

CAES 저장 공동 운영단계에서 발생 가능한 리스크 평가 및 화재 시나리오 분석

윤용균*, 주은혜, 서샘물, 최병희

Analysis of Fire Scenarios and Evaluation of Risks that might Occur in Operation Stage of CAES Storage Cavern

Yong-Kyun Yoon*, Eun-Hye Ju, Saem-Mul Seo, Byung-Hee Choi

Abstract This study focuses on assessing risks which might occur in operation stage of CAES storage cavern and analyzing fire scenarios for the risk that have been assessed with highest risk level. Risks in operation stage were categorized into upper risk group and lower risk group. Components of upper risk group are technical risk, facility risk and natural disaster risk. Lower risk group is composed of 11 sub-risks. 20 experts were chosen to survey questionnaires. ANP model was applied to analyze the relative importance of 11 sub-risks. Results of risk analysis were compared with risk criterion to set risk priorities, and the highest risk was determined to be 'occurrence of the fire within the management opening'. Three fire scenarios were developed for the highest risk level and FDS (Fire dynamics Simulator) was used to analyze these scenarios. No. 3 scenario which air blows from tunnel into outside atmosphere represented that a rate of smoke spread was the fastest among three fire scenarios and a smoke descended most quickly below the limit line of breathing. Thus, No. 3 scenario turned out to be the most unfavorable condition when operating staffs were evacuated from access tunnel.

Key words CAES, ANP model, Risk priorities, Fire scenarios

초 록 본 연구에서는 CAES 저장 공동의 운영단계에서 발생할 가능성이 있는 리스크를 분석 및 평가하고, 가장 높은 리스크 수준을 가지고 있는 것으로 판명된 리스크에 대해서 화재 시나리오를 작성하였다. 운영단계에서의 리스크를 상위 리스크와 하위 리스크로 구분하였다. 상위 리스크는 '기술적 리스크', '시설 리스크', '자연재해 리스크'로 이루어져 있으며, 하위 리스크는 11개의 리스크 요인들로 구성되어 있다. 20인의 관련 분야 전문가에게 설문 조사를 실시하였으며, 설문 내용을 분석하기 위해서 ANP 모델을 적용하였다. 리스크 우선순위를 결정하기 위해서 ANP 분석 결과와 기 결정된 리스크 평가기준을 비교하였으며, 그 결과 '관리공동 내 화재 발생'이 위험도가 가장 높은 리스크로 선정되었다. '관리공동 내 화재 발생' 리스크가 미치는 영향을 평가하기 위하여 시나리오를 작성한 후 분석하였다. 3가지 종류의 시나리오를 고려하였으며, 시나리오를 분석하기 위해서 FDS 화재 해석 프로그램을 사용하였다. 해석 결과 터널 내부에서 외부로 바람이 부는 경우를 가정한 No. 3 시나리오가 연기 확산 속도가 가장 크면서 가장 빠르게 연기가 호흡 한계선 이하까지 하강하는 것으로 나타났다. 따라서 운영요원이 접근터널에서 피난하는 경우 No. 3 시나리오가 가장 불리한 조건으로 판명되었다.

핵심어 CAES, ANP 모델, 리스크 우선순위, 화재 시나리오

Received: Feb. 23, 2015

Revised: Feb. 24, 2015

Accepted: Feb. 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. 서 론

최근 들어 세계적인 경제 침체로 인해 태양열, 태양광, 지열, 풍력, 조력 등과 같은 신·재생에너지의 성장이 둔화되고 있지만, 화석연료 사용에 따른 지구온난화를 예방하기 위해서는 앞으로도 신·재생에너지의 보급은 계속될 것으로 예측할 수 있다.

신·재생에너지는 자연조건에 의존하여 발전을 하는 관계로 출력 변동성이 크다는 단점을 가지고 있어 전력망에 피해를 주지 않고 신·재생에너지 발전이 지속적으로 이루어지기 위해서는 생산된 전력을 저장할 수 있는 시설이 필요하다(Ko, 2012). 여러 에너지저장시스템 중에서도 대규모로 에너지를 저장할 수 있는 CAES(Compressed Air Energy Storage)는 가스터빈 발전에 필요한 고압의 압축공기를 미리 생산하여 저장하는 시스템을 말한다. 일반 가스터빈 발전의 경우 발전에 필요한 압축공기를 생산하기 위하여 압축기를 구동하기 때문에 발전효율이 상당히 떨어지는 단점을 가지고 있다. 따라서 신·재생에너지나 심야의 잉여 전력을 이용하여 미리 생산된 압축공기를 CAES 저장 공동에 저장한 후 첨두부하가 걸리는 시간대에 저장된 압축공기를 이용하여 가스터빈 발전을 한다면 발전효율을 높일 수 있다(Ko, 2012, Yoon et al., 2013).

