

연구논문

지중 저장 이산화탄소의 누출 위험도 평가를 위한 결함수 분석

이상일 · 이상기 · 황진환

동국대학교 사회환경시스템공학과

(2009년 09월 29일 접수, 2009년 12월 24일 승인)

Fault Tree Analysis for Risk Assessment of CO₂ Leakage from Geologic Storage

Lee, Sang Il · Lee, Sang Ki · Hwang, Jin Hwan

Department of Civil and Environmental Engineering, Dongguk University

(Manuscript received 29 September 2009; accepted 24 December 2009)

Abstract

CCS (Carbon Capture and Storage) is considered as the most promising interim solution to deal with the greenhouse gas such as CO₂ responsible for global warming. Even though carefully chosen geologic formations are known to contain stored gas for a long time period, there are potential risks of leakage. Up to now, applicable risk assessment procedures for the leakage of CO₂ are not available. This study presents a basis for risk analysis applicable to a complex geologic storage system. It starts with the classification of potential leakage pathways. Receptors and the leakage effect on them are identified and quantified. Then, a fault tree is constructed, which yields the minimum cut set (i.e., the most vulnerable leakage pathway) and quantifies the probability of the leakage risk through the cut set. The methodology will provide a tool for risk assessment in a CCS project. The outcomes of the assessment will not only ensure the safety of the CCS system but also offer a reliable and efficient monitoring plan.

Keywords : CCS (Carbon Capture and Storage), CO₂, Leakage, Risk assessment, FTA (Fault tree analysis)

I. 서론

대기 중 이산화탄소의 증가로 인한 지구온난화 방지를 위해 북미·유럽 등지에서 탄소 지중저장(Carbon capture and storage; 이하 CCS)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. CCS는 발전소 및 공장에서 배출되는 이산화탄소를 모아서 지하 깊은 곳에 매설하는 방법으로, 이산화탄소의 대기 중 배출량을 줄이는데 가장 효과적인 방법으로 평가된다(IPCC, 2005). 하지만, 아무리 신중한 부지선정과 적절한 조치가 취해진다 해도 여전히 이산화탄소 누출에 대한 위험은 잠재하고 있다. 이에 선진국에서는 누출 위험도 평가와 모니터링 계획 수립에 대한 체계적 연구가 시작되고 있다. 지중 저장된 이산화탄소가 누출될 확률은 천년 기간 기준으로 34% 정도이며, 만약 누출된다면 그 양은 저장된 총량의 0.2%가 될 것이라는 보고도 있다(DEFRA, 2004). 이산화탄소 누출로 인한 경제적 손실과 그 환경영향에 대한 관심이 높아지는 만큼 신뢰도 높은 위험도평가 방법이 마련되어야 할 필요성이 크다. 본 연구에서는 이산화탄소 누출 위험도를 평가함에 있어 결함수 분석(FTA; Fault tree analysis)의 이용을 제안한다.

FTA는 1961년에 미사일 발사 제어 시스템을 개발하기 위해 미국에서 개발된 것으로 핵발전소와 같은 복잡한 동적 시스템들의 안전성 및 신뢰성 정보를 확보하기 위한 수단으로 사용되어 왔다. FTA가 소개된 이후 현재까지 결함수(FT) 구축 방법(Lapp and Powers, 1977; Dubois and Prade, 1980; Ahn and Jo, 2009) 및 몬테카를로 시뮬레이션과의 결합을 이용한 정량화 방법(Durga *et al.*, 2009) 등에 대한 많은 연구가 수행되었다. FTA는 이후 철도안전관리체계(구본희 외, 2008; 윤용기 외, 2008), 가전제품의 안전성 평가(이광원 외, 2002), 전력 공급시스템의 신뢰도 평가(Volkanovski *et al.*, 2009) 및 쓰레기 처리과정에 잠재한 위험도 분석 및 조기 경보 체계 수립에 관한 연구(Dokas *et al.*, 2009) 등 다양한 분야에 적용되고 있다.

이처럼 잠재 위험이 존재하는 거의 모든 시스템에서 활용되고 있고, 그 효용성을 인정받고 있는 FTA를 이산화탄소 누출 위험도 평가에 적용시킴으로써, 지중 저장된 이산화탄소의 누출 위험도 평가의 기초를 마련하는 데에서 본 논문은 실용적·이론적 의의를 갖는다.

