

# 원형강교각의 다이아프램 최적 적용에 관한 해석적 연구

## An Analytical Study on the Optimum Application of Diaphragm in Circular Steel Piers

장 갑 철\*  
Jang, Gab-Chul

장 경 호\*\*  
Chang, Kyong-Ho

### 요 약

최근, 복잡해진 도심지의 토지이용률을 향상시키기 위해 원형 강기둥 구조물의 건설이 점차 요구되고 있다. 원형강기둥 구조물은 유효단면적을 감소함과 동시에 내하력 증가 효과를 기대할 수 있다, 그러나 이러한 원형 강기둥 구조물은 지진 및 피로와 같은 반복하중 작용시 국부좌굴 및 대변형 현상이 발생하며 이로 인하여 대상구조물의 성능이 감소된다. 이러한 내하력 감소 현상을 방지하기 위해 최근 원형 강기둥에 환보강재(다이아프램)의 적용을 고려할 수 있다.

수직보강재의 적용으로 인한 좌굴내하력 및 내진성능의 증가효과는 이미 연구된 바 있으나 다이아프램에 관한 연구는 아직 전무한 실정이다. 단조 및 반복하중 작용시 국부좌굴 및 변형을 효과적으로 방지하기 위해서는 원형강교각에 적용된 다이아프램 설치위치가 중요한 역할을 한다. 그러나 설치위치의 변화에 따른 다이아프램의 내진성능 증가효과에 관해서는 아직 명확히 밝혀지지 않았다.

본 연구에서는 기하학적, 재료학적 비선형을 고려한 유한요소프로그램을 이용하여 탄소성해석을 수행하였다. 즉, 다이아프램 설치위치를 파라메타로하여 내진성능을 검토하였다. 본 연구에서는 각 해석모델의 내하력 및 에너지 소산효율을 비교함으로써 원형강교각에 적용된 다이아프램에 관한 내진성능을 명확히 하였다.

### Abstract

To improve the land use of urban, Construction of the circular steel column is required recently. The circular steel columns have an advantage for improving a load carrying capacity as well as reducing a effective section area. However, the circular steel columns under service load, such as earthquake, shows a tendency to cause local buckling and large deformation. To prevent these phenomena, use of diaphragm is considered.

It is reported that longitudinal stiffeners has a effect on improving a buckling and fatigue performance of steel structures. The research of effect on diaphragm is not sufficient. Under monotonic and cyclic loading, diaphragm make a important role to prevent local buckling and deformation of used steel structures. Therefore, influence of diaphragm on performance of used steel structures is investigated.

In this study, the influence of diaphragm on seismic and deformation performance of circular steel piers was investigated by using elastic-plastic finite element analysis considered geometrical and material non-linearity. The seismic performance of circular steel columns was evaluated for analytical parameter of manufactured part. The seismic performance of circular steel columns was clarified by comparing an energy dissipation of circular steel piers.

**키워드 :** 원형 강기둥, 다이아프램, 탄소성 유한요소 해석, 내진성능, 에너지 소산효율

**Keywords :** Circular Steel Piers, Diaphragm, Elastic-Plastic Finite Element Analysis, Seismic Performance, Energy Dissipation.

## 1. 서 론

근래 복잡해진 도심지의 토지이용율을 높이기 위

해 단면이 작은 원형 강교각의 건설이 요구되고 있다. 그러나, 상대적으로 줄어든 단면으로 인하여 지진 및 진동과 같은 반복하중 작용시 좌굴 및 파괴가 일어날 수 있다. 이에 대한 방안으로 수직보강재 및 환보강재(다이아프램)의 적용을 고려할 수 있다.