CAES 저장 공동에는 5-8 MPa에 이르는 고압의 압축공기를 저장하기 때문에 기밀성을 확보하기 위해서는 공동의 매질이 매우 중요하다. 현재 고려되고 있는 저장 매질로는 다공질 암반, 암염층, 경암, 기 개발된 광산 갱도 등이 있다. 암염층에 개발된 CAES 저장 공동으로는 독일의 Huntorf 발전소와 미국 Alabama 주의 McIntosh 발전소가 있으며 이들은 현재 유일하게 가동되고 있는 CAES 시스템을 이용한 발전소들이다. 기 개발된 광산 갱도를 이용한 CAES 저장 시설로는 상용화를 준비 중에 있는 미국 Norton 발전소가 있으며 석회암 채광 갱도를 활용한다(Marchese, 2008, Ko, 2012, Yoon et al., 2013).

국내에는 결정질 암반이 주로 분포하기 때문에 CAES 저장 공동을 지하 암반 내에 건설하는 것이 가장 효과적인 것으로 판단된다. CAES 저장 공동은 고압의 압축공기를 저장하는 시설이기 때문에 다양한 리스크 요인이 개발 및 운영과정에 영향을 미칠 수 있다. 윤용균 등(Yoon et al., 2013)은 CAES 저장 공동 건설을 기획·설계단계, 시공단계, 운영단계로 구분하여 AHP 모델을 이용한 리스크 분석을 실시하였지만 실제 가스터빈 발전과 연관되어 가장 중요하게 다루어져야 할 리스크 관련 대상은 운영단계이다.

본 연구에서는 운영단계에서 발생할 수 있는 리스크를 상위 리스크와 하위 리스크로 구분하여 설문지를 작성한 후 관련 분야 전문가에 설문 조사를 실시하였다. 조사 결과를 분석하기 위하여 ANP 모델을 적용하였다. ANP(Analytic Network Process)는 Thomas Saaty 교수가 제안한 의사결정이론으로 외부종속법 AHP(Analytic Hierarchy Process)를 네트워크로 확장시킨 모델이다.

AHP도 1971년 Saaty 교수가 제안한 것으로 의사결정 과정을 여러 단계로 나눈 다음 이를 단계별로 분석하여 최종적인 의사결정에 이르는 방법이다. AHP는 단방향의 트리구조로 ANP의 특별한 경우라 할 수 있다. ANP는 피드백과 내부 및 외부요인의 상호 종속성이 허용된 네트워크구조라는 것이 AHP와의 가장 큰 차이점이라 할 수 있다(Kwon, 2012, Seo, 2013). 리스크 분석 결과와 리스크 평가기준을 이용한 리스크 평가 과정을 통해 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 리스크를 선정하였다. 또한, 최고 수준의 리스크 요인을 시나리오로 작성하여 리스크가 발생할 경우 미칠 수 있는 영향을 평가하였다.

2. 리스크 확인

리스크는 부정적인 결과를 유발하는 예기치 않은 사건이 일어날 확률로 정의할 수 있으며, 보통 리스크의 크기는 사건의 발생 확률과 발생에 따른 피해의 곱으로 표시된다(Ostrom and Wilhelmsen, 2012). 보통 발생 확률이 높은 리스크는 피해 정도가 적은 편이고, 발생 확률이 낮은 리스크는 발생할 경우 피해가 큰 경우가 많다. 리스크 사정(risk assessment)을 통해 사건의 발생 가능성과 그것이 발생했을 경우 조직의 중요 기능에 미치는 잠재적인 영향을 평가하여 대처방안에 대한 우선순위를 정하게 된다. 리스크 사정은 리스크 분석(risk analysis)과 리스크 평가(risk evaluation)로 이루어져 있다. 리스크 분석은 사건을 식별하고, 사건의 원인을 파악하며, 사건의 발생 가능성과 영향 정도를 추산하는 것을 말한다. 리스크 평가는 리스크 수준을 기 결정된 리스크 평가기준과 비교하는 과정이다. 조직 또는 기능에 영향을 미칠 수 있는 위기들을 여러 개 상정할 수 있지만 모든 위기가 동등한 크기의 리스크가 되는 것은 아니다. 리스크에 대한 조직의 취약성(vulnerability)을 고려하여 리스크를 선별하는 작업이 필요하다(EMA, 2003, KBCPA, 2010, Engemann and Henderson, 2012, Broder and Tucker, 2012, Yoon, 2011, Yoon et al., 2013).

