

터널공사 프로젝트

-거가대교 육상터널 공정관리-

2015170378 정은영
2015170396 이효정
2015170391 문대식
2015170307 양동관

목 차

<서 론>

- I. 거가대교 공사
- II. 선정이유

<본 론>

- I. Network Model (Duration, Start, Finish, ES, EF, LS, LF, FF, TF, cost)
 - 1. WBS
 - 2. Define Activities (시공, 구매/조달, 관리)
 - 3. Order Activities (물리적, 자재, 안전 제약사항 등 고려)
 - 4. Establish Activity Relationships (선후관계 고려)
 - 5. Draw a Network Diagram
 - 6. Assign Resources and Cost (품셈참고)
- 7. Determining Duration (인부, 시간 곱, optimistic, most likely, pessimistic 설정)
 - 8. Calculate early and late start/finish times
 - 9. Compute float values and identify the critical path
- 10. Compute float values and identify the critical path (PERT)

II. Management of Resources

- 1. ResourceAllocation (SM)
- 2. ResourceAllocation (PM)
- 3. Resource Leveling

III. Shorten a project duration

- 1. redefine the sequencing of activities
- 2. Money and Network Schedules

<최 종 결 론>

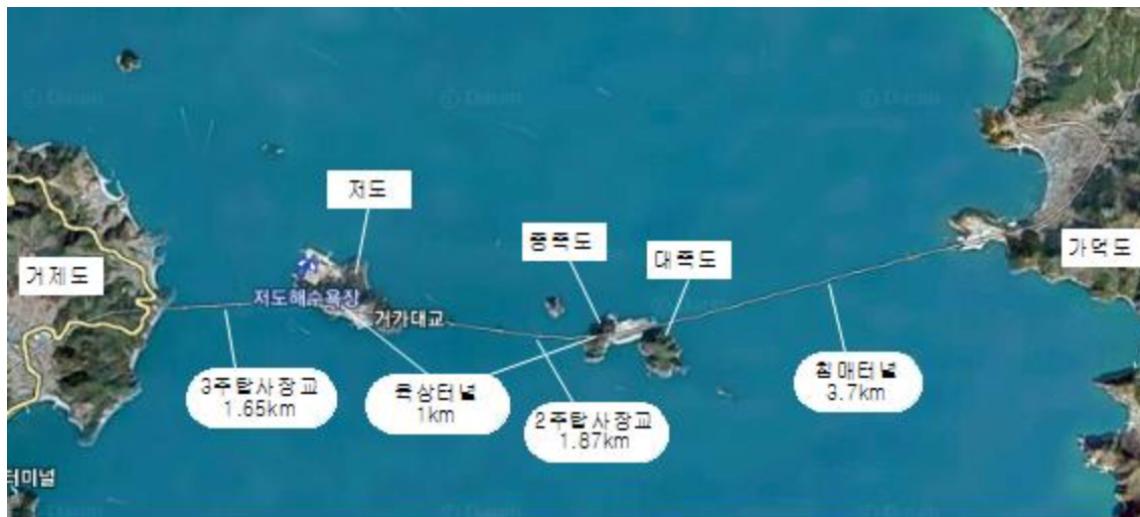
<서론>

1. 거가대교 공사

최근 세계 각 국에서는 고속화 철도 및 도로 등의 고속운송 체계의 개발수요가 증대됨에 따라, 하천이나 해협을 횡단하는 교통용 수저터널의 건설공법이 빠르게 발전하고 있다. 역사적으로 보면 19세기 말~20세기에는 쉴드공법이 수저하의 연약지반에 교통터널을 건설하는 유력한 방법으로 개발·발전되어 왔으나, 원형단면을 기본으로 하는 것과 교통용 터널에 적합한 대단면의 굴착 곤란 등의 이유로 문제점이 대두되어 19C중반이후로 침매터널공법이 해저터널 건설의 새로운 방법으로 발전되어 왔다.

먼저 거가대교를 소개하자면 경상남도 거제시 장목면 유호리와 부산광역시 강서구 천성동 가덕도를 8.2km의 왕복 4차로로 연결하는 노선이며, 주요시설로는 주 항로 구간의 침매터널 3.7km와 예비항로 구간의 2주탑 사장교 및 3주탑 사장교, 접속교, 산악터널 일부로 구성되어 있다. 이 중 침매터널은 가덕도와 중죽도로 연결되는 해저터널로서 침매터널과 육상부의 도로를 연결하기 위하여 침매터널 서쪽 끝단 부에 대죽도와 중죽도 사이를 일부 매립하여 침매터널 갱구부를 조성하고 동쪽 끝단 부에는 가덕도에 일부 매립을 하여 갱구부를 조성하는 것으로 계획하였다. 개착식 터널을 제외한 침매터널 연장은 3,240m로서 높이 9.75m, 폭 26.5m, 길이 180m의 함체 총 18개로 구성되어 있다.





침매터널은 제작된 함체가 부상되어야 하는 조건, 침설이 가능해야 하는 조건, 그리고 하상이나 해상에서 계속 안정된 상태로 유지되어야 하는 조건을 동시에 만족해야하는데 이 3가지 조건은 서로 상반되기 때문에 함체 단면크기, 재료의 단위중량, 물의 밀도 등에 대해 상당한 정밀도가 요구된다. 또한, 공사중 침설이 가능하고 완공 후 부상에 대한 안정성을 확보하기 위하여 터널 내부에 밸러스트가 필요할 정도로 상당한 부력이 작용하므로 침매터널 자중의 일부만이 지반에 하중으로 작용하게 되어 연약지반에서도 별도의 지반보강이 없이 sand flow, sand jet, gravel bed 등 준설면 기초만으로 시공이 가능하다. 그러나 당 현장의 경우 세계적으로 침매터널 시공사례가 없는 20-45m의 수심과 외해, 최대 33m인 연약지반 조건 등 열악한 현장여건과 함체 침설시 시공 오차, 온도변화, 콘크리트의 크리프 및 수축, Gina의 이완, 지진에 의한 거동, 침몰선박, 침수에 의한 하중, 지반의 부등침하 등으로 인해 야기 될 수 있는 조인트 오프닝을 최소화하고자 지반조건을 고려하여 지반보강이 시행되었으며, 함체를 해저면 하부에 거치하기 위한 준설과 침설전 불균등한 준설면에 대한 평탄성 및 상재하중의 균등배분을 확보하기 위한 함체 기초 bed공사가 병행되고 있다.

이하 침매터널을 건설할 때 필요한 Network Model 등을 소개하고자 한다.

2. 선정이유

처음 주제를 정할 때 다른 팀들과는 다르게 창의적인 주제를 선정하고 싶어서 검색을 해보았다. 일반 건물들 같은 경우 WBS가 상세히 나와 있는 것이 많아 건물을 선정하면 진행이 빠를 것으로 보였다. 그러나 앞서 말했듯이 창의적인 주제를 정하고 싶어 건물 보다는 터널이나 대교를 하는 것이 나을 것이라고 생각했다. 검색을 해본 결과, 우리나라에 최초로 지어진 유일무이한 침매터널인 거가대교를 알게 되었고 거가대교로 network model을 만드는 것으로 정해졌다.

그러나 우리나라에 최초로 지어지고 유일한 침매터널이었기 때문에 자료를 검색하기 힘들었고, 침매터널을 건설하는 공법은 전 세계에 널리 알려진 기술이 아니기 때문에 침매터널을 건설할 때의 network model을 만드는 것은 불가능해보였다. 따라서 침매터널을 분석하는 것 보다 침매터널과 연결된 지상으로 나와 있는 양 쪽 터널에 대해 분석하는 것이

더 나을 것이라고 생각되어 거가대교의 양 끝 터널 중에 하나인 중죽도를 공사 할 때의 model을 알아보도록 한다.

<본론>

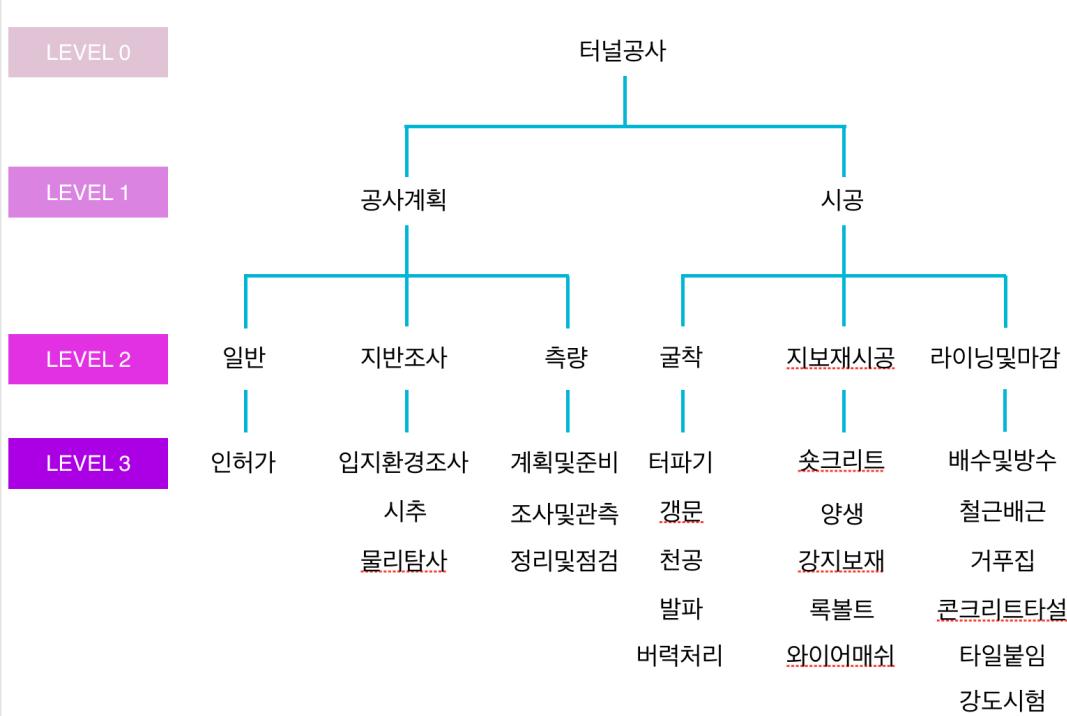
I . Network Model (Duration, Start, Finish, ES, EF, LS, LF, FF, TF, cost)

1. WBS

WBS란 Work Breadown Structure의 약자로 종합적으로 Work를 정의하고 관리가능한 Work의 하부단위로 분할을 가능하게 하는 기법이다. 즉, 각각의 Work Item들의 구성체계를 말하며, 일반적으로 각 Work Item별로 계획과 집행 대비가 용이하게 구성되는 것이 바람직하다. 최종생산물을 얻기 위해 수행되는 작업을 Family Tree 형태로 구성한 것이며, 프로젝트 전체의 범위(Scope)을 정의한다. WBS 이론은 1960년대 미국에서 개발되었다. 이 이론은 대상 Project를 효율적으로 관리하기 위한 방법을 제시하고 있는데, 이는 이 이론이 갖는 사고의 관점이 Project를 관찰하는 방법을 제시하고 있기 때문이다.