수직보강재의 적용으로 인한 좌굴내하력 및 내진성능의 증가효과<sup>1,2)</sup>는 이미 연구된 바 있으나 다이

\* 정희원, 중앙대학교 기술과학연구소, 공학박사  
Tel : 02-820-5337 Fax : 02-823-5337  
E-mail : gabchul.jarg@gmail.com

\*\* 정희원, 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과, 교수  
E-mail : changkor@cou.ac.kr

아프램과 함께인 경우는 아직 전무한 실정이다. 현재, 다이아프램의 설치에 관한 규정은 강관부재의 전단 및 비틀림에 의한 좌굴 또는 국부적인 변형을 방지하기 위해 다이아프램을 설치하며 설치위치에 관해 “최대간격은 교각 바깥지름의 3배로 한다”라는 규정<sup>3)</sup>의 세부적인 항목이 부족한 실정이다. 반복 하중 작용시 국부좌굴 및 변형을 효과적으로 방지하기 위해서는 원형강교각에 적용된 다이아프램 설치위치가 중요한 역할을 한다. 그러나 설치위치의 변화에 따른 다이아프램의 내진성능 증가효과에 관해서는 아직 명확히 밝혀지지 않았다.

본 연구에서는 기하학적, 재료학적 비선형을 고려한 유한요소프로그램을 이용하여 탄소성해석을 수행하였다. 즉 다이아프램 설치위치를 파라메타로 하여 내진성능을 검토하였다. 본 연구에서는 각 해석 모델의 내하력 및 에너지 흡수율을 비교함으로써 원형강교각에 적용된 다이아프램에 관한 내진성능을 명확히 하였다.

## 2. 해석이론 및 타당성 검증

### 2.1 해석이론

본 연구에서 수행한 좌굴해석은 평면응력을 가정한 등매개변수 적층판 쉘요소 프로그램을 이용하였다. 해석시 전단변형을 고려하여 Mindlin 평판이론에 입각한 Refined Plate Theory를 이용하였다. 이때, 변위장은 식(1)과 같이 정의된다.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \sum_{i=0}^4 N_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix} + \sum_{i=0}^4 N_i \zeta \frac{t_i}{2} [V_{1i} - V_{2i}] \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $N_i$ 는 라그랑지안 형상함수이며  $V_{1i,2i}$ 는 기준축의 단위방향 벡터이며  $\alpha_i, \beta_i$ 는 기준축의 회전 각 성분이다.

소성하중 작용시 쉘구조물의 대변형 및 좌굴거동을 구현하기 위해 유한변위이론을 적용하였다. 유한변위이론 정식화시 변형률-변위관계에 기하학적 비선형을 고려한 그린 변형률텐서(Green strain tensor)를 식(2)와 같이 적용하였다.

$$E_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i} \cdot u_{k,j}) \quad (2)$$

$$\{d\epsilon\} = [B] \cdot \{du\} \quad (3)$$

식(3)은 그린변형률 텐서  $E_{ij}$ 를 증분형 변위-변형률 행렬  $[B]$ 로 표현한 행렬식이다.

응력-변형률관계에 있어 재료학적 비선형과 강제회전을 고려한 키르초프응력의 야만속도형 구성식(Jaumann's derivative of Kirchoff stress)을 식(4)과 같이 적용하였다.

$$\sigma'_{ij} = \sigma^*_{ij} - w_{ik} \sigma_{kj} + w_{jk} \sigma_{ki} \quad (4)$$

$$w_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} - v_{j,i}) \quad (5)$$

여기서,  $w_{ij}$ 는 식(4)로 정의되는 회전텐서이며  $\sigma'_{ij}$ 는 야만의 속도형으로 표시되는 응력성분이다.  $\sigma^*_{ij}$ 는 시간  $t$ 에서 계산되어진 키르초프 응력성분이다. 식(4)를 증분형 응력-변형률 행렬식으로 나타내면 식(6)과 같다.

$$\{d\sigma'\} = [D^{ep*}] \cdot \{d\epsilon\} \quad (6)$$

여기서,  $[D^{ep*}]$ 는 탄소성재료행렬로 탄성재료행렬  $[D^e]$ , 소성재료행렬  $[D^p]$  및 스핀텐서항을 고려한 재료행렬  $[D^*]$ 로 이루어지며 식(7)과 같이 정의된다.

