

원통형 구조물의 발파해체를 위한 사전 취약화에 따른 구조물의 안정성에 관한 수치해석적 연구

박 훈^{1)*}, 석철기²⁾, 김승곤³⁾

Numerical Study on the Structural Behavior Accorded by Pre-weakening Before Demolishing a Cylindrical Structure

Hoon Park, Chul-Gi Suk and Seung-Kon Kim

Abstract In this study, the structural behavior accorded by pre-weakening before demolishing a cylindrical structure was investigated to ensure structural stability using 3 dimensional applied element method (3D AEM). An opening angle of crushed area for the pre-weakening was changed to examine the displacement behavior of the cylindrical structure. This study shows that the crushing range for pre-weakness must be below 40% to void the collapse of the cylindrical silo structure.

Key words Cylindrical structure, Pre-weakness, Opening angle

초 록 본 연구에서는 대규모 원통형 구조물의 사전 취약화에 따른 구조적 안전성을 확보하기 위하여 파쇄 각도에 대한 구조물의 붕괴 영향을 검토하였다. 파쇄 각도에 대한 영향을 검토하기 위해 구조적으로 동일한 원통형 구조물을 ELS 프로그램을 이용하여 모형화하였다. 파쇄 형태 및 높이에 대한 변수는 고정시키고, 파쇄 각도를 변화시키면서 시간에 따른 각 방향별 변위를 분석하였다. 원통형 구조물의 시뮬레이션 결과, 사전 취약화에 대한 파쇄 범위는 40%이하 이어야 한다는 것을 확인할 수 있었다.

핵심어 원통형 구조물, 사전 취약화, 개구각도

1. 서 론

최근 노후화된 사일로에 대한 해체가 증가하고 있으며 대규모, 고강도, 고강성을 가지고 있는 사일로의 경우에는 주로 D.W.S(Diamond Wire Saw)와 압쇄기를 이용한 기계식 해체에 의존하고 있다. 그러나 기계식 해체는 해체공기의 증가라는 시간적 제약과 함께 환경위해적인 요소를 내재하는 공간적 제약을 가지고 있으므로 이러한 시·공간적인 제약을 최소화하기 위

해 발파해체 공법을 적용하는 경우도 있다. 국내에서는 사일로의 발파해체는 현재까지 1994년에 1건이 보고되고 있으나, 발파해체가 성공적으로 이루어지지 않았다(석철기와 김태훈, 1995).

사일로와 굴뚝은 원통형 구조로 되어있지만, 구조적 특성 및 규모가 상당히 다르다. 특히 사일로의 경우는 두꺼운 콘크리트 벽체로 구성되어 있으며, 일반적으로 슬립폼(slip form)에 의해 건설되므로 신축이음(expansion joint) 및 구조적 취약성이 없는 구조를 가지고 있다(Elliot and Woolf, 2000). 또한 굴뚝에 비해 높이 대 지름의 비가 크지 않고, 대규모 원통형 구조물이기 때문에 굴뚝보다 전도가 용이하지 않는 특성을 지니고 있다.

발파해체시 구조물의 붕괴거동을 용이하게 하기 위

¹⁾ (주)코리아 카코 연구원

²⁾ (주)코리아 카코 대표

³⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과 교수

* 교신저자 : hujin@chonbuk.ac.kr

접수일 : 2008년 5월 18일

게재 승인일 : 2008년 6월 5일

해 구조적 취약부분을 만들며 이를 사전 취약화라 한다. 이러한 사전 취약화는 구조적 안전성이 확보된 상태에서 작업을 해야하며, 사일로와 같은 대규모 원통형 구조물의 경우에는 경험적인 방법으로 사전 취약화하기가 어려우며, 부적절한 사전 취약화는 위해적인 요소를 내포하고 있다.

