' \exp(-\alpha_c k) & W_p > W_p^f \end{aligned} \tag{18}$$

여기서 α_1은 탄성거동의 한계치를 나타내고, α_c는 파괴이후의 성능저하를 고려하는 매개변수이다. 그리고 f_c'은 콘크리트의 압축강도를 나타낸다.

또한 파괴응력값 σ_f은 다음과 같이 정의하였다.

$$\sigma_f(W_p) = \beta_o f_c' \exp(1 - \beta_1 W_p) \quad 0 < W_p \le W_p^f \tag{19}$$

여기서 β_o와 β_1는 실험데이터로부터 그 값이 결정된다.

4.2 균열기준

콘크리트의 최대 주응력이 한계값을 초과하면 주응력방향의 직각인 면에 균열이 생기는 것으로 가정하였다. 균열이 생기면 콘크리트는 이방성재료로 간주되며 이방성재료의 국부좌표계는 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. 계산시에는 균열에 평행한 면의 수직응력과 전단응력만을 고려하였다. 계산된 최대응력이 주어진 한계값을 초과할 때 두번째 균열이 첫번째 균열의 직각방향으로 생긴다고 가정하였다.

4.3 변형률연화

콘크리트의 변형률연화를 지수함수의 형태로 다음과 같이 고려하였다.

$$\sigma = E_o \varepsilon_t (\exp(-(\varepsilon - \varepsilon_t)/\alpha)) \tag{20}$$

여기서 ϵ_t는 균열변형률을 나타내며 연성매개변수는 $\alpha = G_f / f_t' \ell_c$이다. 각 적분점에서의 유효길이 ℓ_c는 $(dV)^{1/3}$로 정의되며 dV는 유한요소 적분점에서의 콘크리트의 부피를 나타낸다. 이때 균열을 발생시키는 파괴에너지는 다음과 같이 정의하였다.

$$G_f = \int_0^{\infty} \sigma \, dw \tag{21}$$

여기서 σ는 균열면에 수직한 응력이고 w는 균열폭을 나타낸다.

도입된 연화모델은 순수콘크리트재료의 변형률연화만을 고려하였고 철근의 부착으로 인해 발생하는 인장경화현상(tension stiffening effect)은 고려하지 않았다. 그러나 인장경화효과는 일반콘크리트보다 철근콘크리트에 대한 파괴에너지를 높게 가정함으로써 구현할 수 있다. 그리고 다른 적분점에서의 균열로 인한 응력의 재분배는 이미 발생한 균열을 부분적으로 또는 완전히 닫히게 할 수 있는 것으로 가정하였다. 현재의 변형률이 균열에 수직한 최대인장변형률로 기록된 ϵ_{ref}보다 작다면 균열에 수직한 응력σ는 다음식으로 계산할 수 있다.

$$\sigma = \frac{\sigma_{ref}}{\varepsilon_{ref}} \varepsilon \tag{22}$$

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

4.4 균열면에서의 전단

콘크리트는 균열발생이후에도 균열면을 따라서 상당한 양의 전단응력을 전달할 수 있다. 콘크리트

의 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 삽입균열모델에 직접 포함하기 어려우며 따라서 균열면에 대한 전단계수를 감소시킴으로써 전단전달체계를 구현하였다. 전단감소계수는 다음과 같이 정의하였다.

$$G_c = \beta G_o \tag{23}$$

여기서 G_o는 균열이 발생하지 않은 콘크리트의 전단계수이고 β는 감소계수이다. 감소계수는 일반적으로 상수값을 사용하는 경우도 있으나 본 연구에서는 감소계수 β값을 다음과 같이 정의하였다.

$$\beta = 1 - (\varepsilon_n / 0.005)^{\phi} \tag{24}$$

여기서 ϵ_n은 균일면에 수직한 인장변형률이고 매개변수 ϕ는 일반적으로 0.3에서 0.9사이의 값을 가진다.

4.5 압쇄기준

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

$$3J_2' = \varepsilon_u^2 \tag{25}$$

여기서 J_2'는 두번째 편차변형률불변항이고 ϵ_u는 일축압축실험으로부터 구한 극한압축변형률이다.