위험수준이 가장 높은 리스크를 결정하는 절차가 Fig. 1에 표시되어 있다(EMA, 2003). 그림에서처럼 먼저 CAES 저장 공동의 유지단계에서 만날 수 있는 리스크를 확인하고 이들 리스크에 대한 분석을 실시하기 위하여 전문가 설문 조사를 실시한다. 설문 조사 내용을 이용한 리스크 분석을 실시하기 위하여 ANP 모델을 적용한다. 리스크 분석에서 나온 결과를 최종 리스크로 결정하는 것이 아니고 기 결정된 리스크 평가기준과의 비교를 통해 최종적인 리스크 수준을 평가하게 된다. 따라서 리스크 분석에서 가장 높은 리스크로 결정된 리스크가 아

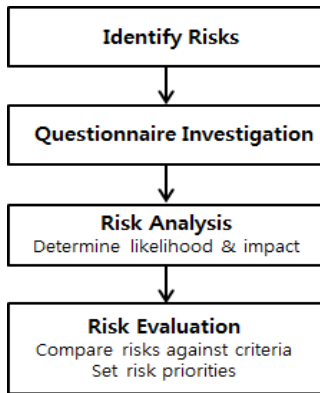


Fig. 1. Risk assessment process

니더라도 리스크 평가 과정에서 리스크 수준이 가장 높은 리스크로 평가될 수도 있다.

본 연구에서는 지하 암반 내에 굴착된 CAES 저장 공동의 운영단계에서 발생할 수 있는 리스크를 식별하고 이들 리스크 간의 상대적 중요성을 평가하였다. 저장 공동과 인접하여 관리공동이 있고 관리공동 내에 압축기 및 여러 종류의 측정 장비가 설치되어 있는 것으로 가정하였다. 또한, 지표로부터 관리공동까지 접근터널이 연결되어 있어 차량을 이용하여 관리공동에 접근할 수 있는 것으로 하였다.

문헌조사와 전문가 자문을 통해 운영단계에서 발생할 수 있는 리스크를 선별하였다. Table 1에서와 같이 리스크를 상위 리스크와 하위 리스크로 구분하였다. 상위 리스크는 ‘기술적 리스크’, ‘시설 리스크’, ‘자연재해 리스크’로 대별하였다. 기술적 리스크의 하위 리스크로는 ‘① 공기 누설을 감지하는 모니터링 시스템 오류’, ‘②

공기압축기 오작동에 따른 공기 압력 과잉 상승’, ‘③ 관리직원에 의한 장비 오작동’, ‘④ 압축공기 저장용 내조시스템에 작용하는 하중을 측정하기 위한 계측기 오작동’이 있다. 시설 리스크의 하위 리스크로는 ‘⑤ 관리공동 내 천반 낙반’, ‘⑥ 관리공동 내 화재 발생’, ‘⑦ 내조시스템 파손에 따른 관리공동 내 고압 압축공기 방출’, ‘⑧ 압축공기 내 윤활유 혼입에 따른 내조시스템 폭발’, ‘⑨ 파이프에서의 압축공기 누설’이 포함된다. 자연재해 리스크의 하위 리스크로는 ‘⑩ 지진으로 인한 저장 공동 파괴’, ‘⑪ 폭우로 인한 접근터널 침수’를 고려하였다(KIGAM. 2013, Seo, 2013).

