

사일로의 경제적인 설계 기준 제시

고훈범*

¹인하공업전문대학 건축과

Proposed Design Guidelines for Optimum Economic Silo

Hune-Bum Ko^{1*}

¹Department of Architecture, Inha Technical College

요약 사일로에 대한 국내의 기존 연구는 여러 분야에서 다양하게 이루어져 왔으나 사일로 자체에 대한 설계나 시공에 대한 연구는 활발하게 이루어 졌다고는 할 수 없으며 경제적인 사일로설계에 대한 접근은 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 기업이나 설계업체 등에서 필요한 성능을 충족시키면서 가장 경제적인 사일로의 규모를 결정할 수 있는 기초 자료를 제시하고자 한다. 해석은 철근 콘크리트 구조에 국한하여 다양한 요인에 대하여 실시하였다. 각각 4종류 저장재료(밀가루, 곡립생식회, 모래, 철광석), 5종류 용량(1만, 3만, 5만, 7만, 9만톤)의 콘크리트 사일로에 대하여 8종류의 H/D(0.5~4)와 3종류의 콘크리트 압축강도(30, 35, 40MPa)를 고려한 해석을 실시하였다. 일반적으로 재료의 종류에 따라 H/D가 1~3사이에서 사일로 설계가 이루어지고 콘크리트 강도(40Pa이상)를 높일 수 있다면 가장 경제적인(50%이상의 물량 및 인건비 절감 가능) 사일로가 구현될 수 있다고 판단된다.

Abstract Previous domestic studies on silos have been carried out in many ways in various fields. On the other hand, research on the design and construction of the silo itself have not be conducted actively and an economical approach is rare. The present study provides basic information to determine the scale of the most economical silo, while satisfying the necessary conditions required by construction companies or design firms. The analysis was carried out with various parameters for reinforced concrete structures, including four kinds of storage material (flour, granulated quicklime, sand, and iron ore), five capacity sizes (10,000, 30,000, 50,000, 70,000, 90,000 ton), eight variants of H/D (0.5~4), and three types of concrete compressive strengths (30, 35, 40 MPa). The findings established a general rule in that a silo designed between 1 and 3 H/D with a greater concrete strength (40MPa and over) depending on the type of storage material would be the most cost-effective (more than 50% of quantity and labor savings).

Keywords : FEM, Height/diameter, Optimized design, Silo, Stored granular materials

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

다양한 입자상 물질을 저장하도록 광범위하게 사용되는 저장고를 원통형 저장용기라고 하며 사일로와 병커로 구분하고 깊은 저장용기를 사일로, 얇은 저장용기를 병커라고 하지만 합의된 규격은 없다. 그렇지만

Dishinger(저장용기 높이>1.5√ $\sqrt{\text{단면적}}$)와 Soviet code(저장용기 높이>1.5×원통의 직경)에 의해 사일로 규격은 제안되어져 있다. 본 논문에서는 사일로와 병커 구분 없이 원통형 저장용기를 사일로로 표기하고자 한다. 사일로는 원료 및 완제품을 저장하는 기능을 가지고 있는 구조물로서 밀이나 콩 등을 저장할 수 있는 농업용에서 시멘트 공장의 석회석이나 클링커 또는 석탄이나

이 논문은 2014년도 인하공업전문대학 교내연구비지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Hune-Bum Ko(Inha Technical college)

Tel: +82-32-870-2257 email: hbko@inhac.ac.kr

Received September 11, 2015

Revised (1st November 10, 2015, 2nd November 26, 2015)

Accepted January 5, 2016

Published January 31, 2016

금속 등을 저장하는 공업용 용도로 사용되고 있으며 강재나 철근 콘크리트로 지어진다. 사일로의 장점으로는 다른 저장고(창고포함)에 비교하여 공간을 비교적 효율적으로 이용할 수 있다는데 있다. 사일로의 크기 및 형태는 매우 다양하며 최근 설계 시공되는 사일로는 대형화 복잡화 되어가고 있는 추세이다.(Fig.1)

최근의 기계화된 혼합 및 하역 시스템을 채용한 사일로는 저장된 원료를 더 빠르게 외부로 배출시키기 위한 적지 않은 배출구도 가지고 있어야 한다. 이처럼 기능적인 사일로는 높고 큰 직경을 갖는 대용량 사일로가 대부분이다. 하지만 이런 대규모 사일로의 사용으로 인하여 붕괴의 가능성이 증대되고 내, 외부의 충격이나 특별한 사고 요인 없이 저장용량에 미달된 원료의 압력으로 붕괴된 사례도 보고되고 있다.(Fig.2)

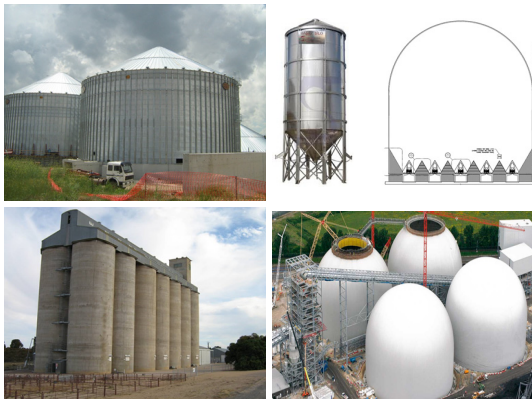


Fig. 1. Examples of silo



Fig. 2. Examples of silo collapse

현재까지 사일로 설계 및 시공이 외국기술에 의존하고 있는 실정인으로서 많은 비용을 지불하면서도 국내 설

계기술이 축적되고 있지 않은 실정이며 설계 기준도 미흡한 실정이다. 또한 대규모 사일로의 국내 연구 자료도 미흡한 실정이다.

