



가연성 금속분진 폭발시 저장 및 포집용 구조물에 대한 3차원 유한요소 해석

장창봉 · 용종원* · 백종배** · 권혁면*** · †고재욱

광운대학교 화학공학과, *(주)세이프티아, **충주대학교 안전공학과, ***한국산업안전보건공단
(2011년 6월 28일 접수, 2011년 10월 20일 수정, 2011년 10월 24일 채택)

3-Dimensional Finite Element Analysis for Collecting Structure of Combustible Metal Dust During Explosion

Chang Bong Jang · Yong Jong Won* · Jong Bae Baek**

Hyuck Myun Kwon*** · †Jae Wook Ko

Dept. of Chemical Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea
**SafeTia Co. Ltd., Seoul 137-895, Korea*

***Dept. of Safety Engineering, Chungju University, Chungju 380-702, Korea*

****Korea Occupational Safety and Health Agency, Incheon 403-711, Korea*

(Received June 28, 2011; Revised October 20, 2011; Accepted October 24, 2011)

요 약

최근 산업구조가 미래 첨단산업 위주로 전환되면서 자동차를 비롯한 항공기, 휴대폰, 전자기기 등 다양한 산업 분야의 제품에 Al, Mg, Li, Zn과 같은 가연성 금속의 사용량이 크게 증가하고 있으며 이러한 가연성 금속의 가공과정에서 발생하는 금속분진에 의한 폭발 사고 또한 증가하고 있다. 금속분진에 의한 폭발사고는 가연성 금속분진을 포집 및 저장하는 국소배기설비의 공기정화장치에서 대부분 발생함에 따라 공기정화장치내 폭발 발생시 폭발압력에 의한 공기정화장치 구조물의 변형과 파열형태를 단순 예측이 아닌 유한요소해석(FEA)법에 의해 기술적으로 분석 및 제시하고자 본 연구를 수행하였다.

Abstract - Due to the latest industrial flow comes mainly switch to high-tech industries, combustible metals as Al, Mg, Li, Zn more require to use for the aircraft, car, cell phones, electronics and others. As a result, Increasing the processing of combustible metals due to increase in amount of combustible metals giving rise dust explosions also. Most Explosions caused by combustible metal dust, occurred in air cleaning device of local exhaust ventilation to capture and store the combustible dust. Therefore, this study was conducted to present and analyze technically that deformation and rupture shape of air cleaning device structure by Finite Element Analysis(FEA) rather than a simple prediction, in case of explosion occurs in an air cleaning device.

Key words : dust explosion, FEA, combustible metal

†주저자:jwko@kw.ac.kr

I. 서론

분진폭발이란 제한된 공간에 존재하는 가연성 분진이 공기 중 부유된 상태에서 점화원에 의해 점화될 경우 급격히 연소되면서 발생하는 사고를 말하며 이는 주로 식료품, 목재, 금속, 플라스틱, 석탄, 곡물 등의 저장 및 취급시 발생하고 있다[1].

일반적으로 분진은 개방된 공간에서 분진운이 형성되어 점화원에 의해 점화될 경우 플래시 화재가 발생되며 제한된 공간에서 점화될 경우에는 발생한 연소열로 인해 급격한 압력상승과 분진의 화염전파 그리고 높은 열과 반응들로 인해 폭발이 된다[2].

최근 국내에서 발생한 금속분진에 의한 폭발사고는 2007년부터 2010년까지 4년 동안 16건의(2007년 4건, 2008년 5건, 2009년 3건, 2010년 4건) 폭발사고가 발생하였으며 이로 인해 9명의 사망자와 39명의 부상자가 발생하였다. 그리고 전체 폭발사고의 50%인 8건이 금속의 연마 및 표면처리시 발생하는 금속분진을 포함 및 저장하는 국소배기설비의 공기정화장치에서 발생하였다[4,5]. 따라서, 국소배기설비 중 공기정화장치 내에서 폭발이 발생할 경우 폭발압력에 의한 구조물의 변형과 파열형태를 단순예측이 아닌 기술적으로 명확하게 분석하고자 유한요소해석을 실시하였다.