3. 리스크 분석 및 평가

CAES 저장 공동의 운영단계에서 발생할 수 있는 리스크들을 분석 및 평가하기 위하여 Table 1의 내용을 토대로 ANP 분석을 수행할 수 있도록 설문지를 작성하였다. 관련 분야에서 현장 경험이 10년 이상이 된 20인의 전문가를 대상으로 설문을 실시하였다. 설문지는 100% 회수되었으며 리스크 간의 상대적 중요도를 평가하기 위하여 ANP 분석을 실시하였다.

ANP 분석을 실시하기 위하여 SuperDecisions 프로그램을 이용하였다. 이 프로그램은 Creative Decisions Foundation의 ANP 팀이 개발한 것으로 무료로 사용할 수 있으며 AHP 분석도 수행할 수 있다.

상위 리스크에 대한 쌍대비교를 통해 각 상위 리스크에 대한 가중치를 계산한 것이 Table 2에 나타나 있다. 상위 리스크에 대한 쌍대비교 시 일관성 지수(consistency index, C.I.)가 0.1 이상인 설문지의 경우 일관성이 없는 것으로 판단하여 분석에서 제외하였다. C.I.=0인 경우

Table 1. Classification of risks which might be encountered in operation stage

Upper risk	Lower risk
Technical risk	① Malfunction of monitoring system to measure an air leakage of inner containment
	② Excessive rise of air pressure induced by malfunction of compressor
	③ Malfunction of system caused by operating staffs
	④ Malfunction of instruments to measure loads applied to inner containment
Facility risk	⑤ Wedge falling from the roof of the management opening
	⑥ Occurrence of the fire within the management opening
	⑦ Flowing out of high compressed air by a breakage of inner containment
	⑧ Explosion of inner containment induced by a lubricant being mixed with compressed air
	⑨ Leakage of compressed air by breakage of pipes
Natural disaster risk	⑩ Failure of storage cavern by an earthquake
	⑪ Flooding of access tunnel by a heavy rain

Table 2. Priority and ranking for upper risks

Type of risks	Weighted value	Ranking
Facility risk	0.5021	1
Technical risk	0.4057	2
Natural disaster risk	0.0922	3

Table 3. Priority and ranking for lower risks

Type of risks	Priority	Ranking
⑦ Flowing out of high compressed air by a breakage of inner containment	0.1574	1
① Malfunction of monitoring system to measure an air leakage of inner containment	0.1181	2
② Excessive rise of air pressure induced by malfunction of compressor	0.1117	3
⑧ Explosion of inner containment induced by a lubricant being mixed with compressed air	0.1005	4
④ Malfunction of instruments to measure loads applied to inner containment	0.0944	5
⑨ Leakage of compressed air by breakage of pipes	0.0925	6
⑥ Occurrence of the fire within the management opening	0.0774	7
③ Malfunction of system caused by operating staffs	0.0770	8
⑤ Wedge falling from the roof of the management opening	0.0737	9
⑩ Failure of storage cavern by an earthquake	0.0508	10
⑪ Flooding of access tunnel by a heavy rain	0.0465	11

상대비교 결과가 완전히 일관된다고 할 수 있다. 각 설문지에 대한 상대비교 결과를 기하평균 하여 Table 2에 제시된 가중치를 계산하였다. 표에서 보듯이 시설 리스크가 가장 큰 것으로 나타났고, 상대적으로 자연재해 리스크는 중요하지 않은 것으로 전문가들은 판단했다는 것을 알 수 있다.

상위 리스크와 하위 리스크를 상대비교 하여 초기대행렬(unweighted super matrix)을 구하고 여기에 상위 리스크의 가중치를 곱하여 가중대행렬(weighted super matrix)을 구한다. 가중대행렬을 무한대로 곱하는 경우 일정한 값에 수렴하게 되는데 이를 수렴대행렬(limited matrix)이라 한다. 수렴대행렬은 개별 리스크 요인의 중요도를 나타낸다. Table 3에는 하위 리스크 요인에 대한 중요도가 표시되어 있다(Seo, 2013). 표를 보면 전문가들은 ‘⑦ 내조시스템 파손에 따른 관리공동 내 고압 압축공기 방출’을 가장 큰 위험이 있는 리스크 요인으로 생각했다는 것을 알 수 있다. 상위 리스크로 선정된 리스크들을 분석해 보면 전반적으로 압축공기를 저장하는 내조시스템과 내조시스템이 적절하게 작동하고 있는지를 체크하는 장비에 대한 오작동을 중요 리스크로 뽑았다는 것을 알 수 있다. 반면 관리공동 자체의 안정성 문제나 관리직원에 의한 인위적 재해 및 자연재해로 인해 발생하는 리스크는 중요하지 않은 것으로 판단

한 것으로 나타났다. 국내에서는 5 MPa 이상의 고압공기를 저장하는 시설을 지하 암반 내에 건설하여 운영한 실적이 없기 때문에 전문가들이 이와 관련된 리스크 요인들에 대해서 상대적으로 우려를 많이 한다고 생각할 수 있다.