그래서 본 연구에서는 원통형 저장용기에 대하여 이론적인 접근보다는 실무에서 간단하게 원통형 저장용기의 규모를 경제적으로 고려할 수 있는 기초 자료를 제시하고자 가장 많이 사용하는 철근 콘크리트 구조에 국한하여 다양한 저장재료에 대하여 콘크리트 강도를 변화시켜 원통 바닥 직경에 대한 높이의 비를 고려한 해석을 실시하고자 한다.

1.2 사일로의 관련된 기존 연구

외국에서는 19세기 후반부터 사일로의 건설되었으며 학문적으로는 1895년 Janssen에 의해 사일로의 이론식과 1897년 Airy에 의하여 사일로 벽면압 산정식이 발표되어 지금까지 이들의 연구결과가 각국의 사일로 설계에 폭넓게 사용되고 있다.[1,2] 소련에서는 1930년대부터 다양한 실험을 통하여 설계방법을 좀 더 정교하게 다듬었다. 가까운 일본에서는 1960년대부터 연구가 활발하게 이루어져 경제성장과 더불어 농업용뿐만 아니라 공업용 사일로의 요구도 급증하여 사일로의 설계 기준도 제시되어 있다.[3]

국내의 경우도 1970년대 경제성장기에 사일로의 대한 요구가 많아져 본격적으로 지어지기 시작하였으며 초기에는 설계기술이 전무하여 외국의 설계도면에 의존하여 시공되어 졌다. 물론 최근 국내시공 및 설계기술이 많이 발전하여 외국의 기술을 그대로 사용하지는 않는다. 하지만 설계는 지금도 미국의 ACI기준에 준하여 설계하고 있는 것도 사실이며 국내기준은 미흡한 실정이다. 특히 최근 사일로의 대형화, 복잡화 되고 있는 실정인으로서 경제적인 부가가치가 높아 외국의 특허기술로 지어지는 사례도 적지 않다.[4]

사일로에 관한 연구로는 오인환은 원통 사일로서 곡물의 저장용량 산출방법을 제안하였으며 정용성은 철근콘크리트 사일로의 설계에 대하여 사일로내의 저장원료 배출시 발생하는 비대칭 흐름의 기하학적 형상을 하중으로 고려하여 사일로 벽체에 가해지는 하중을 계산하고 사일로의 벽체 설계를 실시하였다. [5,6] 전석훈은 불균등한 벽면압을 받는 사일로 구조물의 구조적 거동특성에 관한 연구에서 석탄사일로의 벽면압 실측자료를 하중데이터로 활용하여 유한요소로 해석한 후, 원주방향 모멘트와

반경방향 모멘트의 관계를 분석하여 구조설계에 적용할 수 있는 추정치를 제안하였다.[1,7] 양승혁은 실험을 통하여 시멘트 사일로의 적분생성 역제대책을 제시하였으며 추학훈은 대형호퍼형 사일로의 저장 및 사용상에 있어서 구조물에 미치는 여러 하중을 고려하고 하부 구조물에 대한 구조해석을 실시하여 설계시 필요한 기본적인 자료를 제시하였다. [8,9] 박훈 등은 원통형 사일로 발파해체 시공사례를 제시하였으며 최훈 등은 원통형 콘크리트 사일로의 발파해체 전도공법 적용을 위하여 사전 취약화에 따른 유한요소 해석 및 구조해석을 실시하였다.[10,11] 유창현은 도시재생 측면에서의 근대산업유산의 하나로 노후 사일로의 보존과 활용에 관한 아이디어를 제시하였다.[12] 김영택은 발전용 석탄 사일로에 대하여 FEM을 이용한 구조해석을 수행하여 등가응력과 안전도를 분석하고 구조설계의 건전성을 평가하였다.[13]

이렇게 사일로에 대한 국내의 기존 연구는 여러 분야에서 다양하게 이루어져 왔으나 사일로 자체에 대한 설계나 시공에 대한 연구는 활발하게 이루어 졌다고는 할 수 없으며 경제적인 사일로설계에 대한 접근은 이루어지지 않았다.

2. 사일로 구조해석 내용

2.1 해석대상

해석대상을 결정하는 일은 쉽지 않으며 용량, 부피, 직경에 대한 높이 비, 저장재료, 경제성 등 다양한 요소를 고려해야 한다. 그래서 본 연구에서는 가장 많이 사용하는 철근콘크리트 구조물을 대상으로 하고 재료용량, 재료종류, H(높이)/D(직경), 콘크리트 강도를 주요한 변수로 결정하였으며 변수에 대한 상세내용은 Table 1과 같다.

Table 1. Analysis Variables

Quantity(ton)	10000, 30000, 50000, 70000, 90000
Material type	Flour, Lime-burned-coarse burnt lime, Sand, Iron ore
H(height)/D(diameter)	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0
Concrete compressive strength (MPa)	30, 35, 40

Fig. 3은 높이에 대한 용기 직경 비를 입체적으로 보여주고 있으며 사용된 철근의 항복강도는 400MPa이다. 총 480 경우에 대하여 해석을 실시하였다.

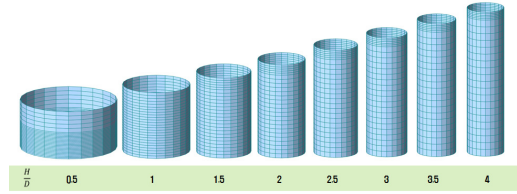


Fig. 3. Model patterns by H/D

2.2 해석하중

저장재료의 설계용 하중은 정지압뿐만 아니라 재료의 적재시, 배출시 예상되는 모든 압력의 증감을 고려해야 하며, 용기에 작용하는 압력을 계산하기 위해서는 먼저 저장재료의 특성을 파악해야 한다. 저장재료는 KBC 기준에서 제시된 재료의 무게에서 최소와 최대 값, 그리고 각각 4등분한 값에 해당하는 재료를 선택하였다.[14] 재료의 무게, 정지마찰각, 마찰계수는 Table 2와 같다.