터널 공사의 wbs를 작성할 때 세세한 activity들 (ex) 재료제작, 주문 및 조달 등)을 얼마나 써야할지, leveling을 어디까지 해야되는지, 어떤 항목끼리 묶어야 하는지 고민했다. 고민하는 과정에서 위에서 말한 제작이라던지, 주문 및 조달은 wbs를 작성할 때 기본적으로 있음을 인정하고 작성하는 것이 옳다고 생각해 포함하지 않았다.

다음은 중죽도의 WBS 모습이다.



2. Define Activities

- 1) 인허가 - 인허가에 대해 강학상으로 허가, 인가, 특허 등의 개념이 사용되고 있으나, 행정 현실상 제도의 명칭은 강학상의 개념과 일치되지 않는 경우가 많다. 또한, 현행법상 동일한 용어가 개별 법률마다 각각 다른 의미로 쓰이는 경우도 있고, 다른 용어가 같은 의미로 쓰이는 경우도 있어서 용어의 정의를 내리는 것조차 어려운 실정이다. 건축법에서 인허가란 허가과정을 얘기하고, 건축허가는 건축주의 책임 하에 받는다.
- 2) 입지환경조사 - 입지환경조사는 건설에 영향을 미치거나 건설로 영향을 받을 수 있는 사항에 대한 조사로서 지형, 환경, 지장물, 지표 수리시설과 지하수 부존특성, 공사용 설비, 보상 및 관계법규 조사를 포함한다. 공사의 목적 및 규모 등을 고려하여 조사내용, 순서, 방법, 범위, 정확도 등을 결정하여야 하고, 시공 중의 조사는 설계시의 조사내용의 확인 또는 변경 및 보완에 필요한 사항을 조사하도록 계획하여야 한다. 일반적으로 지형조사, 환경조사, 지장물 조사, 사토장조사, 공사용 설비조사, 보상조사를 하게된다.
- 3) 시추 - 시추조사는 터널시공구간 내의 지층구성 및 지하수위 확인, 추가시험의 시료 채취를 위하여 실시할 수 있다.
- 4) 물리탐사 - 물리탐사는 지질구조 및 지반상태를 파악하기 위해서 실시할 수 있으며, 현장 여건과 지반조건을 고려하여 탐사방법을 선정한다.

- 5) 계획 및 준비 - 현장 지반특성을 파악하기 위하여 시추공 내, 터널 내 또는 시험터널 내에서 현장시험을 실시할 수 있다. 시험항목과 빈도는 공사의 특성, 현장 여건 등 제반사항을 감안하여 선정하여 야 한다. 토질 및 암석시험은 한국산업표준(KS)에 제시된 시험방법에 따라서 수행하여 야 한다. 단, 이 규격에 명시되지 아니한 시험은 국제적으로 인정되는 시험방 법을 준용 할 수 있다. 시험항목과 빈도는 공사의 특성, 현장여건 등 제반사항을 감안하여 선정한다.
- 6) 조사 및 관측 - 공사 들어가기 전 좀 더 정확한 조사가 필요하고, 일반적으로 측량을 하게 된다. 측량은 터널시공에 필요한 정도를 확보할 수 있도록 시행하여야 한다. 측량작업은 터널 외부측량과 터널 내부측량으로 구분하며, 측량은 지형조건, 터널 규모, 용도, 시공방법 및 측량목적 등에 따라 적합하게 수행하여야 한다. 기준점들은 훼손, 이동의 우려가 없는 장소에 설치하고, 안전하게 보호하여야하며, 훼손 시 즉시 기준점을 재설치하고 기존 측량과 오차를 확인· 보정하여야 한다. 측량의 정도는 공공작업 측량기준의 규정을 따라야 한다.
- 7) 정리 및 점검 - 조사는 그 목적을 충분히 이해할 수 있도록 정해진 양식에 기록하고, 공사의 각 단계별로 활용할 수 있도록 정리, 보관하여야 한다. 조사성과는 각각 그 목적에 적합한 정보가 자세히 기록될 수 있도록 일정한 양식에 정리하여야 한다.
- 8) 터파기 - 터널굴착 시 굴착과 관련된 제반 행정법규, 총포도검화약류 등 단속법, 소음진동관리법 등의 환경관련 법규, 산업안전보건법 등의 안전관련 법규 등을 확인하여야 한다. 굴착을 위해서는 단면의 크기, 형식, 지반조건, 연장, 공기, 입지 조건 등을 종 합적으로 검토하여 적절한 굴착공법과 굴착방법을 계획하여야 한다. 굴착방법에는 인력, 기계, 파쇄, 발파굴착 등이 있으며, 적용 시에는 지반, 지하수, 토피, 환경, 터널단면의 크기, 형상, 연장 등의 조건을 고려하여야 한다.
- 9) 간문 - 경사면 방호나 방토를 위해서 터널의 간 입구부에 설치하는 구조물
- 10) 천공 - 지중의 토질분포, 토층의 구성, 지하수의 수위 등을 알아보기 위하여 기계를 이용해 지중에 구멍을 뚫고 그 안에 있는 토사를 채취하여 조사하는 방법이다. 천공기계는 암질, 터널단면의 크기, 형상, 연장, 굴착공법, 발파계획, 벌력처 리방법, 공사기간 등을 고려하여 선정한다.
- 11) 발파 - 발파란 암석을 굴착할 때 암반에 착암기로 구멍을 뚫고 그 속에 폭약을 장약하여 폭발시킬 때 발생되는 충격으로 암석을 파쇄하는 것이다. 발파계획은 지반조건, 주위환경, 터널단면의 크기와 형상, 굴착공법, 굴진장, 벤치길이 등에 적합

한 천공길이 및 배치, 폭약의 종류와 양, 뇌관의 종류, 발 파순서 등을 종합적으로 판단하여 수립하여야 하며, 시험발파를 통해 적합한 천공장, 벤치길이, 폭약 종류 등을 선정할 수 있다.

- 12) 벼력처리 - 벼력이란터널 굴착과정에서 발생하는 암석덩어리, 암석조각, 토사 등의 총칭이다. 기초를 만들거나 수중 구조물의 밑부분을 보호하기 위해 집어넣는 작업을 말한다.
- 13) 솗크리트 - 굳지 않은 콘크리트를 가압시켜 노즐로부터 뿜어내어 소정의 위치에 부착시켜 시공(타설)하는 콘크리트
- 14) 양생 - 크리트 치기가 끝난 다음 온도 ·하중 ·충격 ·오손 ·파손 등의 유해한 영향을 받지 않도록 충분히 보호 관리하는 것을 일컫는 말로 보양(保養)이라고도 한다.
- 15) 강지보재 - 굴착 후 시공하는 지보재로서 보조지보재 및 콘크리트라이닝을 제외한 지보재의 총칭이며 강지보재, 솗크리트 및 록볼트 등으로 구성
- 16) 록볼트(Rock Bolt) - 굴착암반면의 보강을 위하여 삽입하는 볼트이며, 암반을 일체화 함으로써 원자반의 안정을 위하여 설치한다. 록볼트의 정착방식에는 선단정착방식, 전면정착방식 및 병용방식.
- 17) 와이어메쉬 - 속이 빈 시멘트 블록을 쌓을 때 수평 줄눈에 묻어 쌓아 벽면의 신축균열 교차부나 횡력에 견딜 수 있도록 대는 철선으로 된 좁은 그물모양의 철물
- 18) 배수 및 방수 - 배수형 방수형식터널은 유입되는 지하수를 배수하는 터널로서 배수방법에 따라 3가지 형식으로 구분한다.
 - 1 - 완전배수형 : 터널부의 전 주면으로 배수를 허용하는 형식
 - 2 - 부분배수형 : 터널 천장과 측벽에만 방수막으로 설치하여 유입수를 한곳으로 유도하여 배수하는 형식
 - 3 - 외부배수형 : 터널 내부 시설물이나 콘크리트 라이닝을 보호하기 위하여 콘크리트 라이닝 외부전체를 방수막으로 둘러싸고 터널 외부에 별도의 배수로를 설치하여 터널로 흘러들어오는 지하수를 차집하여 외부로 배수하는 형식
- 19) 철근배근 - 철근을 설계에 의하여 배열(排列)하는 일.
- 20) 거푸집 - 콘크리트 구조물을 소정의 형태 및 치수로 만들기 위하여 일시 설치하는 구조물로, 일반적으로는 콘크리트 거푸집용 합판을 사용하는데, 공사에 따라 경질섬유판, 합성수지, 알루미늄 패널, 강판 등을 쓰기도 한다.
- 21) 콘크리트타설 - 구조물에 콘크리트를 부어넣어 거푸집에 잘 다져지게 하기 위해 진동기

로 작업하는 것을 말한다.

22) 타일붙임 - 마감처리방식으로 구조물에 타일을 붙여 공사를 완성하는 단계에서 한다.

23) 강도시험 - 공사한 것이 계획한대로 잘 완성되었는지 강도시험을 통해 확인한다.