리스크의 상대적 중요성을 판별하는 과정은 리스크 분석에 해당한다고 할 수 있다. 리스크 분석에서 상위를 차지한 리스크가 반드시 처리가 필요한 리스크가 되는 않는다. 리스크 평가기준과의 비교를 통해 최종적으로 처리가 필요한 리스크를 선정해야 한다. 저자들은 리스크 평가기준을 ‘인명 손실이 발생하는 재해가 물적 피해가 발생하는 재해보다 리스크가 큰 것’으로 결정하였다. 따라서 대량의 인명 손실이 날 수 있는 리스크가 가장 위험한 리스크라 할 수 있다. 리스크 중요도가 1위로 분석된 ‘⑦ 내조시스템 파손에 따른 관리공동 내 고압 압축공기 방출’의 경우 내조시스템의 파손이 일부에 국한되어 발생할 가능성이 높고, 고압공기가 관리공동 내로 방출되어 작업자를 직격한다고 해도 해당자에만 피해를 끼칠 확률이 높기 때문에 리스크 평가기준과 비교하면 위험성이 아주 높은 리스크라고 평가하기는 어렵다. 반면에 ‘⑥ 관리공동 내 화재 발생’은 상대적 중요도 분석에서는 7번째를 차지하는 것으로 나타났으나, 관리공동에서 화재가 발생했을 경우 대량의 인명피해

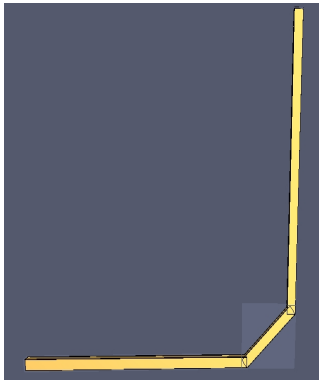


Fig. 2. Mesh layout

가 발생할 수 있기 때문에 잠재적인 리스크가 큰 것으로 평가할 수 있다. 리스크 분석 결과와 리스크 평가 기준을 이용한 리스크 평가를 통해 최종적으로 처리가 필요한 리스크로 ‘⑥ 관리공동 내 화재 발생’과 ‘⑦ 내조 시스템 파손에 따른 관리공동 내 고압 압축공기 방출’을 선정하였다. 처리가 필요한 리스크를 선정 한 후에는 대처방안을 마련하기 위하여 발생 가능한 시나리오를 작성하여 재해 발생 시 미칠 수 있는 영향을 평가해야 된다. 본 연구에서는 리스크 사정을 통해 위험성이 가장 큰 리스크로 선정된 ‘⑥ 관리공동 내 화재 발생’과 ‘⑦ 내조시스템 파손에 따른 관리공동 내 고압 압축공기 방출’ 리스크 중에서 ‘⑥ 관리공동 내 화재 발생’에 대한 리스크에 대해서 시나리오를 작성하여 분석하였다.

4. 화재 시나리오 분석

CAES 접근터널에서 발생한 화재에 따른 연기 확산 거동을 시나리오로 구성하였다. 저장 공동의 적정 가동 여부를 주기적으로 관찰하는 운영요원이 탄 차량이 저장 공동과 접해 있는 관리공동에서 엔진과열에 의해 화재가 발생한 경우를 가정하였다. 계절에 따라 터널 내로의 공기 유동 방향이 바뀌는 것을 고려하여 시나리오를 No. 1(풍속: 1.0 m/s), No. 2(풍속: 0 m/s), No. 3(풍속: -1 m/s)으로 구성하였다.

