

화력발전소 Coal Silo 구조물의 충격성 진동에 대한 사례 연구 Case Studies on Shock Vibration at Coal Silo Structure of Power Plants

임정빈† · 이흥기* · 손성완** · 박상곤**

Jung-Bin Im, Hong-Ki Lee, Sung-Wan Son and Sang-Gon Park

Key Words : Silo Quaking, Shock Vibration, Coal Power Plant, Stick-Slip Friction, Granular Material

ABSTRACT

This paper reviews the dynamic load phenomenon referred to as "silo quaking", caused shock vibration and loud noise, during gravity discharge in coal silos. Quaking in tall silo is examined using experimental data obtained from a Coal Power Plant and several experimental and numerical investigations available in the published literature. In the experiment, the acceleration was measured at various height on the silo column and floor and by doing so, not only could the variation of the amplitude of the quaking be observed, but also the propagation of waves could clearly be seen. Through an overview of recent research on this subject, it is shown that the current silo quaking is produced by slip-stick friction between the internal wall of silo and the granular material, i.e. coal.

1. 서 론

사일로(silo)는 곡물, 시멘트, 석유화합물, 석탄 등과 같은 알갱이 형태의 원료를 저장하기 위한 장치로서 산업 전반에 걸쳐 광범위하게 사용되고 있다.

사일로는 내부에 저장되어 있는 원료를 배출하는 과정에서 진동(silo quaking)과 소음(silo honking or silo music)^(1,2)을 유발하기도 하는데, 최근 국내의 화력발전소에 설치되어 있는 석탄 사일로(coal silo)에서도 이러한 현상이 발생하여 문제가 되기도 하였다.

본 연구에서는 국내 화력발전소에서 발생한 충격성 진동의 사례를 소개하고, 발생 기구 및 저감대책에 대해 고찰하고자 한다.

2. Coal Silo의 충격성 진동 사례

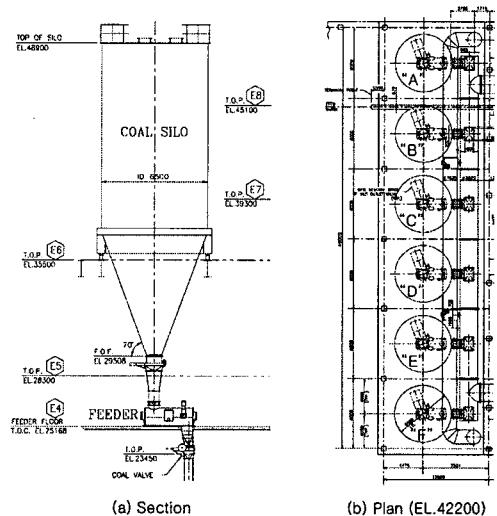
2.1 Coal Silo의 제원 및 진동측정 위치

† 알엠에스 테크놀로지(주)
E-mail : rmstech@rmstech.co.kr
Tel : (041)556-7800, Fax : (041)556-7803

* 알엠에스 테크놀로지(주)

** 알엠에스 시스템(주)

충격성 진동이 발생한 ○○화력발전소는 시간당 50만 Kw의 전력을 생산할 수 있는 시설로 Fig. 1과 같이 6기(A~F)의 사일로가 있으며, 석탄을 주원료로 사용하고 있다. 사일로의 직경은 6.5 m, 높이는 19.4 m, 하부 hopper의 경사각은 70° 이고 최대 380 ton 용량의 석탄을 적재할 수 있다.



[Fig. 1] Coal Silo의 구조

Coal Silo 및 지지구조물의 진동원 위치를 파악하기 위해 1층 바닥(EL.8300), 4층 Feeder 상부(EL.25168), 6층 바닥(EL.35500), 사일로 본체 상·하부 등에서 진동측정을 수행하였다(Fig. 1 참조). 이 때 진동의 전파경로를 추적하기 위해 사일로 본체 상부와 하부, 사일로 본체와 Floor, 인접한 2기의 사일로 등과 같이 두 위치에서 수직방향의 진동을 동시에 측정하였다(Fig. 2 참조). 사용된 가속도계는 Wilcoxon Research 786C-1 모델로서 sensitivity는 10 mV/m/s^2 이다.

