

제2강

터널공사 리스크 관리 가이드라인

Guideline for Tunnelling Risk Management



김영근
(주)건화 기술연구소
소장/공학박사/기술사

국제터널협회(ITA)는 터널과 지하공사에서의 리스크를 규명하고 관리하고자 하는 목적으로 Working Group 2를 중심으로 터널공사에서의 리스크 관리에 대한 가이드라인을 2004년에 발표하였다. 이 가이드라인은 리스크 평가에 대한 최신의 실무를 바탕으로 발주처와 컨설턴트에 제공하고자 하였으며, 기본계획에서부터 운영시작까지의 프로젝트 전 과정에 걸쳐 리스크 관리의 단계를 기술하고 있다.

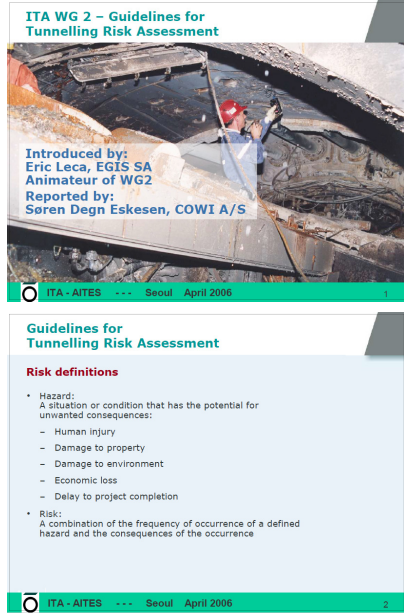
이는 국제터널협회에서 공식적으로 터널공사에 대한 리스크 관리 방안에 대한 지침을 제시하는 것으로 ITA 회원국에 상당한 영향을 주었으며, 이후 각국에서의 터널 및 지하공사에 대한 리스크 관리 기준 및 지침 제정시 참고자료로 활용하게 되었다(그림 1).

제2강에서는 터널공사에서의 리스크 관리의 기본이 되는 ITA의 터널공사 리스크 관리 가이드라인에 대하여 상세하게 검토하고자 하였다.

1. 서론과 범위(Introduction and Scope)

터널과 지하공사는 프로젝트에 관련된 모든 당사자들 뿐만 아니라 직접 참여하지 않은 사람들에게 리스크를 가져오는데, 이는 터널 프로젝트 개발시 발주자(owner)가 상당한 리스크에 직면하게 된다는 것을 의미한다. 지반 및 지하수 조건을 포함한 불확실성(uncertainty)으로 인해 상당한 공사비 초과 및 공기 지연 위험은 물론 환경위험이 있을 수 있다. 또한, 최근 대규모 터널 붕괴에서 보는 바와 같이, 터널공사중에 대규모 사고가 발생할 가능성이 있다. 더욱이 도심지 터널의 경우, 제3자의 재산이 손상될 위험이 있으며, 이는 문화재가 포함된 경우 특히 문제가 될 수 있다. 결과적으로, 터널공사로 인해 주민들에게 영향을 주는 문제들은 심각한 민원을 일으킬 위험이 있다.

전통적으로 리스크는 프로젝트 개발단계에서 내린 엔지니어링 결정을 통해 간접적으로 관리되어 왔다. 본 지침에서는 터널 프로젝트 개발 전반에 걸쳐 체계적인 리스크 관리 기법을 사용함으로써 현재의 리스크 관리 프로세스를 크게 개선할 수 있음



〈그림 1〉 Guideline for Tunneling Risk Management (ITA WG2, 2004)

을 고려하였다. 이러한 기법을 사용함으로써 적절한 리스크 완화조치가 적시에 실행될 수 있도록 잠재적 문제를 명확하게 인식할 수 있다. 선형 선정과 시공 방법 선택과 같은 주요 의사결정에 영향을 미칠 수 있는 프로젝트 초기 단계부터 리스크 관리를 활용하는 것이 필수적이다.

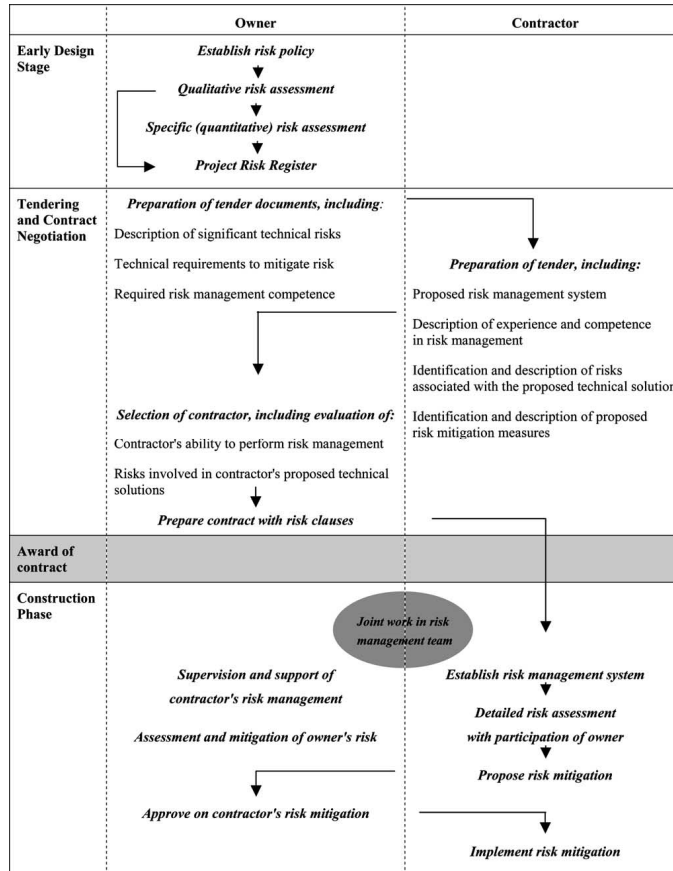
이 문서의 목적은 리스크 관리에 대한 권장할 만한 모범사례가 무엇인지 발주자에게 제시하고, 종합적인 터널 리스크 관리 시스템의 준비 및 실행에 관한 지침을 설계자에게 제공하고자 하는 것이다.

2. 리스크 관리의 사용 (Use of Risk Management)

본 지침에서는 터널과 지하공사에 사용될 수 있는 리스크 관리 활동의 설명을 제공한다. 초기 계획단계부터 운영 시작까지 프로젝트 전반에 걸쳐 리스크 관리를 사용하는 방법은 다음과 같다.

- 1단계: 초기 설계단계(타당성 조사 및 개념 설계)
 - 리스크 정책 수립(4.1절)
 - 리스크 허용 기준(4.2절)
 - 프로젝트의 정성적 리스크 평가(4.3절)
 - 특정 관심분야의 상세 분석(4.4절)
- 2단계: 입찰 및 계약 협상 단계
 - 입찰서류에서의 요구 사항(5.1절)
 - 입찰평가시 리스크 평가(5.2절)
 - 계약상의 리스크 조항(5.3절)
- 3단계: 시공 단계
 - 시공자의 리스크 관리(6.1절)
 - 발주자의 리스크 관리(6.2절)
 - 발주자 및 시공자 사이의 공동 리스크 관리팀

1단계에서는 리스크 정책을 수립하고 리스크 평가를 수행할 책임이 발주자에게만 있다. 2단계에서는 잠재적 시공자는 리스크 관리와 관련하여 입찰에 일정부분 관여 되지만, 발주자는 여전히 주된 책임자이다. 그러나 3단계에서는 일차적인 책임은 리



〈그림 2〉 발주자와 시공자의 리스크 관리 활동

스크 관리시스템을 구축하고 효과적인 리스크 관리를 수행하도록 시공자에게 넘어간다. 발주자는 이 일을 감독하고, 검사하며, 참여해야 하며, 시공자가 다루지 않는 리스크를 계속 평가하고 완화해야 한다.

