

압축공기에너지저장 시설에서 발생 가능한 압축공기 유출 및 화재 시나리오 분석

윤용균*, 주은혜

Analyses of Scenarios Based on a Leakage of Highly Compressed Air and Fire Anticipated in CAES (Compressed Air Energy Storage) Facility

Yong-Kyun Yoon*, Eun-Hye Ju

Abstract In this study, scenarios based on the leakage of highly compressed air and fire occurrence turned out to be high risks in an operation stage of CAES facility were constructed and estimated. By combining Bernoulli equation with momentum equation, an expression to calculate an impact force of a jet flow of compressed air was derived. An impact force was found to be proportional to the square of diameter of fracture and the pressure of compressed air. Four types of fire scenarios were composed to evaluate an effects that seasonal change and location of fire source have on the spread behavior of smoke. Smoke from the fire ignited in the vicinity of CAES opening descended more quickly below the limit line of breathing than one from the fire occurred 10 m away from CAES opening, which is expected to occur due to a propagation of wave front of smoke. It was shown that a rate of smoke spread of the winter fire is faster than one of the summer fire and smoke from the winter fire spreads farther than one of the summer fire, which are dependent on the direction of air flow into access opening. Evacuation simulation indicated that the required safe evacuation time(RSET) of the summer and winter fires are 262, 670 s each.

Key words Leakage of highly compressed air, CAES facility, Impact force, Fire scenario, Limiting line of breathing, RSET

초 록 본 연구에서는 압축공기에너지저장 설비를 운영함에 있어 위험성이 크다고 분석된 ‘내조시스템 파손에 따른 압축공기 유출’과 ‘접근갱도 내 화재 발생’ 리스크를 대상으로 시나리오를 작성하여 분석을 실시하였다. Bernoulli 방정식과 운동량 방정식을 결합하여 압축공기 분출에 따른 충격력을 계산하기 위한 식을 유도하였다. 이 식을 바탕으로 시나리오를 작성하여 충격력을 계산한 결과 충격력은 균열 직경의 제곱 및 압축공기의 압력에 비례하는 것으로 나타났다. 계절의 변화 및 화원의 위치에 따른 연기 확산 거동을 분석하기 위하여 4가지의 화재 시나리오를 작성하였다. 저장 공동 벽면 근처에서 화재가 발생한 경우는 10 m 떨어진 지점에서 화재가 발생한 경우보다 연기가 호흡한계선까지 하강하는 데 소요되는 시간이 더 짧은 것으로 나타났는데 이는 연기 파선단 전파로 인해 발생한 것으로 예측된다. 갱내로의 공기 유동 방향에 따라 연기의 확산 거동이 달라지기 때문에 겨울에 화재가 발생한 경우는 여름에 발생한 경우보다 연기의 확산속도가 빠르고 더 멀리까지 연기가 퍼지는 것으로 나타났다. 피난 시뮬레이션 해석 결과 여름과 겨울 화재에서의 피난요구시간(RSET)은 각기 262, 670 s로 분석되었다.

핵심어 압축공기 유출, 압축공기에너지저장 설비, 충격력, 화재 시나리오, 호흡한계선, 피난요구시간

Received: Dec. 17, 2015

Revised: Dec. 24, 2015

Accepted: Dec. 24, 2015

*Corresponding Author: Yong-Kyun Yoon

Tel) +82436491318, Fax) +82436491787

E-Mail) yoon63@semyung.ac.kr

Dept. of Fire and Disaster Prevention, Semyung University,
Jecheon-si, Chungbuk, Korea

1. 서론

산업화가 증진됨에 따라 태풍, 폭우, 지진, 폭설, 화재, 교통사고, 테러, 전염병 등과 같은 다양한 자연적·인위적·사회적 위협요인도 증가하고 있다. 위협요인 모두가 리스크가 되는 것은 아니며 발생확률이 있고 발생했을

때 인적·물적 피해를 끼치는 경우 그 위협요인을 리스크라 한다(Broder and Tucker, 2012). 여러 위협요인이 미치는 영향을 종합적으로 관리하여 피해를 최소화하기 위한 방법이 위기관리라 할 수 있으며, 위기관리는 예방·대비·대응·복구단계로 이루어져 있다. 리스크평가는 예방단계에서 수행된다. 리스크 평가에서 가장 발생 위험성이 높은 것으로 판명된 리스크에 대해서는 시나리오를 작성하여 그 결과를 평가할 필요가 있다. 시나리오 작성은 교육 및 훈련에 해당하며 대비단계에서 수행된다(Lee, 1996). 시나리오분석은 여러 가능한 대안의 결과를 고려함으로써 미래에 발생 가능한 사건을 분석하는 기법이라 할 수 있다.

