

# 슬래브-기둥 접합부의 구속도 및 드롭패널에 따른 방폭 성능 평가

임광모\* · 이주하\*\*

Lim, Kwang Mo\*, Lee, Joo Ha\*\*

## Evaluation of Blast Resistance of Slab-Column Connections According to the Confinement Effects and Drop Panel

### ABSTRACT

The numerical analysis was conducted to evaluate the behavior of slab-column connection subjected to blast loads using LS-DYNA. The typical form of slab-interior column connection for analysis was considered as a reference specimen and the drop panel slab-interior column was designed to verify the effects of drop panel. The slab-column connections, which were composed of interior, edge and corner column, were additionally analyzed to compare their confinement effects of specimens. Analysis results were contained the failure shape of connection, behavior of member and so on. From the results, the blast-resistant capacities of slab-column connection would be enhanced by reinforcing the drop panel. In addition, the performance of connections could be improved, when the confinement effects were enhanced.

**Key words** : Blast loads, Blast-resistant, Slab-column connection, Drop panel, Confinement effect

### 초록

본 연구에서는 폭발하중을 받는 슬래브-기둥 접합부의 거동을 해석적으로 분석하였다. 슬래브-기둥의 거동을 분석하기 위해 유한요소해석프로그램 LS-DYNA를 사용하여 폭발해석을 수행하였다. 대상 접합부의 형태는 일반적인 내부기둥형태의 슬래브-기둥 접합부와 기둥주위에 드롭패널(drop panel)을 보강한 접합부로 설정하였다. 또한, 슬래브에 의한 기둥의 구속도에 따라 내부기둥, 외부기둥 그리고 모서리기둥 시험체를 모델링하여 비교분석이 수행되었다. 해석결과는 접합부의 파괴형상, 단위부재의 거동 등을 포함하고 있다. 해석결과 드롭패널을 보강한 경우 슬래브-기둥 접합부의 거동이 향상되는 것을 확인하였으며 슬래브에 의한 기둥의 구속도가 감소할수록 거동이 저하되는 것을 확인하였다.

**검색어** : 폭발하중, 방폭성능평가, 슬래브-기둥 접합부, 드롭패널, 구속도

## 1. 서론

일반적으로 폭발하중 및 충격하중을 포함한 매우 짧은 시간에 동적인 하중이 가해지는 구조는 높은 변형률 속도에 의해 재료의 물성이 정하중조건과 비교하여 상당한 차이를 나타내고 있으며 이러한 하중은 구조물을 단기간에 과도한 변형을 발생시켜 결국 파괴에 이르게 할 것이다. 따라서 폭발 및 충격하중을 받는 구조물의 설계는 정하중을 받는 구조물보다 높은 주의가 요구될 것이다(DoD, 2008). 특히, 접합부는 전체 구조시스템에 중요한 역할을 하며 접합부의 파괴는 전체구조시스템의 붕괴를 야기하는 등 치명적인 영향을 미칠 것이다(Yoon, 2013). 접합부는 개구부, 모서리 등과 함께 응력교란구역(D-region)으로 명시되며 응력의 불연속성이 존재하여 보다 주의 깊은 설계가 요구될 것이다(Park, 2011). 따라서 본 연구에서는 슬래브-기둥 접합부의 방폭성능을 확인하였으며 drop panel의

\* 수원대학교 토목공학과 박사과정 (The University of Suwon · kwangmolim@suwon.ac.kr)

\*\* 정회원 · 교신저자 · 수원대학교 토목공학과 조교수 (Corresponding Author · The University of Suwon · leejooha@suwon.ac.kr)

Received December 5, 2016/ revised January 22, 2017/ accepted February 23, 2017

보강 및 접합부의 구속도 변화에 따른 방폭 거동을 해석적으로 분석하였다.

