

'09
기술혁신
E02

공사 환경개선을 위한 PCP 개발 및 실용화

2011

국토해양부
한국건설교통기술평가원

Land Transport and Maritime R&D Report

건설기술혁신사업 최종보고서

R&D / '09 기술혁신 E02

공사 환경개선을 위한 PCP 개발 및 실용화

2011. 06. 25.

주관연구기관 / 서울대학교 산학협력단

국 토 해 양 부
한국건설교통기술평가원

제 출 문

한국건설교통기술평가원장 귀하

이 보고서를 "공사 환경개선을 위한 PCP 개발 및 실용화" 연구과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2011 . 06. 25.

주관연구기관명 : 서울대학교 산학협력단

주관연구책임자 : 김 중 암

연 구 원 : 민 대 호

연 구 원 : 이 병 현

연 구 원 : 이 성 욱

연 구 원 : 이 성 규

연 구 원 : 정 기 명

보고서 요약서

과제고유번호	'09 기술혁신 E02	해 당 단 계 연 구 기 간	4년	단 계 구 분	(2) / (4)
연 구 사 업 명	중 사 업 명				
	세부사업명	건설기술혁신사업			
연 구 과 제 명	대 과 제 명				
	세부과제명	공사 환경개선을 위한 PCP 개발 및 실용화			
연 구 책 임 자	김 중 압	해당단계 참 여 연구원수	총 : 6명 내부 : 1명 외부 : 5명	해당단계 연 구 비	정부 : 54,000 천원 기업 : 20.000 천원 계 : 74,000 천원
		총연구기간 참 여 연구원수	총 : 25명 내부 : 4명 외부 : 21명	총연구비	정부 : 282,000 천원 기업 : 95,000 천원 계 : 377,000 천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	서울대학교 산학협력단		참여기업명	대양이앤이기술(주)	
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위 탁 연 구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요 약				보고서면수	98
주요 연구 수행내용					
● 국 · 내외 연구동향 및 상용화 사례 조사 ● 국내 터널 공사 현장에 대한 현장조사 ● 시스템 개념 설계 ● 시스템 분석 코드의 개발 및 분석 ● 경제성 평가 및 시공성 분석					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	공압식 캡슐 파이프라인, 캡슐 수송, 환기, 경제성 분석			
	영 어	PCP, Capsule Transport, Ventilation, Cost Analysis			

요 약 문

I. 제 목

공사 환경개선을 위한 PCP 개발 및 실용화

II. 연구개발의 목적 및 필요성

국내에서 일반적으로 사용하는 터널 공법인 NATM 공법은 폭약을 통한 발파 작업을 통해 굴진하게 된다. 이 폭약을 통한 발파과정에서 암 버력, 분진 및 유해 가스가 밀폐된 공간에 가득차게 된다. 또한 암 버력을 배출하기 위해 출입하는 덤프트럭에 의한 매연의 발생 및 분진의 2차 비산은 작업장 내 공기의 질을 더욱 저해하게 된다. 이처럼 저해되는 공기의 질을 개선하기 위해 국내의 많은 터널 공사현장에서는 별도의 환기시설을 사용하고 있다.

본 연구는 덤프트럭 및 환기시설을 하나로 대체할 수 있는 공압식 캡슐수송 시스템(Pneumatic Capsule Pipeline, PCP)에 대한 개념설계 및 시스템 분석, 경제성 및 장비 시공성 평가를 수행한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구는 1차년도에 PCP 시스템의 개념설계를 수행하고 2차년도에는 개념설계안을 해석하기 위한 시스템 분석 코드 개발 및 해석을 연구의 주된 내용으로 한다. 또한 해석 결과를 기반으로 기존 시스템과의 경제성을 비교하고 현장에 시스템을 적용하기 위한 방안을 고려하였다.

IV. 연구개발결과

본 연구가 최종적으로 완성된 시점에서의 결과는 다음과 같다.

- PCP 시스템의 개념설계안
- PCP 시스템 시뮬레이션 및 성능분석 S/W의 개발
- 기존 시스템 대비 경제성 분석 결과
- PCP 시스템의 시공성 평가

V. 연구개발결과의 활용방안

본 연구개발결과 얻을 수 있는 PCP 시스템의 개념설계안, 시뮬레이션 및 성능 분석 S/W는 상업용 PCP 개발 업체에 대한 기술 이전 시 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 PCP 시스템과 기존 시스템에 대한 경제성 분석 결과는 실제 공사에 적용 시 경제성을 보장하기 위한 공사 여건을 구분하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

SUMMARY

The NATM method, which is widely applied in tunnel construction, uses explosives to dig through the rocks. In this process, tunnel construction place is filled with noxious gases and dusts. Traditionally, dump trucks are used to emit the excavated material in many tunnel construction places. But, exhaust gas of dump truck pollutes the air in working place. Therefore, it is required an additional ventilation equipments to improve the quality of air in tunnel construction places.

This research suggests a Pneumatic Capsule Pipeline, PCP, which can be used as a means of transportation and ventilation. In the PCP system, a capsule moves in pipeline by pressure difference caused by a blower. With this capsule, it can be used as transportation equipment. And with internal flow of pipeline, PCP system can be used as ventilation equipment, too.

Since PCP system can substitute dump trucks and ventilation equipments, its energy efficiency is expected to be superior than conventional method, dump trucks and ventilation equipment.

In research process, conceptual design, performance analysis, economic feasibility assessment, and system workability will be performed.

Contents

Chapter 1. Outline of research	1
1. Outline of research	1
2. Necessities of research	2
3. Research objectives and contents	4
3.1. Final objectives	4
3.2. Details of final objectives	4
Chapter 2. Current status of technological level	6
1. Domestic level of technology and industrial trend	6
2. International level of technology and industrial trend	7
3. Conclusion	8
Chapter 3. Research results	9
1. Summary of research results	9
2. Research results	9
2.1. International research data	9
2.2. Examples of commercial application	16
2.3. Investigation on tunnel construction place	19
2.4. Design condition	31
2.5. Capsule design	36
2.6. Pipeline design and selection of blower	41
2.7. Conceptual design	55
2.8. Development of system analysis program	57
2.9. Analysis results of PCP system	63
2.10. Economical feasibility	70
2.11. System workability	87
Chapter 4. Level of attainment and contributions	94
Chapter 5. Application of research results	95
Chapter 6. Reference	97

목 차

제1장 연구개발과제의 개요	1
1절 연구개발 개요	1
2절 연구개발의 필요성	2
3절 연구개발의 목표 및 내용	4
3.1. 연구개발의 최종 목표	4
3.2. 최종목표의 성격 및 내용	4
제2장 국내외 기술개발 현황	6
1절 국내 관련기술 및 산업 동향	6
2절 국외 기술 및 산업 동향	7
3절 종합 결론	8
제3장 연구개발수행 내용 및 결과	9
1절 연구개발결과 요약	9
2절 연구개발 주요내용	9
2.1. 해외 연구자료 수집	9
2.2. 해외 실용화 사례 조사	16
2.3. 현장조사	19
2.4. 기초 설계조건 구축	31
2.5. 캡슐 설계	36
2.6. 파이프라인 설계 및 동력원 선정	41
2.7. 개념설계안	55
2.8. 시스템 분석 코드 개발	57
2.9. PCP 시스템 해석	63
2.10. PCP 시스템의 경제성	70
2.11. 장비의 시공성	87
제4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	94
제5장 연구개발결과의 활용방안	95
제6장 참고문헌	97

표 차례

표 1 자문업체별 덤프트럭 운행속도	20
표 2 자문 업체별 추정 버력 발생량(부피)	24
표 3 발파에 사용하는 폭약 별 유해가스 배출량 비교	25
표 4 디젤기관 소요 환기량의 예	26
표 5 터널 공중별 분진발생량	27
표 6 터널 공사 현장 내 환기방식 및 특성	27
표 7 설문조사 총원	29
표 8 기존 덤프트럭 제원 및 PCP 시스템의 설계조건 비교	35
표 9 캡슐 형상에 따른 장·단점 비교 및 선정결과	36
표 10 실험을 통한 구름 저항식의 상수 결정(Yoshinobu Morikawa 연구진)	39
표 11 동력원 선정을 위한 유동조건	47
표 12 Moody's diagram을 참조하기 위한 시제품들의 roughness	47
표 13 각 파이프라인 별 마찰계수 계산 결과	48
표 14 요구 승압력 계산 결과(파이프라인 길이 1km의 경우)	49
표 15 요구 승압력 계산 결과(파이프라인 길이 2km의 경우)	49
표 16 동력원 후보군(가용 시제품)	50
표 17 동력원 및 파이프라인의 대표직경에 따른 평균 주행속도	54
표 18 파이프라인 크기별 선정된 blower	55
표 19 굴진 길이 1km에 대한 해석 결과	65
표 20 굴진 길이 1.5km에 대한 해석 결과	65
표 21 굴진 길이 2km에 대한 해석 결과	66
표 22 굴진 길이 2.5km에 대한 해석 결과	66
표 23 굴진 길이 3km에 대한 해석 결과	67
표 24 굴진 길이 3.5km에 대한 해석 결과	67
표 25 굴진 길이 4km에 대한 해석 결과	68
표 26 굴진 길이 4.5km에 대한 해석 결과	68

표 27 굴진 길이 5km에 대한 해석 결과	69
표 28 기존 시스템 및 PCP 시스템 경제성 분석 항목 비교	72
표 29 덤프트럭 사용대수(동홍천-양양 터널공사현장, 대림산업)	75
표 30 PCP 시스템에 사용한 fan 및 engine 월 임대료	76
표 31 전력량 요금표(한국전기공사)	77
표 32 터널 단면적별 현황	77
표 33 굴진 거리 1km에서의 대여장비 및 작업인원 비교	86
표 34 국내 터널 종단경사 적용 기준	89
표 35 국내 터널의 종단경사 사례	90
표 36 종단경사에 따른 캡슐 수송속도 계산 예	90

그림 차례

그림 1 PCP 수송 시스템의 개요도	1
그림 2 터널 현장 분진 농도	3
그림 3 Sumitomo 사의 PCP 수송용 캡슐	7
그림 4 터널 공사에 사용된 PCP 장치	8
그림 5 Henry Liu의 캡슐 디자인	10
그림 6 캡슐 전면 개폐장치	10
그림 7 캡슐 후면 개폐장치	10
그림 8 수송라인에서의 소요 에너지	10
그림 9 회수라인에서의 소요 에너지	10
그림 10 캡슐과 파이프라인 사이의 거리에 따른 항력계수	11
그림 11 전체적인 실험장치 형상(Left) 및 Test section에서의 형상(Right)	13
그림 12 전 · 후방에 위치하는 캡슐간의 항력비 비교	13
그림 13 가속구간에서의 속도 분포	14
그림 14 감속구간에서의 속도 분포	14
그림 15 시스템 특성곡선 (Required thrust at steady flow)	15
그림 16 캡슐 내 유동의 속도 변화(Unsteady flow)	16
그림 17 LILO-2 in Tula, Russia	17
그림 18 석회석 플랜트에서의 적용(토치기현)	18
그림 19 Airapid PCP and 캡슐(Muroran)	18
그림 20 수직이동형 PCP(히로시마)	19
그림 21 덤프트럭과 PCP 시스템의 Dump site 운용 비교	28
그림 22 암반의 균열에 의한 큰 버력의 발생 예	28

그림 23 덤프트럭 전락 사고 현장(한국산업안전보건공단)	29
그림 24 주행속도 변화에 따른 전체 버력처리 시간 소요	33
그림 25 적재부피에 따른 전체 버력처리 시간 소요	33
그림 26 운송간격에 따른 버력처리 시간 소요	34
그림 27 캡슐의 형상	36
그림 28 Henry Liu의 캡슐 design	40
그림 29 3차원 형상에 대한 격자 생성	41
그림 30 전두부 및 후미부 Aerodynamic shape에 대한 해석결과	41
그림 31 캡슐-파이프라인 개념도	42
그림 32 Blockage ratio별 캡슐의 이동속도 비교	46
그림 33 Moody's diagram	48
그림 34 동력원 후보군의 성능표 예(GAF-#10SS)	50
그림 35 해석문제의 구성	50
그림 36 편흡입형 airfoil 팬에 대한 계산 결과	52
그림 37 양흡입형 airfoil 팬에 대한 계산 결과	53
그림 38 가용 blower별 소모에너지 비교	54
그림 39 Accelerating branch 구성	55
그림 40 정체점 형성에 의해 시스템 운용이 실패할 경우	55
그림 41 Decelerating branch 구성	56
그림 42 현 고려 중인 캡슐의 형상	56
그림 43 Rectangular shape 캡슐 형상	57
그림 44 전두부 및 후미부에 대한 Aerodynamic shape 캡슐 형상	57
그림 45 Imaginary ghost junction cell	58
그림 46 GJM)(a) Reconstruction (b) The effect of scaling function)	60

그림 47 Cournat number에 대한 민감도 비교	62
그림 48 Sensitivity to irregular grid size	63
그림 49 금성풍력(주)에서 제공하는 fan 성능곡선 예	63
그림 50 캡슐 velocity profile	64
그림 51 일반적인 터널 발파 공정 및 기존 시스템과 PCP 시스템 비교	70
그림 52 경제성 분석을 위한 항목	71
그림 53 기존 터널 공사현장에서 사용하는 송기용 배관	71
그림 54 터널 단면적별 경제성 분석 결과 비교	85
그림 55 터널 굴진거리별 장비 임대료 비교	86
그림 56 터널 단면적별 장비 운용비용 비교	87
그림 57 외굴인 경우 PCP 시스템의 설치	88
그림 58 쌍굴인 경우 PCP 시스템의 설치	88
그림 59 종단경사가 존재할 경우 캡슐의 속도 변화 예	90
그림 60 공기압 누설에 따른 캡슐 수송속도 변화	92
그림 61 버력 발파 작업 후 비산된 버력을 폐일로더를 통해 버력을 모으는 작업 수행	92
그림 62 전단면 발파공정에서의 PCP 캡슐의 접근	92
그림 63 상 · 하단면 분리 굴착시 폐일로더 및 덤프트럭의 접근	92
그림 64 상 · 하단면 분리 굴착시 PCP 시스템 캡슐의 접근	93
그림 65 Application example : water hammer scenario	95
그림 66 해석 터널 재원	96
그림 67 터널 중간에서의 온도 변화	96
그림 68 터널 내 압력 변화 및 열차 내 압력 변화율	96

제1장 연구개발과제의 개요

1절 연구개발 개요

본 연구는 터널 공사 중 발생하는 폐기물 및 자재의 수송수단으로 공압식 캡슐수송 시스템(Pneumatic Capsule Pipeline, 이하 PCP 시스템)을 제안한다.

국내에서 일반적으로 사용하는 터널 공법인 NATM 공법은 폭약을 통한 발파 작업을 통해 굴진하게 된다. 이 폭약을 통한 발파과정에서 암 버력, 분진 및 유해가스가 밀폐된 공간에 가득차게 된다. 또한 암 버력을 배출하기 위해 출입하는 덤프트럭에 의한 매연의 발생 및 분진의 2차 비산은 작업장 내 공기의 질을 더욱 저해하게 된다. 이처럼 저해되는 공기의 질을 개선하기 위해 국내의 많은 터널 공사현장에서는 별도의 환기시설을 사용하고 있다.

본 연구는 덤프트럭 및 환기시설을 하나로 대체할 수 있는 공압식 캡슐수송 시스템(PCP 시스템)을 제안한다. 그림 1에 PCP 시스템의 개요를 도시하였다.

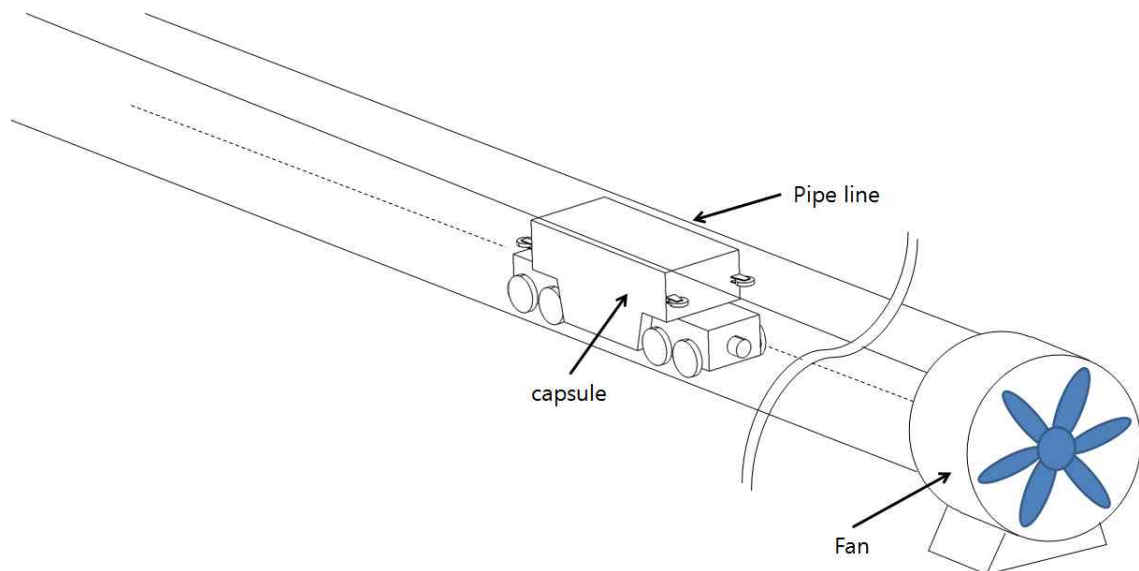


그림 1 PCP 수송 시스템의 개요도

○ 현재 터널 공사 환경에서 발생하는 문제는 다음과 같다.

- 공사 중 발생하는 다량의 버력의 반출 및 필요 자재 반입에 덤프트럭 등 대규모 수송장비와 비용 소요
- 발파로 발생한 분진으로 인해 시계불량으로 작업효율 저하 및 안전사고 발생
- 덤프트럭, 컨베이어를 활용하는 기존 수송시스템은 에너지의 효율성과 작업환경의 확보에 한계

○ 본 과제에서 제안하는 PCP 시스템의 특성은 다음과 같다.

- 캡슐에 화물을 탑재하여 파이프라인을 통해 운반하는 시스템
- 캡슐 수송의 제어는 캡슐 양단의 공기압 차이를 이용
- 캡슐 수송의 주요 동력원으로 배기(suction) 또는 급기(blowing) 팬을 사용
- 순수한 환기시설로 활용이 가능하며, 캡슐을 투입하면 수송과 환기를 겸함
- 무인 수송시스템으로 위험하고 밀폐된 공사 현장에 적용 가능
- 공사 중 위험요소 제거, 공기 질 향상 등 작업환경을 획기적으로 개선

본 과제에서는 기존 PCP시스템을 참고하고 여기에 환기기능을 겸비할 수 있도록 독창적인 PCP 시스템을 제안한다. 개념설계안에 대하여 실용화 가능성을 모색하기 위해 시스템 성능분석과 경제성 분석을 수행하며 수정·보완된 최종 개념설계안을 도출하고자 한다.

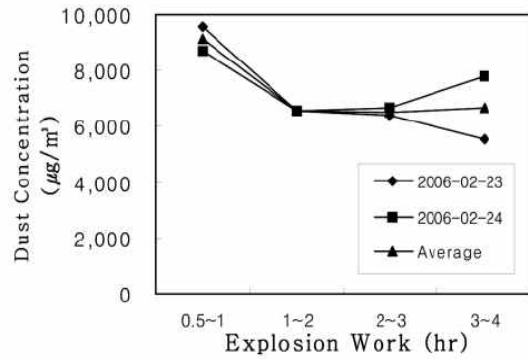
2절 연구개발의 필요성

대다수의 터널 공사 현장에서는 굴진을 위해 폭약을 통한 발파 작업을 수행하고 있다. 이 발파 작업 이후에는 폭발로 인한 폐석과 분진이 밀폐된 공간에 가득차게 된다. 또한 폐석 등 폐기물의 반출과 자재의 반입을 위해 덤프트럭이 터널 내 작업 현장으로 접근해야 한다. 따라서, 발파로 인한 분진의 2차 비산, 매연으로 인한 공기 질 저하 등 작업현장의 안전사고 발생 요인이 다수 존재한다.

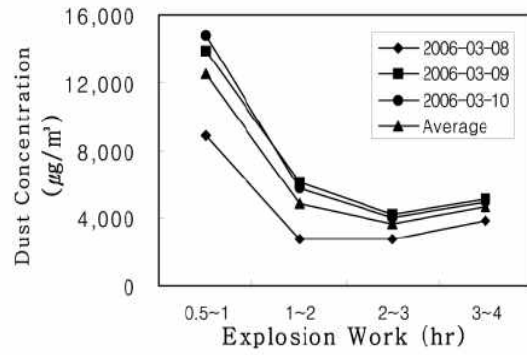
○ 현재 터널 공사 중 운용되는 환기시설 및 수송수단의 특징은 다음과 같다.

- 공사 현장의 공기 질 향상과 작업인력의 가시거리 확보를 위해 별도의 환기시설을 가동(급기설비와 건식/습식 집진장비)
- 급기설비와 건식/습식 집진장비의 활용으로도 일정 수준 이하의 환기 불가(그림2 참조) ⇒ 작업자의 안전 및 건강에 큰 위해 요인으로 작용
- 폐석 운반용 덤프트럭 운행으로 인해 분진 2차 비산 및 매연 발생

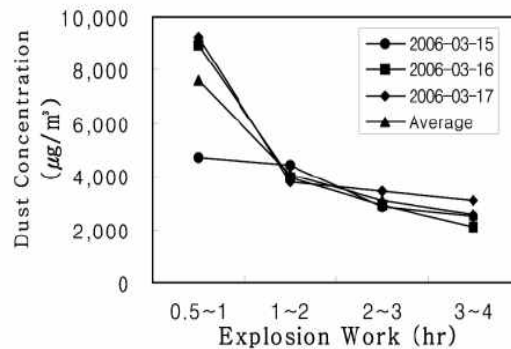
이와 같이 다량의 분진으로 인해 사고위험이 높은 터널 공사 환경에서 위험요소 제거와 자재 및 폐기물의 수송효율 제고를 위해 급기 및 집진 설비와 덤프트럭으로 대표되는 기존 방식 대신 PCP 시스템을 도입하는 것이 대안이 될 수 있다.



(a) 급기만 적용



(b) 급기와 건식 집진기 적용



(c) 급기와 습식 집진기 적용

그림 2 터널 현장 분진 농도

○ PCP 시스템의 경제성

- 발파 분진으로 인한 작업시간 지연 등 소모시간 감소
- 실용화를 위한 수송효율 향상을 위해 다수의 캡슐을 직렬로 운반 가능
- 복선의 파이프라인 구축 시 수송시간 단축 및 급·배기 시설로 활용
 - 각 라인을 통한 자재 반입과 폐기물 반출이 동시에 이루어짐
 - 반입용 라인은 급기시설, 반출용 라인은 배기시설로 활용
- 파이프라인을 모듈화 함으로써 설치와 해체가 용이하며, 재사용이 가능
 - 무인 수송 시스템이므로 인건비 절감
 - 안전사고 위험요소 감소로 기회손실, 보상 및 복구 비용 절감

○ PCP 시스템의 안전성

- 매연발생량 감소, 분진의 2차 비산 방지로 작업환경의 획기적인 개선
 - 터널 내 공기 질 개선으로 작업자 건강의 위해요소 저감
 - 가시거리 증가 및 덤프트럭 등 교통수단 최소화로 안전사고 발생확률 저감

- 공사 중 터널 내 화재 및 지반 붕괴 등 재해발생 시 안전성 향상
 - PCP를 피난자의 응급 환기시설로 활용 가능
 - 캡슐에 구호품 등을 탑재하여 피난자에 전달 가능
 - 1인승 피난용 캡슐을 제작하여 구비할 경우 사고현장의 탈출 가능

3절 연구개발의 목표 및 내용

3.1. 연구개발의 최종 목표

본 연구는 1, 2차년도에 PCP 시스템의 개념설계와 해석적 연구를 수행하여 실용화가 가능한 설계조건과 개념설계안 도출하고 경제성을 평가한다. 3차년도에는 시스템의 효율성을 향상시키기 위한 최적화 연구 및 시스템 적용과 관련한 연구를 수행하며, 4차년도에 풍동 및 기타 실험을 통해 이론적인 연구성과를 보완하고 관련 데이터를 축적하는 것을 내용으로 하고 있다. 연구가 종료될 시점에 달성하고자 하는 목표는 다음과 같다.

- 실용화가 가능한 시스템의 설계조건 구축
- PCP 시스템의 개념 설계
- PCP 시스템의 캡슐수송 시뮬레이션 및 성능분석 S/W 개발
- 경제성 분석 및 시스템 적용성 평가

3.2. 최종목표의 성격 및 내용

가. 실용화가 가능한 시스템의 설계조건 구축

현장에 적용하려면 PCP 시스템의 수송효율이 확보되어야 하므로 실용화 가능한 수준의 설계조건을 제시할 필요가 있다.

- 기존 수송 시스템 대비 PCP 수송 효율을 제고하기 위한 캡슐 용량(m^3), 운송속도(m/s) 및 PCP 수송 용량($m^3 \cdot km/day$) 산출
- 도출된 설계조건을 충족하기 위한 동력원의 용량 산출

나. PCP 시스템의 개념 설계

- 캡슐 설계를 위해 캡슐 주변의 유동 특성을 3차원 해석으로 분석한다. 캡슐에 의한 에너지손실 계수를 예측하고 캡슐의 형상, 단면적 등을 설계한다.
- 파이프라인 설계를 위해 일본 Sumitomo 사에서 터널 공사 현장에 적용한 폐기물 수송 시스템을 벤치마킹하고 경제성 향상을 위해 환기기능을 겸한 하이브리드 시스템으로 개량한다.

다. PCP 시스템의 캡슐수송 시뮬레이션 및 성능분석 S/W 개발

연구의 특성 및 연구비의 제한에 따라 시제품을 개발할 수 없는 만큼, 본 과제에서 개발할 해석 코드는 실용적인 PCP의 설계와 개발을 위한 기본적인 검증 수단이 될 것이며 실험적인 연구에 앞서 구체적인 실험계획 및 모형세트의 설계에 있어 기초자료가 될 것이다.

- 개별 캡슐운동에 대한 3차원 유동해석이 선행되어야 하며 이를 근거로 전체 시스템에 대한 transient analysis(비정상 성능분석)를 수행해야 함
- 성능분석 결과를 근거로 시스템의 수송 효율과 동력원 용량의 적정성을 검토하며 에너지소요량, 에너지손실 등을 이론적으로 예측할 수 있음
- PCP 시스템에 대한 성능분석 코드는 독자적인 S/W로 상용화 가능함

라. 경제성 분석

본 과제에서 제안하는 PCP 시스템이 기존의 터널 공사현장에서 사용하고 있는 덤프트럭과 환기시설을 대체하기 위해서는 실용화의 판단 기준이 되는 경제성 분석 과정을 필요로 하게 된다. 이 경제성 분석 결과 자료는 향후 상업적인 PCP설비를 개발하려는 기업이나 정부의 연구개발을 독려하는 근거자료가 될 것이다.

제2장 국내외 기술개발 현황

1절 국내 관련기술 및 산업 동향

현재 국내에서 PCP 시스템을 실용화한 사례는 없다. 다만, 현재 PCP 시스템과 유사한 설비의 운용 사례로는 용인수지구, 판교신도시 등 대규모 주택단지에서 쓰레기의 수송관로 시설로 공압식(Pneumatic) 파이프라인 시스템을 도입한 사례가 유일하다.

○ 쓰레기 수송관로 시스템은 다음과 같은 특징이 있다.

- 쓰레기의 수시 운반 가능, 운반 차량에 의한 사고 발생 위험 제거
- 밀폐 파이프라인을 사용하는 데 따른 악취와 해충 발생 억제
- 저렴한 운영 및 관리 비용으로 장기적인 비용 절감 효과

이 쓰레기 수송 시스템은 한국건설기술연구원, OO건설 등에 의해 개발되었으며, 그 성과와 최적 설계 방안에 대한 고찰이 논문 및 기고의 형태로 보고된 바 있다.

○ 쓰레기 수송관로 시스템과 PCP 시스템의 차이점

- 단위 화물의 무게가 작고 별도의 캡슐을 사용하지 않음
- 쓰레기 수송 파이프라인은 반영구적 사용을 목표로 시공됨
- 별도의 지하 파이프라인 굴착으로 인한 대규모 초기 설비공사 비용 소요

○ PCP 시스템이 쓰레기 수송 시스템과 구별되는 점

- 파이프라인의 모듈화로 조립설치와 해체가 용이
- 화물의 단위 중량이 수 백 kg에서 수 ton에 이르는 큰 규모
- 파이프라인 내부에서의 효율적 운반이 용이한 캡슐의 도입이 필수적

최근 철도기술연구원을 주축으로 지하 화물교통체계로 PCP를 활용하려는 연구가 계획되고 있으나 LIM(Linear Induced Motor) 방식의 시스템으로서 본 과제의 PCP 방식과는 동력 원리의 측면에서 다르다.

2절 국외 기술 및 산업 동향

작은 소화물 및 유류 등 수송에 파이프라인 수송 설비가 사용된 사례가 있다.

○ 국외의 파이프라인 수송 사례

- 1850년대 영국 런던에서 지하 파이프라인을 통해 통신사간 메시지를 전송
- 1960년대 30인치의 파이프라인으로 3톤의 캡슐을 40mph의 속도로 우편전송
- 19~20세기에 걸쳐 뉴욕, 파리, 베를린, 프라하 등에 위와 유사한 시스템 운용

최근에는 대규모의 화물을 수송하기 위해 PCP 시스템을 사용하고자 하는 노력이 각국에서 진행되고 있다.

○ 대규모 화물을 수송하기 위한 PCP 개발 사례

- 1980년대에 일본 토치기현 시멘트 공장에서 석회석 운반을 위한 PCP 시스템 사용
- 1997년 일본 Sumitomo사(社)에 의해 개발된 터널 공사 및 라이닝 시공 자재 운반 시스템 실용화 성공 및 사용
- 2001년 히로시마 하수구 건설 현장에서 수직형 PCP 최초 구현
- 미국의 Tubexpress, 러시아의 Transprogress 등, 중대형 화물 수송 시스템 개발



그림 3 Sumitomo 사의 PCP 수송용 캡슐

이들 선진국에서는 개념설계 수준을 넘어 실용화 단계의 연구가 진행되고 있다. 미 텍사스 교통국이 “고속도로 정체 완화를 위한 튜브 수송의 타당성 연구” 보고서를 발표한 예에서 볼 수 있듯, 정부 차원에서 튜브수송 기술의 경제적 타당성을 긍정적으로 평가한 보고서를 내고 있으며, 개별 기술 요소의 특허 및 상용화 연구가 진행 중임을 감안하면 가까운 시일 내 상용화가 예상된다. 또한 튜브 수송에 관한 국제 표준을 제정하려는 노력을 기울일 것으로 예상된다. 그림 4는 PCP 시스템을 터널 공사현장에 사용한 예로서 일본 Sumitomo사에서 개발한 파이프라인의 모습이다. 이 터널은 TBM공법을 사용한 터널로써 본 연구의 대상인 NATM 공법과는 전반적으로 차이가 있다.[5]



그림 4 터널 공사에 사용된 PCP 장치

3절 종합 결론

국내에서는 PCP 시스템에 대한 개념 연구를 시작하는 단계에 있으나 국외에서는 적극적인 연구개발 노력이 이루어지고 있고, 정부의 교통 및 수송 혁신대안으로서 긍정적으로 검토되고 있는 실정이다. 현재 철도와 도로 수송이 포화상태에 이르렀음을 감안했을 때 Pipeline 수송은 앞으로 큰 성장이 기대되는 분야라고 할 수 있다.

그러나 국내 뿐만 아니라 해외 다른 국가도 모두 PCP 시스템은 본격적인 상용화 이전의 단계에 머무르고 있다. 국내의 경우 PCP 시스템을 개발할 만한 연구역량이 충분히 갖춰져 있으므로 지속적인 연구가 수행된다면 비교적 단기간에 외국의 사례보다 우수한 수송 시스템 개발도 가능하리라 판단된다.

제3장 연구개발수행 내용 및 결과

1절 연구개발결과 요약

1차년도 연구는 PCP 시스템에 대한 개념설계를 수행하는 단계로써 크게 자료수집, 현장조사, 기초 설계조건 구축, 캡슐의 설계, pipeline 설계 및 동력원의 선정으로 구분할 수 있다. 그리고 이러한 결과를 바탕으로 기본적인 개념설계안을 작성하였다.

2차년도에는 시스템을 분석하기 위한 코드를 개발하고 1차년도의 개념설계안에 대한 해석적 연구를 수행한다. 해석결과를 기반으로 하여 덤프트력과 환기시설을 사용하는 기존 버력 처리방법과의 경제성을 비교한다. 또한 시스템을 현장에 적용하기 위한 대안들에 대하여 살펴보았다.

2절 연구개발 주요내용

2.1. 해외 연구자료 수집

국내에서는 PCP 시스템에 대한 본격적인 연구 사례는 없어 해외 연구자료에 대한 조사를 수행하였다. 해외에서의 PCP 연구는 일본과 미국에서 주로 수행되어 왔으며 일본의 경우 바뀌 없는 캡슐에 대한 연구가 주를 이루어왔다.

실험에 의한 연구 수행의 경우 대상이 실린더형 캡슐만을 고려해 왔으며 캡슐의 형상에 대한 연구 수행 사례는 찾아보기 어려웠다. 또한 수치적 연구 수행의 경우 실험결과를 참조로 하거나 간단한 1-D 이론식을 기반으로 수행해왔다.

본 연구는 3-D CFD 수치해석 결과를 기반으로 캡슐의 형상을 설계하고 1차원 수치해석을 기반으로 시스템 설계를 수행한다는 점에서 타 연구와는 차별성을 가지고 있다.

가. Henry Liu 연구진[1~5]

미국의 Henry Liu 연구진은 기존의 일본에서 상업화에 성공한 PCP 시스템에 대하여 개선책을 제시한 연구가 수행되었다. 기존의 일본에서 상업화에 성공한 PCP 시스템은 고무타이어와 송풍기를 사용하였는데, 동력원으로써 LIM pump를 사용하고 레일 및 철재 바퀴로 대체하면 시스템의 효율을 크게 상승시킬 수 있음을 강조하고 있다.

또한 시스템에 사용되는 캡슐에 대한 개념설계안을 제시한 연구를 수행하기도 하였다. 그림 5는 Henry Liu 연구진이 제안한 캡슐의 개념설계안으로 레일을 사용하고 있다. 캡슐의 전면 및 후면에는 압축탱크를 부착함으로써 pipeline 외부에서의 동력원으로 사용

함과 동시에 제동장치를 구동시키기 위한 보조 동력원으로 사용하기도 한다.

