

비선형 폭발해석에 의한 콘크리트 구조물의 손상도 평가

허택녕* · 김성윤**

Huh, Taik Nyung* · Kim, Seong Yun**

Nonlinear Explosion Analyses for Damage Assessments of Reinforced Concrete Structures

ABSTRACT

In general, the large loads which are applied from explosion, impact, earthquake and wind at a short time caused the materials of structures to large deformations, rotations and strains locally. If such phenomena will be analyzed, hydrocodes which can be considered fluid-structure interaction under computational continuum mechanics are inevitably needed. Also, the explosion mechanism is so complicated, it is reasonable that the behaviors of structure are predicted through explosion analyses and experiment at the same time. But, unfortunately, it is true that explosion experiments are limited to huge cost, large experiment facilities and safety problems. Therefore, in this study, it is shown that the results of explosion analyses using the AUTODYN are agreed with those of existing explosion experiments for reinforced concrete slabs within reasonable error limits. And the explosion damage of the same reinforced concrete slab are assessed for quite different reinforcement arrangement spacings, concrete cover depths, and vertical reinforcements. From the explosion analyses, it is known that the more the ratio of slab thickness to reinforcement arrangement spacing is increased, and small-diameter reinforcements are used than large-diameter reinforcements on the same reinforcement ratio, and vertical reinforcements are used, the more the anti-knock capacities are improved.

Key words : Explosion analysis, RHT (Riedel-Thoma-Hiermaier) concrete failure model, Johnson cook model, Damage assessment, Anti-knock capacity

초 록

일반적으로 구조물에 폭발, 충돌, 지진과 바람 등과 같이 짧은 시간에 큰 하중이 작용하게 되면 구조물은 국부적으로 재료의 대변형(large deformation), 대회전(large rotation), 대변형률(large strain)등이 발생하게 된다. 이와 같은 현상을 해석하려면 전산연속체 역학에 기초하여 유체-구조물 상호작용 등을 고려할 수 있는 하이드로코드(Hydrocode)의 도움이 필요하다. 또한, 폭발로 인해 발생하는 순간 동역학적인 폭발 메커니즘은 매우 복잡하기 때문에 폭발실험을 병행하여 거동을 예측하는 것이 합리적인 방법이지만 막대한 비용과 시설이 요구되므로 한계가 있는 것도 사실이다. 따라서 본 논문에서는 하이드로코드인 AUTODYN을 사용하여 폭발해석한 결과를 기수행된 철근콘크리트 슬래브의 폭발실험 결과와 비교하여 폭발해석 방법의 타당성을 검토하였고, 동일한 폭발해석 모형에 대하여 철근 배근간격, 피복두께의 변화 및 수직철근 유무에 따른 폭발 손상도를 비교검토하였다. 검토한 결과, 철근의 배근간격에 대한 철근콘크리트 슬래브 두께의 비가 커질수록, 지름이 큰 철근 보다 지름이 작은 철근을 많이 사용할수록, 마지막으로 수직철근을 배근할수록 콘크리트 구조물의 내폭성능이 향상됨을 알 수 있었다.

검색어 : 폭발해석, RHT (Riedel-Thoma-Hiermaier) 콘크리트 파괴모델, Johnson Cook 모델, 손상도 평가, 철근콘크리트 슬래브의 내폭성능

* 중신회원 · 교신저자 · 창원대학교 토목환경화학융합공학부 교수 (Corresponding Author · Changwon National University · tnhuh@changwon.ac.kr)
** 창원대학교 토목환경화학융합공학부 연구원 (Changwon National University · n-justone1@nate.com)

Received November 14, 2016/ revised December 1, 2016/ accepted December 13, 2016

1. 서론

최근 세계적으로 테러, 충돌과 지진 등의 각종 원인에 의하여 폭발사고의 빈번하게 발생하고 있으며, 교량, 터널, 댐, 원전구조물 등에 발생한 한 번의 폭발사고에도 수많은 인명피해 및 재산피해가 발생할 가능성이 상당히 높다. 특히, 인구 대부분이 밀집되어 있는 주거 특성을 가지고 있는 대도시에 폭발사고가 발생할 경우 매우 큰 국가적인 손실과 피해가 예상된다.