## 2. 방폭 구조물 관련 문헌조사

### 2.1 방폭구조물 설계기준

국내 국토해양부 및 국방부는 테러에 대비하기 위한 기준을 제시하였으나 공개된 내용은 일반적인 내용으로 구성되어 있으며 민간수준에서 상세한 내용의 열람은 제한이 있다(MND, 2009; MOLIT, 2012). 미 국방부(DoD : Department of Defense)에서 발표한 UFC (Unified Facilities Criteria)시리즈는 테러나 폭발사고 등에 대비하기 위한 지침 및 설계기준 등을 포함한다. 매뉴얼에서는 폭발하중을 받는 구조물을 성능에 따라서 등급을 구분하여 폭발하중이 작용 후 부재의 저항력이 유효한 경우 부재의 지점회전각을 2°로 제한하고 있다(DoD, 2008). 또한 ASCE/SEI는 구조물의 등급을 구분하여 LOP (Level of Protection)를 제시하였다. 단일부재의 일반적인 경우에서 슬래브나 보 부재의 지점회전각을 2°로 제한하고 있다(ASCE/SEI, 2011).

### 2.2 방폭구조물의 구조 상세

폭발하중을 받는 구조물은 높은 에너지 흡수율과 충분한 연성을 보유하고 있어야 할 것이다. RC구조물은 콘크리트에 의한 에너지 흡수율과 철근보강으로 인한 연성으로 적합한 건설재료로 고려되어 왔다(William, 2010; Dusenberry, 2010). 특히, 폭발하중을 받는 접합부의 설계는 축력, 전단력, 휨 모멘트 등 다양한 하중 및 상호작용을 고려한 설계가 수행되어야 할 것이다(Cormie et al., 2009). 접합부에서 폭발하중에 의해 발생하는 과도한 변형을 효과적으로 저항하기 위하여 접합부는 일체형접합부(Monolithic connections)로 설계되는 것이 유리한 것으로 알려져 있다(Dusenberry, 2010). 또한, 슬래브-기둥 접합부의 안전성을 향상시키기 위한 방법의 일환으로 drop panel보강이 고려될 수 있다. Drop panel의 보강은 접합부의 성능을 향상시켜 폭발하중에서도 안전성을 확보 할 수 있을 것이다(ASCE/SEI, 2011; William, 2010).

## 3. 슬래브-기둥 접합부의 폭발 해석

### 3.1 시험체 모델링

본 연구에서는 폭발 및 충돌 등의 해석에 주로 사용되는 프로그램 LS-DYNA를 사용하여 연구를 수행하였다. 콘크리트의 모델링을 위해 폭발하중과 같은 높은 변형률 속도에서 적합하다고 알려져 있는 Mat\_072R3를 사용하였다(Brannon and Leelavanichkul, 2009; Crawford et al., 2012; LSTC, 2013b). 콘크리트 요소의

크기는 기존 타 연구자의 연구결과를 참고하여 실험대비 해석결과 의 정확성 확보를 위해 25 mm의 정방형 요소로 모델링 하였다 (Foglar and Kovar, 2013). 또한 Mat\_072R3재료모델 독립적으로 요소의 파괴 등을 표현할 수 없기 때문에 Add\_Erosion옵션을 적용하여 콘크리트 요소의 파괴를 정의하였다. 콘크리트의 강도 및 재료물성은 Table 1에 표시하였다. 철근의 재료모델은 Mat\_024를 사용하였으며 strain-rate effects를 고려하기 위하여 Table 2의 DIF가 고려된 물성값을 사용하였다(Crawford et al., 2012). 또한 폭발하중과 같이 높은 변형률 구간에서는 부차과 정착 같은 현상은 무시될 수 있다는 기존문헌을 바탕으로 본 연구에서는 철근과 콘크리트의 상호관계정의를 위해 노드를 공유시켰다(Crawford et al., 2012; Shi and Stewart, 2015).

본 연구에서는 Table 3과 같이 총 4개의 시험체로 구분하였으며 Figs. 1 and 2에서 구조상세를 확인할 수 있다. 시험체 ISC는 일반적인 슬래브-내부기둥 접합부로 모델링 하였다. 시험체 DSC는 시험체 ISC를 기본으로 ACI318 및 ACI 352.1R을 참고하여 drop panel이 추가적으로 보강된 형태이다(ACI, 2014; ACI/ASCE, 2012). 시험체 ISC와 DSC의 비교로 drop panel보강에 따른 거동 비교를 할 수 있을 것이다. 시험체 ESC는 슬래브-외부기둥 접합부

Table 1. Material Properties of Concrete

| Variables            | Slab                                   | Column                                 |
|----------------------|--|--|
| Compressive strength | 45 MPa                                 | 90 MPa                                 |
| Tensile strength     | 1.9 MPa                                | 3.5 MPa                                |
| Density              | 2.4×10 <sup>6</sup> kg/mm <sup>3</sup> | 2.5×10 <sup>6</sup> kg/mm <sup>3</sup> |
| Poisson's ratio      | 0.18                                   |  |