화재로 인한 연기 확산을 모사하기 위하여 본 연구에서 사용한 PyroSim 프로그램은 미국의 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 FDS(Fire Dynamics Simulator)의 전처리 프로그램으로써 입력파일을 용이하게 작성할 수 있게 해주는 기능이 있다. FDS는 화재가 발생하지 않은 경우의 건물 환기에 대해서도 분석을 수행할 수 있다. PyroSim 프로그램은

FDS와 Smokeview라는 후처리 프로그램을 포함하고 있어, FDS를 통해 계산된 결과를 Smokeview를 통해 보여준다(Thunderhead Eng., 2010).

본 연구에서는 동굴형 CAES 저장 공동을 해석 대상으로 하였다. 접근터널의 단면 크기는 13×7.5(m)이고, 접근터널의 길이는 터널 입구에서 -41.6 m 지점까지는 320 m, -41.6 m에서 -54.6 m 지점까지는 100 m, -54.6 m 지점에서 저장 공동까지는 338 m이다. 셀의 크기를 0.5×0.5×1(m)로 하여 요소망을 구축하였으며 Fig. 2에 표시되어 있다. 그림에서 좌측이 저장 공동 방향이고 우측은 지표로 향하는 방향이다.

화재 해석 시 가장 중요한 입력자료 중의 하나가 화재강도를 나타내는 연료의 열방출률(heat release rate, HRR)이다. 열방출률은 연료가 연소할 때 열에너지가 발생하는 속도를 말한다. 현장 운영용으로 사용될 것으로 예상되는 차량을 승용차로 가정하여 승용차가 연소 시 발생하는 최대 열방출률을 5 MW로 하였고, 승용차의 경우 최대 열방출률에 도달하는 시간이 10분이라는 점을 고려하여 해석시간은 600초로 하였다(MLTMA, 2009, NFPA, 2014).

화원에서 발생한 연기는 고온이기 때문에 부력에 의해 상승기류를 형성하여 터널 천장부로 올라가 터널 종단을 따라 이동하게 된다. 연기의 온도가 떨어지면 연기는 터널 하부로 하강하게 되어 터널 내부 전체에 연기가 확산되게 된다.

Fig. 3에는 No. 1 시나리오(외부에서 터널 내부로 풍속 1 m/s의 바람이 부는 경우)에서 화재 발생 후 115초 및 380초 경과한 후의 연기 확산 거동이 표시되어 있다. 그림에서 적색 점은 화원을 나타낸다. 해석 결과는 Smokeview 프로그램을 통해 시각적으로 표시되는데 그림에서 사선으로 표시한 부분은 터널이 경사진 부분이라는 것을 나타낸다. 그림을 보면 연기 확산 형상이 일률적으로 진하지 않게 표시되어 있는데, 이는 위치에 따라 연기 농도가 다른 것을 표현했기 때문이다. 화재 발생 후 115초가 경과한 경우 화원으로부터 수평 터널의 중간 지점까지 연기가 확산된 것을 알 수 있으며 터널 중간 높이까지 연기가 하강한 것으로 나타났다. 380초 경과한 경우 화원으로부터 수평 터널 전 구간에 연기가 확산된 것으로 나타났으며, 연기는 바닥 부근까지 하강한 것으로 분석되었다.

No. 2 시나리오에서는 터널 내, 외부로 바람이 불지 않는 경우를 가정하여 풍속을 0 m/s로 하여 해석을 실시하였다. Fig. 4에는 해석 결과가 표시되어 있다. 해석 결과를 보면 No. 1 시나리오에 비해 연기가 터널 내로 확산되는 시간이 빨라졌음을 알 수 있다. 그러나 연기

Scenario type	Elapsed time (sec)	Distribution of smoke in tunnel
No. 1	115	
	380	

Fig. 3. A behaviour of smoke spread for No. 1 scenario

Scenario type	Elapsed time (sec)	Distribution of smoke in tunnel
No. 2	113	
	290	

Fig. 4. A behaviour of smoke spread for No. 2 scenario

Scenario type	Elapsed time (sec)	Distribution of smoke in tunnel
No. 3	106	
	255	

Fig. 5. A behaviour of smoke spread for No. 3 scenario

확산 속도는 빠른 것으로 나타났지만, 연기가 바닥으로 하강하는 정도는 No. 1 시나리오에서보다 약한 것으로 나타났다. 수평터널의 전 구간에 연기가 확산된 것으로 나타난 290초가 경과한 시점에서도 연기는 바닥에서 어느 정도까지 이격된 지점까지만 하강한 것으로 해석되었다.