II. CO₂ 누출 경로 및 영향

1. 누출 가능 경로

Figure 1은 일반적인 CCS 프로젝트 현장에서 이산화탄소 누출 가능성이 있는 경로를 나타낸 것이다. 이산화탄소가 누출될 잠재 위험을 가진 경로는 주입정을 통하는 경우와 주입정을 통하지 않는 경로들로 나눌 수 있다.

먼저, 주입정을 통해 누출되는 경우는 ① 주입이 진행되는 동안 예기치 못한 사고(기계 고장, 유지관리 소홀, 운영자 부주의 등)로 인해 주입정을 통해 대량의 이산화탄소가 빠르게 누출되는 경우와, 주입이 끝난 후 밀봉이 잘못되거나 부식되어 이를 통해 수직 누출되는 경우로 볼 수 있다.

주입정 이외의 경로를 통한 누출은 ② 덮개암을 우회하여 누출이 일어날 수 있으며, ③ 이미 존재했지만 사전에 탐지 못한 균열을 통해 누출하여 상부 지하수나 지표로 이동하는 경우를 고려할 수 있다. 또한, ④ 주입된 이산화탄소의 압력에 의해 덮개암에 새로운 균열이 생기거나, 지진, 지층운동 및 지화학적 반응으로 덮개암에 새롭게 생성된 균열을 통한 누출도 있을 수 있다.

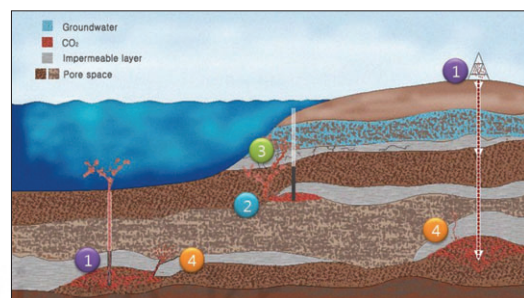


Figure 1. Potential pathways of CO₂ leakage

①의 경우는 시스템 내의 압력변화 모니터링으로 탐지가 비교적 쉬우며, ②~④는 ①에 비해 상대적으로 어려울 것이다.

2. 수용체에 미치는 영향

일단 이산화탄소가 누출되면 그 경로에 따라서 영향을 받는 수용체들이 다르며, 피해 정도나 증상 또한 다를 것이다.

주입정으로부터의 누출은 현장에서 일하는 관리자 및 지상 생태계 그리고 대기 중 이산화탄소 농도에 직접적인 영향을 끼친다. 이산화탄소가 해양으로 누출되면 해양 생태계를 교란시킬 우려가 있다. 누출된 이산화탄소가 대수층을 통과하면서 지하수가 산성화 될 수도 있다. 이산화탄소가 토양 내 미생물에 영향을 미칠 수 있으며, 호기성 미생물과 혐기성 미생물의 개체 수 변화에 영향을 줄 것이다. 이러한 이산화탄소의 누출에 대한 영향은 Table 1에 정리하였다(West *et al.*, 2005). 지중 저장된 이산화탄소가 누출될 경우 H_2S , SO_2 , NO_x 와 같은 불순물도 섞여 나올 수 있는데, Table 1은 이산화탄소만의 영향을 실험을 통해 정리한 것이다. 또, 각 수용체의 상관관계는 고려하지 않았으며 해당 수용체가 받을 수 있는 1차적 영향만을 고려하였다. 예를 들어, 산성화된 지하수를 사람이 마셨을 경우는 고

려하지 않았으며 지하수 자체에 미치는 영향만을 고려하였다.

특히, 사람의 경우 누출된 이산화탄소 농도와 누출 시간에 따라서 두통에서부터 혈압상승, 호흡 곤란, 현기증, 집중력 저하가 올 수 있으며, 대기 중 이산화탄소 농도가 30%를 초과할 경우 사망할 수도 있다. 사람이 고농도의 이산화탄소에 노출될 경우는 주입정을 통한 수직 누출 경우로, 운영 시 각별한 주의가 요구될 것이다.

III. 분석틀 개발

1. FT의 개념

1) FT 작성

위험도를 예측하는 방법은 과거의 재난으로부터 원인을 도출하는 귀납적 방법과 잠재위험을 결정하고 그에 영향을 미칠 만한 사건들을 찾아내는 연역적 방법이 있다. FTA방법은 연역적 위험도 평가 방법으로, FT를 구축하고 기본사상들의 발생 확률을 정량화하여 시스템상의 위험도를 평가하는 기법이다.