3. Order Activities 물리적, 자재, 안전 제약사항 등 고려

- 1) 입지환경조사 - 공사 착공 전에 보상대상이 되는 용지취득에 수반되는 토지, 건물, 수목 등의 매수 및 이전, 각종 권리(지상권, 지하권, 수리권, 온천권, 어업권, 광업권, 채석권 등)의 침해, 농림 및 어업 수익의 감소, 영업 손실 등을 조사하여야 한다.
- 2) 시추 - 시추조사 시에는 관련기관으로부터 지장물 매설도를 구하여 참조하고 반드시 터파기나 물리탐사 장비를 사용하여 지하 지장물의 유무를 확인하고 유관기 관과 협의하여 시추하여야 한다.
- 3) 물리탐사 - 현장여건과 지반조건을 고려하여 탐사방법을 선정한다.
- 4) 조사 및 관측 - 토질 및 암석시험은 한국산업표준(KS)에 제시된 시험방법에 따라서 수행하여 야 한다. 단, 이 규격에 명시되지 아니한 시험은 국제적으로 인정되는 시험방법을 준용할 수 있다. 시험항목과 빈도는 공사의 특성, 현장여건 등 제반사항을 감안하여 선정한다.
- 5) 터파기 - 발파굴착은 화약류 등의 폭발력을 이용하여 암반을 굴착하는 방법으로 소음 및 지반진동을 억제하여야 할 경우에는 조절발파를 적용할 수 있다.
- 6) 갹문 - 터널 갹구부는 토피가 작고 풍화의 영향을 받기 쉽기 때문에 굴착 전에 보강 대책의 적정성을 확인하여야 한다. 터널 갹구에 형성된 비탈면이 붕괴되거나 낙반이 일어나지 않도록 하는 보강 대책의 적정성을 확인하여야 한다. 공사용 진입로는 산림훼손이 적고 공사차량의 소통이 원활하도록 계획하여야 한다.
- 7) 천공 - 천공에 앞서 막장(굴진부)의 점검, 뜯돌 제거, 잔류폭약의 유무 확인 및 회수 등 의 조치를 취하여 천공 중 막장에서의 붕락, 잔류폭약에 의한 폭발사고 등을 방지하도록 하여야 한다. 천공 시에는 분진발생 억제 및 슬라임 제거 등이 가능한 방법으로 정해진 위치, 방향, 깊이대로 정확하게 천공하여야 하며 잔류폭약의 유무가 육안으로 확인되지 않은 전회 발파공을 다시 천공하여서는 안 된다. 천공 중에는 이상 용출수, 가스의 분출, 지질의 변화 등이 있을 경우에는 즉시 천공 을 중지하고 필요한 조치를 취하여야 한다.
- 8) 발파 - 발파로 인한 소음, 지반진동 등 주변환경에 미치는 영향을 고려하여 필요한 경우

에는 그 대책을 강구하여야 한다. 발파작업 시에는 총포도검화약류 등 단속법 및 동법 시행령, 근로안전관 리규정, 기타 관계법규 등을 준수하여야 한다. 발파작업은 화약류관리 보안책임자의 감독 하에 진행되어야 한다. 발파 후 굴착면을 따라 뜬돌의 잔존여부를 확인하고 필요시 안전하게 제거하여야 한다. 이를 위하여 필요한 도구를 상시 마련해 두고 정기적인 점검을 실시하여야 한다.

- 9) 벼력처리 - 터널의 연장이 긴 병렬터널인 경우에는 벼력처리의 효율을 감안하여 일정한 간격으로 횡방향 연결통로를 설치하는 방안을 검토하여야 한다. 벼력의 용적 증가는 지반의 조건과 특성, 벼력의 크기 및 혼합상태 등에 따라 다르므로 윤반 시의 용적변화와 사토 시의 용적변화를 다르게 적용한다. 벼력이 환경 오염을 유발할 수 있는 암종으로 판명되어 환경관련 기준을 초과한 경우에는 중화처리 또는 2차오염이 발생하지 않도록 처리하여야 한다.
- 10) 솗크리트 - 솗크리트는 굴착된 지반의 굴곡부를 매우고 절리면 사이를 접착시킴으로써 응력집중현상을 피하도록 타설되어야 하며 굴착면을 피복하여 풍화, 누수 및 세립자 유출 등을 방지하도록 하여야 한다. 솗크리트 타설공법은 지반조건, 터널연장, 단면크기, 굴착공법, 용출수 유무 등을 고려하여 적정성을 검토한 후 결정하여야 한다. 솗크리트는 배합 및 작업방법에 따라 건식과 습식으로 구분하며 필요에 따라 강재 또는 기타 재질의 섬유도 혼합하여 사용할 수 있으며, 이때에는 철망을 생략할 수 있다. 고강도 솗크리트가 마감면이 되는 경우에는 솗크리트의 안정성을 확보할 수 있는 대책을 세워야 한다. 고강도 솗크리트가 최종 마감재로 사용되는 경우에는 소요 두께 및 층별 기능 확보를 위해 각 층별로 다른 성능의 솗크리트를 타설할 수 있다. 솗크리트 타설기계는 기계적 특성 보유 유무, 시공조건 등을 검토하여 선정하 여야 하며 내압에 대한 안전성, 내구성을 확보하고 소정의 배합재료를 연속하여 압송할 수 있어야 한다. 솗크리트 타설기계는 굴착면 인접부까지 접근이 가능하여야 하며 요구되는 기능을 발휘할 수 있는 부속기기를 갖추어야 한다.
- 11) 강지보재 - 강지보재는 일반적으로 구조용 H형강, U형강, 격자지보 등을 사용하며 굴착면이나 솗크리트에 밀착되어 하중이 강지보재에 고루 분포되도록 하고, 콘크리트라이닝의 두께가 확보될 수 있도록 정확한 제작과 시공을 하여야 한다. 강지보재 시공 시에는 지반조건에 따라 적절한 간격을 유지하고 연결재의 시공을 철저히 하여야 한다.
- 12) 록볼트 - 록볼트가 인장력을 발휘하도록 시공할 경우에는 발생축력을 검토하여 록볼트 재질과 형상을 결정하고 인발내력을 확인하여야 한다. 록볼트 재질, 지압판, 정착형식 및 정착재료 등은 록볼트 시공성을 고려하여 선정하여야 한다. 록볼트에 프리스트레스를 도입할 경우 프리스트레스는 록볼트 항복응력의 80% 이하가 되도록 하여야 한다. 록볼트 천공 시 지반조건상 공벽 자립성이 불량한 경우에는 자천공 록볼트를 사용할 수 있으며, 긴급한 록볼트 기능 도입이 요

구되는 경우에는 마찰력을 즉시 발휘시킬 수 있는 구조의 록볼트를 사용하여야 한다. 8m 이상 긴 록볼트를 설치할 필요가 있는 경우에는 일반 록볼트와 함께 긴 케 이블볼트를 조합하여 사용할 수 있다. 천공기계는 지반조건, 터널 단면 크기와 형상, 연장, 굴착공법, 천공길이, 본 수 등을 고려하여 선정하여야 한다. 천공 도중 천공각도를 일정하게 유지시킬 수 있는 기계를 선정하여야 한다. 록볼트의 삽입, 정착, 조이기 등에 사용하는 기계는 록볼트 정착형식에 적합한 것을 선정하여야 한다. 지반조건 및 암판정 결과를 분석하여 록볼트가 불필요하다고 판단되는 경우에는 감독원의 확인을 통하여 록볼트 설치 여부를 결정할 수 있다.

- 13) 배수 및 방수 - 배수형 방수형식 터널에서 터널 내부로의 유입수가 과다할 경우에는 차수그라우팅 등을 실시하여 유입수를 최소화하여야 한다. 배수형 방수형식 터널 시공구간의 지반이 세립토사를 다량 함유하고 있을 경우에는 부직포 두께의 증가 또는 드레인보드 병용 등을 통하여 터널 배면 토사가 유출되지 않도록 함과 아울러 배수시설이 장기간 동안 기능을 유지할 수 있도록 조치하여야 한다. 방수막 설치작업 시 부착기구, 배근 등에 의해 방수막이 손상되지 않도록 하여야 한다. 지하수 유입이 심한 부분에는 방수막과 솗크리트면 사이에 유입 지하수가 고 이지 않도록 추가의 배수대책을 강구한 후 방수막을 부착하여야 한다.
- 14) 거푸집 - 1회 타설 거푸집의 길이는 시공성, 안전성 및 콘크리트 품질에 미치는 영향 등을 감안하여 결정하여야 한다. 거푸집은 조립과 해체가 용이하며 이동성이 좋고, 견고한 구조가 되도록 제작하여야 하며 콘크리트 투입 및 타설상태 확인 등을 위한 적당한 크기와 수의 작업구를 두어야 한다. 측면판에 지수판을 붙이는 경우에는 지수판의 기능이 발휘되도록 하여야 한다. 인버트 콘크리트의 타설 시 인버트 거푸집을 사용하여 타설하여야 하며, 콘크리트 타설시 압력을 충분히 견딜 수 있어야 한다. 연직갱에 사용되는 거푸집은 콘크리트의 압력과 근접발파의 진동이나 벼력 적재기 등 장비에 의한 충격에 견딜 수 있는 견고한 구조이어야 하며 시공 전 작동상태, 안전성 등을 확인하여야 한다. 경사갱에 이용되는 거푸집은 하부로 낙하되지 않도록 경사갱의 기울기에 대하여 확실히 고정될 수 있는 견고한 구조이어야 한다. 기울기가 급한 경사갱 및 수압관로의 경우는 주변지반조건에 적합한 두께와 구조가 되도록 시공하여야 한다.

- 15) 콘크리트 타설 - 콘크리트라이닝은 주지보재의 시공이 완료된 후 계측결과를 토대로 변위가 수렴된 것을 확인한 후 가능한 한 조기에 시공하여야 한다. 굴착과 병행하여 콘크리트라이닝을 시공하여야 하는 경우에는 발파진동으로 인한 영향을 고려하여 이격거리를 유지하여야 한다. 변위가 완전히 수렴되지 않은 상태에서 콘크리트라이닝을 타설하게 될 경우에는 변위량과 변위속도를 기준으로 콘크리트 타설 시기를 결정하되, 소산되지 않고 남은 이완하중 및 잔류수압 등에 저항할 수 있는 구조적

성능을 보유해야 한다.

4. Establish Activity Relationships

시공계획은 공사규모와 공사기간, 지반조건과 주변여건, 공사용 기계와 각종 설비 및 시공법과 시공순서 등을 포함하여 안전하고 경제적으로 계획되도록 하여야 한다. 공사 중 문제발생 시에는 시공계획의 수정과 변경이 가능하도록 하여야 한다.

시공계획은 각 공종 간 휴지시간을 최소화하여 연속적인 작업이 이루어지도록 하고 기계화 시공을 우선하여 계획되도록 하여야 한다.

시공계획은 공사의 안전성과 시공성, 공법의 적용성을 우선적으로 고려하여 계획하되 건설비와 유지관리비도 포함하여 경제적인 계획이 되도록 하여야 한다. 시공계획은 공사 중과 유지관리 중에 발생할 수 있는 환경피해를 최소화하고 건설폐기물의 저감, 재활용, 처리 및 처분 등 환경보존을 배려한 계획을 수립 하여야 한다.

시공계획에는 품질 및 안전관리 대책을 포함하여야 한다.

또한 시공계획은 준비, 갱구부 시공, 굴착 및 벼력처리, 지보재시공, 계측관리, 방수 및 배수, 콘크리트라이닝, 부대공 등으로 구분하여 효율적인 시공법이 되도록 하여야 한다.