신재생에너지(풍력, 태양광, 태양열 등)는 출력이 일정하지 않아 전력계통에 충격을 줄 수 있기 때문에 생산된 전력을 에너지저장장치(energy storage system, ESS)에 저장하여 사용하는 경우 신재생에너지를 생산할 때 출력을 안정화시킬 수 있으며, 정전과 같은 비상시에도 에너지저장장치에 저장된 전기를 활용할 수 있다. 스마트그리드와 관련해서도 에너지저장장치는 핵심적인 역할을 한다(http://mosfnet.blog.me). 신기후체제 파리 협정이 체결되면서 각국은 온실가스 배출을 지금보다 혁신적으로 줄일 의무가 있으며 우리나라도 2030년까지 전량치 대비 온실가스 배출을 37% 감소시키겠다는 목표를 세웠다(http://magazine.hankyung.com/business/). 현재 국내의 신재생에너지 발전 비율은 1.9% 정도이나 정부는 '2030 에너지 신사업 확산 전략'을 통해 2029년까지 그 비율을 20%까지 올리겠다는 안을 발표하였다(http://www.hani.co.kr). 에너지저장장치에 대한 국내 시장 규모는 2012년 710억 원에서 2020년 8,000억 원이 될 것으로 예측되고 있다(http://mosfnet.blog.me). 에너지저장장치로는 배터리, 플라이휠, 양수발전, 초전도체, 압축공기에너지저장(CAES) 등이 있다. 전기 생산에 고압의 압축공기를 사용하는 가스발전과 압축공기에너지저장을 결합하면 상당한 경제적 효과를 발휘할 수 있을 것으로 예측된다. 압축공기에너지저장은 대규모의 시설이고 압축공기 저장압력이 5~8 MPa에 이르기 때문에 적절한 저장 매체를 선정하는 것이 중요하다. 국내에서는 한국지질자원연구원에서 압축공기에너지저장 시스템과 관련된 연구를 지속적으로 수행하였으며 국내의 경우 지하 암반에 압축공기에너지저장 공동을 설치하는 것이 가장 유리하다는 결과를 제시하였다(KIGAM, 2011).

지하 암반 내에 고압의 압축공기를 저장하는 공동을 설치하고 운영하는 경우 다양한 리스크에 노출될 수 있다. Yoon 등(2013)은 지하 암반 내에 압축공기에너지

저장 공동을 설치하는 경우 발생할 수 있는 리스크를 기획·설계단계, 시공단계, 운영·유지 관리단계로 구분한 후 AHP(Analytic Hierarchy Process) 분석을 적용한 연구를 통하여 품질·안전 관련 리스크의 상대적 중요성이 가장 크다고 발표한 바 있다. 또한 Yoon 등(2015)은 압축공기에너지저장 공동을 운영할 때 발생할 수 있는 12개의 리스크를 선정하여 ANP(Analytic Network Process) 분석을 통해 상대적 중요성을 평가한 후, 리스크 평가기준을 적용하여 가장 위험성이 큰 리스크로 '압축공기저장에너지 공동 접근경도 내 화재 발생'을 선정하고 시나리오 분석을 실시하였다. 그러나 상대적 중요성이 가장 큰 것으로 나타난 '내조시스템 파손에 따른 관리공동 내 고압 압축공기 유출' 리스크에 대한 시나리오 분석을 실시하지 않았고, 화재 시나리오를 작성함에 있어서도 공기의 유입 또는 유출이 경도의 전단면을 통해 이루어지는 것으로 가정하여 자연통기시스템의 개념과 맞지 않는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 '접근경도 내 화재 발생'과 상대적 중요성이 가장 큰 것으로 나타난 '내조시스템 파열에 따른 고압 압축공기 유출'을 대상으로 시나리오를 작성하였다. 유출된 압축공기가 사람이나 시설물을 충격하는 경우 유출 면적의 직경과 압축공기 저장압력의 크기가 충격력에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 접근경도에서 화재가 발생하는 경우, 화원의 위치와 계절에 따른 공기 유동 방향이 연기 확산에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 유출된 압축공기의 충돌에 따른 충격력 계산

압축공기에너지저장 공동을 운영하다 보면 압축공기를 저장하고 있는 내조시스템이 파열되면서 압축공기가 유출되는 사고가 발생할 수 있다. 유출된 분류(jet stream)가 운영요원이나 운영시스템을 충격하는 경우 발생하는 피해를 평가하기 위해서는 분류가 발휘하는 힘을 계산해야 한다.

저장 공동 내 한 점을 1, 저장 공동 플러그에 발생한 균열의 끝단을 2라 하고 저장 공동에서 유출된 분류가 지점 1과 지점 2를 연결하는 유선을 따라 외기로 유출된다고 가정하면 지점 2에서 분류의 속도는 (1)식의 Bernoulli 방정식을 이용하여 구할 수 있다. 이때 분류는 비점성·비압축성·정상류라 가정한다(Munson et al., 2013).

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (1)$$

여기서, P_1, P_2 : 각기 지점 1, 2에서의 유체 압력, ρ : 저장된 압축공기의 밀도, V_1, V_2 : 각기 지점 1, 2의 유체의 속도, g : 중력가속도, z_1, z_2 : 각기 기준면으로부터 지점 1, 2의 높이를 나타낸다. 저장 공동의 체적은 매우 크기 때문에 균열을 통해 누출되는 압축공기의 양이 대단히 적다고 가정할 수 있어 $V_1=0$ 이 되고, 지점 2에서 유체는 대기와 접하기 때문에 $P_2=0$ 으로 가정할 수 있다. 또한 유선이 평행하다고 가정하면 $z_1=z_2$ 가 된다. 상기 조건들을 식 (1)에 대입하여 정리하면 지점 2에서 분류의 속도를 구하는 식은 다음과 같이 표시된다.

$$V_2 = \sqrt{\frac{2P_1}{\rho}} \quad (2)$$

식 (2)에서 보는 것과 같이 압축공기의 압력과 밀도를 알면 균열을 통해 유출되는 분류의 속도를 계산할 수 있다.