Table 2. Material Properties of Rebar in Normal and Dynamic Conditions

| Variables        | Normal condition                        | Impact or Blast loads |
|------------------|---|-----------------------|
| Yield strength   | 414 MPa                                 | 475 MPa               |
| Tensile strength | 620 MPa                                 | 751 MPa               |
| Density          | 7.86×10 <sup>6</sup> kg/mm <sup>3</sup> |                       |
| Young's modulus  | 2×10 <sup>5</sup> MPa                   |                       |
| Poisson's ratio  | 0.30                                    |                       |

Table 3. Variables of Specimens for Analysis

| Specimens | Descriptions   |
|-----------|--|
| ISC       | Interior column-Slab Connection                            |
| DSC       | Interior column-Slab Connection reinforced with Drop panel |
| ESC       | Edge column-Slab Connection                                |
| CSC       | Corner column-Slab Connection                              |

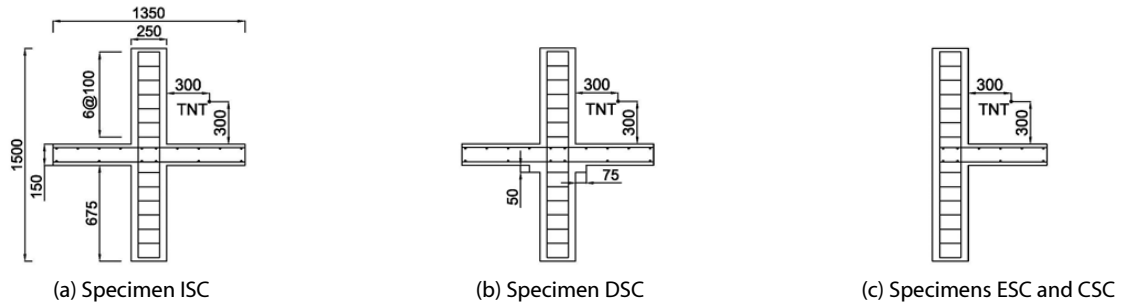


Fig. 1. Front View of Slab-Column Connections for Analysis

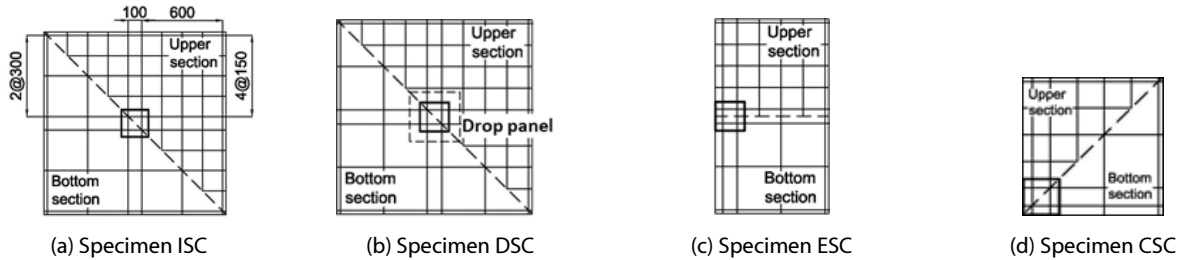


Fig. 2. Plan View of Slab-Column Connections for Analysis

의 형태로 설정되었으며 시험체 CSC는 슬래브-모서리기둥 접합부 형태로 설정되었다. 일반적인 슬래브-내부기둥 시험체 ISC는 슬래브에 의해 기둥의 4면이 구속되어있는 형태로 설정하였으며 시험체 ESC와 CSC는 각각 기둥의 3면 및 2면이 구속되어있는 형태이다. 기존 타 연구 등에 의하면 슬래브에 의한 기둥의 구속도가 증가함에 따라 슬래브-기둥 접합부의 유효강도가 증가하는 경향을 확인할 수 있는데 이와 같은 현상을 폭발하중 하에서 확인하기 위하여 시험체 ESC 및 CSC가 변수로 고려되었다(Bianchini et al., 1960; Gamble and Klinar, 1991). 따라서 시험체 ISC, ESC 그리고 CSC의 비교로 접합부의 구속도에 따른 방폭성능을 확인할 수 있을 것이다.