공정계획은 공사규모, 순서, 시공방법 및 환경영향을 고려하여 전산화된 상용 의 공정관리 기법에 의한 작업수행이 가능하도록 수립하여야 한다. 수립된 공정계획은 정당성과 일정계획, 진도계획, 자원계획, 예산 및 비용분석 평가의 기초자료가 될 수 있어야 한다.

앞서 말한 것들을 모두 고려해보았을 때, 터널 공사를 함에 있어서 activity들의 순서는

인허가 - 입지환경조사 - 시추 - 물리탐사 - 계획 및 준비 - 조사 및 관측 - 정리 및 점검 - 터파기 - 갱문 - 천공 - 발파 - 벼력처리 - 콘크리트 - 양생 - 강지보재 - 롤볼트 - 와이어매쉬 - 배수 및 방수 - 철근배근 - 거푸집 - 콘크리트 타설 - 타일붙임 - 강도시험

이 적절해 보인다.

5. Draw a Network Diagram

네트워크 다이어그램(Network Diagram)은 프로젝트를 구성하는 활동들의 논리적인 연관관계를 도식적으로 표현한 것이다. 따라서 네트워크 다이어그램은 활동들의 순서를 표현한 것으로 의존연관도(Dependency Diagram) 또는 논리연관도(Logical Network)로 불리기도 한다. 네트워크 다이어그램은 크게 AOA(Activity On Arrow) 방식과 AON(Activity On Node) 방식으로 작성할 수 있는데, 일반적으로 AON 방식을 사용한다.

AOA 방식은 화살도형법(ADM: Arrow Diagramming method)이라고도 하며, 활동을 화살표 위에 표시하는 방식이다. 화살표는 활동의 진행방향을 나타내며, 화살표들을 연결하는 원모양(일명 노드)은 하나의 이벤트(사건)로 표현된다. AON 방식은 선후행관계도법(PDM: Precedence Diagramming method)이라고도 하며, 활동들이 노드(Node)상에 표시되며 화살표는 활동들간의 논리적인 연관관계를 표현한다. 근래의 대부분의 프로젝트 관리 소프트웨어

에서는 AON 방식을 사용한 네트워크 다이어그램을 지원하고 있으며, 대부분의 프로젝트에서 사용되고 있는 방식이다.

네트워크 다이어그램을 작성하기 위해서는 기본적으로 활동들의 논리적 연관관계, 의존성의 유형에 대해 알아야 할 필요가 있다. 활동들의 논리적인 연관관계는 크게 종료-시작(FS: Finish to Start): 선행활동은 후행활동이 시작되기 전에 완료되어야 하는 관계로 대부분 활동의 논리적인 연관관계가 이러한 형태이다. 종료-종료(FF: Finish to Finish): 선행활동과 후행활동은 동시에 시작할 수는 있지만, 선행활동이 종료되기 전에는 후행활동이 종료될 수 없는 관계이다. 시작-시작(SS: Start to Start): 선행활동과 후행활동은 동시에 시작할 수는 있지만, 선행활동이 시작되기 전에는 후행활동이 시작될 수는 없는 관계이다. 시작-종료(SF: Start to Finish): 선행활동은 후행활동이 종료되기 전에 시작되어야 하는 관계를 의미하나, 현실적으로 거의 발생하지 않는 논리적 연관관계 유형이다.

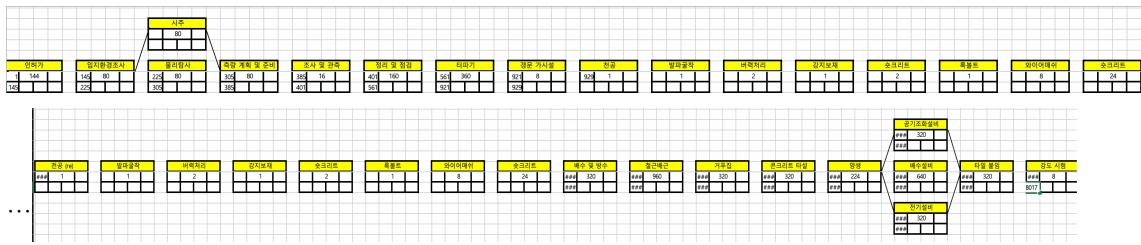
이러한 연관관계가 어떤 의존성을 가지고 있는 지도 파악해야 한다. 강제적 의존성(Mandatory Dependencies): 활동들의 본질 상 임의로 정할 수 없는 미리 정해진 의존성으로 마음대로 논리적 연관관계를 바꿀 수 없다. “Hard logic”이라고도 한다. 임의적 의존성(Discretionary Dependencies): 프로젝트 팀에 의하여 명시된 의존성으로 프로젝트 팀이 필요에 의해 논리적 연관관계를 변경할 수 있다. “Soft logic”이라고도 한다. 외부 의존성(External Dependencies): 프로젝트 활동과 프로젝트에 해당되지 않는 활동의 관계를 의미한다. 예를 들면, 소프트웨어 프로젝트에서 테스팅 활동은 외부 공급업체의 하드웨어 납품에 의존하는 경우, 혹은 건설 프로젝트에서 부지 정지공사(Site preparation)가 시작되기 전에 환경 공청회(Environmental hearings)가 실시되어야 하는 것 등이 외부 의존성의 예가 될 수 있다.

두 활동간의 논리적 연관관계와 의존성 외에도 추가적으로 지연시간(Lag Time)과 선행시간(Lead Time)이 파악되어야 한다. 즉, 논리적 연관관계가 종료-시작(FS) 관계이면서 강제적 의존성을 가지고 있는 A, B 활동이 있다고 하자. 이 경우 A 활동이 완료되면 B 활동이 시작되어야 하나, 특정 이유로 인해 B 활동을 바로 시작할 수 없는 대기시간(Waiting Time)이 발생한다면, 지연시간을 고려해야 한다. 프로젝트 팀에서 임의적 의존성으로 설정해 놓은 종료-시작(FS) 관계이지만, 필요에 의해 A 활동이 끝나기 전에 B 활동을 시작해야 하는 경우가 발생할 수도 있다. 이런 경우 두 활동 간에는 선행시간이 적용 되어야 한다.

프로젝트 매니저가 일정계획 수립과 일정 관리를 위해서 네트워크 다이어그램을 개발해 두면 많은 이점이 있다.

WBS(Work Breakdown Structure)와 프로젝트 시간에 근거하여 프로젝트 목적을 달성하기 위해서 수행해야 하는 세부 활동들의 관리를 쉽게 할 수 있다. 즉, 업무 활동들에 필요한 자원의 예측을 보다 정확하게 할 수 있으며, 여러 많은 프로젝트에 적용되는 반복적인 계획 수립 형태를 확인하여 프로젝트 간의 관련성, 자원 한계 등을 반영하여 업무 활동 간에 우선 순위를 재조정할 수 있다.

다음은 거가대교 터널 시공의 Network diagram이다.



중간에 생략된 부분은

천공-발파굴착-버력처리-강지보재-숏크리트-록볼트-와이메쉬-숏크리트

이며, 한 번 발파 (3m기준) 싸이클 당 40일이 걸렸으며 위 과정이 총 94번 반복되어 공사 일은 총 8017일이 걸렸다.

6. Assign Resources and Cost

전 세계에 자원은 한정되어 있고, 경제활동은 언제나 진행중이기 때문에 적절한 자원의 배치와 인력의 배분이 필요하다. 인간 활동에 필요한 물자를 획득하기 위한 행위를 경제활동이라 하고, 사회활동을 유지하고 향상시켜가는 원천으로서 노동의 대상이 되는 사물을 자원이라고 한다. 자원은 크게 토지, 자본, 노동으로 나눌 수 있다. 이 자원들은 한정이 되어 있기 때문에 자원을 효율적으로 배분하는 방법에 대해서 알아본다.

자원 배분이란 필요로 하는 수 많은 재화와 서비스 가운데서 무엇을, 얼마나, 어떻게 생산하여 이를 어떻게 나눌 것인가의 과제를 해결하는 체계적 방법을 말한다. 그렇다면 자원 배분도 효율적으로 하여야 하는데 그 이유는 경제재는 희소하므로 그 재분에는 효율성이 보장되어야 하고, 효율적인 자원 배분이 이루어질 때 경제가 성장하고 사회의 안정과 발전이 지속될 수 있으므로 효율적인 자원 배분이 필요하다. 이하 터널 공사시 필요한 효율적인 자원 배분과 비용에 대해 알아본다.

먼저 공사 시 필요한 인력의 종류가 많았는데, 우리는 크게 특급기술자와 고급기술자를 묶어서 A로, 중급기술자와 초급기술자를 묶어서 B로, 초급기능사와 인부를 묶어서 C로 정리하였다.

Activity	인허가	입지환경조사	시추	물리탐사	측량 계획 및 준비	조사 및 관측	정리 및 점검	터파기	경문 가시설	천공	발파 굴착	버력처리	숏크리트
Resource	1A, 2B	3B	5B, 5C	13A, 12B, 13C	20A, 20B	9A, 24B, 18C	30A, 10B	4A, 2C	5A, 3C	8B, 9C	1A, 5B, 8C	2B, 4C	2B, 4C
Duration(day)	18	10	10	10	10	2	20	45	1	1	1	2	2
Expansion	1A, 2B	3B	5B, 5C	13A, 12B, 13C	20A, 20B	9A, 24B, 18C	30A, 10B	4A, 2C	5A, 3C	12B, 13C	1A, 7B, 12C	3B, 6C	3B, 6C
강지보재	록볼트	와이어메쉬	양생	배수 및 방수	철근배근	거푸집	콘크리트 타설	타일 붙임	강도 시험	공기조화설비	배수설비	전기설비	
2B, 4C	2B, 4C	2B, 4C	1B, 1C	5B, 2C	10C	3A, 4B, 5C	12B	8A, 3C	3C	8A, 3C	8A, 3C	8A, 3C	
1	1	8	224	8	24	8	8	1	1	1	2	1	
3B, 6C	3B, 6C	3B, 6C	1B, 1C	7B, 3C	15C	4A, 6B, 7C	18B	12A, 4C	4C	12A, 4C	12A, 4C	12A, 4C	
Activity	버력처리	숏크리트	터널지보재	강지보재	록볼트	와이어메쉬	양생	배수 및 방수	철근배근	거푸집	콘크리트 타설	타일 붙임	
Resource	2B, 4C	2B, 4C	2B, 4C	2B, 4C	2B, 4C	2B, 4C	1B, 1C	5B, 2C	10C	3A, 4B, 5C	12B	8A, 3C	
Duration	2	3	1	1	1	1	28	1	3	1	1	1	

7. Determining Duration

소요 시간(duration)이란 작업을 수행하는 데 필요한 시간으로, 네트워크가 수치적 합리성을

특색으로 하는 것이므로 그 견적은 가장 중요하다. 일반적으로는 건설 공사의 경우 1점 견적을 최가능 값으로 하여 계산하지만 이와는 달리 3점 견적이 있다. 소요 시간 결정의 요소는

- ① 일의 종류와 양의 상태,
- ② 작업 인원, 사용 기계의 종류 및 수와 능률의 초기 · 종기의 저하도,
- ③ 가동률,
- ④ 기후의 영향,
- ⑤ 1일당의 가동 시간,
- ⑥ 기계 조달 등의 상황
- ⑦ 토질, 물의 상태 공법

등이 있다.