균열을 통해 유출된 분류의 속도를 알면 운동량의 변화를 계산하여 분류가 발휘하는 힘을 계산할 수 있다. 운동량의 변화를 평가하기 위하여 Newton의 운동 제2법칙에 Reynolds 수송정리(Reynolds transport theorem)를 적용하면 다음과 같이 표시된다(Munson et al., 2013).

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} \int_{CV} \vec{V} \rho dV + \int_{CS} \vec{V} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dV \quad (3)$$

여기서 \vec{F} : 검사체적에 작용하는 힘, t : 시간, CV : 검사체적(control volume), CS : 검사표면(control surface), \vec{V} : 유체의 속도, ρ : 유체의 밀도, dV : 검사체적을 구성하는 미소 요소의 체적, \vec{n} : 검사표면에 수직인 단위벡터를 나타낸다. 유체의 흐름을 정상류로 가정하였기 때문에 검사체적 내 운동량 변화율은 0이 되어 식 (3) 우항의 첫 번째 식은 0이 된다. 검사체적에서 유출되는 유체의 운동량을 (+), 유입되는 운동량을 (-), 검사체적의 입구를 3, 검사체적의 출구를 4로 하여 (3)식을 고쳐 쓰면 다음과 같다.

$$\vec{F} = \rho_4 V_4 A_4 \vec{V}_4 - \rho_3 V_3 A_3 \vec{V}_3 \quad (4)$$

플러그에 발생한 균열의 끝단을 지점 3, 유출된 압축공기가 작업자를 충격하는 경우 충격지점을 4라 하자. 지점 3과 지점 4 사이의 유동 경로에 있는 공기의 덩어리를 검사체적으로 가정하여 식 (4)을 적용하면 다음과 같이 표시된다.

$$P_3 A_3 - P_4 A_4 - R_x = \rho_4 u_4 A_4 u_4 - \rho_3 u_3 A_3 u_3 \quad (5)$$

여기서 P_3 : 검사체적의 좌변(지점 3)에 작용하는 압력, P_4 : 검사체적 우변(지점 4)에 작용하는 압력, R_x : 압축공기가 작업자를 수평방향(x 방향)으로 충격했을 때 작용하는 충격력, u_3 : \vec{V}_3 의 x 방향 성분, u_4 : \vec{V}_4 의 x 방향 성분이다. 식 (4)에서 Bernoulli 방정식을 적용하면서 유체를 비압축성으로 가정하였기 때문에 식 (5)에서 $\rho_3 = \rho_4 = \rho$, 검사체적은 외기와 접하기 때문에 $P_3 = P_4 = 0$, 압축공기가 사람이나 물체에 부딪치는 순간 속도는 0이 되기 때문에 $u_4 = 0$, 질량보존이 되기 때문에 연속방정식을 적용하면 $A_3 = A_4 = A$ 이 된다. 상기의 조건들을 식 (5)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 나타난다.

$$R_x = \rho_3 u_3 A_3 u_3 = \rho A u^2 \quad (6)$$

식 (2)에서 구한 속도는 $V_2 = u$ 의 관계가 있기 때문에 식 (2)을 식 (6)에 대입하여 정리하면 충격력은 다음과 같이 표시된다.

$$R_x = \rho A u^2 = \rho A \left(\sqrt{\frac{2P_1}{\rho}} \right)^2 = 2AP_1 = P_1 \left(\frac{\pi D^2}{2} \right) \quad (7)$$

여기서 D : 플러그에 발생한 균열을 원형으로 가정하는 경우 균열의 직경이다. 균열의 형상은 원형 이외의 형상을 띌 수도 있지만 운동량 변화를 계산함에 있어서는 균열의 형상 보다는 단면적의 크기가 주요 변수이기 때문에 본 연구에서는 편의상 균열의 형태를 원형으로 가정하였다.

3. 시나리오 분석

3.1 내조시스템 파열에 따른 압축공기 유출

식 (7)을 보면 균열을 통해 유출된 압축공기가 작업자를 충격하는 경우 충격력은 압축공기의 밀도나 속도와 관계없이 저장 공동 내 공기의 저장압력과 유출공기 흐름의 면적에 비례하는 것으로 나타난다. 압축공기에너지저장 공동의 운영압력은 대략 5~8 MPa이기 때문에 운영압력이 각기 5, 8 MPa일 때를 시나리오로 구성하여 균열 직경의 변화에 따른 충격력의 변화를 평가하였다. Fig. 1에는 균열의 직경과 압축공기 압력의 변화에 따른 충격력의 변화가 표시되어 있다. 그림을 보면 압축공기의 압력이 5 MPa, 균열의 직경이 1 cm일 때 충

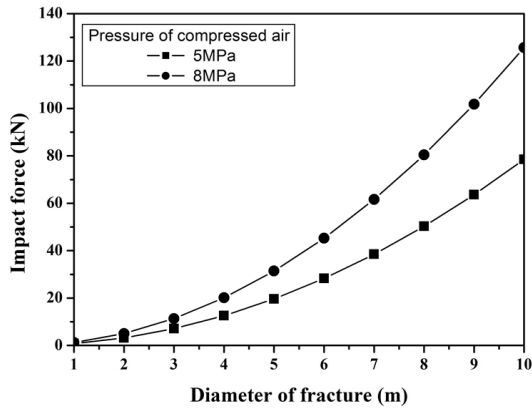


Fig. 1. Changes of impact force with diameter of fracture

격력은 0.785 kN으로 나타났고, 압축공기의 압력이 8 MPa이고 균열의 직경은 동일할 때 충격력은 1.257 kN으로 계산되었다.