리스크 관리는 당사자들 간의 원활한 협력 환경에서 수행하는 것이 중요하다. 이를 달성하기 위해 협력(partnering)이 유용한 도구가 될 수 있다. 협력의 과정은 당사자들 간의 원활한 의사소통을 촉진하기 위한 실천으로부터 만들어질 수 있다. 그것은 시공자의 이익을 최대화하는 동시에 발주자에 대한 비용을 최소화하는 공식일 수 있으며, 공동 계획과 문제 해결, 공기, 지연 대책과 가치 엔지니어링을 포함한다. 따라서 협력의 과정은 발주자와 시공자를 위한 리스크 완화 대책으로 볼 수 있다. 발주

자 관점에서 본 리스크 관리 활동의 개요는 그림 2에 제시되어 있다.

3. 리스크 관리 목표 (Objectives of Risk Management)

설계와 시공에 따른 리스크 확인은 프로젝트 초기에 반드시 필요한 작업이다. 모든 관련 당사자들(예: 발주자, 설계자, 보험자 및 시공자)에 대한 공통의 참조를 형성하기 위하여 발주자가 건설 리스크 정책을 수립해야 한다. 프로젝트의 건설 리스크 정책은 다음을 나타낼 수 있다.

3.1 범위(Scope)

범위는 다음과 같은 리스크를 포함할 수 있다.

1. 부상과 인명 손실을 포함한 작업자의 건강과 안전에 대한 리스크
2. 제3자의 건강과 안전에 대한 리스크
3. 제3자 재산, 특히 기존 건물과 구조물, 문화재 및 지상/지하 구조물의 리스크
4. 토지, 수질 또는 공기오염, 식물 및 동물에 대한 손상 등 환경에 대한 리스크
5. 준공 연장에 대한 발주자의 리스크
6. 재무 손실 및 계획되지 않은 추가 비용 측면에서 발주자의 리스크

3.2 리스크 목표(Risk Objectives)

리스크 목표는 각 리스크 유형에 대한 특정목표에 의해 보완되는 일반적인 목표로 제공될 수 있다. 건설 리스크 정책의 일반적인 목표는 다음을 통해 프로젝트의 모든 단계에서 적절한 리스크 관리가 보장되도록 한다.

- 리스크 식별
- 리스크를 제거하거나 완화할 수 있는 조치의 식별
- 특정 위험 목표 또는 보건 및 안전 법률에 따라 경제적으로 실현 가능하거나 요구되는 리스크를 제거하거나 완화하기 위한 조치의 이행

경제적 실현가능성은 ALARP(As low as reasonably practical) 원칙을 사용하여 정의될 수 있다. 즉, 합리적으로 실현 가능한 낮은 수준으로 포함되는 모든 위험을 감소시킬 수 있다. 건설 리스크 정책은, 예를 들어 몇 명의 사망자나 중대한 정치적 우려와 같은 큰 결과를 초래하는 사건의 발생 가능성을 감소시킴으로써 전체적인 리스크를 최소화하는 데 중점을 두어야 한다. 이는 발주자가 효과는 크지만 발생가능성이 낮은 사건을 발생가능

성은 높지만 효과가 낮은 사건보다 더 큰 관심을 가져야 함을 의미한다. 건설 리스크 정책은 당사자 간의 리스크 분담에 대한 몇 가지 일반적인 내용을 포함할 수 있다. 예를 들어 리스크를 통제할 수 있는 최선의 방법을 가진 당사자에게 리스크를 배분해야 한다.

3.3 리스크 관리 전략(Risk Management Strategy)

건설 리스크 정책의 일환으로 리스크 관리 전략을 채택해야 한다. 권장 전략은 이용 가능한 정보와 각 단계에서 취하거나 변경해야 할 결정에 따라 설계 및 시공 각 단계에서 시공 리스크 평가를 수행하는 것이다. 모든 리스크 관리전략에는 다음이 포함되어야 한다.

- 관련된 다양한 당사자의 리스크 관리 책임의 정의
- 목표 달성을 위해 프로젝트의 여러 단계에서 수행해야 할 활동에 대한 간략한 설명
- 리스크 관리 활동을 통해 얻은 후속 결과에 대한 계획
- 운영 단계에 관한 초기 가정에 대한 후속 조치
- 모니터링, 감사 및 검토 절차

4. 초기 설계 단계에서의 리스크 관리 (Risk Management in Early Design Stages)

터널 및 지하공사 프로젝트의 효과적인 리스크 관리를 위해서는 가능한 빨리 프로젝트 타당성 및 초기 계획 단계 중에 리스크 관리를 시작하는 것이 중요하다.

발주자의 리스크 정책은 실천 목표를 설정하고 프로젝트 팀의 구성원은 공사를 수행할 때 전체 리스크 관리 프로세스를 명심해야 한다. 효과적인 리스크 관리 실행의 성공은 확인된 리스크 완화 조치의 품질과 참가자(발주자, 설계자 및 시공자)의 능동적 관여, 경험 및 일반적인 의견에 따라 다르다는 점에 유의해야 한다. 리스크 관리는 시스템과 절차의 강제 시행만으로 달성되는 것이 아니라, 리스크 관리 목표의 이해와 적용을 조직 전체에 퍼지게 하는 세미나 및 회의를 통해 강화될 수 있다.

4.1 리스크 정책 확립(Establish Risk Policy)

리스크 관리 시스템을 확립하는데 있어 주된 단계는 발주자가 리스크 정책을 공식화하는 것이다.

4.2 리스크 허용기준(Risk Acceptance Criteria)

발주자의 리스크 정책에서 리스크 목표는 수행할 리스크 평가 활동에 적합한 리스크 허용기준으로 변환되어야 한다. 여기에는 다음이 포함될 수 있다.

- 정성적 리스크 평가에 사용되는 리스크 허용기준
- 정량적 리스크 평가에 사용되는 리스크 허용기준

발주자의 리스크 정책의 리스크 목표에 대한 설명과 관련하여 리스크 허용기준이 어떻게 설정되었는지 설명하는 문서가 제공되어야 한다.

4.3 정성적 리스크 관리 (Qualitative Risk Assessment)

초기 설계 단계에서, 정성적 리스크 평가는 프로젝트에 포함될 것으로 예상되는 공사 활동에 대한 잠재적 위험의 식별에 초점을 맞추어야 하고, 시공 리스크 정책에서 확인된 모든 유형의 리스크를 다루어야 한다. 이 작업의 주요 목적은 시공과 관련된 주요 위험에 대한 모든 관련자의 인식을 높이고 초기 설계 단계에서 취해야 할 설계 결정에 대한 구조화된 기반을 제공하는 것이다. 결과적으로 이 작업은 입찰시 리스크 관리의 출발점으로 사용될 수 있다.