5. 철근모델

철근은 길이 방향으로 일축재료적 성질을 가진다고 가정한다.

$$\dot{\varepsilon}_{vps} = \pm\gamma \frac{(|\sigma_s| - f_y)}{f_y} \tag{26}$$

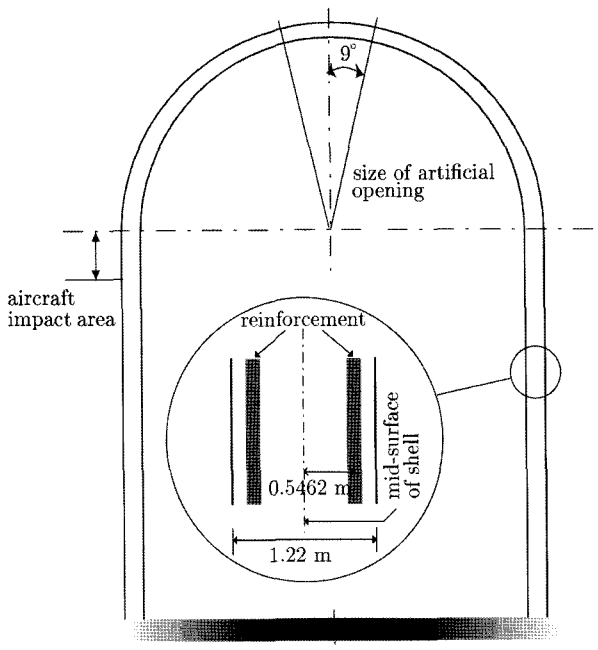
여기서 σ_s는 철근의 현재응력수준이고 f_y는 철근의 항복응력을 나타낸다. 그리고 유동성 파라메타는 식(16)과 같이 정의하며 그 계수는 실험데이터로부터 결정된다.

6. 격납건물의 시간이력해석

6.1 유한요소해석 모델

대상구조물의 복잡성을 줄이고 수치적으로 구해지는 해를 벤치마크검사로 제시하기 위하여 실제구조물의 구조적인 성능을 크게 훼손하지 않는 범위내에서 유한요소모델을 이상화하였다. 이때 격납건물의 형상은 실제구조물과 동일하게 하고 격납건물의 벽체는 <그림 3>에 도시된 바와 같이 간략화 하였다.

생성된 유한요소모델은 <그림 3>에 도시된 바와 같이 기초슬래브 부분을 제외한 뒤 고정지지 된 것으로 처리하였다. 또한 격납건물의 정점부분에 가상의 개구부를 도입함으로써 유한요소의 이산화를 용이하게 하였다. 해석에는 격납건물의 반쪽만을 이용하였으며 항공기가 충돌되는 부분의 요소는 다른 부분에 비하여 세밀하게 형성하였다.

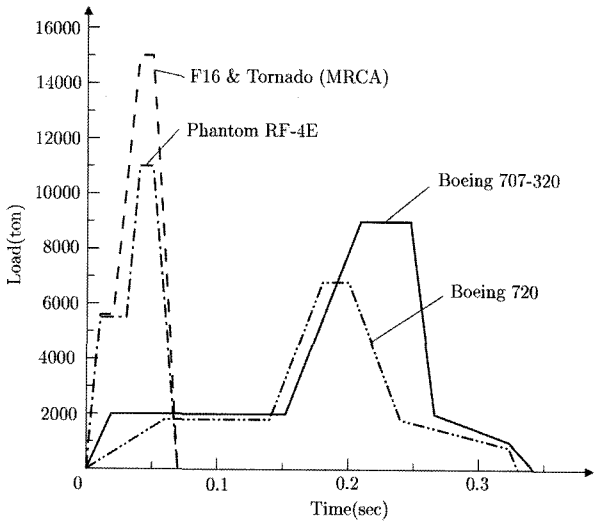


(b)

〈그림 3〉 이상화된 유한요소 모델

6.2 항공기에 의한 충돌

항공기의 충돌은 그 충돌위치에 따라 격납건물의 파괴나 손상도가 달라질 수 있다. 일반적으로 실린더벽체 높이의 1/2지점, 벽체와 돔의 접합부 그리고 상부돔의 정점부등이 취약한 부분으로 고려되어 왔다. 본 고에서는 벽체와 돔의 접합부에 항공기가 충돌했을 때 나타나는 격납건물의 거동에 대하여 기술하였다. 항공기는 격납건물의 벽체에 직각인 방향으로 충돌하는 것으로 가정하였으며 충돌면은 그림 3에 도시된 바와 같이 격납건물의 돔과 실린더 접합부 아래에 위치한 28m^{2}부분이다. 항공기의 충돌에 대한 하중 값은 <그림 4>에 도시된 바와 같다.