$$[D^{ep*}] = [D^e] - ([D^p] + [D^*]) \quad (7)$$

적층판 탄소성 유한요소해석의 전체강성방정식을 가상일의 원리를 이용하였으며 유한변위이론에 기초한 요소강성행렬  $[K]$ 를 식(8)와 같이 정식화된다.

$$[K] = \int_V ([B]^T [D^{ep}] [B] + [G]^T [M] [G]) dV \quad (8)$$

여기서,  $[B]$ 는 식(3)에 의해 정식화된 변형률-변위 행렬이며  $[D^{ep*}]$ 는 식(6)에 의해 정식화된 응력-변형률 행렬이다.  $[M]$ 은 초기응력 행렬(Initial stress matrix)로 식(9)과 같이 정의된다.

$$[M] = \begin{Bmatrix} [\sigma_0] & 0 & 0 \\ 0 & [\sigma_0] & 0 \\ 0 & 0 & [\sigma_0] \end{Bmatrix}, [\sigma_0] = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{yz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

### 2.2 프로그램 타당성 검증

적층판 탄소성 유한요소프로그램을 이용하여 원형강교각의 좌굴해석을 수행하였으며 기존문헌의 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

검증모델은 외경이 60.5mm이며 두께가 3.2mm인 원형강관기둥이며 세장비가 20, 30인 경우로 분류하여 좌굴해석을 수행하였다. 이때, 경계조건은 실험과 동일하게 양단을 단순지지로 하였으며 해석 및 실험모델의 제원 및 제성질은 <표 1, 2>와 같다.

해석 및 실험결과의 비교는 <그림 1>과 같다. <그림 1>에 보인바와 같이 원형 강관기둥의 세장비에 따른 하중-변위곡선의 분포가 거의 일치함을 알 수 있다. 즉, 본 연구에서 사용된 적층판 탄소성 유한요소해석이 소성하중 재하시 강관기둥 구조물의 좌굴거동을 정확히 예측할 수 있음을 알 수 있다.

<표 1> 해석모델

	$\lambda=11$ (단주)	$\lambda=50$ (중간주)	$\lambda=110$ (장주)
R(mm)	500	500	500
h(mm)	6,000	27,000	60,000

\* R : 단면의 반지름, h : 원형강교각의 높이

<표 2> 검증모델의 제원 및 제성질

$\lambda$ (세장비)	Diameter (외경: mm)	t (두께:mm)	h (높이:mm)	k (오일러 좌굴계수)
20.0	60.5	3.2	40.6	1.0
30.0	60.5	3.2	60.9	1.0

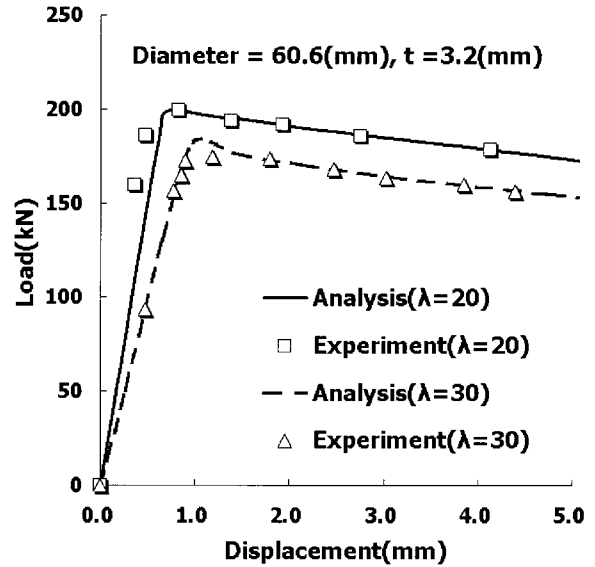
$\sigma_u$ (인장응력: MPa)	$\sigma_y$ (항복응력: MPa)	elo (연신률: %)	E (탄성계수: GPa)
387	327	21.0	201