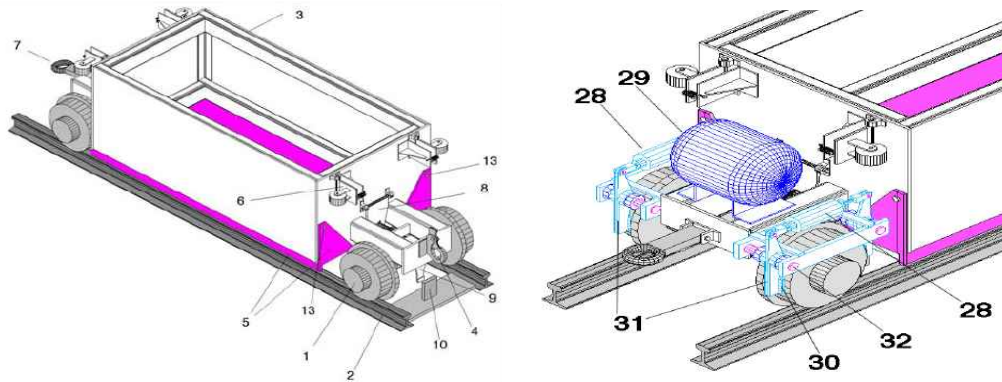


그림 5 Henry Liu의 캡슐 디자인

그림 6과 그림 7은 캡슐의 전면 및 후면에 부착되어 있는 개폐장치로 레일 사이의 바닥에 부착되어 있는 front barrier(그림 6-10) 및 rear barrier(그림 7-12)을 통해 캡슐의 바닥을 지지하고 있는 빗장을 움직이게 하는 구조로 되어 있다.

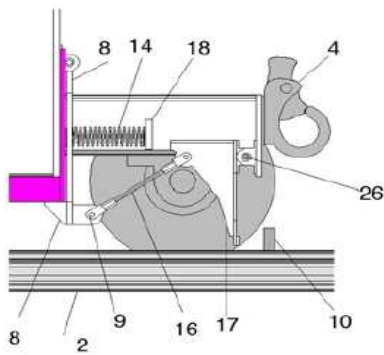


그림 6 캡슐 전면 개폐장치

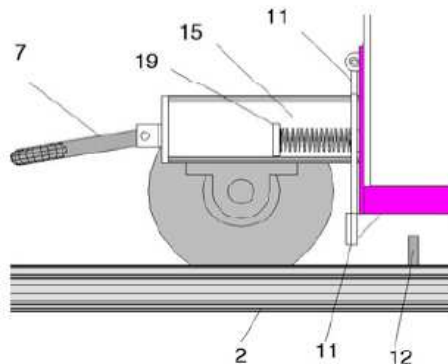


그림 7 캡슐 후면 개폐장치

또한 캡슐이 터미널에 접근할 때 이에 대한 정보를 주고받기 위한 서브 시스템에 대하여 연구를 수행하기도 하였다.

그림 8, 9는 Henry Liu 연구진이 수행한 시스템의 소요 에너지에 대한 분석 결과이다.

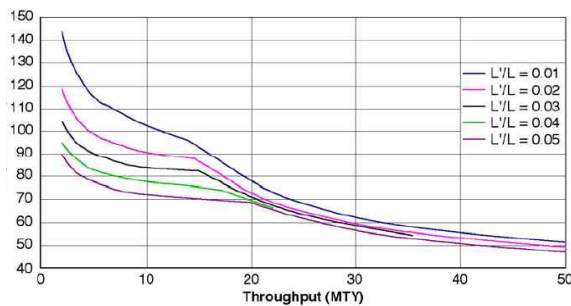


그림 8 수송라인에서의 소요 에너지

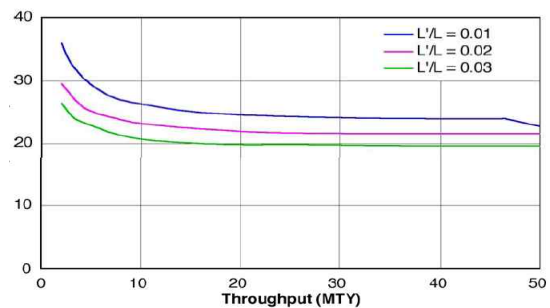


그림 9 회수라인에서의 소요 에너지

그래프의 Y축에 표시되어 있는 EI(Energy Intensiveness)는 단위 질량의 화물이 단위 거리를 이동하는데 필요로 하는 에너지로써 다음과 같이 정의했다.

$$EI = \frac{P_{sys}}{T_h L}$$

P_{sys} : 수송수단이 소모한 에너지, T_h : 화물 운송량(million ton per year), L : 거리(mile)

X축은 이송되는 화물량으로써 그래프에서 화물량이 증가할수록 시스템의 효율성이 증가함을 알 수 있다. 또한 L'/L 은 캡슐의 길이 대비 pipeline의 길이로 정의되며 운송거리가 길어지면 길어질수록 시스템의 효율성이 증가함을 알 수 있다.

나. 텍사스 교통국(Texas Transportation Institute) [6]

텍사스 교통국에서는 pipeline 내부를 이동하는 수송수단이라는 점에서 PCP 시스템과 유사하나 각 unit에 자체적인 동력원을 내장하고 있다는 점에서 본 연구의 대상과는 차이가 있다. 그러나 상용 CFD tool인 STARCD를 통해 3차원 형상에 대한 수치해석 결과를 기반으로 pipeline의 재원을 설계한다는 점에서 본 연구의 연구방향과 유사한 점을 지니고 있다.

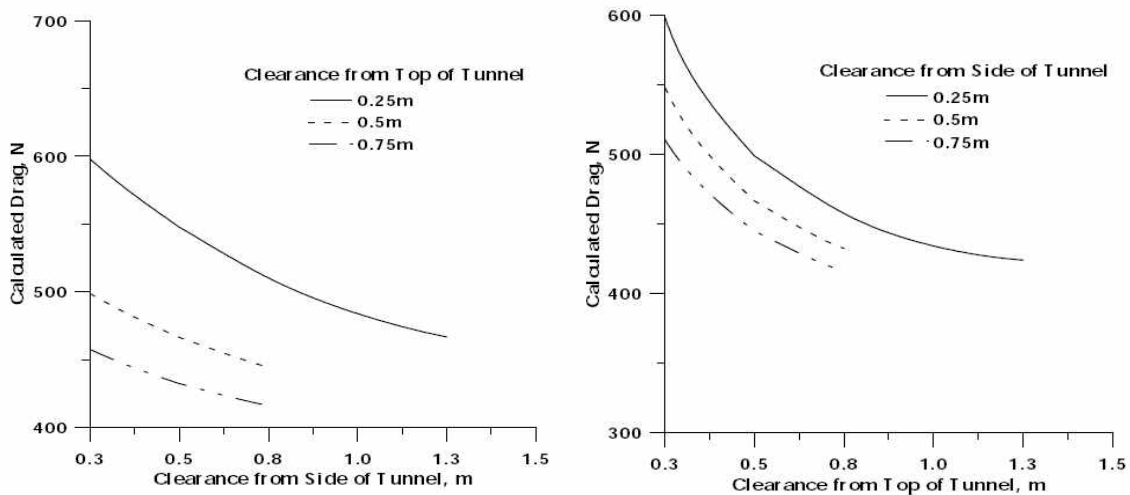


그림 10 캡슐과 pipeline 사이의 거리에 따른 항력계수

그림 10의 좌측은 unit과 pipeline의 천정 사이의 거리에 따라 캡슐에 작용하는 항력 계수를 표현한 것이고, 그림 10의 우측은 unit과 pipeline의 측면 벽 사이의 거리에 따라 캡슐에 작용하는 항력계수를 표현한 것이다. 해석한 결과 pipeline과 unit 사이의 간격이 증가함에 따라 항력이 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

텍사스 교통국의 연구대상은 unit 자체에 동력원을 내장하고 있어 본 연구 대상인 PCP 시스템과는 다소 차이가 있다. 그러나 3차원 형상에 대한 수치해석 결과를 기반으

로 연구를 진행했다는 점에서 본 연구와 유사한 점이 있다.

텍사스 교통국에서는 unit에 작용하는 공기압에 의한 에너지 소요, unit의 형상에 의한 에너지 소요, 마찰에 의한 에너지 소요 등을 고려한 소요 에너지 분석 연구도 수행하였다. 소요 에너지를 분석하기에 앞서 unit에 작용하는 항력을 계산하고, 이 항력을 기반으로 소요 에너지를 분석하였으며 각 항목에 대한 항력은 다음과 같이 계산하였다.

○ 유동의 점성에 의한 항력

$$D = \frac{\rho V_1^2 W \times 0.031}{(1 - \beta)^2 Re^{1/7}}$$

β : Blockage ratio, V_1 : capsule velocity, W : capsule width

○ 유동의 압력에 의한 항력

$$D_{p_1} = \frac{\rho A V_1^2 \beta^2}{(1 - \beta)^2} \quad , \quad D_{p_2} = \frac{1}{2} \rho V_1^2 \left[\frac{1}{(1 - \beta)^2} - \left(\frac{L}{(1 - \beta)(1 - \delta)} \frac{1}{1 + \frac{7\delta}{8(L - \delta)}} \right) \right] A_t$$

β : Blockage ratio, δ : Thickness of boundary layer

○ Unit의 형상에 의한 손실

$$D_{s-l} = \frac{\rho V_1^2}{2(1 - \beta)^2} A_t \left(\sum_{i=1}^{N-1} K_{L,i} \right)$$

$K_{L,i}$: loss of pressure, N : number of capsule

○ 바퀴의 마찰에 의한 항력

$$D_{roll} = 3.82 \times 10^3 \frac{Capsule\ Mass}{424.4} + 0.039 \frac{Capsule\ Mass}{424.4} V_1$$

다. Yutaka Tsuji 연구진

일본의 Yutaka Tsuji 연구진은 실험을 통한 연구를 수행하고 그 결과를 기반으로 수치적 연구를 수행하였다. 실험을 통해 바퀴의 마찰력, 단일 캡슐에 작용하는 항력을 측정하였으며, 2개의 캡슐이 연속적으로 배치될 경우 거리에 따른 항력의 변화를 측정하기도 하였다.

아래 그림 11은 2개의 캡슐이 연속적으로 배치될 경우 거리에 따른 항력의 변화를 측정하기 위한 실험장치의 구성이다.[7]

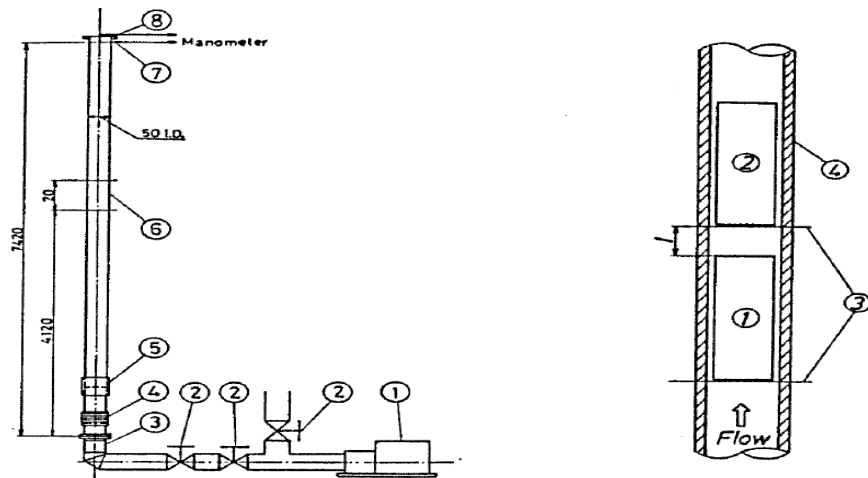


그림 11 전체적인 실험장치 형상(Left) 및 Test section에서의 형상(Right)

①에 위치하고 있는 blower로부터 형성된 유동은 ⑥에 위치한 test section으로 유입된다. ⑥의 test section에는 고정된 두 캡슐이 존재하며, 두 캡슐간의 거리를 조정하면서 각각 작용하는 압력을 통해 항력을 측정하였다.

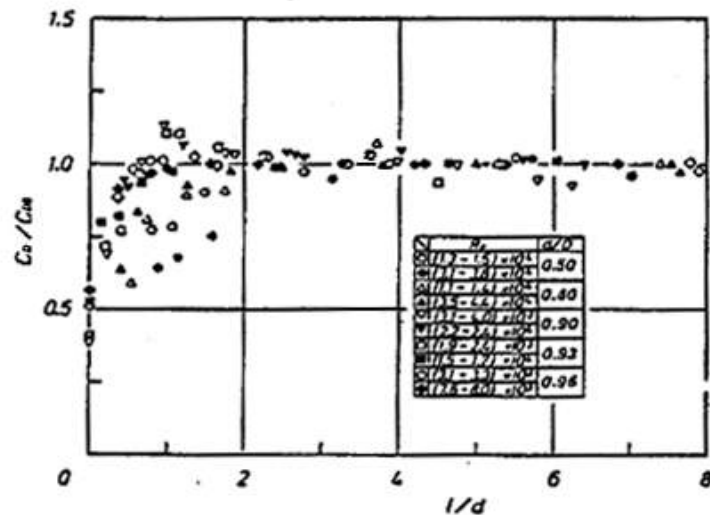


그림 12 전 · 후방에 위치하는 캡슐간의 항력비 비교

그림 12는 실험을 통해 측정된 결과이다. 측정된 결과 캡슐 대표직경의 2배 이상 떨어진 경우($l/d = 2$) 두 캡슐에 작용하는 항력이 일치함을 확인할 수 있다. 즉, 캡슐 대표직경의 2배 이상 떨어지게 되면 wake의 영향에 따른 항력의 변화가 거의 없다는 것을 보여주고 있다. 본 연구의 대상이 되는 PCP 캡슐의 경우 하나의 캡슐이 출발한 이후 다음 캡슐이 출발하기까지 약 1분 이상의 시간이 필요하다는 점을 고려한다면 두 캡슐간의 영향은 거의 없을 것으로 예상할 수 있다.

또한 실험을 통해 캡슐의 전 · 후두부에서의 손실계수를 추정하고 이를 기반으로 하여

가속구간 및 감속구간에서의 수치적 해석을 수행하였다. 아래의 식은 캡슐의 이동속도를 계산하기 위한 수식으로써 구름저항 R은 실험을 통해 산출하였다.[8]

$$M \frac{dc}{dt} = C_D A \frac{\rho}{2} (\bar{U} - c)^2 - R$$

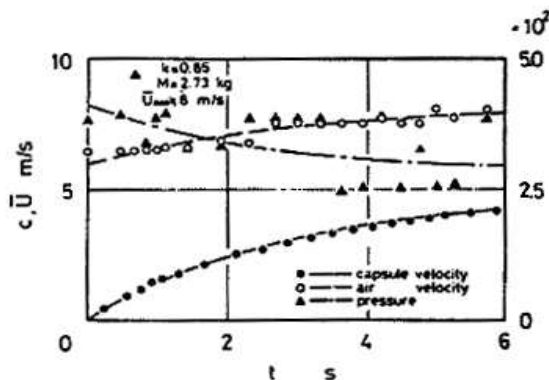


그림 13 가속구간에서의 속도 분포

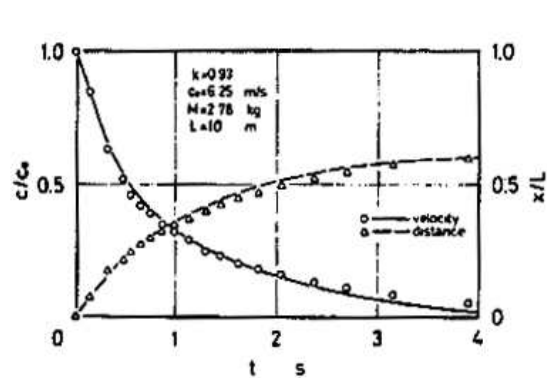


그림 14 감속구간에서의 속도 분포

그림 13과 그림 14는 수치적 해석결과와 실험결과를 비교한 것으로써 비교적 유사한 결과를 보임을 확인할 수 있다.

라. Carsten 연구진

미국의 Carsten 연구진은 캡슐의 전·후미부에서의 압력 및 펌프에 의해 시스템에 유입되는 에너지를 고려한 선형 운동방정식을 통해 연구를 수행하였다.[10] 그리고 이를 통해 시스템의 운용 특성이 시간에 따라 변화하지 않는 steady system과 시스템의 운용 특성이 시간에 따라 변화하는 시스템 성능에 대한 transient system 분석을 수행하였다.

steady system에 대한 해석은 내부 캡슐의 속도 및 무게가 일정하다는 가정과 시간이 지나도 pipeline 내부에 이동하고 있는 캡슐의 수가 변하지 않는다는 가정을 통해 사용하였다. Carsten 연구진은 이 경우 안정적으로 시스템을 운용하기 위해 필요로 하는 펌프의 승압력을 추정하였다. 그림 15는 해석 결과로써 펌프의 승압력 및 시스템의 정상 작동을 위한 요구 승압력은 다음과 같이 모델링하였다.

○ 펌프의 요구 승압력

$$\Delta p A = m \Delta p_0 A \left(1 - \frac{V}{V_0} \right)$$

m : 펌프의 개수, Δp_0 : Shut-off pressure, V : Pipeline 내 유동의 속도

○ 시스템의 정상작동을 위한 요구 승압력

$$Required Thrust = \Delta p A = A \left(1 + \frac{fL}{D} \right) \frac{\rho V^2}{2} + \frac{GLW(S_0 + f_r)}{V - \sqrt{\frac{2W(S_0 + f_r)}{\rho A C_D}}}$$

f : Pipeline의 마찰계수, L, D : Pipeline의 길이 및 대표직경
 G : 단위시간당 capsule 유입수, W : Capsule의 무게

그림 15를 보면 포물선형으로 표현되는 시스템 정상작동을 위한 요구 승압력과 선형으로 표현되는 펌프의 요구 승압력의 두 교점 중 하나를 선택해야 함을 알 수 있다. 이에 대하여 transient system 분석을 수행한 결과 두 교점 중 더 높은 압력을 사용해야 함을 알 수 있었다. 일반적으로 PCP 시스템에서는 새로운 캡슐이 유입되면 기존의 이동 하던 캡슐들은 속도가 일시적으로 감소했다가 다시 올라가게 되는데 이러한 영향을 고려해야 하기 때문이다.

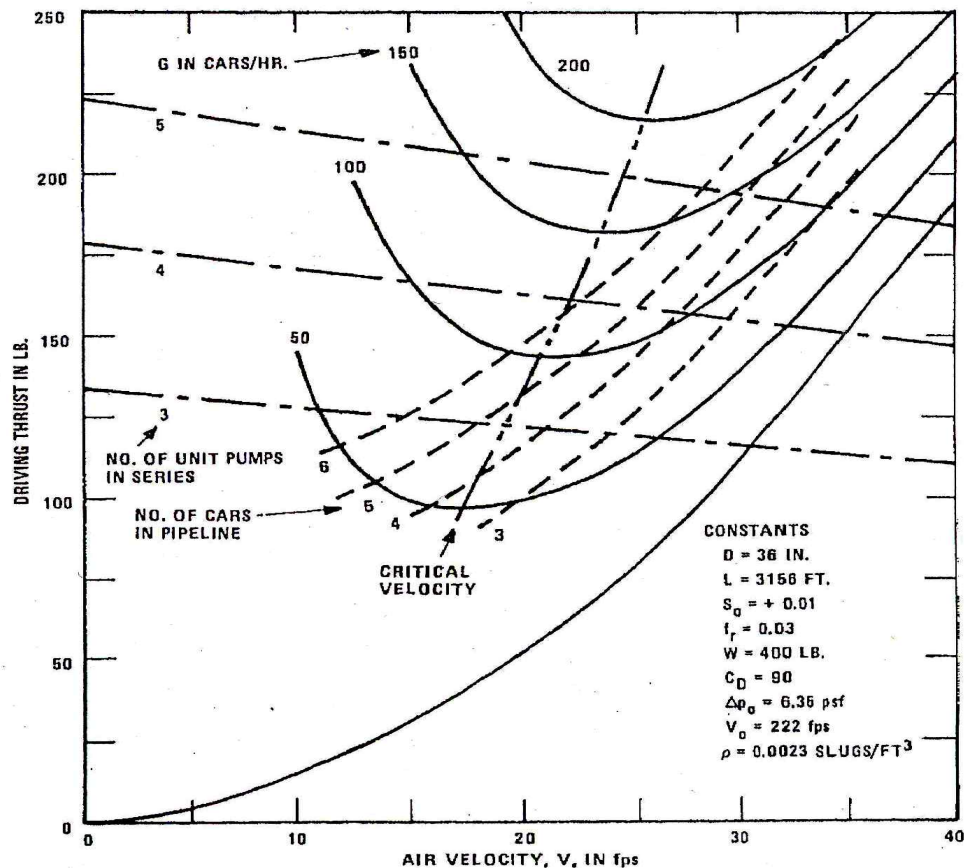


그림 15 시스템 특성곡선 (Required thrust at steady flow)

그림 16은 system 성능에 대한 transient system 분석에 대한 해석결과로써 전술한 경향성 및 시스템 작동을 위한 요구 승압력 선정 이유를 잘 보여주고 있다.

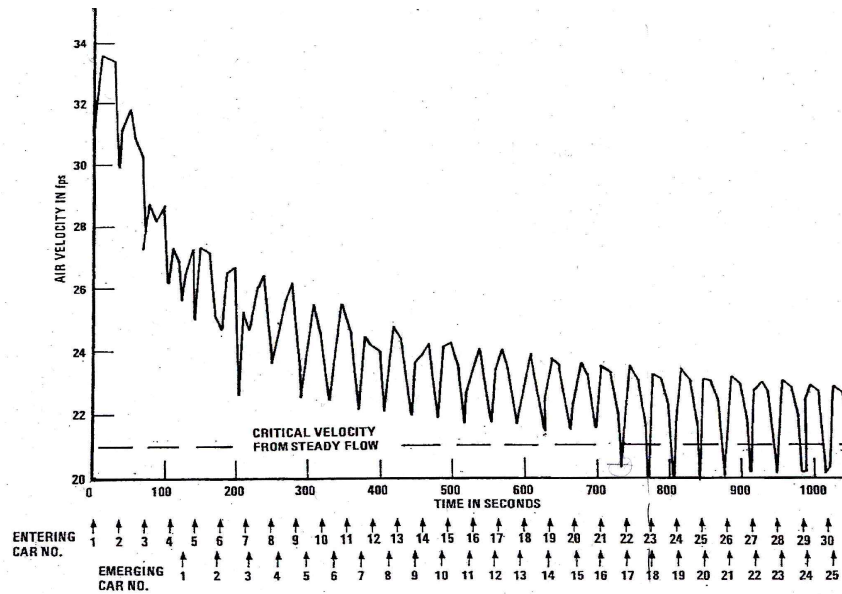


FIG. 4. AIR VELOCITY ($G^{-1} = 35 \text{ sec.}$)

그림 16 캡슐 내 유동의 속도 변화(Unsteady flow)

2.2. 해외 실용화 사례 조사

해외 구 소련 및 유럽에서는 초기 PCP 시스템에 대한 연구 및 사용한 기록이 있으나 설비의 노후화 이후에는 덤프트럭이 대안으로 사용되었다. 이후 PCP 시스템에 대한 관련 기술은 일본으로 판매되었다. 일본에서는 1980년대 후반부터 PCP 시스템에 대한 실용화가 성공하였다.

가. 초기 PCP 시스템의 실용화 사례

(1) Hamburg, 독일

Hamburg에서는 1962~1973년 사이 우체국으로부터 기차역까지의 메일 배송용으로 PCP 시스템을 사용하였다. 파이프라인은 거리 지하에 매립되어 길이 1.6m, 직경 0.45m의 캡슐을 이용하였으며 30~36km/h까지 주행할 수 있었다고 한다. 또한 당시 사용한 파이프라인은 1.8km에 달하는 등 비교적 원거리에 걸쳐 PCP 시스템을 사용하였다.

(2) Tibilisi, Gerogia, Russia

러시아의 Tibilisi에서는 1971년 직경 1.02m의 캡슐에 화물을 탑재하여 속도 30~50km/h로 화물을 운송하였다. 당시 거리는 2.1km에 달했으며 1개의 열차에 6개의

캡슐을 연결하는 조립식 구조를 사용했다. 이 경우 최대 15톤의 화물을 운송하는 등 비교적 대규모의 운송이 가능했다.

(3) Sichveska, Russia

러시아의 Sichveska에서는 자갈 및 모래 운송용으로 PCP 시스템을 사용하였다. 사용한 캡슐은 직경 1.22m로써 약 8km를 이동할 수 있었으며, 110개의 캡슐을 통해 연간 8백만톤의 물량을 운송할 수 있었다.

(4) Tula, Russia

러시아의 Tula에서는 LILO-2라는 PCP 시스템을 사용하였다. 사용한 캡슐의 직경은 1.22m로 약 49km까지 이동할 수 있었다. (그림 17)



그림 17 LILO-2 in Tula, Russia

(5) Romania

루마니아에서는 직경 1.02m의 캡슐을 사용했는데 캡슐에 바퀴 및 레일을 사용하였다. 또한 물건을 적재하거나 하역하는데 중간에 멈출 필요 없이 바로 할 수 있는 dynamic loading & unloading을 구현했다는 점이 특징이었다.

나. 일본에서의 실용화 사례

(1) 토치기현, Japan

일본 토치기현의 시멘트 공장에서는 Sumitomo사에서 개발한 실용화 PCP 시스템을 사용하였다. 이 시스템은 1983년부터 지금까지 사용되고 있으며 직경 1m의 실린더형 캡슐을 통해 연간 2백만톤의 석회석을 운반할 수 있다. 또한 이 시스템에서는 각 1.6톤

씩 운반 가능한 캡슐을 3개까지 연결하여 사용할 수 있다.(그림 18)



그림 18
석회석 플랜트에서의 적용(토치기현)

(2) Muroran, Japan

일본 Daifuku에서 사용한 PCP 시스템인 Airapid는 토치기현에서 사용한 PCP 시스템과 마찬가지로 석회석을 운반하기 위해 사용됐다. 이 시스템은 하나의 캡슐 당 500kg씩 적재할 수 있었으며 1.5km만큼 떨어진 거리를 운송할 수 있었다.(그림 19)

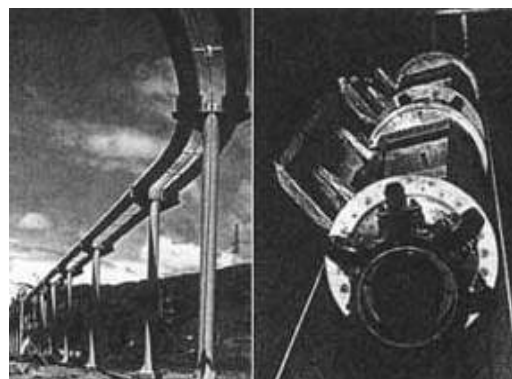


그림 19
Airapid PCP and capsule(Muroran)

(3) 아키마 터널 공사 현장, Japan

본 과제의 연구와 가장 유사한 경우라 할 수 있는 아키마 터널 공사 현장에서의 적용 사례이다. 1997년 길이 8.3km의 아키마 터널을 공사하는 과정에서 자재 및 암 버력 운반용으로 PCP 시스템을 사용하였다. 캡슐은 고무 타이어를 이용하였고 박스형 형상이었다. 발파 후 배출되는 암 버력은 공사 현장으로부터 3km 떨어진 dump site까지 운반 가능하였다.

(4) 히로시마, Japan, 2001, (Sumitomo)

2001년 히로시마의 하수구 건설에 사용된 PCP 시스템은 다른 시스템과는 달리 수직형 PCP 시스템이었다.[15] 이 시스템은 하수구 건설을 위한 터널 공사 현장에서 깊이 35m의 흙을 파내기 위해 사용되었으며 5.1톤의 흙을 시간당 200KW의 전력을 필요로 하는 blower를 통해 운송할 수 있었다.(그림 20)

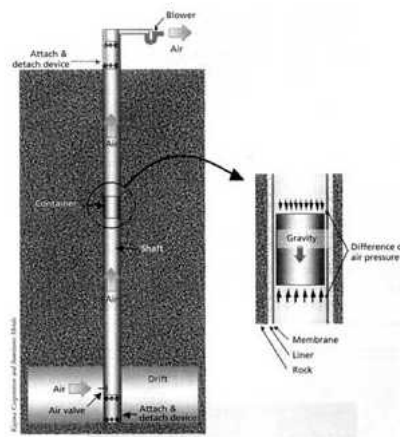


그림 20
수직이동형 PCP(히로시마)

2.3. 현장조사

본 연구진은 기존의 터널 공사현장에서 사용하고 있는 덤프트럭의 버력 처리 효율을 산출하고 PCP 시스템이 이에 준하는 효율을 가지기 위한 기초 설계조건을 도출하기 위해 현장조사를 수행하였다. 현장 조사는 현재 국내에서 진행 중인 울산-포항 복선전철 3공구 노반신설공사 현장과 동홍천-양양고속 10공구 공사 현장에서 수행하였으며, 이 과정에서 전문가 자문을 통해 기초설계조건 구축을 위한 정보를 수집하였다. 또한 현장 작업원들과의 설문조사를 통해 본 연구의 필요성에 대한 검토도 수행하였다.

가. 전문가 자문

기초설계조건 구축을 위해 한양주택(주) 임재석 상무, 현대산업 박창배 소장 및 광동준 과장, 대림산업 이춘수 부장의 자문 연구를 수행하였으며 내용은 다음과 같다.

(1) 공사현장 내 덤프트럭의 운행속도

(km/h)

구 분	A 업체	B 업체	C 업체
운행속도	20~40	10~25	10

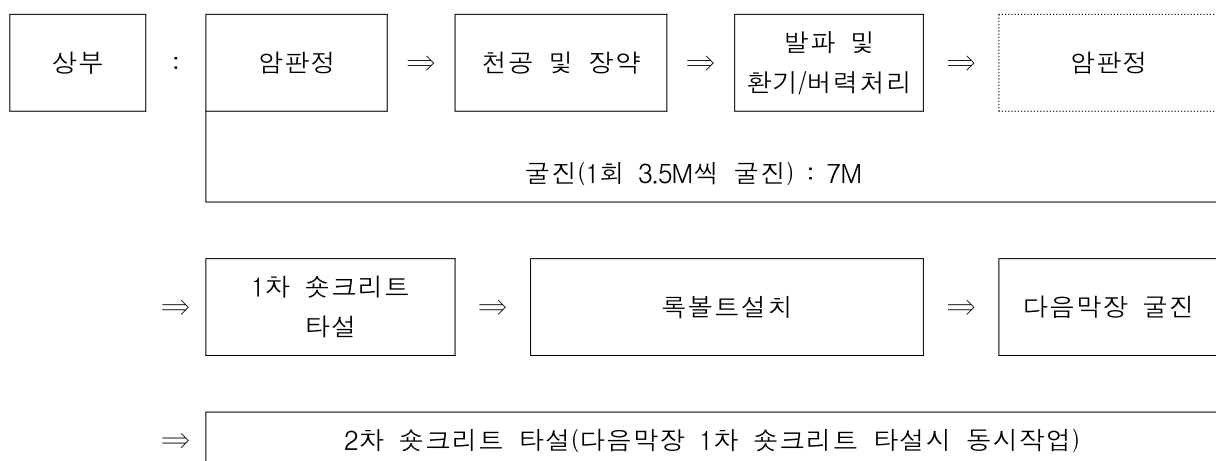
표 1 자문업체별 덤프트럭 운행속도

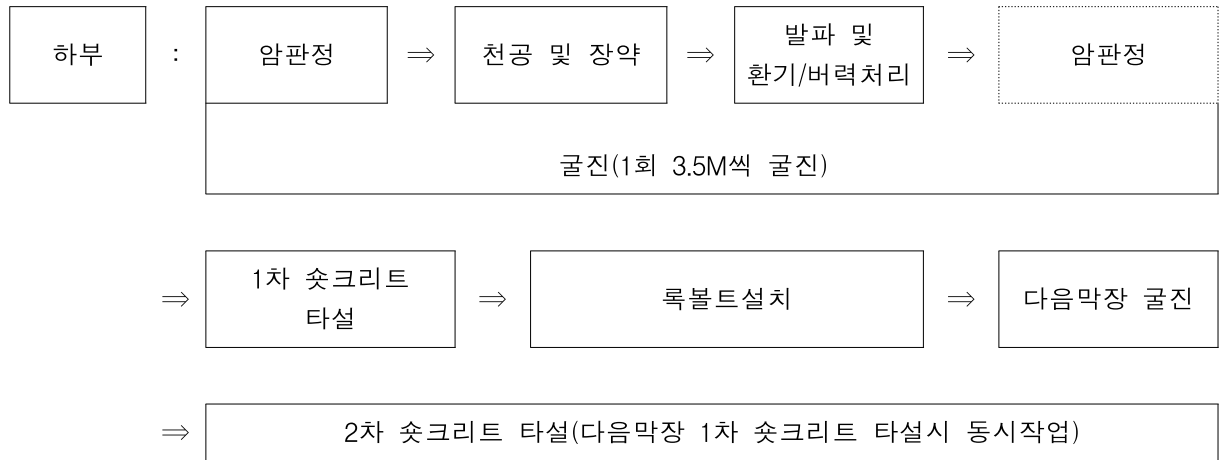
PCP 시스템에 사용할 캡슐의 운행속도를 알아보기에 앞서 기존 터널공사 현장에서 덤프트럭의 운행속도에 대해 알아보았다. 각 업체별로 이동하는 속도에서 차이가 발생하였으나 이는 지면의 상태에 따라 차이가 발생할 수 있다고 한다. 또한 일반적으로 터널 내부는 약 10(km/h)로 이동하고 있으며 법률상 운행속도는 최대 20(km/h)로 규정하고 있다고 한다. 기초 설계조건 구축시에는 법률상의 최대 운행속도인 20(km/h)를 참조하였다.