정성적 리스크 평가의 타이밍은 주요 설계변경이 여전히 가능한 것이어야 한다. 초기 설계의 일정에 따라, 설계 단계 이후에 처음의 정성적 리스크 평가를 업데이트하는 것이 가능할 수 있다. 정성적 리스크 평가는 다음을 포함해야 한다.

- 위험 식별, 7.2절 참조.
- 확인된 위험의 분류, 7.3절 참조

- 리스크 완화 조치의 식별
- 프로젝트 리스크 등록부에서 리스크의 세부사항

리스크 식별 및 분류는 기술적으로나 실무적으로 경험이 풍부한 전문가로 구성된 리스크 선별팀을 대상으로 숙련된 리스크 분석가가 지도하는 브레인 스토밍 회의를 통해 가장 잘 수행된다. 목적은 프로젝트를 위협하는 모든 가능한 위험한 경우를 식별하는 것이어야 하며, 빈도가 낮지만 우수한 결과를 가져오는 경우가 포함된다.

리스크 식별 및 분류 과정에서 다음과 같은 위해성의 경우에 대한 일반적인 원인을 충분히 고려해야 한다.

- 적용된 기술의 복잡성과 성숙도
- 예기치 못한 불리한 지반과 지하수 상태
- 기술 또는 경영상의 무능
- 인적 요인 또는 인적 오류
- 내부 및 외부 인터페이스 간의 충분한 소통 및 조정 부족
- 개별적으로 중요하지 않은 몇 가지 원하지 않는 경우의 조합

확인된 위험은 리스크의 크기에 따라 분류된다. 이 분류의 목적은 리스크 완화 조치의 실행에 대한 의사결정의 프레임워크를 제공하는 것이다. 분류시스템은 빈도 및 결과에 기초한 리스크 분류뿐만 아니라 빈도 및 결과를 구분하도록 해야 한다. 분류시스템은 리스크 허용기준에 포함될 수 있다(4.2절 참조). 리스크 완화조치의 식별은 동일하거나 다른 팀에 의해 수행될 수 있으며, 이 팀은 우선적으로 프로젝트의 모든 주요 당사자를 대표해야 한다.

리스크 수준이 프로젝트 리스크 허용기준과 상충되는 경우, 의무적으로 리스크 저감조치를 확인하고, 실행하여야 하는 행동 조치에 대한 관리 결정에 관한 문서를 제공해야 한다. 그 결과는 프로젝트 리스크 등록부에 등록되어야 한다.

프로젝트의 이러한 단계에서 리스크 완화는 주로 기술 솔루션 및 대안작업 절차의 변경을 가져올 것이다. 이 시점에서, 일련의 리스크 저감조치 실행이 실제로 리스크를 허용가능한 수준

으로 줄일 수 있는지 여부를 확립할 수 있어야 한다. 이러한 경우가 아니라면 다른 접근방식을 검토해야 한다.

4.4 특정 리스크 평가(Specific Risk Assessment)

특정 리스크에 대하여, 즉 관련된 리스크의 심각성이나 취해 질 설계 결정의 중요성으로 인해, 일반적인 정성적 분석보다 더 상세한 리스크 분석을 수행할 수 있다. 또한 이 분석 결과는 프로젝트 리스크 등록부에 기록되어야 한다.

작업은 다음 중 하나 이상으로 구성될 수 있다.

- 위험원인에 대한 결함수 분석법(FTA, Fault Tree Analysis)
- 결과에 대한 이벤트 트리 분석법(ETA, Event Tree Analysis)
- 리스크의 완전 정량화

5. 입찰 및 계약협상 단계에서의 리스크 관리 (RM during tendering and contract negotiation)

5.1 입찰서류 준비단계의 리스크 관리 (Risk Management during tendering)

5.1.1 주요 리스크 관리 활동 (Main risk management activities)

다음의 리스크 관리활동은 입찰서 작성시 수행되어야 한다.

- 리스크가 리스크 정책에 따라 관리되도록 하기 위해 입찰문서에 기술 사양과 기타 요건. 초기 설계다단계에서 수행된 정성적 리스크 평가 결과는 기본의 일부로 사용되어야 한다. 기술 사양과 기타 요건은 리스크 배분을 포함하는 프로젝트에 채택된 일반 원칙에 따라 리스크에 대한 책임을 상세히 기술해야 한다.
- 초기 설계 단계에서 수행한 정성적 리스크 평가는 입찰서류가 최종수정의 근거로서 거의 완료되었을 때 그리고 리스크가 리스크 정책에 따라 관리되었음을 문서화하도록 반복되어야 한다.
- 입찰자의 리스크 관리 능력과 다른 입찰자에 의해 제공된 제

안서에서의 리스크의 차이를 평가하기 위하여 입찰자로 부터 신청 받은 정보의 정의

- 계약 시행 중 시공자의 리스크 관리 활동에 관한 입찰문서에 서의 요구사항 명세

5.1.2 입찰과 함께 제공되어야 할 정보 (Information with tender)

입찰자의 비교와 평가의 근거를 보장하기 위해, 입찰문서는 각 입찰자가 이러한 측면에서 제시해야 하는 정보를 명시해야 한다. 이 정보에는 다음이 포함되어야 한다.

- 유사한 프로젝트와 그 결과에서의 구조화된 리스크 관리에 대한 정보
- 리스크 관리 책임이 있는 사람에 대한 이력서와 전문가 조직의 세부 사항
- 프로젝트 특정조직과 리스크 관리 목표에 관한 입찰자의 의도에 대한 설명
- 프로젝트 입찰자가 인지하는 주요 리스크에 대한 개요 및 설명
- 프로젝트에 대한 주요 리스크 관리를 위한 전략과 성공을 정의하고 측정하는 방법에 대한 입찰자가 제안한 전략

입찰자에 의해 제공된 상기 정보의 일부 또는 전부를 발주자의 입찰 평가기준으로 사용할 것임을 명시해야 한다. 이 정보는 시공자가 필요한 체계적인 리스크 분석과 예상되는 위험 관리 수행을 실행할 수 있는지 여부를 설명하는 데 도움이 될 것이다.

5.1.3 입찰서류에 명시되어야 할 요구사항 (Requirement in the tender document)

입찰서류는 시공자가 발주자의 리스크 정책에 따라 리스크 관리를 수행해야 함을 명시해야 한다. 시공자의 리스크 관리 시스템과 접근방법이 발주자의 것과 양립 가능해야 하며, 따라서 시공자 자신과 발주자 및 공공의 모두에게 리스크를 감소시키고 통제해야 한다. 시공자의 리스크 관리시스템에 관한 요구사항을 기술해야 하며, 여기에는 다음과 같은 것들이 포함될 수 있다.