\*  $\lambda$  (세장비) =  $\frac{h}{r}$ ,  $\gamma = \sqrt{\frac{I}{A}}$

<표 3> 압축부재에서의 세장비 구분

강종	단주	중간주	장주
SS400	$\lambda \leq 20$	$20 < \lambda \leq 93$	$\lambda > 93$

\*  $\lambda$  = 원형강교각의 세장비



<그림 1> 실험 및 해석결과의 비교

## 3. 유한요소 모델링

### 3.1 해석모델

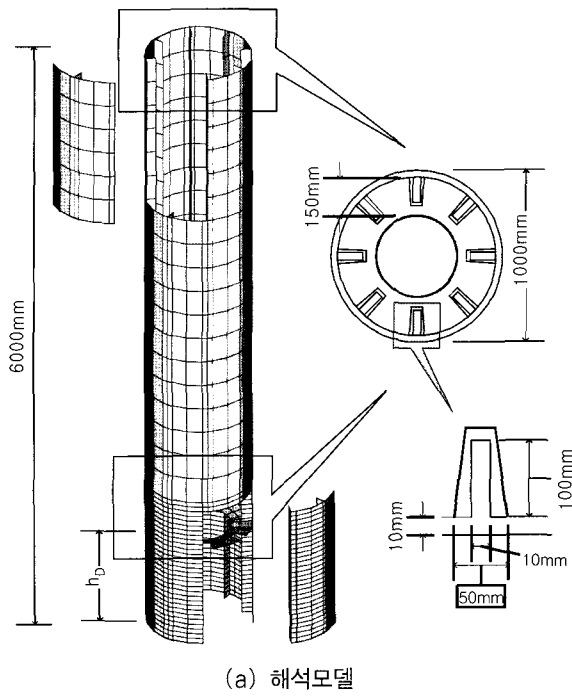
본 연구에 적용된 해석모델은 <그림 2(a)>와 같이 높이 6000mm, 지름 1000mm, 두께 10mm의 단주 원형 강교각이며 반지름-두께비는 50이다. 이때, 8개의 수직보강재1,2가 적용되었으며 수직보강재의 두께는 10mm이며 폭은 100mm이다. 다이어프램의 크기는 시방서 규정<sup>3)</sup>에 따라 두께 12mm, 폭 150mm인 다이어프램을 설치하는 것으로 가정하였다. 설치위치(hD)를 변화하여 수치해석을 수행하였으며 적용된 강재는 SS400이다<sup>3)</sup>.

<표 4> 및 <그림 3>은 다이어프램 설치위치를 파라메타로 한 해석모델이다. 해석모델은 다이어프램이 적

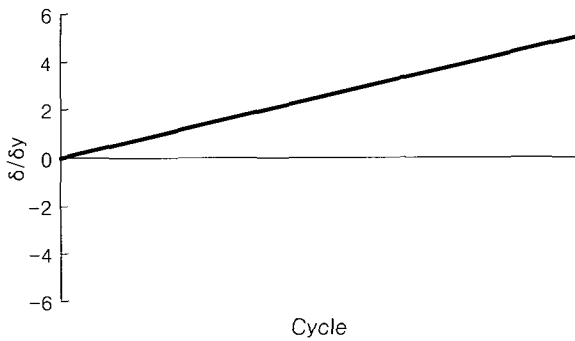
<표 4> 해석모델의 분류

해석모델	hD-1	hD-2
0D(Non-Diaphragm)	-	-
2D	2000mm	4000mm
1D	3000mm	-
1D-1.0hD	1000mm	-
1D-0.5hD	500mm	-
1D-0.0hD	0mm	-

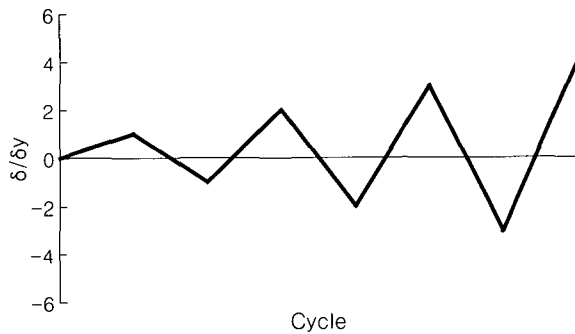
\* hD는 교각의 하부로부터 측정된 길이이다.