II. 금속분진의 저장 및 포집 구조물 형태와 시뮬레이션 조건

가연성 금속의 가공시 발생하는 금속분진을 포집하는 국소배기설비 중 공기정화장치 구조물의 형태는 Fig. 1과 같이 Box Type과 Cylinder Type의 2가지 형태로 대부분 설치되고 있다.

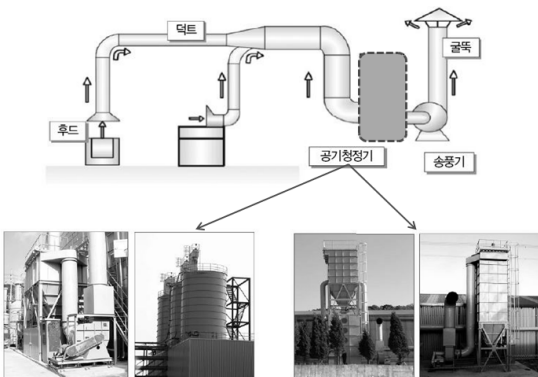


Fig. 1. Structure shape of air cleaning device.

이에 Box와 Cylinder Type 두 가지 형태의 구조물을 대상으로 유한요소해석을 실시하였으며 해석을 위한 Tool은 ANSYS Ver. 12를 사용하였다. 그리고 시뮬레이션 조건은 일반적으로 현장에서 설치되는 구조물의 사양을 고려하여 다음과 같이 선정하였다.

□ 구조물의 제작사양

- 재질 : SS400
- 두께 : 3.5T(mm)
- (300m³ 이하의 경우 대부분 3.5T 적용)

□ 폭발조건

- 폭발압력 : 10bar
- 폭발지점 : 중심부

시뮬레이션의 폭발압력은 분진폭발 사고사례중 가장 많은 사고를 발생시킨 AI를 대상으로 공기정화장치 구조물을 충분히 파열시킬 수 있는 압력과 실험을 통해 제시된 최대폭발압력(9.8bar, 평균입경 25 μm)을 고려하여 10bar로 선정하였다[6].

2.1. Box Type 구조물의 형태 및 폭발지점

Box Type 구조물의 경우 정육면체(Cube)와 직육면체(Rectangle)로 구분하여 나타냈으며 직육면체는 각 면의 면적에 따라 A와 B로 구분하였다.

□ 정육면체(Cube) 구조물

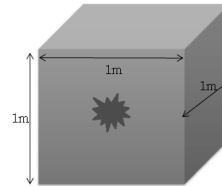


Fig. 2. Shape and explosion point of Cube structure.

□ 직육면체(Rectangle) 구조물

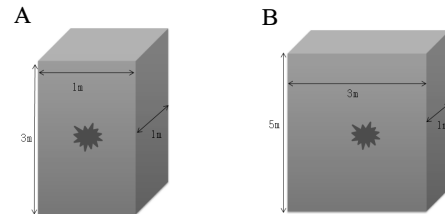


Fig. 3. Shape and Explosion point of rectangular structures A, B.

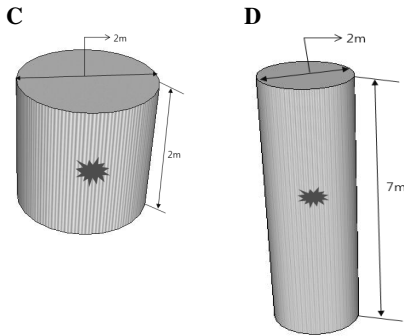


Fig. 4. Shape and Explosion point of cylinder structures C, D.

2.2. Cylinder Type 구조물

Cylinder Type 구조물의 경우 직경과 기둥의 높이가 동일한 구조물 그리고 직경대비 기둥의 높이가 긴 구조물로서 각각 C와 D로 구분하였다.

