

CAES(Compresses Air Energy Storage) 지하 저장 공동 개발에 따른 리스크 사정 윤용균*, 서샘물, 최병희

Risk Assessment with the Development of CAES (Compressed Air Energy Storage) Underground Storage Cavern

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

Abstract The objective of this study is to assess risks which might occur in connection with the storage of the highly compressed air in underground opening. Risk factors were selected throughout literature survey and analysis for the characteristic of CAES. Large risk factors were categorized in three components; planning and design phase, construction phase, and operation & maintenance phases. Large category was composed of 8 medium risk groups and 24 sub-risks. AHP technique was applied in order to analyze the questionnaires answered by experts and high-risk factors were selected by evaluating the relative importance of risks. AHP analysis showed that the operation & maintenance phases are the highest risk group among three components of large category and the highest risk group of eight medium risk groups is risk associated with the quality and safety. Risk having the highest risk level in 24 sub-risks is evaluated to be a failure of tightness security of inner containment storing compressed air.

Key words Risk, CAES, Highly compressed air, AHP technique

초 록 본 연구의 목적은 지하공동 내에 고압 압축공기를 저장하는 경우 발생할 수 있는 리스크를 평가하는 것이다. 문헌 조사와 CAES의 특성에 대한 연구를 통해 CAES 지하 저장 공동 개발과 관련된 리스크 요인을 선정하였다. 대분류 리스크 요인으로 기획·설계단계, 시공단계, 운영·유지관리단계의 3개를 고려하였으며, 중분류 리스크 요인으로 8개를, 소분류 리스크 요인으로 총 24개의 리스크 인자들을 선정하였다. 전문가 설문을 통해 얻어진 자료를 분석하기 위하여 AHP 기법을 적용하였으며 리스크 상호 간 상대적 중요도를 평가하였다. 해석 결과 대분류에서는 운영·유지관리단계 리스크, 중분류에서는 품질·안전 관련 리스크, 소분류에서는 압축공기 저장용 내조시스템의 기밀성 확보 실패가 가장 큰 리스크로 평가되었다.

핵심어 리스크, CAES, 고압 압축공기, AHP 기법

1. 서 론

발전량과 전기 소비량을 평형하게 유지하는 것은 어렵기 때문에 공급이 수요를 초과하는 경우 초과된 전기

에너지를 다른 형태의 에너지로 변환하여 저장하는 것이 필요하다. 에너지 저장 시스템으로는 열에너지 저장(Thermal energy storage), 양수발전 저장(Pumped hydro-electric storage, PHES), 플라이휠 저장(Flywheel storage), 배터리 저장(Battery storage), 압축공기 에너지 저장(Compressed air energy storage, CAES), 초전도체 저장(Super-conductive magnetic storage) 등을 들 수 있다(Ter-Gazarian, 2011). 상기에 제시한 에너지 저장시스템 중에서 배터리는 가격이 비싸고, 플라이휠은 단기 간의 저장에 적합하며, 양수발전은 환경적인 제한을 가지고 있고, 초전도체 저장은 실험적인 단계에 머무르고

Received: Aug. 20, 2013

Revised: Aug. 26, 2013

Accepted: Aug. 28, 2013

***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

있다는 단점이 있다.

CAES 시스템은 PHES 시스템과 더불어 기존 발전소 수준의 출력을 여러 시간 동안 유지할 수 있다는 장점이 있을 정도로 대규모 저장이 가능하기 때문에 경제적이며, 재사용이 가능하고, 기저 및 첨두부하에 빠르게 대응할 수 있다는 장점을 가지고 있다(Succar, 2011). 최근 들어 안정적으로 전력을 공급하는 것 보다는 효율적으로 전력을 공급하는 스마트그리드 기술이 주목을 받고 있다. 스마트그리드 기술이란 실시간으로 전력 소비량을 확인하여 수요와 공급이 최적화 되도록 전력 공급 시스템을 자동으로 조절하는 것으로 인여 생산되는 전기를 최소화하는 것이다(Wikipedia, 2013). 스마트그리드 시스템이 성공적으로 적용되기 위해서는 인여되는 전기를 저장할 수 있는 에너지 저장시스템을 개발·상용화하는 것이 필요하다. CAES는 기저전력생산 비율이 높아져 전력예비율이 증가하는 경우 인여 전력을 저장하기 위한 용도로도 사용될 수 있고, 또한 환경 변화에 따라 전력 생산이 가변적이라 전력 생산 조절이 불가능한 신재생에너지의 확대 보급을 위해서도 사용될 수 있다(Ko, 2012).