(a) 해석모델



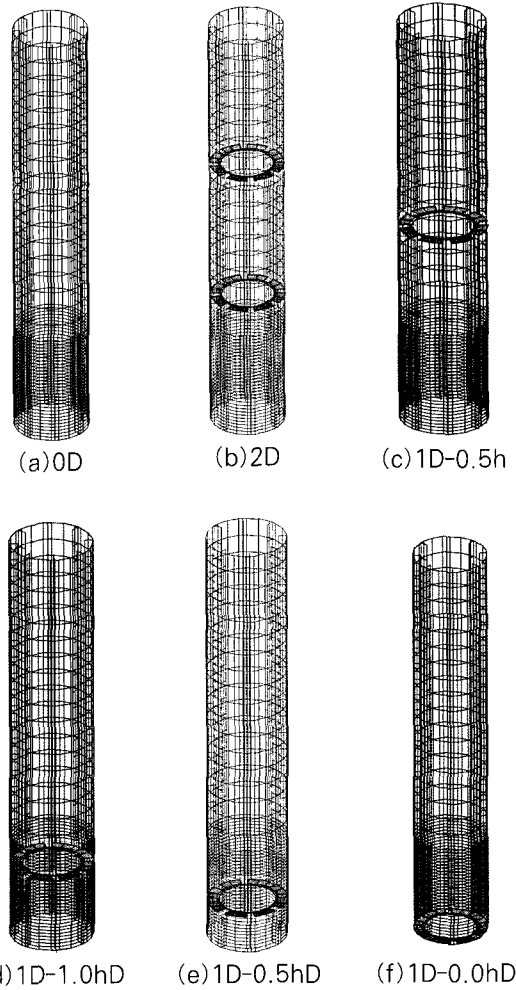
(b) 단조재하(Monotonic Loading)



(c) 반복하중 (two-side cyclic loading)

<그림 2> 해석모델 및 하중패턴

용되지 않은 모델(0D)과 시방서 규정에 따라 다이어프램을 적용한 모델(2D, 1D-0.5h)과 국부좌굴이 발생하는 교각하부에 다이어프램을 적용한 모델(1D-0.0hD, 1D-0.5hD, 1D-1.0hD)로 분류하여 해석을 수행하였다.



<그림 3> 다이어프램의 설치위치에 따른 해석모델

### 3.2 해석조건

해석모델의 경계조건은 교각의 하부는 지반에 완전히 고정된 상태를 가정하여 모든 자유도를 고정하였으며 나머지 부분은 모두 자유로 하였다. 재하하중은 실제 지진하중에서 발생할 수 있는 하중형태를 이상화하여 <그림2(b), (c)>와 같이 단조재하(monotonic load)와 반복하중(two-side cyclic load)으로 분류하여 원형강교각의 내진성능을 검토하였다. 이때, 적용된 수평반복하중은 항복변위

( $\delta_y$ )에 비례하여 해석을 수행하였으며 항복 수평하중( $H_y$ )과 수평변위( $\delta_y$ )의 산출방법은 식(10), (11)와 같다<sup>4)</sup>.

