

힘과 전단을 고려한 철근콘크리트 방호벽 성능에 관한 연구

권영범¹ · 박종일^{2†}

Bending and Shear Capacity of Reinforced Concrete Protective Wall

Young Beom Kwon¹ · Jong Yil Park^{2†}

†Corresponding Author

Jong Yil Park

Tel : +82-2-970-9844

E-mail : jjp111@seoultech.ac.kr

Received : January 11, 2023

Revised : February 28, 2023

Accepted : April 18, 2023

Abstract : With the recent increase in gas energy use, risk management for explosion accidents has been emphasized. Protective walls can be used to reduce damage from explosions. The KOSHA GUIDE D-65-2018 suggests the minimum thickness and height of protective walls, minimum reinforcement diameter, and maximum spacing of reinforcements for the structural safety of the protective walls. However, no related evidence has been presented. In this study, the blast load carrying capacity of the protective wall was analyzed by the pressure-impulse diagrams while changing the yield strength of the reinforcement, concrete compressive strength, reinforcement ratio, protective wall height, and thickness, to check the adequacy of the KOSHA GUIDE. Results show that failure may occur even with design based on the criteria presented by KOSHA GUIDE. In order to achieve structural safety of protective walls, additional criteria for minimum reinforcement yield strength and maximum height of protective wall are suggested for inclusion in KOSHA GUIDE. Moreover, the existing value for minimum reinforcement ratio and the thickness of the protective wall should be increased.

Copyright©2023 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Key Words : protective wall, explosion, reinforced concrete, P-I curve, SDOF

1. 서론

최근 도시가스, LPG, 고압용기 등의 보편화, 수소충전소 건설로 인하여 폭발 사고에 대한 대비가 강조되고 있다. 폭발은 복사열, 폭발압, 파편 등 피해기구를 발생시켜 광범위한 영역에 인명 및 경제적 피해를 야기할 수 있다.

이러한 피해기구가 사업장 내·외부에 미치는 영향을 감소시키기 위한 대책 중 하나로 방호벽 설치가 있다. 일반적으로 철근콘크리트 구조를 가지며, 「방호구조의 설계 및 설치에 관한 기술지침」(KOSHA GUIDE D-65-2018)¹⁾에서 따르면, 설비에서 발생할 수 있는 폭발로부터 보호시설 및 주거시설에 미치는 영향을 줄이기 위해, 높이는 폭발점과 방호벽의 상단을 이었을 때 보호시설의 윗부분과 만나지 않아야 하며, 폭발점과 방호벽의 양쪽 끝을 이었을 때 보호시설의 옆쪽 부분

과 만나지 않아야 한다. 따라서, 방호벽의 높이와 폭은 보호시설과 폭발점에 따라 다르게 적용된다. 구조적 성능과 관련해서는 최소 방호벽 두께, 철근 직경 및 배근 간격 등을 제시하고 있다.

방호벽이 본연의 역할을 하기 위해 기본적으로 폭발에 파괴되지 않아야 한다. 폭발 하중에서 철근콘크리트 방호벽의 파괴는 전단 또는 휨에 의해 발생한다. 전단 파괴는 구조물이 휨에 의해 변형되기 전 지지부에 과도한 전단력이 가해졌을 때 발생한다. 즉 충격과 방호벽에 가해진 직후 관성에 의해 구조 거동 자체가 거의 없을 때 파괴된다²⁾. 휨 파괴는 구조물이 폭발을 받으면 동적으로 거동하면서, 단면에 걸리는 단면모멘트가 허용모멘트를 초과하면 발생한다.

철근콘크리트 구조물의 폭발에서 성능은 압력-충격량(Pressure-Impulse, P-I) 곡선을 적용하여 분석할 수 있다. 일반적으로 전단 파괴와 휨 파괴는 독립적으로 고

¹서울과학기술대학교 안전공학과 석사과정 (Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

²서울과학기술대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

려할 수 있으므로, 전단 파괴 P-I 곡선과 휨 파괴 P-I 곡선을 통해 방호벽의 성능을 파악할 수 있다^{3,4)}.

본 연구에서는 KOSHA GUIDE D-65-2018에서 제시하고 있는 구조 설계 기준에 따라 설계한 경우 방호벽이 충분한 성능을 가졌는지 검토하고자 한다. 이를 위해 콘크리트 압축강도, 철근 인장 강도, 방호벽 두께, 방호벽 높이, 철근비 등의 변화에 따른 방호벽 성능을 P-I 곡선으로 분석하였다.