내조시스템이 파열되어 외부로 분출된 압축공기가 운영요원을 충격하는 경우 피해가 발생할 수 있다. 1.257 kN의 충격력이 미치는 영향을 평가하면 체중 65 kg인 사람이 19.2 m/s의 속도로 달려가서 벽과 1초 동안 충돌하는 것과 동일한 효과를 낸다. 만일 균열의 직경이 10 cm이고 압축공기의 저장압력이 8 MPa인 경우 충격력은 125.7 kN이 되어 약 12.5 ton에 해당되는 차량도 전도시킬 수 있다. 아주 작은 균열을 통해 분출된 압축공기도 인체에 치명적인 손상을 입힐 수 있고 시설물을 파손시킬 수 있기 때문에 플러그 앞을 가로막는 방호 콘크리트와 같은 시설물을 설치하는 것이 필요하다.

3.2 압축공기에너지저장 접근갱도 내 화재 발생

압축공기에너지저장 관리공동 내 화재 시나리오 분석을 연구한 Yoon 등(2015)의 연구에서는 공기의 유동이

접근갱도 전단면을 통해 한 방향으로만 유입되거나 유출되는 것으로 가정하고, 공기의 풍속도 임의적으로 설정하여 해석을 실시하였다. 그러나 압축공기에너지저장 공동 접근갱도의 경우 끝단이 막혀있는 형태이기 때문에 지상으로 연결된 갱도 입구에서 외부 공기의 유입과 갱도 내 공기의 유출이 동시에 이루어 질 것으로 예상할 수 있다. Fig. 2에는 한 쪽 끝이 막힌 갱도에서의 계절에 따른 공기의 유동 방향이 표시되어 있다. Fig. 2(a)에서 보는 것과 같이 여름에는 외부 공기의 온도가 갱도 내 공기의 온도보다 높기 때문에 외부 공기가 갱도 상부 반단면을 통해 갱도 내로 유입되고, 상대적으로 차가운 갱도 내 공기는 갱도 하부 반단면을 통해 외부로 유출된다. 겨울에는 Fig. 2(b)에서와 같이 반대의 현상이 발생한다(Hartman et al., 1997). 따라서 화재 발생 시나리오 분석을 여름과 겨울로 구분하여 실시할 필요가 있다. 본 연구에서는 화재 시나리오를 구성함에 있어 Fig. 2에 제시된 공기 유동 방향을 고려하였다.

시나리오 및 요소망

압축공기에너지저장 관리공동 내 화재 발생에 따른 연기 확산 거동을 분석하기 위하여 화재 시나리오를 구성하였다. 압축공기에너지저장 공동을 주기적으로 관찰하는 운영요원이 탄 소형 차량에 엔진과열 또는 기타의 원인으로 인해 화재가 발생한 것을 가정하였다. 화재가 공동 벽면과 인접하여 발생한 경우와 어느 정도 이격하여 발생한 경우에 연기의 유동 양상이 달라진다. 화재에서 발생한 연기는 부력 때문에 공동의 천정을 따라 흐르다 주위 공기와의 접촉으로 인해 온도가 낮아지면서 서서히 바닥으로 하강하는 것이 일반적이지만, 벽면 인근에서 화재가 발생하는 경우 연기의 운동에너지로 인한 파선단(wave front) 전파가 발생하면서 연기가 벽면과 충돌하여 되돌아 나오므로 공동 내부가 빠르게 연기로 충전될 수 있다(Quintiere, 1998). 따라서 시나리오를

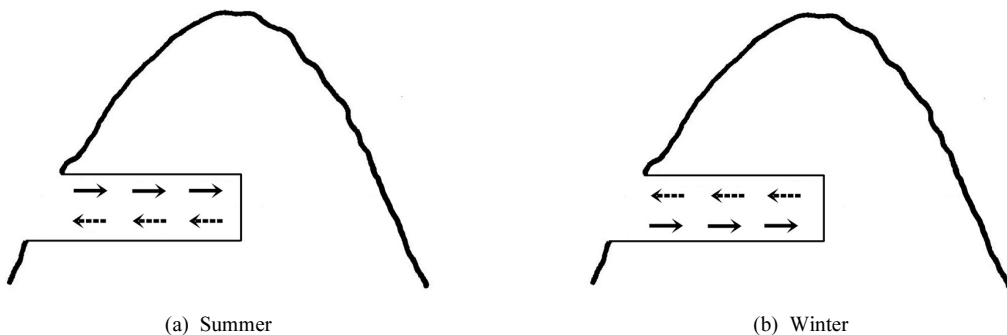
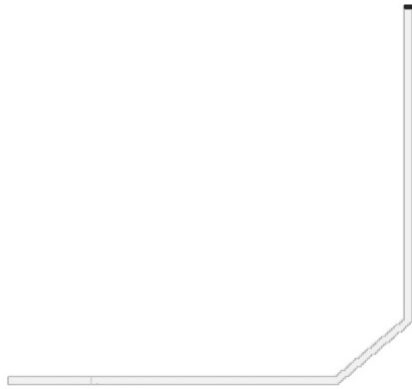


Fig. 2. Direction of air flow in natural ventilation systems

Table 1. Fire scenarios

Type of scenario	Season	Location of fire source
1-1	Summer	Adjacent to a wall of CAES opening
1-2	Summer	10 m away from a wall of CAES opening
2-1	Winter	Adjacent to a wall of CAES opening
2-2	Winter	10 m away from a wall of CAES opening

**Fig. 3.** Mesh layout

구성함에 있어 화재 발생 장소의 고려도 필요하다.