FT 구축의 목적은 잠재 위험을 발생시킬 수 있는 상황을 모델링 하는데 있으며, FT는 정상사상(Top Event), 중간사상(Intermediate Event), 기본사

Table 1. Influence to CO_2 exposure (Adapted and Modified from West *et al.*, 2005)

Receptor		Influence
Terrestrial	Human	Headache, blood pressure increasing, shortness of breath, dizziness, loss of consciousness or death
	Vertebrates (rodents)	Evacuation
	Invertebrates (insect)	Behavioral change
	Plants	Inhibition of growth
Subsurface	Soils	Acidification
	Subsurface microbes	Aerobic organism: decrease anaerobic organism: increase
	Aquifer (groundwater)	Acidification
Marine ecosystem	Seawater	Acidification
	Invertebrates (shellfish)	Corrosion of the shell which made up with calcium
	Vertebrates (fish)	Little direct influence (but, can cause disturbances of the food chain)
Atmosphere		Climate change (rising temperature, changes in precipitation and greater frequencies of extreme events)

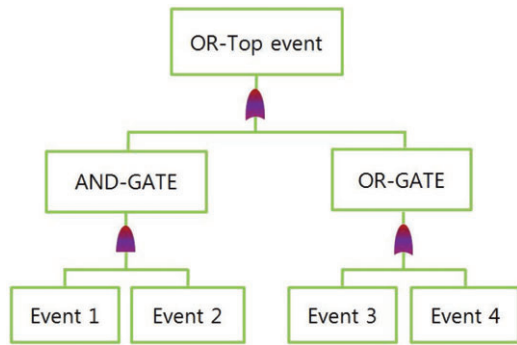


Figure 2. Example of a simple FT

상(Basic Event)으로 구성된다. 정상사상은 시스템의 잠재위험을 뜻하며, 기본사상은 잠재위험을 발생시킬 수 있는 최하위 사건을 뜻한다. 중간사상은 각각의 기본사상들의 논리 게이트로, FT에서는 주로 AND게이트와 OR게이트가 사용된다. Figure 2는 FT의 간단한 예이다.

여기서 AND-Gate는 하위사상들이 동시에 일어날 경우에만 발생하는 결과로 논리곱이라 하고, OR-Gate는 하위사상들 중 한 가지 사건만 발생하더라도 고장이 일어나는 경우로 논리합이라 한다.

2) Minimal cut set

정상사상으로부터 기본사상들까지의 각 경로를 cut set이라 하고(Table 2), 정상사상을 일으킬 주된 경로를 minimal cut set이라 한다. Minimal cut set은 각 사상에 영향을 주는 하위사상들 중 고장 확률이 큰 사상을 향하는 경로이다. 즉, 정상사상에 고장 확률을 부여하는 하위사상들의 고장 확률 중 큰 값을 따라가는 경로가 된다. 따라서, 전체 시스템 관리에서 중점적으로 다뤄져야 할 경로를 뜻한다.

Table 2. Cut sets of the FT in Figure 2

No.	Cut set
1	OR-Top event / AND-GATE 1 / Event 1
2	OR-Top event / AND-GATE 1 / Event 2
3	OR-Top event / OR-GATE 2 / Event 3
4	OR-Top event / OR-GATE 2 / Event 4

3) 고장 확률 산정

상위사상이 일어날 확률은 하위사상들의 고장 확률을 논리식으로 계산하여 얻어진다. Figure 3은 식 (1)과 (2)를 사용해 상위사상의 고장 확률을 계산하는 예이다.

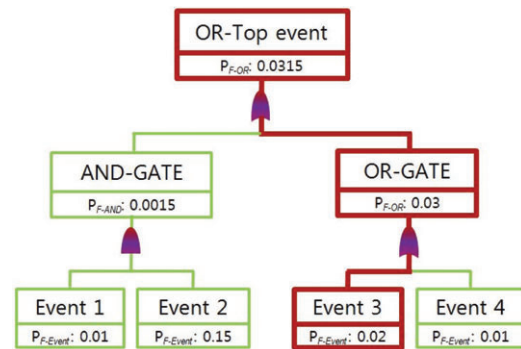


Figure 3. Calculation of failure probability (Bold line: Minimal cut set)