$$H_y = \frac{M_y}{h} \left( 1 - \frac{P}{P_y} \right) \quad (11)$$

$$\delta_y = \frac{H_y h^3}{3EI} \quad (11)$$

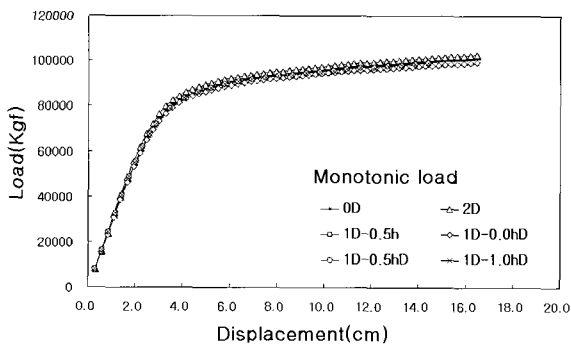
여기서,  $M_y$ 는 항복모멘트,  $P$ 는 수직하중,  $P_y$ 는 항복수직하중,  $h$ 는 원형강교각의 높이이다.

### 4. 해석 결과 및 고찰

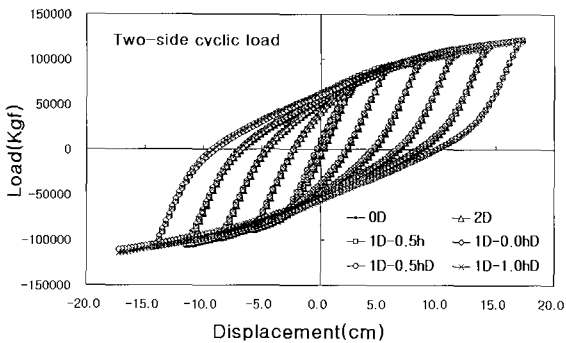
재료학적·기하학적 비선형을 고려한 탄소성 유한요소해석을 통하여 다이아프램 설치위치를 파라메타로한 내진해석을 수행하였다.

#### 4.1 하중-변위 곡선

<그림 4>는 다이아프램 설치위치 변화에 따른 단조하중 및 반복하중 재하시 하중-변위 곡선을 나타내고 있다. 단조하중 재하시 다이아프램이 2개 설치된 모델(2D)의 경우 다이아프램이 설치되지 않은 모델(0D)에 비해 최대 10.5%의 내하력 증가효과를 보이고 있으며 그 외 모델의 경우 그 효과가 미비함을

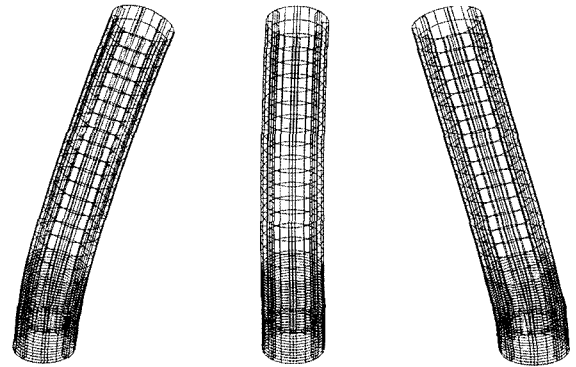


(a) 단조하중 재하시 하중-변위곡선



(b) 반복하중 재하시 하중-변위곡선

<그림 4> 단조하중 및 반복하중 재하시 하중-변위곡선



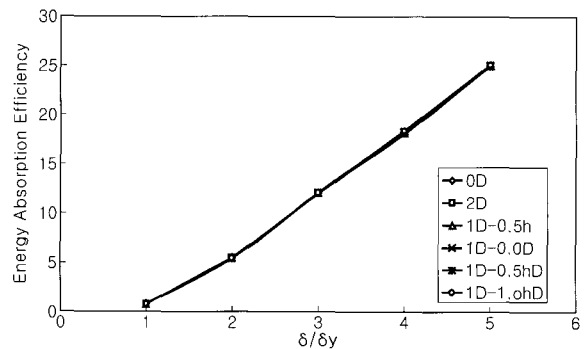
(a)  $+5\delta_y$  (b)  $0\delta_y$  (c)  $-5\delta_y$

<그림 5> 반복하중재하시 변형형상(1D-0.5hD). (×10)