중죽도 터널 공사시 각 activity에 대해 위 요소들을 고려해 소요 시간을 계산하였고, 그 결과는 다음과 같다.

Activity	인허가	입지환경조사	시추	물리탐사	측량 계획 및 준비	조사 및 관측	정리 및 점검	터파기	경문 가시설	천공	발파 굴착	버력처리	숏크리트
Resource	1A, 2B	3B	5B, 5C	13A, 12B, 13C	20A, 20B	9A, 24B, 18C	30A, 10B	4A, 2C	5A, 3C	8B, 9C	1A, 5B, 8C	2B, 4C	2B, 4C
Duration(day)	18	10	10	10	2	20	45	1	1	1	1	2	2
Expansion	1A, 2B	3B	5B, 5C	13A, 12B, 13C	20A, 20B	9A, 24B, 18C	30A, 10B	4A, 2C	5A, 3C	12B, 13C	1A, 7B, 12C	3B, 6C	3B, 6C
강지보재	록볼트	와이어매쉬	양생	배수 및 방수	철근배근	거푸집	콘크리트 타설	타일 붙임	강도 시험	공기조화설비	배수설비	전기설비	
2B, 4C	2B, 4C	2B, 4C	1B, 1C	5B, 2C	10C	3A, 4B, 5C	12B	8A, 3C	3C	8A, 3C	8A, 3C	8A, 3C	
1	1	8	224	8	24	8	8	1	1	1	1	2	1
3B, 6C	3B, 6C	3B, 6C	1B, 1C	7B, 3C	15C	4A, 6B, 7C	18B	12A, 4C	4c	12A, 4C	12A, 4C	12A, 4C	
Activity	버력처리	숏크리트	터널지보재	강지보재	록볼트	와이어매쉬	양생	배수 및 방수	철근배근	거푸집	콘크리트 타설	타일 붙임	
Resource	2B, 4C	2B, 4C	2b, 4C	2B, 4C	2B, 4C	2B, 4C	1B, 1C	5B, 2C	10C	3A, 4B, 5C	12B	8A, 3C	
Duration	2	3	1	1	1	1	28	1	3	1	1	1	

8. Calculate early and late start/finish times

Early and late start와 early and late finish times을 계산하는 방법에 대해 설명한다.

t = single estimate of mean activity duration

TE = earliest even occurrence time

TL = latest allowable event occurrence time

ES = earliest activity start time (가장 일찍 시작 가능한 시간)

EF = earliest activity finish time (가장 일찍 마감 가능한 시간)

LS = latest allowable activity start time (가장 늦게 시작해도 되는 시간)

LF = latest allowable activity finish time (가장 늦게 마감해도 되는 시간)

FF (Free Float) = 다음 엑티비티 들어가기 전까지 지연시간

TF (Total Float) = 모든 프로젝트가 완성되기까지 지연될 수 있는 시간

S = total activity slack (총 여유 시간)

Slack = LS - ES = LF - EF

CP (critical path) : Slack이 “0”인 작업들을 이어놓은 주 공정들

다음은 터널공사의 시간을 계산한 결과다.

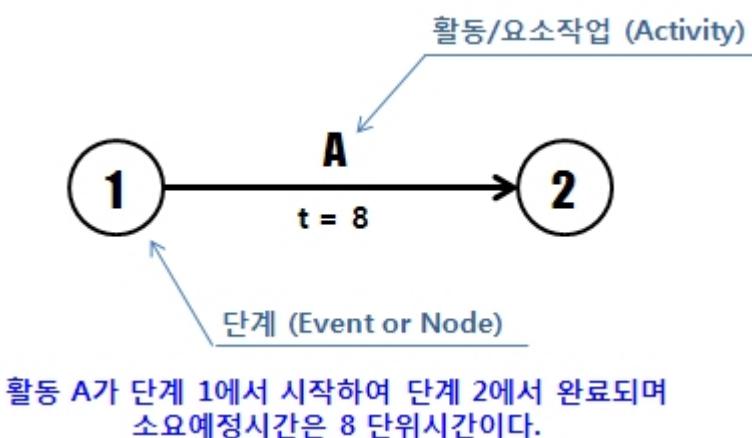
9. Compute float values and identify the critical path (PERT)

PERT (Project Evaluation Review Technique)는 ‘프로젝트 평가 및 재검토 기법’으로 번역할 수 있으며, 대규모 프로젝트에서 일정계획을 작성하고 진행 상황을 관리하기 위한 계획수립 기법이다. 대개 규모가 크면서 비반복적인 프로젝트들은 상호간에 관련이 많은 업무들로 구성되어 있다.

그런데 이러한 업무들은 종류도 다양하고 각각 결합하거나 동시에 이뤄지는 내용들이 많다. 따라서 전체 프로젝트를 효율적으로 관리할 수 있는 네트워크 계획 및 통제 시스템이 필요한데, 이런 요구에 따라 개발되어 사용되고 있는 것이 퍼트와 CPM이다.

퍼트는 프로젝트를 완료하는데 필요한 활동의 순서, 시간, 자원 등을 흐름도로 나타내는 것이다. (참고 : ‘자원’이란, 생산활동의 요소인 사람, 자본, 기계, 재료, 방법 등을 말한다.) 또한, PERT는 확률적인 추정치를 이용하여 단계중심의 확률적 모델을 전개하며 최단기간에 목표를 달성하기 위해 만들어진 기법이다.

작성절차는 다음과 같다.



- ① 프로젝트 목표를 설정하고 필요한 작업(Activity)를 선정한다.
- ② 작업 목록표(Activity List)를 작성한다. (현실적으로 Event 중심으로 적당하게..)
- ③ 활동과 단계를 연결한 네트워크를 만들고, 활동 및 단계의 명칭을 기입한다.

단, PERT Network의 실제 작업은 작업목록표 (Activity List)를 작성함에 있어서

- ① 작업을 명확하게 나누기 어렵거나,
- ② 어느수준까지 작업을 나눠야 하는지 모호하거나,
- ③ 어떤 작업들이 있는지 정확하게 파악을 못했거나,

④ 작업목록이 너무 많아서 등의 문제들이 발생할 수 있다.

다음은 PERT 기법으로 각 엑티비티들의 공사를 얼마안에 완성시키는 것이 가능한지 알아본다. 다음은 각 엑티비티들의 PERT기법으로 기간을 계산하는데 필요한 목록들이다.

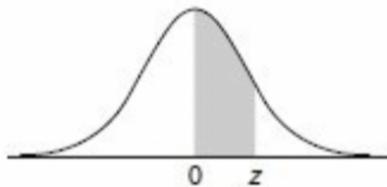
Name	label	precede	Mean duration	3-time estimate			SD	Variance				
1 콘크리트			3.000	2.40	3	3.60	0.200	0.04				
26 배수 및 방수	1	1.033	1.00	1	1.20	0.033	0.001					
27 철근배근	26	3.000	2.40	3	3.60	0.200	0.040					
28 거푸집	27	1.033	1.00	1	1.20	0.033	0.001					
29 콘크리트타설	28	1.033	1.00	1	1.20	0.033	0.001					
30 배수 및 방수	29	1.033	1.00	1	1.20	0.033	0.001					
31 철근배근	30	3.000	2.40	3	3.60	0.200	0.040					
32 거푸집	31	1.033	1.00	1	1.20	0.033	0.001					
33 콘크리트타설	32	1.033	1.00	1	1.20	0.033	0.001					
34 배수 및 방수	33	1.033	1.00	1	1.20	0.033	0.001					
35 철근배근	34	3.000	2.40	3	3.60	0.200	0.040					
36 거푸집	35	1.033	1.00	1	1.20	0.033	0.001					
37 콘크리트타설	36	1.033	1.00	1	1.20	0.033	0.001					
38 배수 및 방수	37	1.033	1.00	1	1.20	0.033	0.001					
39 철근배근	38	3.000	2.40	3	3.60	0.200	0.040					
40 거푸집	39	1.033	1.00	1	1.20	0.033	0.001					
41 콘크리트타설	40	1.033	1.00	1	1.20	0.033	0.001					
42 배수 및 방수	41	1.033	1.00	1	1.20	0.033	0.001					
43 철근배근	42	3.000	2.40	3	3.60	0.200	0.040					
44 거푸집	43	1.033	1.00	1	1.20	0.033	0.001					
45 콘크리트타설	44	1.033	1.00	1	1.20	0.033	0.001					
70 양생	45	28.000	28.00	28	28.00	0.000	0.000					
72 배수설비	70 70		3.000	2.40	3	3.60	0.200	0.040				
74 타일붙임	71 72 73	1.033	1.00	1	1.20	0.033	0.001					
75 천공	10 49 74	1.033	1.00	1	1.20	0.033	0.001					
합계			66.567		66		0.547	0.299				
		X		66								
		Z_score		-1.0365083								
						Z_score = (X-66.567) / 0.547						

여기서 합계는 66일이 나왔고, 이 말은 위 사진에 있는 엑티비티들이 진행되는데 걸리는 공사기간은 평균 66일 정도가 걸린다는 소리다. 그렇다면 임의의 날짜를 정해 다음과 같은 공식을 활용해 임의의 날짜 안에 공사가 끝마쳐질 확률을 구해본다.

$$Z_{score} = \frac{X - 66.567}{0.547}$$

위 식으로 계산하면 Z_score는 -1.0365가 나온다. 이 값을 확률분포표로 찾으면

Area between 0 and z



z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.0000	0.0040	0.0080	0.0120	0.0160	0.0199	0.0239	0.0279	0.0319	0.0359
0.1	0.0398	0.0438	0.0478	0.0517	0.0557	0.0596	0.0636	0.0675	0.0714	0.0753
0.2	0.0793	0.0832	0.0871	0.0910	0.0948	0.0987	0.1026	0.1064	0.1103	0.1141
0.3	0.1179	0.1217	0.1255	0.1293	0.1331	0.1368	0.1406	0.1443	0.1480	0.1517
0.4	0.1554	0.1591	0.1628	0.1664	0.1700	0.1736	0.1772	0.1808	0.1844	0.1879
0.5	0.1915	0.1950	0.1985	0.2019	0.2054	0.2088	0.2123	0.2157	0.2190	0.2224
0.6	0.2257	0.2291	0.2324	0.2357	0.2389	0.2422	0.2454	0.2486	0.2517	0.2549
0.7	0.2580	0.2611	0.2642	0.2673	0.2704	0.2734	0.2764	0.2794	0.2823	0.2852
0.8	0.2881	0.2910	0.2939	0.2967	0.2995	0.3023	0.3051	0.3078	0.3106	0.3133
0.9	0.3159	0.3186	0.3212	0.3238	0.3264	0.3289	0.3315	0.3340	0.3365	0.3389
1.0	0.3413	0.3438	0.3461	0.3485	0.3508	0.3531	0.3554	0.3577	0.3599	0.3621
1.1	0.3643	0.3665	0.3686	0.3708	0.3729	0.3749	0.3770	0.3790	0.3810	0.3830

0.3531이 나오고 이 값을 0.5에서 빼면 0.1469가 나온다. 공사는 14.69%의 확률로 처음 설정한 기간에 완료한다.