$$P_{F-OR} = \sum P_{F-Events} \quad (1)$$

$$P_{F-AND} = \prod P_{F-Events} \quad (2)$$

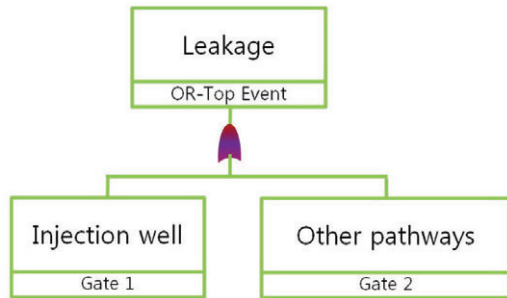
여기서, P_{F-OR} , P_{F-AND} 과 $P_{F-Event}$ 는 각각 OR-GATE, AND-GATE, 기본사상들의 고장 확률을 뜻한다.

Figure 3에서 AND-GATE의 고장 확률은 하위사상들의 고장 확률의 논리곱으로 $0.01 \times 0.15 = 0.0015$ 가 된다. 또한 OR-GATE의 고장 확률은 하위사상들의 고장 확률의 논리합으로 $0.02 + 0.01 = 0.03$ 이 된다. 마찬가지로 OR-Top event의 고장 확률은 AND-GATE와 OR-GATE의 고장 확률의 논리합으로 $0.0015 + 0.03 = 0.0315$ 가 된다.

2. FT 구축

1) 정상사상

FT 구축에 있어서 첫 번째 단계는 분석의 주체가 될 대상을 정의하는 것이다. 본 논문에서는 지중 저장된 이산화탄소가 저장층을 벗어나 지표 또는 해저로 누출되는 경우를 정상사상으로 정의한다. 정상사상이 정의되면 정상사상에 영향을 미치는 모든 하위사상을 검토해야 한다. 2.1절의 잠재 누출 경로를 바


Figure 4. OR-Top event of CO₂ leakage

탕으로 각 경로상의 누출을 일으키는 요인(기본사상)을 연역적으로 분석하여 FT를 구축하게 된다.

Figure 4는 이산화탄소 누출(OR-Top Event)이 주입정을 통해 일어나는 경우(Gate 1)와 그 외의 경우(Gate 2)로 구분한 FT이다. 이 때, 각 중간사상들이 누출에 독립적으로 영향을 미치므로 OR-Gate로 표현할 수 있다. 즉, 지중 저장된 이산화탄소의 누출이 일어날 위험도는 주입정을 통한 누출 위험도와 주입정 이외의 모든 가능한 경로를 통한 누출 위험도의 논리합으로 나타낼 수 있다.

2) 주입정을 통한 누출

이산화탄소 누출이 주입정을 통해 일어나는 경우의 하위사상은, 운영 중 예기치 못한 사고로 인한 누출(Gate 3), 주입정의 밀봉이 부식되어 폐정을 통해 수직 누출되는 경우(Event 1) 또는 설계 및 시공 오류로 인해 주입 중, 정의 파괴로 인한 수직 누출(Event 2)로 볼 수 있다. 이 때, 각 하위사상들은 서로 독립이므로 Gate 1은 OR-Gate가 된다. 이를 FT로 나타내면 Figure 5와 같다.

부적절한 주입압력으로 인해 주입정으로 수직 누출되는 경우의 하위사상들은 운영자의 실수(OR-Gate 5), 주입 시스템의 Software의 고장(OR-

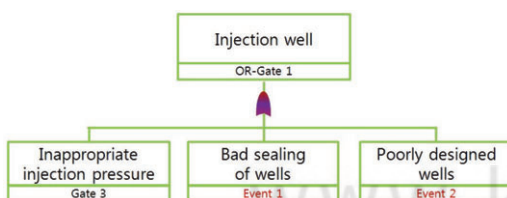


Figure 5. Branch events of OR-Gate 1

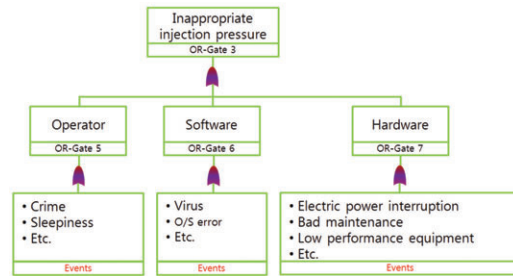


Figure 6. Branch events of OR-Gate 3

Gate 6) 및 주입 시스템의 기계적 고장(OR-Gate 7)의 논리합으로 나타낼 수 있다. OR-Gate 5~7들의 하위사상들은 수없이 많이 정의할 수 있으나, 몇 가지 주요 기본사상들을 Figure 6과 같이 정리할 수 있다.