### 3.2 폭발하중의 모델링

폭발하중을 받는 구조물의 해석을 위해서 폭발하중을 모델링 하는 방법은 몇 가지로 구분할 수 있을 것이다. 우선 가장 보편적으로 사용되는 방법은 대기층 및 폭발물질을 solids요소로 모델링 하는 Multi-material arbitrary lagrangian eulerian (MM-ALE) 방법이 언급될 수 있다. MM-ALE방법을 사용한 폭발해석은 대기층을 유체로 모델링 함으로써 폭발에 의한 주변 영향 및 폭발의 흐름을 파악하기에 이점이 있다(Bae and Zakki, 2011; Zahra and Jeffery, 2012). 본 연구에서는 폭발하중의 모델링을 위해 ConWep (Conventional Weapon effects)을 기반으로 정의된 LBE (Load\_Blast\_enhanced)옵션 사용하였다(LSTC, 2013a). LBE옵션은 ConWep의 database를 활용하여 폭발물질의 질량

및 위치 등을 입력하면 구조물에 가해지는 폭압을 계산하여 직접작용 시키도록 정의되어있다. 따라서 LBE방법은 MM-ALE방법과 비교하여 해석의 유효성확보와 함께 해석시간을 단축시킬 수 있는 이점을 보유하고 있다(Jang, 2007; Zahra and Jeffery, 2012).

유럽의 강구조 학회에서는 테러공격에 대한 등가질량을 환산하는 예시를 제시하였다(Yandzio and Gough, 1999). 여기서 MCE는 military and commercial bomb로 대표적으로 TNT를 의미하며 HME는 homemade bomb로 수제폭탄을 의미한다. 본 연구에서는 Table 4에서 large briefcase에 상응하는 질량인 5 kg의 TNT를 선택하여 슬래브 상부, 기둥면으로부터 300 mm의 이격거리를 갖도록 모델링 하였다.

Table 4. Typical Example of Terrorist Explosive Materials in Europe

| Variables | Explosion methods | Loaded weight | Material |
|-----------|-------------------|---------------|----------|
| Bomblet   | Small briefcase   | 2~4 kg        | M/CE     |
|           | Large briefcase   | 4~12 kg       |          |
|           | Suitcase          | 12~22 kg      |          |
|           | Bicycle           | 30 kg         |          |
| Car bomb  | Sedan             | 250 kg        | HME      |
|           | Small van         | 0.25~0.9 t    |          |
|           | Large van         | 1~2 t         |          |
|           | Small truck       | 2~3 t         |          |
|           | Large truck       | 4~5 t         |          |

## 4. 폭발 해석 결과 및 분석

### 4.1 시험체 파괴 형상

해석 종료시간을 시험체의 변형이 발생 후 충분한 시간 이후인 5000 msec로 설정하여 해석을 수행하였다. 시험체가 받는 최대 압력을 Fig. 3에 표시하였으며 모든 시험체에서 동일한 압력이 작용하였다. 시험체 ISC에서의 폭발의 흐름을 Fig. 4에 나타내었으며 발생한 폭발의 형태가 기존 문헌의 일반적인 폭발 형태와 유사하게 확인되었다(DoD, 2008). 또한 Fig. 5의 각 시험체 파괴 형상에서 폭발하중에 직접적으로 영향을 받는 면 보다 배면에서의 파괴가 더 크게 발생한 것을 확인할 수 있었다. 이러한 경향은 타 연구자의

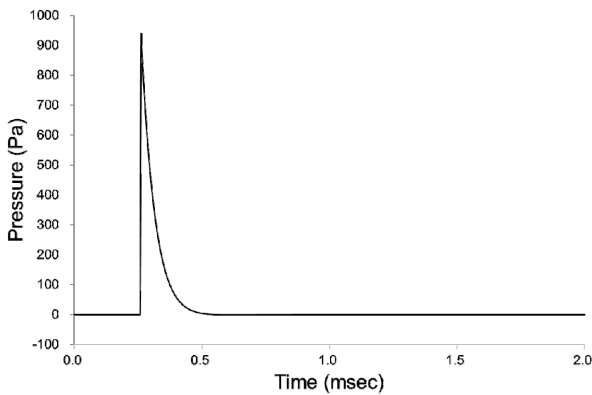


Fig. 3. Explosive Pressure Applied to Slab-column Connections

폭발 실험 연구에서도 유사하게 확인할 수 있었다(Foglar and Kovar, 2013; Thiagarajan et al., 2015). 따라서 본 연구에서의 폭발 해석이 적절하게 수행되었다고 판단할 수 있을 것이다.