2. 폭발 하중에서 방호벽 거동 분석 방법론

2.1 동적 지배 방정식

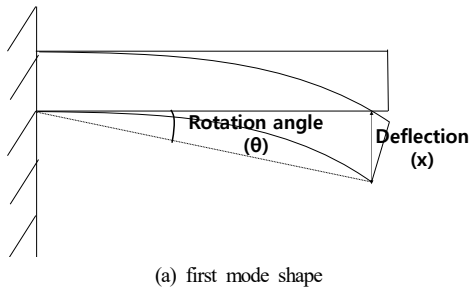
P-I 곡선 생성을 위해서는 폭압에서 구조물의 거동 해석이 필수적이며, 본 연구에서는 단자유도(Single Degree Of Freedom, SDOF) 모델⁵⁾을 기반으로 한다. 분석에 사용된 SDOF 모델은 실증 실험을 통해 검증된 방법이며⁶⁻⁸⁾, 휨과 전단 거동은 독립적으로 분석한다.

2.1.1 휨 거동

폭압에서 방호벽의 휨에 의한 거동 이력은 아래와 같은 지배방정식을 가진다⁵⁾.

$$K_{LM}M\frac{d^2x}{dt} + C\frac{dx}{dt} + R(x) = P(t) \quad (1)$$

여기서, K_{LM} = 하중질량계수, M = 방호벽 질량, x = 방호벽의 처짐(최대 처짐 발생 지점에서), C = 감쇠율, $R(x)$ = 처짐(x)에 따른 방호벽의 저항력, $P(t)$ = 폭압 방호벽의 경우 바닥이 고정된 캔틸레버 형태를 가지고 있으므로, K_{LM} 과 $R(x)$ 은 Fig. 1(a)와 같은 모드 형상을 기준으로 계산된다. $R(x)$ 는 그림 Fig. 1(b)와 같이 선형 탄성 - 완전 소성 형태로 가정되며, 방호벽의 재질 특성, 높이, 철근 배근 등에 의해 결정된다. K_{LM} 은 지지부 단면이 항복하지 않은 탄성 영역과 항복이 발생한 소성 영역에서 상이하므로, 탄성 영역에서 0.65, 소성에서는 0.66를 사용한다(Table 1)⁹⁾. 감쇠 효과의



(a) first mode shape

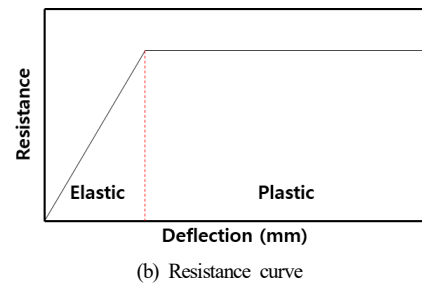
Table 1. Load-mass factors⁹⁾

Supporting conditions and loading diagrams	Range of behavior	Load factor KL	Mass factor KM	Load - mass factor KLM
	Elastic	0.64	0.50	0.78
	Plastic	0.50	0.33	0.66
	Elastic	1.0	0.49	0.49
	Plastic	1.0	0.33	0.33
	Elastic	0.58	0.45	0.78
	Elastic - Plastic	0.64	0.50	0.78
	Plastic	0.50	0.33	0.66
	Elastic	1.0	0.43	0.43
	Elastic - Plastic	1.0	0.49	0.49
	Plastic	1.0	0.33	0.33
	Elastic	0.53	0.41	0.77
	Elastic - Plastic	0.64	0.50	0.78
	Plastic	0.5	0.33	0.66
	Elastic	1.0	0.37	0.37
	Plastic	1.0	0.33	0.33
	Elastic	0.40	0.26	0.65
	Plastic	0.50	0.33	0.66
	Elastic	1.0	0.24	0.24
	Plastic	1.0	0.33	0.33
	Elastic	0.87	0.52	0.60
	Plastic	1.0	0.56	0.56

경우, 하중의 지속시간과 구조물 거동 시간 모두 매우 짧으므로 고려하지 않는다($C=0$)¹⁰⁾.

2.1.2 전단 거동

전단 거동의 지배방정식도 식 (1)과 동일한 형태를 가진다. 다만, x 는 처짐이 아닌 shear slip양을 나타낸다. 전단의 경우 Fig. 2(a)와 같은 모드 형상을 가지므로 K_{LM} 은 1로 일정하다¹⁰⁾. $R(x)$ 는 그림 Fig. 2(b)와 같이



(b) Resistance curve

Fig. 1. Cantilever flexural mode shape and resistance curve.

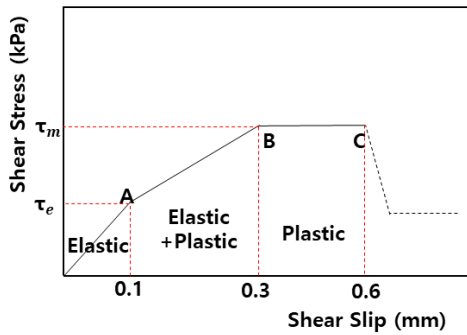
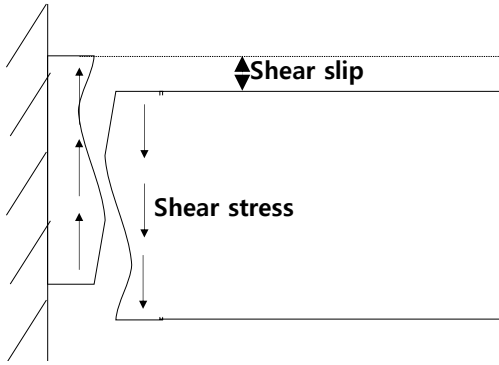


Fig. 2. Shear mode shape and resistance function for RC³⁾.