- 리스크 관리 직원의 조직 및 자격
- 고려하고 평가해야 할 리스크의 유형
- 시공자의 리스크 위험 관리에 포함되어야 할 최소 활동 요건에 대한 설명
- 리스크 관리 활동 일정
- 발주자의 리스크 관리 및 리스크 관리팀과의 조화
- 다른 시공자의 리스크 관리팀과의 조화
- 리스크 관리와 시공자의 다른 시스템, 즉 품질관리 및 환경관리간의 조화
- 전문업체 활동으로 발생하는 리스크의 통제
- 현장의 리스크 관리에 관한 특정 요건 명시

발주자의 리스크 정책, 리스크 허용기준 및 리스크 분류시스템은 입찰문서에 명시되어야 하며, 발주자의 리스크 관리활동은 간략하게 언급되어야 한다. 시공자가 발주자의 리스크 분석결과를 어느 정도까지 파악할 수 있는지를 신중하게 고려하고 지적해야 한다. 더욱이 시공자가 발주자로부터 도출된 리스크 정보의 범위와 세부내용에 관계없이 효과적인 리스크 관리에 대한 책임이 있다는 것을 입찰서류에 명시해야 한다.

입찰서류에는 발주자가 시공중에 리스크 관리에 참여하도록 하고, 리스크 관리팀을 시공자와 발주자의 참여와 함께 구성하도록 하는 것을 요구하는 것이 바람직하다.

5.2 시공자 선정단계에서의 리스크 관리 (RM during selection of contractor)

입찰자가 입찰문서에 명확히 정보를 제공하면, 발주자의 리스크 관리기법의 적용은 성공적인 입찰자를 선정하는데 그 가치가 있을 수 있다. 입찰자의 리스크 이슈의 확인은 입찰 협상의 기초로 사용될 수 있다. 리스크에 관한 입찰자의 평가는 정성적이거나 정량적 기준일 수 있다. 입찰에서의 리스크 이슈는 다음을 포함하여야 한다.

- 기술 솔루션의 실행으로 리스크를 식별하고 통제할 수 있는 시공자의 능력 평가

- 다른 입찰자의 프로젝트 제안서상의 리스크 차이에 대한 체계적인 평가
- 시공자의 조직에서의 리스크 관리 전문지식의 평가

정성적 리스크 평가가 예상되는 경우, 이 요구를 달성할 방법은 입찰 문서작성 중에 고려해야 한다. 확인된 각각의 리스크에 대해, 입찰자들을 비교할 필요가 있고, 차이가 있는 부분은 강조되어야 한다. 정량적 리스크 평가가 예상된 경우, 권장 접근방법은 발주자 프로젝트에 대한 정량적 리스크 평가를 우선 수행하는 것이다. 이것은 이슈발생과 입찰 수령시점 사이에 수행될 수 있다. 입찰에서의 리스크는 입찰자의 정량적 리스크 평가와 각각의 리스크에 대한 빈도 및 결과의 차이를 고려하여 정량화한다. 정량화에 대한 입력은 브레인 스토밍 회의를 통해 얻은 신뢰성 있는 정보로부터 얻을 수 있으며, 브레인 스토밍팀의 경험과 능력은 필수적이다. 최종 결과는 각각의 입찰에 관련된 리스크의 정량화이다. 이는 리스크의 절대값이 불확실하더라도 수준 비교의 이점을 갖는다.

이러한 정량화는 발주자에 대한 경제적 손실 리스크와 프로젝트 완료에 대한 지연 리스크에 특히 유용하다.

5.3 계약에서의 리스크 조항 (Risk clauses in contract)

시공자를 선정할 때, 발주자와 시공자 사이의 협상은 프로젝트에 실행될 리스크 관리 시스템에 대한 상세한 계약적 설명을 가져올 수 있다. 이것은 발주자 의도와 시공자가 제안한 절차와의 조합에 기초할 수 있다. 기술적 해법에 대한 대안은 또한 계약에 따라 수행되고 명시된 리스크 평가에 기초하여 협상될 것이다.

성공적인 입찰의 리스크 평가는 이전에 찾지 못한 리스크 또는 특별한 관심의 영역을 식별했을 수 있다. 이러한 리스크를 허용 가능한 수준으로 줄이기 위해, 계약에 추가 리스크 완화 조항이 도입될 수 있다. 예를 들어, 시공자가 발주자에 예상하는 시공방법의 변경을 제안했을 수 있다.

6. 시공단계에서의 리스크 관리 (Risk management during construction)

초기 설계, 입찰 및 계약 협상단계에서는 계약상 또는 보험을 통해 특정 리스크가 이전될 수 있으며, 다른 리스크는 유지되고 일부 리스크는 제거되거나 완화될 수 있다.

시공단계에서는 리스크의 이전 가능성이 최소화되며, 발주자와 시공자 모두에게 가장 유리한 전략은 리스크 제거 또는 리스크 완화 계획과 실행을 통해 최대한 많은 리스크를 줄이는 것이다.

6.1 시공자의 리스크 관리 (Contractor's risk management)

시공자는 발주자의 리스크 정책을 이행할 책임이 있으며, 세심하게 계획되고 잘 구조화되며 사용하기 쉬운 리스크 관리 시스템을 구축하는 것으로 시작해야 한다. 리스크 관리시스템의 구조는 리스크의 상세한 식별과 리스크 평가의 추가 작업에 있어 매우 중요하다. 시공자는 발주자가 사용하는 시스템과 호환되는 시스템을 사용하여 리스크를 식별하고 리스크를 분류해야 하며, 확인된 리스크를 줄이기 위한 경감 대책을 제안해야 한다. 경감 대책을 시행하면 상당한 지연이 발생하거나 발주자에게 손실을 초래할 수 있는 경우, 발주자는 이의 시행 전에 완화 조치를 승인해야 한다.

시공자의 리스크 관리전략은 직무 수행에 관계없이 모든 직원이 수행해야 한다. 위험의 확인 및 리스크의 통제, 그리고 관련된 기법은 프로젝트의 모든 설계 및 시공 활동의 필수적인 부분으로 간주되어야 한다. 필요한 경우 프로젝트 전체에 걸쳐 모든 직원에게 정보와 교육을 제공해야 한다. 발주자는 시공자의 리스크 관리 회의, 발표 및 훈련 회의에 참여하고, 참석하도록 초대해야 한다.

리스크 완화 조치에는 시기적절한 고려와 조치가 필수적이다. 목표는 효과적인 사전 예방 조치를 예측하고 시행하는 것이다. 위험의 확인, 리스크의 분류, 의사결정 및 리스크 완화 조치를 잘 이해하고, 시공자가 결과를 신속하게 실행할 수 있어야 한다.

시공자는 확인된 위험과 리스크의 세부사항이 포함된 프로젝

트 리스크 등록부를 평가된 리스크 수준으로 지키고 유지하는 것이 바람직하다. 모든 사고, 사건, 위기일발의 상황 및 기타 경험 있는 사건은 모두 열거하고 조사해야 한다. 조사 결과는 유사한 사건발생의 예방과 리스크 관리시스템의 지속적인 개선을 목적으로 하여, 프로젝트 내내 유지되도록 해야 한다.

예측 가능한 사고와 비상사태를 다루기 위해서는 전체 프로젝트 기간 내내 비상대책과 비상계획을 수립하고, 실행하고 유지해야 한다. 여기에는 프로젝트에 대한 모든 당사자들과 공공 비상 서비스와의 협조와 소통이 관계된다. 시공단계 내내 시공자는 리스크를 완화하기 위해 발주자가 제공하는 계획을 이행할 책임 또한 있다.