일반적으로 구조물에 폭발, 충돌, 지진과 바람 등과 같이 짧은 시간에 큰 하중이 작용하게 되면 구조물은 국부적으로 재료의 대변형, 대회전, 대변형률 등이 발생되고 궁극적으로 파괴를 동반하게 된다. 이와 같은 현상을 해석하려면 전산연속체 역학에 기초하여 유체구조물 상호작용 등을 고려할 수 있는 하이드로코드(Hydrocode)의 도움이 필요하다. 이와 같은 하이드로 코드에는 LS-DYNA, ANSYS/AUTODYN, PARM-CRASH 등이 있으며, 전문화된 충돌 및 폭발문제를 해석하기 위한 도구로 개발되어 상용화되고 있다. 한편, 폭발로 인해 발생하는 순간 동역학적인 충돌 메커니즘은 매우 복잡하기 때문에 폭발실험을 병행하여 거동을 예측하는 것이 합리적인 방법이지만 막대한 비용과 시설이 요구되므로 한계가 있는 것도 사실이다(Riedel et al., 1999).

따라서 본 논문에서는 AUTODYN을 사용하여 기수행된 철근 콘크리트 슬래브의 폭발실험 결과와 폭발해석한 결과를 비교하여 폭발해석 방법의 타당성을 검토할 것이며, 다양한 폭발 시나리오에 따라 비선형 폭발해석을 수행할 것이다. 또한, 동일한 폭발해석 모형에 대하여 철근의 배근간격, 피복두께의 변화 및 수직철근 유무에 따른 폭발손상도를 비교검토함으로써 철근콘크리트 구조물의 내폭성능을 향상시킬 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

2. 본론

본 장에서는 폭발하중에 대한 압력과 시간간의 관계식에 대하여 언급한 후, 폭발해석에 적용된 콘크리트와 철근의 파괴모델인 RHT 모델과 철근의 파괴모델인 Johnson Cook 모델에 대하여 각각 서술한다(Makoto et al., 2009).

2.1 폭발하중

폭발이란 매우 짧은 시간동안 빛, 열, 소리, 충격과 등의 형태로 빠르게 에너지를 방출하는 것을 의미한다. 구조물에 작용하는 일반적인 하중과 비교했을 때 폭발하중의 가장 큰 특징은 매우 짧은 시간동안 높은 열과 많은 에너지를 방출한다는 점이다. 폭발하중에 의해 발생하는 압력형태가 Fig. 1에 도시되어 있다. 그림에서 보는 바와 같이 평상시 대기압은 P_0 를 유지하고 있지만, 폭발후 일정시간

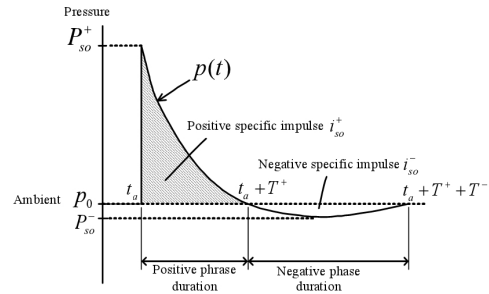


Fig. 1. Curve of Explosion Pressure and Time

이 지나면 최대압력을 나타낸 후 다시 대기압과 같은 압력을 갖게 되는데, 이 구간을 정압기(positive phase duration)라고 한다. 이후 대기압보다 낮은 압력을 갖게 되는 부압기(negative phase duration)를 거쳐 평상시 압력으로 돌아오게 된다. 방폭구조물 설계 시에는 정압단계의 최대압력이 구조물의 거동에 중요한 영향을 미치고, 부압단계에 의한 충격량은 정압단계에 비해 상대적으로 작기 때문에 일반적으로 고려하지 않는다.

정압단계의 압력-시간간의 관계식은 다음과 같다.

$$p(t) = P_0 + P_{so}^+ \left(1 - \frac{t}{T^+}\right) e^{-bt/T^+} \quad (1)$$

여기서, $p(t)$ 는 시간 t 에서의 초과압력, P_0 는 대기압, P_{so}^+ 는 최대 압력, T^+ 는 정압단계의 지속시간, b 는 압력하강의 적합상수를 의미하며, T^- 는 부압단계의 지속시간, i_{so}^+ 와 i_{so}^- 는 각각 양의 충격량과 음의 충격량을 나타낸다. 정압단계의 초과압력을 삼각형의 압력-시간 곡선으로 가정하면 단순화된 압력시간 곡선식은 Eq. (2)와 같이 얻어진다.