철근콘크리트 단면의 경우 shear slip이 0.1 mm 까지는 탄성영역, 0.1~0.3 mm에서는 탄소성 영역, 0.3~0.6 mm에서는 소성 영역으로 구분될 수 있으며, 각 영역 별 전단 응력은 아래의 식을 통해 계산될 수 있다³⁾. 다만, τ_e 는 $\tau_m/2$ 을, τ_m 은 $0.35f'_c$ 을 초과할 수 없다.

$$\tau_e = 1137.51 + 0.157f'_c \quad (2)$$

$$\tau_m = 21.005\sqrt{f'_c} + 0.8\rho_{vt}f_y \quad (3)$$

여기서, τ_e =탄성영역에서 최대 전단응력(kPa), τ_m =탄소성 영역에서 최대 전단응력(kPa), f'_c =콘크리트 압축 강도(kPa), ρ_{vt} = 철근비, f_y =철근 항복강도(kPa)

2.2 파괴 기준

지배방정식을 바탕으로 수치해석을 거치면 구조물의 시간에 따른 거동을 해석할 수 있다. 산출된 거동(x) 이력의 최대값이 파괴 기준을 초과하게 되면, 방호벽이 파괴된 것으로 판단할 수 있다.

2.2.1 휨 파괴기준

휨으로 인한 파괴 기준으로는 미군에서 적용하고 있는

Table 2. Damage criteria(support rotation angle)⁷⁾

Damage	Moderate damage	Heavy damage	Hazardous failure	Blowout
Support rotation angle	less than 2°	2°~5°	5°~10°	over 10°

PDC TR 06-08⁹⁾이 일반적으로 사용되며, 각 피해 정도에 따라 Table 2와 같이 정량적 지점 회전각(θ , Fig. 1(a) 참조) 기준을 제시하고 있다.

- 분석된 최대 지점 회전각이 2° 미만이고 탄성 범위를 벗어날 때는 Moderate damage로, 일부 영구 변형이 발생하며, 보수 후 재사용이 가능하나 경제적이지 않은 정도를 나타낸다.
- 지점 회전각이 2°~5°일 때는 Heavy damage로, 구조 부재가 파괴(여기서 파괴는 더 이상 구조 부재로 역할을 못한다는 의미이다)되지는 않으나 영구 변형이 크게 발생하고 보수가 불가능한 피해 정도이다.
- 지점 회전각이 5°~10°일 때 Hazardous failure가 발생하며, 구조 부재는 파괴되며, 부재에서 떨어져 나간 파편이 생성된다.
- 지점 회전각이 10° 이상일 때 Blowout으로 구분되며, 구조부재는 완전히 파괴되며 대부분이 파편화되어 2차 피해를 야기한다.

KOSHA GUIDE D-65-2018에서는 방호성능을 1단계, 2단계로 구분하고 그에 따른 지점 회전각을 제시하고 있다. 1단계는 폭발압력이나 파편으로부터 인명이나 기자재 피해가 발생하지 않는 것을 목표로 하며, 지점 회전각은 2°를 기준으로 한다. 2단계는 구조부재 자체의 붕괴 및 파괴를 막는 것을 목표로 하며, 지점 회전각은 4°를 기준으로 한다.

미국과 국내 기준을 비교해보면, 국내의 방호성능 1단계는 PDC의 Moderate damage와 동일한 기준이며, 방호성능 2단계는 Heavy damage와 유사하다. 방호벽의 주 목표가 인명이나 기자재 피해를 감소시키는 것이므로 본 연구에서는 방호성능 1단계, 즉 지점 회전각 2°를 휨에 의한 파괴 기준으로 설정한다.

방호벽과 같은 캔틸레버 형태의 경우 최대 처짐과 지지부에서 처짐각은 식 (4)와 같은 관계를 가진다.

$$\tan(\theta) = x/L \quad (4)$$

여기서, θ =지점 회전각, L= 방호벽의 높이
따라서 지점 회전각 2° 기준으로 최대 처짐(x)이 0.035L 이상 발생하면 휨에 의한 파괴가 발생한다.

2.2.2 전단 파괴 기준

전단의 경우 급격히 파괴가 발생하므로 휨과 같이 세부적으로 손상 정도가 구분될 수 없다. 따라서 Fig. 2(a)에 제시된 저항 곡선과 같이 소성 영역이 끝나는 지점, 즉 shear slip이 0.6 mm일 때를 파괴 기준으로 한다.