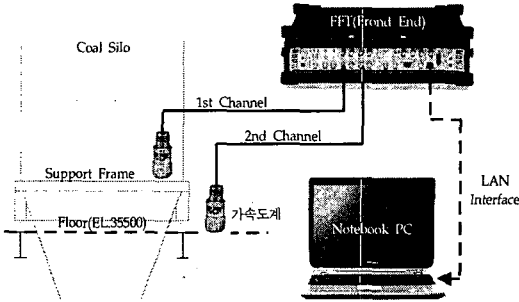
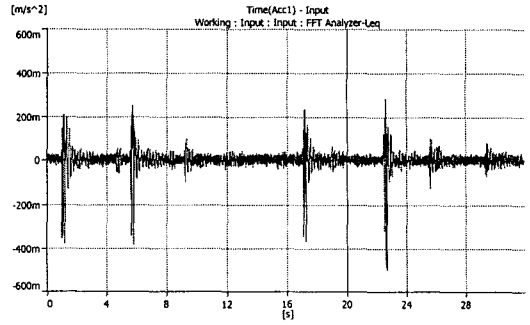


Fig. 2 Silo 진동측정 계통도

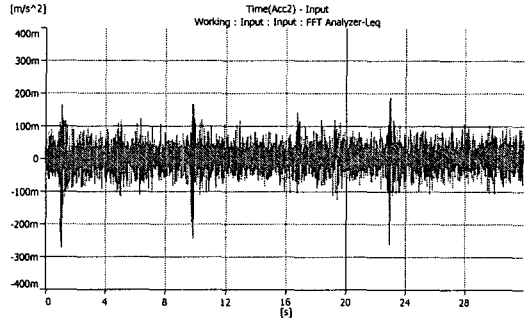
2.2 충격성 진동의 크기

측정결과 A~F의 6기 사일로 모두 충격성 진동이 발생하고 있었으며, 이 때 각 사일로의 석탄 투입량은 140~160 ton 이었다. 충격성 진동이 발생하는 주기는 일정하지 않지만 약 5초~20초 정도이고 사일로의 석탄 투입량이 많을수록 진동의 진폭이 커지며, 석탄의 배출속도가 빠를수록 주기가 짧아지는 경향을 나타내었다.

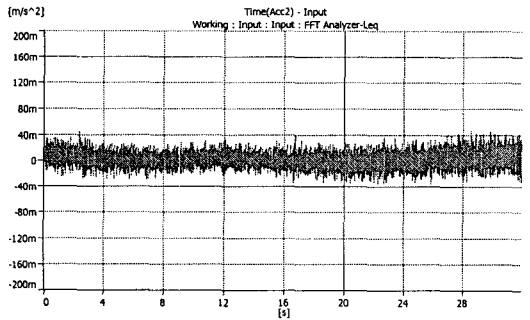
Fig. 3은 사일로에서 발생하는 충격성 진동의 대표적인 예로, 사일로 "C"에 대하여 위치별로 측정된 진동 가속도의 시간이력선도를 나타낸 것이다. 그림에서 충격성 진동은 4층 Feeder 상부에서 발생하는 것으로 추정되며, 사일로 본체에서 진동가속도의 최대값(0-peak)은 약 $42 \text{ gal} (= \text{cm/s}^2)$ 임을 볼 수 있다.