따라서 최종 공기를 50% mean값인 약 67일로 계산한다. 그리고 이는 전체 공사기간의 일부분이기 때문에 이 결과가 나온다고 할 수 있다.

10. Compute float values and identify the critical path

PERT/CPM의 정의는 project의 계획 및 통제에 사용되는 그래픽 기법이다. 이 기법은 시간, 비용 및 자원 가용도를 개별적으로 혹은 조합해서 다루기 위해 개발되었다. CPM은 과거 실적이나 경험 등의 확정적 결과값을 이용하여 활동중심의 확정적 모델을 전개하고 목표기일 단축과 비용 최소화를 달성하기 위해 만들어진 기법이다.

이 기법의 활용 목적은 다음 네 가지가 있다.

- 프로젝트 작업 활동을 그래프로 표현
 - 프로젝트 완료에 필요한 시간을 평가
 - 프로젝트 완료에 가장 중요하게 영향을 미치는 작업을 파악
 - 프로젝트를 지연 시키지 않고 연기될 수 있는 작업 활동을 파악
- 등이 있다.

PERT/CPM의 적용 절차는 다음과 같다.

활동정의 - 네트워크 구성 - 활동의 시간 추정치 결정 - 평균소요시간, 분산 산출 - 전방, 후방 계산, 여유시간 산출 - 주공정 산출 - 공기 추정

II. Management of Resources

1. Resource Allocation (SM)

자원이 제한되어 있을 때 다음과 같은 방법을 통해 자원을 배분할 수 있다.

- Resource Allocation : 제한된 자원을 배분한다.
- Resource Leveling : 프로젝트의 기간이 바뀔 수 없을 때 필요한 자원의 효율적인 사용을 고려한다.

자원 배분에는 세 가지 방법이 있는데 series method, parallel method와 brooks method가 있다. 그 중 우리는 series method와 parallel method로 자원을 배분하는 것을 하려고 한다. 단, 두 가지 방법을 사용할 땐, 인력이 최대 5M과 2H를 넘을 수 없다. (M-masons, H-helpers.) 먼저 series method에 대해 알아본다.

Series method란 전 엑티비티가 완성되자마자 다음 엑티비티가 시작될 수 있게 일정을 짜는 방법이다. 이 방법을 사용할 시, 하나의 엑티비티를 진행할 때는 다른 엑티비티는 진행될 수 없다.

Precede는 activity가 실행되기 전에 수행되어야 하는 activity를 나타낸 것이고, A,B,C는 각각의 인부 수, R은 각각의 인부 수의 합으로 각 엑티비티에 배분되어야 하는 총 인부 수이다.

그 결과 다음과 같이 정리가 되며, 총 60개의 activity가 있다.

Allocation의 경우, 아이디어는 할당되는 곳에 1을, 아닌 곳에 0을 넣은 dataframe을 엑셀 파일로 저장하여 1인부분을 색칠하여 표시하는 것이다. 뒤에 나올 공기 줄인 network의 앞부분만 선정하여 진행하였다. Allocation의 원리를 담은 코드는 아래와 같다. 각각 과정에 대해서는 주석표시하였다. 아래는 SM에 대한 코드와 결과이다.

```

for day in range(conP): #day는 날짜를 나타냄. 즉 column 수(최대공기)만큼 반복함
    aLimit = 24 #하루에 배분될 수 있는 최대 인부 수
    bLimit = 24
    cLimit = 19

    for item in candidateIdx: # 그 날짜에 배분될 수 있는 activity 후보군에 대하여 반복
        #SM 이기 때문에 한번 시작한 activity는 중간에 멈출 수 없어 만약 바로 전 날짜가 실행되었으면(1) 이번도 실행
        #각 activity의 duration이 끝나지 않았으면
        if((allocationMatrix[item][day-1] == 1) & (dur[item] > 0)):
            allocationMatrix[item][day] = 1 #자원배분
            dur[item] -= 1 #배분 시 duration 1 감소
            aLimit = aLimit - A[item] #배분되는 양만큼 인부 한계 감소
            bLimit = bLimit - B[item]
            cLimit = cLimit - C[item]
        # 각 activity의 duration이 끝나면
        if(dur[item]==0):
            for item2 in precede:
                if(name[item] in item2): # 선행이 끝났으니 선행list에서 지워준다.
                    item2.remove(name[item])

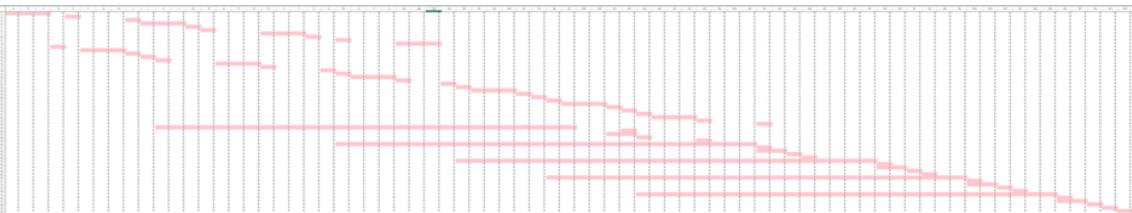
    #미리 시작한 activity에 할당을 끝내면 남은 공간에 새로 시작하는 후보군이 들어갈 수 있는지 확인한다.
    for item in candidateIdx:
        if((A[item] <= aLimit) & (B[item] <= bLimit) & (C[item] <= cLimit) & (dur[item] > 0) & (allocationMatrix[item][day-1] != 1)):
            allocationMatrix[item][day] = 1
            dur[item] -= 1
            aLimit = aLimit - A[item] #배분되는 양만큼 인부 한계 감소
            bLimit = bLimit - B[item]
            cLimit = cLimit - C[item]

        if(dur[item]==0):
            for item2 in precede:
                if(name[item] in item2):
                    item2.remove(name[item])

candidateIdx = []
LS_temp = [] #자원할당 가능 후보군의 LS
TF_temp = [] #자원할당 가능 후보군의 TF
for i in range(len(precede)):
    if not precede[i]: #선행 list가 빈 list일 때 선행node가 모두 수행되었음을 의미하기 때문에
        candidateIdx.append(i) #수행된 것을 다음 날짜의 자원할당가능 후보군으로 옮김
        LS_temp.append(LS[i])
        TF_temp.append(TF[i])

c = pd.DataFrame({'candidateIdx':candidateIdx,'LS':LS_temp,'TF':TF_temp})
c = c.sort_values(['LS','TF']) # LS에 따라 정렬 후 같은 값일 때 TF에 따라 정렬
candidateIdx = list(c.candidateIdx) #정렬된 순서로 진행되도록 후보군 리스트 정렬

```



A를 21, B를 15, C를 15로 설정하였을 때, SM은 75일동안 자원배분되었다.

2. Resource Allocation (PM)

두 번째 방법은 parallel method이다. 이 방법은 series method와 다르게 하나의 엑티비티를 진행할 때 다른 엑티비티가 진행될 수 있다. 이 방법은 동시에 여러 개의 엑티비티가 진행될 수 있으므로 시간을 절약하고 비용을 절감하는데 효율적인 방법으로 공정 관리 할 때 많이 이용되고 있는 방법이다. Parallel method를 이용하여 스케줄을 짜고 leveling을 하였다. 이 방법을 쓰는 경우 몇 가지 법칙이 있다.

이 방법에서는 제한된 동일한 자원을 필요로하는 두 개의 다른 엑티비티가 진행될 경우, 가장 늦은 시작일을 가진 엑티비티에 우선 순위가 부여된다. 또한, 가장 늦은 시작일을 가진 두 가지 활동이 동시에 존재하는 경우, total float이 가장 적은 엑티비티가 우선순위가 된다. 또한, 여전히 활동이 겹치는 경우 resource가 가장 많은 것이 우선된다. 그 뒤에는 먼저 시작한 것이 우선하게 되고, 어떠한 엑티비티도 위의 경우에 해당되지 않는 경우 input order에

따라 진행하면 된다.