CAES 저장 매질로는 암염층, 다공질 암반, 경암을 고려할 수 있다(Succar, 2011). 암염층에 용해 채굴 공동을 형성하여 CAES 시스템을 운영하고 있는 곳으로는 독일의 Huntorf 발전소와 미국의 McIntosh 발전소가 있으며 현재 전 세계적으로 상용화 운전을 하고 있는 유일한 CAES 발전소들이다(Fthenakis, 2008). 다공질 암반으로는 대수층이 대표적이다. 대수층을 저장 매질로 이용하기 위해서는 대수층 상부에 불투수의 덮개암이 존재해야 되며 대수층 지역에 시추공을 천공하고 시추공을 통해 압축공기를 주입하게 된다. 대수층을 이용하는 방법은 인위적인 저장 공동 굴착이 필요 없다는 장점은 있으나 압축공기 저장량 및 발전량 추정이 어렵고 장소 선택에 대한 어려움이 따른다. 경암에 압축공기 저장 공동을 개발하는 경우 굴착비가 비교적 높을 수도 있지만 지상시설과 독립적으로 공간을 활용할 수 있고, 발전 설비가 있는 곳에 저장 공동을 만들 수 있다는 장점을 가지고 있다. 기존의 채광 갱도를 이용하는 방법도 있으며 현재 상용화 준비 중인 미국의 Norton 발전소가 대표적으로 석회석 광산 갱도를 저장 공동으로 활용한다(Marchese, 2008). 폐갱도를 사용하는 경우 새로 공동을 굴착할 필요가 없다는 장점은 있으나 갱도 주변에 발달한 불연속면의 처리와 장소 선택의 문제가 단점으로 존재한다.

국내에서 CAES 저장 공동을 개발하는 경우 지하암반에 저장 공동을 건설하는 것이 가장 효율적인 것으로

평가된다. 지하암반 내에 압축공기를 저장하기 위한 공동을 건설하는 경우 인적, 환경적, 기술적 요인 등에 영향을 미치는 리스크가 발생할 수 있다. 시스템을 개발, 유지하는 공학적 기술이 완전한 것으로 예상되더라도 시스템에 영향을 미칠 수 있는 예상치 못한 리스크가 발생하는 경우가 있다. 지하공동 저장식 CAES 시스템에서는 5 MPa 이상의 고압의 압축공기를 저장, 운영하기 때문에 다양한 위험요인들에 대한 리스크 평가가 필요하다.

CAES 지하 저장 공동 건설은 타당성평가, 부지 선정, 부지 조사, 시공, 운영, 설비 개선 등의 단계를 거치지만(Bauer, 2008) 각 단계별 발생 가능한 리스크는 기획·설계단계, 시공단계, 운영·유지관리단계로 구분하여 평가할 수 있다.

본 연구에서는 지하암반에 CAES 저장 공동을 개발하는 경우 발생할 수 있는 다양한 리스크요인들을 식별한 후 리스크 간 상대 비교를 통해 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 리스크 요인을 사정하였다. 리스크 사정을 위해 전문가 설문을 실시하였으며 리스크 상대 비교를 위해 AHP(Analytic Hierarchy Process)기법을 적용하였다.

2. CAES 발전 및 리스크 사정의 개요

2.1 CAES 발전

일반적인 가스 터빈 발전에서는 공기압축기와 터빈이 직·간접적으로 연결되어 있어 공기압축기로부터 생산된 고압의 공기는 연소기에서 고온·고압으로 팽창되고 팽창된 공기가 터빈을 돌려 전기를 생산하게 된다. 압축공기 생산과 연소기에서의 압축공기 팽창에는 많은 에너지가 소요되고 총에너지의 2/3 정도가 투입되는 것으로 알려져 있다(Succar, 2011). 가스 터빈 발전은