### 4.2 슬래브 부재의 거동

Fig. 6은 슬래브의 증립축에서의 파괴 형상을 나타내고 있으며 ACI318에서 정의한 접합부의 위험단면을 붉은 선으로 표시하였다(ACI, 2014). Drop panel이 보강된 시험체 DSC는 위험단면 내부로 파괴가 진행되지 않았으며 일반 내부기둥 시험체 ISC에서는 위험단면 내부까지 파괴가 진행되었다. 더 상세한 비교를 위해 Table 5에 각 시험체의 슬래브 거동을 정리하였다. 슬래브의 위험단면에서 최대 변위는 시험체 DSC가 가장 낮게 확인되어 drop panel보강에 의한 방폭성능 향상을 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 계산된 지점회전각의 비교도 함께 수행되었다. ASCE, DoD에서 폭발 후 유효한 구조물의 지점회전각은 2°로 제한하고 있다(ASCE/SEI, 2011; DoD, 2008). 시험체 DSC의 지점회전각은 0.43°로 안전하다고 판단될 수 있을 것이다. 또한 일반 내부기둥은 8.34°로 계산되어 폭발하중 작용 후 유효하지 않은 구조물로 평가된다. 반면 시험체 ISC 그리고 DSC의 슬래브 전체적인 파괴형상은 유사하게 확인된다. 따라서 지점회전각 단독으로 접합부의 안전성을 평가하기에는 무리가 있을 것으로 판단되며 추가적인 평가요소가 필요할 것이다.

기둥 위치에 따른 슬래브-기둥 접합부의 거동을 비교하기 위해 시험체 ISC, ESC 그리고 CSC의 비교가 수행되었다. 슬래브 부재

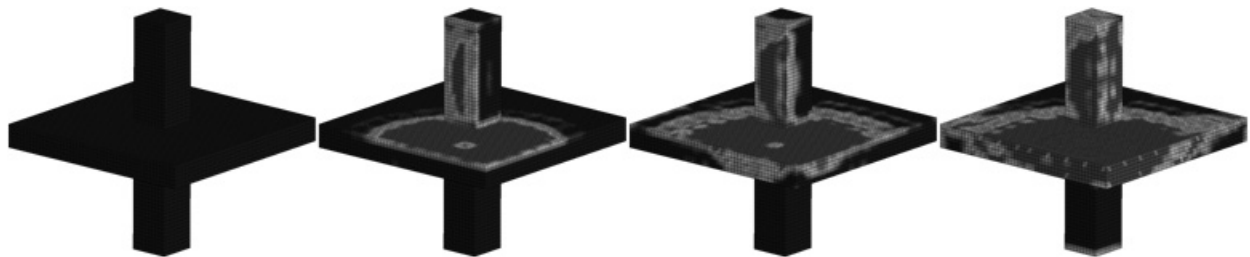


Fig. 4. Dynamic Response Process about Pressure

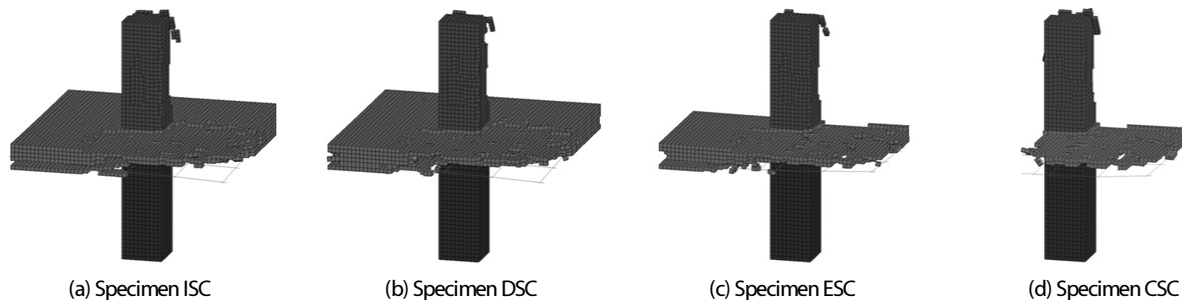


Fig. 5. Failure Shapes of Specimens

Table 5. Maximum Deflection and Support Rotation of Slab

| Specimens | Max deflection | Support rotation | Failure in critical section |
|-----------|----------------|------------------|-----------------------------|
| ISC       | 29.3 mm        | 8.34°            | O                           |
| DSC       | 1.5 mm         | 0.43°            | X                           |
| ESC       | 43.4 mm        | 12.24°           | O                           |
| CSC       | 57.4 mm        | 16.01°           | O                           |