(2) 발파 공법별 시공흐름도 및 발파 공법의 선정

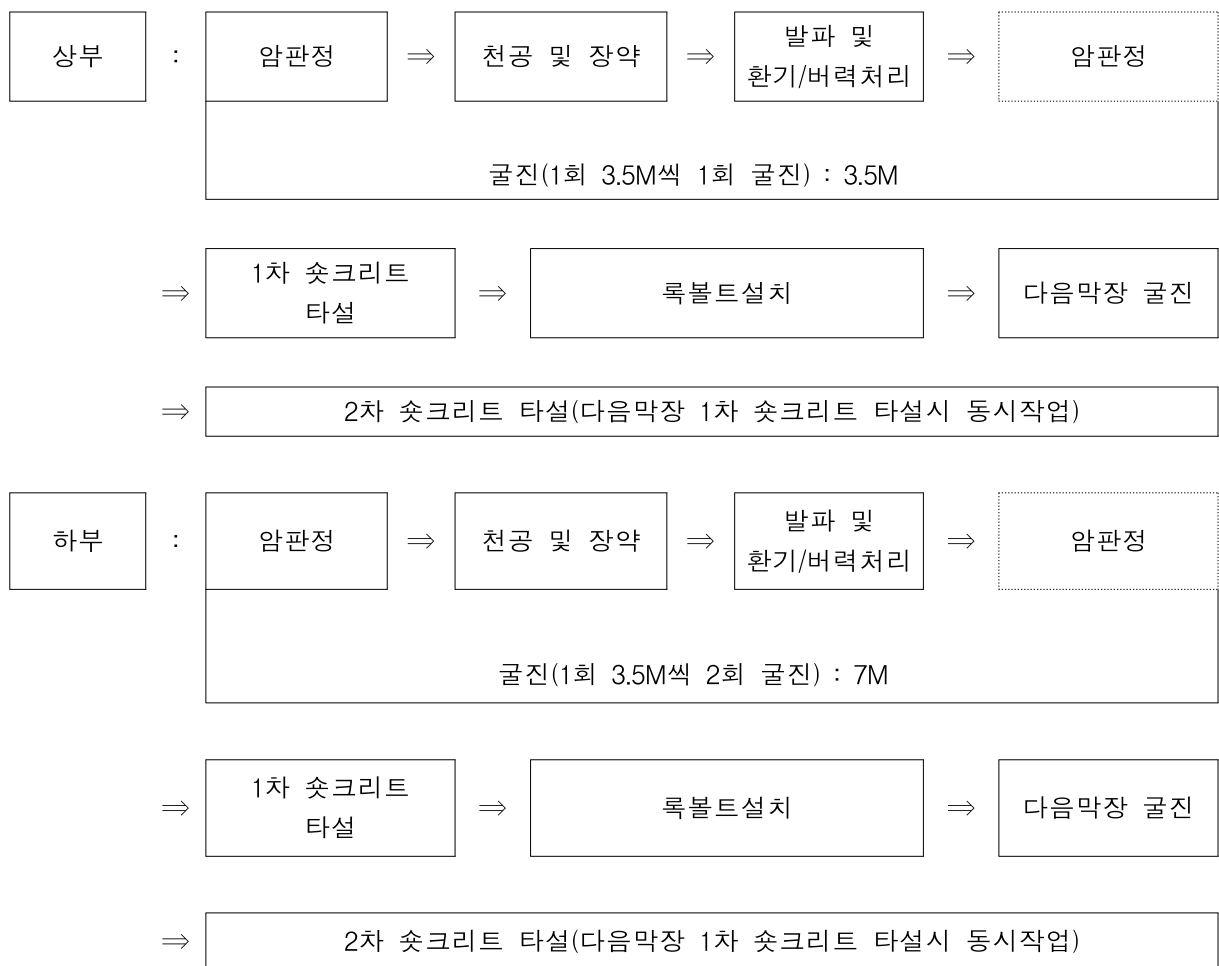
터널 발파 공법은 기반암의 강도에 따라 선정하게 된다. 즉, 기반암의 강도가 높으면 높을수록 1회 발파에 따른 굴진길이가 긴 공법을 선정하게 된다. 일반적으로 portal 부근에서는 굴진길이가 가장 짧은 발파 공법 6을 사용하지만 터널 공사 중반에서는 발파 공법 1을 가장 많이 사용하고 있다.

(가) 발파 공법 1





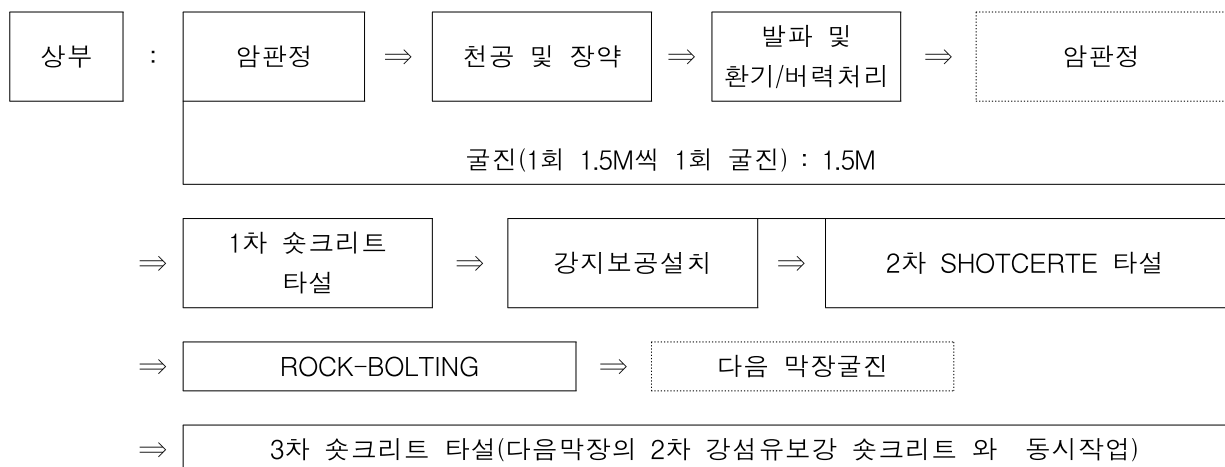
(나) 발파 공법 2

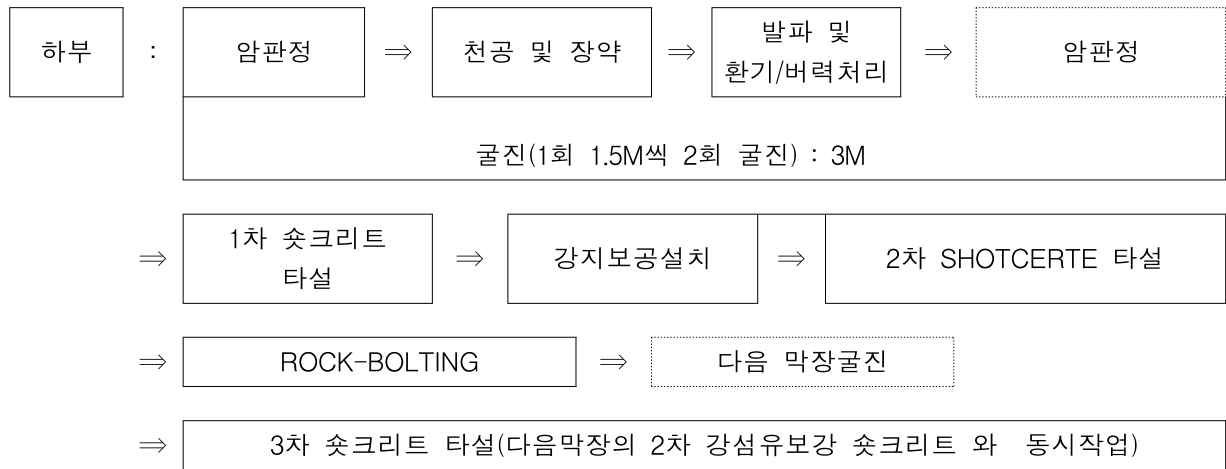


(다) 발파공법 3

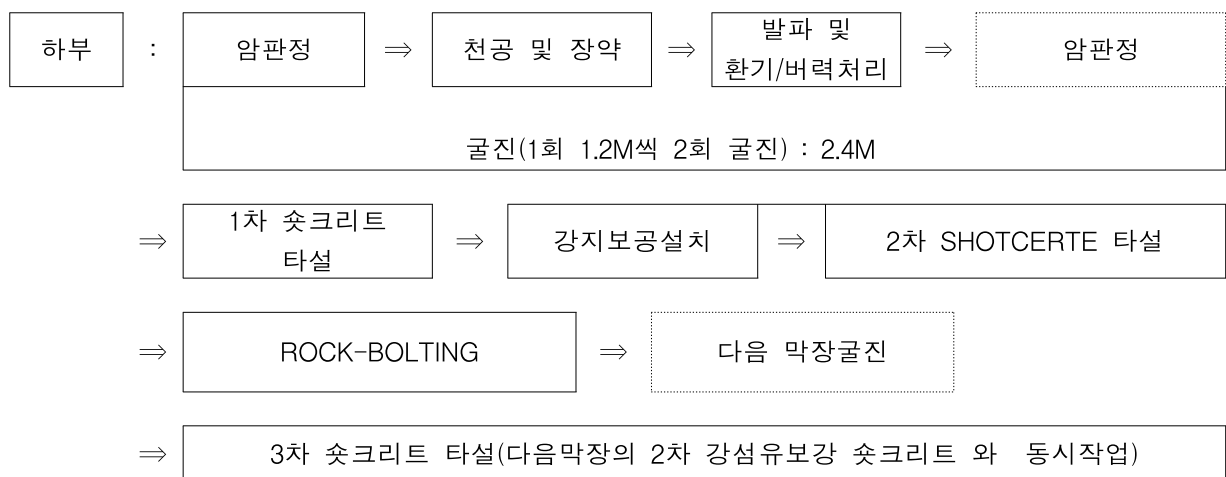
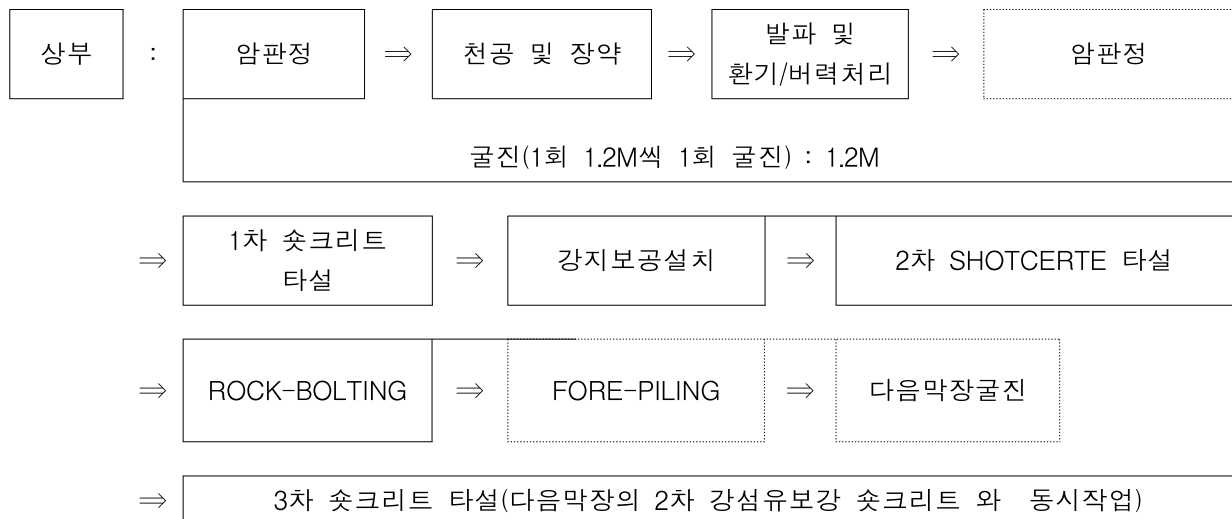


(라) 발파 공법 4





(마) 발파 공법 5



(바) 발파 공법 6



(3) 1회 발파에 따라 발생하는 버력의 부피 및 무게

(단위 : m³)

발파공법	A 업체	B 업체	C 업체
1	329.77	306.86	335.87
2	329.77	306.86	335.82
3	192.49	176.84	195.89
4	147.82	134.13	199.62
5	119.50	111.56	121.53
6	99.576	94.00	101.28

표 2 자문 업체별 추정 버력 발생량(부피)

자문결과 각 업체별로 1회 발파에 따라 발생하는 버력의 부피는 조금씩 차이가 발생하고 있었다. 또한 단위 부피당 버력의 무게도 기반암의 종류에 따라 2~2.65톤으로 차이가 발생하게 된다. 버력의 무게는 캡슐의 구름 저항과 직접적으로 관계하게 되고, 또한 버력의 부피는 캡슐의 크기와 관련되는 등 중요한 변수라 할 수 있다.

(4) 덤프트럭에 버력 상차시 필요한 시간 및 운송간격

기존의 터널 공사현장에서는 일반적으로 작업장에 위치한 폐일로더 혹은 백호우를 통해 덤프트럭에 상차하고 있다. 효율적인 암 버력의 배출 및 터널 1사이클 공정에 필요한 시간을 맞추기 위해서라도 이 상차장비들이 시간 지연없이 연속적으로 가동해야 한다. 또한 덤프트럭의 사용 차량 수도 이를 만족하기 위한 수를 사용하고 있다. 즉, 덤프트럭에 버력 상차시 필요한 시간은 필요로 하는 차량의 수를 결정하는데 중요한 변수라 할 수 있다. 덤프트럭의 경우 단순 장비 임대료가 500~600만원, 운전기사 인건비 및 유류비 포함시 약 1,000만원이 소요된다는 점을 고려했을 때 버력 배출에 필요로 하는 차량의 수는 경제성 분석에 중요한 영향을 미치는 변수라 할 수 있다.

이 버력 상차시 필요한 시간은 일반적으로 약 5분으로 산정하고 있다.

(5) 발파 후 유해가스 발생량

발파시 배출되는 유해가스는 폭약의 종류에 따라 다소 차이가 발생하고 있으며 유해가스의 환기에 필요로 하는 환기량은 화약량 및 환기방식을 고려하여 산정하게 된다. 이 중 에멀전 폭약은 다이나마이트에 비해 폭발력은 다소 떨어지나 발파 후 배출가스가 양호하여 환기측면에서 유리하며 진동저감에도 효과적인 특징을 가지고 있다.

터널 연장이 짧은 공사현장의 경우 별도의 환기시설을 사용하지 않고 자연 환기방식을 채택하는 경우도 존재한다고 하며 이 경우 유해가스가 충분히 배출되지 않을 가능성도 존재하게 된다.

구 분	CO(m^3/kg)	NOx(m^3/kg)	비 고
일반 다이나마이트	8.0×10^{-3}	1.5×10^{-3}	CO > NOx
기타 다이나마이트	11.0×10^{-3}	2.5×10^{-3}	CO > NOx
에멀전폭약	5.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}	CO > NOx
슬러리폭약	2.5×10^{-3}	1.5×10^{-3}	CO > NOx
정밀폭약(Finex)	9.0×10^{-3}	17.0×10^{-3}	CO < NOx
ANFO	30.0×10^{-3}	20.0×10^{-3}	CO > NOx

표 3 발파에 사용하는 폭약 별 유해가스 배출량 비교

(6) 디젤기관 소요 환기량

디젤기관에서 배출되는 유해가스는 장비의 종류 및 규격, 제조사별로 상이하다. 다만 일반적으로 장비의 출력에 비례하며 소요 환기량은 디젤기관의 배출가스 중 유해성이 큰 Nox(허용농도 25ppm)을 기준으로 산정하게 된다. 아래의 표4는 디젤기관 소요 환기량의 예로써 덤프트럭이 전체 디젤기관 소요 환기량의 1/3을 차지하고 있다. 이 덤프트럭을 PCP 시스템으로 대체할 경우 소요 환기량이 감소하게 되므로 터널 내 공기질 상승을 기대할 수 있다.

구 분		출 력 (PS)	환기량 산정기준		수량	소요 환기량 (①×②×③)	비 고
			출력당 환기량 ($m^3/minps$)	가 동 료			
점보드릴	2Boom	90	2.2	0.2~0.3	1	59.4	1차선
	3Boom	156	2.2	0.2~0.3	1	103.0	2차선
로우더	1.72m ³	110	2.2	0.2~0.3	1	72.6	1차선
	2.87m ³	207	2.2	0.2~0.3	1	136.6	2차선
덤프트럭	10.5톤	290	0.8	0.4~0.5	4	464.0	1차선
	15.0톤	320	0.8	0.4~0.5	4	512.0	2차선
기 타	숏크리트 타설기	115	0.8	0.15~0.2	1	18.4	공 통
	덤프믹서	260	0.8	0.4~0.5	2	208.0	공 통
	펌프카	295	0.8	0.4~0.5	1	118.0	공 통
계						1,692	-

표 4 디젤기관 소요 환기량의 예

(7) 터널 공중별 분진 발생량

분진의 성분은 기반암의 종류에 따라 차이가 발생하게 된다. 표 5는 터널 공중별 발생량을 나타낸 것으로써 PCP 시스템을 적용할 경우 운반작업에 의한 분진발생량을 배제할 수 있어 터널 공사 현장 내 공기질 상승을 기대할 수 있게 한다. 또한 건설기계용 디젤기관에 의한 분진발생량 중 덤프트럭에 의한 발생량을 배제할 수 있을 것이다.

구 분	분진발생량(mg/m^3)	비 고
천공작업	1 ~ 50	
발파작업	100 ~ 300	
적재작업	10 ~ 1,000	
운반작업	10 ~ 1,000	
건설기계용 디젤기관	100 ~ 2,000	매 연
췌크리트 작업	10 ~ 200	

표 5 터널 공종별 분진발생량

(8) 터널 공사 현장 내 환기 방식

종 류	특 성
송기식	- 급기덕트만을 사용하는 방법 - 갱구에서 신선한 공기를 작업장에 공급 - 터널 내부가 오염될 수 있으나 소규모 터널 공사시 작업장 송기에 의한 배기 가능 - 연질의 풍관 사용 가능하므로 공사비 절감 가능
송 · 배기 조합식	- 급기 및 배기덕트를 조합하여 사용하는 방법 - 장대터널 공사시 충분한 배기량 확보 가능 - 배기가스, 분진, 수분상태에 따른 시계 확보 용이 - 급기는 연질풍관, 배기는 경질풍관을 사용하는 것이 일반적 - 공사비 및 동력비 면에서 송기식에 비해 상대적으로 증가
배기식	- 작업장의 오염된 공기를 배기덕트만으로 배출 - 발파가스를 곧바로 외부로 배출 ⇨ 터널 내 다른 지역이 오염되지 않음 - 경질의 풍관 사용 - 공사진행에 따라 환기팬 추가설치로 경제성 우수
송기식 및 집진설비 사용	- 갱구에서 신선한 공기를 급기덕트를 통해 공급 - 터널 연장이 길어져도 분진제거에 의한 터널내 환경 개선 - 터널 외부의 오염분진량을 감소 ⇨ 외부 환경 개선 가능

표 6 터널 공사 현장 내 환기방식 및 특성

표 6은 터널 공사 현장 내 적용할 수 있는 환기방식 및 특징을 비교한 것이다. PCP 시스템은 이 중 송기식 및 배기식을 조합한 형태와 동일한 효과를 볼 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

(9) Dump site의 운용

터널 공사현장에서 dump site로 배출되는 암 버력은 재활용 가능한 버력과 불가능한 버력으로 구분 적치하는 경우가 다수 존재한다. 덤프트럭을 통해 암 버력을 배출하는 경우 이동의 제약이 없기 때문에 재활용 가능한 버력과 불가능한 버력을 자유롭게 적치할 수 있으나 파이프라인을 통해 이동하는 PCP 시스템의 캡슐은 파이프라인의 주변에 크게 쌓을 수 밖에 없다.(그림 21)

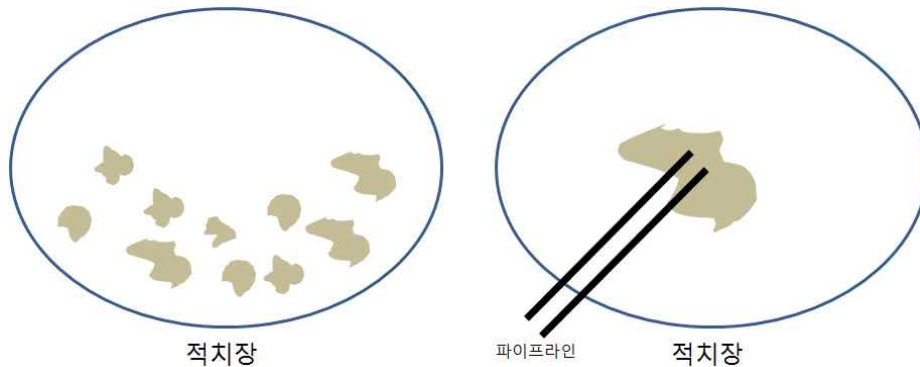


그림 21 덤프트럭과 PCP 시스템의 Dump site 운용 비교
: 덤프트럭의 경우(Left) 자유롭게 배출하나 PCP 시스템의 경우(Right)
이동한 파이프라인 주변에 크게 쌓는 수 밖에 없음

또한 발파 작업 전 기반암에 균열이 존재할 경우 PCP 시스템의 캡슐 규격 이상의 큰 버력이 발생할 경우도 존재한다.(그림 22) 이러한 경우를 고려하기 위해서라도 작업장 부터 portal까지는 PCP 캡슐을 통해 이동하고 portal에서 dump site까지는 덤프트럭을 통해 이동하는 방안을 고려해야 한다.



그림 22 암반의 균열에 의한 큰 버력의 발생 예

나. 설문조사

본 연구의 필요성에 대한 공사현장의 의견을 구하기 위해 터널 공사현장 견학 중 현장 작업원들에 대해 설문조사를 수행하였다. 조사 결과 대다수의 작업원이 작업장 내 공기 질 저하로 인한 불편함을 호소하고 있으며 본 연구에 대해 긍정적으로 생각하고 있었다.

Dump site에서 덤프트럭이 버럭 하차 시 전도 위험성에 대해 다수 공감하고 있었다. 실제 이러한 사고 사례는 거의 매년 존재하고 있다.(그림 23) 또한 충분하지 못한 환기로 인해 불편한 작업 환경에 대해 다수 공감하고 있었다. 이에 대한 관련 의견으로 1일 작업 싸이클 타임을 맞추기 위해 충분한 환기가 이루어지지 않은 상태에서 작업한다는 점, 그리고 덤프트럭 이동시 배기가스로 인해 주변의 다량의 분진이 유발된다는 점, 덤프트럭 이동에 따른 분진 발생으로 측량 작업시 시야 확보가 어렵다는 점 등 환기 부분에 대한 다양한 의견을 수렴할 수 있었다.



그림 23 덤프트럭 전락 사고 현장(한국산업안전보건공단)

○ 설문조사 총원

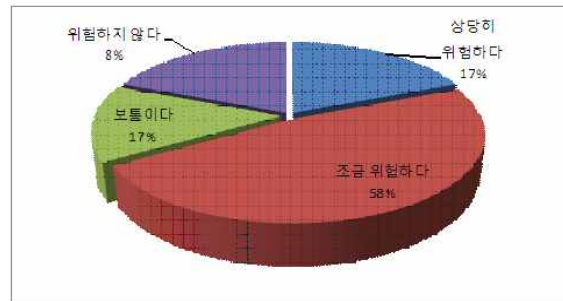
구 분	A 산업	B 산업	총 원
인 원(명)	9	12	21

표 7 설문조사 총원

○ 설문조사 문항 및 결과

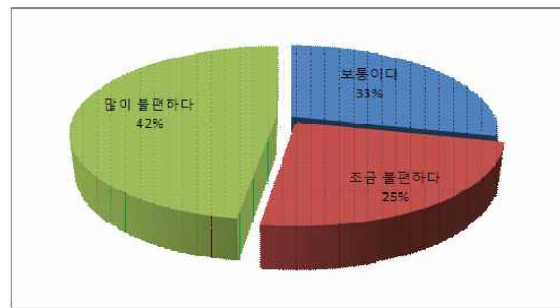
- 터널 공사 현장(터널 내부/외부 이동 포함)에서 덤프트럭의 위험도가 어느 정도라고 생각하십니까?

상당히 위험하다	4
조금 위험하다	10
보통이다	3
위험하지 않다	4
전혀 위험하지 않다	0



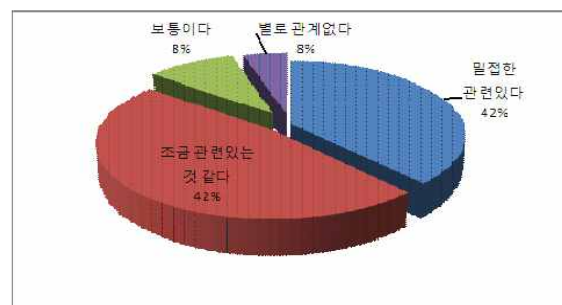
- 터널 굴착 공사 중 터널 내 공기의 질이 어느 정도라고 생각하십니까?

쾌적하다	0
다소 쾌찮은 편이다	0
보통이다	6
조금 불편하다	5
많이 불편하다	10



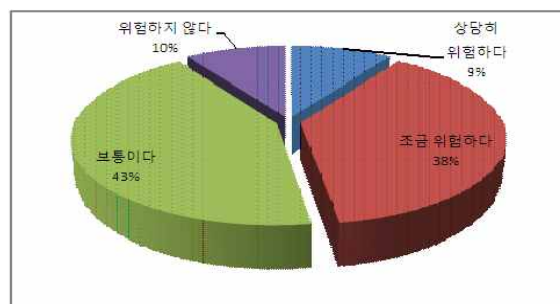
- 터널 공사 현장에서 이동하는 덤프트럭과 터널 내 공기 질이 어느 정도 관련 있다고 생각하십니까?

밀접한 관련있다	8
조금 관련있는 것 같다	10
보통이다	2
별로 관계없다	1
전혀 관계없다	0



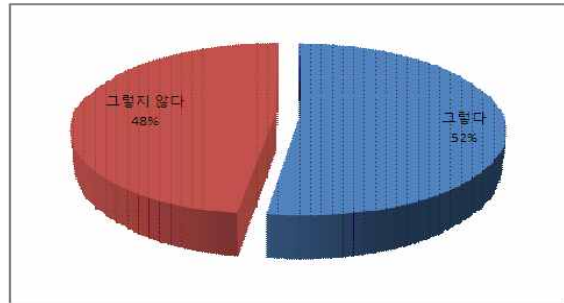
- 덤프트럭으로 배출한 버력을 쌓아두는 적치장의 위험도는 어느 정도라고 생각하십니까?

상당히 위험하다	2
조금 위험하다	8
보통이다	9
위험하지 않다	2
전혀 위험하지 않다	0



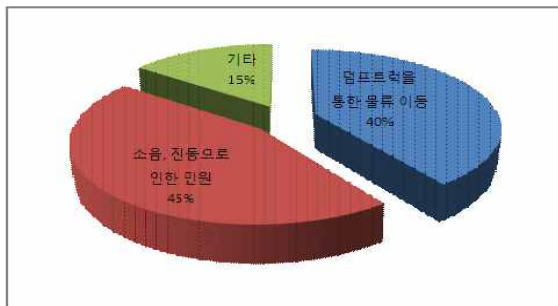
- 발파 후 덤프트럭에 버력을 상차하는 과정 또는 터널 내 덤프트럭 이동 시 분진으로 인한 시야방해로 현장작업이 불편한 경우가 있습니까?

그렇다	11
그렇지 않다	10



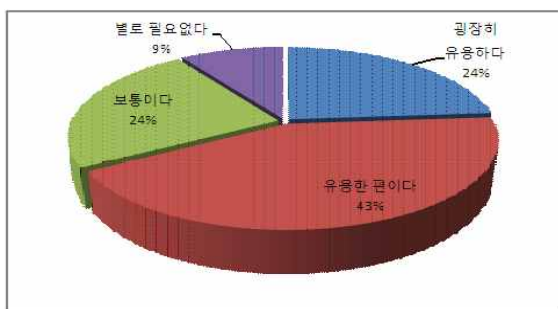
- 터널 굴착 공사 중 공사기간을 지연시키는 주된 원인이 무엇입니까?

덤프트럭을 통한 물류 이동	8
발파 후 터널 내 분진으로 인한 시야 방해	0
소음, 진동으로 인한 주변 민원 발생	9
기 타	3



- 본 연구는 터널 공사 현장의 물류 운송장비를 덤프트럭에서 공압식 캡슐 파이프라인 설비로 대체하는 친환경 운송시스템을 개발함으로써 공사의 공기단축 및 작업 환경의 향상을 꾀하는 것입니다. 이러한 연구에 대해 어떻게 생각하십니까?

굉장히 유용하다	5
유용한 편이다	9
보통이다	5
별로 필요없다	2
전혀 필요없다 생각한다	0



2.4. 기초 설계조건 구축

실제 터널 공사 현장에서 덤프트럭의 임대 수를 산정하는 방법은 작업장에 위치하고 있는 페일로더가 시간 지연없이 연속적으로 운행하기 위한 필요 대수를 사용하고 있다.

즉, 덤프트럭이 dump site까지 왕복하는 시간과 페일로더가 상차하는데 필요로 하는 시간을 참조하고 있으며, 이를 기반으로 아래와 같이 시스템 효율성을 분석하였다.

가. 시스템 효율성 분석(버력 처리 소요시간의 산정)

○ 차량의 왕복시간 산정

$$\text{왕복시간} = \text{거리에 따른 이동시간} + \text{상차시간(loading time)} + \text{하차시간(unloading time)}$$

○ 페일로더의 지연없이 운행하기 위한 차량의 수 산정

$$\begin{aligned} \text{차량의 수} &= \text{왕복시간} / \text{덤프트럭의 운행간격} \\ \text{덤프트럭의 운행간격} &= \text{상차시간(loading time)} \end{aligned}$$

○ 버력 전체를 배출하기 위한 운행주기 계산

$$1\text{주기를 통해 처리 가능한 버력량} = \text{차량의 수} \times \text{차량 부피}$$

$$\begin{aligned} \text{버력 전체를 배출하기 위한 운행주기} \\ &= \text{전체 버력량} / 1\text{주기를 통해 처리가능한 버력량} \end{aligned}$$

○ 버력 처리 소요시간 산정

$$\begin{aligned} \text{버력 처리 소요시간} \\ &= \text{버력 전체를 배출하기 위한 운행주기} \times \text{왕복시간} \end{aligned}$$

※ 주기 : PCP 시스템에 사용하고 있는 차량 전체가 1회씩 운반하고 되돌아오는 것

※ 싸이클 : 전체 터널 공정 1회 수행하는 것

나. 설계인자 분석을 통한 기초 설계조건 구축

(1) 주행속도

PCP 캡슐의 주행속도가 증가하면 증가할수록 1주기 시스템 운행에 필요로 하는 차량(캡슐)의 수가 감소하게 된다. 여기에서 1주기 시스템이란 주어진 캡슐이 모두 1회 왕복하는 것을 의미한다. 1주기 시스템 운행에 필요로 하는 운반장비(덤프트럭, 캡슐)의 수가 감소되는 것은 결국 운반 장비의 최대 제한 수까지 도달하는데 필요로 하는 거리도 증가하게 된다. 운반장비의 최대 제한수란 1주기 운행만으로 버력을 모두 배출 할 수 있는 수를 의미한다. 예를 들어 전체 100m³의 버력을 배출하는데 10m³ 씩 배출할 수 있

는 덤프트럭이 있다면 덤프트럭은 최대 10대 이상은 필요로 하지 않으며 이 10대가 운반장비의 최대 제한수를 의미한다.

굴진길이가 늘어나게 되면 버력의 배출 시간이 증가하게 된다. 그러나 이에 따라 차량(캡슐)을 증차하게 되면 버력의 배출시간이 다소 감소하게 된다. 주행속도가 증가하게 되면 1대의 차량(캡슐)이 시간 당 처리할 수 있는 버력의 부피가 증가하게 되며 결국 1대의 증차에 따른 버력 처리 소요시간의 감소 폭도 증가하게 된다.(그림 24)

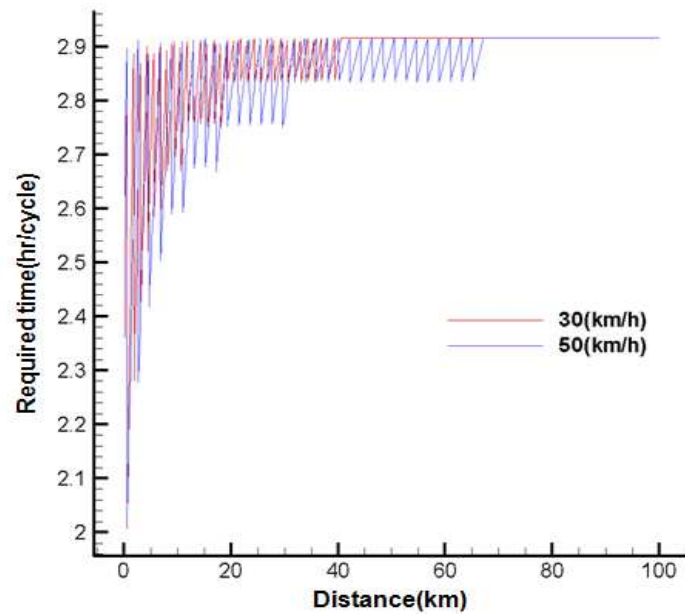


그림 24 주행속도 변화에 따른 전체 버력처리 시간 소요

(2) 적재 부피

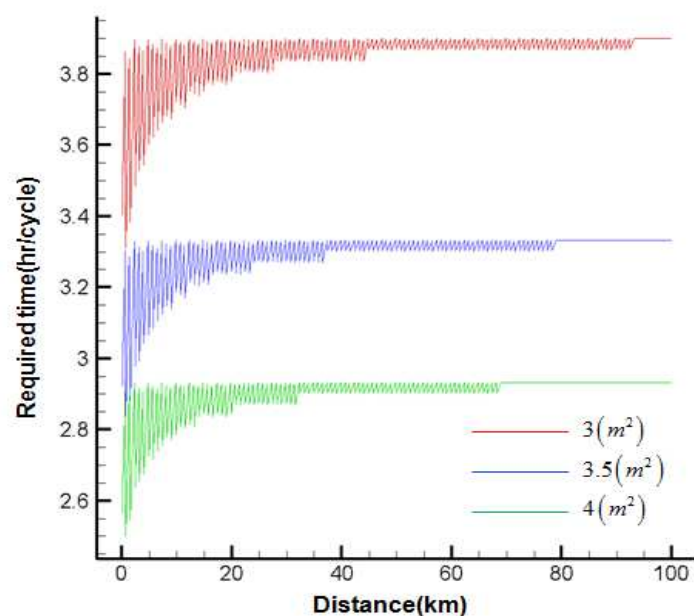


그림 25 적재부피에 따른 전체 버력처리 시간 소요

1대의 차량(캡슐) 당 적재할 수 있는 적재부피가 증가하게 되면 전체 버력을 배출하는데 필요로 하는 차량(캡슐) 수가 감소하게 된다. 이를 통해 결국 차량(캡슐)의 최대 제한 수까지 도달하는데 필요로 하는 거리가 감소하게 된다. 또한 주행속도가 일정한 가운데 적재 부피가 늘어난다면 단위 시간 동안 처리할 수 있는 용량이 증가하게 되어 전체 버력 처리 시간이 감소하게 된다.(그림 25)

(3) 운송 간격

차량(캡슐)의 운송 간격이 줄어들게 되면 상차장비의 시간 지연 없는 운행에 필요로 하는 차량(캡슐)의 수가 증가하게 된다. 그러므로 차량(캡슐)의 최대 제한 수까지 상대적으로 더 빨리 도달하는 경향을 확인할 수 있다.(그림 26) 또한 운송간격이 감소하게 되면 버력의 배출이 더 수월해지므로 전체 버력 처리 시간이 감소하게 된다.