$$p(t) = P_0 + P_{so}^+ \left(1 - \frac{t}{T^+}\right) \quad (2)$$

최대압력은 TNT 폭발의 경우 Eqs. (3) and (4)로부터 결정할 수 있다.

$$P_{so}^+ = \frac{6.7}{z^3} + 1 \quad (P_{so}^+ > 10) \quad (3)$$

$$P_{so}^+ = \frac{5.85}{z^3} + \frac{1.455}{z^2} + \frac{0.975}{z} - 0.019 \quad (0.1 < P_{so}^+ < 10) \quad (4)$$

여기서, TNT의 양으로 환산한 폭풍과의 환산거리 z 는 다음 식과 같다.

Table 1. TNT Equivalent

Type of explosive	Mass specific energy Q_x (kJ/kg)	TNT equivalent (Q_x/Q_{TNT})
Nitroglycerin (liquid)	6,700	1.481
HMX	5,680	1.256
Semtex	5,660	1.250
RDX(cyclonite)	5,360	1.185
Compound B	5,190	1.148
TNT	4,520	1.000
Blasting gelatin	4,520	1.000
ANFO	3,932	0.870
60% nitro. dynamite	2,710	0.600

$$z = r/w^{1/3} \quad (5)$$

여기서, r 은 폭발지점에서 측정점까지의 거리(m), w 는 TNT의 질량(kg)을 나타낸다. TNT의 양을 기준으로 하므로 다른 폭발물인 경우 Table 1을 이용해 등가의 TNT량으로 변환하여 사용할 수 있다(Kim, 2012).

2.2 콘크리트의 파괴모델

폭발하중은 건물에 일반적으로 작용하는 하중에 비해 매우 짧은 시간동안 큰 충격량이 전해지기 때문에 하중을 받는 부재도 일반적인 거동과는 다른 양상을 보이게 된다. 폭발하중과 같이 매우 짧은 시간 동안 작용하는 하중의 속도를 재료의 변형속도가 따라가지 못해 파괴가 되기 전에 항복점과 극한응력에 도달하기 때문에, 폭발해석을 할 때는 이와 같은 특징을 고려하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 다양한 콘크리트 파괴모델중에서 폭발해석에 일반적으로 사용되는 RHT 콘크리트 모델을 사용한다(Zhenguo and Yong, 2012).

Riedel 등에 의해 정립된 RHT 콘크리트 모델은 일반적인 취성재료를 분석하기 위한 새로운 모델이다. RHT 콘크리트 모델은 비슷한 여러 종류의 구성 모델들에서 도입하는 압력경화(pressure hardening), 변형률 경화(strain hardening), 변형률 속도 경화(strain rate hardening) 그리고 누적 파괴(strain softening)와 같은 특징들이 있다. 이 모델에서는 탄성 한계면(elastic limit surface), 파괴된 재료에서의 파괴면(failure surface), 잔류 파괴면(residual surface)과 같은 세 가지 강도면이 이용되어 진다. 먼저, 탄성 한계면은 파괴면으로부터 측정되어지며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{elastic} = Y_{fail} \cdot F_{elastic} \cdot F_{CAP(p)} \quad (6)$$

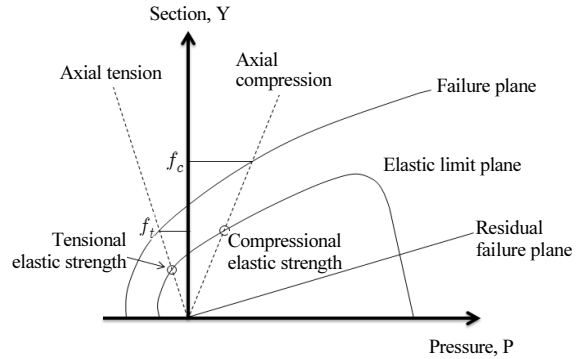


Fig. 2. RHT Concrete Failure Model

여기서, $F_{elastic}$ 은 탄성 강도의 파괴면 강도에 대한 비이며, $F_{CAP(p)}$ 은 정수압력 상태에서 탄성편차 응력을 제한하는 함수이다.