Table 2. Material properties

Material type	Weight (kN/m ³)	Angle of repose, DEG.(≈ρ)	Coefficient of friction (μ')	
			concrete	steel
Flour	6.1	40	0.30	0.30
Lime-burned-coarse	12.00	35	0.50	0.30
Sand	16.0~20.0	25~40	0.40~0.70	0.35~0.50
Iron ore	24.60	40	0.50	0.36

정지된 상태의 저장된 재료에 의하여 용기의 벽체에 작용하는 정지압은 Janssen식을 이용하여 구한다. [15] 적재 상부로부터 깊이 Y인 지점에서 수직방향 단위정지압은 식 (1)과 같다.

$$q = \frac{\gamma R}{\mu' k} [1 - e^{-\mu' k Y/R}] \quad (1)$$

깊이 Y에서 수평방향 단위정지압은 식 (2)와 같다.

$$p = qk \quad (2)$$

$$k = \frac{1 - \sin \rho}{1 + \sin \rho}$$

깊이 Y 에서 벽체의 단위길이당 작용하는 수직방향 마찰력은 식 (3)과 같다.

$$V = (\gamma Y - 0.8q)R \quad (3)$$

γ : 저장재료의 단위부피당 무게, D : 용기의 내직경, μ' : 저장재료와 벽체 또는 배출구면 사이의 마찰계수, ρ : 내부마찰각 또는 정지마찰각, H : 배출구 상단 또는 절곡점으로 부터 용기 상단까지의 용기높이, R : 적재공간의 수평단면에 대한 정수압반경(원형용기: $R = D/4$), k : q 에 대한 p 의 비율

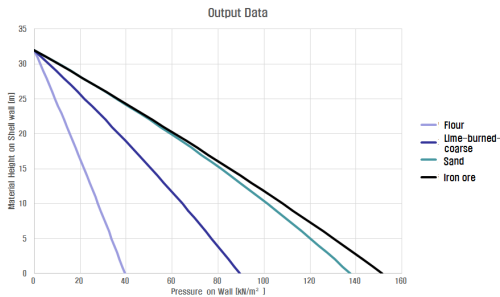


Fig. 4. The pressure of the material

Fig. 4는 벽체의 높이에 따라 벽체에 적용되는 압력의 예를 보여주고 있다.

저장재료는 계절에 따라 간헐 있는 상태에서 90도 이상으로 온도가 올라 갈 수 있는데 이 때문에 저장용기의 벽체에 내부와 외부의 온도차이로 인한 모멘트가 발생한다. 물론 최근에는 저장용기의 내 외부 온도차이가 크지 않게 자동시스템을 채택하고 있다. 그래서 최대 온도 차이에 의한 모멘트는 인천지역 기상청 자료(사일로가 많이 시공되는 곳으로 연구대상 지역임)를 통하여 내 외부 온도차를 30도로 가정하여 온도 차이에 의한 모멘트도 고려하였다. 모멘트는 식 (4)와 같다.

$$M_t = \frac{E_c h^2 \alpha_c \Delta T}{12(1-\nu)} \quad (4)$$

E_c : 콘크리트 탄성계수, h : 벽체두께, α_c : 선팽창계수, ΔT : 내외부의 온도차(30℃), ν : 프아송비

그 외 하중으로 풍하중, 지진하중, 적설하중이 있으며

인천지역을 기반으로 적용하였다. 풍하중인 경우 기본풍속 30m/s, 노풍도 C, 중요도 계수 1.9, 지형계수 1.0, 지진하중인 경우 지역계수 0.22, 지반종류 S_B , 중요도 계수 1.2(내진등급 I), 반응수정계수 3, 적설하중인 경우 기본 지상적설하중 0.8, 노출계수 1.0, 중요도 계수 1.0, 지붕 적설하중계수 0.7, 온도계수 1.2를 적용하였다.

2.3 부재력 검토식

저장용기에 고려해야 하는 하중들을 전부 적용하고 구조해석 프로그램으로 해석을 하여 저장용기 벽체에 발생하는 인장력과 압축력에 대한 축력과 휨모멘트, 전단력을 구하였다.

$$\text{축력의 인장력: } F_u \leq \phi A_s f_y \quad (5)$$

$$\text{축력의 압축력: } F_u \leq 0.8 \phi 0.85 f_{ck} A_g \quad (6)$$

휨모멘트 인장응력:

$$M_u \leq \phi A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right), \quad a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_{ck} b} \quad (7)$$

휨모멘트 압축응력:

$$\frac{M_u}{Z} \leq 0.8 \phi 0.85 f_{ck} \quad (8)$$

$$\text{전단력: } V_u \leq \phi \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} b_w d \quad (9)$$

F_u : 계수축력, A_s : 인장철근량, f_y : 철근의 설계기준항복강도, f_{ck} : 콘크리트의 설계기준강도, A_g : 전체 단면적, M_u : 계수휨모멘트, d : 유효깊이, b : 부재의 복부폭, ϕ : 강도감소계수, Z : 단면계수, V_u : 수평 계수전단력, b_w : 플랜지가 있는 부재에서의 복부폭

Fig. 5는 해석시 사용된 H/D에 따른 재료하중과 각각의 부재력을 보여주고 있다.

2.4 물량 분석

경제적인 물량분석을 위하여 Fig. 6와 같이 구조적인 최소 벽체 두께(210mm)와 철근의 직경을 결정한 후 해석 결과의 축력과 휨모멘트, 전단력으로 요구되는 최대 허용값에 도달했을 때의 필요한 콘크리트 량과 수직 및 수평 철근의 량을 계산하였다. 최소벽체두께가 하중에 견디지 못하는 경우 벽체의 두께를 10mm씩 증가시키면서 최대 허용값 도달여부를 평가 하였다.