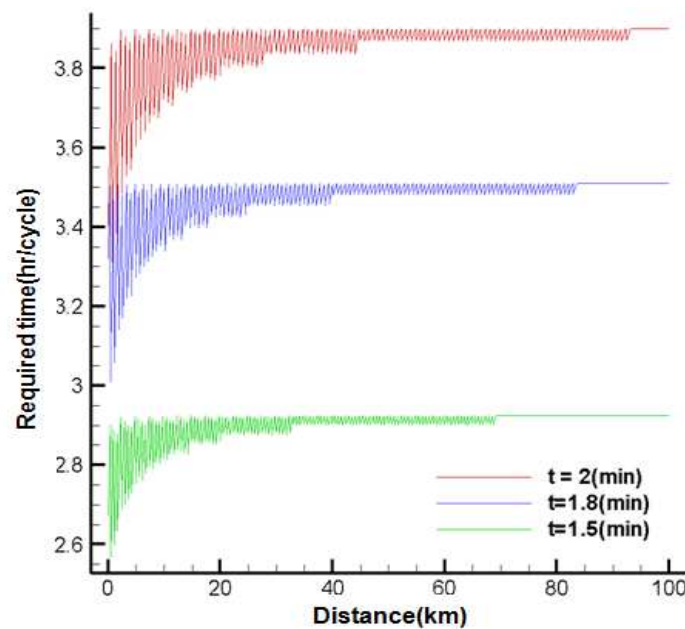


그림 26 운송간격에 따른 버력처리 시간 소요

다. 기초 설계조건외의 구축

(1) 차량별 적재부피

1번 운행에 대량의 버력을 배출하는 덤프트럭과는 달리 PCP 시스템의 캡슐은 소량의 버력을 연속적으로 배출하는 방법을 채택해야 한다. 이는 자체적인 동력원이 없기 때문에 많은 버력을 한 번에 적재할 경우 공기압에 의한 동력이 구름저항을 이기지 못하는

경우도 발생할 수 있기 때문이다. 또는 터널 공사 현장에서 일반적으로 사용하는 페일로더의 적재 부피가 $3.5(m^3)$ 임을 고려한다면 PCP 캡슐의 적재부피도 이와 동일하게 하는 편이 유리할 것이다. 또는 터미널에 별도의 상차 장비를 탑재하여 $3.5(m^3)$ 보다 더 작은 부피를 빠르게 상차하는 방법도 가능할 것으로 판단된다. 그러나 터미널에 상차 장비를 탑재하는 경우 시스템 생산단가 및 산정될 임대료도 증가할 수 있으므로 기초 설계조건으로써 차량별 적재부피를 $3.5(m^3)$ 으로 결정하였다.

(2) 주행속도

캡슐의 주행속도가 빠르면 빠를수록 캡슐의 수가 감소하므로 임대료 면에서 유리하게 된다. 그러므로 주행속도는 빠른 편이 더 좋지만 이를 만족하기 위한 blower의 용량도 증가하게 된다는 점 또한 고려해야 한다.

Henry Liu의 연구[1]에 따르면 캡슐의 속도는 약 54km/h지도 설계가 가능하며 실용화 사례를 검토해보아도 이와 준하는 속도를 설계하는 것이 가능하다. 본 연구에서는 캡슐의 주행속도로 50km/h로 선정했고, 이 속도는 시스템 분석코드 활용 결과를 통해서도 가능할 것으로 판단된다. 실제 경제성 검토 시 주행속도를 변경할 필요도 존재한다.

(3) 운송 간격

약 $8\sim 10m^3$ 의 버력을 적재하는 덤프트럭의 경우 상차시간은 약 5분 정도 소요되며, 이 경우 페일로더는 약 4회 정도 적재하게 된다. 적재 부피를 $3.5m^3$ 으로 결정하는 경우 상차시간은 이와 비견하여 약 1분 안팎이 가능하며, 기존의 덤프트럭과 유사한 효율로 버력을 배출하기 위해서는 운송간격은 약 1.7~1.8분 정도로 산정되어야 한다.

구 분	덤프트럭	PCP 시스템
차량별 적재부피(m^3)	8	3.5
주행속도(km/h)	20	50
상차시간(min)	5	1.7

표 8 기존 덤프트럭 제원 및 PCP 시스템의 설계조건 비교

2.5. 캡슐 설계

가. 캡슐 외형 결정

일본에서 기존에 실용화된 PCP는 그림과 같이 실린더형 캡슐과 박스형 캡슐로 구분되어 있다. 실린더형 캡슐은 그림 27과 같이 회전이 가능한 짐발형 바퀴의 조합을 캡슐 전·후방에 설치하여 사용한다. 반면 박스형 캡슐은 전·후방의 바닥면에 바퀴 2쌍과 곡면부에서 회전하기 위한 가이드 바퀴 2쌍을 설치하여 사용하게 된다.

두 타입의 캡슐은 다음과 같은 특성을 가지게 된다.

구 분	실린더형 캡슐	박스형 캡슐
장 점	- 우수한 벽면 내압 특성 - 규격화 파이프라인 사용시 ⇨ 단가 절감 - 대형굴착기(TBM)과의 호환성	- 적재에 편리 - 설계속도에서 상대적으로 자유로움 - 파이프라인의 지상 고정예 용이
단 점	- 설계속도의 상대적 제한 - 지상 고정예 불편	- 압력이 높은 유류 수송에 불리 - 별도의 파이프라인 생산 필요
선 정		○

표 9 캡슐 형상에 따른 장·단점 비교 및 선정결과

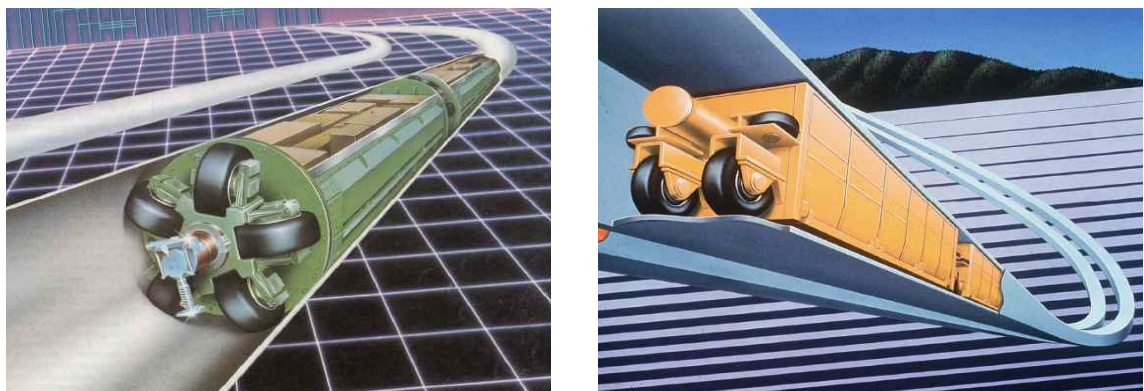


그림 27 캡슐의 형상. 실린더형 캡슐(Left) & 박스형 캡슐(Right)

(1) 실린더형 캡슐의 특성

○ 우수한 벽면 내압 특성

실린더형 캡슐을 사용하는 경우 이와 함께 사용되는 실린더형 파이프라인은 내부 압력이 벽면에 고르게 분산되기 때문에 내압특성이 뛰어나다. 뿐만 아니라 만일 파이프라인이 지하에 매설되어 사용되는 경우 외부로부터 전달되는 고압 또한 분산되기 때문에 파이프라인이 별도의 변형이나 데미지 없이 형상을 유지할 수 있게 된다.

○ 파이프라인의 규격화에 따른 저렴한 생산 가능

원형 파이프라인의 지름이 4ft 이하인 경우 일반적으로 상용화된 파이프라인 그대로 사용할 수 있기 때문에 별도의 개발 없이 사용할 수 있다. 그러므로 새로운 규격으로 파이프라인을 만드는 것 보다는 저렴한 생산이 가능하게 된다.

○ 대형 터널 굴착 분쇄기와의 호환성

NATM 공법은 발파 공정 중 소음 및 진동이 심하기 때문에 도심지와 가까운 곳에서는 적용하기 어려우며 이 경우 대형 터널 굴착 분쇄기(TBM, Tunnel Boring Machine)을 사용하게 된다. 또한 터널 단면이 원형인 경우에 이 TBM을 사용하기도 하는데, 이 TBM을 수송하는데 원형 파이프라인이 사각형 파이프라인보다 더 유리하다.

(2) 박스형 캡슐의 특성

○ 적재에 편리

박스형 캡슐의 경우 상자, 팔레트 혹은 표준화된 컨테이너 등을 싣는데 공간의 낭비 없이 적재하기 간편하다.

○ 캡슐 이동속도 제한면에서 유리

박스형 캡슐에 사용하는 일반적인 바퀴는 실린더형 캡슐에 사용하는 짐발형 바퀴에 비해 이동속도 면에서 설계하기 유리하다. 짐발형 바퀴는 일반적으로 생산단가가 높으면서 마모가 일반적인 바퀴에 비해 상대적으로 심하게 일어난다. 또한 바퀴의 수명이나 타이어의 과열 없이 이동하기 위한 속도에서 일반적인 바퀴에 비해 제한이 있다. 일본에서의 한 연구 결과에 따르면 짐발형 바퀴는 과열 없이 이동하는데 최대 10m/s를 넘지 못하지만 일반적인 바퀴는 20m/s 이상의 속도에서도 별도의 과열이 없다고 한다.

○ 파이프라인 설치의 용이성

박스형 캡슐에 사용하는 사각형 파이프라인은 실린더형 캡슐에 사용하는 원형 파이프라인보다 지상 위 설치 시 상대적으로 고정하기 쉽다.

(3) 캡슐 단면 형상의 결정

터널 공사현장에서 적용하게 될 PCP 시스템은 실린더형 캡슐보다 박스형 캡슐을 사

용하는 것이 합당한 결정으로 판단된다.

우선 PCP의 파이프라인은 지하에 매설하여 사용하는 형태라기보다는 지상에 설치하고, 터널의 굴진에 따라 연장하는 형태를 취하게 된다. 그러므로 지상에 고정하기 편한 사각형 파이프라인을 사용하는 편이 더 좋다. 물론 사각형 파이프라인 안에 원형 캡슐을 사용할 수도 있지만, 이러한 선택은 캡슐과 파이프라인 사이의 밀폐율을 떨어뜨리게 되므로 시스템 성능의 저하를 피할 수 없다.

또한 설계 속도의 제한이 문제가 된다. 현재 버력운송에 가장 널리 사용되고 있는 덤프트럭의 경우 안전규정상 현장에서 20km/h를 넘지 못하도록 되어 있다. 덤프트럭은 자체 동력을 가지고 있기 때문에 한 번에 많은 부피·무게의 버력을 운송할 수 있으므로 이 속도만으로도 충분하다. 그러나 PCP 시스템은 캡슐별로 자체 동력을 가지고 있지 않기 때문에 개별 캡슐별 운송 부피가 덤프트럭에 비해 상대적으로 적게 설계될 수 밖에 없다. 이 상대적으로 적은 운송 부피를 충당하기 위해 설계속도는 증가할 수 밖에 없다. 실린더형 캡슐은 설계속도에 제한이 있기 때문에 설계속도 제한 없이 자유로운 박스형 캡슐이 더 합당한 선택이라 할 수 있다.

나. Wheel type의 선정

PCP 시스템에 적용할 수 있는 바퀴로 상용화에 성공한 일본의 경우 고무타이어를 사용하고 있다. 이에 대해 미국의 Henry Liu 연구진은 시스템의 효율을 향상하기 위하여 레일을 사용하는 것을 제한하고 있다. PCP 시스템의 바퀴는 이처럼 고무바퀴를 사용할 수 있고, 또 레일을 사용할 수도 있다.

일반적으로 바퀴를 통해 이동하는 운송수단에 작용하는 항력은 크게 이동속도와 밀접한 연관을 맺는 공기저항과 이동속도보다는 유닛의 무게와 더 연관을 가지는 마찰력으로 구분된다. 일반적으로 이동속도가 높지 않다면 공기저항은 마찰력에 비해 그 크기가 작다. PCP의 캡슐의 이동속도는 약 10~20m/s 임을 고려한다면 마찰력이 공기저항에 비해 주요하게 작용하는 요인이라 할 수 있다.

일반적으로 고무타이어의 구름저항은 약 0.01정도임에 비해 레일은 약 0.002정도이다. 즉, 레일을 사용하는 편이 시스템의 효율 면에서는 더 유리한 선택일 수 있다.

시스템의 효율 및 설계조건 충족을 위해서는 레일을 사용하는 것이 경제성 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

(1) 구름 저항

일반적으로 구름 저항은 캡슐의 무게에 의해 결정된다. 그러나 이 외에 속도에 의해 변경되는 부분도 존재하며 고무타이어 및 레일에 대해서 다음과 같이 결정된다.

(가) 고무타이어의 구름저항

일본의 Yoshinobu Morikawa 연구진은 고무타이어에 대한 실험적 연구를 수행한 바 있다.[12] 일반적으로 알려진 구름 저항식은

$$R = \xi N_f + R_0$$

ξ : friction coefficient, N_f : normal force, R_0 : friction of wheel bearing

으로 구성된다. 이에 대한 실험적 연구 결과 friction coefficient ξ 와 베어링에서의 마찰력 R_0 는 표 10과 같이 정리되었다.

Wheel No.	ξ	R_0 [N]
1	0.0325	0.203
2	0.0249	0.484
3	0.0345	0.284
4	0.0412	0.282

표 10 실험을 통한 구름 저항식의 상수 결정(Yoshinobu Morikawa 연구진)

수 천 kg에 달하는 캡슐에서 베어링의 마찰은 무시할 수 있을만큼 작다고 가정할 수 있으므로 R_0 는 무시하는 경우가 많다. 구름 마찰계수를 보면 약 0.033으로써 일반적으로 알려진 고무타이어의 구름 마찰계수와 동일한 차수를 보여주고 있다.

(나) 레일의 구름저항

텍사스 교통국에서 수행한 연구에서 대상은 PCP 시스템과는 다소 차이가 있다. 두 시스템 모두 파이프라인 안에서 이동한다는 점은 동일하다고 할 수 있으나 텍사스 교통국에서 수행한 연구의 대상은 캡슐 자체에 동력원을 내장하고 있다는 점에서 차이가 있다. 그러나 이 텍사스 교통국에서 연구한 캡슐은 바퀴로 철제 바퀴와 레일을 사용하고 있으며, 본 연구에서는 이 부분에 대해 참조하고자 한다.

레일 위를 달리는 캡슐의 구름저항도 고무타이어와 마찬가지로 베어링 마찰력, 레일과 플렌지 사이의 마찰력에 의해 결정되는 부분과 이동하는 속도에 의해 결정되는 부분으로 구분되며 다음과 같은 식을 사용한다.

$$R = 3.82 \frac{\text{capsule mass}}{424.4} + 39 \times 10^{-6} \frac{\text{capsule mass}}{424.4} V_1$$

여기에서 이동속도에 의해 결정되는 마지막 항은 이동속도가 느린 경우 무시할 수 있다.

다. 제동장치

기본적으로 PCP에는 엔진 같은 동력원은 존재하지 않는다. 그러나 Henry Liu가 제안한 시스템에는 이러한 동력원은 존재하지 않는 대신 보조동력원으로써 압축공기를 사용하고 있다.

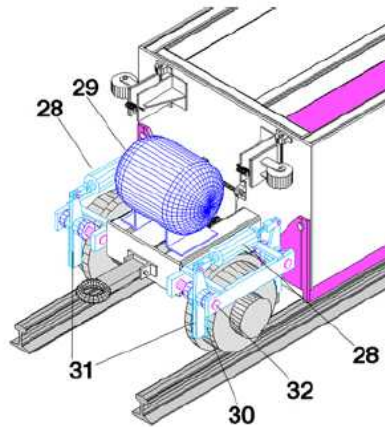


그림 28 Henry Liu의 캡슐 design

그림 28은 Henry Liu의 캡슐 디자인이다. 그림 28에 표시된 28은 실린더로써 각 바퀴의 brake block을 구동시키기 위해 설치되어 있다. 이 디자인에서는 29의 압축공기 탱크로부터 전달받는 공기를 통해 32의 고정된 축을 붙여 제동장치를 작동시키고 있다. 또한 압축공기는 제동뿐만 아니라 파이프라인 외부에서 자체적으로 저속으로 이동하기 위한 동력원으로 사용된다. 이 디자인에서 압축공기는 1회의 충전으로 150회의 제동을 할 수 있다고 한다.

이 디자인 그대로 터널 공사 현장에 적용할 PCP 시스템에 적용할 수 있지만, 주기적으로 압축공기를 재충전해야 한다는 점에서 번거로울 수 있고 각 유닛의 생산단가가 증가할 것이다. 그러므로 본 연구에서 제안하는 디자인에서는 각 유닛에 제동장치를 설치하기 보다는 unloading station에 stopper를 설치하고 있다. 이를 통해 오르막 길 경사에서 감속한 유닛이 완전히 제동하게 된다.

다만, 파이프라인 외부에서 내부로 진입할 경우와 같은 단거리 이동을 위한 보조동력원은 필요로 하며 Henry Liu와 같이 압축공기를 이용하는 방법이나 소형의 발전기를 통한 전기 동력을 사용하는 방법을 제고해야 할 것으로 판단된다.

라. 3차원 유동해석

파이프라인 내 이동하는 캡슐의 최적의 형상을 알아보기 위해 본 연구에서는 3차원 형상에 대한 유동해석을 수행한다. 이 유동해석은 시스템 분석의 정확도를 보다 향상하기 위한 과정이라 할 수 있다. 현재 rectangular shape 캡슐 및 전두부 aerodynamic shape 캡슐, 전두부 및 후미부 aerodynamic 캡슐에 대한 격자 생성 작업을 완료했다.

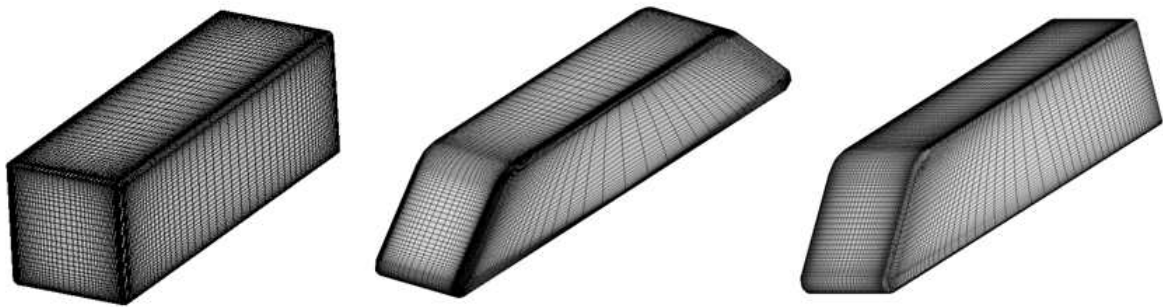


그림 29 3차원 형상에 대한 격자 생성. 좌측부터 Rectangular shape 캡슐, 전두부 및 후미부에 대한 Aerodynamic shape 캡슐, 전두부 Aerodynamic shape

그림 30은 전두부 및 후미부에 대한 aerodynamic shape 캡슐에 대한 해석결과이다. 후미부에서 불어오는 유동이 파이프라인 사이 공간을 지나 전면부로 확장하고 있으며 그림 30의 좌측과 같이 전두부의 끝에서 작은 박리 영역이 형성됨을 볼 수 있다. 현재 해석 결과 캡슐에 작용하는 힘은 약 1076(N)이다.

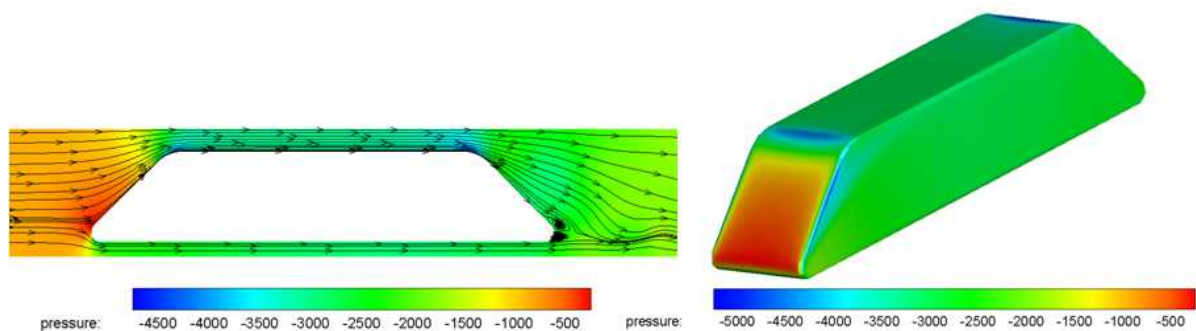


그림 30 전두부 및 후미부 Aerodynamic shape에 대한 해석결과. 압력장 분포 및 Streamline(좌측) 및 표면 압력 분포(우측)

2.6. 파이프라인 설계 및 동력원 선정

PCP 시스템의 효율성은 캡슐의 형상도 영향을 미치지만 파이프라인과 캡슐 사이의 거리(blockage ratio)도 큰 영향을 미치게 된다. 그러나 이 blockage ratio와 시스템 효

을 간의 상관관계를 정량적으로 규명한 연구자료의 부재로 인하여 차년도 연구과제였던 시스템 분석기법의 부분적 개발 및 적용이 필요했다.

부분적으로 개발한 시스템 분석코드는 1개의 blower가 파이프라인 끝에 위치할 경우만 모사 가능하고, 실제 시스템의 운용을 모하기 위한 밸브나 여러 파이프가 연결된 부분에서의 모델링 등이 제외된 단순화된 모델만 해석 가능한 상태이다.

파이프라인의 대표직경 선정 및 이에 대한 동력원 선정은 다음과 같은 순서로 진행되었다. 우선 파이프라인의 대표직경별 요구 증압력을 간단한 수식을 통해 계산하고, 이를 만족할 수 있는 시제품 후보군을 선정하였다. 이후 시스템 분석코드를 통해 후보군에 대한 시뮬레이션을 수행하고 그 결과 캡슐의 주행속도가 목표치에 도달할 수 있는 동력원들을 선별하였다. 이후 blower의 소요 에너지가 가장 작은 것을 해당 파이프라인에 대한 동력원으로 선정하였다.

가. 캡슐에 작용하는 힘

그림 31은 캡슐의 개념도로써 캡슐에 작용하는 힘은 다음과 같다.

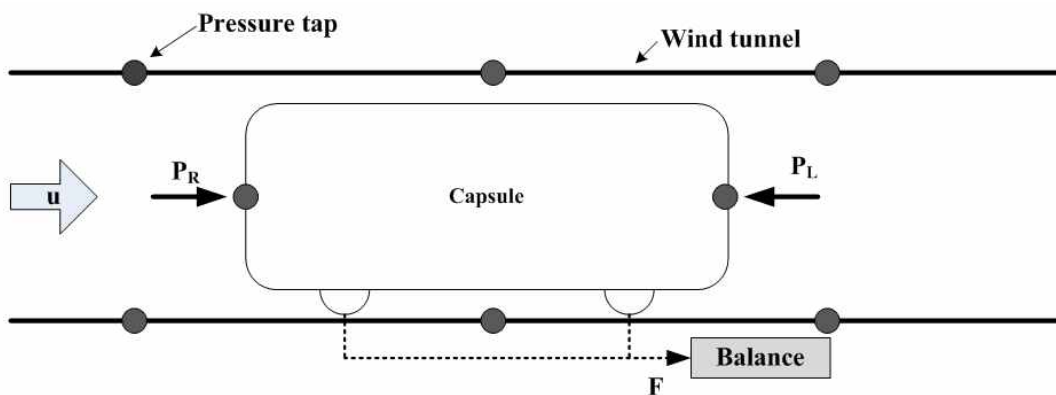


그림 31 캡슐-파이프라인 개념도

제 1 추진력	: $S_i(p_L - p_R)$	캡슐 단면에 작용하는 추진력 전두부, 후미부 압력차에 의해 획득
제 2 추진력	: $\int_{x_1}^{x_2} C_{f,i} \frac{1}{2} \rho (u - V_i) u - V_i P_{r,i} dx$	캡슐 몸체에 작용하는 추진력 유동과의 마찰력에 의해 획득
마찰 항력	: $f_n m_i g_n$	마찰에 의한 저항력
중력	: $m_i g_i$	캡슐의 바퀴와 rail 간 마찰에 의한 중력의 주행방향 성분

이러한 힘이 작용하는 캡슐에 대하여 운동 방정식은 다음과 같이 구성되게 된다.

$$F_{i,x} = S_i(p_L - p_R) + \int_{x_1}^{x_2} C_{f,i} \frac{1}{2} \rho (u - V_i) |u - V_i| \text{Pr}_i dx - f_n m_i g_n + m_i g_i = m_i a_i$$

$$V_i^n = V_i^{n-1} + a_i \Delta t$$

$$x_i^n = x_i^{n-1} + V_i \Delta t$$

$F_{i,x}$	: net force acting on capsule i
S_i	: cross-section area of capsule i
p_L	: pressure acting on capsule rear cross-section
p_R	: pressure acting on capsule head cross-section
u	: air velocity
V_i	: speed of moving capsule i
$C_{f,i}$	: skin friction coefficient of body of capsule i
x_1	: rear coordinate of capsule i
x_2	: head coordinate of capsule i
f_n	: friction coefficient due to capsule weight
g_n	: n-directional gravity acceleration
g_i	: i-directional gravity acceleration
m_i	: mass of capsule i
a_i	: acceleration of capsule i
x_i	: absolute coordinate of capsule head
Δt	: time step size
Pr_i	: perimeter of capsule i
$\text{Pr}_i dx$	: surface area of capsule i on which friction force acted

이처럼 유동의 압력차에 의한 힘, 유동의 점성에 의한 마찰력 힘, 중력의 주행성분 및 구름 저항에 의한 힘을 고려한 캡슐의 운동방정식을 통해 캡슐의 이동속도, 변위 등을 계산하게 된다. 여기에서 유동에 대한 해석을 필요로 하며 유동해석에 대한 지배방정식 및 소스벡터 등은 아래와 같이 구성된다.

○ 지배방정식

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega(t)} Q d\Omega + \oint_{\Sigma(t)} E d\Sigma = \int_{\Omega(t)} H d\Omega$$

○ 이상기체 상태 방정식

$$p = (\gamma - 1) \rho e$$

○ 지배 방정식의 물성치 벡터와 플럭스

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho e_t \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ (\rho e_t + p)u \end{bmatrix}$$

○ PCP 시스템 관 내 유동의 물리 현상

$\frac{1}{S} p \frac{\partial S}{\partial x}$	: 캡슐 통과 시 유효 면적 변화에 따른 운동량 변화
$\frac{1}{S} C_f \frac{1}{2} \rho u u \text{Pr}$	: 파이프라인 내벽과의 마찰에 의한 유동의 압력 손실
$\frac{1}{S} \sum_{i=1}^{N_c} (C_{f,i} + C_{f_{3D},i}) \frac{1}{2} \rho (u - V_i) u - V_i \text{Pr}_i$	: 캡슐과의 마찰로 인한 유동의 압력 손실
ρg_x	: 중력에 의한 운동량 증가
$\sum_{j=1}^{N_{turbo}} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_j$	: Suction 및 Blowing Fan에 의한 운동량 증가
$\frac{1}{S} \sum_{i=1}^{N_c} p V_i \frac{\partial S_i}{\partial x}$	: 캡슐 통과 시 유효 면적 변화에 따른 에너지 변화
$\frac{1}{S} \sum_{i=1}^{N_c} (C_{f,i} + C_{f_{3D},i}) \frac{1}{2} \rho (u - V_i) u - V_i \text{Pr}_i V_i$	: 캡슐과의 마찰로 인한 유동의 에너지 손실
$u \sum_{j=1}^{N_{turbo}} \frac{1}{\eta_i} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_j$	: Suction 및 Blowing Fan에 의한 에너지 유입
q	: 외부환경과의 열전달

○ 지배방정식의 소스벡터

$$H = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{S} \left[p \frac{\partial S}{\partial x} - C_f \frac{1}{2} \rho u |u| Pr - \sum_{i=1}^{N_c} (C_{f,i} + C_{f_{3D},i}) \frac{1}{2} \rho (u - V_i) |u - V_i| Pr_i \right] + \rho g_x + \sum_{j=1}^{N_{turbo}} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_j \\ \frac{1}{S} \sum_{i=1}^{N_c} \left[-p V_i \frac{\partial S_i}{\partial x} - (C_{f,i} + C_{f_{3D},i}) \frac{1}{2} \rho (u - V_i) |u - V_i| Pr_i V_i \right] + u \sum_{j=1}^{N_{turbo}} \frac{1}{\eta_j} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_j + q \end{bmatrix}$$

여기서

ρ	: air density
u	: air velocity
p	: pressure
e	: internal energy
e_t	: total energy $e_t = e + \frac{1}{2}u^2 + gZ$
q	: heat source per volume
S	: effective cross-section area
S_i	: cross-section area of capsule i
C_f	: skin friction coefficient of pipe wall
$C_{f,i}$	: skin friction coefficient of body of capsule i
$C_{3D,i}$	: additional friction coefficient of head/tail of capsule i
Pr	: perimeter of pipe cross-section
Pr_i	: perimeter of capsule i
V_i	: speed of moving capsule i
Ω	: control volume
Σ	: control surface
N_c	: number of capsule in pipeline
N_{turbo}	: number of Fan/Booster in pipeline
g_x	: x-directional gravity acceleration
$(\partial p / \partial x)_j$	: momentum per volume obtained from Fan/Booster j
η_j	: shaft efficiency of Fan/Booster j

나. Blockage ratio - 캡슐의 설계속도 간의 경향성 파악

위에서 언급한 내용들을 포함한 시스템 분석코드를 통해 blockage ratio - 캡슐의 설계속도 간의 경향성을 파악하였다. 이를 위해 고정된 blower에 대해 파이프라인의 대표 직경을 변화시킨 경우 캡슐의 속도를 산출하고, 이 캡슐의 속도가 설계속도에 도달할 수 있는지를 확인하였다.

○ 해석 결과

그림 32은 blockage ratio별 캡슐의 이동속도로써 D는 파이프라인의 대표 직경을 의미하고 x축은 time(sec), y축은 캡슐의 이동속도(m/s)를 의미한다. 결과에서 확인할 수 있듯이 blockage ratio가 가장 높은 파이프라인 대표 직경 D=1.5(m)인 경우 설계속도 (50km/h, 13.39m/s) 이상을 만족할 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 파이프라인 내 캡슐이 새로이 유입되는 순간마다 기존에 이동하던 캡슐들의 속도가 감소하는 경향을 보여 주고 있으며 이는 Carsten의 연구 결과와 동일하다. 파이프라인의 대표 직경이 커질수록 기존 캡슐의 이동속도가 감소하고 있었으며, 결국 설계속도를 충족시키지 못하는 경우도 발생할 수 있음을 확인할 수 있다. (D=2.0m)

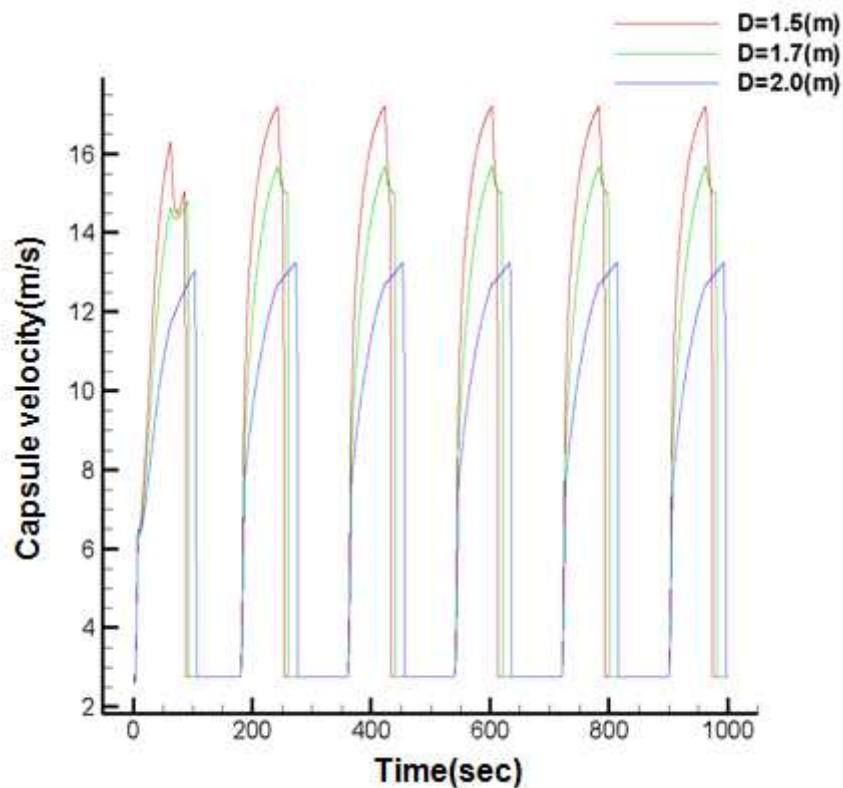


그림 32 blockage ratio별 캡슐의 이동속도 비교

다. 동력원 및 파이프라인 크기 선정

(1) 파이프라인 내부 요구 승압력 산정

$$\Delta P_{required} = \frac{1}{2} \rho V^2 \frac{fL}{D} + \frac{1}{2} \rho V^2 (\eta_{inlet} + \eta_{outlet} + \eta_{capsule})$$

f : friction coefficient, L, D : length and diameter of pipeline

$\eta_{inlet}, \eta_{outlet}, \eta_{capsule}$: loss coefficient for each component

파이프라인의 내부 요구 승압력은 위의 수식과 같이 표현할 수 있다. 먼저 파이프라인의 조도에 의한 friction factor, 파이프라인의 길이 및 대표 직경에 의해 결정되는 요구 승압력과 캡슐의 형상, 파이프라인의 출입구에서의 손실을 고려하여 내부 요구 승압력을 산정해야 한다. 다음은 이를 산정하기 위한 유동조건으로써 표준대기 상태를 가정하였다.