III. 3차원 유한요소해석(FEA)

Box Type과 Cylinder Type 두 가지 형태의 구조물을 선정하여 내부에서 폭발이 발생할 경우, 폭발압력에 의한 구조물의 변형(deformation)과 응력(stress) 분포를 분석하였다.

3.1. Box Type 구조물

Box Type 구조물에서 폭발이 발생할 경우, 폭발압력에 따른 변형(deformation)과 응력(stress) 분포는 제작형태에 따라 정육면체(Cube)와 직육면체(Rectangle)로 구분하여 분석하였다.

□ 정육면체(Cube) 구조물의 유한요소해석(FEA)

정육면체 구조물의 내부에서 폭발로 인해 10bar의 압력이 발생 할 경우, 발생된 변형 시뮬레이션은 Fig. 5와 같으며 최대 변형이 발생한 지점은 6면의 각 중심부로 160.25mm의 부풀어 오름이 발생하였다.

구조물의 크기에 따라 폭발시 폭발압력에 의한 구조물의 변형 차이는 있었으나 정육면체 구조물은 각 면의 중심부에서 폭발압력에 의한 변형이 가장 크게 발생하는 것으로 분석되었다. 또한, 정육면체 구조물의 응력분포는 시뮬레이션 결과 Fig. 6과 같이 나타났으며 최대응력 발생지점은 각 면의 접합부 중간지점으로 최대 2,438MPa의 응력(Stress)이 발생하였다. 그러나 각 면의 모서리 지점은 낮은 수치를 나타냈으며 이는 구조물의 기하학적 요인에 의해 응력(Stress)이 순간적으로 일정 부위에 집중되기 때문으로 분석된다.

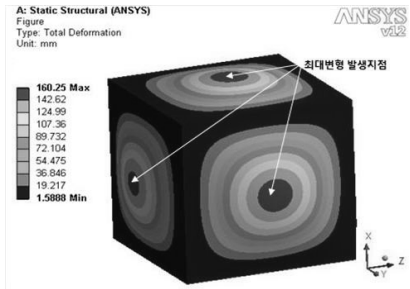


Fig. 5. Simulation of deforming during an internal explosion of cube.

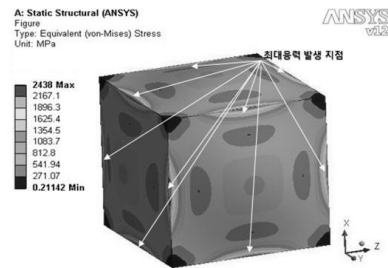


Fig. 6. Simulation of stress distribution during an internal explosion of cube.

따라서, 정육면체 구조물은 각 면의 접합부 중간 지점에서 폭발시 압력에 의한 응력(Stress)이 가장 크며 용기가 파열될 경우 이 부분에서 발생할 것으로 분석 되었다.

□ 직육면체(Rectangle) 구조물의 유한요소해석(FEA)

직육면체 구조물 내부에서 폭발로 인해 10bar의 압력이 발생 할 경우, 구조물의 변형은 A형이 Fig. 7, B형이 Fig. 8과 같이 발생하였다. 그리고 변형이 발생한 최대지점은 A형이 6개의 면 중 면적이 넓은 수직의 4개 면 중심부로 331.49mm의 부풀어 오름이 발생하였으며 B형은 6개의 면 중 면적이 가장 큰 2개의 면 중심부로 41,200mm의 부풀어 오름이 발생하였다. 직육면체 구조물 또한, 구조물의 크기에 따라 폭발압력에 의한 변형 크기의 차이는 있었으나 정육면체 저장용기와는 달리 6개의 면 중 면적이 넓은 중심부 지점에서 변형이 가장 많이 발생하는 것으로 분석되었다.