본 연구에서는 대규모 원통형 구조물의 사전 취약화 작업시 구조적 안전성을 확보하기 위하여 사전 파쇄되는 부분의 파쇄 각도에 대한 구조물의 붕괴 영향을 검토하였다. 파쇄 각도에 대한 영향을 검토하기 위해 구조적으로 동일한 원통형 구조물을 모형화하여 파쇄 형태 및 높이에 대한 변수는 고정시키고, 파쇄 각도를 변화시키면서 시간에 따른 각 방향별 변위를 분석하였다.

2. Applied Element Method(AEM)

AEM은 Fig. 1과 같이 실제 구조물을 작은 요소들로 모델링 할 수 있으며, 두 요소는 수직 스프링과 전단 스프링이 한 쌍을 이루며 요소 면에 분포되어 있고, 접촉점에 연결된 것으로 가정된다. 각각의 한 쌍의 스프링은 Fig. 1에서 빗금친 부분의 면적에 대한 응력과 변형을 나타내며, 수직 스프링과 전단 스프링의 강성은 다음 식 (1), 식 (2)와 같다.

$$K_n = \frac{E \times d \times T}{a} \quad (1)$$

$$K_s = \frac{G \times d \times T}{a} \quad (2)$$

여기서 d 는 한 쌍의 스프링 간의 거리, T 는 요소의 두께, a 는 한 쌍의 스프링이 나타내는 면적의 길이, E 는 영률, G 는 전단계수를 나타낸다.

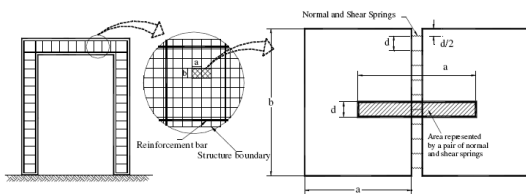


Fig. 1. Modeling of structure and face to face contact at AEM(ASI, 2006).

Fig. 2는 두 요소가 한 쌍의 수직 스프링과 전단 스프링이 접촉되었을 때를 가정한 것이다. 2차원 모델에서는 하나의 요소는 3개의 자유도를 가지며, 다음 식 (3)은 강성 매트릭스 상부 좌측의 성분을 나타낸 것이다.

$$\begin{pmatrix} \sin^2(\theta + \alpha)K_n & -K_n \sin(\theta + \alpha)\cos(\theta + \alpha) & \cos(\theta + \alpha)K_n L \sin(\alpha) \\ + \cos^2(\theta + \alpha)K_s & + K_s \sin(\theta + \alpha)\cos(\theta + \alpha) & - \sin(\theta + \alpha)K_n L \cos(\alpha) \\ -K_n \sin(\theta + \alpha)\cos(\theta + \alpha) & \sin^2(\theta + \alpha)K_n & \cos(\theta + \alpha)K_n L \cos(\alpha) \\ + K_s \sin(\theta + \alpha)\cos(\theta + \alpha) & + \cos^2(\theta + \alpha)K_s & + \sin(\theta + \alpha)K_n L \sin(\alpha) \\ \cos(\theta + \alpha)K_n L \sin(\alpha) & \cos(\theta + \alpha)K_n L \cos(\alpha) & L^2 \cos^2(\alpha)K_n \\ + \sin(\theta + \alpha)K_n L \cos(\alpha) & + \sin(\theta + \alpha)K_n L \sin(\alpha) & + L^2 \sin^2(\alpha)K_s \end{pmatrix} \quad (3)$$

3. 해석모델

ELS(Extreme Loading for Structures) 프로그램은 3차원 비선형 구조해석 프로그램으로 정적해석 및 동적해석이 가능하다. 또한 구조물의 구성재료가 철근 콘크리트, 철골, 철골조, 벽돌 등 다양하게 해석할 수 있으며, 지진, 발파, 충격, 수압 등에 대한 비선형 동적해석이 가능하다. 철근콘크리트 구조물의 경우에는 주철근 및 후크와 스트립을 상세히 모델링할 수 있다.