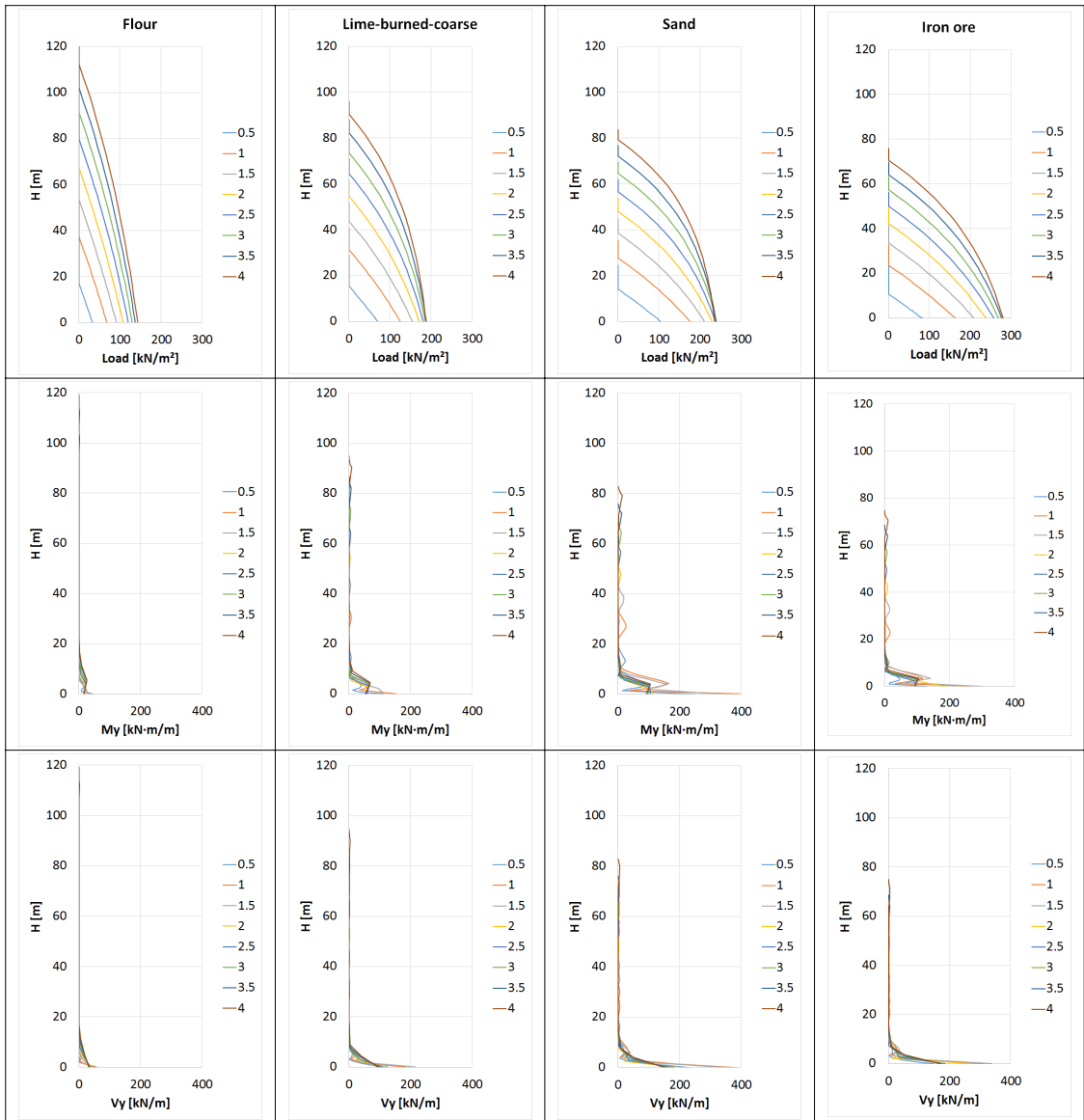


Fig. 5. Material load and member force

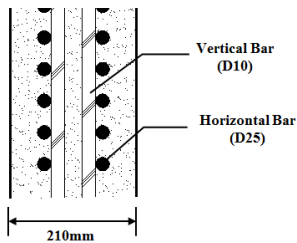


Fig. 6. Basic wall section for analysis

3. 사일로 구조해석 결과

모든 해석결과를 나타내기에는 어려워 해석결과중 가장 대표할 수 있는 값을 선택하여 Fig 7과 Fig. 8과 같이 전체적인 경향을 알 수 있도록 그래프로 표시하였다. 해석 결과는 저장량별, 저장재료별, 높이에 대한 직경비별, 콘크리트 강도별로 구분하여 나타내고자 한다. 콘크리트 물량은 m^3 으로 철근 물량은 ton으로 나타내었다.

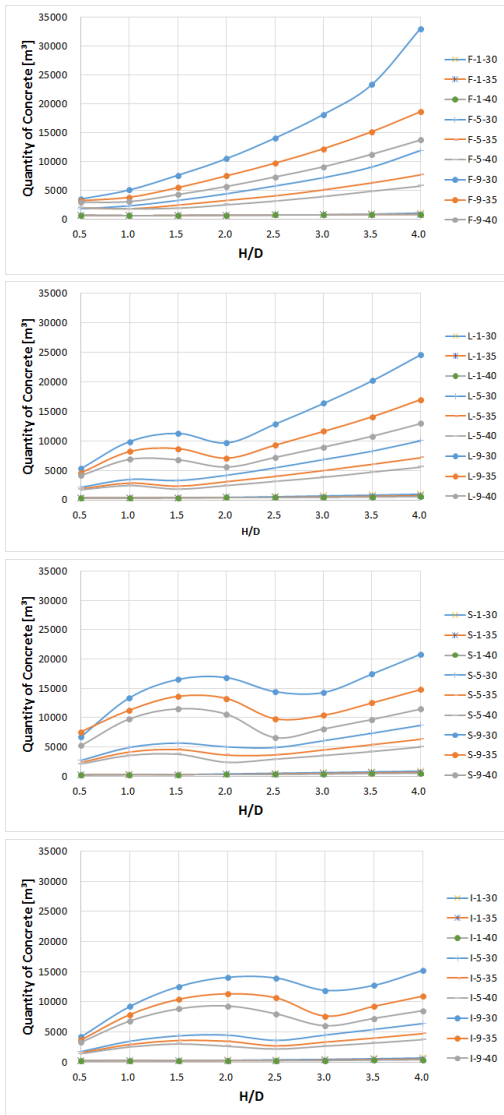


Fig. 7. Analysis results (concrete)