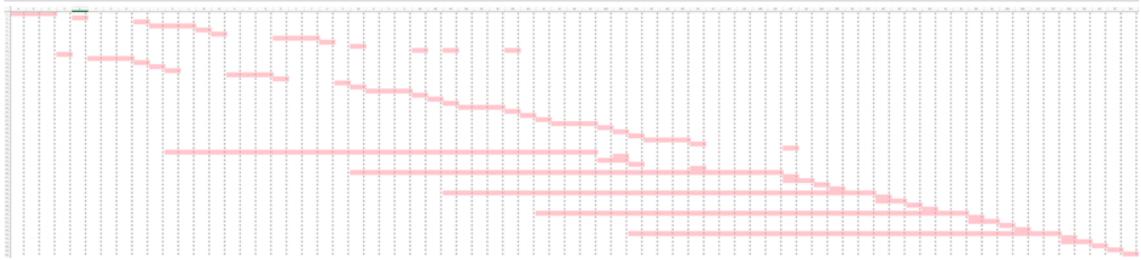
아래는 PM에 대한 코드이다.

```
#자원할당 matrix에 자원 분배를 위한 반복문 생성
for day in range(conP): #day는 날짜를 나타냄. 즉 column 수(최대공기)만큼 반복함
    aLimit = 24 #하루에 배분될 수 있는 최대 인부 수
    bLimit = 24
    cLimit = 19

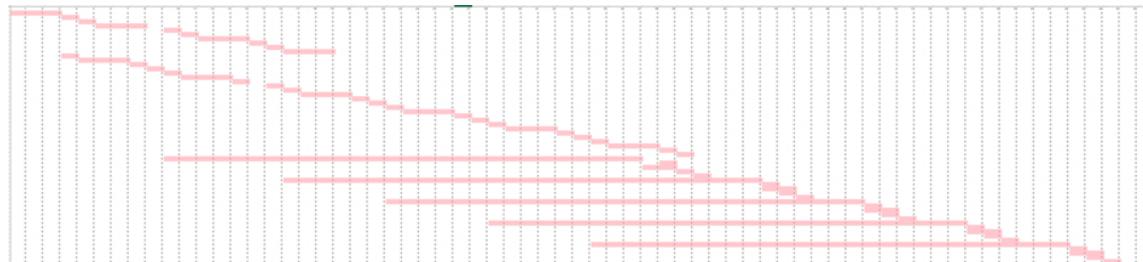
    for item in candidateIdx: # 그 날짜에 배분될 수 있는 activity 후보군에 대하여 반복
        #하루 용량 범위 내에서, 각 activity의 duration이 끝나지 않았으면
        if((A[item] <= aLimit) & (B[item] <= bLimit) & (C[item] <= cLimit) & (dur[item] > 0)):
            allocationMatrix[item][day] = 1 #자원배분
            dur[item] -= 1 #배분 시 duration 1 감소
            aLimit = aLimit - A[item] #배분되는 양만큼 인부 한계 감소
            bLimit = bLimit - B[item]
            cLimit = cLimit - C[item]
        # 각 activity의 duration이 끝나면
        if(dur[item]==0):
            for item2 in precede: # 선행이 끝났으니 선행list에서 지워준다.
                if(name[item] in item2):
                    item2.remove(name[item])

candidateIdx = []
LS_temp = [] #자원할당 가능 후보군의 LS
TF_temp = [] #자원할당 가능 후보군의 TF
for i in range(len(precede)):
    if not precede[i]: #선행 list가 빈 list일 때 선행node가 모두 수행되었음을 의미하기 때문에
        candidateIdx.append(i) #수행된 것을 다음 날짜의 자원할당가능 후보군으로 옮김
        LS_temp.append(LS[i])
        TF_temp.append(TF[i])

c = pd.DataFrame({'candidateIdx':candidateIdx,'LS':LS_temp,'TF':TF_temp})
c = c.sort_values(['LS','TF']) # LS에 따라 정렬 후 같은 값일 때 TF에 따라 정렬
candidateIdx = list(c.candidateIdx) #정렬된 순서로 진행되도록 후보군 리스트 정렬
```



A를 21, B를 15,C를 15로 설정하였을 때, PM은 73일이 걸렸고, A를 25, B를 20, C를 20으로 설정하였을 때 아래와 같이 나타나 66일인 Critical Path의 기간이 되었다.



A를 21, B를 15, C를 15로 설정하였을 때, PM은 73일, SM은 75일로 SM 이 더 오래걸리는 결과가 나타났다.

3. Resource Leveling

자원평준화는 시간의 일정을 지키고 자원에 제약을 받지 않으면서 가능한 자원의 일정량을 사용하고자 하는 문제이다. 자원평준화는 크게 세 가지로 나뉜다.

- 1 - 무제한 자원공급하의 자원분배 : 충분한 자원으로 작업완료 예정일 안에 작업완료를 목표로 자원의 분배계획을 수립하는 것이다.
- 2 - 자원제약하의 자원분배 : 제한된 자원을 가지고 최대한도로 작업을 빨리 완료하려고 자원을 적절히 분배하며 계획을 세우는 것이다.
- 3 - 장기자원계획 : 총 작업시간과 자원의 분배로써 총 비용을 최소한으로 하는 계획을 수립하는 것이다. 이때 총 비용은 자원의 사용비용, 간접비용은 물론이고, 납기지연에 따른 연대비용을 포함하게 되는 것이다. 여기서 우리는 자원제약하의 자원분배만을 다루어 본다.

자원 제약하의 자원분배의 기본 아이디어는 각 작업의 여유시간 안에서 자원의 사용을 조정하여 일시에 자원이 사용되지 않게 하는 것이다. 자원이 일시에 많이 사용되는 것을 전 작업기간에 일정하게 사용하기 위한 작업을 작업평준화 기법이라 하며, 이를 위한 많은 기법이 소개되었다. 그 중 한가지 방법을 소개하면, 프로젝트 전체 끝나는 시간에 지장이 없으면서 각 작업간의 여유시간 안에서 작업을 조정하여 자원 사용이 가능한한 평준화하는 방법이다. 진행순서는 다음과 같다.

- 1) 일정계획을 수립한다. (이 때 일정계획의 기준은 ES와 LS이다.)
- 2) 일정계획에 따른 자원 계획의 수립
- 3) 기간별 자원의 소요량을 고르게 하기 위하여 정점의 활동을 이동시킨다.

자원을 leveling하는데 있어 다음과 같은 공식을 이용한다.

$$IF(A,N) = R \times (Rv - Ro - R \times (Nr))$$

A = activity designation

N = number of free float days consumed

R = the number of resources used by the activity per day

Rv = number of resource days currently assigned to those days that will be vacated when the activity start date is changed

Ro = number of resource days currently assigned on those days that will be occupied when the activity start date is changed

Nr = the smaller value of the number of days of free float consumed and the duration of the activity

거가대교 터널시공의 레벨링 과정을 알아본다. Leveling은 움직이는 사이클 당 자원 수가 나타나도록 output파일을 작성하였다.

코드에 대한 설명은 html 파일에 있는 주석을 참고한다. 코드는 forward와 backward를 따로 수행하였고 마지막에 합쳤다.

다음과 같은 계산과정을 거친다. 중간 생략.

중간 과정에 대한 결과들은 html 파일을 참고하면 된다.

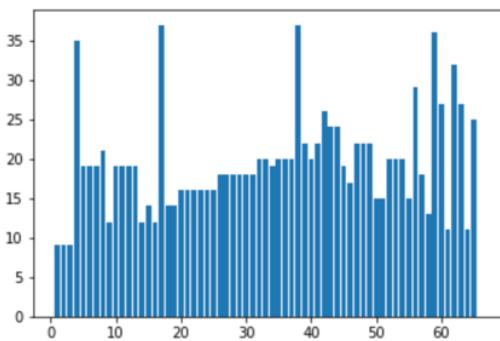
아래는 forward 결과이다.

```

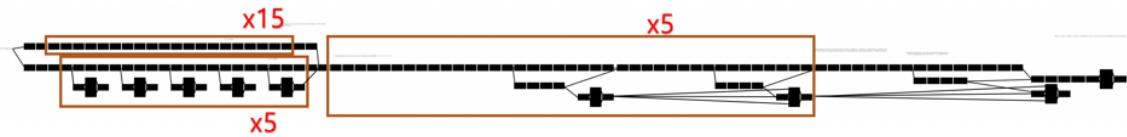
IF( 10 , 44 ) = -45
IF( 10 , 45 ) = -171
IF( 10 , 46 ) = -252
IF( 49 , 1 ) = 60
IF( 49 , 2 ) = 192
IF( 49 , 3 ) = 192
IF( 49 , 4 ) = 192
IF( 49 , 5 ) = -300
IF( 49 , 6 ) = 24
IF( 49 , 7 ) = 84
IF( 49 , 8 ) = 216
IF( 49 , 9 ) = 216
IF( 49 , 10 ) = 216
IF( 49 , 11 ) = -276
IF( 49 , 12 ) = 48
IF( 49 , 13 ) = 108
IF( 49 , 14 ) = 240
IF( 49 , 15 ) = 240
IF( 49 , 16 ) = 240
IF( 49 , 17 ) = -252
IF( 49 , 18 ) = 72
IF( 49 , 19 ) = 132
IF( 49 , 20 ) = 264
IF( 49 , 21 ) = 264
IF( 49 , 22 ) = 264
IF( 49 , 23 ) = -228
IF( 49 , 24 ) = 96
IF( 49 , 25 ) = 156
IF( 10 , 1 ) = 0
IF( 10 , 2 ) = -18
IF( 10 , 3 ) = -36
IF( 10 , 4 ) = -54
IF( 10 , 5 ) = -54
IF( 10 , 6 ) = -54
IF( 10 , 7 ) = -54
IF( 10 , 8 ) = -72
IF( 10 , 9 ) = -90
IF( 10 , 10 ) = -108
IF( 10 , 11 ) = -108
IF( 10 , 12 ) = -108
IF( 10 , 13 ) = -108
IF( 10 , 14 ) = -126
IF( 10 , 15 ) = -144
IF( 10 , 16 ) = -162
IF( 10 , 17 ) = -162
IF( 10 , 18 ) = -162
IF( 10 , 19 ) = -162
IF( 10 , 20 ) = -549
IF( 10 , 21 ) = -693
IF( 10 , 22 ) = -684
IF( 10 , 23 ) = -189
Number of Moves: 43
[9, 9, 9, 35, 19, 19, 19, 21, 12, 19, 19, 19, 12, 14, 12, 37, 14, 14, 16, 16, 16, 16, 16, 16, 18, 18, 18, 18, 18, 18, 20, 20, 19, 20, 20, 20, 37, 22, 20, 22, 26, 24, 24, 19, 17, 22, 22, 22, 15, 15, 20, 20, 20, 15, 29, 18, 13, 36, 27, 11, 32, 27, 11, 25, 0]

```

Number of Moves: 0
[9, 9, 9, 35, 19, 19, 19, 21, 12, 19, 19, 19, 12, 14, 14, 16, 16, 16, 16, 16, 18, 18, 18, 18, 18, 18, 20, 20, 19, 20, 20, 20, 37, 22, 20, 22, 26, 24, 24, 19, 17, 22, 22, 22, 15, 15, 20, 20, 20, 15, 29, 18, 13, 36, 27, 11, 32, 27, 11, 25, 0]



Backward에 대한 결과는 다음과 같다.