에 의해 기둥의 4면이 구속되어있는 내부기둥 시험체의 변위는 29.3 mm로 확인되었으며 3면이 구속되어있는 시험체 ESC, 2면이 구속되어있는 시험체 CSC는 각각 43.4 mm, 57.4 mm로 변위가 증가하였다. 직접회전각의 비교에서도 그 경향이 동일하게 확인된다. 더불어 Fig. 6의 파괴형상을 비교하였을 때 기둥 부재의 구속도가 낮아질수록 위험단면 내부의 파괴가 더 크게 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 슬래브에 의한 기둥의 구속도가 방폭 성능에도 영향을 미치는 것을 확인하였다.

슬래브 상·하부의 보강철근 응력을 Table 6에 정리하였다. 상부 보강철근은 시험체 ISC와 DSC에서는 비슷하지만 시험체 ESC, CSC로 구속도가 감소할수록 보강철근의 응력이 증가하는 경향을 확인했다. 또한, 전체적으로 상부 보강철근보다 하부 보강철근의 응력이 더 높게 확인되었다. 이러한 경향은 앞서 언급된바와 같이 폭발하중에 직접적인 영향을 받는 전면부 보다 배면에서의 변형 및 파괴가 더 크게 발생하기 때문으로 사료된다.

Table 6. Stresses in Reinforcements of Slab

| Specimens      |     | Peak stress | Time      |
|----------------|-----|-------------|-----------|
| Top of slab    | ISC | 125 MPa     | 2099 msec |
|                | DSC | 128 MPa     | 1915 msec |
|                | ESC | 172 MPa     | 2676 msec |
|                | CSC | 200 MPa     | 2983 msec |
| Bottom of slab | ISC | 439 MPa     | 531 msec  |
|                | DSC | 439 MPa     | 517 msec  |
|                | ESC | 444 MPa     | 483 msec  |
|                | CSC | 436 MPa     | 691 msec  |

### 4.3 기둥 부재의 거동

상·하부 기둥부재의 거동을 Fig. 7에서 확인할 수 있으며 상부기둥 부재의 중립축에서의 변위를 Table 7에 정리하였다. 내부기둥 시험체 ISC와 DSC의 기둥부재 변위는 거의 유사하게 발생함을 확인하였다. 외부기둥 시험체 ESC에서는 약간의 차이가 있으나 큰 차이를 보이고 있지는 않았다. 모서리기둥 시험체 CSC는 다른 시험체와 비교하여 가장 큰 변위가 발생하였으며 해석 종료시점에서 변위가 계속 증가하고 있었다. 따라서 시험체 CSC는 저항 한계치를 초과하여 구조적 기능을 상실했다고 판단할 수 있다. 따라서 drop panel이 보강된 시험체 DSC는 폭발하중을 적절하게 저항하고 있는 것을 확인하였으며 내부기둥 시험체 ISC 및 외부기둥 시험체 ESC는 폭발하중에 의해서 상당한 피해를 입었지만