본 연구에서는 ELS 프로그램을 이용하여 대규모 원통형 구조물을 모델링하였으며(ASI, 2006), 주요 제원은 Table 1과 같고, 원통형 구조물의 입력 물성은 ELS 프로그램에서 내장된 보통콘크리트의 물성을 이용하였으며, Table 2와 같다. 원통형 구조물은 신축이 없는 구조로 모델링하기 위해 구조물 전체를 하나의 원통으로 모델링하였으며, 상부는 두께 300mm의

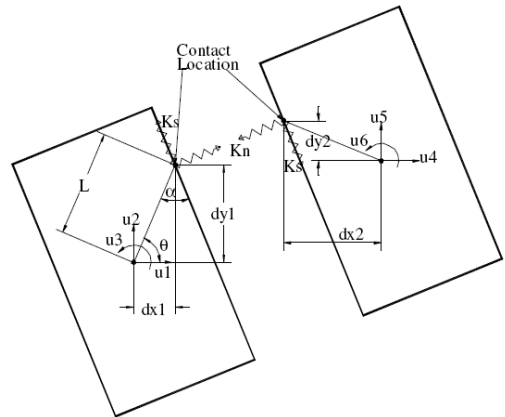


Fig. 2. Element shape, contact point, and degree of freedom (ASI, 2006).

Table 1. Specification condition of the cylindrical structure

Structure	Specification				
	Diameter(m)	Height(m)	Thickness(m)	Reinforcement	Stirrup
RC Shell	16.7	53.0	0.35	D25@100	D10@200

Table 2. Parameters of the analysis model for the cylindrical structure

Property	Young's modulus (MPa)	Shear modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Specific weight (kg/m ³)
Value	2.4×10 ⁴	9.7×10 ³	3.0	29.4	2,500

Table 3. Statistical information of used elements

Statistics	Matrix elements	Matrix springs	RFT springs	Frames
Number	3264	163450	111956	3011

철근콘크리트 슬래브로 마감하였다. 또한 AEM를 이용하여 분할된 요소에 대한 통계는 Table 3과 같다.

4. 해석방법

대규모 원통형 구조물의 사전 취약화를 모델링하기 위해 하단부 요소들을 제거하는 방식으로 사전 파쇄 각도를 증가시키면서 비선형 동적해석을 수행하였다. 사전 파쇄 높이는 4m로 일정하게 하였으며, 파쇄 형태는 사각형으로 고정하였다. 그리고 사전 파쇄 각도는 초기 60°를 선정하여, 110°부터 12°씩 증가시키면서 172°까지 해석하였다. Fig. 3은 사전 파쇄 각도에 따른 원통형 구조물의 모델이다. 사전 취약화되는 하단부 요소들은 0.01sec에 동시에 파쇄되도록 설정하였으며, 해석시간은 30sec로 하였다.

파쇄 각도 별로 파쇄된 하단부 중앙에서 원통형 구조물의 최상단 요소의 시간에 따른 각 방향별 변위와 전체 변위를 비교하여, 파쇄 각도에 따른 구조물의 안전성을 분석하였다.

5. 해석결과

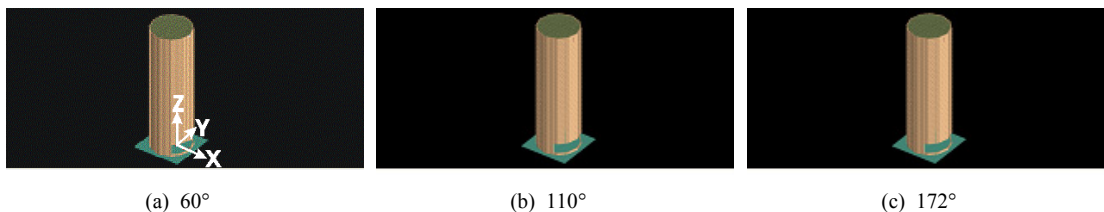
원통형 구조물의 파쇄범위는 파쇄된 부분의 호의 길이에 대한 원통형 구조물 둘레의 길이를 백분율로 나타낸 것으로 다음 식 (4)와 같다.

$$Range = \frac{b}{\pi D} \times 100(\%) \quad (4)$$

여기서 b 는 호의 길이(m), D 는 원통형 구조물의 지름(m)이다.