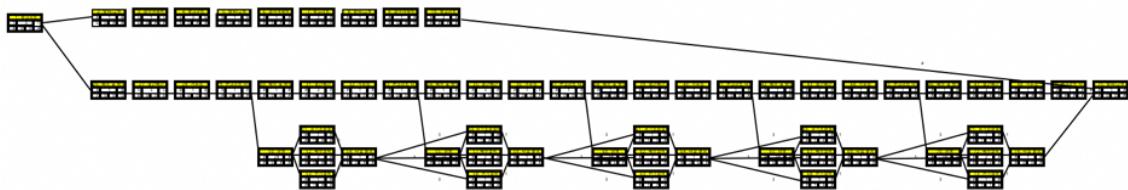


공기를 줄인 후의 network diagram은 위와 같다. 이 시점부터는 첫 번째 줄의 엑티비티들과 두 번째 줄의 엑티비티들이 합쳐져 위와 같은 싸이클을 반복하게 된다. 엑티비티는

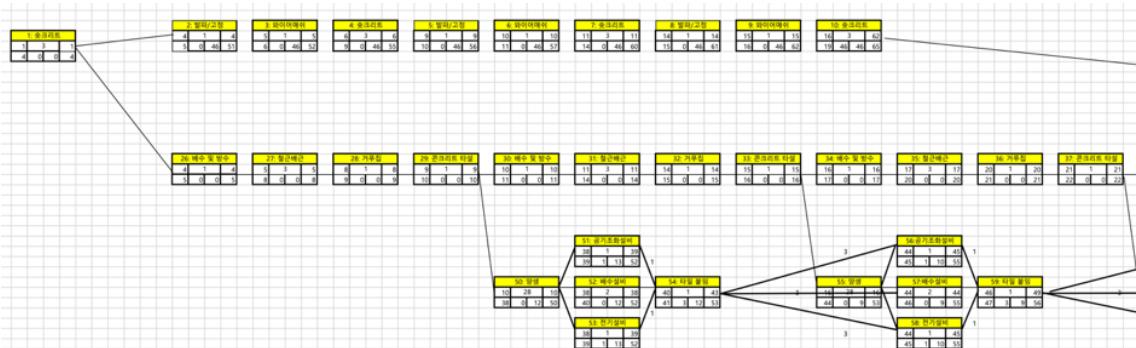
발파-발파-발파, 라이닝-발파-발파, 라이닝

으로 다섯 싸이클이 돌아간다.

위 과정으로 공사를 진행하여 완공하는데까지 걸리는 시간을 계산하면 중간 과정은 너무 길기 때문에 곱하기로 처리하였다. Allocation과 leveling을 진행하기 위한 준비과정에서 이 부분이 activity의 수가 많으며 기간도 길었으므로 지금까지 굴착한 부분을 라이닝을 진행하며 따라잡는 부분만 잘라서 실행하기로 하였다. 따라서 결정된 전체적인 network의 모습은 다음과 같다.



위 사진을 확대해보면 다음과 같은 모습을 볼 수 있다.

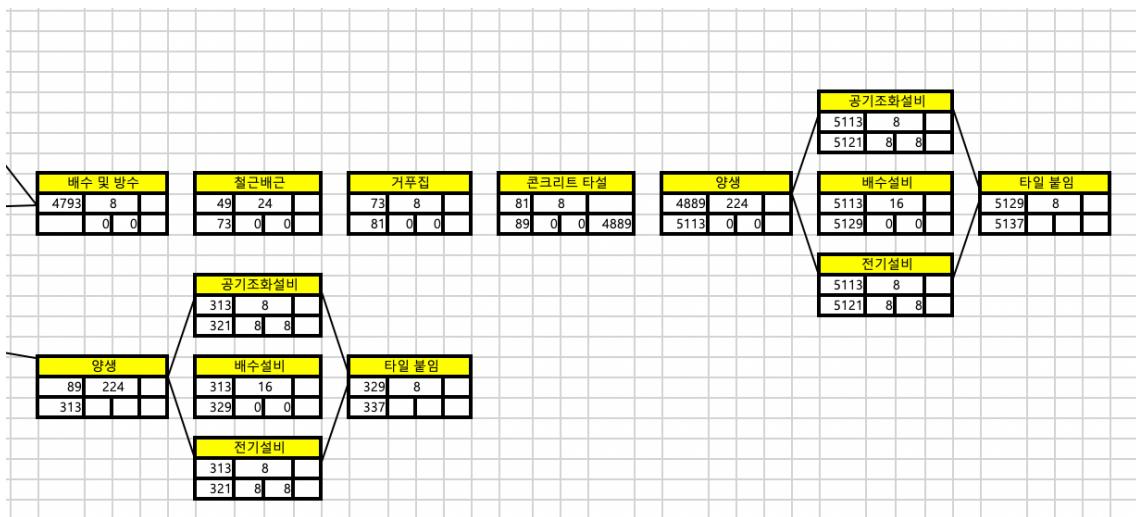


원래는 라이닝의 끝부분이 아주 훗날의 라이닝으로 이어져야 하지만 Allocation과 leveling을 진행하기 위해 위와 같이 다음 발파 전으로 잇는다.

또한 발파/고정이라고 되어있는 부분은 천공, 발파굴착, 벼력처리, 강지보재, 콘크리트의 과정을 합한 내용이다. 아래와 같다. 따라서 인력도 아래 합으로 구한다.

천공	발파 굴착	버력처리	숏크리트	터널지보재	강지보재
8B, 9C	1A, 5B, 8C	2B, 4C	2B, 4C	2b, 4C	2B, 4C
1	1	2	3	1	1

이 위의 표의 1은 2시간을 뜻하며, 모두 합하면 8로 16시간이기 때문에 약 하루로 산정하였다.



위와 같이 계산을 하면 총 공사기간은 5137일이 나온다. 이는 공기를 줄이지 않았을 때인 5137일보다 대략 3000일 정도 줄여진 값으로 실제로는 375일 정도가 단축이 가능하다.

2. Money and Network Schedules

위 1번에서는 duration을 줄이기 위해 공사 과정 중 일부 과정을 재배열/재배치하는 방법을 알아보았다. 이번 항목에서는 소요비용을 줄이기 위해 어떤 방법이 있는지 알아본다.

프로젝트를 진행함에 있어 resource의 가치는 소요되는 cost를 의미한다. Resource를 언제, 어떻게 얼마나 쓰이는지는 프로젝트가 진행됨에 있어 중요하고 이 값을 대략적으로 계산하는 것이 필요하다. CPM은 critical path method의 약자로 시간과 돈을 관리하고 계산하는 방법이다. 이 방법은 시간과 돈을 적절히 분배하고 다른 대체할 수 있는 엑티비티들과의 관계도 고려하여 원가를 계산해준다. 이 방법은 두 가지의 섹션으로 나뉘어져 있는데 첫 번째로 cash flow에 대해 알아본다.

cash flow는 지출에 대해서도 고려되어 분석된다. 지출의 시기는 직접적으로 얼마만큼의 돈을 쓸 수 있는지, 얼마만큼의 적자가 날지 분석하는데 영향을 줄 수 있으며 지출의 시기는 프로젝트를 진행함에 있어 중요한 고려요소가 된다. 비용이 고려되는 요소는 다음과 같다.

- Labor : 전체 비용의 30% 정도를 차지한다
- Equipment : 기계를 빌리거나 회사에서 지원해준다

- Materials : 프로젝트에 포함되는 자재 비용은 공사 비용의 대부분을 구성한다

두 번째 섹션은 time-cost trade-offs다. 여기서는 direct costs, indirect job cost(Job Overhead), Overhead (Company Overhead), profit을 각각 그래프로 그려 계산한다. 다만, 여기서 몇 가지 전제가 되는 사항들이 있다.

- activity의 소요기간을 늘리거나 줄이면 직접적으로 activity에 영향을 주어 비용이 올라간다.
- 전체 프로젝트의 기간을 줄이면 indirect cost가 감소한다.
- 프로젝트의 소요기간은 critical path에 있는 하나 또는 그 이상의 엑티비티의 기간을 줄이게 되면 감소시킬 수 있다.
- 프로젝트의 소요기간 단축은 프로젝트의 전체 비용을 감소시키거나 증가시키게 되는데 그 이유는 소요기간 단축을 위해 추가적으로 필요한 자원의 비용이 기존의 비용보다 작거나 클 수 있기 때문이다.

그렇다면 소요기간을 줄이려면 어떻게 해야 되는지 구체적으로 알아본다.

- 각 엑티비티의 early start (ES)와 early finish (EF) times을 비교한다.
- 엑티비티들을 이어주는 “links”的 link lag values (ex)ES-EF)를 계산한다.
- 위 계산한 값이 0이 되지 않는 곳을 찾는다. (ex. double connecting lines)
- 프로젝트가 짧아졌다면, critical path에 있는 엑티비티들 중 하나의 기간은 짧아졌다고 할 수 있다.

소요 기간을 줄이려면 가장 효과적인 방법은 resource를 늘리는 방법이었다. 그러나 현실적으로 resource를 늘리게 되면 duration은 줄어들지만 비용은 늘어나므로 효율적이라고 할 수 없어 우리는 위에서 선택한 일부 엑티비티들을 재배열하여 duration을 줄이고 줄이기 전과 후의 비용을 비교해보았다.

Activity	Normal Duration	Crash duration	Normal Cost	Crash Cost	Days to Shorten	Cost per day
발파 시공 (3m ->4m)	94	70	159424	173600	24	590.67
숏크리트	282	140	49632	36960	142	89.24
배수 & 방수	40	31	9920	10912	9	110.22
철근배근	120	93	28800	33480	27	173.33
거푸집	40	31	14632	20584	9	661.33
콘크리트 타설	40	31	19200	22320	9	346.67
타일 붙임	40	31	23360	26784	9	380.44
공기조화설비	40	31	23360	26784	9	380.44
배수설비	80	62	46720	53568	18	380.44
전기설비	40	31	23360	26784	9	380.44

<최종결론>

앞서 말한 방법으로 터널공사 하는데 걸리는 시간과 소요되는 인력들을 알 수 있었다. 터널 공사하는데 필요한 엑티비티들을 알아보았고, 각 엑티비티의 순서를 배열하고, 각 엑티비티당 필요한 자원과 인력들을 배분했다. 자원은 제한되어 있기 때문에 동일한 자원과 인력으로 가장 효율적으로 프로젝트를 진행하는 것이 이 보고서의 목적이었다. 위와 같은 방법으로 일정 한 자원을 이용해 적절히 배분하여 총 공사기간을 알 수 있었고, 불필요한 공기를 줄여 비용 을 절감하고 효율적으로 공사를 진행하는 방법을 알아보았다.

참고

2019 건설공사 표준품셈

2015 터널공사표준시방서 - 국토교통부