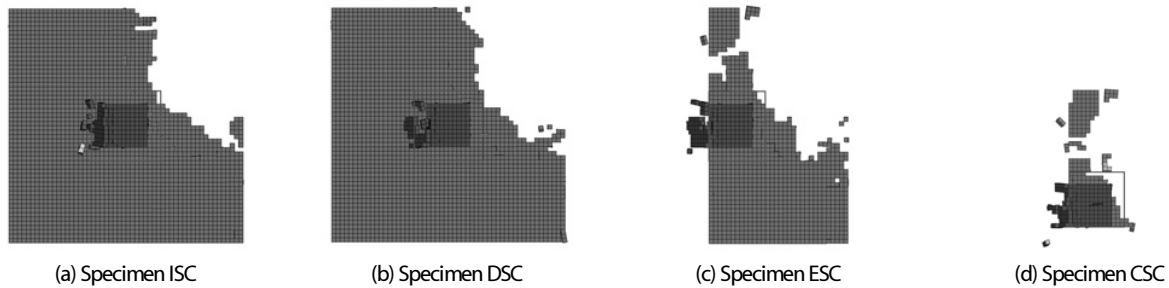


Fig. 6. Failure Shape with Critical Section of Slab

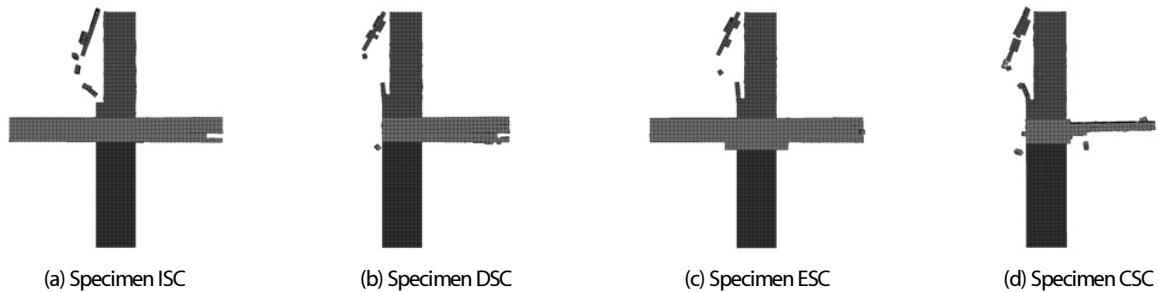


Fig. 7. Behavior of Column Member

Table 7. Maximum Deflection of Column

| Specimens | Max deflection | Time      |
|-----------|----------------|-----------|
| ISC       | 0.116 mm       | 356 msec  |
| DSC       | 0.112 mm       | 346 msec  |
| ESC       | 0.086 mm       | 271 msec  |
| CSC       | 4.170 mm       | 5000 msec |

기둥부재의 변위가 제어되었기 때문에 전체 구조시스템의 파괴까지는 발생하지 않았다고 판단할 수 있을 것이다. 그리고 시험체 CSC는 폭발하중에 의해서 구조체가 파괴되었다고 판단할 수 있을 것이다.

### 5. 결론

본 연구에서는 폭발하중을 받는 슬래브-기둥 접합부에 대해서 일반적인 슬래브-내부기둥, drop panel이 보강된 슬래브-내부기둥, 슬래브-외부기둥 그리고 슬래브-모서리기둥으로 구분하여 해석을 수행하였다. 해석결과를 바탕으로 구조부재의 거동을 비교분석하였으며 그 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) Drop panel의 보강은 슬래브-기둥 접합부의 방폭성능을 향상시키는 것을 확인하였다. Drop panel이 보강된 시험체는 일반 슬래브-내부기둥 시험체와 비교하여 파괴형상, 변위 및 지점회전각에서 모두 우수한 거동을 보이고 있다. Drop panel이 보강된 시험체는 일반적인 내부기둥 시험체와 비교하여 지점회전각은 약 8° 감소하는 경향을 보이고 있다. 따라서 방폭구조물의 설계 시 drop panel의 보강방안에 관한 검토가 필요할 것으로 판단된다.
- (2) 내부기둥, 외부기둥 그리고 모서리 기둥으로 접합부의 구속도가 낮아 질수록 변위, 파괴형상 등의 거동이 저하되는 것을 확인하였다. 지점회전각을 기준으로 비교한 경우 내부기둥을 기준으로 외부기둥 모서리 기둥의 지점회전각은 각각 약 1.5배 2배 정도 증가하는 경향을 보이고 있었다. 특히, 구속도가 가장 낮은 모서리 기둥 시험체는 해석결과를 종합하여 볼 때 전체구조시스템이 기능을 손실했다고 판단할 수 있었다. 따라서 슬래브-기둥 접합부가 적용되는 방폭 설계 시 접합부 형상에 따라 적절한 보강 방안이 요구될 것이다.
- (3) ASCE 및 DoD에서 제안하고 있는 성능평가요소 기준인 지점회전각 단독으로 전체적인 방폭성능을 평가하기에는 어려움이 있을 것으로 판단된다. 지점회전각 기준을 만족하는 시험체에서도 슬래브 부재 전체적으로 상당한 파괴가 발생하고 있었다. 따라서 구조물의 방폭 성능을 평가하기 위해서는 지점회전각 이외에 추가적인 평가요소가 요구될 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 연구는 국토교통부 건설기술연구사업 방호·방폭 연구단(과제번호 : 13건설연구S02)의 연구지원에 의해 수행되었습니다.