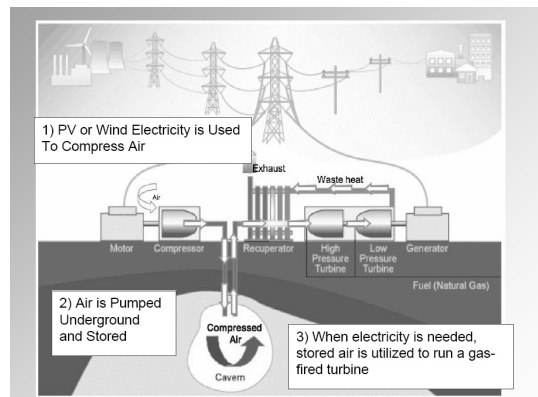


Fig. 1. CAES gas turbine plant (After Fthenakis, 2008)

기동이 빠르다는 장점이 있지만 효율이 높지 않다는 단점이 있다.

CAES 가스 터빈 발전에서는 5~8 MPa에 이르는 압축공기를 미리 생산하여 저장 공동에 저장한 후 첩두부하가 걸리는 시간대에 저장된 압축공기를 천연가스로 가열 후 팽창된 압축공기로 터빈을 구동하여 전기를 생산하게 된다(Fig. 1 참조). 현재 상용화된 CAES 발전소로는 독일의 Huntorf 발전소(발전용량 : 290 MW)와 미국의 McIntosh 발전소(발전용량 : 348 MW)가 있다. 야간에 남는 전기나 신재생에너지를 사용하여 압축공기를 생산하는 경우 가스 터빈 발전의 효율을 높일 수 있다는 장점이 있으나, 5 MPa 이상의 압축공기를 저장 공동에 저장하기 때문에 저장 공동 내에 설치되는 내조 시스템의 파괴 방지와 기밀성 확보가 중요하다.

2.2 리스크 사정

리스크는 발생 가능성과 발생했을 경우 미치는 영향 정도가 측정되는 사건을 겪을 가능성을 말한다. 리스크는 위협요소(Threat)가 위기(Crisis)가 되고 이로 인해 조직의 기능이 중지되어 자산(인명이나 재산) 상의 손실이 발생하는 일련의 연쇄과정으로 나타난다. 방지대

책이 있는 경우 리스크 전이 가능성을 감소시키거나 피해를 감소시킬 수 있다(Engemann and Henderson, 2012).

리스크 사정(Risk assessment)은 리스크 관리(Risk management)의 일환으로 실시된다. 리스크 관리 절차는 Fig. 2와 같다. 리스크 사정은 리스크 확인(Risk identification), 리스크 분석(Risk analysis), 리스크 평가(Risk evaluation)로 구성된다. 리스크 확인은 조직의 기능에 영향을 줄 수 있는 위협요소를 선정하고 위협요소에 대한 조직의 취약성을 동시에 고려하여 리스크가 될 가능성을 평가한다. 위협요소 자체가 일반적으로 불리한 영향을 미칠 수 있다 하여도 그것에 대한 조절대책이 구비되어 취약성이 낮다면 리스크로 고려하지 않는다. 리스크 분석은 사건을 확인하여 발생 원인을 결정하고 발생 가능성과 발생했을 경우 미치는 영향 정도를 평가하는 것이다. 리스크 평가는 리스크 분석에서 평가된 리스크 수준과 기 결정된 리스크 처리기준을 비교하여 어떤 리스크를 처리할 필요가 있는지 처리를 하는 경우 처리 우선순위를 정하는 단계이다(Engemann and Henderson, 2012, Yoon, 2011, Yoon et al., 2013).

본 연구에서는 리스크 관리에서 리스크 처리(Risk treatment)를 제외한 리스크 사정 단계를 통해 CAES 저장 공동 개발에 따른 상위 리스크를 평가하였다.