(b) 6층 Floor (28 gal, 0-peak)

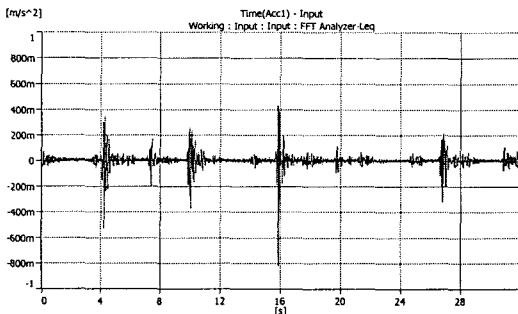


(c) 4층 Feeder (19 gal, 0-peak)



(d) 1층 Floor (4.5 gal, 0-peak)

Fig. 3 Silo 진동의 시간이력



(a) Silo 본체 (42 gal, 0-peak)

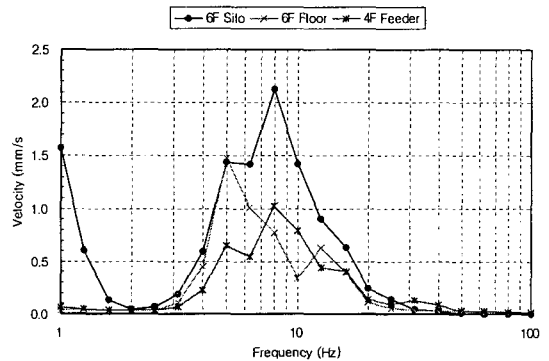


Fig. 4 Silo 진동의 주파수특성

각 측정위치별 진동속도의 주파수특성은 Fig. 4에 나타낸 바와 같다. 그림에서 사일로는 8 Hz, 그리고 6층 Floor는 5 Hz에서 진폭이 가장 높게 나타나고 있다.

충격진동에 의한 사일로 구조물의 손상가능성을 평가하기 위해 Table 1에 나타낸 바와 같이 각 위치별로 측정된 진동속도의 시간이력선상 최대값을 DIN 4150의 기준과 비교하였다. 표에서 각 위치별로 측정된 진동속도의 최대값은 10.2 mm/sec로서 DIN 4150에서 제시하고 있는 충격진동에 의한 구조물 손상허용기준인 40 mm/s 이하인 것으로 나타났다. 그러나 약 5초~20초 간격으로 계속해서 충격성 진동이 발생하는 준 정상상태임을 감안하여 정상진동에 의한 구조물 손상허용기준과 비교하면 손상허용기준인 10 mm/s를 다소 초과하고 있음을 알 수 있다. 더욱이 사일로 최대용량의 약 50% 수준인 140~160 ton의 현재 석탄투입량을 최대 380 ton까지 높여 운전할 경우 충격진동으로 인해 심각한 구조물 손상을 야기할 것으로 예상된다.

Table 1 구조물 손상기준 진동 측정결과

Silo #	측정위치별 진동속도 (mm/s, 0-peak)		구조물손상기준 (DIN 4150)
	4층 Feeder	6층 Floor	
A	-	6.98	· 정상진동 : 10 mm/s 이하 · 충격진동 : 40 mm/s 이하
B	-	3.45	
C	3.45	6.36	
D	3.80	6.44	
E	-	5.98	
F	-	10.2	

2.3 충격성 진동원의 위치

사일로 하부의 Feeder를 포함하여 사일로와 연결된 배관 계통에는 특별한 진동원이 없으므로 사일로 내부에 진동원이 있을 것으로 판단하여 진동원의 위치를 추적하였다.

Fig. 5는 사일로의 Hopper 상·하부 진동을 동시에 측정하여 시간지연특성을 비교한 결과이다. 그림에서 Hopper 하부에서 상부로 진동이 전파되는 현상을 볼 수 있으며 따라서 사일로 하부의 Hopper 부위에 진동원이 있을 것으로 판단하였다.

3. Silo 진동의 발생 기구

사일로에서 발생하는 충격성 진동은 사일로 내부의 유동 특성에 기인하는 것으로 알려져 있다. 사일로 진동을 유발하는 내부유동은 사일로의 형태에 따라 slip-stick flow와 funnel flow(or intermediate flow)의 2가지로 크게 구분할 수 있다⁽³⁾.