No. 3 시나리오에서는 터널 내부 공기가 풍속 1 m/s로 터널 외부로 부는 것을 가정하여 해석을 수행하였다. Fig. 5에는 해석 결과가 표시되어 있다. 터널 내부에서

외부로 바람이 부는 것으로 가정하였기 때문에 연기 확산이 가장 빠를 것으로 예상할 수 있으며 해석 결과도 이런 예측과 부합한다.

Fig. 6에는 연기의 확산 거리에 따른 소요 시간이 No. 1, 2, 3 시나리오에 대해서 표시되어 있다. 화원으로부터 150 m 이격된 지점까지는 거의 비슷한 시간대에 연기가 확산되는 양상을 보이지만, 150 m 이후부터 연기 확산 시간의 차이가 많이 나타나고 있다. 특히 No. 1 시나리오의 경우 연기 확산에 소요되는 시간이 지수적

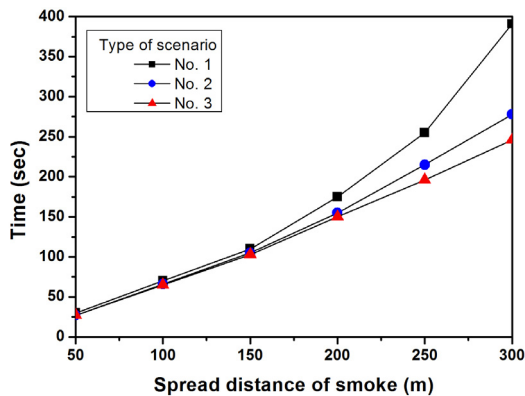


Fig. 6. Change of elapsed time with spread distance of smoke

으로 증가한다는 것을 알 수 있다. 이는 터널 외부에서 부는 바람이 연기 확산에 대한 저항으로 작용하였기 때문인 것으로 판단된다.

연기의 확산 속도도 중요하지만, 운영요원이 피난하는데 있어 가장 중요한 문제는 바닥에서 1.8 m로 정해져 있는 호흡기계선까지 연기가 하강하는 데 얼마만큼의 시간이 소요되는 가이다(NEMA, 2014). 각 시나리오에서 호흡기계선까지 연기가 하강하는 데 걸리는 시간을 분석한 결과 No. 1, 2, 3의 각 경우에 대해서 각기 320초, 300초 및 260초로 평가되었다. 터널 내부에서 외부로 바람이 부는 것을 가정한 No. 3 시나리오의 경우 연기 확산도 빠르지만, 호흡기계선까지 연기가 하강하는 데 걸리는 시간도 가장 빠른 것으로 나타났다. 따라서 No. 3 시나리오의 경우가 운영요원이 피난하는 데 가장 불리한 조건이라 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 지하 암반 내 건설한 CAES 저장 공동의 운영단계에서 발생할 수 있는 리스크를 분석 및 평가하고 가장 큰 리스크 요인에 대해서 시나리오를 작성하여 시나리오에 따른 영향을 평가하였다.

운영단계에서의 리스크를 상위 리스크와 하위 리스크로 구분하였다. 리스크 간의 상대적 중요도를 평가하기 위하여 20인의 관련 분야 전문가에게 설문 조사를 실시하고, 조사 내용을 평가하기 위하여 ANP 분석을 실시하였다. 리스크 분석 결과 상위 리스크에서 가장 큰 가중치를 보이는 리스크는 ‘시설 리스크’로 나타났으며, 하위 리스크에서는 ‘내조시스템 파손에 따른 관리 공동 내 고압 압축공기 방출’이 가장 큰 중요도를 갖는 것으로 분석되었다. 최종적으로 리스크의 수준을 결정하기

위해서는 리스크 분석뿐만 아니라 리스크 평가 과정이 필요하다. 리스크 평가에 필요한 리스크 평가기준은 ‘인명 손실이 발생하는 재해가 물질 피해가 발생하는 재해보다 리스크가 큰 것’으로 결정하였다. 리스크 평가기준에 따르면 재해에 따른 인명 손실이 클수록 리스크가 큰 것으로 나타나기 때문에 ‘관리 공동 내 화재 발생’을 최종적으로 리스크 수준이 가장 높은 리스크로 평가하였다.