파괴면 Y_{fail} 는 압력 p , 콘크리트 입자 사이의 각도 θ , 그리고 변형률 속도 $\dot{\epsilon}$ 의 함수로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{fail} = Y_{TXC(p)} \cdot R_3(\theta) \cdot F_{RATE(\dot{\epsilon})} \quad (7)$$

여기서, $Y_{TXC} = f_c [A(p^* - p_{spall}^* F_{RATE(\dot{\epsilon})})^N]$, f_c 는 압축강도, A 는 파괴면 상수, N 은 파괴면 지수, p^* 는 f_c 에 의해 표준화된 압력, $p_{spall}^* = p^*(f_t/f_c)$, $F_{RATE(\dot{\epsilon})}$ 은 변형률 속도 함수, $R_3(\theta)$ 는 모델의 세 번째 불변식이다.

마지막으로 잔류 파괴면은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Y_{resid} = B \cdot (p^*)^M \quad (8)$$

여기서, B 는 잔류파괴면 상수, M 은 잔류파괴면 지수이다. Fig. 2는 이러한 관계를 도식적으로 나타내고 있다.

2.3 철근의 파괴모델

철근의 비선형 해석 모델로 사용되는 Johnson-Cook 모델은 아래와 같은 Eq. (9)와 같이 표현된다.

$$Y = [A + B\epsilon_p^n][1 + C \log \epsilon_p^*][1 - T_H^m] \quad (9)$$

A 는 초기항복응력, B 는 변형률 경화상수(hardening constant), C 는 변형률 상수(strain rate constant), n 은 경화지수(hardening exponent), ϵ_p 는 등가소성 변형률, $\epsilon_p^* (= \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)$ 는 무차원 등가소성 변형률 속도, $\dot{\epsilon}$ 는 등가소성 변형률 속도, $\dot{\epsilon}_0$ 는 기준 등가소성 변형률 속도(1.0/sec)이다. T_H 는 다음 Eq. (10)으로 구해진다. T_H 의 경우 입자의 온도 범위에 따라 다르게 적용되어 계산된다.

$$T_H = \begin{cases} 0 & \text{for } T < T_{room} \\ (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room}) & \text{for } T_{room} \leq T \leq T_{melt} \\ 1 & \text{for } T > T_{melt} \end{cases} \quad (10)$$

여기서, T 는 매 사이클마다 계산되어지는 재료의 온도, T_{melt} 는 재료의 용융온도(melting temperature), T_{room} 은 실온, m 은 재료의 열열화지수(thermal exponent)이다. 만약 실험을 실온에서 수행한다면 무차원 증가온도가 무시되어 식을 단순화 할 수 있다 (Razaqpur et al., 2007).

3. 철근 콘크리트 슬래브의 폭발해석

폭발로 인하여 발생하는 동역학적인 충돌 메커니즘은 매우 복잡하며, 이에 대한 실험적 연구는 막대한 비용과 시설이 요구되기 때문에 매우 제한적으로 수행될 수 밖에 없다. 따라서 본 논문에서는 하이드로 코드인 AUTODYN 을 이용하여 기수행된 폭발실험을 해석적으로 모사하여 그 결과를 상호비교함으로써 폭발해석의 타당성을 검토하고자 한다.

3.1 폭발실험 모형

철근콘크리트 슬래브에 대한 폭발실험은 Fang Wang 등에 의해 수행되었으며, 모형의 크기는 3,000×3,000×300 mm와 같고, 철근 콘크리트 슬래브 상면중앙에 TNT 2 kg과 3 kg를 폭발시킨 후, 손상정도를 측정하는 과정으로 수행되었다. 콘크리트의 압축강도



Fig. 3. Explosion Experiment Model of RC Slab

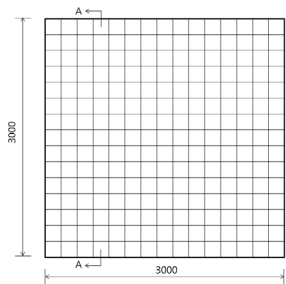


Fig. 4. Detailed Drawing Sheet of RC Slab

는 32 MPa을, 지름이 13 mm인 철근의 항복강도는 460 MPa을 각각 사용하였고, Figs. 3 and 4에는 폭발실험 모형사진과 배근도를 각각 도시하였다(Fang et al., 2008).