시나리오는 크게 여름과 겨울에 화재가 발생하는 것으로 구분하였다. 시나리오 1-1은 여름에 공동 벽면 근처에서 화재가 발생한 경우를 가정하고, 시나리오 1-2는 여름에 공동 벽면에서 10 m 이격된 지점에서 화재가 발생한 것을 가정하였다. 시나리오 2-1은 겨울에 공동 벽면 근처에서 화재가 발생한 경우를, 시나리오 2-2는 겨울에 공동 벽면에서 10 m 이격된 지점에서 화재가 발생한 것을 가정하였다(Table 1 참조).

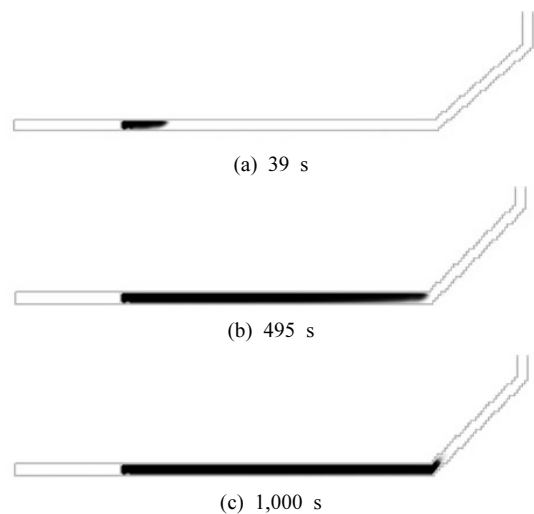
본 연구에서는 한국지질자원연구원에서 개념 설계를 수행한 고압압축공기에너지저장 공동과 연결된 접근갱도를 해석 대상으로 하였다. 접근갱도는 크게 3부분으로 구성되어 있으며 각각의 길이는 갱도 입구에서 -41.6 m 지점까지는 320 m(갱도 1), -41.6 m에서 -54.6 m까지는 100 m(갱도 2), -54.6 m 지점에서 저장 공동까지 연결된 수평갱도의 경우 250 m(갱도 3) 이다. 접근갱도의 단면 크기는 13×7.5 m이다(KIGAM, 2013). 셀의 크기를 1×1 m로 하여 요소망을 구축하였으며 요소망이 Fig. 3에 나타나 있다. 수평갱도를 모사한 부분에서 수직선으로 구분된 좌측 부분이 저장 공동이고 우측에 나타난 부분은 지상까지 연결된 접근갱도를 나타낸다. 승용차 화재를 가정하여 차량이 연소할 때 발생되

는 열방출률(heat release rate)은 5,000 kW로 하였다(NFPA, 2014, Yoon et al., 2015). 최대열방출률에 도달하는 데 걸리는 시간은 600 s이지만 전 갱도에서의 연기 거동을 해석하기 위해서 화재 해석 시간은 1,500 s로 하였다. 풍속은 Kim 등(2013)이 국내 석회석광산 대단면 갱도에서 측정한 평균 풍속 0.5 m/s를 모든 시나리오에 적용하였다.

시나리오 분석

Yoon 등(2015)의 연구에서는 저장 공동과 연결된 수평갱도만을 해석 대상으로 하였지만, 본 연구에서는 화재가 발생한 경우 운영요원이 보행하여 갱도 밖으로 탈출하는 피난대책을 검토하기 위해서 전 갱도를 대상으로 해석을 실시하였다.

시나리오 1-1에서는 여름에 갱도 윗부분으로 공기가 유입되고 아랫부분으로 공기가 유출되는 것으로 가정하여 해석하였다. Fig. 4에는 각기 39, 495, 1,000 s의 시간이 경과한 후의 연기의 거동이 표시되어 있다. 화재 시에 운영 요원이 안전하게 피난하는 데 요구되는