알 수 있다. 반복하중 재하시 2개의 다이아프램이 설치된 모델(2D)과 교각중양부에 다이아프램의 설치된 경우(1D-0.5h) 다이아프램이 설치되지 않은 모델(0D)에 비하여 최대 10%의 내하력증가 효과가 있었으며 그의 모델(1D-1.0hD, 1D-0.5hD, 1D-0.0hD)의 경우 다이아프램의 효과가 미비하였다. 특히, 교각하부에 다이아프램을 설치한 모델의 경우 다이아프램의 위치에 상관없이 거의 유사한 하중-변위 곡선을 보이고 있음을 알 수 있다. 즉, 교각하부에 다이아프램을 설치한 경우 그 내하력 및 내진성능에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

#### 4.2 에너지 흡수율

정확한 내진해석을 위해 각 해석모델의 에너지 흡수율을 비교하였다. 반복하중에 의해 축적된 에너지가 비탄성거동에 의하여 에너지가 소산되며 이는 대상 구조물의 손상을 의미한다. 에너지 흡수율은 각 사이클에서 흡수된 누적에너지( $\Delta E_C$ )와 탄성에너지



<그림 6> 에너지 흡수율

지( $E_E$ )와의 비로 식(12)과 같이 계산된다<sup>9)</sup>.

$$\text{Energy dissipation} = \frac{\Delta E_C}{E_E} \quad (12)$$

여기서,  $E_E = H_y \delta_y / 2$ 이며 본 연구에서 적용된 해석 모델의 에너지 흡수율은 그림6와 같다. 에너지 흡수율의 경우 다이아프램 설치위치의 변화에 대해 미소한 차이는 있으나 거의 유사한 거동을 보이고 있다. 즉, 다이아프램 설치위치의 변화로 인한 원형강교각의 에너지 흡수율에 대한 내진성능의 변화는 거의 없으며 이는 다이아프램이 원형강교각에 수직보강재가 적용된 경우 내진성능에 거의 영향이 없음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 기하학적, 재료학적 비선형을 고려한 유한요소프로그램을 이용하여 원형강교각의 다이아프램 위치를 파라메타로하여 내진해석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 단조하중 재하시 다이아프램이 2개 설치된 모델(2D)의 경우 다이아프램이 설치되지 않은 모델(0D)에 비해 최대 10.5%의 내하력 증가효과를 보이고 있으며 그외 모델의 경우 내하력 증가효과가 미비하였다.

2. 반복하중 재하시 2개의 다이아프램이 설치된 모델(2D)과 교각중앙부에 다이아프램의 설치된 경우(1D-0.5h) 다이아프램이 설치되지 않은 모델(0D)에 비하여 최대 10%의 내하력증가 효과가 있었으며 나머지 모델(1D-1.0hD, 1D-0.5hD, 1D-0.0hD)의 경우 그 증가효과가 미비하였다
3. 에너지 흡수율의 경우 각 해석모델에 대한 에너지 흡수정도가 거의 유사하였다. 즉, 다이아프램 적용시원형강교각의 에너지 흡수율에 대한 내진성능은 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

## 참고문헌

1. 장경호, 장갑철, 박원준, "원형 강교각에서 수직보강재 적용에 관한 연구," 대한토목학회 학술발표 논문집(1), 2000, pp.173-176
2. 장경호, 장갑철, 박원준, "수직보강재가 적용된 원형 강교각의 내하력 및 내진성능에 관한 연구," 대한토목학회 학술발표 논문집, 2001.
3. 건설교통부, 도로교설계기준, 2005
4. T. Usami, H. B. Ge "Cyclic Behavior of Thin-Walled Steel Structures-numerical analysis", Thin-Walled Structures, Vol.32, 1998, pp.41-80
5. Ge, H. B., and Usami, T. (1987) "Ductility of Steel Short Cylinders in Compression and Bending," J. Engrg. Mech., ASCE, Vol.124(2), 1987, pp.176-183