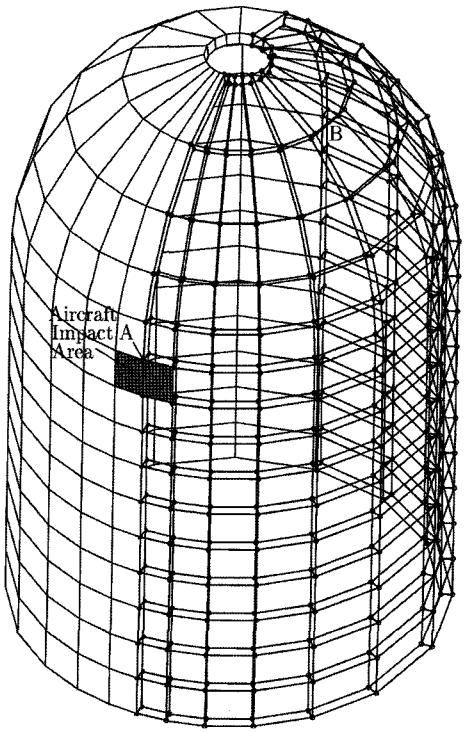
〈그림 4〉 충돌하중함수

6.3 유한요소해석

유한요소모델은 <그림 5>에 도시된 바와 같이 격납건물의 반쪽부분을 150개의 8절점 고체요소로 이산화하여 형성하였다. 격납건물에 사용된 콘크리트의 재료특성치는 다음과 같다: 탄성계수 $E_c = 2 \times 10^5 kg/cm^2$, 프와송비 $\nu = 0.17$, 압축강도 $f_c = 350 kg/cm^2$, 극한압축변형률 $\epsilon_{cu} = 0.0035$, 재료밀도 $\rho = 0.245 \times 10^{-3} kg/cm^3$, 파괴에너지 $G_f = 0.2 kg/cm$의 값을 사용하였다. 그리고 콘크리트 재료모델에 사용된 매개변수는 다음과 같다: 연성매개변수 $\alpha = 1.0$, 유동성매개변수 $a_o' = 0.3055$ 와 $a_1' = 0.76$, 연성매개변수 $\alpha_c = 10$, 파괴면매개변수 $\beta_o = 1.84$와 $\beta_1 = 1.09$의 값을 사용하였다. 철근의 재료특성치와 재료모델의 매개변수값은 다음과 같다: 탄성계수 $E_s = 2 \times 10^6 kg/cm^2$, 프와송비 $\nu = 0.2$, 항복강도 $f_y = 4218 kg/cm^2$, 유동성매개변수 $a_o' = 1.539$ 와 $a_1' = 0.971$의 값을 사용하였다. 철근은 <그림 3>에 도시한 위치에 격자형태로 배근되어 있으며 철근비는 2%이다. 콘크리트 재료모델에 사용된 매개변수는 실험값이 존재하지 않을 경우 문헌상에 나타나는 유사한 값들을 이용하였다.

본 연구에서는 시간이력해석을 위하여 암시적인 Newmark법을 도입하였으며 적분에는 격납건물 기본주기의 약 1/160인 시간간격 $\Delta t = 0.00125 sec$를 사용하였다. Newmark법의 조건없는 안전성을 확보하기위해 $\beta = 0.25$와 $\delta = 0.5$의 매개변수를 택하였다. 그리고 본 연구에서는 유한요소해석시에 감쇠가 없는 것으로 가정하였다.

먼저 Boeing 707-320이 격납건물에 충돌할 경우의 시간이력해석을 콘크리트의 균열변형률값이 $\epsilon_t =$ 0.00015, 0.00018, 0.0002일 경우에 대해 각각 실시하였다. 시간이력해석결과로부터 충돌지점 A(<그림 5>참조)에서 나타나는 최대변위는 충격하중이 최대값을 통과한 직후 일어났으며 이때 각 균열변형률



〈그림 5〉 격납건물의 유한요소모델

값에 따른 최대변위값과 도달한 시간은 <표 1>에 도시하였다.

또한 항공기의 종류에 따른 격납건물의 시간이력 해석을 균열변형률값 ε_t=0.0002을 이용하여 수행하였다. 시간이력해석으로부터 계산된 변위는 항공기의 종류에 따른 충격하중함수의 특성을 충분히 반영한 이력 값을 나타내었다. 특히 항공기의 종류에 무관하게 최대충격하중값이 적용된 직후에 격납건물은 최대 국소변형을 경험하였으며 점차 그 변형이 감쇠되었다. 각 항공기 충돌에 따른 격납건물의 최대변위와 그 도달시점은 <표 2>와 같다.

각 항공기에 대한 A지점과 B지점에서의 변위이력을 <그림 6>에 도시하였다.