### References

ACI (American Concrete Institute) Committee 318 (2014). *ACI318-14 : Building code requirements for structural concrete & commentary*, American Concrete Institute, Michigan, US.

ACI/ASCE (American Concrete Institute-American Society of Civil Engineers) Committee 352 (2012) *ACI352.1R-11 : Guide for design of slab-column connections in monolithic concrete structures*, American Concrete Institute, Michigan, US.

ASCE/SEI (American Society of Civil Engineers/Structural Engineering Institute) (2011). *ASCE/SEI 59-11 : Blast protection of building*. ASCE, Virginia, US.

Bae, D. M. and Zakki, A. F. (2011). "Comparisons of multi material ALE and single material ALE in LS-DYNA for estimation of acceleration response of free-fall lifeboat." *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 48, No. 6, pp. 552-559.

Bianchini, A. C., Woods, R. E. and Kesler, C. E. (1960). "Effect of floor concrete strength on column strength." *ACI Journal Proceedings*, Vol. 56, No. 5, pp. 1149-1170.

Brannon, R. M. and Leelavanichkul, S. (2009). *Survey of four damage models for concrete*, Sandia National Laboratories, SAND2009-5544, California, US.

Crawford, J. E., Wu, Y., Choi, H. J., Magallanes, J. M. and Lan, S. (2012). *Use and validation of the release III K&C concrete material model in LS-DYNA*, Karagozian&Case Technical Report TR-11-36.5, California, US.

Department of Defense (2008). *UFC 3-340-02 : Structures to resist the effects of accidental explosions*. Department of Defense, California, US.

Dusenberry, D. O. (2009). *Handbook for blast resistant design of buildings*. WILEY, US.

Foglar, M. and Kovar, M. (2013). "Conclusions for experimental testing of blast resistance of FRC and RC bridge decks." *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 59, pp. 18-28.

Gamble, W. L. and Klinar, J. D. (1991). "Tests of high-strength concrete columns with intervening floor slabs." *Journal of Structural Engineering-ASCE*, Vol. 117, No. 5, pp. 1462-1476.

Jang, I. H. (2007). *Sloshing response analysis of LNG carrier tank using fluid-structure interaction analysis technique of LS-DYNA3D*, Master's thesis, Korea Maritime and Ocean University (in Korea).

LSTC (Livermore Software Technology Corporation) (2013a). *LS-DYNA keyword user's manual volume I*, Livermore Software Technology Corporation, California, US.

LSTC (Livermore Software Technology Corporation) (2013b). *LS-DYNA keyword user's manual volume II material models*. Livermore Software Technology Corporation, California, US.

- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2010). *Design guidelines of building to prevent the terrorism* (in Korea).
- Ministry of National Defense (MND) (2009). *DMFC 4-40-50 Design criteria of blast-resistant facility* (in Korea).
- Park, J. Y. (2011). *Modern Protective Structures*, CIR.
- Shi, Y. and Stewart, M. G. (2015). "Damage and risk assessment for reinforced concrete wall panels subjected to explosive blast loading." *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 85, pp. 5-19.
- Thiagarajan, G., Kadambi, A. V., Robert, S. and Johnson, C. F. (2015). "Experimental and finite element analysis of doubly reinforced concrete slabs subjected to blast loads." *International Journal of Impact Engineerings*, Vol. 75, pp. 162-173.
- William, L. B. (2010). *Design of blast-resistant building in petrochemical facilities*. American Society of Civil Engineering, US.
- Yandzio, E. and Gough, M. (1999). *Protection of buildings against explosions*, The Steel Construction Institute, Ascot, UK.
- Yoon, Y. S. (2013). *Mechanics & design of reinforced concrete*. CIR (in Korea).
- Zahra S. T. and Jeffery S.-V. (2012). "A comparison between three different blast methods in LS-DYNA : LBE, MM-ALE, Coupling of LBE and MM-ALE." *12th International LS-DYNA Users Conference*, Detroit, US.