Table 4는 사전 파쇄 각도에 따른 각 방향별 최대변위 및 각 방향별 전체 변위를 나타낸 것이다. 파쇄 각도가 60°~160°의 경우에는 원통형 구조물은 붕괴되지 않았으며, 시간이 지나면서 하중의 재분배에 의해 영구 변위로 수렴하였다. 그러나 파쇄 각도가 172°의 경우에는 원통형 구조물이 전도가 되면서 붕괴되었다.

Fig. 4는 파쇄 범위와 각 방향별 최대변위와의 관계를 나타낸 것으로 파쇄 범위가 증가함에 따라 각 방향별 최대변위는 증가하는 경향을 보였다. 또한 파쇄 범



(a) 60°

(b) 110°

(c) 172°

Fig. 3. Cylindrical structure model changed with the opening angle of the crushed area.

위가 40% 이상의 경우에는 각 방향별 최대변위가 급격히 증가하였다. 구조물의 기울기에 대한 균열 발생 한계 기준은 1/500 이내이므로(한국시설안전공단, 2008), 160°(44.4%)인 경우는 구조물이 붕괴되지는 않았지만 균열 발생을 초래할 수 있다. 따라서 한 구역의 사전 파쇄 범위는 안전율을 고려하여 40%이내에서 수

행되어야 하며, 이 범위를 초과할 경우에는 구역마다 원통형 구조물의 하중을 지지할 수 있는 잔류 벽체를 남겨야 할 것으로 사료된다.

Fig. 5에서 Fig. 7은 각각 사전 파쇄 각도가 60°, 160°, 172°일 때 시간에 따른 각 방향별 변위를 나타낸 것이다. 파쇄 각도가 커질수록 각 방향별 영구 변

Table 4. Maximum displacement of the top of the structure model changed with the opening angle of the crushed area

Angle(Range, %)	Max. displacement (cm)			
	X	Y	Z	Total
60°(16.7)	0.443	0.006	-0.240	0.502
110°(30.6)	1.767	0.014	-0.550	1.850
122°(33.9)	2.464	0.013	-0.723	2.567
134°(37.2)	3.450	0.015	-0.968	3.580
148°(41.1)	4.959	0.034	-1.290	5.117
160°(44.4)	11.568	0.023	-2.550	11.846
172°(47.8)	4484.887	1411.603	-5251.112	7026.329

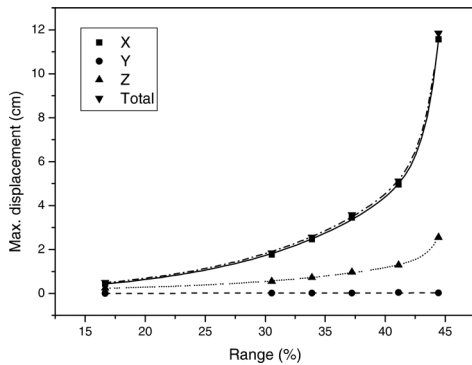


Fig. 4. Maximum displacement of the top of the structure model vs. Range of the crushed part.

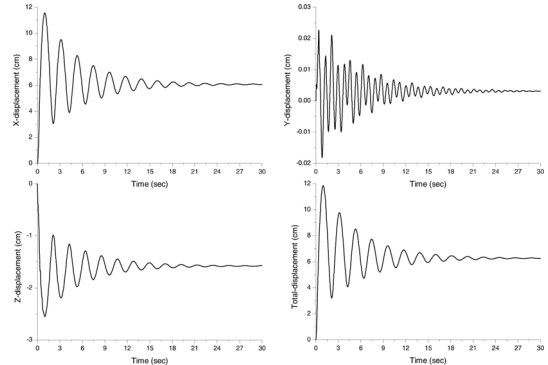


Fig. 6. Displacement-time histories in each direction at the opening angle of 160°.