3) 다른 경로를 통한 누출

이산화탄소가 주입정 이외의 예기치 못한 곳으로 누출되는 경우는 덮개암을 우회하는 경우(Event 3), 덮개암의 균열을 사전에 알지 못했을 경우(Event 4) 그리고 덮개암에 새로운 균열이 생기는 경우(Gate 4)를 들 수 있다. 이 때, 각 하위사상들은 서로 독립이므로 Gate 2는 OR-Gate가 된다. 이를 FT로 나타내면 Figure 7과 같다.

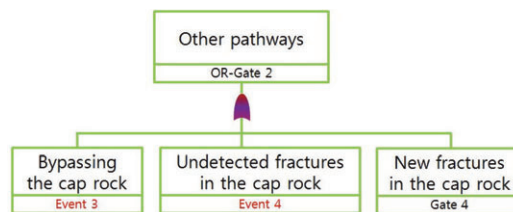


Figure 7. Branch events of OR-Gate 2

덮개암에 균열을 만들 수 있는 원인으로 지진(Event 5), 지각운동으로 인한 단층(Event 6), 주입된 이산화탄소의 압력(Event 7) 및 덮개암과 이

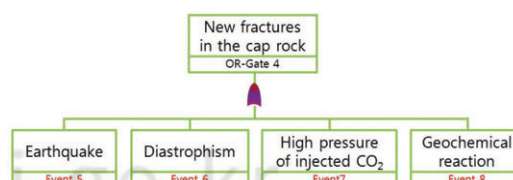
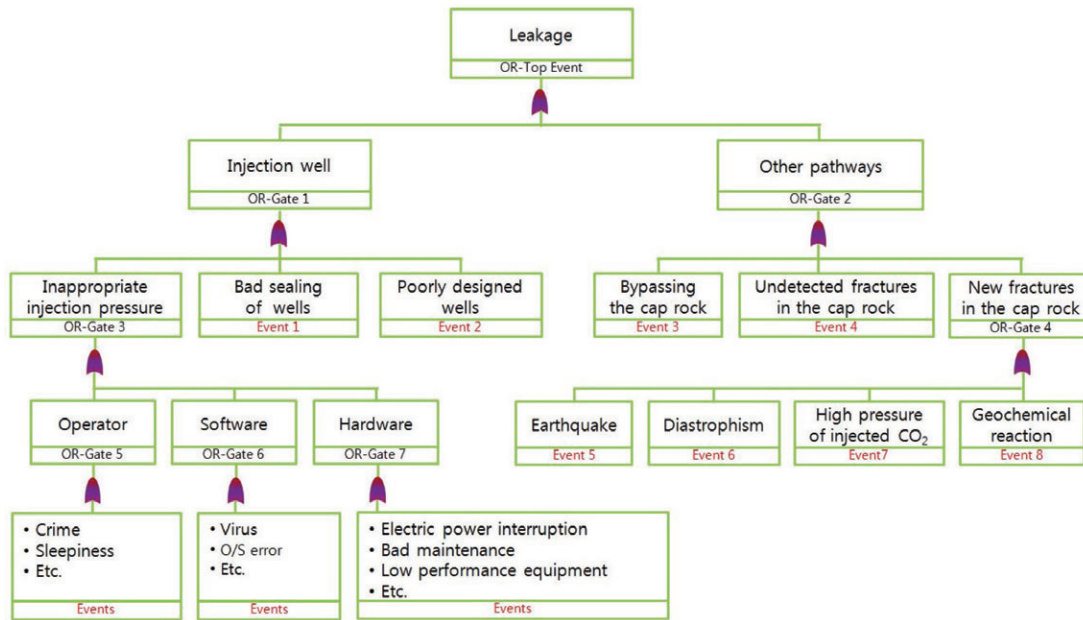


Figure 8. Branch events of OR-Gate 4

Figure 9. The overall FT for CO₂ leakage

산화탄소의 화학적 반응(Event 8)을 들 수 있다. Gate 4의 하위사상들을 독립으로 가정하면, Figure 8과 같은 논리합으로 나타낼 수 있다.