○ 유동 조건

flow condition		구 분	pipeline diameter D		
			1.5m	1.7m	2.0m
ρ	$1.225(kg/m^3)$	Re_d	1.53e6	1.74e6	2.04e6
μ	$1.8 \times 10^{-5}(m^2/s)$				
V	$15(m/s)$				

표 11 동력원 선정을 위한 유동조건

○ 마찰계수(Friction coefficient)의 결정

pipeline의 재질별로 유동이 점성에 의해 받게 되는 마찰력이 서로 다르게 된다. 이 점을 고려하기 위한 friction coefficient는 Moody's diagram을 통해 근사적으로 결정된다.(그림 33)

material	condition	$\epsilon(mm)$	uncertainty(%)
steel	commercial	3.0	± 30
concrete	smooth	0.04	± 60
	rough	2.0	± 50

표 12 Moody's diagram을 참조하기 위한 시제품들의 roughness

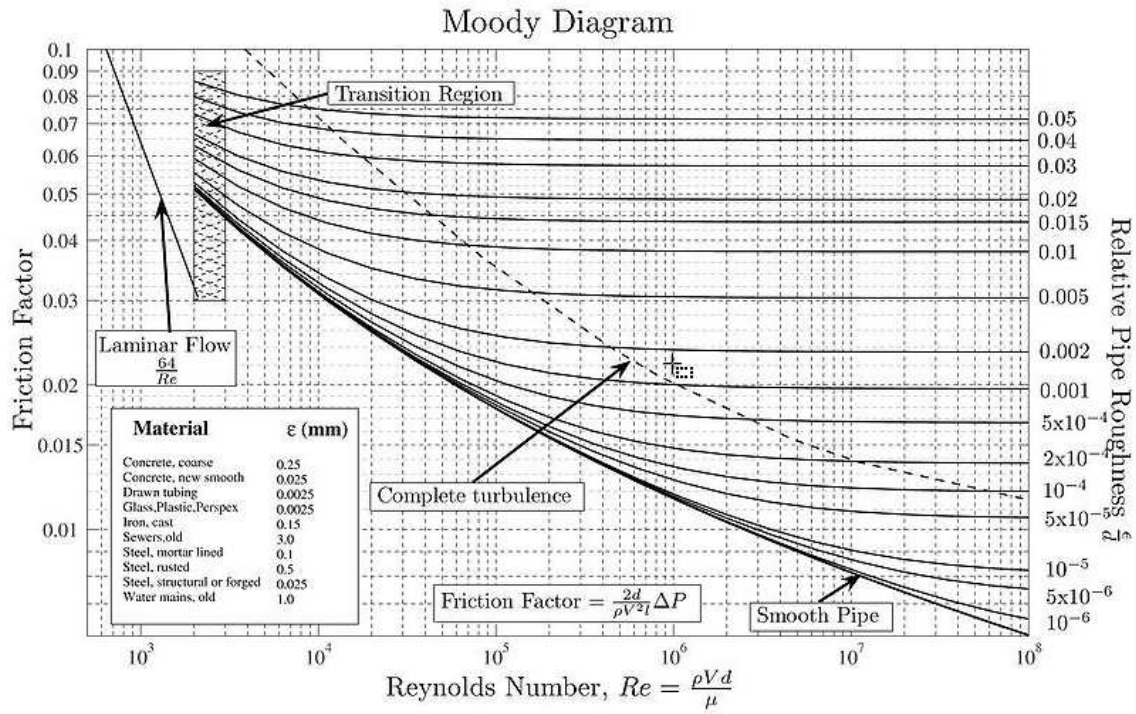


그림 33 Moody's diagram

표 13에 나타난 바 있는 roughness를 기준으로 relative roughness ϵ 을 결정하고 유동의 reynolds number를 참조하여 friction factor를 산정한다. 다음은 각 재질별 산정된 friction coefficient이다.

pipeline diameter		1.5m	1.7m	2.0m
reynolds number		1.53e6	1.74e6	2.04e6
relative roughness (ϵ/D)	steel	2.00e-3	1.76e-3	1.50e-3
	smooth concrete	2.67e-5	2.35e-5	2.00e-5
	rough concrete	1.33e-3	1.18e-3	1.00e-3
friction coefficient (f)	steel	0.0250	0.0225	0.0190
	smooth concrete	0.0114	0.0113	0.0113
	rough concrete	0.0217	0.0181	0.0130

표 13 각 파이프라인 별 마찰계수 계산 결과

○ 요구 승압력의 계산

단위 : Pa(N/m²)

pipeline diameter		1.5m	1.7m	2.0m
required pressure difference ($L = 1km$)	steel	2779.219	2306.333	1791.563
	smooth concrete	1529.719	1398.392	1260.984
	rough concrete	2476.031	1949.642	1378.125

표 14 요구 승압력 계산 결과(파이프라인 길이 1km의 경우)

pipeline diameter		1.5m	1.7m	2.0m
required pressure difference ($L = 2km$)	steel	5076.094	4130.322	3100.781
	smooth concrete	2577.094	2314.439	2039.625
	rough concrete	4469.719	3416.939	2273.906

표 15 요구 승압력 계산 결과(파이프라인 길이 2km의 경우)

(2) 동력원 후보군 결정

요구 승압력 계산 결과 파이프라인의 재질은 smooth concrete가 가장 우수할 것으로 판단된다. 계산된 요구 승압력에 대하여 blower의 성능이 공개된 바 있는 금성풍력의 시제품과 대비할 경우 표 16과 같이 PCP 시스템에 적용할 수 있을 것으로 판단되는 동력원 후보군을 산출할 수 있었다.

pipeline diameter		1.5m	1.7m	2.0m
편흡입형 airfoil fan (225mmAq)	GAF-#10SS	○		
	GAF-#11SS	○		
	GAF-#12SS	○	○	
	GAF-#13SS	○	○	○
	GAF-#14SS	○	○	○

pipeline diameter		1.5m	1.7m	2.0m
양흡입형 airfoil fan (220mmAq)	GAF-#7DS	○		
	GAF-#8DS	○		
	GAF-#9DS	○	○	
	GAF-#10DS	○	○	○
	GAF-#11DS	○	○	○
	GAF-#12DS	○	○	○
	GAF-#13DS	○	○	○
	GAF-#14DS	○	○	○

표 16 동력원 후보군(가용 시제품)

MODEL GAF-#10SS

WHEEL DIA		1520mm		TIP SPEED = 0.079xRPM												Outlet Dim'				1525x1200				outlet Area				1.83m ²			
Capacity (CMM)	Outlet velocity (m/sec)	45mmAq		60mmAq		75mmAq		90mmAq		105mmAq		120mmAq		135mmAq		150mmAq		165mmAq		180mmAq		195mmAq		210mmAq		225mmAq					
		RPM	Bkw	RPM	Bkw	RPM	Bkw	RPM	Bkw	RPM	Bkw	RPM	Bkw	RPM	Bkw	RPM	Bkw	RPM	Bkw	RPM	Bkw	RPM	Bkw	RPM	Bkw	RPM	Bkw				
558,8	5,09	384	5,39	433	7,23																										
652,6	5,94	403	6,50	444	8,37	487	10,48																								
746,4	6,80	425	7,76	462	9,78	498	11,93	535	14,23	573	16,84																				
840,2	7,65	451	9,32	485	11,50	519	13,87	550	16,21	582	18,68	616	21,41	648	24,29																
934,0	8,51	477	11,05	511	13,54	541	15,96	571	18,53	599	21,11	629	23,92	657	26,65	687	29,64	717	32,99	747	36,46										
1027,8	9,36	504	13,02	537	15,75	565	18,29	593	21,03	620	23,79	646	26,63	673	29,69	700	32,79	726	35,87	754	39,26	779	42,58	807	46,47						
1121,6	10,21	532	15,20	563	18,17	591	20,99	618	23,93	644	26,95	669	29,97	694	33,16	717	36,24	741	39,47	765	42,77	790	46,30	814	49,74	839	53,51				
1215,4	11,07	558	17,41	590	20,84	618	24,03	644	27,16	669	30,36	692	33,48	715	36,71	739	40,22	760	43,42	782	46,93	805	50,54	827	54,10	850	57,90				
1309,2	11,92			618	23,81	646	27,45	670	30,61	694	33,99	717	37,40	740	40,97	761	44,38	783	48,03	803	51,48	824	55,25	844	58,95	865	62,78				
1403,0	12,78			644	26,77	672	30,71	698	34,62	721	38,15	743	41,71	765	45,44	786	49,15	806	52,83	826	56,59	846	60,46	865	64,26	884	68,20				
1496,8	13,63					700	34,52	724	38,48	748	42,61	770	46,46	791	50,33	811	54,16	831	58,14	850	62,06	869	66,10	888	70,19	906	74,19				
1590,6	14,49					728	38,64	752	42,91	775	47,27	797	51,54	818	55,71	837	59,64	856	63,72	875	67,94	893	72,06	911	76,32	929	80,65				
1684,4	15,34							779	47,46	802	52,13	824	56,87	844	61,21	864	65,65	883	70,03	901	74,34	919	78,77	936	83,08	953	87,51				
1778,2	16,19							807	52,53	829	57,30	851	62,35	872	67,43	891	72,01	909	76,45	927	81,05	945	85,80	961	90,14	978	94,87				
1872,0	17,05									857	63,04	878	68,17	898	73,29	918	78,67	936	83,49	954	88,38	971	93,16	988	98,08	1004	102,8				
1965,8	17,90											906	74,60	926	80,05	945	85,46	963	90,80	981	96,12	998	101,2	1014	106,1	1030	111,2				
2059,6	18,76											934	81,43	953	86,90	972	92,62	990	98,25	1008	104,1	1025	109,6	1041	114,8	1057	120,2				
2153,4	19,61													981	94,45	999	100,2	1017	106,1	1035	112,3	1052	118,3	1068	124,0	1084	129,7				
2247,2	20,47															1027	108,5	1045	114,7	1062	120,8	1079	127,2	1095	133,3						
2341,0	21,32																1073	123,8	1089	129,8											

그림 34 동력원 후보군의 성능표 예(GAF-#10SS)

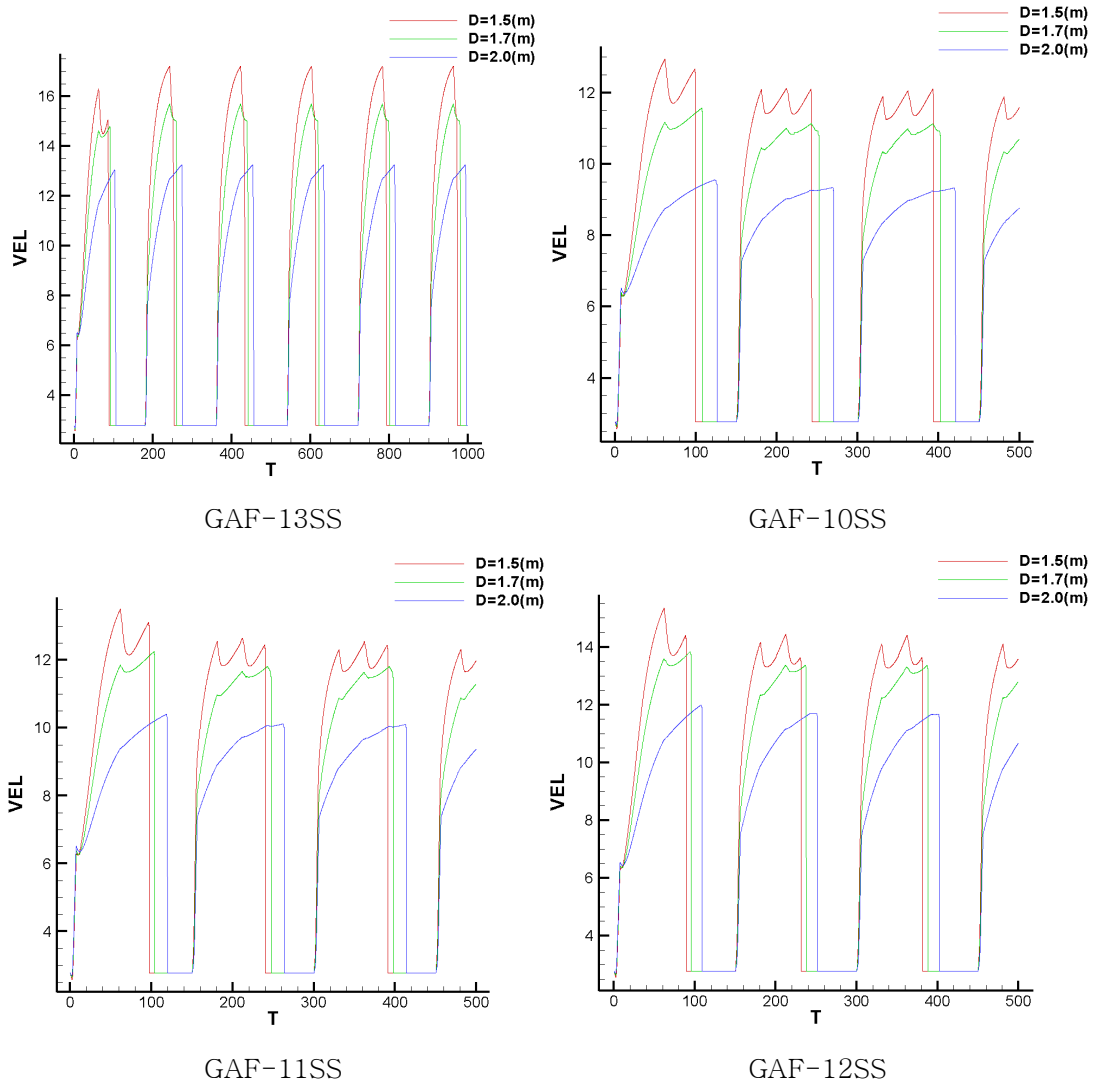
이러한 동력원 후보군 들 중에서 캡슐의 설계속도를 만족시킬 수 있는 blower들을 알아보기 위해 다음과 같은 해석 문제를 구성하고 해석을 수행하였다.(그림 35)

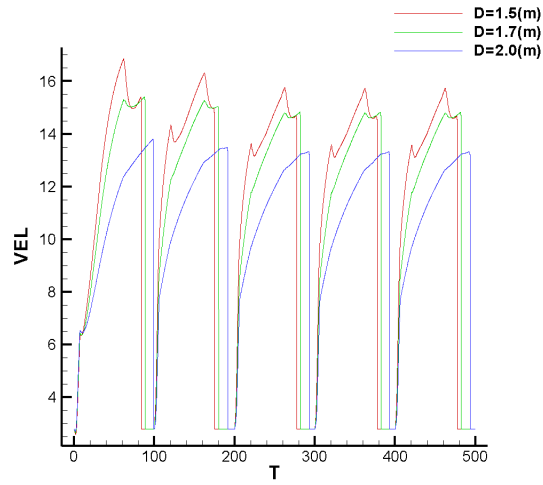


그림 35 해석문제의 구성

해석문제는 portal에 위치한 송풍기에 의해 캡슐을 좌측에서 우측으로 이동시키게 된다. 이동한 캡슐은 오르막길 경사를 통해 감속 및 제동하게 되며 캡슐의 바퀴로 레일을 사용하였다. 레일의 구름 저항은 텍사스 교통국의 연구에서 사용한 경험식의 상수를 참조하였다.

○ 편흡입형 airfoil 팬에 대한 계산 결과

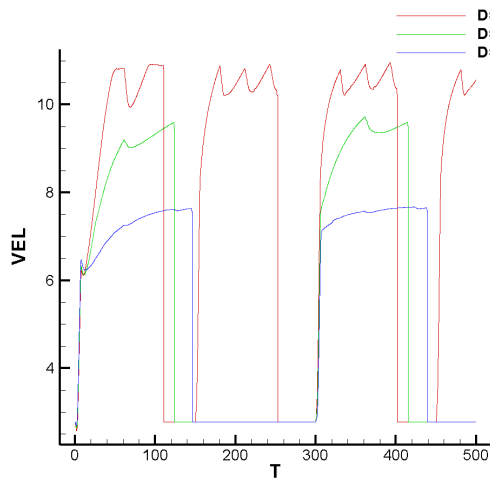




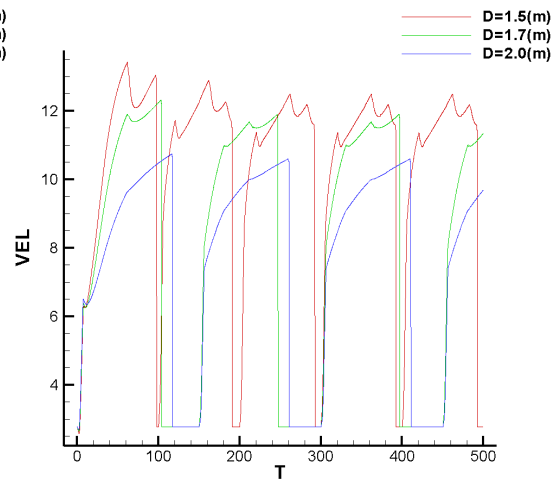
GAF-14SS

그림 36 편흡입형 airfoil 팬에 대한 계산 결과

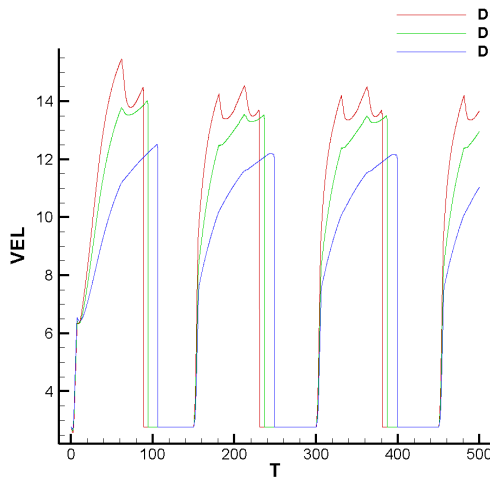
○ 양흡입형 airfoil 팬에 대한 해석 결과



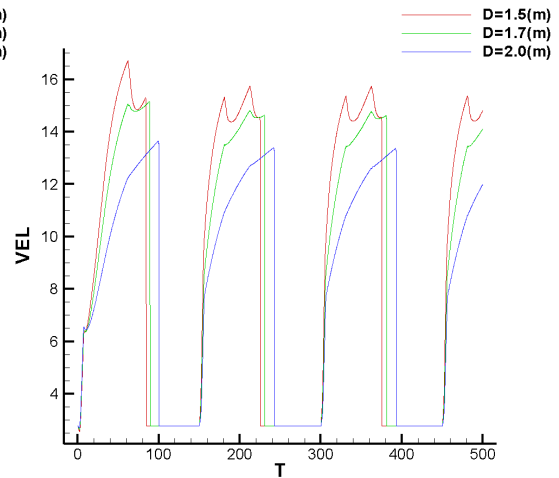
GAF-7DS



GAF-8DS



GAF-9DS



GAF-10DS

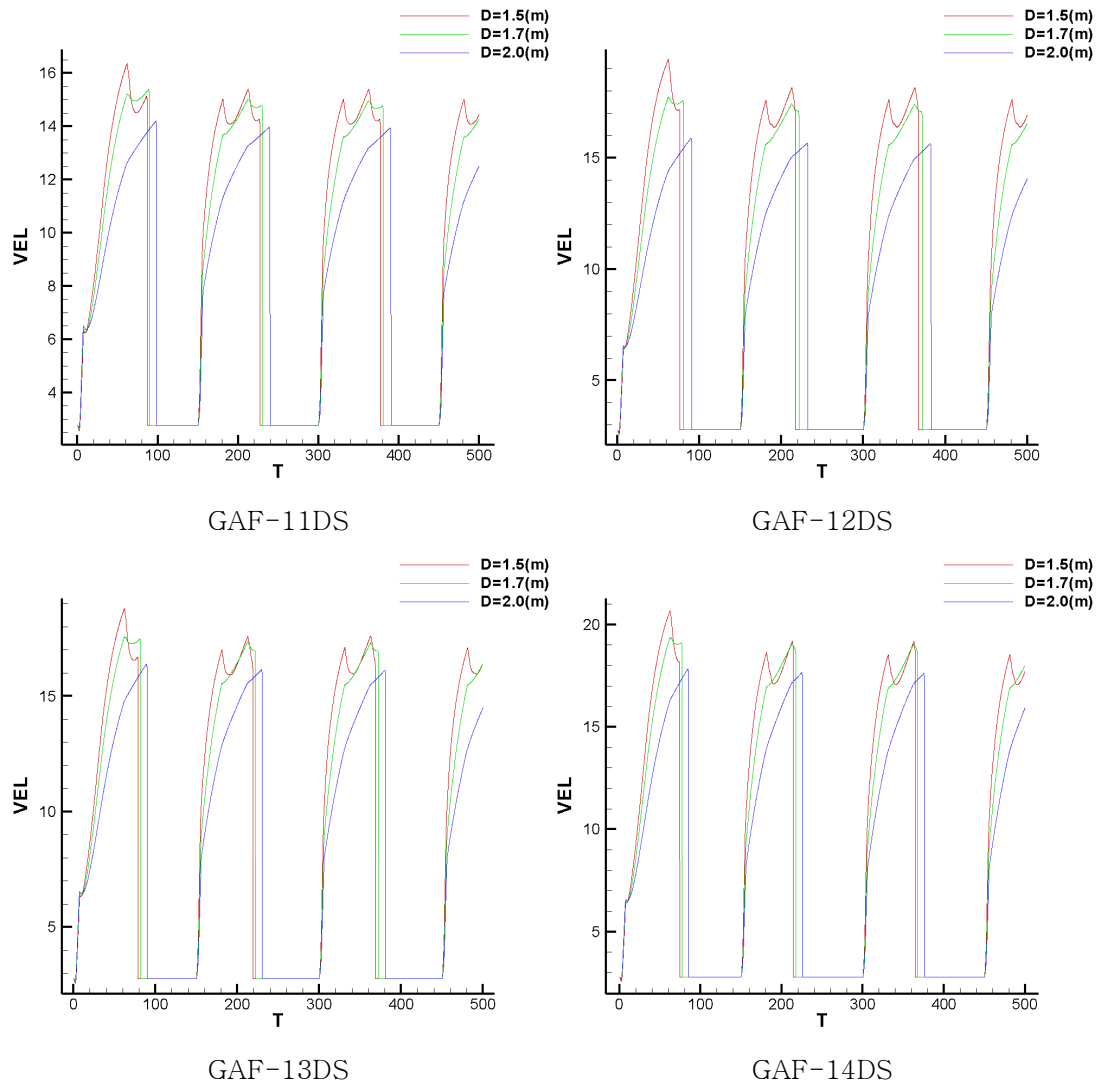


그림 37 양흡입형 airfoil 팬에 대한 계산 결과

○ 파이프라인의 대표 직경 별 동력원 선정

위의 airfoil 팬들에 대하여 캡슐의 평균 주행속도를 계산한 결과 각 파이프라인들의 대표 직경에 대하여 적용 가능한 blower는 다음과 같았다.

Pipeline diameter		1.5m	1.7m	2.0m
편흡입형 airfoil fan (225mmAq)	GAF-#10SS	38.4	35.2	29.8
	GAF-#11SS	39.9	37.0	31.8
	GAF-#12SS	44.3	41.1	35.4
	GAF-#13SS	49.2	44.6	37.7
	GAF-#14SS	49.1	44.9	39.3
양흡입형 airfoil fan (220mmAq)	GAF-#7DS	35.1	31.2	25.8
	GAF-#8DS	38.8	37.0	32.5
	GAF-#9DS	44.6	41.4	36.4
	GAF-#10DS	47.6	44.4	39.1
	GAF-#11DS	46.7	44.8	40.1
	GAF-#12DS	53.6	50.1	43.7
	GAF-#13DS	52.1	49.9	44.7
	GAF-#14DS	55.9	53.4	47.7

표 17 동력원 및 파이프라인의 대표직경에 따른 평균 주행속도(단위 : km/h)

이 파이프라인의 대표직경에 대한 가용 blower의 소모에너지(BHP, W)를 비교해 보았으며 최종적으로 사용할 수 있는 blower는 다음과 같다.

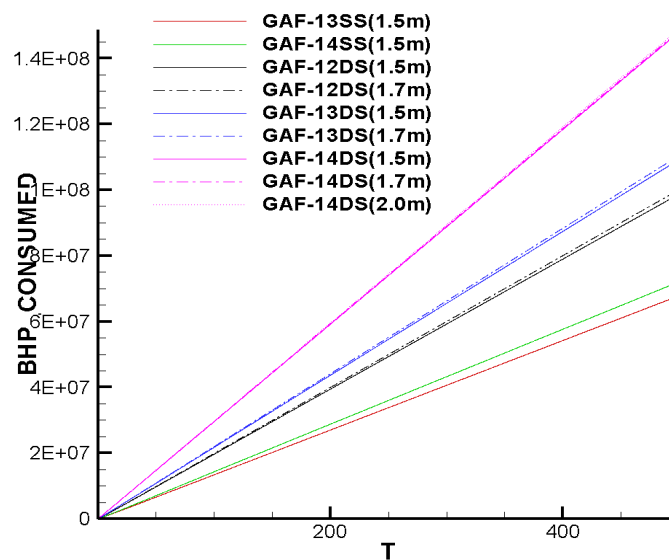


그림 38 가용 blower별 소모에너지 비교

pipeline의 대표직경	1.5(m)	1.7(m)	2.0(m)
blower	GAF-13SS	GAF-12DS	GAF-14DS

표 18 파이프라인 크기별 선정된 blower

2.7. 개념설계안

가. 전체 시스템 개념설계

(1) Accelerating branch

터널 내부로 진입하는 파이프라인에서 초기 가속구간은 다음과 같은 형태를 개념설계안을 작성하였다. 외부의 loading station에서 파이프라인 내부로 캡슐이 이동하여 accelerating branch 안으로 진입하게 된다. accelerating branch에는 check valve가 설치되어 있는데 캡슐이 접근하게 되면 이 valve가 열리고, 캡슐이 valve를 지나가게 되면 다시 닫히게 된다. check valve 이후 존재하는 경사에 의해 캡슐은 초기 가속하게 되고, 이후에는 blower에 의해 형성된 유동의 압력차에 의해 목적지까지 이동하게 된다.

accelerating branch는 파이프라인으로 구성되지 않고 rail로 구성되게 된다. 이러한 구성은 파이프라인으로 구성하는 경우 valve 후면에 높은 정체점 압력이 형성될 수 있어 시스템의 정상적인 운용이 불가능한 경우가 발생할 수 있기 때문이다.(그림 40)

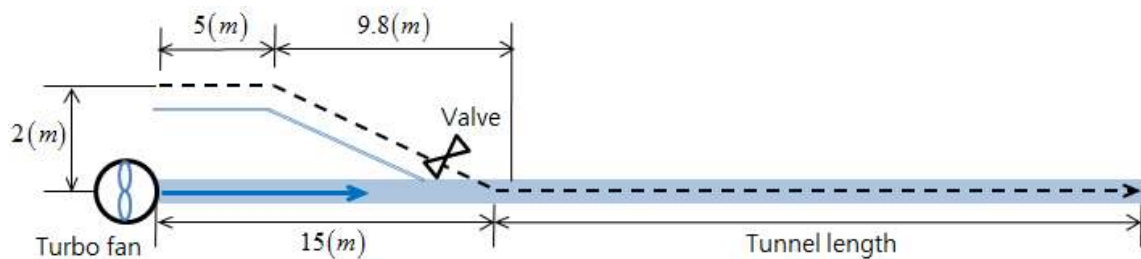


그림 39 Accelerating branch 구성

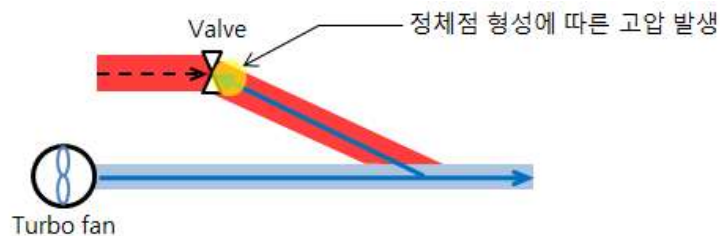


그림 40 정체점 형성에 의해 시스템 운용이 실패할 경우

(2) Decelerating branch

다음은 decelerating branch의 구성이다. blower에 의해 형성된 유동장의 압력차로 캡슐은 외부로 접근하게 되는데 감속은 전술한 바와 같이 오르막길 경사를 통해 이루어진다. 이후 외부 대기로 노출되는 unloading station에 도착하게 되며 stopper에 의해 완전히 제동하게 된다. 이후 캡슐의 적재물은 unloading station 하부에 대기하고 있는 dump truck에 하차하게 된다.

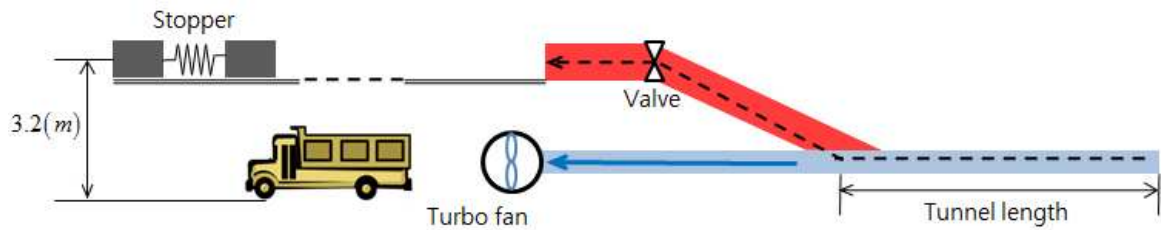


그림 41 Decelerating branch 구성

나. 캡슐 형상

현재 캡슐은 박스형 캡슐을 고려하고 있으며, 전두부 및 후미부의 형상 결정은 3차원 유동해석이 후 결정될 것이다. 현재 고려하고 있는 캡슐의 형상은 그림 42과 같으며 여기에서는 rectangular shape, 전두부 및 후미부에 대한 aerodynamic shape 캡슐의 형상을 제시하였다.

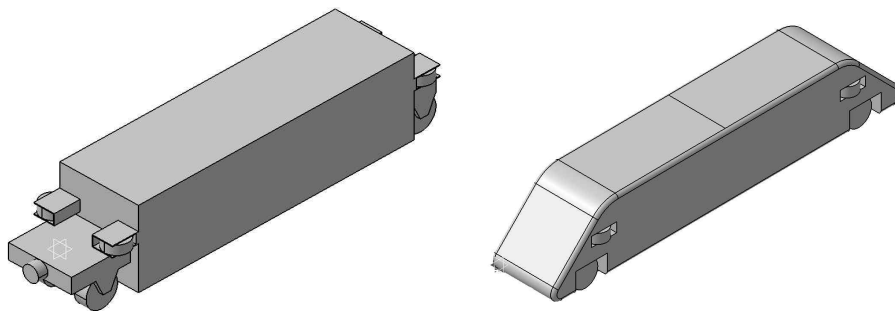


그림 42 현 고려 중인 캡슐의 형상
rectangular shape 캡슐(Left) 및 aerodynamic shape 캡슐(Right)

이 두 형상은 각각 Sumitomo사의 캡슐과 텍사스 교통국의 연구에서 사용한 캡슐의 형상을 참조하였다.

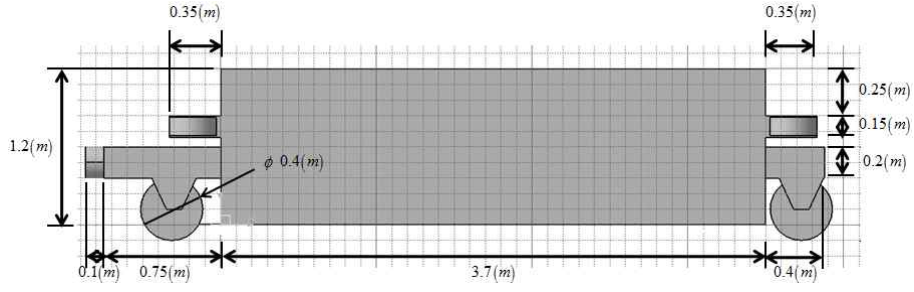


그림 43 Rectangular shape 캡슐 형상

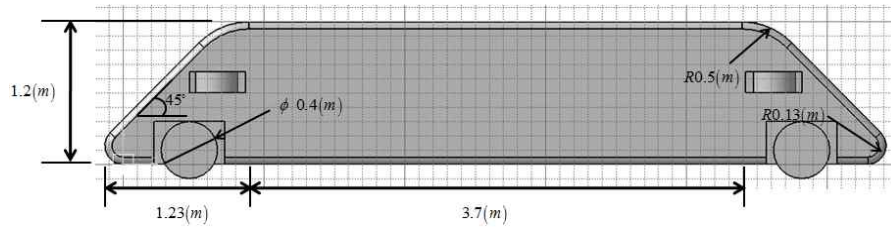


그림 44 전두부 및 후미부에 대한 Aerodynamic shape 캡슐 형상

2.8. 시스템 분석 코드 개발

가. 시스템 분석 코드 개요

파이프라인 내부를 이동하는 캡슐에 대한 비정상 해석을 3차원 모델링을 통해 수행하기에는 계산을 위한 컴퓨터 자원 및 시간 측면에서 비현실적인 측면이 많다. 그러므로 본 연구에서는 해석적 연구는 1차원 모델링을 사용하였으며 다수의 파이프라인들이 연결되는 접속부에서는 GJM(Ghost Junction Method)를 사용하였다.

나. 파이프라인 연결부 모델링

전통적으로 파이프라인의 연결부(junction)에서는 질량보존법칙에 기초한 다음의 결합조건(Coupling Condition)이 널리 사용되어 왔다.

- ① Mass conservation at junction : $\sum_i \lim_{x \rightarrow 0+} (\rho U s)_i = 0.$
- ② Single pressure at junction : $p_{\tilde{k}} = p_k.$
- ③ Pressure loss along streamline $(k, \tilde{k})$: $p_{\tilde{k}} = p_k - \tilde{f}_{(k, \tilde{k})}.$

여기서, $(k, \tilde{k})$ 는 분기관 k 로부터 분기관 $\tilde{k}$ 로 흐르는 유선, 분기관 내 좌표 x 는 junction으로부터 축방향 거리, $\tilde{f}$ 는 압력손실량을 나타낸다.