**Fig. 4.** Smoke spread with elapsed time in Scenario 1-1

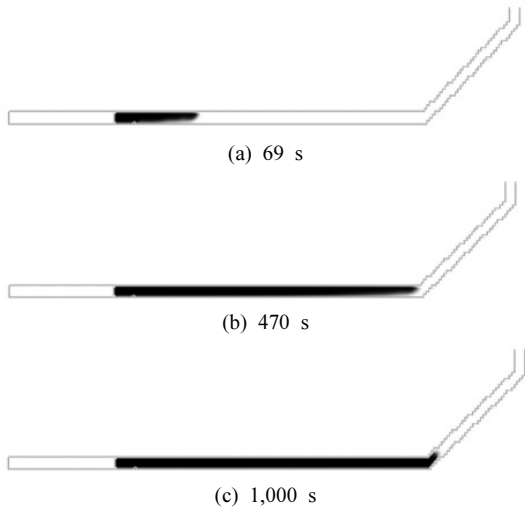


Fig. 5. Smoke spread with elapsed time in Scenario 1-2

중요한 기준은 연기가 하강하여 바닥에서부터 1.8 m 지점인 호흡기계선까지 하강하는데 걸리는 시간이다. Fig. 4를 보면 화재 발생 후 39 s가 지나면 호흡기계선까지 연기가 하강하여 연기를 흡입하지 않고는 이동을 할 수 없다는 것을 알 수 있다. 수평갱도 끝까지 연기가 확산되는 데는 495 s가 소요되는 것으로 분석되었다. 해석 시간을 1,500 s로 하였지만 1,000 s에 도달하고부터는 연기가 운동에너지를 잃고 경사갱도에서 정체되는 것으로 나타났다. Fig. 5에는 여름에 벽면에서 10 m 떨어진 지점에서 화재가 발생한 시나리오 1-2의 해석 결과가 표시되어 있다. Fig. 5(a)를 보면 연기가 호흡기계선까지 하강하는 데 69 s가 소요되고 수평갱도 끝까지 확산되는 데는 470 s가 걸리는 것으로 나타났다. 시나리오 1-1과 유사하게 시나리오 1-2에서도 1,000 s가 경과한 후 연기는 경사갱도(갱도 2) 초입에서 정체하는 것으로 나타났다. 연기가 수평갱도를 지나면서 정체되는 이유는 연기 이동 방향과 외부에서 유입되는 공기의 방향이 서로 반대가 되어 연기가 운동에너지를 급격하게 잃기 때문인 것으로 판단된다.

겨울에 벽면과 인접한 곳에서 화재가 발생한 시나리오 2-1을 해석한 결과가 Fig. 6에 표시되어 있다. Fig. 6(a)를 보면 호흡기계선까지 연기가 하강하는 데 54 s가 소요되었고, 수평갱도 끝까지 연기가 전파하는 데에는 403 s가 걸린 것으로 나타났다. Fig. 6(c)에는 1,000 s 경과 후 연기의 확산이 표시되어 있다. 중간 경사갱도(갱도 2)를 지나 입구와 연결된 경사갱도(갱도 1)까지 연기가 확산된 것으로 나타났지만 갱도 밖으로 유출되

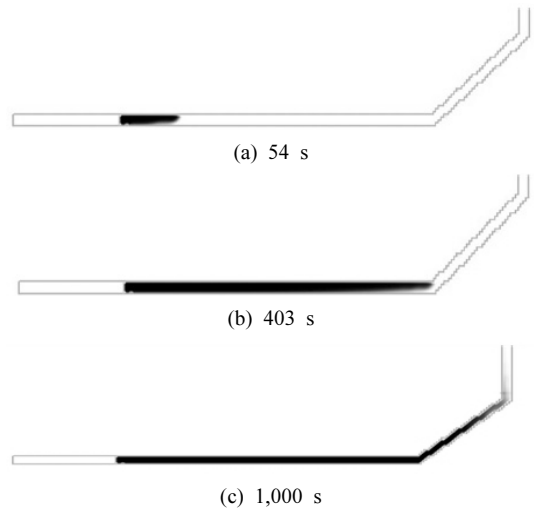


Fig. 6. Smoke spread with elapsed time in Scenario 2-1

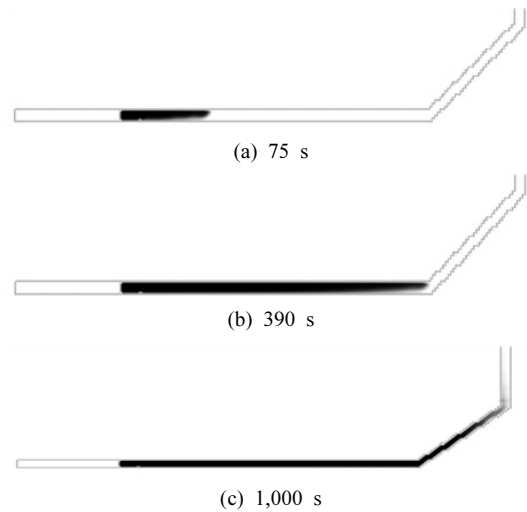


Fig. 7. Smoke spread with elapsed time in Scenario 2-2

지는 않는 것으로 분석되었다. Fig. 7에는 겨울에 벽면에서 10 m 이격된 지점에서 화재가 발생한 시나리오 2-2를 해석한 결과가 나타나 있다. Fig. 7(a)를 보면 호흡기계선까지 연기가 하강하는 데 소요되는 시간은 75s로 나타났다. 1,000 s가 경과한 후 연기는 시나리오 2-1과 유사하게 입구와 연결된 경사갱도(갱도 1) 초입에 머무는 것으로 해석되었다. Fig. 6과 Fig. 7을 비교해 보면 겨울에도 벽면에서 화재가 난 경우에 호흡기계선까지 연기가 하강하는 데 소요되는 시간이 더 짧다는 것을 알 수 있다.

4개의 시나리오를 분석한 결과를 비교해 보면 호흡한계선까지의 연기 하강 시간이 가장 짧아 대피하는 데 가장 불리한 경우는 시나리오 1-1(여름에 저장 공동 벽면 근처에서 화재가 발생한 경우), 하강 시간이 가장 늦어 대피에 유리한 경우는 시나리오 2-2(겨울에 저장 공동 벽면에서 10 m 이격된 지점에서 화재가 발생한 경우)로 나타났다.