3.2 폭발해석 모형

Fig. 5에는 폭발해석 모형인 철근콘크리트 슬래브를 도시하였고, Fig. 6에는 콘크리트와 철근의 유한요소 모형을 각각 도시하였다. 그림에 보인 바와 같이 콘크리트는 8절점 고체요소로, 철근은 보요소로 모형화하였다. 폭발해석 기법으로 철근콘크리트 슬래브는 Lagrange 기법을, 공기와 TNT는 Euler 기법을 각각 사용하였다 (Hakan, 2001).

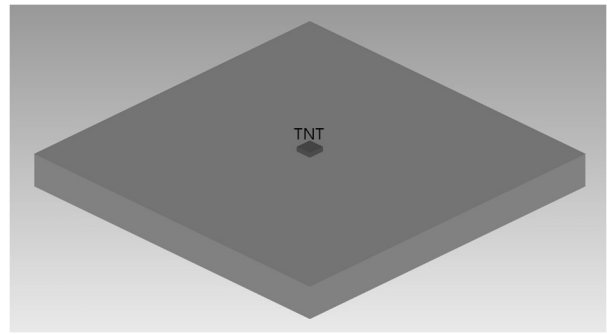
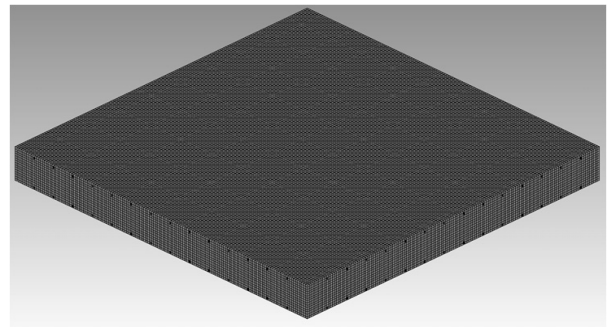
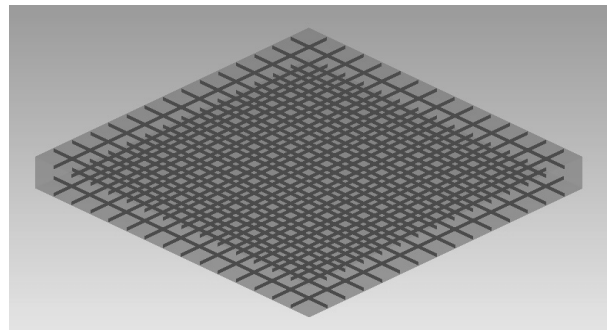


Fig. 5. Explosion Analyses Model of RC Slab



(a) Concrete



(b) Reinforcements

Fig. 6. Finite Element Model of Concrete and Reinforcements

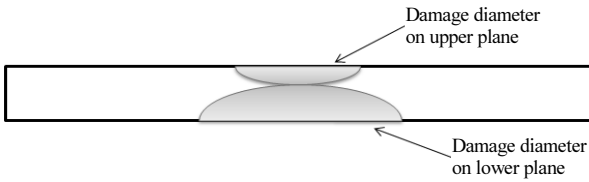


Fig. 7. Damage Diameters on Upper and Lower Plane

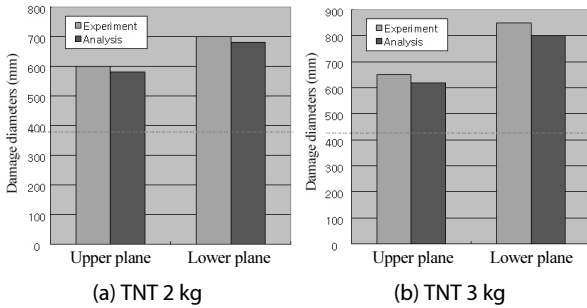


Fig. 8. Damage Diameters Comparisons on Upper and Lower Plane

3.3 수치해석결과 및 비교검토

본 논문에서 수행된 폭발해석 결과를 폭발실험 결과와 상호비교하기 위하여 Fig. 7과 같은 슬래브의 전면부 손상지름과 후면부 손상지름을 사용하여 TNT 2 kg과 3 kg의 폭발해석 결과를 Fig. 8에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 2 kg의 TNT 폭발해석인 경우 전면부 손상지름 차이는 3.33%, 후면부 손상지름은 2.86%의 차이가 낮으며, 3 kg의 TNT 폭발해석인 경우, 전면부 손상지름 차이는 4.62%, 후면부 손상지름 차이는 5.88%로 각각 나타났다. 이와 같은 차이는 폭발실험의 정확한 조건을 해석에 반영하지 못한 점과 손상정도의 지름에 대한 수치가 측정장비 혹은 측정자에 따라 발생하는 오차인 것으로 판단된다. 또한 철근콘크리트의 파괴 형상이 해석과는 달리 실험에서는 매번 다르게 나타나는 것도 차이를 발생하게 하는 원인으로 사료된다.