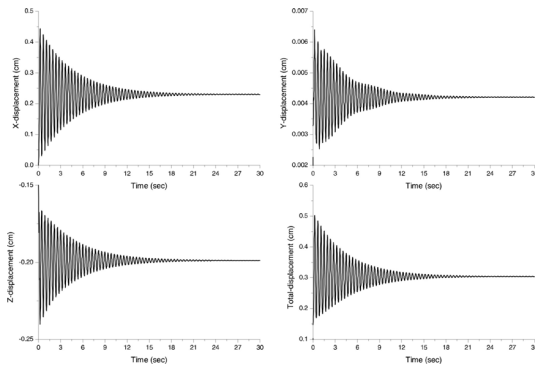


Fig. 5. Displacement-time histories in each direction at the opening angle of 60°.

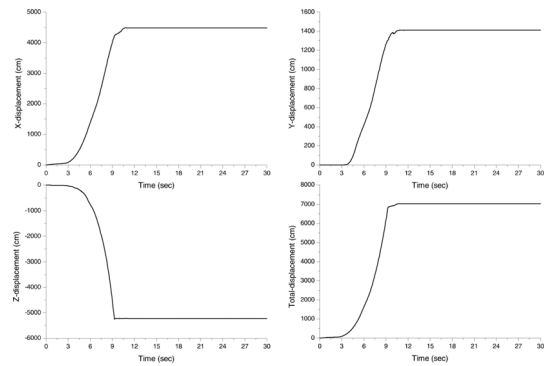


Fig. 7. Displacement-time histories in each direction at the opening angle of 172°.

위는 증가하였으며, 하중의 재분배에 따른 각 방향별 변위의 주기가 길어짐을 알 수 있다. 사전 파쇄 각도가 172°인 경우에는 사전 파쇄에 따른 구조물의 안정성을 확보하지 못하고 전도되었다.

6. 결론

본 연구에서 원통형 구조물의 사전 취약화에 대한 사전 파쇄 범위를 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 사전 파쇄 범위가 증가함에 따라 각 방향별 최대 변위는 증가하는 경향을 보였으며, 파쇄 범위가 40% 이상부터 각 방향별 최대변위는 급격히 증가하였다.
- 2) 파쇄 각도가 커질수록 각 방향별 영구 변위는 증가하는 경향을 보였으며, 구조물 자체의 안정성을 확보하기 위해 하중의 재분배 주기가 길어짐을 알 수 있다.
- 3) 원통형 구조물의 사전 파쇄 범위는 안전율을 고려하여 40%이내에서 수행되어야 하며, 이 범위를 초과할 경우에는 사전 파쇄 범위 내에 원통형 구조물의 하중을 지지할 수 있는 잔류 벽체를 남겨야

할 것으로 사료된다. 또한 향후 잔류벽체와 사전 파쇄 높이와의 관계를 고려하는 연구가 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(과제번호 : 06건설핵심B04)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 석철기, 김태훈, 1995, CEMENT SILO 발파해체 사례 연구, 최신엔지니어링 발파 특별 심포지움, 한국자원공학회, pp. 285-294.
2. 한국시설안전공단, 2008, 건축물 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침, 국토해양부 한국시설안전공단, pp. 59.
3. ASI, 2006, Extreme Loading for Structures Technical Manual, Applied Science International, USA.
4. Elliott, R. J. and R. Woolf, 2000, Demolition blasting of reinforced concrete structures, EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE-WORLD CONFERENCE, pp. 397-404.



박 훈

(주) 코리아 카코 연구원

Tel : 02)834-4590
E-mail : hujin@chonbuk.ac.kr



석 철 기

(주) 코리아 카코 대표

Tel : 02)834-4590
E-mail : kacoh@hanmail.net



김 승 곤

전북대학교 자원·에너지공학과 교수

Tel : 063)270-2365
E-mail : kimsk@chonbuk.ac.kr