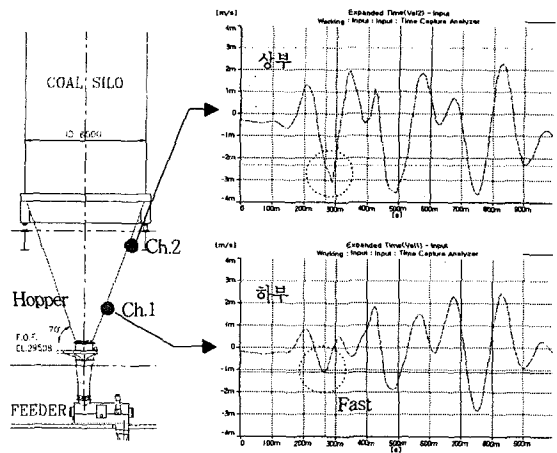


Fig. 5 Silo 진동의 전파특성

3.1 Slip-stick flow

Slip-stick flow는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 사일로 내부의 원료 적재 높이 H가 임계높이(사일로 단면에서 원료의 속도분포가 일정한 높이) Hcr 이상이 될 경우 주로 발생한다. 즉, 사일로 하부의 hopper에서 원료가 배출되면서 공극이 발생하게 될 경우 hopper 상부의 수직압력과 함께 벽면의 전단응력이 어느 순간 급격히 해소되면서 공극 상부의 원료가 사일로 벽면과 미끄러지면서 순간적으로 내려앉는 현상이 반복적으로 발생하게 된다. 이로 인하여 발생하는 충격성 진동은 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 원료의 순간적인 이동에 의한 unloading wave와 원료를 안정화시키는 compression wave로 구성이 된다^(4,5).

Slip-stick flow에 의한 충격성 진동의 발생주기와 크기는 사일로 내부의 원료 높이, 배출속도, 사일로 벽면의 마찰계수 및 원료 내부의 점성에 따른 내부 마찰각(angle of internal friction)에 지배적인 영향을 받는다.

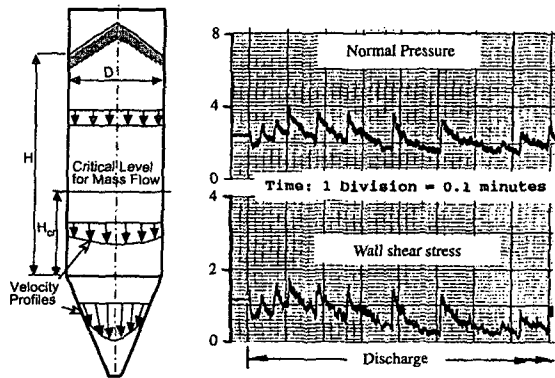


Fig. 6 Slip-stick flow의 발생원인

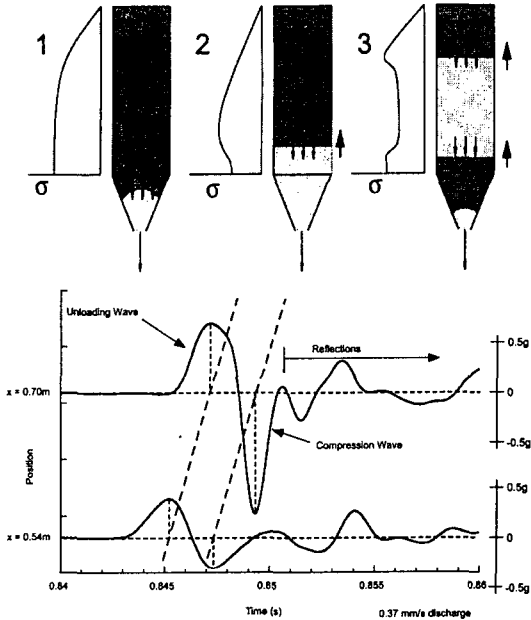
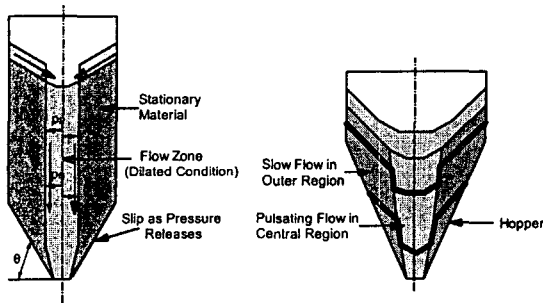