리스크 수준이 가장 높은 것으로 결정된 ‘관리 공동 내 화재 발생’이 미치는 영향을 평가하기 위하여 시나리오를 작성하였다. 3개의 시나리오를 가정하여 No. 1 시나리오는 풍속이 1.0 m/s, No. 2 시나리오는 풍속이 0 m/s, No. 3 시나리오는 풍속이 -1 m/s인 것으로 하였다. 연기 확산 속도를 평가한 결과 터널 외부에서 내부로 바람이 부는 경우를 가정한 No. 1 시나리오에서 연기 확산이 가장 느린 것으로 나타났으며, 터널 내부에서 외부로 바람이 부는 것으로 가정한 No. 3 시나리오에서 연기 확산 속도가 가장 큰 것으로 나타났다. No. 3 시나리오의 경우 연기 확산이 가장 빠르기도 하지만 연기가 호흡기계선까지 하강하는데 가장 적은 시간이 소요되어 운영요원이 피난하는 데는 가장 불리한 조건을 나타내었다.

본 연구에서는 ANP 분석 결과에서 가장 큰 리스크 요인으로 분석된 ‘내조시스템 파손에 따른 관리 공동 내 고압 압축공기 방출’ 리스크를 시나리오로 작성하지 않았으나 압축공기가 방출되어 운영요원을 타격하는 경우 인명 사고가 발생할 수 있기 때문에 차후 연구를 통해 이 리스크에 대한 시나리오 분석을 실시할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2012학년도 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행된 연구입니다. 연구비 지원에 감사를 드립니다.

References

1. Broder, J.F. and E. Tucker, 2012, Risk analysis and the security survey, Elsevier Inc., pp. 39-44.
2. EMA, 2003, Critical infrastructure emergency risk management and assurance, EMA, 29p.
3. Engemann, K.J and D.M. Henderson, 2012, Business continuity and risk management, Rothstein Associates Inc., pp. 33-58.
4. KBCPA, 2010, 재난관리 전문과정, KBCPA, pp. 17-24.
5. KIGAM, 2013, A Study on a risk assessment and disaster scenario analysis with storage of high-pressure materials

- in underground opening, KIGAM, 105p.
6. Ko, T.Y., 2012, New concept of underground space utilization: Compressed Air Energy Storage, Architecture 56.2, pp. 87-90.
 7. Kwon, J.H., 2012, 전략적 의사결정기법, 청람, 168p.
 8. Marchese, D., 2008, Norton energy storage: CAES resiliency in uncertain markets, Compressed Air Energy Storage (CAES) scoping workshop, Columbia University, pp. 151-165.
 9. MLTMA, 2009, 도로터널 방재시설 설치 및 관리지침, 국토해양부, 103p.
 10. NEMA, 2014, 소방방재청고시 제2014-31호 : 소방시설 등의 성능위주 설계 방법 및 기준, 소방방재청.
 11. NFPA, 2014, NFPA 502 : Standard for road tunnels, bridges, and other limited access highways, NFPA, 64p.
 12. Ostrom, L.T. and C.A. Wilhelmsen, 2012, Risk assessment, Wiley & Sons Inc., pp. 1-12.
 13. Seo, S.M., 2013, A study on a risk assessment with storage of high-pressure materials in underground opening, M. Eng. Thesis, Semyung University, 86p.
 14. Thunderhead Eng., 2010, PyroSim user manual, Thunderhead Eng., 101p.
 15. Yoon, Y.K., 2012, A study on the risk assessment occurred possibly in a civil project, Explosives & Blasting 29.2, pp. 59-66.
 16. 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 Space(J of KSRM) 23.4, pp. 319-325.

윤 용 균



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

서 샘 물



2011년 세명대학교 소방방재학과 소방
학사
2013년 세명대학교 대학원 소방방재공
학과 공학석사

Tel: 070-8793-7244
E-mail: cdwssm@naver.com
현재 (주)씨에스 근무

주 은 혜



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

최 병 희



1988년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
2002년 전남대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2005년 전남대학교 대학원 지구시스템
공학과 공학박사

Tel: 042-868-3237
E-mail: bhchoi@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구
본부 책임연구원