4. 토 의

여름과 겨울을 막론하고 저장 공동 벽면과 인접한 곳에서 화재가 발생하는 경우 10 m 이격된 지점에서 화재가 발생한 경우보다 호흡한계선까지 연기가 하강하는 데 소요되는 시간이 더 짧은 것으로 나타났다. 이는 연기의 확산에서 파산단 전파가 주요한 원인인 것으로 생각된다. 즉 벽면에 인접한 곳에서 발생한 화재의 경우 연기가 부력 때문에 상승하면서 갱도 천정을 채우기도 하지만 연기가 바로 인접한 벽에 부딪쳐 되돌아 나오면서 갱도 중간부분을 채우기 때문에 더 이른 시간에 호흡한계선까지 연기가 하강하는 것으로 예측된다. 따라서 갱내에 자동차를 주차하거나 관련시설을 설치하는 경우 벽에서 어느 정도 떨어진 지점을 선택하는 것이 피난시간을 확보하는 데 유리하다고 할 수 있다.

화재가 발생하면 중력에 의한 부력 발생으로 인해 화염과 연기는 상방향으로 향하게 되고 상대적으로 압력이 감소한 화염의 하부로 공기가 유입되면서 화재가 지속 성장하게 된다. 위로 떠오른 팽창된 고온의 연기는 주변 공기보다 밀도가 작아서 공동 천정을 따라 흐르다 추가적으로 연기가 계속 공급되거나 연기의 온도가 떨어지게 되면 하부로 하강하게 된다(Gorbett and Pharr, 2011). 이러한 사실로부터 공기의 유동 방향이 일반적인 연기의 확산 거동에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 여름에 화재가 발생한 시나리오 1-1, 1-2와 겨울에 화재가 발생한 2-1, 2-2를 비교해 보면 공기의 유동 방향이 연기의 거동에 영향을 미치는 것으로 나타난다. 여름에는 외부의 온도가 공동 내부보다 높기 때문에 외부에서 공동 내부로의 공기 유동은 공동 상부 반단면을 통해 이루어지게 되고, 이러한 공기 유동 방향은 연기의 이동 방향과 반대가 되어 연기가 가지고 있는 운동량이 감소되면서 연기가 멀리까지 확산되지 못하는 원인으로 작용한다. 겨울에는 반대로 하부 반단면을 통해 외부 공기가 유입됨으로 인해 화재 지속에 필요한 공기 유입이 원활하게 진행되고 상부 반단면을 통해 갱내 공기가 유출되면서 연기의 방향과 공기 유동 방향이 일치하여 연기의 운동량이 증가하는 효과가 발생하게 되면

서 더 멀리까지 연기가 확산된다고 할 수 있다. 계절에 따라 연기의 확산 거동이 달라지기 때문에 겨울을 기준으로 하여 피난대책을 세우는 것이 필요하다.

접근갱도 내에 특별한 소화설비나 배연설비가 설치되어 있지 않은 상태에서 화재가 발생하는 경우 아주 신속하게 현장을 탈출하여 피난을 하는 것이 중요하다. 피난 시간을 계산하기 위하여 피난 시뮬레이션 프로그램인 Pathfinder를 사용하였다. Pathfinder는 미국 Thunderhead Engineering 사에서 개발하였으며, Java VM V.1.8.0_60을 기반으로 한다. 화재가 발생하면 연기로 인해 시야가 짧아진다는 점을 고려하여 수평갱도와 경사갱도에서의 평균 보행속도를 1 m/s로 하였다(DiNunno, 2005). 화재가 저장 공동 벽면 인근에서 발생하였고 운영요원도 그 지점에서부터 대피를 시작하는 경우 갱도 입구까지 피난하는 데 소요된 시간은 669.58 s로 계산되었다. 또한 수평갱도 끝까지 보행하는 데 걸리는 시간은 262.03 s로 분석되었다. 사람이 재난현장으로부터 안전하게 대피하는 데 필요한 시간을 피난요구시간(required safe evacuation time, RSET)이라고 한다. 여름에 발생한 화재의 경우 연기가 중간 경사갱도 입구까지만 확산되고, 시나리오 중 수평갱도 끝까지 연기가 가장 빨리 도달하는 경우는 시나리오 2-1에서 390 s인 것으로 나타났다기 때문에 상기에서 계산된 262 s를 여름철 화재의 RSET로 설정해도 큰 문제는 없을 것으로 판단된다. 겨울 화재의 경우 연기가 입구와 연결된 경사갱도(갱도 1)까지 확산되는 것으로 나타났다기 때문에 보수적인 관점에서 갱구 외부로 피난하는 데 소요되는 시간 670 s를 겨울철 화재의 RSET로 설정하는 것이 타당하다고 판단된다. 승용차 화재와 같이 소규모 화재가 갱내에서 발생하는 경우 연기 확산 속도가 대피자의 보행속도보다 늦기 때문에 운영요원이 외부로 대피하는 것에는 문제가 없을 것으로 예상된다. 그러나 시나리오 1-1에서 보듯이 호흡한계선까지의 연기 하강이 39 s만에 이루어지기 때문에 화재 초기에 당황하여 대피시간을 놓치는 경우 질식의 우려가 있어 평소예 대피훈련을 충분히 하는 것이 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 압축공기에너지저장 공동에서 발생 가능성이 높고 발생하는 경우 인명 사상의 우려가 높은 내조시스템 파열에 따른 압축공기 유출과 화재 발생 리스크에 대해서 시나리오를 작성한 후 분석을 실시하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 내조시스템이 파열되면서 분출된 압축공기가 사람

을 포함한 물체를 충격할 경우 충격력의 크기는 균열 직경의 제곱 및 압축공기의 저장압력에 비례하는 것으로 나타났다. 균열의 직경이 1~10 cm이고 압축공기의 저장압력이 5 MPa인 경우 충격력은 0.785~78.539 kN, 저장압력이 8 MPa인 경우에는 충격력은 1.256~125.7 kN으로 계산되어 사람이나 시설물에 큰 피해를 줄 수 있는 것으로 나타났다.