2.3 P-I 곡선 생성 방법론

폭압의 경우 일반적으로 하중 이력을 rising time이 없는 직삼각형으로 나타낼수 있다¹¹⁾. 따라서 최대압력과 충격량으로 하중의 특성을 표현할 수 있다. P-I 곡선은 정해진 파괴 기준(처짐 또는 shear slip)을 발생시키는 하중 특성을 나타낸 것이다. Fig. 3은 P-I 곡선의 예시이다¹²⁾. x축은 충격량, y축은 최대압력을 나타내며, 가해지는 하중이 곡선의 우측에 위치하면 파괴 기준을 초과하는 것을 의미한다. 예를 들어 Fig. 3에서 최대 압력이 100 kPa이고 충격량이 1000 kPa×ms인 하중이 가해지면 파괴가 발생한다.

P-I 곡선 도출을 위해서는 기준이 되는 최대 거동이 발생할 때의 압력과 충격량 조합을 찾기 위해 다수의 구조 동해석이 요구된다. 본 연구에서는 P-I 곡선을 Fig. 4와 같이 다음의 순서로 산출하였다¹³⁾.

- 초기 하중을 정하고 구조해석을 수행한다.
- (a) 계산된 거동(처짐 또는 shear slip)이 파괴 기준보다 큰 경우, 파괴 기준보다 작은 값이 나올 때까지 최대 압력과 충격량을 일정 비율로 감소시키며 구조해석을 수행한다.
- (b) 파괴 기준보다 작은 값이 나온 이후에는 다시 초과하는 값이 나올 때까지 압력과 충격량을 증가시키며 구조해석을 수행한다. 다만 증가폭은 앞서의 감소폭보다 작게 설정한다.

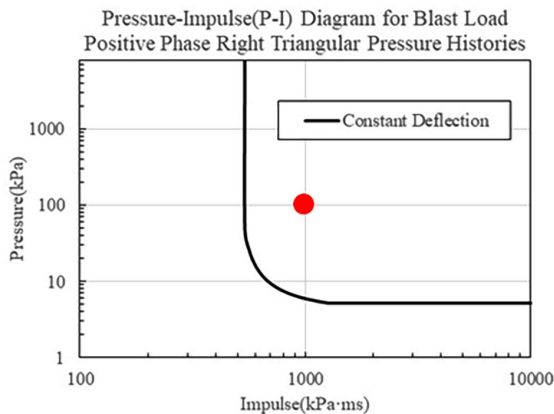


Fig. 3. P-I diagram according to destruction criteria.

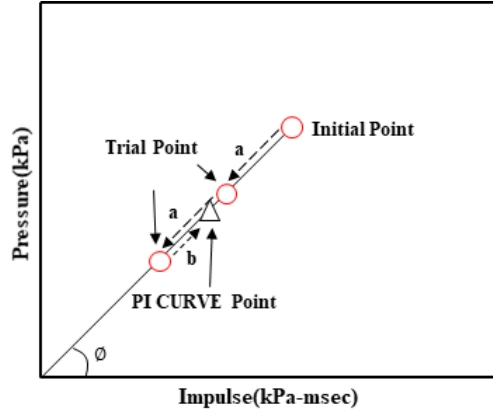


Fig. 4. P-I diagram calculation process.

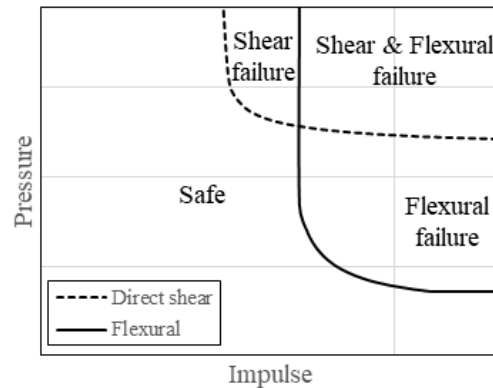


Fig. 5. Combined shear and flexural P-I diagram.

- (c) 위 과정을 반복하여 P-I 곡선 위의 한 점을 찾으며, 이 후 각도(θ)를 변화시키면서 반복한다.

이와 같은 방법으로 휨과 전단에 대한 P-I 곡선을 독립적으로 산출한다. 이후 Fig. 5와 같이 결합한다. Safe 영역은 파괴가 발생하지 않는 하중 조합을 나타내며, 하중이 전단 파괴 영역에 있는 경우 전단에 의한 파괴, 휨 파괴 영역에 있는 경우 휨에 의한 파괴, 전단 & 휨 파괴 영역의 경우 휨과 전단에 의한 파괴가 발생한다.