이러한 조건은 junction에서 운동량 상호작용(momentum interaction)에 대한 물리적 성질을 반영하기 위하여 유선 $(k, \tilde{k})$ 에 따른 많은 손실계수(loss coefficient)를 사용해야 하며, 결합조건으로부터 분기관(branch or pipe)의 경계조건을 얻기 위하여 반복계산을 요구한다. 더욱이, 손실계수에 대한 상관식이 알려져 있는 전형적인 몇 가지 junction type을 제외하면 복잡한 유동망 시스템 내 임의의 junction-branch 조합에 대하여 손실계수에 대한 이론 상관식을 유도하는 것은 매우 어려우며 경험적인 상관식 역시 얻기 어렵다.

이러한 전통적인 절점기반의 junction결합법(node-based junction coupling method)의 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 GJM(Ghost Junction Method)를 사용하였다. 또한 junction에서 발생할 수 있는 비 물리적인 플럭스를 배제하기 위해 scaling function을 사용하였다.

(1) 파이프라인 연결부에서의 유한체적법

그림 45에 나타난 것처럼 접속부에 가상의 제어체적을 자동생성 할 수 있으며, 이 때 생성된 제어체적은 하나의 ghost junction cell과 동일하며 접속부에 대한 지배방정식은 다음과 같이 유한체적법으로 표현할 수 있다.

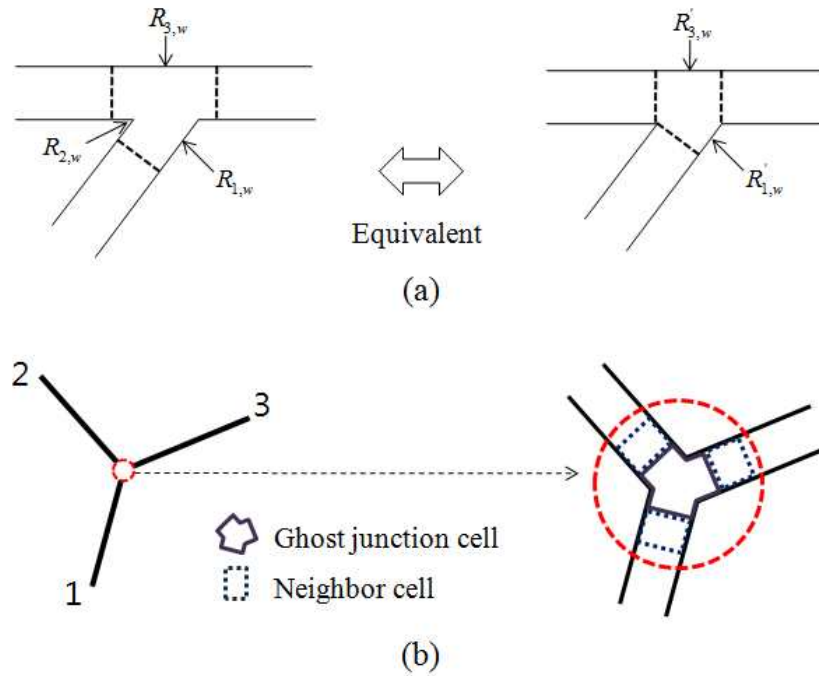


그림 45 Imaginary ghost junction cell

$$V \frac{\partial Q}{\partial t} = - \sum_i F_i s_i - \frac{\partial V}{\partial t} Q \quad (1)$$

$$Q = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho e_t \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} \rho U \\ \rho u U + n_x p \\ \rho v U + n_y p \\ \rho w U + n_z p \\ (\rho e_t + p) U \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$U = n_x u + n_y v + n_z w, \quad N = (n_x, n_y, n_z) \quad , \quad p = (\gamma - 1) \rho e - \gamma p_c, \quad a = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho} (p + p_c)} \quad (3)$$

여기서 U , N 은 인터페이스(접속부와 관 요소를 연결하는 경계면)에 대하여 수직인 속도와 단위벡터이다. V 는 가상의 제어체적의 크기로 연결된 관 요소 격자의 평균 체적을 사용하였으며 그림 45(b)에 나타내었다. 또한, 접속부에 생성된 ghost junction cell 은 이웃한 관 요소와의 인터페이스 외에 벽면으로 구성되어 있으므로 접속부에서의 운동량 교환을 올바르게 해석하기 위해서는 다음과 같이 벽면효과를 고려해야 한다. 벽면효과는 운동량 방정식에 다음의 힘벡터(force vector)로 표현된다. 여기서 하첨자 R 은 유효벽면을 나타낸다.

$$\overline{R}_w = \sum_i R_{i,w} = p s_R (n_x, n_y, n_z)_R \quad (4)$$

관 요소(pipe element) 유동은 1차원의 특성을 갖고 있으므로 이에 대한 1차원 Euler 방정식은 다음과 같다.

$$V \frac{\partial Q}{\partial t} = - \left(s_{j+\frac{1}{2}} F_{j+\frac{1}{2}} - s_{j-\frac{1}{2}} F_{j-\frac{1}{2}} \right) + H_V = -R \quad (5)$$

$$Q = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho U \\ \rho e_t \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} \rho U \\ \rho U^2 + p \\ (\rho e_t + p) U \end{pmatrix} \quad (6)$$

여기서, ρ , U , p , e_t , s , V 은 각각 밀도, 속도, 압력, 토탈 에너지, 파이프 단면적, 격자체적의 크기를 나타낸다. 주 소스벡터는 압력, 벽면마찰, 그리고 중력에 의한 힘으로 구성되며 다음과 같다.

$$H_V = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_w \text{Pr} \Delta x + p \left(s_{j+\frac{1}{2}} - s_{j-\frac{1}{2}} \right) + m g_n \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

여기서 τ_w 은 벽면 전단응력을 나타내며, Pr , Δx , g_n , m 은 단면 접속길이, 격자크기, 중력가속도, 제어체적 내 유체의 질량을 나타낸다. 이 밖의 물리현상에 대한 모델링을 추가해야 하는 경우 보조 소스벡터를 추가할 수 있으나, 본 연구에서는 생략하였다.

(2) 접속부 인터페이스 처리

운동량 상호작용을 고려해야 하는 Junction에서 데카르트좌표계를 사용하며, 분기관은 1차원 국부좌표계를 사용한다. 접속부 인터페이스에서의 플럭스는 데카르트좌표계에서의 표현으로 얻을 수 있으며, 동일시간 단계에 이웃 분기관의 경계조건으로 사용된다. 이때, 인터페이스에서 물성치 보존을 위해 식(8)의 오른쪽 식에 의해 1차원 국부좌표계로 변환하여 사용한다.

$$F_{3d} = \begin{pmatrix} f_{3d}^\rho \\ f_{3d}^{\rho u} \\ f_{3d}^{\rho v} \\ f_{3d}^{\rho w} \\ f_{3d}^{\rho e_t} \end{pmatrix}, \quad F_{1d} = \begin{pmatrix} f_{3d}^\rho \\ n_x f_{3d}^{\rho u} + n_y f_{3d}^{\rho v} + n_z f_{3d}^{\rho w} \\ f_{3d}^{\rho e_t} \end{pmatrix} \quad (8)$$

식(8)은 수치플럭스의 보존법칙을 보장하나 물리적으로 정확한 해를 보장하지는 않는다. 따라서, 접속부에서 운동량 교환에 의한 이론적인 손실계수를 예측하기 위해서는 인터페이스에서의 수치플럭스를 scaling function으로 보정하는 작업이 필요하다.

인터페이스에서의 압력변화량을 이론적으로 분석하기 위해 질량보존 방정식과 운동량 방정식으로부터 인터페이스에 수직인 속도성분에 의한 변화량과 수평성분에 의한 변화량으로 분리하여 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta p = -\rho a \Delta U_n - \rho a \left(\frac{M+|M|}{1+M} \right) \left(\frac{t_x + t_y}{n_x + n_y} \right) \Delta U_t \quad (9)$$

여기서, $M = U_n/a$. 식 (9)의 우변의 첫 번째 항은 인터페이스에 수직인 속도성분의 차에 의한 것이며 식 (10)로 정의되는 Joukowski의 Water-hammer 방정식과 같음을 알 수 있다.

$$\Delta p = -\rho a \Delta U \quad (10)$$

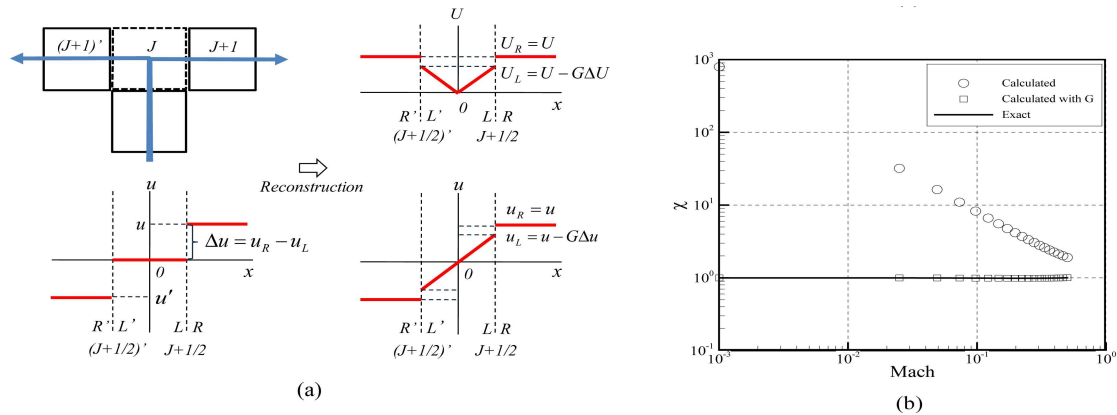


그림 46 (a) Reconstruction (b) The effect of scaling function

그런데 우변 첫 번째 항은 인터페이스에서 비물리적인 해를 유도하는 수치오차로 작용할 수 있다. 예를 들면, 그림 46(a)에서 90° counter-dividing configuration을 생각해보자. 접속부에서 x방향 속도성분 u 의 셀 평균값은 0이 되지만, 인접한 이웃 셀에서는 유한 값을 갖는다. 따라서, 우변 첫 번째 항은 수충격의 충격파 크기와 같은 값을 갖게 된다. 이와같이 인터페이스에서 발생하는 비물리적 현상은 Godunov 계열의 유한체적 수치기법을 사용하면서 격자 해상도가 부족한 경우에 발생하게 됨을 알 수 있다. 따라서, 새로이 제안한 해석모델의 수치적인 문제는 접속부에 가상의 셀 1개만을 사용한다는 것이며 이러한 수치적 문제를 해결하기 위한 대안으로 다음과 같은 scaling function을 제안하였다.

$$G = \delta \cdot \min\left(\frac{|\Delta U_n|}{a}, 1\right), \quad \delta = \begin{cases} 1: \text{if } outflow \\ 0: \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

식 (11)의 scaling function을 식 (9)의 우변 첫 번째 항에 적용하면 다음과 같이 정리된다. 수식의 간략화를 위해 2차원 좌표계를 사용하였다.

$$\Delta p + \rho |\Delta U_n| \Delta U_n = -\rho a \left(\frac{M + |M|}{1 + M} \right) \left(\frac{t_x + t_y}{n_x + n_y} \right) \Delta U_t \quad (12)$$

식 (12)의 좌변은 운동량 플럭스의 변화량과 유사하므로 스케일링 함수를 적용한 GJM이 접속부에서 이론 해를 예측할 수 있도록 도움을 준다. 한 편 스케일링 함수를 수치플럭스에 반영하기 위하여 그림 46에 나타난 것처럼 간단한 투영법을 적용하였다. interface의 왼쪽(junction 방향)으로 투영된 속도벡터는 스케일링한 수직 속도벡터와 본래 평행한 속도벡터의 합으로 얻을 수 있고, 오른쪽(branch 방향)은 그대로 사용한다.

그림 46(b)는 90° counter-dividing에 대한 유선(3,1)에서 토탈압력의 강하량을 식 (13)와 같이 이론값으로 무차원화 한 값을 보여준다. 스케일링 함수를 사용하지 않은 경우, $M = 0.01$ 일 때 이론값보다 80배 이상 크다는 것을 알 수 있다. 비슷한 현상이 90° counter-combining 에서도 나타날 것이다. 반면, 스케일링 함수를 사용한 경우 이론값을 모사함을 알 수 있다.

$$\chi = \frac{K_{(3,1)}}{K''_{(3,1)}} = \frac{\Delta p_{0,(3,1)}}{\Delta p''_{0,(3,1)}} \quad (13)$$

여기서, 위첨자 "은 각각 이론값을 의미한다. (i,j) 는 파이프 i 와 파이프 j 간 유선을 나타낸다.

(3) 해석 프로그램 검증 및 비교

본 해석프로그램의 검증 및 비교 대상으로 MOC를 사용하였다. MOC는 지배방정식에서 대류 항으로 제거하고 등엔트로피 조건을 가정하여 유동의 지배방정식을 상미분 연립방정식 형태로 단순화하여 표현하는 수치기법이다. 또한 접속부에 대해서는 기존의 절점기반의 결합 조건을 사용한다.

파이프 시스템 내 충격파 발생 시 유체의 급속변동에 대한 해석 능력을 관찰하기 위해 두 개의 파이프가 직렬로 연결된 시스템을 분석 대상으로 선정하였다. 직렬 파이프라인에서 각 파이프 요소의 길이는 1000m, 초기 유속은 1m/s이며 하류 파이프 요소의 단면적이 상류 파이프 요소의 단면적 대비 1/2로 급격히 감소하도록 구성되어 있다. 초기 평형 상태에서 하류 말단 밸브를 급속히 폐쇄하여 수충격을 발생시켰다. 유체의 급속비정상에 대한 해석 능력만을 객관적으로 비교하기 위해 벽면 마찰계수를 제거하였으며 접속부 손실계수는 GJM이 모사하는 이론값을 MOC에 반영하여 동일한 조건에서 해석능력을 비교하였다.

우선 Courant number에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 그림 47(b)를 보면 Courant number가 1인 이상적인 조건 하에서는 MOC의 수치점성이 가장 작아 정확한 해석 능력을 보여주었으나 0.95인 경우 GJM보다 수치점성이 더 커져 시스템 내 급속변동에 의한 기계적 에너지의 총량이 GJM보다 빠른 속도로 감쇄하고 있다. 더욱이 0.5이하의 Courant number를 사용할 경우 수치점성이 과다하여 그림 47(a)에 보인 것처럼 충격파의 구배를 심각한 정도로 훼손하고 있다. 민감도 분석결과는 관 내 충격파에 대한 MOC의 정확도를 보장하기 위해 Courant number를 1에 가까운 값을 유지할 수 있어야 하므로 복잡한 시스템을 다루는 데 있어 제약조건으로 작용할 수 있음을 알 수 있다.

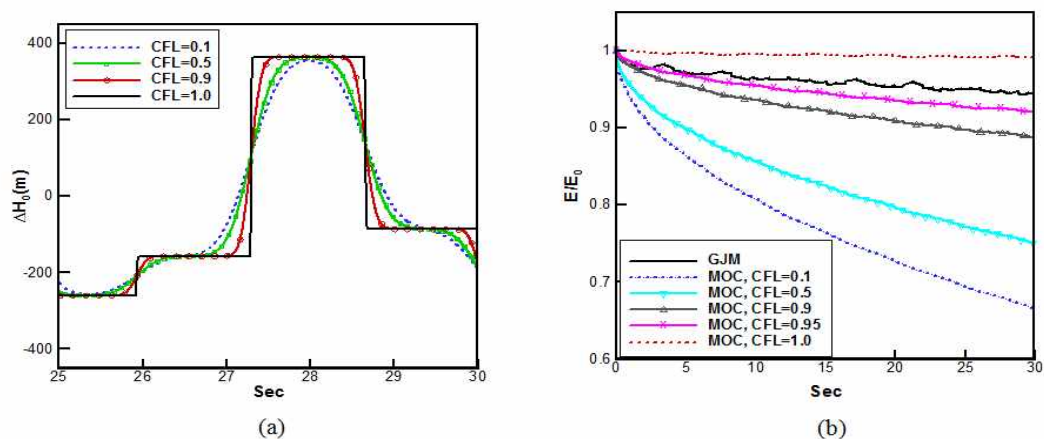


그림 47 Courant number에 대한 민감도 비교 : $\Delta x = 5$

(a) Head trace with MOC (b) Energy trace

다음으로 격자크기의 비 균일성에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 상류 파이프 요소의 격자크기는 1로 고정한 채로 하류 파이프 요소의 격자크기를 1~10으로 변화시키면서 수치점성을 비교하였다. 그림 48(a)에서 GJM은 격자크기의 비 균일성에 대해 민감하지 않은 결과를 보여주었으나 MOC는 매우 민감하여 균일한 격자크기를 사용해야 함을 보여주고 있다. 마찬가지로 파이프 요소의 재질의 비 균일성에 대한 민감도를 관찰한 결과를 그림 48의 (b)에 나타내었으며 기계적 에너지 총량을 추적한 결과 유사한 경향

을 보이고 있다.

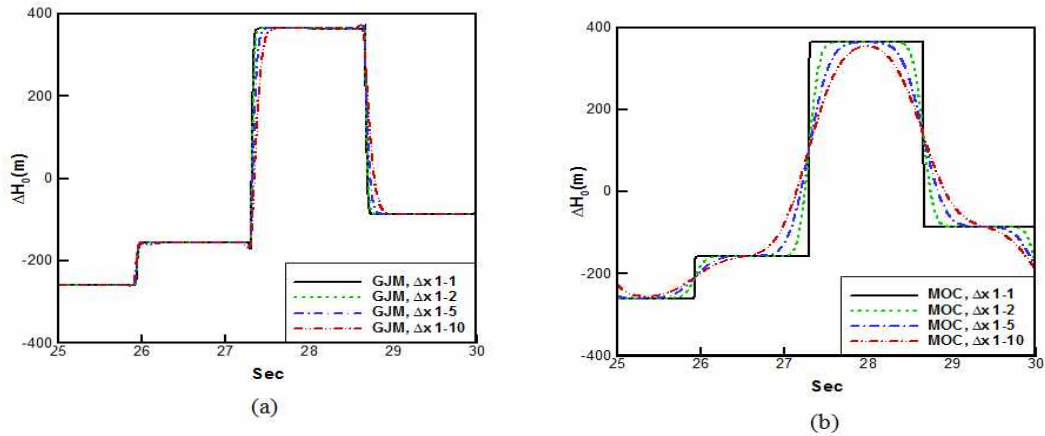


그림 48 Sensitivity to irregular grid size :
(a) Head trace with GJM (b) Head trace with MOC

2.9. PCP 시스템 해석

PCP 시스템의 수송 능력을 해석하기 위해 대상 터널의 굴진길이 및 캡슐의 무게를 바꿔가며 해석을 수행하였다.

일반적으로 터널 굴진길이 길어지면 길어질수록 캡슐의 수송속도는 감소하게 되며 결국 시스템이 정상적으로 작동하지 못할 경우가 발생한다. 또한 캡슐의 중량이 증가하면 wheel에 작용하는 마찰력이 증가하여 이동속도가 감소하게 되며 마찬가지로 시스템이 정상적으로 작동하지 못할 경우가 발생한다. 그러므로 터널의 굴진길이 길어지거나 캡슐의 하중이 증가하게 되면 보다 큰 압력 상승량 및 부피 유량을 가지는 fan을 사용할 필요가 발생한다. 본 연구에서는 금성풍력(주)에서 제공하는 양흡입형 fan 성능곡선을 참조하여 8가지 Fan에 대해 해석을 수행하였다.(그림 49)

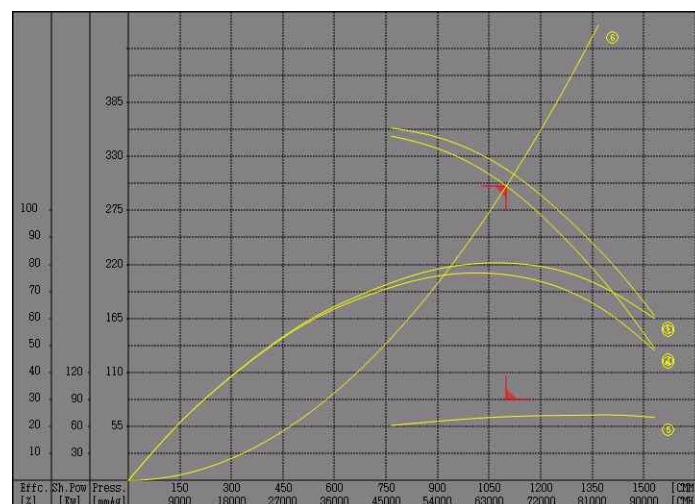


그림 49 금성풍력(주)에서 제공하는 fan 성능곡선 예

또한 버력을 적재하지 않은 경우(중량 1t) 및 버력을 적재한 경우(10.1t)에 대해 PCP 시스템의 수송 능력을 분석하였다. 여기에서 버력을 적재한 경우의 하중은 현 캡슐의 설계 적재부피 및 일반적인 버력 중량 2.6t/m^3 을 가정하여 결정할 것이다.

시스템에 사용한 동력원은 설계조건을 구축할 때 사용한 양흡입형 airfoil팬을 사용하였다.

가. 캡슐의 이동속도

캡슐의 이동속도는 일반적으로 그림 50 같이 나타난다. 파이프라인 내부를 이동하는 캡슐은 전·후면에 작용하는 압력차에 의해 속도가 증가하게 된다. 새로운 캡슐이 파이프라인에 새로이 유입되면 기존에 이동하던 캡슐은 유동에 의해 전달받던 운동량이 순간 감소하게 되어 수송 속도가 감소하게 된다. 이후 유동장이 정상상태를 회복함에 따라 캡슐의 이동속도는 다시 증가하게 된다.

그러므로 일정 시간 간격으로 캡슐이 유입된다면 캡슐의 수송 속도는 그림 50와 같이 주기적인 분포를 나타나게 된다. 본 연구에서 시스템의 수송성능은 캡슐의 평균 수송속도를 참조하였다.

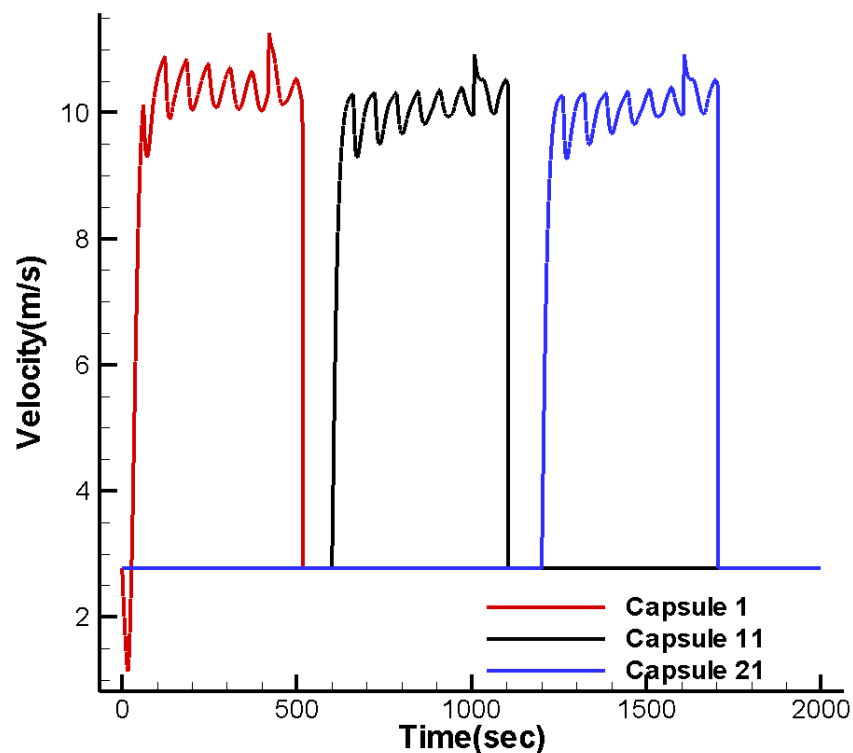


그림 50 캡슐 velocity profile

나. 시스템 해석 결과

구 분	버력을 적재하지 않은 경우		구 분	버력을 적재한 경우	
	이동속도 (km/h)	소요 전력량 (kw)		이동속도 (km/h)	소요 전력량 (kw)
GAF-#7DS	28.90	41.75	GAF-#7DS	25.38	40.99
GAF-#8DS	32.97	52.54	GAF-#8DS	29.25	48.17
GAF-#9DS	41.05	80.54	GAF-#9DS	33.53	72.38
GAF-#10DS	49.76	132.35	GAF-#10DS	38.44	116.48
GAF-#11DS	57.92	212.69	GAF-#11DS	42.88	183.58
GAF-#12DS	64.88	325.07	GAF-#12DS	46.72	276.55
GAF-#13DS	69.88	442.11	GAF-#13DS	49.51	378.32
GAF-#14DS	75.21	617.71	GAF-#14DS	52.67	539.09

표 19 굴진 길이 1km에 대한 해석 결과

표 19을 보면 굴진 길이가 1km인 경우 어떠한 fan을 사용하더라도 충분히 캡슐을 이동시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 같은 동력원을 사용하더라도 버력을 적재한 경우는 마찰력에 의해 상대적으로 수송능력 저하되며 fan 용량을 증가시키면 캡슐의 이동속도를 증가시킬 수 있으나 장비를 운용하는데 필요로 하는 에너지가 증가하게 된다.

구 분	버력을 적재하지 않은 경우		구 분	버력을 적재한 경우	
	이동속도 (km/h)	소요 전력량 (kw)		이동속도 (km/h)	소요 전력량 (kw)
GAF-#7DS	27.91	40.96	GAF-#7DS, 직렬	31.43	82.90
GAF-#8DS	31.69	51.62	GAF-#8DS, 직렬	35.40	98.49
GAF-#9DS	39.41	78.83	GAF-#9DS	29.36	68.73

표 20 굴진 길이 1.5km에 대한 해석 결과

표 20는 굴진 길이 1.5km에 대한 해석 결과이다. 버력을 적재한 경우 #7DS, #8DS는 캡슐의 이동속도가 감소하여 정상적인 시스템 운용이 불가능한 경우가 발생하였다. 이를 해결하기 위해서는 높은 압력 상승량을 확보할 수 있는 #9DS를 사용하거나 #7DS, #8DS를 직렬로 연결하면 정상적인 시스템 운용이 가능하다.

구 분	버력을 적재하지 않은 경우		구 분	버력을 적재한 경우	
	이동속도 (km/h)	소요 전력량 (kw)		이동속도 (km/h)	소요 전력량 (kw)
GAF-#7DS	28.91	82.35	GAF-#7DS, 직렬	26.58	41.11
GAF-#8DS	32.95	97.54	GAF-#8DS, 직렬	30.46	50.90
GAF-#9DS	38.96	147.62	GAF-#9DS, 직렬	37.30	77.84
GAF-#10DS	44.98	129.80	GAF-#10DS	30.44	110.34
GAF-#11DS	52.13	207.82	GAF-#11DS	35.96	177.34
GAF-#12DS	58.18	308.11	GAF-#12DS	40.70	268.95
GAF-#13DS	62.59	411.18	GAF-#13DS	44.06	369.57
GAF-#14DS	67.64	571.44	GAF-#14DS	48.17	527.38

표 21 굴진 길이 2km에 대한 해석 결과

표 21과 같이 굴진 길이가 2km에 도달하게 되면 #9DS도 직렬로 연결해야 시스템을 정상적으로 이동시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 표 22를 보면 굴진 길이가 2.5km에 도달하게 되면 #10DS도 단일 구동으로는 시스템에 충분한 동력을 전달할 수 없음을 볼 수 있다.

구 분	버력을 적재하지 않은 경우		구 분	버력을 적재한 경우	
	이동속도 (km/h)	소요 전력량 (kw)		이동속도 (km/h)	소요 전력량 (kw)
GAF-#7DS	25.60	41.27	GAF-#7DS, 직렬	Failed	-
GAF-#8DS	29.03	50.26	GAF-#8DS, 직렬	29.69	95.97
GAF-#9DS	35.32	77.30	GAF-#9DS, 직렬	35.85	143.86
GAF-#10DS	42.41	128.95	GAF-#10DS, 직렬	42.68	231.68
GAF-#11DS	48.99	203.87	GAF-#11DS	31.73	175.53
GAF-#12DS	54.53	300.25	GAF-#12DS	36.84	266.70
GAF-#13DS	58.68	400.21	GAF-#13DS	40.21	351.35
GAF-#14DS	63.37	564.34	GAF-#14DS	43.36	517.63

표 22 굴진 길이 2.5km에 대한 해석 결과

구 분	버력을 적재하지 않은 경우		구 분	버력을 적재한 경우	
	이동속도 (km/h)	소요 전력량 (kw)		이동속도 (km/h)	소요 전력량 (kw)
GAF-#7DS	24.48	41.42	GAF-#7DS, 직렬	Failed	-
GAF-#8DS	27.90	49.87	GAF-#8DS, 직렬	Failed	-
GAF-#9DS	33.56	77.15	GAF-#9DS, 직렬	32.49	140.38
GAF-#10DS	39.94	127.35	GAF-#10DS, 직렬	39.49	227.35
GAF-#11DS	46.11	200.01	GAF-#11DS, 직렬	45.63	363.32
GAF-#12DS	51.30	293.58	GAF-#12DS	32.95	264.82
GAF-#13DS	55.25	393.39	GAF-#13DS	36.83	364.60
GAF-#14DS	59.59	559.28	GAF-#14DS	41.14	520.09

표 23 굴진 길이 3km에 대한 해석 결과

구 분	버력을 적재하지 않은 경우		구 분	버력을 적재한 경우	
	이동속도 (km/h)	소요 전력량 (kw)		이동속도 (km/h)	소요 전력량 (kw)
GAF-#7DS	23.62	41.53	GAF-#7DS, 직렬	Failed	-
GAF-#8DS	26.74	49.53	GAF-#8DS, 직렬	Failed	-
GAF-#9DS	32.05	76.95	GAF-#9DS, 직렬	28.86	137.73
GAF-#10DS	37.86	125.89	GAF-#10DS, 직렬	36.32	224.69
GAF-#11DS	43.53	196.33	GAF-#11DS, 직렬	42.58	360.41
GAF-#12DS	48.47	288.18	GAF-#12DS	28.87	263.40
GAF-#13DS	52.12	390.28	GAF-#13DS	33.19	362.60
GAF-#14DS	56.28	555.11	GAF-#14DS	31.21	512.15

표 24 굴진 길이 3.5km에 대한 해석 결과

구 분	버력을 적재하지 않은 경우		구 분	버력을 적재한 경우	
	이동속도 (km/h)	소요 전력량 (kw)		이동속도 (km/h)	소요 전력량 (kw)
GAF-#7DS	22.78	41.64	GAF-#7DS, 직렬	Failed	-
GAF-#8DS	25.75	49.28	GAF-#8DS, 직렬	Failed	-
GAF-#9DS	30.55	76.52	GAF-#9DS, 직렬	Failed	-
GAF-#10DS	35.95	124.18	GAF-#10DS, 직렬	33.20	222.80
GAF-#11DS	41.20	193.30	GAF-#11DS, 직렬	39.66	357.95
GAF-#12DS	45.93	284.40	GAF-#12DS	45.26	542.36
GAF-#13DS	49.40	387.79	GAF-#13DS	29.59	360.73
GAF-#14DS	53.44	551.79	GAF-#14DS	34.62	515.01

표 25 굴진 길이 4km에 대한 해석 결과

구 분	버력을 적재하지 않은 경우		구 분	버력을 적재한 경우	
	이동속도 (km/h)	소요 전력량 (kw)		이동속도 (km/h)	소요 전력량 (kw)
GAF-#7DS	21.98	41.62	GAF-#7DS, 직렬	Failed	-
GAF-#8DS	24.75	49.19	GAF-#8DS, 직렬	Failed	-
GAF-#9DS	29.23	75.79	GAF-#9DS, 직렬	Failed	-
GAF-#10DS	34.23	122.44	GAF-#10DS, 직렬	30.12	221.39
GAF-#11DS	39.18	190.45	GAF-#11DS, 직렬	36.88	355.92
GAF-#12DS	43.61	282.58	GAF-#12DS, 직렬	42.59	539.80
GAF-#13DS	67.02	390.28	GAF-#13DS, 직렬	46.76	741.85
GAF-#14DS	52.37	555.11	GAF-#14DS	31.50	513.07

표 26 굴진 길이 4.5km에 대한 해석 결과

구 분	버력을 적재하지 않은 경우		구 분	버력을 적재한 경우	
	이동속도 (km/h)	소요 전력량 (kw)		이동속도 (km/h)	소요 전력량 (kw)
GAF-#7DS	21.18	41.50	GAF-#7DS, 직렬	Failed	-
GAF-#8DS	23.80	49.16	GAF-#8DS, 직렬	Failed	-
GAF-#9DS	28.06	75.18	GAF-#9DS, 직렬	Failed	-
GAF-#10DS	32.76	120.99	GAF-#10DS, 직렬	33.47	221.39
GAF-#11DS	37.39	188.02	GAF-#11DS, 직렬	34.28	353.87
GAF-#12DS	41.59	281.06	GAF-#12DS, 직렬	40.10	537.45
GAF-#13DS	44.84	383.86	GAF-#13DS, 직렬	44.23	739.18
GAF-#14DS	48.66	546.50	GAF-#14DS, 직렬	49.10	1055.44

표 27 굴진 길이 5km에 대한 해석 결과

굴진 길이가 증가하면 증가할수록 fan의 단일 연결로는 정상적인 시스템 운용이 불가능한 경우가 많아지게 된다. 결국 굴진 길이가 5km까지 도달하게 되면 어떠한 fan으로도 단일 연결로는 시스템의 정상적인 운용이 불가능하게 된다. 그러므로 PCP 시스템을 장거리 굴진 터널에 적용하기 위해서는 충분히 높은 압력 상승량을 확보할 수 있는 fan을 사용해야 할 것이다.

2.10. PCP 시스템의 경제성

PCP 시스템이 실제 적용되기 위해서는 덤프트럭 및 환기시설을 사용하는 경우와 비교하여 높은 경제성을 입증할 수 있어야 한다. 일반적인 터널 시공은 그림 51과 같이 진행된다. 이 중 본 연구를 통해 개발하고자 하는 장비인 PCP 시스템은 환기 및 버력처리 과정에 사용된다.