3. CAES 저장 공동 개발에 따른 리스크 요인 도출

CAES 저장 공동은 고압의 압축공기를 저장하기 때문에 터널이나 일반 목적의 저장공동과 같은 기존의 시설물과는 설계 개념 및 시공과정이 다르기 때문에 일반적인 리스크 요인을 그대로 적용할 수는 없다(You et al., 2008, Seo et al., 2010). CAES 저장 공동 개발을 위한 절차는 타당성 분석, 부지 선정, 부지 조사, 시공, 운영, 설비 개선 등으로 이루어진다. 각 단계에서 다양한 리스크 요인들이 상존할 수 있지만 운영·유지관리 단계에서 압축공기가 누출됨으로 인해 발생하는 리스크가 문제가 될 수 있다. 고압의 압축공기를 지하공동에 저장함으로써 발생하는 리스크를 예측하는 것은 쉽지 않은 일이다. 이것은 지하 저장 암반공동에서의 누출 리스크 발생 빈도와 누출에 따른 피해에 대한 정보가 거의 알려진 것이 없다는 점에 대부분 기인한다. 누출에 대한 리스크는 공학적 설비와 암반으로 구분하여 확인할 수 있다. 누출의 규모는 파이프나 지하공동에 형성된 아주 작은 구멍으로부터의 누출로부터 파이프의 파손, 극단적인 경우는 지하공동의 붕괴로부터 발생하는 누출까지를 고려할 수 있다.

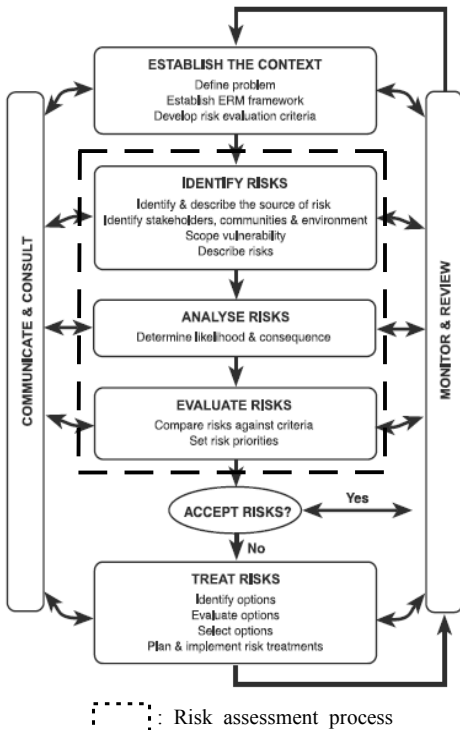


Fig. 2. Risk management process (After EMA, 2003)

본 연구에서는 상기의 내용을 바탕으로 대분류 항목으로 기획·설계단계, 시공단계, 운영·유지관리단계의 3단계로 구분하였다. 대분류에 속하는 중분류 항목은 기획·설계단계에 3개, 시공단계에 2개, 운영·유지관리단계에 3개로 총 8개 항목을 고려하였다. 소분류 항목에 속하는 구체적인 리스크 요인은 총 24개를 도출하였다. 리스크 분류체계가 Table 1에 표시되어 있다. Table 1에서 ‘정책적 리스크’에 속하는 ‘관련 업계의 압력’ 리스크는 신재생에너지 확대 및 대규모 에너지 저장기술 개발을 위하여 국가가 정책적 판단으로 CAES 가스 터빈 발전을 기획하는 경우 경제성 등의 이유로 CAES 지하 저장 공동 개발을 반대하는 경우를 상정한 것이다.

Table 1에 표시된 리스크 중에는 취약성 정도에 따라 리스크가 아니고 위협요소로 볼 수 있는 것들도 있다.

예를 들면 시설 리스크에 속하는 ‘압축공기 내 윤활유 혼입에 따른 저장 공동 폭발’을 들 수 있다. 공기를 고압으로 압축하는 경우 산소의 분압이 높아져 대기압보다 지연성이 증가하기 때문에 윤활유를 사용하는 일반적인 공기압축기에서는 윤활유가 에어탱크(Air receiver tank)나 파이프에 축적되면 과열에 의해 자연발화되어 폭발이 발생할 수 있다(Naver, 2013). 이런 경우 취약성이 높은 경우가 되어 ‘압축공기 내 윤활유 혼입에 따른 저장 공동 폭발’이 리스크가 될 수 있지만 만일 윤활유를 사용하지 않는 무급유식 공기압축기를 사용하는 경우 취약성이 낮아져 ‘압축공기 내 윤활유 혼입에 따른 저장 공동 폭발’은 리스크가 아니고 단순한 위협요인이 된다. 본 연구에서는 일반적인 공기압축기를 사용하는 것으로 가정하여 ‘압축공기 내 윤활유 혼입에 따른 저장 공동 폭발’을 리스크로 고려하였다.