재료에 대한 표기로 F=밀가루, L=과립생석회, 그래프에서 A-B-C는 재료-용량-콘크리트 강도를 의미하며, S=모래, I=철광석으로, 용량에 대한 표기로는 1=10,000톤, 5=50,000톤, 9=90,000ton을 나타내며, 콘크리트강도는 MPa를 의미한다.

3.1 저장량별 물량

Fig 7과 Fig. 8에서 살펴보면 저장량이 많을수록 콘크리트나 철근의 물량은 늘어나는 것을 알 수 있는데 동일재료와 동일한 콘크리트 강도를 사용한 경우 H/D비가

클수록 콘크리트와 철근 물량의 변화가 크다는 것을 알 수 있다.

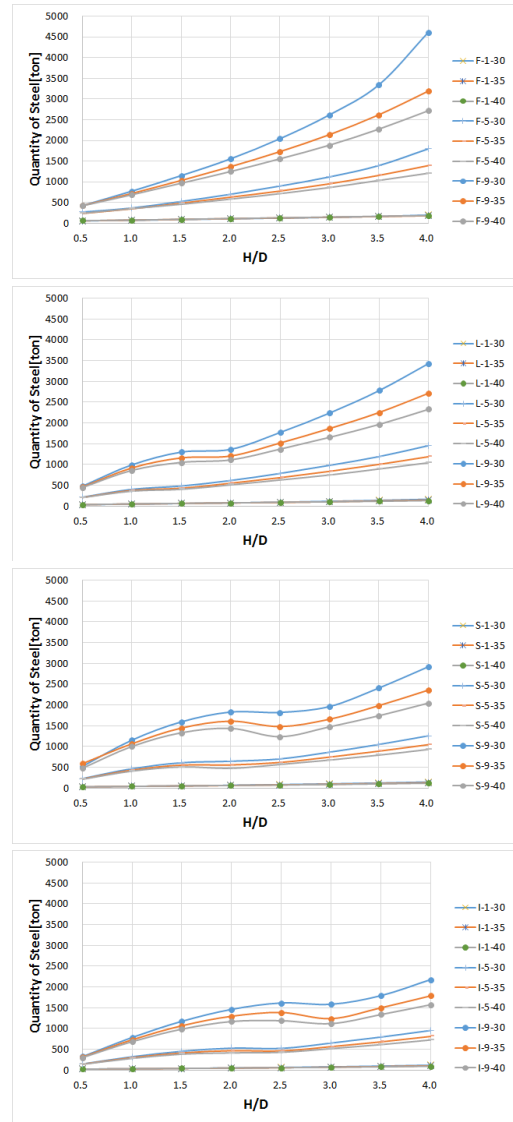


Fig. 8. Analysis results (steel)

3.2 저장재료별 물량

Fig 7과 Fig. 8에서 F-1-30, L-1-30, S-1-30, I-1-30를 살펴보면 H/D=0.5인 경우, 모래의 콘크리트 물량이 가장 크며 H/D가 4인 경우는 질량이 큰 재료일수록 콘크리트 물량이 작게 나타났다. 철근물량도 동일한 경향을 보여주고 있다.

3.3 직경에 대한 높이비별 물량

Fig 7과 Fig. 8에서 살펴보면 재료의 질량과 상관없이 H/D비가 클수록 콘크리트 물량이나 철근 물량이 점차적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 밀가루인 경우 증가 추세에 변화가 없으나 모래, 과립생석회, 철광석인 경우 물량의 증가 추세는 과형으로 증가에서 감소 다시 증가하는 추세를 보여주고 있다. 이러한 경향은 철근 물량에 비해 콘크리트 물량인 경우가 뚜렷하다. 특히 콘크리트 물량에서 질량이 큰 재료 일수록 증가에서 감소하는 시기(과립생석회 1.5, 모래 2, 철광석 2.5)가 늦다는 것을 알 수 있다.

3.4 콘크리트 강도별 물량

Fig 7과 Fig. 8에서 살펴보면 동일조건인 재료와 용량인 경우 콘크리트 강도가 클수록 철근 및 콘크리트 물량은 작아지는 것을 알 수 있다.

전체적인 해석 결과를 살펴보면 동일한 용량의 사일로인 경우 콘크리트 및 철근 물량은 H/D의 영향을 가장 많이 받는 것으로 알 수 있었으며 전반적으로 H/D가 클수록 필요 물량은 증가하는 것을 알 수 있었다.

콘크리트 물량인 경우 모든 재료에서 H/D=0.5, 1 순서로 물량이 증가하다가 재료의 질량이 커질수록 H/D=2~3사이에서 물량이 줄어드는 구간을 발견할 수 있었다. 콘크리트 강도도 콘크리트 및 철근 물량에 영향을 주었으며 강도가 클수록 물량이 적어지는 것을 알 수 있었다. 사일로의 용량이 커질수록 H/D와 콘크리트 강도의 영향이 커지는 것을 알 수 있었다.