직육면체 구조물의 응력분포는 시뮬레이션 결과 A형이 Fig. 9, B형이 Fig. 10과 같이 나타났으며 최대 응력 발생지점은 정육면체 구조물과는 다르게 A, B형 모두 6개의 면 중 상·하부 2개면을 제외한 수직 4개 면의 접합지점 이었으며 각 지점의 최대응력은

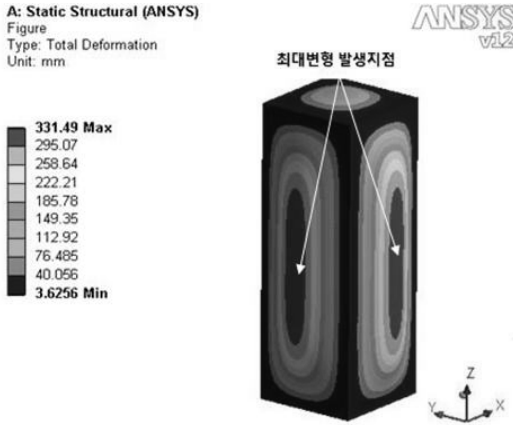


Fig. 7. Simulation of deforming during an internal explosion of A rectangle structure.



Fig. 9. Simulation of stress distribution during an internal explosion of A rectangle structure.

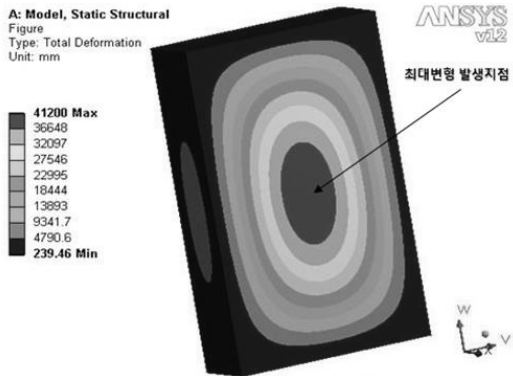


Fig. 8. Simulation of deforming during an internal explosion of B rectangle structure.

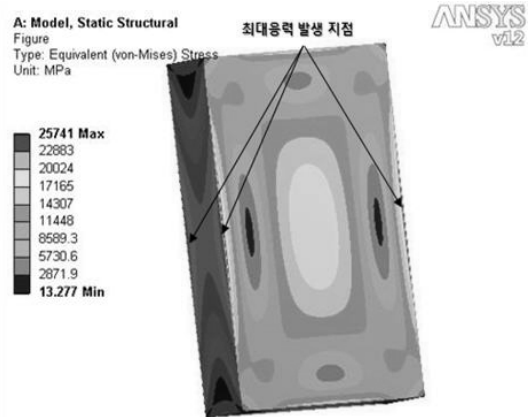


Fig. 10. Simulation of stress distribution during an internal explosion of B rectangle structure.

A형 4,040MPa, B형 25,741MPa로 나타났다. 그리고 직사각형 구조물의 경우 A형과 같이 면적이 동일한 수직 4개 면의 접합지점보다 B형과 같이 면적이 동일하지 않은 수직 4개 면의 접합지점에서 훨씬 더 큰 응력이 발생하였다. 따라서, 직육면체 구조물의 경우 6개의 면 중 상·하부 2개 면을 제외한 수직 4개 면의 접합지점에서 폭발시 압력에 의한 응력 (Stress, MPa)이 가장 크며 용기가 파열될 경우 이 부분에서 발생될 것으로 분석되었다.

3.2. Cylinder Type 구조물

Cylinder Type 구조물의 경우, 폭발압력에 따른 변형(deformation)과 응력(stress) 분포는 제작형태에 따

라 Fig. 4의 C와 D로 구분하여 해석하였다.

C, D 원통형 구조물 내부에서 폭발로 인해 10bar의 압력이 발생 할 경우, 구조물에 발생한 변형 시뮬레이션은 Fig. 11, 12와 같다. 그리고 최대변형이 발생한 지점은 상·하부 경판 중심부로서 C형 2,153mm, D형 2057mm의 부풀어 오름이 발생하였다. 특히 폭발압력으로 인한 셸(shell)은 큰 변화가 없고 상·하부 경판에만 큰 변형이 발생하였다.