6.2 발주자의 리스크 관리 (Owner's risk management)

발주자는 시공자가 다루지 않는 리스크에 대해 리스크 평가를 계속 수행할 것을 권장한다. 이것은 발주자가 식별된 기술적 위험을 포함하여 계약상 리스크가 될 수 있다. 주된 관심사는 발주자의 경제적 손실 또는 지연과 관련된 리스크이다. 경감 대책은 발주자가 확인하여 실행해야 하지만, 일부 경감조치는 실행을 위해 시공자에 양도할 수 있다. 여기에 추가적으로 발주자는 시공자의 리스크 관리를 장려하고 감시해야 한다. 발주자가 실시하는 품질관리 감사는 이를 수행하는 한 가지 방법이다.

이러한 활동은 발주자에게 시공자가 확인한 리스크를 유지하도록 허용하고, 발주자가 시공자의 리스크 관리시스템을 적절하게 실행하고 효과적으로 기능할 수 있는지를 확인 가능하게 할 것이다. 발주자 또는 공동 리스크 관리팀은 합의된 리스크 완화 조치에 대한 변동이 있는지 현장에서의 실재를 살펴보는 것이 좋다.

7. 리스크 관리의 구성 요소 (Typical components of risk management)

7.1 위험 식별(Hazard Identification)

식별 과정은 다음에 따라 달라진다.

- (i) 서면제출을 통해 유사한 프로젝트의 운영경험에 대한 검토
- (ii) 수행하는 작업의 유형과 관련된 위험에 대한 일반적인 지침의 연구
- (iii) 프로젝트팀 및 다른 조직의 자격 있고 경험이 풍부한 직원과 논의

구조화된 프로세스에서 잠재적 위험을 식별하는 것이 중요하다. 그룹화를 위한 제안이 아래에 제시되어 있다.

일반 위험: 1. 계약상의 분쟁

- 2. 지불불능과 제도적 문제
- 3. 당국의 간섭
- 4. 제3자의 간섭
- 5. 노동쟁의

특정 위험: 6. 사건의 발생

- 7. 예상치 못한 불리한 조건
- 8. 부적절한 설계, 규격 및 프로그램
- 9. 주요 장비의 고장
- 10. 표준이하, 제작공차범위 밖

위험은 일반 위험과 특정 위험으로 분류되었다. 특정 위험은 프로젝트의 각 부분에 대해 고려되어야 한다. 반면에 일반 위험은 각 계약에 대해 일반적으로 고려될 수 있다. 10개의 위험이 서로 다른 수준에 있다고 할 수 있지만, 그러한 위험요소가 모든 관심 이슈에 대해 합리적인 적용범위를 갖는 것으로 나타났다.

7.2 분류(Classification)

각 위험에 대한 발생 빈도와 결과의 범위는 프로젝트의 요건과 규모에 적합하도록 특별히 설정된 분류시스템에 따라 평가되어야 한다. 또한, 주어진 위험의 빈도와 결과 분류에 기초하여 리스크 분류를 제공함으로써, 리스크 수준에 따라 취해야 할 조치를 나타내는 리스크 분류시스템을 확립되어야 한다. 빈도, 결과 및 리스크의 분류는 프로젝트에 대해 정의된 리스크 목표 및 리스크 허용 기준에 따라 확립되어야 한다.

빈도 분류시스템은 모든 유형의 리스크에 공통적으로 적용되어야 하지만, 반면에 결과 분류시스템은 각 유형의 리스크에 대해 별도로 설정해야 한다. 가급적 분류 시스템은 공통적인 리스크 분류시스템이 모든 유형의 리스크에 사용할 수 있도록 조정해야 한다. 빈도, 결과 및 리스크 수준의 분류 예는 5등급 분류 시스템을 사용하였다.

7.2.1 빈도 분류(Frequency Classification)

공개된 통계 자료 외에도, 프로젝트팀 또는 조직의 직원으로부터 도출된 전문가 판단은 분류에 만드는데 사용될 수 있다. 팀원의 업무를 용이하게 하기 위해서는 빈도 평가에 대한 지침이 가능한 명확하고 종합적으로 설정되어야 한다. 제안된 빈도 평가 방법은, 빈도 등급에 대한 자체 지침을 공식화하기 위해 경험 많은 터널엔지니어로 구성된 리스크 평가팀을 갖도록 하는 것이다.

일반적으로 빈도 분류의 실용적인 방법으로 5가지 등급 또는 간격으로 분리하는 것이 추천된다. 빈도 분류는 사건 수(위험 발생)를 “연간” 또는 “터널 km당” 단위로 설정할 수 있다. 그러나

〈표 1〉 공사단계에서의 발생 빈도와 빈도 등급

Frequency class	Interval	Central value	Descriptive frequency class
5	>0,3	1	Very likely
4	0,03 to 0,3	0,1	Likely
3	0,003 to 0,03	0,01	Occasional
2	0,0003 to 0,003	0,001	Unlikely
1	<0,0003	0,0001	Very unlikely

중앙값은 지정된 간격의 대수 평균값을 나타낸다.

제2강. 터널공사 리스크 관리 가이드라인

전체 공사기간 동안 발생 가능한 사건의 수와 관련된 분류를 사용하는 것이 가장 적절하다고 제안한다. 이러한 분류의 예는 표 1에 나타난 바와 같다.

7.2.2 결과 분류(Consequence Classification)

결과는 5가지 등급으로 분류하는 것이 추천된다. 결과의 유형과 잠재적 심각도의 선정은 프로젝트의 범위와 특성에 따라 달라진다. 다음의 예는 일반적인 실무와 일치하지만, 각각의 프로젝트에 대한 지침과 분류 등급은 특정 리스크 정책을 고려하여 정의해야 한다는 점을 유념해야 한다. 사용된 예는 프로젝트 가치가 약 10억 유로이고, 공사기간이 약 5-7년인 지하건설 프로젝트이다.

7.2.2.1 작업자의 부상

결과 분류와 작업자의 손상에 대한 허용기준은 리스크 평가에 대한 현실적인 기초를 형성하기 위해 리스크 정책에 대해 보정해야 한다. 부상에 대한 지침 설명과 함께 결과 분류의 예가 표 2에 나타나 있다.

7.3.2.2 제 3자의 부상

제3자에 대한 부상을 고려할 때, 작업자의 부상과 비교했을

때, 리스크 허용은 일반적으로 감소한다. 결과 분류의 예는 표 3에 제시되어 있으며, 표 2의 작업자에 비해 제3자에 대한 부상 발생시가 더 엄격하다.

7.2.2.3 제 3자의 재산 피해

제3자 재산에 대한 피해 또는 경제적 손실은 발주자에 의한 경제적 손실에 비해 더 엄격한 등급을 가진 별도의 결과 등급에 의해 보상해야 한다. 실제로는 많은 프로젝트 경우에 있어, 대형 토목 엔지니어링 계약의 고객들은 많은 프로젝트 경우에 직접적인 수혜자가 아닌 제3자에게 합리적인 것 이상의 경제적 위험에 노출되어 있음을 보여준다. 표 4에 결과 분류의 예가 제시되어 있다.

7.2.2.4 환경에 대한 피해

환경 문제는 일반적으로 프로젝트의 환경 관리시스템 내에서 다른 용어로 다루어진다. 리스크 관점에서 환경적 피해를 분류하는 것은 다소 복잡하다. 잠재적 불변성과 잠재적 피해의 심각도와 관련된 환경 피해를 평가하는 것을 제안한다. 표 5는 추가적인 개발이 필요한 결과 분류의 예를 보여준다. 다른 결과의 경우에 대해, 기술적인 결과 등급은 고려중인 프로젝트에 대해 구체적으로 정의해야 한다.