〈표 1〉 균열변형률에 따른 A지점의 최대변위와 도달시간

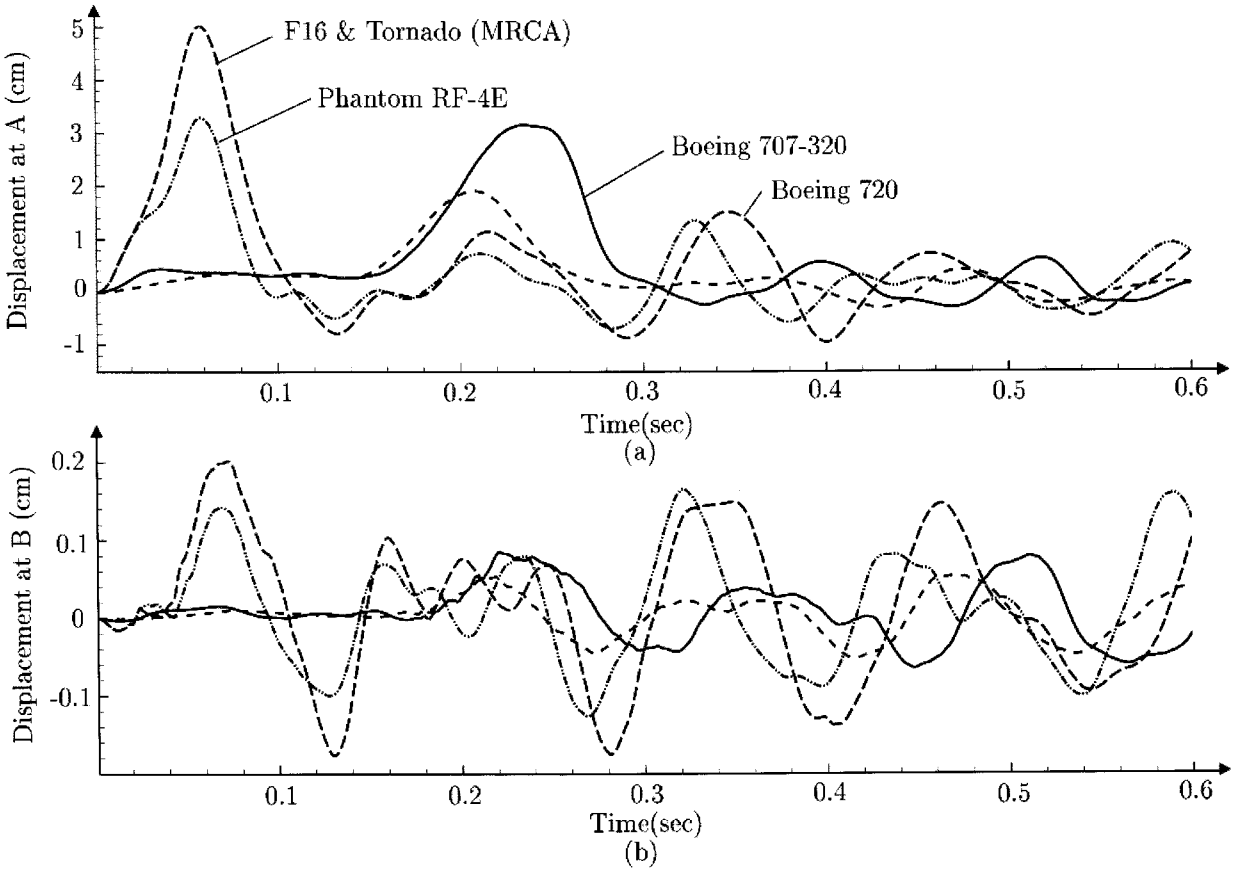
균열변형률	최대변위값	도달시간
0.00015	3.662cm	0.24625sec
0.00018	3.387cm	0.24375sec
0.00020	3.157cm	0.23500sec

〈표 2〉 항공기종류에 따른 A지점의 최대변위와 도달시간

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

7. 결 언

본 고에서는 항공기 충돌에 대한 철근콘크리트 쉘 격납건물의 거동해석에 대한 요소기술과 간략한 결과를 기술하였다. 균열 변형률의 수준에 따른 충돌지점에서의 최대 변위 값과 네 가지 다른 항공기가 격납건물에 충돌했을 경우에 발생하는 변위이력에 대하여 기술하였다. 충돌지점에서 생기는 변위는 최대 5cm로 일시적으로 매우 큰 변형을 나타내었으며 이는 항공기의 중량 및 크기와 관련이 있는 것으로 나타났다. 본 고에서 기술한 요소기술들은 앞으



〈그림 6〉 항공기의 종류에 따른 격납건물의 변위이력

로 지진에 대한 격납건물의 거동예측에도 사용될 수 있을 것으로 판단되며 재료상수에 대한 정확한 모사를 위해 다양한 재료실험이 수반되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 이상진, "항공기 충돌에 대한 쉘 격납건물의 동적 비선형 해석", 한국전산구조공학회 논문집, Vol.15, 2002, pp.567 ~ 578
2. Riera, J. D., "On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces", Nuclear Engineering & Design, Vol.8, 1968, pp.415~426
3. Hughes, T.J.R., The finite element method -Linear static and dynamic finite element analysis, Prentice Hall, New Jersey, 1987
4. Hinton, E., Rock, T.A. and Zienkiewicz, O.C., "A note on mass lumping and related processes in finite element method", Int. J. Earthquake Eng. Struc. Dyn., Vol.4, 1976, pp.245~249