Figs. 9 and 10에는 TNT 2 kg과 TNT 3 kg의 폭발실험에 의한 철근콘크리트 슬래브의 전후면부에서 발생한 손상형상을 나타내고 있으며, Figs. 11~16에는 폭발해석에 의한 철근콘크리트 전후면부와 단면에서 발생하는 손상형상을 각각 도시하였다.

그림에서 보는 바와 같이 전면부의 철근은 소성영역이 적고 변화가 적은 반면에 후면부의 철근은 소성영역이 많아 늘어나고 많은 변형을 보이고 있다. 이와 같이 폭발해석에 의한 전후면부의 손상형상은 폭발실험에 의한 손상형상과 매우 유사하게 나타남을 알 수 있다.



(a) Upper Plane

(b) Lower Plane

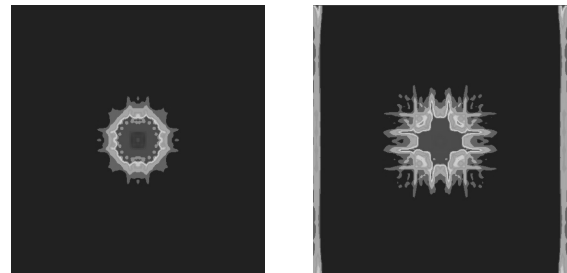
Fig. 9. Damage Shape of Explosion Test (TNT 2 kg)



(a) Upper plane

(b) Lower plane

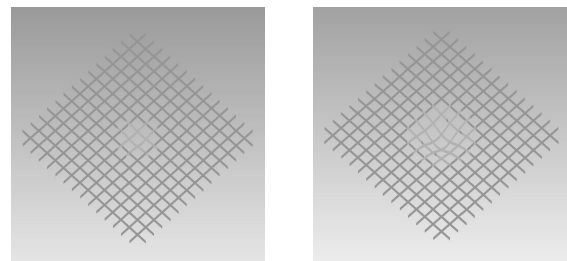
Fig. 10. Damage Shape of Explosion Test (TNT 3 kg)



(a) Upper Plane

(b) Lower Plane

Fig. 11. Concrete Damage Shape of Explosion Analysis (TNT 2 kg)



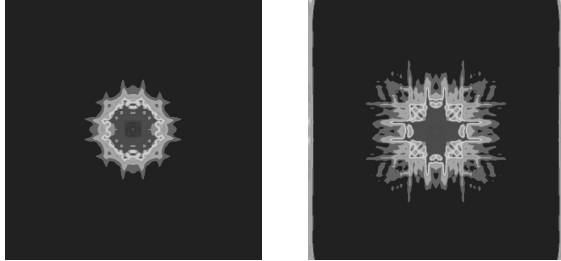
(a) Upper Reinforcements

(b) Lower Rreinforcements

Fig. 12. Reinforcements Damage Shape of Explosion Analysis (TNT 2 kg)

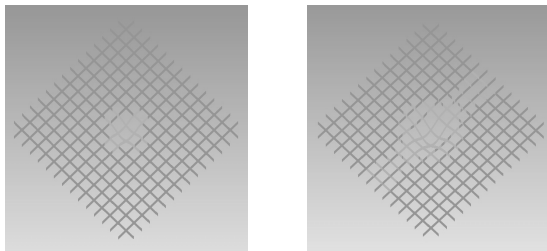


Fig. 13. Section Damage Shape of Explosion Analysis (TNT 2 kg)



(a) Upper Plane (b) Lower Plane

Fig. 14. Concrete Damage Shape of Explosion Analysis (TNT 3 g)



(a) Upper Reinforcements (b) Lower Reinforcements

Fig. 15. Reinforcements Damage Shape of Explosion Analysis (TNT 3 kg)



Fig. 16. Section Damage Shape of Explosion Analysis (TNT 3 kg)

4. 철근배근에 대한 손상도 평가

본 장에서는 3장에서 해석한 철근콘크리트 슬래브를 대상으로 동일한 철근량을 갖도록 하면서 배근간격, 철근면적과 피복두께의 변화 및 수직철근의 유무에 따라 폭발해석을 수행하여 얻은 손상정도로부터 철근 콘크리트 구조물의 내폭성능을 검토하였다.