<표 2> 작업자의 부상

	Disastrous	Severe	Serious	Considerable	Insignificant
No. of fatalities/Injuries	F)10	1(F≤10, SI)10	1F, 1(SI≤10)	1S, 1(MI≤10)	1MI

F, fatality; SI, serious injury; MI, minor injury

<표 3> 제3자의 부상

	Disastrous	Severe	Serious	Considerable	Insignificant
No. of fatalities/Injuries	F)1, SI)10	1F, 1(SI≤10)	1S, 1(MI≤10)	1MI	-

F, fatality; SI, serious injury; MI, minor injury

<표 4> 제3자에 대한 피해와 경제적 손실

	Disastrous	Severe	Serious	Considerable	Insignificant
Loss in Million Euro	>3	0,3-3	0,03-0,3	0,003-0,03	<0,003

〈표 5〉 환경에 대한 피해

	Disastrous	Severe	Serious	Considerable	Insignificant
Guideline for proportions of damage	Permanent severe damage	Permanent minor damage	Long-term effects	Temporary severe damage	Temporary minor damage

'long-term'과 'temporary'의 정의는 공사기간과 관련하여 제공되어야 한다.

7.2.2.5 공기 지연

지연의 잠재적 결과는 공사활동이 임계공기에 있는지 여부에 관계없이 초기에 특정 공사 활동의 지연으로 평가될 수 있다. 임계 공기에 대한 예상된 공기지연을 평가하기 위해 공기지연에 대한 별도평가가 이루어져야 한다. 모든 결과를 포함하는 하나의 리스크 매트릭스를 달성하기 위해서는 10개 구간의 공기지연을 유지할 수 있지만, 좀 더 현실적인 분류를 정의할 수 있다 (표 6), 이러한 분류는 더 쉽게 이해되기 때문에 권장된다.

7.2.2.6 발주자에 대한 경제적 손실

이 유형은 위험 발생의 결과로 발주자에 대한 추가 비용과 관련이 있으며, 발주자에 의해 예상되는 추가 비용을 포함한다. 그러나 추가적인 원가를 발주자나 다른 당사자가 부담할 것인지 여부를 쉽게 정할 수 없다면, 발주자가 손실을 부담한다고 가정해야 한다. 운영중 불편사항의 자본화된 비용(예: 표준 이하의 작업으로 인한 유지보수 및 운영비용 증가)을 건설단계 중 관련 위험요소에 포함시켜야 하는지 여부를 조기에 결정해야 한다. 발주자에게 경제적 손실을 리스크 별로 분류하는 제안된 예는 표 7에 나와 있다.

7.2.2.7 여론의 악화

정치적, 경제적, 환경적으로 민감하고 여론이 프로젝트 개발에 심각한 영향을 미칠 것으로 예상되는 프로젝트의 경우, 여론의 악화는 평가해야 할 관련 결과 범주가 될 수 있다. 하지만 발주자에 대한 손실의 일부로 여론 악화를 고려할 것을 제안한다. 여론 악화는 위에서 설명한 분류에서 결과를 초래하는 사건과 매우 관련이 있다. 일반적으로 정치적 의제에서 높은 순위를 차지하는 제3자와 환경에 대한 결과가 발생할 경우, 여론 악화가 발생할 것이다.

7.2.3 리스크 분류 및 리스크 허용

(Risk classification and Risk acceptance)

리스크 수준의 결정을 위한 리스크 매트릭스의 예는 표 8에 나와 있다. 그 예는 일반적인 실무와 일치하지만, 특정 리스크 정책을 고려하여 각 특정 프로젝트에 대해 리스크 분류 시스템을 정의해야 한다는 점을 유념하는 것이 중요하다.

다른 빈도와 결과 등급의 5단계를 사용함으로써 리스크 분포에 대한 일반적인 대수적 해석을 유지할 수 있다. 각 위험에 대해 수행해야 할 조치는 관련 리스크가 허용할 수 없는지

〈표 6〉 공기지연

	Disastrous	Severe	Serious	Considerable	Insignificant
Delay(1) (months per hazard)	>10	1-10	0,1-1	0,01-0,1	<0,01
Delay(2) (months per hazard)	>24	6-24	2-6	1/2-2	<1/2

〈표 7〉 발주자에 대한 경제적 손실

	Disastrous	Severe	Serious	Considerable	Insignificant
Loss in Million Euro	>30	3-30	0,3-3	0,03-0,3	<0,03

〈표 8〉 리스크 매트릭스(예)

Frequency	Consequence				
	Disastrous	Severe	Serious	Considerable	Insignificant
Very Likely	Unacceptable	Unacceptable	Unacceptable	Unwanted	Unwanted
Likely	Unacceptable	Unacceptable	Unwanted	Unwanted	Negligible
Occasional	Unacceptable	Unwanted	Unwanted	Acceptable	Negligible
Unlikely	Unwanted	Unwanted	Acceptable	Acceptable	Negligible
Very Unlikely	Unwanted	Acceptable	Acceptable	Negligible	Negligible

리스크 수준에 따른 대책

Unacceptable 허용불가	리스크는 리스크 완화 비용에 관계없이 적어도 원치 않는 수준으로 감소
Unwanted 원치 않음	리스크 완화 대책 검토 비용이 얻어진 리스크 감소와 불균형을 이루지 않는 한 대책은 실행(ALARP 원칙)
Acceptable 허용가능	리스크는 프로젝트 전체에 걸쳐 관리 리스크 완화에 대한 고려는 필요하지 않음
Negligible 무시	리스크에 대해 더 이상 고려할 필요가 없음

(unacceptable), 원치 않는지(unwanted), 허용할 수 있는지(acceptable) 또는 무시 할 수 있는지(negligible)로 분류되는 지에 따라 달라진다.

수행할 조치에 대한 설명에는 리스크 완화 조치를 결정해야 하는 프로젝트 조직의 수준에 대한 정의가 포함될 수 있다. 표 8에 제시된 리스크 매트릭스는 검토된 각 위험요소에 대한 허용 가능성에 대한 의사결정의 근거로 만들어진 것이다. 개별 위험요소의 리스크를 통제함으로써, 프로젝트에 관련된 총 리스크는 추정치를 고려하지 않고 통제된다. 발생 빈도를 줄이기 위해 위험요소를 과도하게 세분화하지 않는 것이 이 접근법의 전제조건이다. 리스크 목표를 기초로 리스크 매트릭스를 설정할 때는 다양한 등급에서의 예상된 위험요소의 횟수를 고려해야 한다. 이는 단순한 분류이기 때문에 이러한 지침에서는 다른 결과 그룹에 대해 제안된 가중치 또는 조합을 제시하지 않는다.

7.3 정량적 리스크 평가

(Quantitative risk assessment)

신뢰성 있는 정량적 리스크 평가치를 제공하기에는 리스크 매트릭스 방법이 너무 개략적이며, 확인된 리스크를 정량화하는 것은 실행 가능한 작업이다.