또한, 두가지 형태의 원통형 구조물에 대한 응력 분포 시뮬레이션 결과는 Fig. 13, 14와 같이 나타났

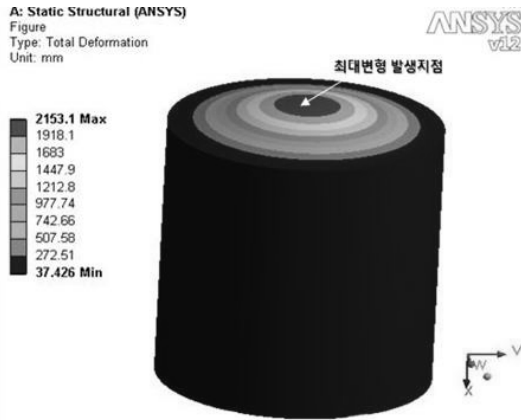


Fig. 11. Simulation of deforming during an internal explosion of C cylinder structure.



Fig. 13. Simulation of stress distribution during an internal explosion of C cylinder structure.



Fig. 12. Simulation of deforming during an internal explosion of D cylinder structure.



Fig. 14. Simulation of stress distribution during an internal explosion of D cylinder structure.

으며 최대응력 발생지점은 모두 상하부 경판과 셸(shell)의 접합지점으로 C형은 최대 6,403MPa, D형은 5,564MPa의 응력이 발생하였다. 그러나 셸(shell) 부분에는 미비한 응력이 발생하는 특징을 나타내었으며 이 또한 구조물의 기하학적 요인에 의한 것으로 분석된다.

따라서, 폭발시 파열지점은 최대 응력 발생 지점인 상·하부 경판 과 셸(shell)의 접합부가 될 것으로 분석되며 이는 실제 사고사례에서도 유사한 경향을 나타내고 있다.

IV. 결론

공기정화장치 구조물의 형태에 따른 유한요소해석(FEA) 결과 Box Type의 구조물에서 정육면체(Cube)의 경우, 각 6개의 면 중심부에서 가장 큰 변형이 발생하였으며 파열이 예상되는 최대응력발생 지점은 각 6개의 면의 접합부로 나타났다. 그리고 직사각형(Rectangle)의 경우 각 6개의 면 중 면적이 넓은 수직 4개의 면 중심부에서 가장 큰 변형이 발생하였으며 파열 지점은 면적이 넓은 수직 4면의 접

합부로 나타났다. 끝으로 원통형의 경우는 높이에 상관없이 상하부 경관 중심점에서 가장 큰 변형이 발생 하였으며 파열 예상지점은 경관과 셸(shell)의 접합 지점으로 분석되었다.

끝으로, 본연구의 결과를 통해 공기정화장치 구조물의 변형과 파열형태를 단순예측이 아닌 유한요소해석(FEA)에 의해 기술적으로 분석·제시함에 따라 국소배기설비의 설계 및 설치시 공기정화장치의 설치위치와 제작형태 그리고 폭발방산구 위치 선정 등 안전대책 수립을 위한 자료로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청의 안전관리기술개발사업으로 지원되었으며 이 논문은 "인적재난안전기술개발사업단"의 연구 결과입니다.

(과제번호: 2010-NEMA04-004-01030000-2010)

참고문헌

- [1] R. K. Eckhoff, "Dust Explosion in the Process Industries", 3rded., Gulf Professional Publishing, USA (2003)
- [2] Tasneem Abbasi, S.A.Abbasi, " Dust explosion -Case, cause, consequence, and control", Journal of Hazardous Materials, 140 7- 144, (2007)
- [3] C.W.Kauffman, Agricultural dust explosions in grain handling facilities, in: J.H.S.Lee, C.M. Guirao (Eds.), Fuel-air Explosions, University of Waterloo Press, Waterloo, Ontario, Canada, 305-347, (1982)
- [4] 화학물질연구센터 "고기능성 금속 미분체의 발화 및 폭발특성 연구보고서", 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원, (2010)
- [5] 한국산업안전보건공단, "산업재해사례". <http://www.kosha.net>. (2011)
- [6] 화학물질연구센터 "Mg 합금의 분진폭발 위험성 평가 보고서", 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원, (2010)