3. 변수 설정

방호벽에 영향을 끼치는 변수는 콘크리트 강도, 철근 항복강도, 방호벽 높이, 방호벽 두께, 철근비 등이 있다. 하지만, KOSHA GUIDE D-65-2018에서는 방호벽 높이, 방호벽 두께, 철근 직경, 철근 배근 간격과 성능에 대한 기준을 제공하기 때문에 콘크리트 강도, 철근비, 철근 항복강도에 대한 기준이 부족하다. 따라서, 다른 구조 지침을 참고하여, 특성 값을 설정하고 방호벽 성능 도달 여부를 확인하고자 한다.

철근 콘크리트용 봉강 국가 표준(KS D 3504)¹⁴⁾에 따르면 철근콘크리트에 사용되는 철근은 이형봉강이다. 종류는 일반용, 용접용, 특수내진용으로 분류되며, 일반용의 항복강도는 300 ~ 700 MPa까지 분류된다. 따라서 철근의 항복강도는 300, 500, 700MPa로 설정한다.

「건축물의 구조기준 등에 관한 규칙」¹⁵⁾에 따르면 콘크리트의 경우 타설 후 4주가 지난 뒤 압축 강도는 15 MPa 이상을 기준으로 한다. 하지만, 일반적으로 시공 후 일정 시간이 지나면 강도는 더 증가하므로, 콘크리트 압축 강도는 20, 30, 40 MPa로 설정한다.

KOSHA GUIDE D-65-2018에 따르면 구조 설계 기준으로 “철근 직경 9 mm 이상, 철근 배근 간격은 가로세로 400 mm 이하, 높이 2000 mm 이상, 두께 120 mm 이상 그리고 일체로 된 철근콘크리트 기초”라고 명시되어 있다. 이에, 방호벽 높이는 2 m, 3 m, 4 m로, 두께는 120, 160, 200 mm를 설정한다.

「콘크리트 벽체 설계기준」(KDS 14 20 72)¹⁶⁾에 따르면 최소 수직 철근비는 설계기준 항복강도 400 MPa 이상으로서 D16 이하의 이형철근을 사용할 경우 0.0012, 기타 이형철근의 경우 0.0015, 지름 16 mm이하의 용접 철망은 0.0012이다. 따라서 KOSHA GUIDE D-65-2018에서 두께 160 mm 일 때 철근 직경이 9 mm 간격이 400 mm라면 철근비는 0.00099이므로 0.001, 0.0015, 0.002로 설정한다.

변수 및 설정된 값들을 종합하면 아래 표와 같다.

Table 3. Parameters and Values

Parameters	Values
Yield Strength of Reinforcement (MPa)	300, 500, 700
Concrete Compressive Strength (MPa)	20, 30, 40
Reinforcement Ratio	0.001, 0.0015, 0.002
Height of protective wall (m)	2, 3, 4
Thickness of protective wall (mm)	120, 160, 200

4. 결과 및 분석

KOSHA GUIDE D-65-2018에 따르면 방호벽 성능 기준은 “20 ms 동안에 70 kPa 및 100 ms 동안에 20 kPa의 폭발압력에 견딜 수 있는 구조로 설계되어야 한다.”라고 명시되어 있다. 즉, 삼각형 압력이력을 가정했을 때, 최고압력이 70 kPa이고 충격량이 700 kPa·ms인 폭발과 최고압력이 20 kPa이고 충격량이 1000 kPa·ms인 폭발에서 피해 기준을 초과하면 안 된다.

3장에서 기술된 변수 값 별로 방호벽의 P-I 곡선을 도출하고, 기준에서 요구하고 있는 폭발에서 파괴 발

생 유무를 파악하여 기준의 합리성에 대해 분석하였다.

4.1 철근 항복강도의 영향

Fig. 6은 철근 항복강도(300, 500, 700 MPa)에 따른 방호능력 변화를 P-I 곡선으로 나타낸 것이다. 콘크리트 압축강도, 철근비, 방호벽 높이, 방호벽 두께는 각각 30 MPa, 0.0015, 3 m, 160 mm로 고정하였다. 철근 항복강도는 전단 파괴 관련 방호벽 성능에는 영향 거의 없으며, 휨 파괴에는 항복강도가 높을수록 좋은 성능을 보인다. 이는 철근콘크리트에서 인장에 대한 저항은 철근이 분담하기 때문이다.

Fig. 6의 녹색점은 KOSHA GUIDE D-65-2018에서 제시하고 있는 견뎌야 하는 폭압 특성을 나타낸다. 철근 항복강도가 300 MPa인 경우 녹색점이 P-I 곡선의 우측에 있으므로 파괴 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 지침에서 요구한 최소 두께 120 mm 보다 큰 160 mm를 사용하고 철근 또한 요구되는 철근비 0.001(두께 160 mm, 철근 직경 9 mm, 배근 간격 400 mm 기준)보다 큰 0.0015를 사용하였음에도, 철근의 항복강도가 300 MPa인 경우 지침에서 요구하는 성능을 발휘하지 못해 힘에 의한 파괴가 발생한다.