각 위험요소에 대해 빈도에 대한 수, F와 결과에 대한 수, C를 지정함으로써 리스크를 정량화할 수 있다. 이 위험요소의 리스크는 $F \times C$ 로 평가되며, 프로젝트의 총 리스크는 모든 위험요소에 대한 합으로 평가된다. 이 단순 접근방식은 각 리스크 유형에 대한 단일 리스크 수치를 제공하여 리스크에 대한 최선의 평가를 보여준다.

이와 같은 단순 접근법의 단점은 리스크 평가치의 불확실성을 설명하지 않는다는 것이다. 불확실성에 대한 설명은 각 결과를 확률 변수로 고려하고, 단일 수치 대신 각 변수에 분포를 할당함으로써 얻을 수 있다. 분포는 가능한 최소 및 최대 수치를 할당하여 얻을 수 있다. 빈도 평가에도 동일한 접근방식을 사용할 수 있지만, 빈도 변화의 결과의 민감도 검사가 더 적절할 수 있도록 이 접근법의 적합성이 논의되어야 한다. 총 리스크는 변수 간의 상관관계를 고려하여 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 얻을 수 있다. 이러한 복잡한 접근법의 이점은 다음과 같다.

- 리스크는 단일 수치보다 각 결과(또는 빈도)에 대해 가능한 최소값과 최대값을 할당함으로써 더 잘 설명할 수 있다.
- 일반적으로 경험 기록의 통계적 분석보다는 공학적 판단에 기초하여 할당되어야 하는 빈도와 결과의 상당한 불확실성을 고려하여, 단일 수치대신 평가 범위의 사용은 리스크 평가를 수

행하는 사람이 수치를 결정하는 것을 더 쉽게 할 것이다.

- 최종적인 리스크 평가치는 단일 수치가 아닌 확률 분포이다. 이것은 리스크에 대한 50%, 75% 및 95% 분위수(fractile)를 표현 할 수 있다.

위에서 설명한 정량화 방법은 경제적 손실 및 공기지연 리스크 평가에 가장 적합하지만, 원칙적으로 모든 유형의 리스크와 결과에 사용될 수 있다. 멀티 리스크(Multi-risk)는 불확실성을 포함한 공사비 평가치와 공기 일정을 수립하기 위한 방법이다. 이 방법은 최대 평가치에 그러한 위험요소의 결과를 포함함으로써 발생 빈도가 다소 높은 위험요소에서의 비용과 공기에의 미치는 영향을 다루는 데 사용될 수 있다. 이 방법은 매우 높은 결과를 가지기 때문에 지하 건설내에서 중요할 수 있는 발생 빈도가 낮은 위험요소에서의 비용과 공기에의 미치는 영향을 다루는 데 사용할 수 없다.

8. 리스크 관리 도구(Risk Management Tools)

터널 프로젝트의 계획과 여러 다른 단계에서의 리스크 판단은 적절한 도구가 필요하다. 리스크 분석 도구를 사용하여 해결해야

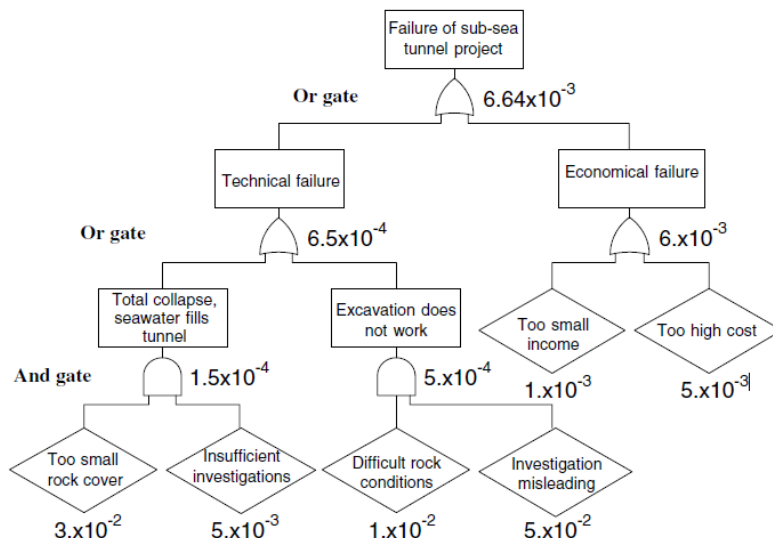
할 문제의 유형은 리스크를 식별하고, 리스크를 정량화하며, 원인과 결과를 시각화하고, 사건의 과정(체인)을 파악하는 것이다. 대부분의 도구는 지하산업 외부에서 적용할 수 있도록 개발되었지만, 대부분의 도구는 큰 수정 없이 지하 건설에서 발생하는 문제에 사용될 수 있다. 이 장의 목적은 추가적인 검토를 위한 참고 문헌과 함께 여러 기법에 대한 간략한 소개를 제공하는 것이다.

8.1 결함수 해석(Fault tree analysis)

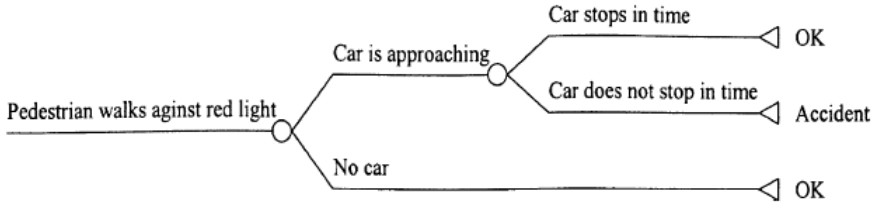
결함수 해석은 음의 사건에 선행하는 단일 또는 조합된 인과 관계의 연결(관계)을 분석하는 데 사용할 수 있다. 결함수 분석은 사건의 확률을 정량화하거나 또는 정량화 없이 활용된다. 이 도구를 사용함으로써, 많은 상호작용 사건과 관련된 복잡한 문제를 구조화 할 수 있다.

8.2 이벤트 트리 해석(Event tree analysis)

초기 사건에서부터 가능한 단계를 통한 최종상태로의 발전에 대한 설명은 이벤트 트리 분석을 통해 수행될 수 있다. 다양한 결과에 대한 확률을 평가하면 정량적 분석이 가능하다(그림 3과 그림 4 참조).



〈그림 3〉 추정 확률을 가진 결함수의 예



〈그림 4〉 사건에 대한 이벤트 트리 원리

8.3 의사결정 트리 해석(Decision tree analysis)

의사결정 트리 해석은 이용가능한 정보를 바탕으로 최선의 결정을 분석하는 데 활용된다. 지하 건설공사에 관한 많은 의사결정들은 큰 불확실성을 포함하고 있으며, 의사결정 트리 분석을 통해 이것들은 구조화된 형식으로 제시된다. 이는 다른 방법보다 더 나은 의사결정 기반을 형성할 수 있다.

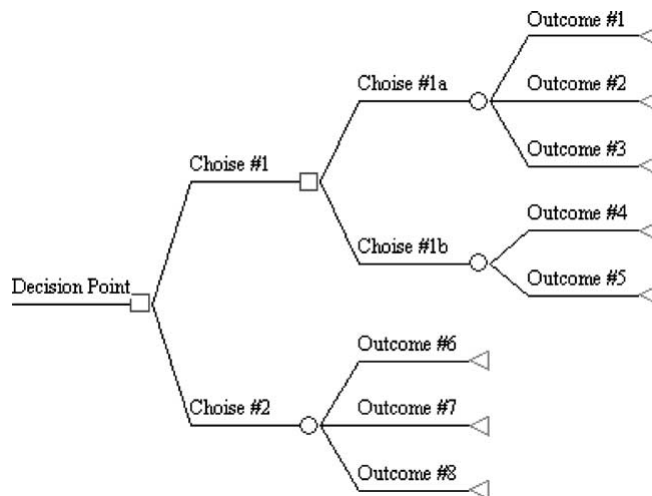
트리 구조는 이벤트 트리 분석시 왼쪽에서 오른쪽으로 만들어진다. 의사결정 트리는 여러 개의 이벤트 트리로 설명할 수 있다(그림 5).