4. 경제적인 사일로 설계제안

Table 3은 각 재료별 용량별로 최대물량과 최소물량을 산출한 값으로 예외 없이 동일용량에서는 H/D가 4인 사일로는 가장 큰 물량을 나타내었다.

표는 동일 용량 사일로서서 H/D가 4, 콘크리트 강도가 30MPa인 경우의 콘크리트와 철근의 물량을 100으로 보고 그 용량에서 각각 콘크리트와 철근 물량이 가장 작은 값인 H/D를 찾아 비교 분석한 값이다. 모든 재료에서 H/D가 0.5 또는 1.0에서 가장 작은 물량을 보여주고 있다. Table 4와 Table 5는 Table 3에 근거하여 일반적인 사일로인 경우 H/D가 1 이상인 경우가 대부분이므로 각

재료 및 용량에 대해서 콘크리트 강도별로 물량이 가장 작은 경우의 H/D를 조사하였다. 콘크리트인 경우 밀가루(무게=6.1)에서는 H/D= 1.0에서 가장 작게 나타났으나 과립생석회(무게=12)에서는 H/D=1(5회), H/D=1.5(6회), H/D=2(4회), 모래(무게=18)에서는 H/D=1(2회), H/D=1.5 (2회), H/D=2(5회), H/D=2.5(6회), 철광석(무게 24.6)에서는 H/D=1(7회), H/D=1.5 (1회), H/D=2 (2

Table 3. Analysis Result (Minimum Quantity)

Material type	Quantity (ton)	Concrete Strength (MPa)	H/D	Concrete Quantity (m ³)	ratio (%)	Steel Quantity (ton)	ratio (%)
Flour	10,000	30	4.0	1058	100	197	100
Flour	10,000	30	1.0	615	58	72	37
Flour	10,000	30	0.5	677	64	59	30
Flour	30,000	30	4.0	5296	100	850	100
Flour	30,000	30	1.0	1278	24	203	24
Flour	30,000	30	0.5	1408	27	145	17
Flour	50,000	30	4.0	11912	100	1798	100
Flour	50,000	30	0.5	1797	15	271	15
Flour	50,000	35	0.5	1979	17	236	13
Flour	70,000	30	4.0	21072	100	3045	100
Flour	70,000	40	1.0	2249	11	507	17
Flour	70,000	30	0.5	2477	12	316	10
Flour	90,000	30	4.0	33051	100	4612	100
Flour	90,000	40	0.5	2929	9	420	9
Lime	10,000	30	4.0	990	100	168	100
Lime	10,000	30	1.0	375	38	52	31
Lime	10,000	30	0.5	380	38	38	23
Lime	30,000	30	4.0	4737	100	713	100
Lime	30,000	40	0.5	865	18	111	16
Lime	50,000	30	4.0	10058	100	1460	100
Lime	50,000	40	0.5	1744	17	207	14
Lime	70,000	30	4.0	16662	100	2367	100
Lime	70,000	40	0.5	2845	17	320	14
Lime	90,000	30	4.0	24626	100	3435	100
Lime	90,000	40	0.5	4146	17	447	13
Sand	10,000	30	4.0	884	100	148	100
Sand	10,000	30	0.5	275	31	30	20
Sand	30,000	30	4.0	4148	100	625	100
Sand	30,000	40	0.5	1009	24	110	18
Sand	50,000	30	4.0	8692	100	1260	100
Sand	50,000	40	0.5	2109	24	214	17
Sand	70,000	30	4.0	14321	100	2036	100
Sand	70,000	40	0.5	3551	25	339	17
Sand	90,000	30	4.0	20840	100	2921	100
Sand	90,000	40	0.5	5220	25	479	16
Iron	10,000	30	4.0	711	100	121	100
Iron	10,000	35	1.0	243	34	34	28
Iron	10,000	30	0.5	267	38	26	21
Iron	30,000	30	4.0	3087	100	481	100
Iron	30,000	40	0.5	688	22	76	16
Iron	50,000	30	4.0	6420	100	957	100
Iron	50,000	40	0.5	1413	22	142	15
Iron	70,000	30	4.0	10523	100	1527	100
Iron	70,000	40	0.5	2281	22	217	14
Iron	90,000	30	4.0	15253	100	2180	100
Iron	90,000	40	0.5	3303	22	302	14

Table 4. Minimum Quantity ($H/D \geq 1$, Concrete)

Material type	Quantity (ton)	Concrete strength					
		30MPa		35MPa		40MPa	
		H/D	%	H/D	%	H/D	%
Flour	10,000	1	58	1	58	1	58
Flour	30,000	1	24	1	24	1	24
Flour	50,000	1	19	1	15	1	15
Flour	70,000	1	17	1	13	1	11
Flour	90,000	1	15	1	11	1	9
Lime	10,000	1	38	1	38	1	38
Lime	30,000	1	31	1.5	24	1.5	19
Lime	50,000	1.5	33	1.5	23	1.5	18
Lime	70,000	1	38	2	30	1.5	23
Lime	90,000	2	39	2	29	2	23
Sand	10,000	1.5	34	1.5	34	1	32
Sand	30,000	2	44	2	34	2	27
Sand	50,000	2.5	56	2	42	2	28
Sand	70,000	2.5	55	2.5	41	2.5	32
Sand	90,000	1	64	2.5	47	2.5	32
Iron	10,000	1.5	38	1	34	1	34
Iron	30,000	1	48	2	34	2	28
Iron	50,000	1	54	2.5	42	2.5	34
Iron	70,000	1	58	1	49	2.5	35
Iron	90,000	1	61	3	50	3	40

Table 5. Minimum Quantity ($H/D \geq 1$, Steel)