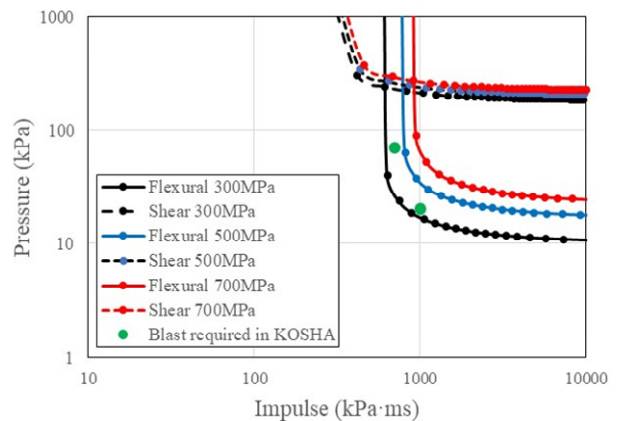


Fig. 6. Shear and flexural P-I diagram with different reinforcement yield strength.

4.2 콘크리트 압축강도의 영향

Fig. 7은 콘크리트 압축 강도(20, 30, 40 MPa)의 영향을 나타내는 P-I 곡선이다. 철근 항복강도, 철근비, 방호벽 높이, 두께는 각각 500 MPa, 0.0015, 3 m, 160 mm로 고정하였다. 콘크리트 압축 강도는 전단 및 휨 성능에 영향이 모두 미비한 것으로 나타났다. 이는 폭발하중에 대한 주요 구조적 저항이 압축이 아닌 인장에 의해 지배받기 때문이다. 또한, 이 경우 성능 기준을 모두 만족하였다.

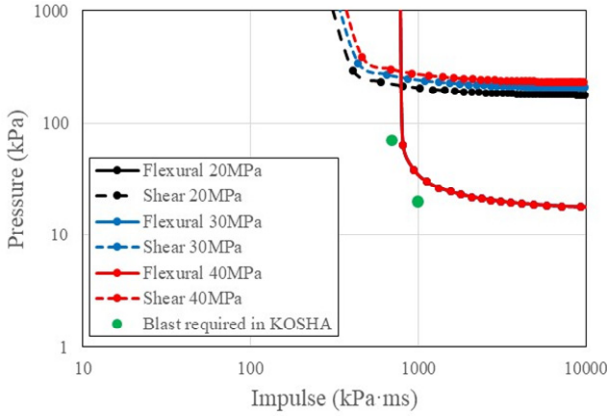


Fig. 7. Shear and flexural P-I diagram with different concrete compressive strength.

4.3 철근비의 영향

Fig. 8은 철근비(0.001, 0.0015, 0.002)의 영향을 나타내는 P-I 곡선이다. 철근 항복강도, 콘크리트 압축강도, 방호벽 높이, 두께는 각각 500 MPa, 30 MPa, 3 m, 160 mm로 고정하였다. 전단 파괴에 대한 방호벽 성능에 미미하며, 휨 파괴에 대한 방호벽 성능에는 일부 영향을 준다. 이는 철근 항복강도의 경우와 동일하게 철근 콘크리트에서 인장에 대한 저항은 철근이 분담하기 때문이다.

철근비가 0.001일 때 성능 기준을 만족하지 못하고 휨 파괴가 발생하는 것으로 나타난다.

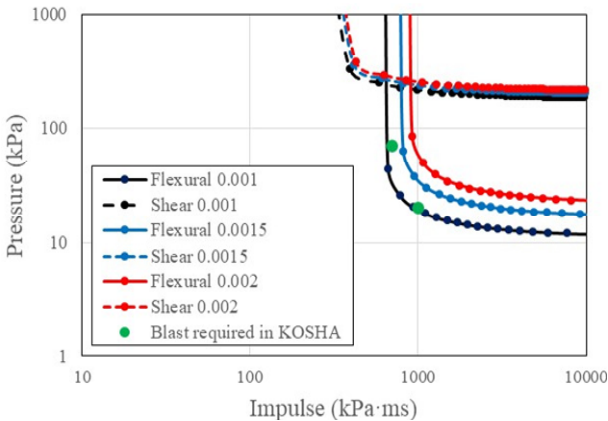


Fig. 8. P-I diagram of shear and flexural response with different steel Ratio.