8.4 멀티 리스크(Multi-risk)

이 방법은 비용과 시간 계산을 위해 확률 변수를 사용하여 합수를 계산하는 근사법이다. 멀티 리스크는 불확실성이 높은 경

우에 가장 유용하다. 이 방법은 컴퓨터 기반이며 비용 계산을 위해 7단계로 구성된다.

1. 독립적인 주요 비용항목의 값을 확인
2. 3가지 값(최소값, 가장 가능성이 많은 값, 최대값)으로 각 항목의 비용을 평가
3. 각 비용항목에 대해 예상되는 값과 불확실성 범위를 계산
4. 비용에 대한 합과 분산을 계산
5. 총 분산이 너무 클 경우, 불확실성에 가장 큰 영향을 미치는 항목을 독립적인 하위 항목으로 나눔
6. 총 분산이 허용치에 도달할 때까지 2-5단계를 반복
7. 결과는 평균 비용 및 표준 편차로 표시



〈그림 5〉 의사결정 트리의 예

8.5 몬테카를로 시뮬레이션 (Monte Carlo simulation)

지하 프로젝트에서의 평가 종류에는 종종 몇몇 확률 변수가 있는 방정식이 포함된다. 이러한 종류의 문제에 대한 분석적 해결은 분석적 표현이 확립되었다 하더라도 매우 복잡하다. 시뮬레이션을 사용하면, 예를 들어 다른 엔지니어링에서 광범위하게 사용되는 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 근사해를 계산할 수 있다.

방정식은 확률 변수와 상수를 사용하여 결정된다. 각각의 확률 변수의 분포와 변수 간의 상관성이 지정된다. 이후에 방정식에 대한 근사 결과를 시뮬레이션할 수 있다. 각 시뮬레이션 단계에서 방정식은 변수의 분포와 상관성에 따라 각각의 확률 변수에서 샘플은 무작위로 선택하여 계산한다. 시뮬레이션 수가 많을수록 결과가 더 적합하게 된다. 1,000, 10,000, 100,000회 실행 또는 선택한 실행수를 시뮬레이션한 후에는 결과가 불확실한 분포로 나타나고, 이러한 히스토그램으로부터 평균값, 표준 편차 및 기타 통계 변수를 결정할 수 있다.

제2강을 마치면서

이상으로 국제터널협회(ITA)에서 제시한 터널 리스크 관리 지침에 대하여 살펴보았다. 앞서 설명한 바와 같이 터널공사에서의 리스크 관리의 다양한 기법을 이용하여 정성적 또는 정량적 평가방법이 만들어져왔다. 터널 엔지니어는 공사의 특징과 규모 등을 고려하여 리스크 관리방법에 발주자와 협의하여 수립하도록 하여야 한다. 특히 설계자와 시공자의 리스크에 대한 평가와 이에 대한 상호 커뮤니케이션은 공사의 안전사고를 예방하고 리스크를 최소화함으로써 공사비와 공기달성에 기여할 것으로 판단된다.

본 원고는 글로벌 엔지니어링 계약시스템을 기본으로 해서 작성된 것이므로 우리 건설공사 시스템과는 맞지 않거나 적용하기가 어려운 것이 있음은 물론이다. 하지만 해외 터널프로젝트 참여시 또는 국내 터널공사에서의 리스크 안전관리에 대한 보다 구체적인 참고가 될 것이다.

용어(Glossary)

Hazard 위험/위험요소	인적 부상, 재산 피해, 환경 피해, 경제적 손실 또는 프로젝트 완료 지연 가능성이 있는 상황 또는 조건
Risk 위험도/리스크	정의된 위험의 발생 빈도와 발생 결과의 조합
Risk acceptance criteria 리스크 허용기준	주어진 시스템에 대해 허용되거나 허용 가능한 최대 리스크 수준을 정의하는 정성적 또는 정량적 표현
Risk analysis 리스크 분석	주어진 활동에서 발생하는 나쁜 결과의 확률과 정도를 확인하는 구조화된 프로세스. 리스크 분석에는 위험의 식별과 리스크에 대한 정량적 또는 정성적 기재가 포함
Risk assessment 리스크 평가	시스템 또는 프로젝트에 내재된 리스크와 적절한 맥락에서의 중요도에 대한 통합 분석 즉, 리스크 분석 및 리스크 평가
Risk elimination 리스크 제거	리스크 발생을 방지하기 위한 조치
Risk evaluation 리스크 평가	리스크 분석 결과와 리스크 허용기준 또는 기타 의사결정 기준을 비교
Risk Mitigation Measure 리스크 저감 대책	결과 또는 발생 빈도를 줄임으로써 리스크를 줄이기 위한 조치.

위의 용어 정의는 [엔지니어링 위원회, 1993]에서 발췌한 것이며, 건설 프로젝트에 더 잘 적합하도록 약간의 수정과 보충을 포함

참고문헌

1. 글로벌 터널 설계 엔지니어링 실무, 2016, 김영근, 시아이알
2. Søren Degn Eskesen, Per Tengborg, Jørgen Kampmann, Trine Holst Veicherts, Guidelines for tunnelling risk management: ITA WG 2, 2004
3. Eric Leca, Søren Degn Eskesen, ITA WG2 – Guidelines for Tunnelling Risk Assessment, 2006
4. Lichtenberg, S., 2000. Proactive Management of Uncertainty Using the Successive Principle. Polyteknisk Forlag, Copenhagen.
5. Sturk, R., 1998. Engineering geological information -. Its value and impact on tunnelling. Doctoral Thesis at Royal Institute of Technology, Stockholm.
6. Einstein, H.H., 1996. Risk and risk analysis in rock engineering. Tunnelling and Underground Space Technology 11 (2), 141-155.
7. Eskesen S.D., Kampmann J., 2000. Risk reduction strategy in urban tunnelling: experience from the Copenhagen Metro. In: ITA World Tunnel Congress, Tunnels under Pressure, Durban, 2000.
8. Isaksson, M.T., Reilly, J.J., Anderson, J.M., 1999. Risk mitigation for tunnel projects -. A structured approach. In: Alten, et al., (Eds.), Proceedings Challenges for the 21st Century. Balkema, Rotterdam.
9. Reilly, J.J., 2000. The management process for complex underground and tunnelling projects. Tunnelling and Underground Space Technology 15 (1), 31-44.
10. Tonon, F., Bernardini, A., Mammino, A., 2002. Multiobjective optimization under uncertainty in tunnelling: application to the design of tunnel support/reinforcement with case histories. Tunnelling and Underground Space Technology 17 (1), 33-54.

[본 기사는 저자 개인의 의견이며 한국터널지하공간학회의 공식입장과는 무관합니다.]