정상사상으로부터 기본사상들까지를 종합해 보면 Figure 9와 같다. 모든 기본사상들의 원인이 되는 하위사상을 생각할 수 있다. 예를 들어, 본 논문에서 기본사상으로 정의한 OR-Gate 7의 하위사상 중 하나인 정전을 정상사상으로 볼 수도 있을 것이다. 또한, 본 논문에서 정의한 Gate는 모두 OR-Gate로, 각 Gate의 하위사상들을 독립으로 가정한 결과이다.

IV. 위험도 산정

3절에서 구축된 FT (Figure 9)의 각 기본사상들에 고장 확률을 부여했으며(Table 3), 식 (1)을 이용해 상위사상들의 고장확률을 계산했다(Figure 10). 이 때, 정상사상인 이산화탄소 누출이 일어날 확률

은 3.92%로 나타났다. 또한, 이산화탄소 누출에 가장 큰 기여를 하는 기본사상(minimal cut set)은 주입 설비의 전기 공급에 문제가 생겼을 경우로, 운영 관리에 있어서 해당 문제점을 집중적으로 관리해야 함을 시사하고 있다.

본 논문에서 부여한 기본사상들의 고장확률은 다소 임의적이기는 하지만 가급적 과학적 근거와 개별 연구에 기초한 것이다(최규식, 1999a; 최규식, 1999b). 이 연구들은 전기 생산을 위한 설비들의 이용불능을 정상사상으로 하며 화력발전소는 0.1049%, 원자력발전소는 0.0045%의 고장확률을 제시했다.

이산화탄소 주입 현장의 정전을 정상사상으로 가정할 경우, “발전소 설비들의 이용불능”, “송전선의 파손” 및 “현장 전기설비 고장” 등 다양한 기본사상을 갖게 될 것이다. 따라서, 본 논문의 기본사상 중 하나인 “정전으로 인한 주입 불능”의 고장확률로 직접 채택하는데 다소 무리가 따른다. 이에 본 논문

Table 3. Probability of fault for basic event (%)

Event	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15
Probability	0.9	0.5	0.1	0.1	0.05	0.05	0.1	0.31	0.1	0.1	0.09	0.09	1.0	0.03	0.4

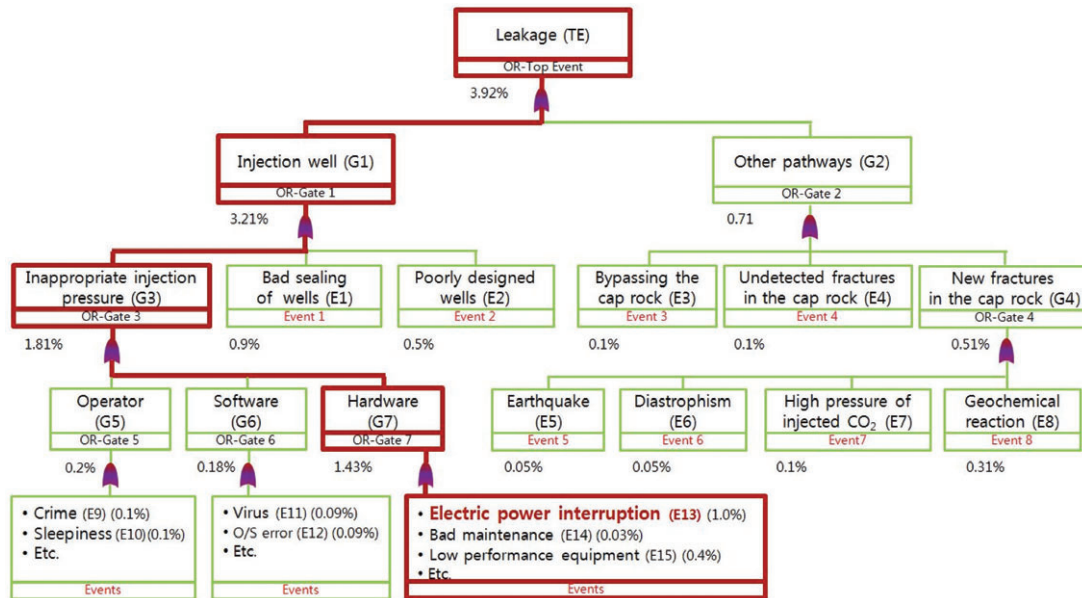


Figure 10. Quantitative analysis and minimal cut set (Bold line: Minimal cut set)

서는 선행연구 결과를 토대로 임의적인 위험도 산정의 예를 제시했다. 향후 신뢰도 높은 고장확률 도출에 많은 노력이 기울여져야 할 것이다.