4.1 철근배근간격에 대한 폭발해석 결과

철근배근에 따른 철근콘크리트 슬래브의 폭발에 의한 손상정도를 비교하기 위한 기준모델로 철근지름 13 mm에 배근간격 200 mm로 배근한 후, 동일한 철근량을 가지도록 철근지름은 10~15 mm, 배근간격은 142~272 mm사이에서 변화시키면서 6가지 경우의 폭발해석을 수행하였다. Fig. 17에는 철근배근에 따른 폭발해석 결과를 무차원량으로 표시하여 도시하였다.

그림에서 보는 바와 같이 철근 배근간격에 대한 철근콘크리트

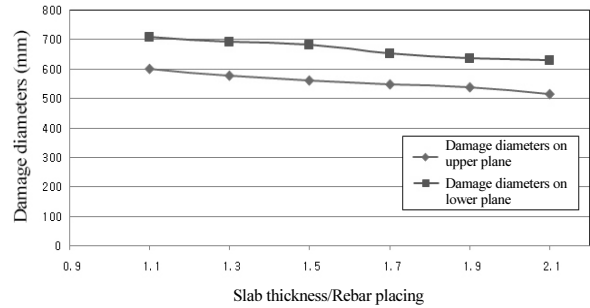


Fig. 17. Damage Diameters for Reinforcement Arrangement Spacing

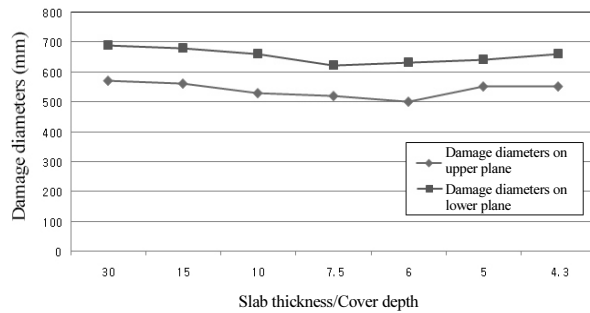


Fig. 18. Damage Diameters for Covering Depths

슬래브의 두께의 비가 커질수록 폭발에 의한 손상정도가 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 동일한 철근량을 사용할 때 지름이 큰 철근보다 지름이 작은 철근을 많이 사용할수록 손상정도가 감소하는 것을 알 수 있다.

4.2 피복두께변화에 따른 폭발해석 결과

피복두께변화에 따른 철근콘크리트 슬래브의 폭발에 의한 손상정도를 비교하기 위한 기준모델로 철근지름 13 mm에 피복두께는 20 mm로 배근한 후, 동일한 철근량을 가지도록 피복두께를 10~70 mm사이에서 변화시켜 가면서 폭발해석을 수행하였다.

Fig. 18에는 피복두께변화에 따른 폭발해석을 수행하여 얻은 결과를 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 철근의 피복두께를 다르게 하여 폭발에 의한 손상도를 비교한 결과, 폭탄이 위치한 전면부와 후면부의 파괴형상이 서로 다르며, 평균적인 손상정도로 볼 때 피복두께에 대한 철근콘크리트 슬래브 두께의 비가 6일 때, 가장 작은 손상이 나타남을 알 수 있다.

4.3 수직철근배근에 따른 폭발해석 결과

수직철근배근에 따른 철근콘크리트 슬래브의 폭발에 의한 손상정도를 검토하기 위하여 피복두께는 20 mm로 가정하고, 가로철근과 세로철근이 교차하는 모든 지점에 수직철근을 배근하였다. 또한,

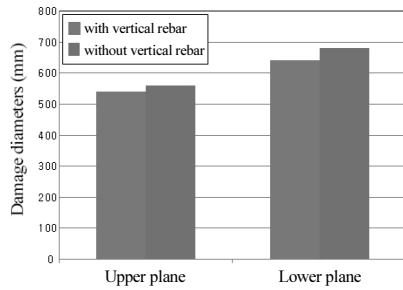


Fig. 19. Damage Diameters with and without Vertical Reinforcements

수직철근이 없는 경우와 비교하기 위하여 철근콘크리트 슬래브에 배근된 철근량은 동일하게 설정하였으며, Fig. 19에는 수직철근 유무에 따른 폭발해석 결과를 도시하였다.