Table 1. Risk category related to development of CAES underground storage cavern

대분류	중분류	소분류
기획·설계단계	정책적 리스크	관계 정부 부처의 CAES 발전에 대한 이해 부족
		관련 업계의 압력
	환경적 리스크	적합한 부지 확보의 어려움
		민원 발생
	설계 리스크	지반조사 불량으로 인한 설계 오류
		부적합한 설계기준
부적합한 재료 선정		
시공단계	작업 안정성 리스크	설계와 현장 조건 불일치
		굴착작업 중 낙반, 발파사고 등 발생
	품질·안전 관련 리스크	작업자 미숙련
		관리 감독 소홀
		공기 부족에 따른 무리한 공사 진행
		압축공기 저장용 내조시스템의 기밀성 확보 실패
운영·유지 관리단계	기술적 리스크	공기 누설을 감지하는 모니터링 시스템 오류
		공기압축기 오작동에 따른 공기 압력 과잉 상승
		관리 직원의 장비 오작동
		압축공기 저장용 내조시스템에 작용하는 하중을 측정하기 위한 계측기 오작동
	시설 리스크	관리 공동 내 천반 낙반
		관리 공동 내 화재 발생
		내조시스템 파손에 따른 관리 공동 내 고압 압축 공기 방출
		압축공기 내 윤활유 혼입에 따른 저장 공동 폭발
		파이프류에서의 압축 공기 누설
	자연재해 리스크	지진으로 인한 저장 공동 파손
폭우로 인한 인입경도 침수		

4. 결과 및 분석

Table 1에 제시된 리스크 분류체계를 바탕으로 설문 을 작성하였다. 관련 분야에서 10년 이상의 경험을 가지고 있는 산·학·연 전문가 20인에게 설문지 조사를 의뢰하여 설문지를 100% 회수하였다. 설문지 분석을 위해 AHP 기법을 적용하였다. AHP 기법은 계층분석 방법 또는 분석적 계층화 과정을 말하며, 의사결정의 계층구조를 구성하고 있는 요소간의 쌍대비교를 통해 평가자의 지식, 경험 및 직관을 평가하는 다목적 의사 결정 기법이다. AHP 기법은 복잡한 상황을 구조화하여 비교적 쉽게 조사 및 분석을 가능하게 하고 정량적·정성적 및 주관적·객관적 요소를 통합함으로써 결과의 타당성 및 객관성을 제고할 수 있다는 장점이 있다. 단 점으로는 전문가 선정에 유의할 필요가 있으며 자료변 환 시 무관한 가치치 선정으로 자료와의 관련성이 취약 해질 수 있다는 점이다(Harker, 1989, Seo, 2013). 설문 지 자료에 대한 분석은 AHP 기법을 활용할 수 있는 Super Decisions(V. 2.2.3) 프로그램을 활용하였다(Creative Decisions Foundation, 2013). 분석과정에서 일관성지 수(Consistency index)가 0.1 이상인 설문 자료는 제외 하고 분석을 실시하였다. 일관성지수는 평가자의 대답 에 일관성이 있는가를 판단하는 지표를 말한다.

대분류 항목에 대한 분석 결과가 Table 2에 표시되어 있다. 표에서 보는 바와 같이 ‘운영·유지관리단계’, ‘기획·설계단계’, ‘시공단계’의 우선순위(Priority)는 각기 0.3751, 0.361, 0.2639로 나타나 ‘운영·유지관리 단계’의 리스크가 가장 큰 것으로 분석되었다. ‘시공단계’의 리스크가 가장 낮은 것으로 평가된 것은 지금까지 국내에서 지하공동 설계 및 시공사례가 많아 CAES 지하 저장 공동 건설 기술도 충분히 확보된 것으로 전문가들이 평가한 것으로 판단된다.

중분류 리스크 요인들에 대한 분석 결과가 Table 3에 표시되어 있다. 리스크가 가장 큰 3개의 중분류 리스크 요인들을 순서대로 나열하면 ‘품질·안전 관련 리스크’, ‘시설 리스크’, ‘설계 리스크’로 우선순위가 각기 0.2211, 0.1672, 0.1368 로 나타났다. 중분류 리스크 요인들의 우선순위를 바탕으로 대분류 요인들에 대한 우선순위를 역으로 평가하는 경우 ‘기획·설계단계’, ‘시공단계’, ‘운영·유지관리단계’의 우선순위 평균이 각 기 0.1111, 0.1667, 0.1111로 나타나 ‘시공단계’ 리스크 요인이 가장 큰 것으로 나타났다. 상기 결과는 Table 2에서 대분류만으로 평가한 경우 ‘시공단계’ 리스크가 가장 낮은 것으로 나타난 결과와 배치되는데 이는 대분 류 리스크 요인 간 쌍대비교에서 전문가들이 각 대분류