상들에 고장 확률을 부여하는 과정이 분석의 신뢰성을 높이는데 중요한 관건이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 “CO₂ 해양지중 저장기술 개발” 사업의 지원을 받아서 수행하였습니다.

참고문헌

이산화탄소가 안전하게 지하에 머물러 있도록 철저한 사전 조사와 운영방안이 마련되어 있다 하더라도, 누출 위험에 대한 정성적·정량적 평가가 이루어져야 할 것이다. 하지만, 아직 CCS 프로젝트에서 이산화탄소 누출 위험도를 종합적으로 평가한 사례는 찾아볼 수 없으며 그것을 가능하게 하는 도구도 현재로서는 존재하지 않는다. 이에 본 논문은 이산화탄소 누출 위험도 평가에 FTA를 적용하고, 그 적용 가능성을 검토하였다.

핵발전소를 비롯한 산업 전반에 걸쳐 널리 사용되고 있는 위험도 평가 방법론 중 하나인 FTA가 CCS에도 적용 가능함을 알 수 있었다. 이를 통해 CCS 프로젝트의 안전성과 CCS에 대한 공공의 이해를 높일 수 있을 것으로 기대되며, 취약한 것으로 판명된 누출 경로를 중심으로 신뢰성 있는 모니터링 계획에도 기여할 수 있을 것이다. 다만, 기본사

구본희, 차준민, 김형철, 2008, FTA를 이용한 전기철도 전차선의 신뢰도 분석, 전기학회논문지, 57(11), 1905-1909.

윤용기, 정락교, 김용규, 2008, FTA(Fault Tree Analysis)를 이용한 철도신호설비 안전 기준대상 선정에 관한 연구, 한국철도학회 2008년도 춘계학술대회 논문집, 671-675.

이광원, 이필호, 임현교, 이용희, 강성기, 강인호, 박익철, 윤석범, 2002, FTA기법을 통한 가전제품의 안전성 평가, 한국산업안전학회 '02년 춘계 학술논문발표회 논문집, 381-386.

최규식, 1999a, 최소 컷셋법에 의한 화력발전소 기

- 동전원의 신뢰도 예측에 관한 연구, 전기학회논문지, 48(4), 358-364.
- 최규식, 1999b, FTA 기법에 의한 원전기동전원의 이용율 예측에 관한 연구, 전기학회논문지, 48(5), 517-523.
- Ahn, K. I. and Jo, Y. G., 2009, Treatment of complementary events in constructing the linked level 1 and level 2 fault trees, *Nuclear Engineering and Design*, 239(4), 769-780.
- DEFRA., 2004, Literature review: environmental impacts of a gradual or catastrophic release of CO₂ into the marine environment following carbon dioxide capture and storage, UK.
- Dokas, I. M., Karras, D. A. and Panagiotakopoulos, D. C., 2009, Fault tree analysis and fuzzy expert systems: early warning and emergency response of landfill operations, *Environmental Modelling & Software*, 24(1), 8-25.
- Dubois, D. and Prade, H., 1980, Fuzzy sets and systems; theory and applications, Academic Press, New York.
- Durga Rao, K., Gopika, V., Sanyasi Rao, V. V. S., Kushwaha, H. S., Verma, A. K. and Srividya, A., 2009, Dynamic fault tree analysis using Monte Carlo simulation in probabilistic safety assessment, *Reliability Engineering and system safety*, 94(4), 872-883.
- IPCC, 2005, IPCC special report on carbon dioxide capture and storage, Cambridge University Press, New York.
- Lapp, S. A. and Powers, G. J., 1977, Computer-aided synthesis of fault-trees, *IEEE Trans. Reliability*, R(26), 2-13.
- Volkanovski, A., Cepin, M. and Mavko, B., 2009, Application of the fault tree analysis for assessment of power system reliability, *Reliability Engineering and System Safety*, 94(6), 1116-1127.
- West, J. M., Pearce, J., Bentham, M., and Maul, P., 2005, Issue Profile: Environmental issues and the geological storage of CO₂, *European Environment*, 1(5), 250-259.

최종원고채택 09. 12. 24