그림에서 보는 바와 같이 수직철근의 유무에 따라서 철근콘크리트 슬래브의 전면부 손상지름은 3.57%, 후면부의 손상지름은 5.88%정도 손상이 감소함을 알 수 있다. 따라서 수직철근을 배근하므로써 철근콘크리트의 내폭성능이 증가함을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 하이드로코드인 AUTODYN을 사용하여 기수행된 폭발실험의 측정결과와 폭발해석의 결과를 상호 비교하여 프로그램 사용의 적합성을 판단하였다. 또한, 동일한 폭발해석 모형에 대하여 전체의 철근량을 고정시키고 철근 배근간격, 피복두께의 변화에 따른 폭발 손상도를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

기존 폭발실험 결과와 본 연구에서 수행된 폭발해석 결과를 비교한 결과, 최소 2.86%, 최대 5.88%의 손상도 차이가 나타났다. 이와 같은 오차는 보다 다양한 콘크리트의 파괴모형을 적용하고, 폭발해석시 주변으로 전파되는 폭발 메커니즘에 대한 규명이 현실적으로 밝혀지면 상당히 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 슬래브에 국한하지 않고 다양한 폭발실험과 재료의 정확한 파괴모델에 대한 개발이 병행되면 폭발실험 결과에 근접한 해석 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

동일한 철근량을 전제로 하여 배근간격을 변화시키면서 폭발 후 손상정도를 비교한 결과, 철근의 배근간격에 대한 철근콘크리트 슬래브의 두께의 비 1.1에서 2.1로 커질수록 폭발에 대한 손상정도가 감소했으며, 지름이 큰 철근보다 지름이 작은 철근을 많이 사용할수록 손상도가 감소함을 알 수 있었다.

철근의 피복두께를 다르게 하여 폭발 후 손상도를 비교한 결과, 폭탄이 위치한 전면부와 후면부의 파괴형상이 다르며, 이에 따라 철근이 다르게 저항하는 것으로 판단된다. 본 폭발해석의 경우에 평균적인 손상정도로 볼 때 피복두께에 대한 철근콘크리트 슬래브 두께의 비가 6일 때, 가장 작은 손상이 나타남을 알 수 있었으며, 보다 다양한 폭발해석과 실험을 병행하여야 이에 대한 일반화 경향을 예측할 수 있을 것으로 기대한다.

가로철근과 세로철근이 교차하는 모든 지점에 수직철근을 배근하여 수직철근의 유무에 따른 손상정도를 비교한 결과, 전면부 손상지름은 3.57%, 후면부 손상지름은 5.88%정도 감소함을 확인하였다. 이와 같이 감소한 이유에 대하여 보다 확실한 규명이 필요하지만, 손상도의 외관적 기준으로 판단할 때, 수직철근이 철근콘크리트 구조물의 내폭성능향상에 기여하는 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2015~2016년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

References

- Ghani, R., Ahmed, T. and Ettore, C. (2007). "Blast loading response of reinforced concrete panels reinforced with externally bonded GFRP laminates." *ScienceDirect Part B* 38, pp. 535-546.
- Hakan, H. (2001). "Numerical simulation of concrete penetration with Euler and Lagrange formulations." FOI.
- Kim, S. Y. (2012). *Explosion damage assessment of a reinforced concrete slabs on the distribution of reinforcement*, Master's Thesis, Changwon National University, Changwon, Korea (in Korean).
- Makoto, Y., Kiyoshi, M., Koji, T. and Yoshiyuki, M. (2009). "An experimental study on blast resistance of polyethylene fiber reinforced concrete." *J. Temporal Des. Arch. Environ*, Vol. 9, No. 1.
- Riedel, R., Thoma, K., Hiermaier, S. and Schmolinske, E. (1999). "Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500 numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes." *Internationales Symposium*.
- Wang, F., Wan, Y. K. M., Chong, O. Y. K., Lim, C. H. and Lim, E. T. M. (2008). "Reinforced concrete slab subjected to close-in explosion." *LS-DYNA Anwenderforum*.
- Zhenguo, T. and Yong, L. (2012). "Modifications of RHT material model for improved numerical simulation of dynamic response of concrete." *International Journal of Impact Engineering*.