Fig. 7 Slip-stick flow에 의한 충격성 진동의 특성

3.2 Funnel flow or intermediate flow

Funnel flow는 Fig. 8(a)에 나타난 바와 같이 사일로 벽면에 원료가 정체되어 있고 중간의 원료가 순간적으로 미끄러짐이 발생하여 내려앉는 유동의 형태이고, Intermediate flow는 Fig. 8(b)에 나타난 바와 같이 원료 적재 높이가 임계높이 이하인 경우($H < H_{cr}$) 발생하는 유동의 형태로서 Hopper 중심부에서 급격한 유동이 발생하고 외부에서는 느린 유동이 발생한다. Funnel flow는 Intermediate flow의 외부 유동이 정체되어 있는 특별한 경우에 속한다.



(a) Funnel flow (b) Intermediate flow

Fig. 8 Funnel flow 및 Intermediate flow의 유동형태

4. Silo 진동의 저감 방안

앞에서 살펴 본 바와 같이 ○○화력발전소의 Coal Silo에서 발생하는 충격성 진동은 사일로 내부의 Slip-stick flow

에 의한 것으로 판단하여 다음과 같은 대책을 제안하였다.

- 1안 : 사일로 최대 용량의 50% 이하로 석탄 적재량 조절
(장점) 구조물 손상 방지, (단점) 석탄투입작업 빈도증가
- 2안 : 사일로 하부에 vibrator 또는 air blaster 설치
(장점) Slip-stick flow 방지, 진동발생 억제
(단점) 사일로 손상, 적분 생성 우려, 설비추가비용 발생
- 3안 : 입자가 크고 수분함유량이 적은 석탄으로 변경
(장점) Slip-stick flow 방지, 진동발생 억제
(단점) 사용가능 석탄 종류 제한, 원료비 상승

상기의 대책 중 <3안>을 선정하여 탄종을 기존의 BHPB 탄에 비해 입자가 크고 수분함유량이 적은 XSTRADA탄으로 변경함으로써 석탄 적재량에 상관없이 사일로의 충격성 진동의 발생을 차단할 수 있었다.

4. 결론

국내의 ○○화력발전소 Coal Silo 구조물의 충격성 진동 발생 사례를 통하여 사일로의 진동 발생 기구 및 진동 저감 대책에 대하여 고찰하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 사일로에서 발생하는 충격성 진동은 사일로 내부 벽면과 석탄 사이의 Slip-stick flow에 기인한다.
- 2) Slip-stick flow에 의한 충격성 진동의 발생주기와 크기는 사일로 내부 석탄의 적재량과 배출속도, 사일로 벽면의 마찰계수 및 석탄의 내부 점성에 지배적인 영향을 받는다.
- 3) 실제 현장에서 기존보다 입자가 크고 수분함유량이 적은 석탄을 사용하여 충격성 진동의 발생을 차단할 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Benson K. Muite, Shandon F. Quinn, Sankaran Sundaresan, K. Kesava Rao, 2004, "Silo music and silo quake: granular flow-induced vibration", Powder Technology 145, pp. 190~202.
- (2) J. M. Buick, J. Chavez-Sagarnage, Z. Zhong, J. Y. Ooi, Pankaj, D. M. Campbell, C. A. Greated, 2005, "Investigation of Silo Honking: Slip-Stick Excitation and Wall Vibration", Journal of Engineering Mechanics 131(3), pp. 299~307.
- (3) Alan W. Roberts, Christopher M. Wensrich, 2002, "Flow dynamics or 'quaking' in gravity discharge from silos", Chemical Engineering Science 57, pp. 295~305.
- (4) Chris Wensrich, 2002, "Experimental behaviour of quaking in tall silos", Powder Technology 127, pp.87~94.
- (5) Chris Wensrich, 2003, "Numerical modeling of quaking in tall silos", International Journal of Mechanical Sciences 45, pp. 541~551.