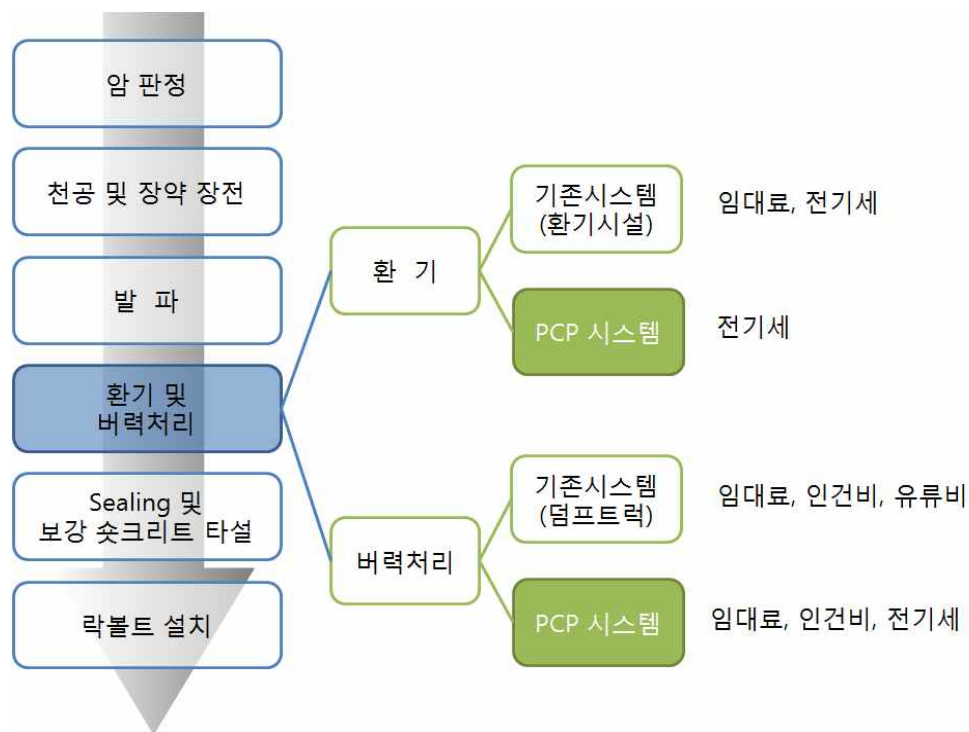


그림 51 일반적인 터널 발파 공정 및 기존 시스템과 PCP 시스템 비교

터널 공사현장에서 기존에는 덤프트럭과 환기시설을 같이 사용하고 있다. 반면 PCP 시스템은 파이프라인 내부의 캡슐을 통해 버력을 처리함과 동시에 자체적인 환기시설로써 사용할 수 있으므로 기존 시스템에서 소요되는 환기시설에 대한 임대료가 저감될 것이다. 또한 덤프트럭의 경우 각 차량마다 차량 운전기사가 있어야 하는 반면 PCP 시스템의 경우 시스템을 운용할 관리자만 필요하므로 인건비 측면에서 저렴해질 것으로 예상하고 있다.

가. 경제성 분석 비용 항목

기존의 터널 공사현장에서 사용되는 덤프트럭과 환기시설을 대체하는 새로운 시스템을 제안하는 본 연구에서는 경제성이 우선적으로 입증되어야 그 가치를 인정받을 수 있다. 이를 위한 경제성 분석 항목으로는 그림 52와 같이 인건비, 장비 임대료, 장비 운용 비용이 있다.

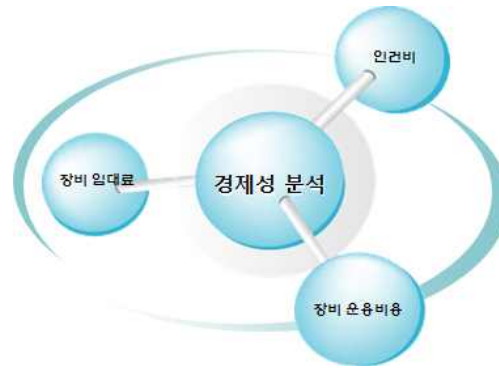


그림 52 경제성 분석을 위한 항목

(1) 인건비

버력 운송 작업을 수행하는데 필요로 하는 인부들에 대한 인건비이다. 기존 시스템의 경우 덤프트럭 운전기사의 인건비이고 PCP 시스템의 경우 파이프라인 조립원 및 중앙 시스템 운전원, 덤프트럭 운전기사의 인건비가 될 것이다.

기존 시스템의 경우 굴진 거리가 늘어나 덤프트럭의 사용 대수가 증가하게 되면 인건비도 함께 증가할 것이다. 반면, PCP 시스템의 경우 터널 굴진거리와 상관없이 항상 일정할 것이다.

(2) 장비 임대료



그림 53 기존 터널 공사현장에서 사용하는 송기용 배관

각 시스템에서 사용하는 장비의 임대료를 고려해야 한다. 기존 시스템의 경우 덤프트럭의 임대료 및 환기용 축류팬, 그리고 송기용 배관 비용이 이에 해당하게 된다. 기존 터널 공사환경에서 사용하는 송기용 배관은 그림 53과 같이 천 재질로 구성된다. 그러므로 배관이 찢어지는 경우 재사용이 불가능하며 구매형식으로 사용하게 된다. 본 경제성 분석에서는 1일 굴진 길이에 따라 필요로 하는 송기용 배관의 구매 비용을 임대 비용으

로 참조하였다.

PCP 시스템의 장비 임대료는 터널 입구에서 대기하는 덤프트럭 2대에 대한 임대료, 캡슐, 파이프라인, 중앙 fan의 임대료의 임대료로 구성하게 된다.

(3) 장비 운용 비용

각 시스템의 운용에 필요로 하는 비용이다. 기존 시스템의 경우 덤프트럭을 운행하기 위한 유류비 및 환기용 축류팬에서 소요되는 전기세로 구성되고, PCP 시스템의 경우 중앙 fan의 전기세로 구성된다.

각 경제성 비교 비용항목을 정리하면 표 28과 같다.

구 분	기존 시스템	PCP 시스템
인건비	· 덤프트럭 운전기사 인건비	· 덤프트럭 운전기사 인건비 · 파이프라인 조립인원 인건비 · 중앙 시스템 운전기사 인건비
장비 임대료	· 덤프트럭 임대료 · 환기용 축류팬 임대료 · 송기용 배관 임대료	· 덤프트럭 임대료 · 캡슐 임대료 · 파이프라인 임대료
장비 운용비용	· 덤프트럭 유류비 · 환기시설 전기세	· 중앙 fan 전기세

표 28 기존 시스템 및 PCP 시스템 경제성 분석 항목 비교

나. 경제성 분석 기본 가정

PCP 시스템의 경제성 분석을 위해서는 필요로 하는 캡슐의 수를 산출해야 한다. 이를 위해 기존 터널 공사현장에서 버력 배출 작업을 수행하는데 필요로 하는 덤프트럭의 산출 조건을 기본 가정으로 포함시키고, 캡슐에 버력을 상차하는 시간을 추정하였다. 또한 버력 배출 시간을 산출하기 위해 기존 덤프트럭의 이동속도 및 왕복시간을 기본 가정으로 사용하였다.

(1) 시간 지연없이 가동하는 페일로더

실제 터널 공사현장에서는 버력 배출 시간을 최소화하기 위해 작업장에 위치하고 있

는 페일로더가 시간 지연없이 계속 상차하는 것을 목표로 하고 있다. 이를 굴진 길이가 길어지는 덤프트럭을 증차하게 되는데 본 연구에서도 캡슐의 수를 산정하는데 같은 조건을 참조하였다.

(2) 버럭 상차 시간(차량 운송 간격)

적재 부피 최대 10m^3 인 덤프트럭의 경우 1회 적재 가용 부피 3.5m^3 인 페일로더로 약 4~5회 적재하며, 약 5분 정도 소요된다. 페일로더를 통한 적재량이 덤프트럭의 적재 부피보다 큰 것은 버럭 간의 공극이 존재하기 때문이다. 적재 부피 3.5m^3 인 PCP 캡슐은 페일로더로 약 1~2회만 적재하면 될 것으로 판단되며, 버럭 상차 시간은 이를 참조하여 약 1분으로 가정하였다.

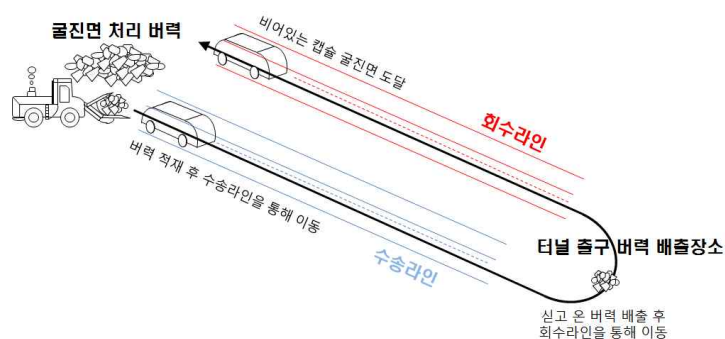
(3) 덤프트럭 이동속도 및 왕복시간

터널 내 덤프트럭의 이동속도는 안전규정상 최대 20km/h 를 벗어나지 않도록 명시되어 있다. 전체 버럭 배출시간을 계산하는데 기존 시스템은 이 안전규정 속도를 참조하였다. PCP 시스템은 시스템 분석코드를 통해 계산된 수송 속도를 참조하였다.

다. 시스템 운행 시간 계산

(1) 1주기 배출 및 회수 소요 시간 계산

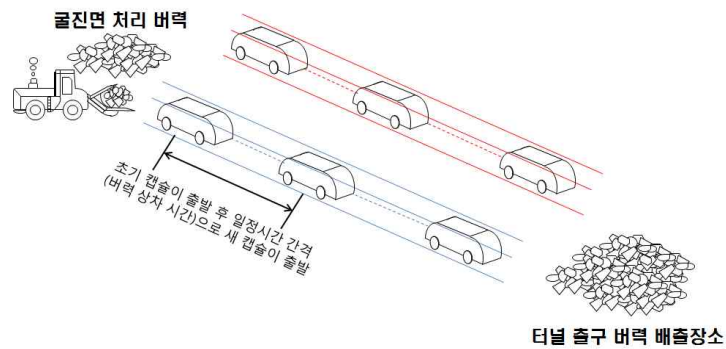
페일로더가 시간 지연없이 가동하기 위해 필요로 하는 덤프트럭 및 캡슐이 1회씩 버럭을 배출하는 것을 1주기로 정의하고 이 1주기 운행에 필요로 하는 시간을 계산한다. 결국 첫 번째 덤프트럭(캡슐)이 굴진면에서 터널 출구 버럭 배출장소까지 1회 왕복하는 시간이 1주기 배출 및 회수 소요 시간이 되는데, 기존 시스템의 경우 덤프트럭이 안전규정에서 제한하고 있는 속도인 20km/h 로 이동하는 것으로 가정하였다. PCP 시스템의 경우 시스템 성능 분석 결과에서 나온 수송 속도를 참조하였다.



(2) 전체 캡슐 수 산정

1주기 배출 및 회수하는데 필요로 하는 시간 동안 버력 상차 시간을 간격으로 1대씩 캡슐이 동원되어야 한다. 이러한 조건을 통해 전체 캡슐 수는 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$\text{전체 캡슐 수} = \frac{\text{1주기 수송 및 회수 소요 시간}}{\text{버력 상차 시간}} + 1$$



(3) 1주기 운행 버력 배출량 및 버력 처리 소요 운행주기 산정

(2)의 과정을 통해 산정된 전체 캡슐이 각 1회씩 배출할 경우 배출할 수 있는 버력의 부피를 계산한다. 이를 통해 터널 굴진면에 위치하고 있는 전체 버력을 모두 배출하기 위해서는 총 몇 주기 운행되어야 하는지를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{1주기 운행 버력 배출량} &= \text{전체 캡슐 수} \times \text{캡슐 적재 부피} \\ \text{버력 처리 소요 운행주기} &= \frac{\text{전체 버력량}}{\text{1주기 운행 버력 배출량}} \end{aligned}$$

(4) 버력 처리 소요시간

전체 버력을 배출하는데 총 몇 주기 운행이 필요한 지가 계산되면, 1주기 운행에 필요로 하는 시간을 통해 전체 버력 처리 소요시간을 계산할 수 있다.

$$\text{버력 처리 소요시간} = \text{버력 처리 소요 운행주기} \times \text{1주기 수송 및 회수 소요 시간}$$

라. 기존 시스템의 경제성 분석 항목

(1) 장비 임대료

거리	사용대수	거리	사용대수
시점 ~ 300m	3	1000 ~ 1300m	7
300 ~ 500m	4	1300 ~ 1600m	8
500 ~ 700m	5	1600 ~ 종점	9
700 ~ 1,000m	6	-	-

표 29 덤프트럭 사용대수(동홍천-양양 터널공사현장, 대림산업)

기존 터널 공사현장에서 사용하는 덤프트럭은 각 현장마다 증차 방법이 조금씩 차이가 있다. 표 29는 덤프트럭 증차의 한 예로써 초기 덤프트럭 3대부터 시작하여 굴진 거리 1,000m 전에는 증차간격을 200m 간격으로 하고 1,000m 후에는 증차간격을 300m로 하고 있다. 이 외에 현대건설의 경우 덤프트럭의 증차간격을 150m 간격으로 고정하여 사용하는 현장도 있다.

본 연구에서 적용하는 덤프트럭의 수는 대림산업의 경우와 같이 덤프트럭의 증차간격을 거리에 따라 달리 하면서 추정하는 방법을 사용하였다.

(2) 장비 운용 비용

덤프트럭의 유류비는 덤프트럭의 연비를 가정하여 추정하였다. 버력이 적재되지 않은 경우는 일반적으로 알려진 $4km/l$ 를 사용하였고, 버력이 적재된 경우는 $0.4km/l$ 로 가정하였다. 실제 터널 굴진길이 1km의 현장에서 덤프트럭 1대가 하루 사용하는 유류 사용량은 130l로, 가정한 연비를 대입하여 추산하면 가정한 연비가 현실성 있음을 확인할 수 있다.

(3) 인건비

기존 시스템에서의 인건비는 덤프트럭 운전기사 인건비로써 덤프트럭 사용대수와 동일한 운전원을 필요로 한다.

마. PCP 시스템의 경제성 분석 항목

(1) 장비 임대료

PCP 캡슐의 임대 수는 시스템 운행 시간 계산 중 산출할 수 있는 시스템 구성 캡슐 수를 참조했다. 파이프라인 밖에서 내부로 진입하기 위한 보조 동력원만을 사용하는 캡슐은 덤프트럭과 임대료 면에서 큰 차이가 있을 것으로 예상되며 덤프트럭의 1/10 수준으로 가정했다.

또한 중앙 fan의 월 임대료는 덤프트럭의 구매비용과 임대 비용 사이의 비율을 동일하게 적용하였으며 표 30과 같다.

Fan 및 Engine 월 임대료(만원/월)							
Fan1	Fan2	Fan3	Fan4	Fan5	Fan6	Fan7	Fan8
53	79	120	170	250	270	300	320

표 30 PCP 시스템에 사용한 fan 및 engine 월 임대료

PCP 시스템의 파이프라인은 기존 환기시스템에서 사용하는 풍관과는 달리 재사용이 가능하며 구매가 아닌 임대의 형식으로 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 그러나 PCP 시스템이 기존에 흔히 사용되는 장비는 아니라서 이 파이프라인의 월 임대료는 일정한 기준 값으로 가정할 수 밖에 없다.

(2) 장비 운용 비용

PCP 시스템을 운용하기 위한 전기세는 시스템 성능 분석결과 산출할 수 있는 사용 전력량과 전력량 요금을 참조하여 결정할 수 있다. 계절별, 사업장 별로 전력량 요금은 표 31과 같이 차이가 있으며 본 연구에서는 각 계절의 전력요금의 평균을 사용하였다. 또한 중앙 fan의 전기 효율은 80%로 가정하여 사용 전력량을 산출하였다.

구 분		기본요금	전력량 요금(원/kWh)				
			시간대	여름철 (7~8월)	봄,가을철 (6월)	봄,가을철 (3~5, 9~10월)	겨울철 (11~2월)
고압 A	선택 I	5,720	심야	44.40	44.40	44.40	44.40
			주간	111.30	76.40	63.70	76.10
			저녁	76.40	63.70	76.40	91.40
	선택 II	6,610	심야	39.90	39.90	39.90	39.90
			주간	106.80	71.90	59.20	71.60
			저녁	71.90	59.20	71.90	86.90

구 분		기본요금	전력량 요금(원/kWh)				
			시간대	여름철 (7~8월)	봄,가을철 (6월)	봄,가을철 (3~5, 9~10월)	겨울철 (11~2월)
고압 B	선택 I	5,280	심야	43.70	43.70	43.70	43.70
			주간	107.50	74.00	61.50	73.60
			저녁	74.00	61.50	74.00	88.00
	선택 II	6,110	심야	39.50	39.50	39.50	39.50
			주간	103.30	69.80	57.30	69.40
			저녁	69.80	57.30	69.80	83.80

표 31 전력량 요금표(한국전기공사)

(3) 인건비

PCP 시스템의 인건비는 굴진길이와 관계없이 항상 일정하며 파이프라인 조립원 4명, 중앙 시스템 운전기사 1명, 터널 출구에서 사용하는 덤프트럭 2대에 대한 운전기사 2명을 통해 결정된다.

바. PCP 시스템 파이프라인 월 임대료 산정

PCP 시스템의 경제성 중 가장 큰 부분을 차지하는 부분인 파이프라인의 기준 월 임대료 산정을 위해 기준 터널 단면적 및 굴진 거리를 선정하였다. 그리고 해당 공사현장에서 기존 시스템에 비해 10% 개선된 경제성을 확보하기 위한 파이프라인의 월 임대료를 다른 공사 조건에서의 경제성을 비교하기 위한 기준 값으로 선정하였다.

(1) 기준 터널 단면적 및 굴진 거리 결정

국내 도로 터널 단면적 관련 자료 수집결과 표 32와 같으며, 여굴에 의한 버력량을 고려한다면 기준 단면적은 60m²가 타당할 것으로 판단된다.

단면적 (m ²)	30미만	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80	80~90	90~100	100이상
개 소	19	41	53	70	21	6	2	12	2

표 32 터널 단면적별 현황

PCP 시스템의 경제성은 중/장거리 터널 굴진작업에 더 타당할 것으로 판단된다. 이는 단거리의 경우 기존 시스템의 덤프트럭의 수가 많지 않아, PCP 시스템의 터널 입구에서 사용하는 덤프트럭 2대 때문에 경제성을 확보하기 어려울 것으로 예상되기 때문이다. 일반적으로 중/장거리 터널은 터널 입구와 출구 양 쪽에서 굴진작업을 진행하는 경우가 많으며 이를 고려하여 기준 버력 운송거리는 2km가 타당할 것으로 판단된다.

(2) 파이프라인 월 임대료 산정

파이프라인의 월 임대료를 산정하지 않을 경우의 경제성을 분석한다면 아래와 같다.

버력처리 소요시간(Hr)		예상 소요예산(원/일)	
기존 시스템	PCP 시스템	기존 시스템	PCP 시스템
2" 10'	2"	2,638,000	1,081,000

여기에서 기존 시스템 대비 10% 개선된 경제성을 만족하기 위한 파이프라인의 월 임대료는 월 9,690원/m로 추정되며 이 임대료를 다른 공사현장에 대해서 공통적으로 적용하였다.

사. PCP 시스템 경제성 분석 결과

(1) 굴진 거리 1km 분석 결과

○ 총 괄

터널단면적 (m ³)	버력처리 소요시간(Hr)		예상 소요예산(원/일)	
	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템
40	1" 17'	1"	1,597,000	1,723,000
60	1" 54'	1" 32'	1,628,000	1,727,000
80	2" 35'	2"	1,658,000	1,731,000
100	3" 7'	2" 33'	1,685,000	1,735,000

○ 세부항목

터널단면적 (m ³)	장비운용비용(원/일)		인건비(원/일)		장비임대료(원/일)	
	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템
40	57,000	9,000	600,000	700,000	940,000	1,014,000
60	88,000	13,000				
80	118,000	17,000				
100	145,000	21,000				

(2) 굴지 거리 1.5km 분석결과

○ 총 괄

터널단면적 (m ³)	버력처리 소요시간(Hr)		예상 소요예산(원/일)	
	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템
40	1"	1"	2,089,000	2,112,000
60	1" 37'	1" 33'	2,133,000	2,120,000
80	2" 10'	2" 4'	2,176,000	2,126,000
100	2" 40'	2" 35'	2,215,000	2,133,000

○ 세부항목

터널단면적 (m ³)	장비운용비용(원/일)		인건비(원/일)		장비임대료(원/일)	
	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템
40	83,000	13,000	800,000	700,000	1,206,000	1,399,000
60	127,000	21,000				
80	170,000	27,000				
100	209,000	34,000				

(3) 굴진 거리 2km 분석결과

○ 총 괄

터널단면적 (m ³)	버럭처리 소요시간(Hr)		예상 소요예산(원/일)	
	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템
40	1" 7'	1"	2,578,000	2,482,000
60	1" 34'	1" 40'	2,638,000	2,495,000
80	2"	2" 12'	2,695,000	2,508,000
100	2" 23'	2" 46'	2,745,000	2,522,000

○ 세부항목

터널단면적 (m ³)	장비운용비용(원/일)		인건비(원/일)		장비임대료(원/일)	
	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템
40	105,000	27,000	1,000,000	700,000	1,473,000	1,755,000
60	165,000	40,000				
80	222,000	53,000				
100	272,000	67,000				

(4) 굴진 거리 2.5km 분석결과

○ 총 괄

터널단면적 (m ³)	버럭처리 소요시간(Hr)		예상 소요예산(원/일)	
	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템
40	1"	1"	2,840,000	2,888,000
60	1" 30'	1" 34'	2,910,000	2,908,000
80	1" 55'	2" 6'	2,981,000	2,928,000
100	2" 34'	2" 38'	3,045,000	2,948,000

○ 세부항목

터널단면적 (m ³)	장비운용비용(원/일)		인건비(원/일)		장비임대료(원/일)	
	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템
40	133,000	40,000	1,100,000	700,000	1,607,000	2,148,000
60	203,000	60,000				
80	274,000	80,000				
100	338,000	100,000				

(5) 굴진 거리 3km 분석결과

○ 총 괄

터널단면적 (m ³)	버력처리 소요시간(Hr)		예상 소요예산(원/일)	
	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템
40	1"	1"	3,100,000	3,245,000
60	1" 26'	1" 32'	3,183,000	3,274,000
80	2" 10'	2"	3,268,000	3,302,000
100	2" 28'	2" 32'	3,342,000	3,330,000

○ 세부항목

터널단면적 (m ³)	장비운용비용(원/일)		인건비(원/일)		장비임대료(원/일)	
	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템
40	160,000	57,000	1,200,000	700,000	1,740,000	2,488,000
60	243,000	86,000				
80	328,000	114,000				
100	402,000	142,000				

(6) 굴진 거리 3.5km 분석결과

○ 총 괄

터널단면적 (m ³)	버력처리 소요시간(Hr)		예상 소요예산(원/일)	
	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템
40	1"	1" 6'	3,358,000	3,602,000
60	1" 22	1" 40'	3,455,000	3,632,000
80	2" 7'	2" 13'	3,554,000	3,663,000
100	2" 23'	2" 46'	3,640,000	3,694,000

○ 세부항목

터널단면적 (m ³)	장비운용비용(원/일)		인건비(원/일)		장비임대료(원/일)	
	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템
40	185,000	61,000	1,300,000	700,000	1,873,000	2,841,000
60	282,000	91,000				
80	381,000	122,000				
100	467,000	153,000				

(7) 굴진 거리 4km 분석결과

○ 총 괄

터널단면적 (m ³)	버력처리 소요시간(Hr)		예상 소요예산(원/일)	
	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템
40	1"	1"	3,617,000	3,982,000
60	1" 44'	1" 38'	3,730,000	4,023,000
80	2"	2" 10'	3,840,000	4,064,000
100	2" 17'	2" 43'	3,938,000	4,104,000

○ 세부항목

터널단면적 (m ³)	장비운용비용(원/일)		인건비(원/일)		장비임대료(원/일)	
	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템
40	211,000	82,000	1,400,000	700,000	2,006,000	3,200,000
60	324,000	123,000				
80	434,000	164,000				
100	532,000	204,000				

(8) 굴진 거리 4.5km 분석결과

○ 총 괄

터널단면적 (m ³)	버력처리 소요시간(Hr)		예상 소요예산(원/일)	
	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템
40	57'	1" 2'	3,876,000	4,348,000
60	1" 42'	1" 34'	4,002,000	4,404,000
80	2"	2"	4,126,000	4,461,000
100	2" 39'	2" 35'	4,238,000	4,514,000

○ 세부항목

터널단면적 (m ³)	장비운용비용(원/일)		인건비(원/일)		장비임대료(원/일)	
	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템
40	236,000	111,000	1,500,000	700,000	2,140,000	3,537,000
60	362,000	167,000				
80	486,000	224,000				
100	598,000	277,000				

(9) 굴진 거리 5km 분석결과

○ 총 괄

터널단면적 (m ³)	버력처리 소요시간(Hr)		예상 소요예산(원/일)	
	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템
40	1"	1" 7'	4,135,000	4,773,000
60	1" 40'	1" 40'	4,275,000	4,836,000
80	1" 55'	2" 15'	4,412,000	4,899,000
100	2" 35'	2" 48'	4,536,000	4,962,000

○ 세부항목

터널단면적 (m ³)	장비운용비용(원/일)		인건비(원/일)		장비임대료(원/일)	
	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템	덤프 트럭	PCP 시스템
40	262,000	127,000	1,600,000	700,000	2,273,000	3,946,000
60	402,000	190,000				
80	539,000	253,000				
100	663,000	316,000				

(10) 경제성 분석 결과

○ 버력 운송거리별 비교

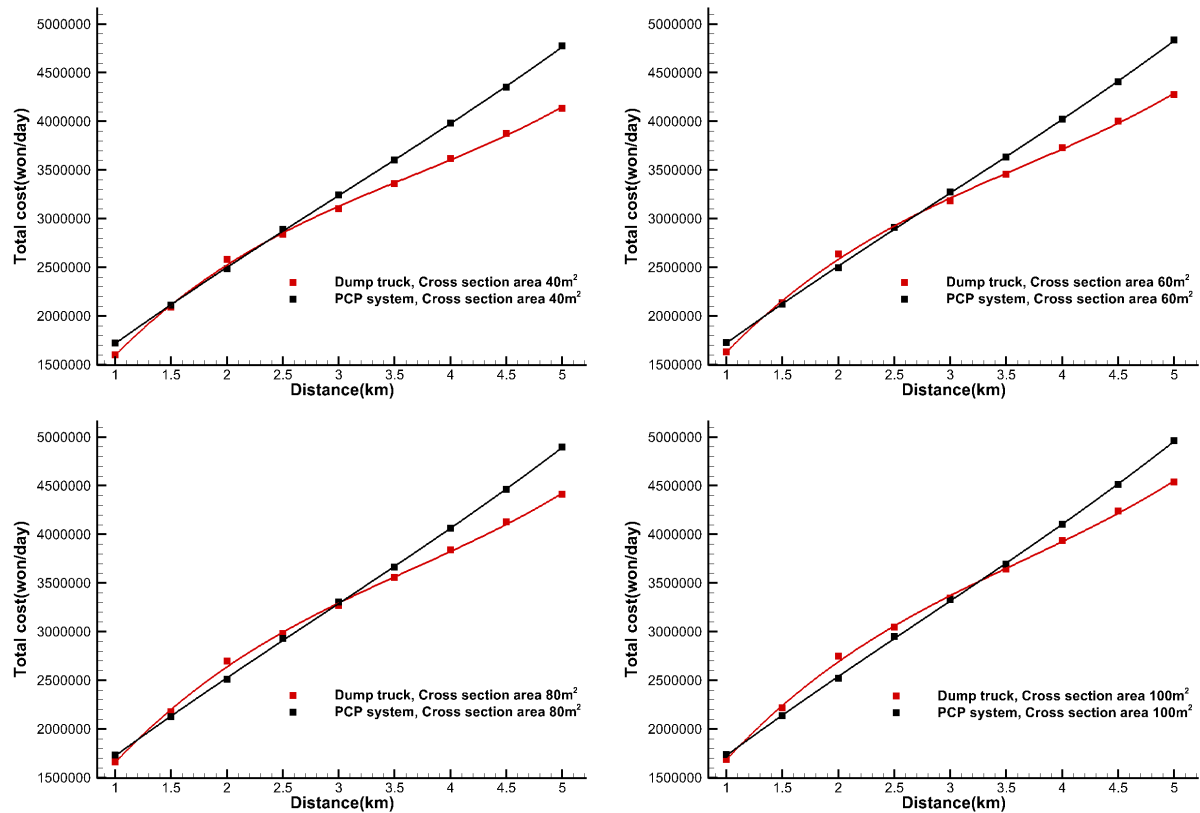


그림 54 터널 단면적별 경제성 분석 결과 비교

그림 54는 터널 단면적별 경제성 분석 결과를 비교한 것이다. PCP 시스템이 기존 시스템에 비해 경제성을 확보할 수 있는 구간은 터널 단면적이 증가하면 증가할수록 넓어진다.

터널단면적	$40m^2$	$60m^2$	$80m^2$	$100m^2$
경제성 확보 구간(km)	1.53~2.36 (0.83)	1.33~2.73 (1.4)	1.21~3.02 (1.81)	1.12~3.26 (2.14)

그러나 굴진 거리가 짧은 경우(1km 미만)의 경우 PCP 시스템은 기존 시스템에 비해 경제성을 확보하기 어렵다. 이는 기존 시스템이 임대하는 덤프트럭 수가 많지 않아 인건비 및 장비 임대료 측면에서 저렴하기 때문이다. 표 33은 굴진 거리 1km에서의 대여장비를 비교한 것이다.

구 분	기존 시스템	PCP 시스템
대여장비	덤프 트럭 6대 환기용 축류팬 1대	덤프 트럭 2대 PCP 캡슐 4대 파이프라인 1km Fan 2대
작업인원	덤프 트럭 운전기사 6명	덤프트럭 운전기사 2명 PCP 시스템 중앙통제원 1명 파이프라인 조립원 4명

표 33 굴진 거리 1km에서의 대여장비 및 작업인원 비교

반면, 굴진 거리가 길어진 경우(4km 이상)도 PCP 시스템이 경제성을 확보하기 어렵다. 이는 파이프라인의 임대료가 차지하는 비용이 크기 때문이다.

○ 장비 임대료 비교

PCP 시스템의 장비 임대료를 구성하는 fan 임대료, 캡슐 임대료, 파이프라인 임대료 중 가장 많은 비중을 차지하는 것은 파이프라인 임대료이다. 그림 55은 PCP 시스템과 기존 시스템의 장비 임대료를 비교한 것인데, PCP 시스템의 장비 임대료가 선형으로 증가하는 것은 이 파이프라인 임대료 때문이다.

PCP 시스템의 파이프라인은 기존 시스템의 환기시설에서 사용하는 풍관과는 달리 재사용이 가능하기 때문에 월 임대료를 비교적 자유롭게 산정할 수 있다. 이 파이프라인의 임대료를 어떻게 산정하는가에 따라 경제성을 확보할 수 있는 구간이 바뀔 수 있다.

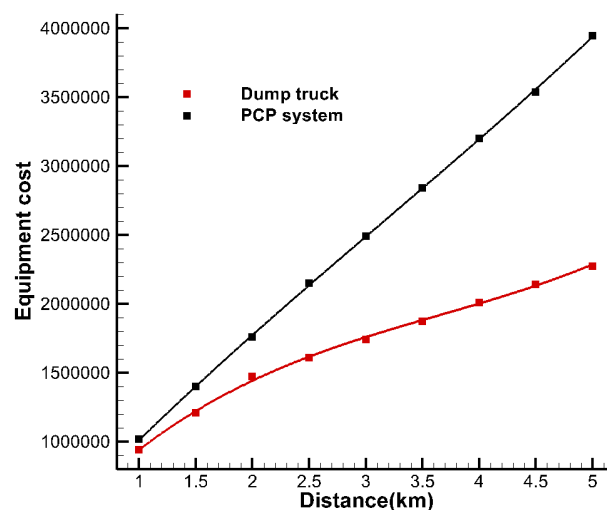


그림 55 터널 굴진거리별 장비 임대료 비교

○ 장비 운용비용 비교

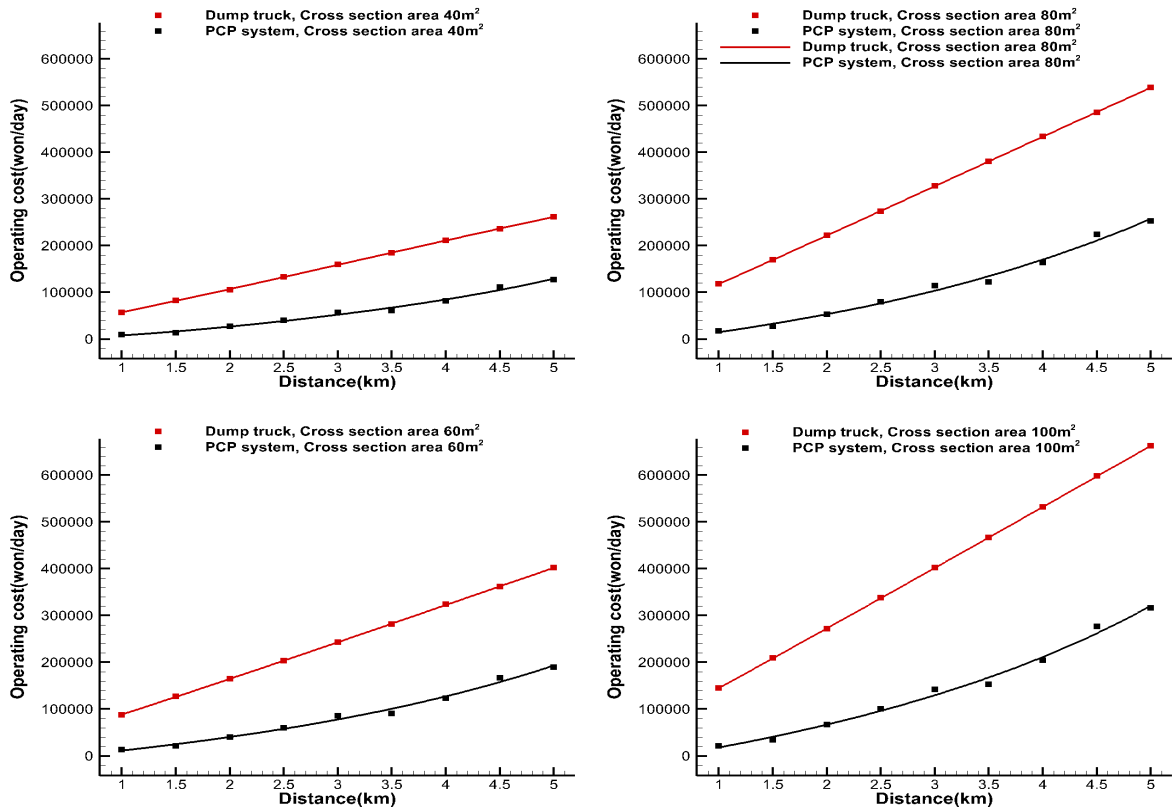


그림 56 터널 단면적별 장비 운용비용 비교

그림 56은 터널 단면적별 장비 운용비용을 비교한 것이다. PCP 시스템은 장비 운용 비용 측면에서 기존 시스템에 비해 항상 우수한 것을 확인할 수 있는데 이는 PCP 시스템이 중앙 fan 전기세만을 필요로 하기 때문이다. 반면, 기존 시스템은 굴진 거리가 길어짐에 따라 증차하게 되는 덤프트럭별로 유류비를 소요되기 때문이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 버력 운송거리가 멀어지면 멀어질수록 장비 운용비용의 차이가 증가되며, 운송 버력의 총 부피가 늘어나면 늘어날수록 장비 운용비용의 차이도 증가한다.