2. 화재 시나리오를 분석한 결과 저장 공동 벽면 인근에서 화재가 발생했을 경우에 벽면에서 10 m 이격된 지점에서 화재가 발생했을 때보다 호흡기계선까지 연기가 하강하는 데 소요되는 시간이 짧은 것으로 나타났다. 호흡기계선까지 연기가 빨리 하강한다는 것은 대피할 시간이 적다는 것을 뜻하기 때문에 가급적 벽면 가까이에 주차를 하거나 시설물을 설치하지 않는 것이 유리할 것으로 생각된다.
3. 겨울에 화재가 난 경우는 여름에 발생한 경우보다 연기의 확산속도가 빠르고 더 멀리까지 연기가 이동하는 것으로 나타났다. 이는 공기의 유동 방향이 연기의 유동 방향에 영향을 미치기 때문이다. 여름의 경우 연기의 이동 방향과 갱내로의 공기의 유동 방향이 반대가 되어 확산속도가 느리게 나타나고, 겨울의 경우에는 반대로 연기의 이동 방향과 공기의 유동 방향이 일치하여 공기의 유동이 연기의 유동에 운동에너지를 부가함으로써 연기 확산속도를 빠르게 하는 것으로 생각된다.
4. 피난 시뮬레이션을 실시한 결과 저장 공동과 연결된 250 m의 수평갱도를 보행하는 데 소요된 시간은 262.03 s로 나타났다. 또한 갱도 입구까지 도달하는 데는 669.58 s가 걸리는 것으로 분석되었다. 화재 시나리오 분석 결과 수평갱도 끝까지 연기가 도달하는 데 가장 빠른 경우 390 s가 소요되는 것으로 나타났다. 때문에 초기에 당황하지만 않는다면 대피할 시간은 충분할 것으로 생각된다. 분석 결과에 따르면 여름과 겨울에 화재가 발생할 경우 피난요구시간(RSET)은 각기 262, 670 s로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2013학년도 세명대학교 교수연구년제 지원에 의해 수행된 연구입니다. 지원에 감사를 드립니다.

References

1. Broder, J.F. and E. Tucker, 2012, Risk analysis and the security survey, Elsevier, Inc., 348p.
2. DiNunno, P.J., 2005, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, V. 3, SFPE, pp. 362-364
3. Gorbett, G.E. and J.L. Pharr, 2011, Fire dynamics, Pearson, pp. 227-265.
4. Hartman, H.L., J.M. Mutmanský, R.V. Ramani, and Y.J. Wang, 1997, Mine ventilation and air conditioning, John Wiley & Sons, Inc., pp. 293-313.
5. <http://magazine.hankyung.com/business/>, 한경BUSINESS.
6. <http://mosfnet.blog.me>, 기획재정부 경제이야기.
7. <http://www.hani.co.kr>, 한겨레.
8. KIGAM, 2011, Development of underground energy storage system in lined rock cavern, KIGAM, 388p.
9. KIGAM, 2013, A Study on a risk assessment and disaster scenario analysis with storage of high-pressure materials in underground opening, KIGAM, 105p.
10. Kim, D.Y., K.H. Jeong, and C.W. Lee, 2013, 대단면 갱내 초저풍속 측정 방법에 관한 연구, 한국암반공학회 학술대회 및 세미나 자료집, 180-183.
11. Lee, Y.J., 2006, 위기관리:business continuity, 생능출판사, 438p.
12. Munson, B.R., T.H. Okiishi, W.W. Huebsch, and A.P. Rothmayer, 2013, Fundamentals of fluid mechanics, John Wiley & Sons, Inc., 101- 274.
13. NFPA, 2014, NFPA 502 : Standard for road tunnels, bridges, and other limited access highways, NFPA, 64p.
14. Quintiere, J.G., 1998, Principles of fire behavior, Delmar Publishers, pp. 169-195.
15. Yoon, Y.K., S.M. Seo, and B.H. Choi, 2013, Risk assessment with the development of CAES(Compressed Air Energy Storage) underground storage cavern, Tunnel and Underground Space(J. of KSRM) 25.1, 319-325.
16. Yoon, Y.K., E.H. Ju, S.M. Seo, and B.H. Choi, 2015, Analysis of fire scenarios and evaluation of risks that might occur in operation stage of CAES storage cavern, Tunnel and Underground Space(J. of KSRM) 25.1, 107-114.

**윤용균**

1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사

1987년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사

1992년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사

Tel: 043-649-1318

E-mail: yoon63@semyung.ac.kr

현재 세명대학교 소방방재학과 교수

**주은혜**

2009년 세명대학교 소방방재학과 소방
방재학사

2012년 세명대학교 대학원 환경안전시
스템공학과 공학석사

Tel: 043-649-7379

E-mail: jeh0715@nate.com

현재 세명대학교 대학원 소방방재공학과
박사과정 수료