Material type	Quantity (ton)	Concrete strength					
		30MPa		35MPa		40MPa	
		H/D	%	H/D	%	H/D	%
Flour	10,000	1	37	1	38	1	39
Flour	30,000	1	24	1	24	1	25
Flour	50,000	1	21	1	19	1	20
Flour	70,000	1	19	1	17	1	17
Flour	90,000	1	17	1	16	1	15
Lime	10,000	1	31	1	32	1	33
Lime	30,000	1	27	1	26	1	25
Lime	50,000	1	28	1	26	1	25
Lime	70,000	1	29	1	27	1	25
Lime	90,000	1	29	1	27	1	25
Sand	10,000	1	31	1	31	1	31
Sand	30,000	1	35	1	33	1	31
Sand	50,000	1	37	1	35	1	33
Sand	70,000	1	38	1	36	1	34
Sand	90,000	1	40	1	37	1	34
Iron	10,000	1	29	1	28	1	29
Iron	30,000	1	32	1	30	1	29
Iron	50,000	1	34	1	32	1	30
Iron	70,000	1	35	1	33	1	31
Iron	90,000	1	36	1	34	1	32

회), $H/D=2.5$ (3회), $H/D=3.0$ (2회)로 분포하는 것을 알 수 있다. 철근인 경우는 전부 $H/D=1$ 에서 가장 최소물량이 나타났다. 각 재료와 용량에서 가장 큰 값(H/D 가 4, 콘크리트 강도가 30MPa)을 100으로 가정하였을 때, 콘크리트인 경우 밀가루 9~58%, 과립생석회 19~39%,

Table 6. Economic analysis-1st ($H/D \geq 1$)

Material type	Quantity (ton)	Concrete strength					
		30MPa		35MPa		40MPa	
		H/D	%	H/D	%	H/D	%
Flour	10,000	1	46	1	50	1	53
Flour	30,000	1	24	1	26	1	27
Flour	50,000	1	20	1	18	1	19
Flour	70,000	1	18	1	16	1	15
Flour	90,000	1	16	1	14	1	13
Lime	10,000	1	34	1	37	1	39
Lime	30,000	1	29	1	27	1	26
Lime	50,000	1	31	1.5	28	1.5	25
Lime	70,000	1	33	1	31	1	29
Lime	90,000	1	35	1	32	1	30
Sand	10,000	1	33	1	35	1	35
Sand	30,000	1	43	1	40	2	36
Sand	50,000	1	47	1	44	2	36
Sand	70,000	1	50	2.5	46	2.5	41
Sand	90,000	1	52	1	49	2.5	41
Iron	10,000	1	34	1	33	1	35
Iron	30,000	1	40	1	38	1	36
Iron	50,000	1	44	1	41	1	39
Iron	70,000	1	47	1	44	1	42
Iron	90,000	1	49	1	46	1	43

Table 7. Economic analysis-2nd ($H/D \geq 1$)

Material type	Quantity (ton)	Concrete strength					
		30MPa		35MPa		40MPa	
		H/D	%	H/D	%	H/D	%
Flour	10,000	1.5	53	1.5	57	1.5	60
Flour	30,000	1.5	31	1.5	30	1.5	31
Flour	50,000	1.5	28	1.5	25	1.5	22
Flour	70,000	1.5	26	1.5	22	1.5	20
Flour	90,000	1.5	24	1.5	20	1.5	18
Lime	10,000	1.5	40	1.5	42	1.5	45
Lime	30,000	1.5	32	1.5	29	1.5	27
Lime	50,000	1.5	33	1	29	1	27
Lime	70,000	1.5	38	1.5	33	1.5	29
Lime	90,000	2	40	2	34	2	30
Sand	10,000	1.5	36	1.5	38	1.5	40
Sand	30,000	2	45	2	40	1	38
Sand	50,000	2	55	2	45	1	42
Sand	70,000	2.5	55	1	47	1	44
Sand	90,000	2.5	66	2.5	52	1	46
Iron	10,000	1.5	36	1.5	38	1.5	40
Iron	30,000	2	48	2	39	2	36
Iron	50,000	2.5	56	2.5	48	2.5	43
Iron	70,000	1.5	64	3	57	2.5	44
Iron	90,000	1.5	68	3	56	3	50

모래 27~64%, 철광석 28~61%, 철근인 경우 밀가루 15~39%, 과립생석회 25~32%, 모래 31~40%, 철광석 29~36%의 분포를 나타내고 있다.

재료 물량에 대한 경제성 평가는 각각의 재료에 단가를 곱하는 것으로 비교해 보았는데 콘크리트 가격은 굵

은 골재 25mm, 슬럼프 150인 경우 1m³당 30MPa=90,000원, 35MPa=100,000원, 40MPa=110,000원으로, 철근은 1ton당 600,000원으로 가정하였다. 각 재료 별 가장 큰 값을 100으로 가정하였을 때 Table 6은 가장 작은 값을 Table 7은 두번째 작은 값을 나타내었다. 용량이 10,000톤인 경우를 제외하고 H/D=1과 40MPa인 경우가 가장 경제적이라고 할 수 있으며 밀가루 13~53%, 과립생석회 25~39%, 모래 33~52%, 철광석 33~49%의 비용분포를 보여주고 있다.