Table 2. Priority and ranking for components of large category

대분류	우선순위	순위
기획·설계단계	0.361	2
시공단계	0.2639	3
운영·유지관리단계	0.3751	1

Table 3. Priority and ranking for components of medium category

중분류	우선순위	순위
정책적 리스크	0.1014	6
환경적 리스크	0.0951	7
설계 리스크	0.1368	3
작업 안정성 리스크	0.1122	5
품질·안전 관련 리스크	0.2211	1
기술적 리스크	0.1333	4
시설 리스크	0.1672	2
자연재해 리스크	0.0329	8

항목에 속하는 중분류 리스크 요인들을 고려하지 않았 기 때문인 것으로 생각된다.

Table 4에는 소분류에 속하는 리스크 요인들에 대한 해석 결과가 표시되어 있다. 24개의 리스크 요인들 중 상대적 중요도가 큰 리스크 4개를 열거하면 ‘압축공기 저장용 내조시스템의 기밀성 확보 실패’, ‘설계와 현장 조건 불일치’, ‘관계 정부 부처의 CAES 발전에 대한 이해 부족’, ‘민원 발생’이며 각각의 우선순위는 0.1109, 0.0852, 0.0787, 0.0656로 나타났다. 상대적 중요도가 높은 리스크 중에서도 ‘압축공기 저장용 내조시스템의 기밀성 확보 실패’ 리스크는 다른 리스크 요인들에 비해 우선순위가 아주 높은 것으로 나타난다. 지하 암반 공동 내에 고압의 압축공기를 그대로 저장하는 경우 암 반 벽면을 통해 공기가 누출되기 때문에 이를 방지하기 위하여 저장 공동 내에 여러 조각의 철재를 용접하여 내조시스템을 설치한 후 내조시스템 내에 압축공기를 저장하게 된다. 내조시스템의 기밀성을 확보하기 위해서는 용접부위에 누출 틈새가 없어야 되고 5 MPa 이상의 압력에도 견딜 수 있어야 한다. 또한 플러그나 압축 공기 주입 및 배출 파이프가 통과하는 곳을 통해서도 압축공기가 누출될 수 있기 때문에 이 부분에 대한 기밀성 확보도 중요하다. 상용화 CAES 지하 저장 공동은 상당한 크기가 될 것으로 예상되기 때문에 상기 사항들 을 고려한 기밀성 확보 대책이 필요할 것으로 판단된다.

Table 4. Priority and ranking for components of small category

소분류	우선순위	순서
관계 정부 부처의 CAES 발전에 대한 이해 부족	0.0787	3
관련 업계의 압력	0.0227	22
적합한 부지 확보의 어려움	0.0295	15
민원 발생	0.0656	4
지반조사 불량으로 인한 설계 오류	0.0574	6
부적합한 설계기준	0.0385	10
부적합한 재료 선정	0.0409	9
설계와 현장 조건 불일치	0.0852	2
굴착작업 중 낙반, 발파사고 등 발생	0.027	16
작업자 미숙련	0.0263	17
관리 감독 소홀	0.0375	12
공기 부족에 따른 무리한 공사 진행	0.0463	7
압축공기 저장용 내조시스템의 기밀성 확보 실패	0.1109	1
공기 누설을 감지하는 모니터링 시스템 오류	0.0409	8
공기압축기 오작동에 따른 공기 압력 과잉 상승	0.0383	11
관리 직원의 장비 오작동	0.024	20
압축공기 저장용 내조시스템에 작용하는 하중을 측정하기 위한 계측기 오작동	0.03	14
관리 공동 내 천반 낙반	0.0256	19
관리 공동 내 화재 발생	0.0232	21
내조시스템 파손에 따른 관리 공동 내 고압 압축 공기 방출	0.0607	5
압축공기 내 윤활유 혼입에 따른 저장 공동 폭발	0.0314	13
파이프류에서의 압축 공기 누설	0.0262	18
지진으로 인한 저장 공동 파손	0.0174	23
폭우로 인한 인입경도 침수	0.0155	24