4.4 방호벽 높이에 대한 영향

Fig. 9는 방호벽 높이(2 m, 3 m, 4 m)의 영향을 나타내는 P-I 곡선이다. 철근 항복강도, 콘크리트 압축강도, 철근비, 두께는 각각 500 MPa, 30 MPa, 0.0015, 160 mm로 고정하였다. 방호벽 높이는 방호벽의 전단

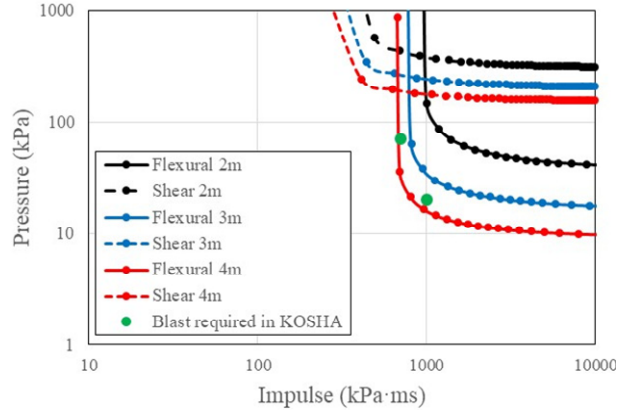


Fig. 9. Shear and flexural P-I diagram with different RC slab height.

성능과 휨 성능에 영향을 준다. 폭발 하중은 면적당 받는 힘으로 나타낼 수 있기 때문에, 방호벽 높이가 증가할수록 폭발 하중을 받는 면적이 증가하여 받는 하중도 증가한다. 따라서, 방호벽 높이가 4 m일 때 성능 기준을 만족하지 못하고 휨 파괴가 발생하는 것으로 나타난다.

4.5 방호벽 두께의 영향

Fig. 10은 방호벽 두께(120 mm, 160 mm, 200 mm)의 영향을 나타내는 P-I 곡선이다. 철근 항복강도, 콘크리트 압축강도, 철근비, 방호벽 높이는 각각 500 MPa, 30 MPa, 0.0015, 3 m로 고정하였다. 방호벽 두께는 방호벽의 전단 성능과 휨 성능에 영향을 준다. 이는 방호벽 두께가 증가할수록 방호벽의 휨 저항과 전단 저항뿐만 아니라 관성력도 증가하기 때문이다.

방호벽 두께가 120 mm일 때 성능 기준을 만족하지 못하고 휨 파괴가 발생하였다.

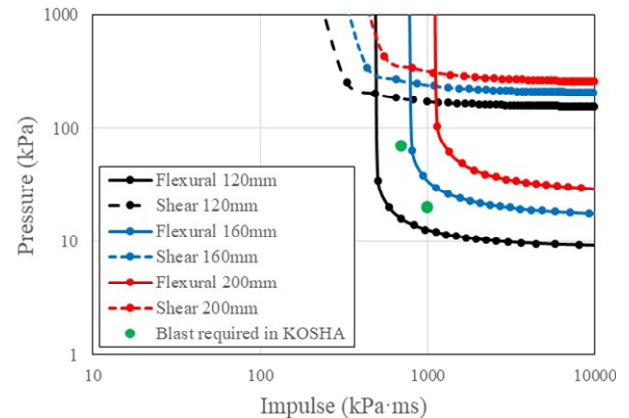


Fig. 10. P-I diagram of shear and flexural response with different RC slab Depth.

Table 4. Failed cases

Related parameters		Yield strength of reinforcement (MPa)	Reinforcement ratio	Height of protective wall (m)	Thickness of protective wall (mm)
Yield strength of reinforcement	Failed case	300	0.0015	3	160
	Required from KOSHA	NA	0.001	2	120
Reinforcement ratio	Failed case	500	0.001	3	160
	Required from KOSHA	NA	0.001	2	120
Height of protective wall	Failed case	500	0.0015	4	160
	Required from KOSHA	NA	0.001	2	120
Thickness of protective wall	Failed case	500	0.0015	3	120
	Required from KOSHA	NA	0.0013	2	120

4.5 소결

전단 성능과 관련하여, 방호벽의 높이와 두께의 경우 영향을 크게 미치지만, 콘크리트 압축강도, 철근 항복강도, 철근비는 영향이 미미한 것으로 분석되었다. 휨 성능의 경우 콘크리트 압축강도를 제외한 모든 변수에 영향을 받았다.

철근 항복강도, 철근비, 방호벽 높이 및 두께를 KOSHA GUIDE D-65-2018에서 제시한 기준으로 적용했음에도 파괴가 발생하는 것으로 분석되었으며, 파괴가 발생한 경우를 종합하면 아래와 같다. 현재 범위(20 MPa-40 MPa)에서 압축강도 감소에 의한 파괴는 발생하지 않음으로 Table 4에 포함하지 않았다.

5. 결론

본 연구에서는 KOSHA GUIDE D-65-2018에서 제시한 기준에 따라 설계된 방호벽의 성능을 전단 및 휨을 고려한 P-I 곡선을 활용해 분석하여 아래와 같은 결과를 도출하였다.