두 번째로 경제적인 경우는 밀가루에서는 H/D=1.5, 과립생석회 1.5~2, 모래 1.5~2.5, 철광석 1.5~3 사이로 분포되는 것으로 알 수 있으며 전체적으로 18~68%의 비용분포를 보여주고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 실무에서 간단하게 사일로의 규모를 경제적으로 고려할 수 있는 기초 자료를 제시하고자 철근 콘크리트 구조에 국한하여 각각 4종류 저장재료(밀가루, 과립생석회, 모래, 철광석), 5종류 용량(1만, 3만, 5만, 7만, 9만톤)의 사일로에 대하여 8종류의 H/D(0.5~4)와 3종류의 콘크리트 강도(30, 35, 40MPa)를 고려한 해석을 실시하여 다음 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전체적인 해석 결과를 살펴보면 콘크리트 및 철근 물량은 H/D의 영향을 가장 많이 받았으며 동일한 용량의 사일로인 경우 전반적으로 H/D가 클수록 콘크리트 및 철근 물량은 증가하는 것을 알 수 있었다.
- (2) 콘크리트 물량인 경우 모든 재료에서 H/D=0.5, 1 순서로 물량이 증가하다가 재료의 질량이 커질수록 H/D=2~3사이에서 물량이 줄어드는 구간이 확연하게 나타났으나 철근인 경우는 그러한 경향이 미약하였다.
- (3) 콘크리트 강도도 콘크리트 및 철근 물량에 영향을 주었으며 강도가 클수록 물량이 적어지는 것을 알 수 있었다.
- (4) 사일로의 용량이 커질수록 H/D와 콘크리트 강도의 영향이 커지는 것을 알 수 있었다.
- (5) 가장 많은 물량과 작은 물량을 비교할 경우 재료

에 따라 콘크리트 물량인 경우 91~36%, 철근 물량인 경우 85~60%를 절감할 수 있다고 판단된다.

- (6) H/D가 1이상인 사일로에서 물량을 30,000~90,000톤 그리고 콘크리트 강도를 30~40MPa로 한정한다면, 가장 경제적인 사일로는 모든 재료에서 H/D=1이고 콘크리트 강도는 40MPa인 경우로 나타났으며 두 번째로 경제적인 사일로는 밀가루는 H/D=1.5, 과립생석회인 경우 H/D=1.5~2, 모래인 경우 H/D=1.5~2.5, 철광석인 경우 H/D=1.5~3로 나타났다.

경제적인 사일로 설계를 위해서는 재료별로 가장 적은 물량을 나타내는 H/D와 콘크리트 강도 조합을 찾아야 하며, 일반적으로 경제적인 관점에서 H/D가 1이상의 사일로는 대부분이므로 H/D가 1~3사이에서 재료의 질량에 따라 H/D를 선택하고 콘크리트 강도를 높일 수 있다면 가장 경제적인 사일로는 구현될 수 있다고 판단된다.

전체적으로 간략화한 모델과 하중조건을 사용하여 해석결과가 정밀하다고는 할 수 없지만 경제적인 설계를 위한 기본적인 자료를 제공하고자 한 목적은 달성되었다고 판단된다. 물론 형상변화와 콘크리트 강도변화에 따른 경제성 분석에 대한 자료 축적은 계속적으로 필요하며 이론적인 설명과 함께 시공된 자료의 축적도 필요하다고 판단된다.

References

- [1] S. H. Jeon, "A study on the structural behavior of silos under non-uniform lateral pressures", Ph.D. thesis, Department of architectural engineering, Graduate school, Myong Ji university, June, 2001
- [2] S. S. Safarian, E. C. Harris, "Design and construction of silos and bunkers", Van nostrand reinhold company, 1985
- [3] Architectural Institute of Japan, "Design recommendation for storage tanks and their supports with emphasis on seismic design(2010 edition)", Architectural Institute of Japan, 2011
- [4] ACI Committee 313, "Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials", American Concrete Institute, Detroit, 2005.
- [5] I. H. Oh, "Calculation of storage capacity of cereals in tower silos", Journal of the Research institute of natural science, Konkuk university, Vol.3, pp.87-98, 1992

- [6] Y. S. Jeong, "A study on design of reinforced concrete silo considering asymmetric flow channel of stored material, Master thesis, Graduate school of engineering, Yonsei university, June, 1997
- [7] S. H. Jeon, S. K. Yoo, B. M. Park, "A study on the circumferential moment by discharging granular-materials in silos", Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol.16, No.11, pp.67-74, November, 2000
- [8] S. H. Yang, "Suppression of coating formation in cement silo", Master thesis, Department of production engineering, Graduate school, Chungbuk national university, August, 2002
- [9] H. H. Choo, "A study on the understructure of large volume hopper type silos", Master thesis, Department of Mechanical design engineering, Graduate school of industrial technology & management, Korea polytechnic university, December, 2006
- [10] H. Park, S. O. Jang, H. K. Park, N. H. Kim, C. G. Suk, "A case study on explosive demolition of cylindrical silo", Journal of Korean society of explosives & blasting engineering, Vol.26, No.2, pp.52-63, Dec., 2008
- [11] H. Choi, H. J. Kim, H. Park, S. J. Yoon, "Structural analysis of the pre-weakening of a cylindrical concrete silo for the application of overturning explosive demolition method", Journal of Korean society of explosives & blasting engineering, Vol.27, No.2, pp.12-18, Dec., 2009
- [12] C. H. Ryu, "A study on preservation and application of modern industrial heritage in the aspect of urban restoration - Focusing on Changwon-si- ", Master thesis, Department of architecture, Graduate school, Changwon national university, July, 2012
- [13] Y. T. Kim, "A study on the integrity review of a power plant coal silo using finite element method structural analysis", Master thesis, Department of industrial & Mechanical engineering, Graduate school, Changwon national university, June, 2014
- [14] Architectural institute of Korea, "Korean Building Code And Commentary", Architectural institute of Korea, 2009, pp.144-165
- [15] H. A. Janssen, "Versuche über Getreidedruck in Silozellen," VDI Zeitschrift (Düsseldorf), V. 39, Aug. 31, 1885, pp. 1045-1049

고 훈 범(Hune-Bum Ko)

[종신회원]



- 1992년 3월 : Kyoto대학교 대학원 건축학과 (공학석사)
- 2007년 3월 : Kyoto대학교 대학원 도시환경공학과(공학박사)
- 1992년 10월 ~ 1998년 2월 : 금호 건설 기술연구소
- 1998년 3월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 건축과 교수

<관심분야>
건축시공, 건축재료