5. 결론

본 연구에서는 5 MPa 이상의 고압의 압축공기를 저장할 수 있는 지하 암반 내 저장 공동을 개발하는 경우 발생할 수 있는 리스크 요인들을 선정하였다. 리스크 요인들을 선정하기 위하여 문헌조사와 CAES 지하 저장 공동의 특성을 고려하였다. 리스크 요인들을 범주화하여 대분류 리스크, 중분류 리스크, 소분류 리스크로 구분하였다. 대분류 리스크로는 ‘기획·설계단계’, ‘시공단계’, ‘운영·유지관리단계’의 3개를 고려하였으며, 중분류 리스크 요인은 8개를, 소분류 리스크 요인들은 24개를 선정하였다. 각 리스크 간 상대적 중요도를 평가하기 위하여 AHP 기법을 적용하였다.

AHP 분석을 실시한 결과 대분류에서 가장 큰 리스크 요인으로 평가된 것은 ‘운영·유지관리단계’로 나타났다. 중분류에서 가장 큰 리스크는 ‘품질·안전 관련 리스크’로 나타났고, 소분류에서는 ‘압축공기 저장용 내조시스템의 기밀성 확보 실패’가 가장 큰 리스크로 분석되었다.

본 연구에서 선정된 리스크 요인의 중요도는 프로젝트의 규모와 특성 등에 따라 조금씩 달라질 수도 있겠으나 넓은 범위로 리스크 요인을 도출하였기에 리스크 관리 시 크게 문제가 없을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2012 한국지질자원연구원에서 수행한 자체사업의 위탁연구 결과입니다. 지원에 감사를 드립니다.

References

1. Bauer, S.J., 2008, Underground aspects of underground compressed air energy storage(CAES), Compressed Air Energy Storage(CAES) scoping workshop, 2008. 10. 21-22, Columbia University, pp. 224-246.
2. Creative Decisions Foundation, 2013, www.superdecisions.com.
3. EMA, 2003, Critical infrastructure emergency risk management and assurance, EMA, 29p.
4. Engemann, K.J. and D.M. Henderson, 2012, Business

- continuity and risk management, Rothstein Associates Inc., pp. 33-58.
5. Fthenakis, V., 2008, Enabling large scales of PV and wind, Compressed Air Energy Storage(CAES) scoping workshop, 2008. 10. 21-22, Columbia University, pp. 38-58.
 6. Harker, P.T., 1989, The Analytic Hierarchy Process : Applications and Studies, Springer-Verlag, pp. 3-36.
 7. Ko, T.Y., 2012, New concept of underground space utilization: Compressed Air Energy Storage, Architecture 56(2), pp. 87-90.
 8. Marchese, D., 2008, Norton energy storage: CAES resiliency in uncertain markets, Compressed Air Energy Storage(CAES) scoping workshop, 2008. 10. 21-22, Columbia University, pp. 151-165.
 9. Naver, 2013.08.17, www.naver.com.
 10. Seo, J.W., J.H. Yoon, J.H. Kim and S.H. Jee, 2010, Development of risk analysis structure for large-scale underground construction in urban areas, J. of KGS 26(3), pp. 59-68.
 11. 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.
 12. Succar, S., 2011, Compressed air energy storage, Large energy storage systems handbooks(edited by Barnes, F.S. and Levine, J.G.), CRC Press, pp. 111-152.
 13. Ter-Gazarian, A.G., 2011, Energy storage for power systems(2nd Edition), The Institution of Engineering and Technology, pp. 31-34.
 14. Wikipedia, 2013.08.17, ko.wikipedia.or.
 15. Yoon, Y.K., 2011, 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 management for CAES underground storage cavern, Proceeding of 2013 KSRM Spring Annual Conference, pp. 89-93.
 17. You, Y.I., M.K. Kim and J.J. Song, 2008, Methodology to quantify rock behavior in shallow rock tunnels by analytic hierarchy process and rock engineering systems, J. of KSRM 18(6), pp. 465-479.

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 들



2011년 세명대학교 소방방재학과 소방학사
 2013년 세명대학교 대학원 소방방재공학과 공학석사

Tel: 010-3945-1616
 E-mail: cdwssm@naver.com

최 병 희



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

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