- 철근 항복강도에 대한 기준은 KOSHA에서 제시하고 있지 않으나, 콘크리트 압축강도, 철근비, 방호벽 높이, 방호벽 두께는 각각 30 MPa, 0.0015, 3 m, 160 mm로 고정하고 항복강도(300 MPa, 500 MPa, 700 MPa)를 변수로 했을 때, 항복강도가 300 MPa이라면 방호벽 성능 기준을 만족하지 못한다. 따라서, 항복강도에 대한 기준 도입이 필요하다.
- 철근 항복강도, 콘크리트 압축강도, 방호벽 높이, 두께는 각각 500 MPa, 30 MPa, 3 m, 160 mm로 고정하고 철근비(0.001, 0.0015, 0.002)를 변수로 했을 때, 철근비 0.001의 경우 파괴가 발생하였다. 현재 KOSHA의 최소 배근 간격 400 mm, 최소 철근 직경 9mm는 충분하지 않은 것으로 판단된다. 또한, 철근비의 경우 두께에도 영향을 받으므로

KDS 14 20 72 및 방호성능을 고려하여 철근비 기준을 추가하는 것이 적절하다.

- 철근 항복강도, 콘크리트 압축강도, 철근비, 방호벽 높이는 각각 500 MPa, 30 MPa, 0.0015, 3 m로 고정하고 방호벽 두께(120 mm, 160 mm, 200 mm)를 변수로 했을 때, 방호벽 두께 120 mm에서 파괴가 발생했다. 따라서, KOSHA의 두께 기준은 상향될 필요가 있다.
- 철근 항복강도, 콘크리트 압축강도, 철근비, 두께는 각각 500 MPa, 30 MPa, 0.0015, 160 mm로 고정하고 높이(2 m, 3 m, 4 m)를 변수로 했을 때, 방호벽의 높이가 3 m인 경우 성능을 만족 못 하였다. 높이는 하중의 크기를 증대시키는 효과가 있으므로 성능 기준으로 사용하기 위해서는 일정 수준 이하로 설정하여야 한다.

Acknowledgement: This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (No. 202158 10100020).

References

- 1) Korea Occupational Safety & Health Agency, “KOSHA GUIDE D-65-2018: Technical Guidelines for Design and Installation of Protective Structures”, 2018.
- 2) T. R. Slawson, “Dynamic Shear Failure of Shallow-buried Flat-roofed Reinforced Concrete Structures Subjected to Blast Loading”, Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg Ms Structures Lab, pp. 7-10 1984.
- 3) J. Xu, C. Wu and Z. Li, “Analysis of Direct Shear Failure Mode for RC Slabs under External Explosive Loading”, International Journal of Impact Engineering, Vol. 69, pp.

- 136-148, 2014.
- 4) R. Yu, L. Chen, Q. Fang, H. Yan and G. Chen, "Generation of Pressure-impulse Diagrams for Failure Modes of RC Columns Subjected to Blast Loads", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 100, pp. 520-535, 2019.
 - 5) J. M. Biggs, "Introduction to Structural Dynamics", McGraw-Hill College, pp. 1-314 1964.
 - 6) S. J. Lee, J. Y. Park, Y. H. Lee and H. S. Kim, "Experimental Analysis on the Criteria of the Explosion Damage for One-way RC Slabs", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 32, No. 6, pp.68-74, 2017.
 - 7) S. J. Lee, T. K. Oh, J. Y. Park and H. S. Kim, "The Study on the Optimal NDT Method for the Explosion Damage Analysis for One-way RC Slabs", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 32, No. 5, pp. 62-68, 2017.
 - 8) W. El-Dakhakhni, W. Mekky and S. Rezaei, "Validity of SDOF Models for Analyzing Two-way Reinforced Concrete Panels under Blast Loading", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 24, No. 4, pp. 311-325, 2010.
 - 9) US Army Corps of Engineers, "PDC TR 06-08: Single Degree of Freedom Structural Response Limits for Antiterrorism Design", 2006.
 - 10) T. Krauthammer, N. Bazeos and T. J. Holmquist, "Modified SDOF Analysis of RC Box-Type Structures", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 112, No. 4, pp. 726-744, 1986.
 - 11) US Department of the Army, "UFC 3-340-02: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions", 2008.
 - 12) US Army Corps of Engineers, "PDC TR 06-01: Methodology Manual for Single Degree of Freedom Blast Effects Design Spreadsheets (SBEDS)", 2008.
 - 13) J. H. Kee and J. Y. Park, "Simple PI Diagram for Structural Components based on Support Rotation Angle Criteria", *Advances in Concrete Construction*, Vol. 10, No. 6, pp. 509-514, 2020.
 - 14) Korean Agency for Technology and Standards, "KS D 3504:2021: Steel bars for Concrete Reinforcement", pp. 2, 2021.
 - 15) Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Regulations on Structural Standards, etc. of Buildings", 2021.
 - 16) Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "KDS 14 20 00: Concrete wall design standards, 2022.