2.11. 장비의 시공성

가. 사갱 및 피난 연락갱이 존재할 경우에 대한 대안

기존의 터널 공사현장에서 굴진 거리가 길어지면 사갱을 사용하게 된다. 이는 덤프트럭의 수가 지나치게 많아져 버력 배출 작업시간이 지연되거나 버력 배출 작업 비용이 지나치게 커지기 때문이다.

기존 시스템과 PCP 시스템간의 경제성을 비교한 결과를 통해 확인할 수 있듯이 굴진

거리가 길어지면 경제성을 확보하기 어렵다. 사갱을 필요로 하는 경우는 보통 굴진거리가 5km 이상인 경우가 많다. 그러므로 PCP 시스템은 사갱 시공이 예정되어 있는 터널 공사현장에서는 적용하기 어렵다. 다만, 국내 터널 공사현장은 인가가 없는 산은 없어 사갱 시공시 주변에 대한 보상 및 환경 문제 때문에 사갱을 시공하기 어려운 경우가 많다. PCP 시스템은 이러한 경우에 대한 대안으로 적용할 수 있을 것으로 예상된다.

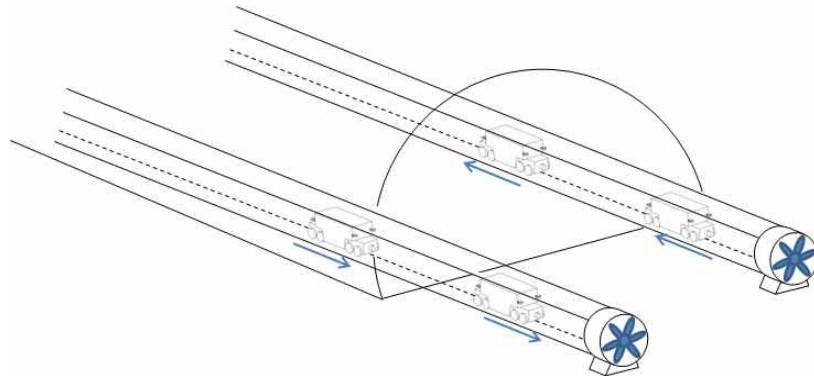


그림 57 외굴인 경우 PCP 시스템의 설치

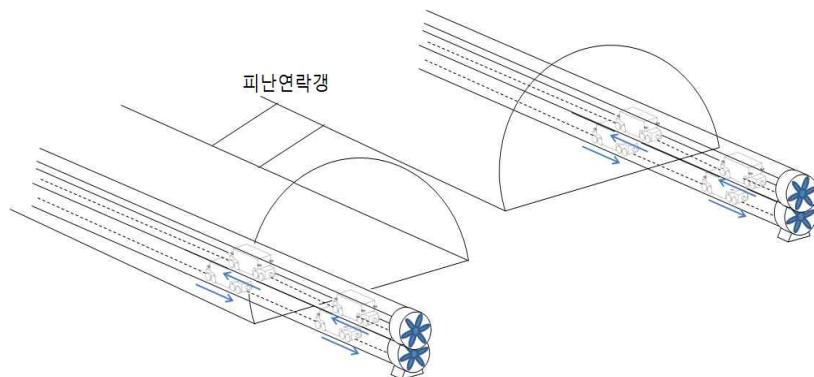


그림 58 쌍굴인 경우 PCP 시스템의 설치

외굴에서 PCP 시스템은 그림 57과 같이 배수로 위에 설치하는 것이 공간 활용 측면에서 용이할 것으로 판단된다. 그러나 쌍굴인 경우 두 터널 간의 장비 대피로 및 피난 연락갱을 설치하게 된다. 이 경우 그림 57과 같이 배수로에 위치하는 파이프라인은 피난 연락갱을 막기 때문에 이러한 방법은 적절하지 않다. 그러므로 쌍굴인 경우 그림 58과 같은 복층 구조로 파이프라인을 설치해야 할 것으로 판단된다. 캡슐의 중량이 상대적으로 가벼운 회수라인은 상부에 배치하고, 버력을 적재한 수송라인을 하부에 배치하는 것이다.

나. 종단 경사에 따른 장비 시공성

일반적으로 터널 공사 현장에서는 작업장 내 배수 등의 문제로 설계 시 종단 경사를 적용하게 된다. 지나친 가파른 종단경사가 터널 공사 장비의 효율이 감소하고 환기를 어렵게 한다. 그러므로 국내에서는 일반 도로구간의 종단경사보다 완만한 0.3~2.0%를 기

준으로 적용하고 있으며 특히 최대 경사인 2.0% 이상은 설계 단계에서 잘 적용하지 않는다. 표 34는 국내 터널 종단경사 적용 기준이고 표 35는 국내 터널의 종단 경사 사례이다.

적 용 기 준	기 준 내 용
터널설계기준 (건설교통부, 1999)	터널의 구배는 배수에 지장이 없는 범위내에서 가급적 완만하게 계획하여야 하며 기능상 요구되는 조건에 부합되어야 한다.
도로설계 편람 - 터널편 (건설교통부, 2002.2)	- 배수에 의한 영향 : 시공 중 용출수를 자연 요출시키기 위해서는 용출수가 적을 경우 0.3%, 상당히 많을 경우 0.5% 정도의 경사가 필요하다. - 환기에 의한 영향 : 기계환기를 필요로 하는 터널에서는 환기 계획 상 특수한 경우를 제외하면 일반적으로 0.3% ~ 2.0% 사이의 경사로 완만하게 사용하는 것이 바람직하다.
도로설계요령 (한국도로공사, 2002.1)	- 시공중의 용수를 측구를 통하여 자연 유출시키기 위해서는 용수가 작은 경우에도 0.3%, 상당히 많은 경우에는 0.5% 정도의 구배가 필요하다. - 특수한 경우를 제외하면 일반적으로 0.3%~2.0% 사이의 구배로 완만하게 사용하는 것이 바람직하다.
도로설계기준(안) (한국도로교통협회)	터널의 종단선형은 시공중의 용출수, 공용후의 누수처리, 차량의 주행을 위한 에너지와 배기가스의 저장 및 주행의 안정성을 고려하여 결정해야 하며, 특수한 경우를 제외하면 일반적으로 0.3% ~ 2.0%사이의 급로 최대한 완만하게 계획하는 것이 바람직하다.

표 34 국내 터널 종단경사 적용 기준

터널명	도로구분	연장(m)	종단경사(%)	비 고
고성 1, 2터널	고속도로	1,192	1.90	대전 ~ 통영
분내터널	고속도로	3,364	1.507	영동고속도로
유당터널	고속도로	1,245	0.88	광주시 우회도로
육십령터널	고속도로	3,150	0.8	대전~진주
장성터널	고속도로	3,598	0.5	광주시 우회도로
진부1터널	고속도로	2,074	1.84	영동고속도로
차령터널	고속도로	2,360	1.3	천안~공주
능동터널	국도	4,538	0.92	산외~상북
대쌍터널	국도	2,340	1.06	성남~장호원
미시령터널	국도	3,565	1.68, 1.65	용대~원암
수인터널	국도	2,925	0.51, -0.35	신북~양구, 양방향
수천터널	국도	1,760	2.0	둔덕~주삼

터널명	도로구분	연장(m)	종단경사(%)	비 고
싸릿재터널	국도	2,470	2.0	강원/국도 양방향
우면산터널	국도	1,893	0.3	반포~과천
웅진터널	국도	1,225	0.51, -0.35	강원/국도 양방향
철마산터널	국도	1,040	1.0~2.0	산곡~석남
침곡터널	국도	2,605	0.54	전주~함양
화북터널	국도	2,040	1.45	청주~상주

표 35 국내 터널의 종단경사 사례

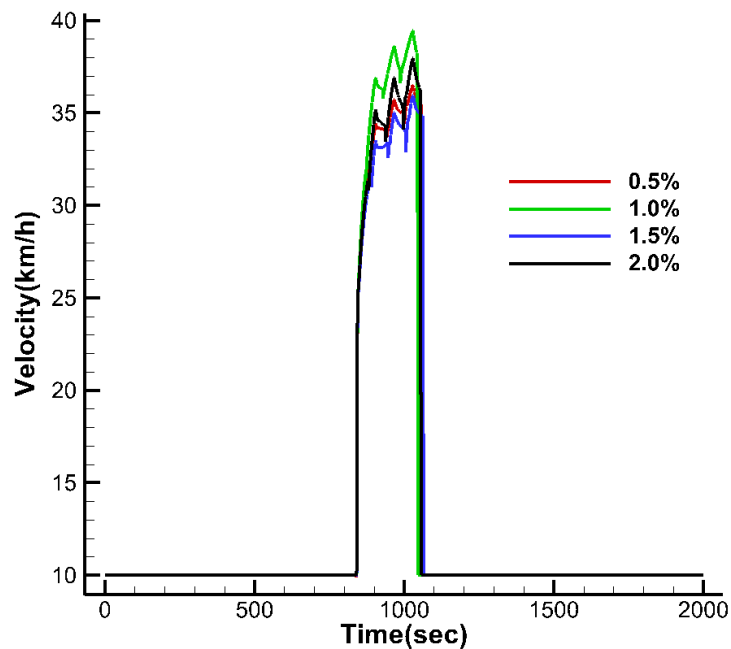


그림 59 종단경사가 존재할 경우 캡슐의 속도 변화 예

그러나 PCP 시스템을 적용하고자 하는 터널에 종단경사가 존재한다면 중력에 의해 캡슐의 이동이 정상적으로 이루어지기 어려운 경우가 발생할 수 있어 이 부분에 대한 고려를 필요로 하게 된다. 그림 59는 굴진길이 2km인 터널 공사현장에서 각각 종단 경사 0.5~2.0%가 적용된 경우 캡슐의 이동속도 변화이다. 비록 종단경사가 없는 경우에 비해 필요로 하는 동력원의 요구 승압력은 커지게 되나 종단 경사가 최대 2.0%까지 적용되어 있더라도 시스템의 정상적인 운용이 가능함을 확인할 수 있다.(표 36)

종단경사	중앙 동력원	수송속도
0.5%	Fan6	32.49(km/h)
1.0%	Fan8	34.59(km/h)
1.5%	Fan5, 직렬연결	31.73(km/h)
2.0%	Fan6, 직렬연결	32.97(km/h)

표 36 종단경사에 따른 캡슐 수송속도 계산 예

다. 공기압 누설에 따른 시스템의 적용성

PCP 시스템의 파이프라인의 조립 연결부에서 공기압 누설이 있을 경우 캡슐의 수송 성능이 저하될 수 있다. 그러므로 시스템 요구 성능에 부합하는 설계기준으로 조립시 허용가능한 등가 누기면적을 분석할 필요가 있으며, 이 등가 누기면적을 파이프라인 설계의 기준으로 제시되어야 할 필요가 있다.

파이프라인과 외기 사이의 공기압 누설에 따른 압력 변화는 등엔트로피 관계식을 통해 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{dp_{in}}{dt} = C_k \gamma \rho^{\gamma-1} \frac{d\rho}{dt} = C_k \gamma \rho^{\gamma-1} \frac{1}{V} \frac{dM}{dt} = C_k \gamma \rho^{\gamma-1} \frac{1}{V} q_{in}$$

$$q_{in} = \text{sign}(p_e - p_{in}) \times s_{eq} \sqrt{2\rho|p_e - p_{in}|}$$

여기에서 등가 누기면적 s_{eq} 를 가정하여 캡슐의 수송속도를 비교해야 한다. 그림 60은 굴진 거리 2km 및 3km에 대해 공기압 누기가 존재할 경우의 캡슐 수송 속도이다. 두 경우 파이프라인 둘레길이에 대하여 0.001%(파이프라인 연결부 틈새길이 0.015mm)보다 큰 누기가 발생할 경우 캡슐은 정상적으로 이동하지 못하고 중간에 멈추는 경우가 발생하게 된다. 그러므로 PCP 시스템의 파이프라인은 조립 후 실리콘 등을 통해 공기압의 누기를 최소화할 수 있는 별도의 공정이 필요한 것으로 판단된다.

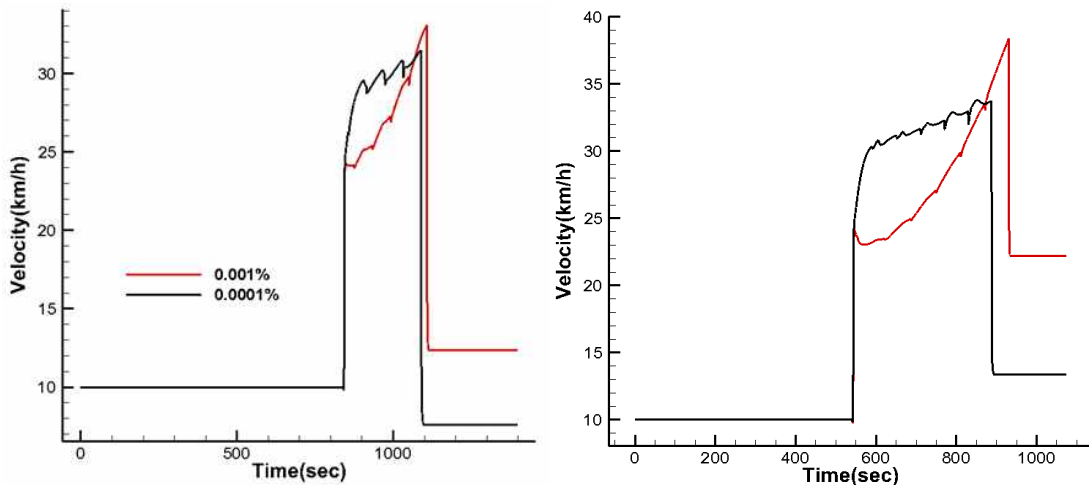


그림 60 공기압 누설에 따른 캡슐 수송속도 변화(좌 : 굴진거리 2km, 우 : 굴진거리 3km)

라. 터널 발파 공법에 따른 장비의 시공성

시공 터널의 단면적이 크지 않다면 전단면 발파를 통해 굴착하지만 터널 단면적이 큰 경우 상단면과 하단면을 분리하여 굴착하는 경우가 발생한다.

기존 터널공사 현장에서는 발파 후 비산되어 있는 버력을 폐일로더를 통해 한 곳으로 모은 후 상차하는 방법을 사용하고 있다. PCP 시스템이 터널 공사 현장에 적용된다면 이와 유사하게 파이프라인 외부로 설치되는 rail이 끝나는 위치에 버력을 모아서 상차작업을 시행한다면 기존의 방법과 큰 차이 없이 작업할 수 있을 것으로 생각된다.(그림 61, 62)

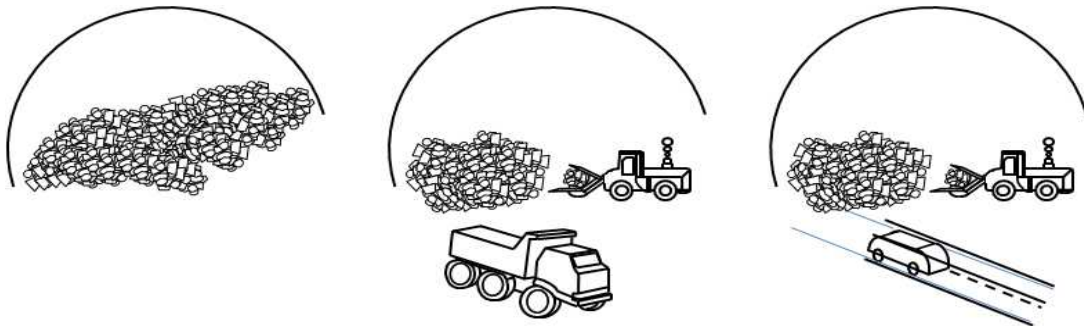


그림 61 버력 발파 작업 후 비산된 버력을 폐일로더를 통해 버력을 모으는 작업 수행

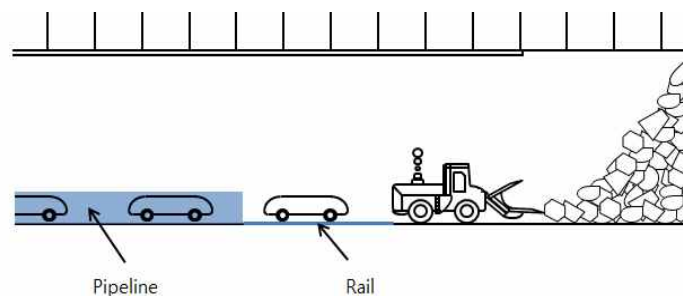


그림 62 전단면 발파공정에서의 PCP 캡슐의 접근

또한 상·하단면 분리 굴착을 시행하는 터널 공사 현장에서 상단면 굴착 후 발생하는 버력은 그림 63과 같이 굴진 작업 중 발생한 버력으로 오르막길을 조성한다. 이 오르막길을 통해 덤프트럭을 접근시키는데 PCP 시스템도 이와 유사하게 버력으로 조성한 오르막길 위로 rail을 통과시켜 캡슐을 접근시키면 장비의 시공성에 큰 문제가 없을 것으로 생각된다.(그림 64)

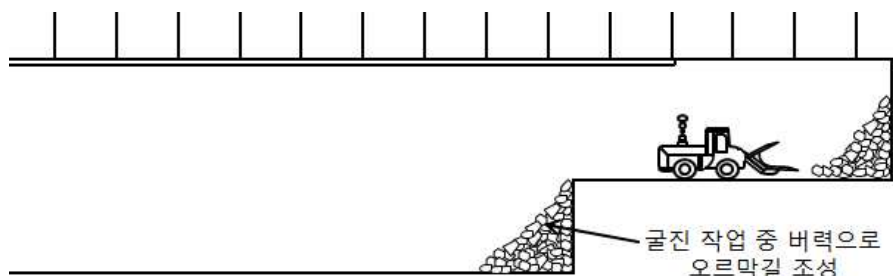


그림 63 상·하단면 분리 굴착시 폐일로더 및 덤프트럭의 접근

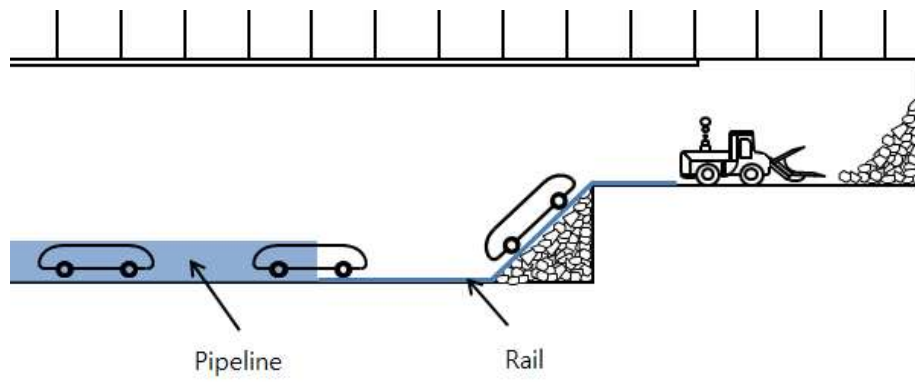


그림 64 상 · 하단면 분리 굴착시 PCP 시스템 캡슐의 접근

제4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

○ 목표 달성도

본 연구는 국내에서 기존에 개발 및 적용된 바 없는 PCP 시스템의 개념설계 연구이다. 이를 위해 시스템의 설계 조건을 구축 및 개념 설계를 수행하고, 개념 설계안을 해석할 수 있는 시스템 분석 코드를 개발하였다.

시스템 분석 코드는 계산의 효율성을 위해 1차원 모델링을 기반으로 파이프라인의 연결부를 정확하게 모사할 수 있는 GJM(Ghost Junction Method)를 사용하였다. 또한 파이프라인의 접촉면에서 발생할 수 있는 비물리적인 해가 발생할 수 있는데, 이를 배제하기 위해 scaling function을 도입하였다. 개발한 시스템 분석 코드를 통해 다양한 굴진 거리 및 캡슐의 하중 변화에 따라 시스템의 수송 성능 및 소요 에너지를 도출할 수 있었다. 본 연구의 가장 중요한 부분은 바로 이 시스템 분석 코드의 개발 및 해석으로 이 부분만으로도 연구의 목표를 거의 달성한 것으로 생각된다.

분석된 시스템의 수송 성능 및 소요 에너지를 바탕으로 경제성 분석을 수행하였다. 또한 기존 터널 공사 현장에서 사용하고 있는 덤프트럭 및 환기시설에 대한 경제성 분석을 수행하였다. 두 시스템의 경제성을 비교한 결과 PCP 시스템이 항상 우수한 경제성을 보장하지 않았고, 경제성을 확보할 수 있는 구간이 대상 터널의 단면적에 따라 변화할 수 있음을 알 수 있었다.

마지막으로 다양한 터널 공사 현장에서 시스템을 적용할 때 우려할 만한 문제들에 대한 대안을 모색하였다. 쌍굴 및 외굴을 시공하는 현장에서 PCP 시스템을 적용하기 위한 대안을 모색하였고, 국내 터널 공사현장에서 일반적으로 적용하는 종단 경사가 존재할 경우에도 캡슐이 정상적으로 이동할 수 있음을 시스템 분석을 통해 확인할 수 있었다. 또한 공기압 누설이 존재할 경우 발생할 수 있는 시스템 수송 성능 저하를 시스템 분석을 통해 확인하고 허용 가능한 누기 면적을 도출하였다. 그리고 다양한 터널 굴진 공법에서 캡슐이 버력에 접근하기 위한 대안을 마련하였다.

○ 관련분야에의 기여도

무인 수송시스템인 PCP 시스템은 네트워크화가 용이하고 전기적 제어가 용이하여 새로운 개념의 무인 교통·수송 시스템으로 향후 발전할 수 있는 여지가 남아있다. 또한 현장에서 경제성 및 안전성이 입증된다면 다음의 분야에서 활용이 가능할 것으로 예측된다.

- 공항, 항만에서의 하역 화물 운반 시스템
- 주요 산업 공단에서의 자재 및 제품 수송
- 원전 폐기물 및 환경 폐기물의 안전한 수송

- 초고속 미래형 철도 튜브로 활용 가능
- 근거리 해운 교통의 대안으로 해저 터널 등에 적용 가능

제5장 연구개발결과의 활용방안

본 연구개발결과 얻을 수 있는 PCP 시스템의 개념 설계안, 시뮬레이션 및 성능분석 프로그램은 상업용 PCP 개발 업체에 대한 기술 이전 시 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 PCP 시스템은 터널 공사 현장 외에도 공항, 항만에서의 하역 화물 운반 시스템이나 주요 산업 공단에서의 물류 수송, 원전 폐기물 및 환경 폐기물의 수송 등에도 적용 가능할 것으로 판단된다.

PCP 시스템과 기존 시스템에 대한 경제성 분석 결과는 실제 공사에 적용 시 경제성을 보장하기 위한 공사 여건을 구분하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

개발된 PCP 성능분석 프로그램은 파이프라인내 유동을 일반적으로 모사할 수 있어 PCP 시스템 외에도 고층 빌딩에서의 급수 파이프라인 문제, 터널 내 화재 발생 시 매연의 이동, 기차 내 승객이 느끼는 이명(耳鳴) 여부 등 다양한 문제에도 적용할 수 있다. 그림 64는 파이프라인 시스템 분석의 예로써 lavatory D에서 갑자기 밸브를 닫았을 때 가정에 공급되는 수관의 압력변화를 계산한 것이다. lavatory D 전면에 어레스터가 존재할 경우와 존재하지 않는 경우 압력차가 약 750kPa 정도 나타나게 되며, 가정 내 수관을 설치한다면 이를 참조하여 수관이 터지지 않도록 설계되어야 할 것이다.

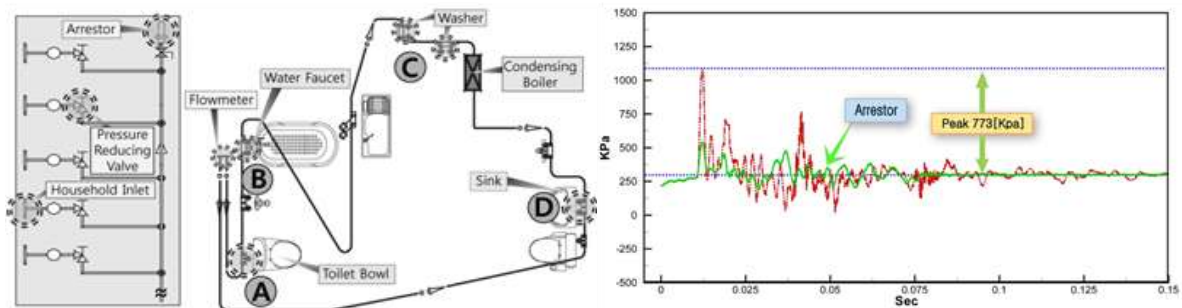


그림 65 Application example : water hammer scenario

터널 내 기차가 통과할 경우 발생하게 되는 온도, 압력 변화는 터널 설계시 적용되어야 할 설계조건으로 적용되기도 한다. 또 터널 내 압력변화는 기차 내 승객이 느끼는 이명(耳鳴)과도 관계 있어 이 부분 역시 설계조건과 연결되기도 하는데, 본 연구를 통해 개발된 시스템 분석 코드는 이러한 문제에 적용될 수도 있다. 그림 65~67은 호남선이 통과하는 터널에 대하여 KTX 열차가 통과할 시 나타나게 되는 온도, 압력변화를 수치적으로 해석한 것이다. 터널 내 온도는 열차가 통과하더라도 4도 이상 변화가 없도록 설

계되어야 하는데 그림 66을 보면 각 터널 모두 이러한 설계요구 조건을 만족하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 67은 터널 B 내 압력 변화와 열차 내 승객이 느끼는 이명과 관련한 압력 변화를 나타낸 것이다.

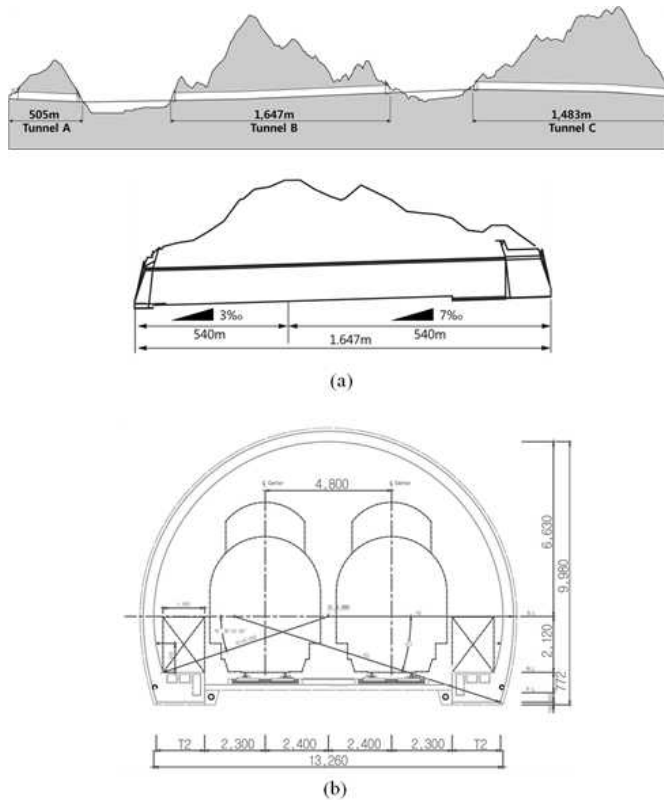


그림 66 해석 터널 재원

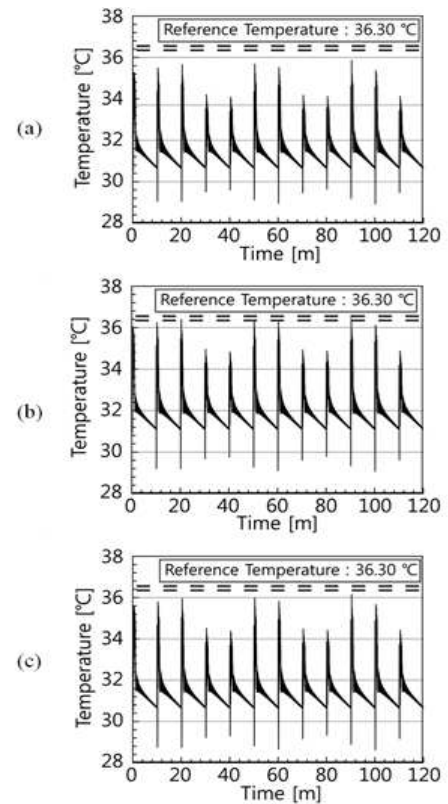


그림 67 터널 중간에서의 온도 변화

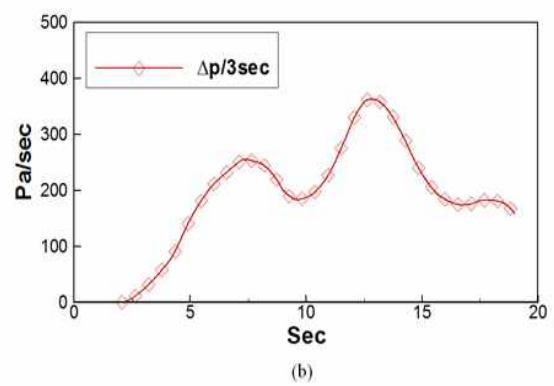
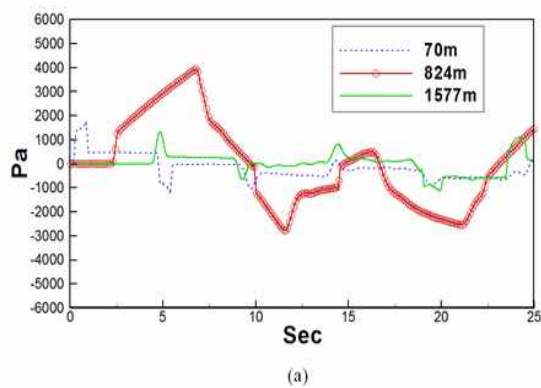


그림 68 터널 내 압력 변화 및 열차 내 압력 변화율

제6장 참고문헌

- [1] Henry Liu et al. An advanced Electromagnetic Capsule Pipeline System for Conveying Minerals and Mine Wastes, International Symposium on Underground Freight Transport. (2005)
- [2] Henry Liu, Sanai Kosugi, Use of Pneumatic Capsule Pipeline for Underground Tunneling, 12th International Symposium on Freight Pipelines. (2004)
- [3] Henry Liu et al. Feasibility of Underground Pneumatic Freight Transport in New York City, NYSERDA Final report (2004)
- [4] Henry Liu, Charles W. Lenau, An Electromagnetic Pneumo Capsule System for Conveying Minerals and Mine Wastes(Final Report), DOE project final report (2005)
- [5] Henry Liu, Transporting Freight Containers by Pneumatic Capsule Pipeline : Port Security and Other Issues, Invited Presentation at Summer Meeting of U.S.Transport Research Board. (2006)
- [6] Stephen S.Roop et al. The Technical and Economic Feasibility of a Freight Pipeline System in Texas – year 2 Report, Texas Department of Transportation report, (2001)
- [7] Yutaka Tsuji et al. A Fundamental Investigation of the Capsule Transport (2nd Report, Wake of a capsule and the effect of interaction between two capsules on the drag), Bulletin of JSME, Vol 27. (1984)
- [8] Yutaka Tsuji et al. A Fundamental Investigation of the Capsule Transport (4th Report, Numerical Analysis of Motion of Accelerating and Decelerating Capsules), Bulletin of JSME, Vol 28. (1985)
- [9] Yutaka Tsuji et al. A Fundamental Investigation of the Capsule Transport (5th Report, Transport Experiment and Numerical Analysis of Two Capsules), Bulletin of JSME, Vol 28. (1985)
- [10] M.R.Carstens, Analysis of a low-speed capsule transport pipeline, International conference on the hydraulic transport of solids in pipes, 1970

- [11] G.F.Round and M.I.Marcu, Pneumaticcapsule Pipelines : Potential for North America, Journal of pipelines, 6(1987) 221~238
- [12] Yoshinobu Morikawa et al. A Fundamental Investigation of the Capsule Transport (3rd Report, Friction of Capsule wheels and Transport Experiment of a Single Capsules), Bulletin of JSME, Vol 27. (1984)
- [13] 홍석우, 김종암, 유동망 시스템 해석을 위한 경계처리에 대한 보존형 유한 체적법, 한국전산유체공학회지 제14권, 제1호, pp35-44
- [14] Seok Woo Hong, Chongam Kim, A New Finite Volume Method on Junction Coupling and Boundary Treatment for Flow Network System Analyses, International Journal for Numerical Methods in Fluids, published online, DOI: 10.1002/fld.2212.
- [15] Sanai Kosugi et al. Applicability of Pneumatic Capsule Pipeline system to Radioactive waste disposal, WM'02 conference, 2002
- [16] G. Q. Zhang and D. N. Assanis, Manifold Gas Dynamics Modeling and Its Coupling With Single-Cylinder Engine Models Using Simulink, J. Eng. Gas Turbines and Power 2003, 125, 563-571.
- [17] G. P. Greyvenstein, An implicit method for the analysis of transient flows in pipe networks, International Journal for Numerical Methods in Engineering 2002, 53, 1127-1143.
- [18] T. Kiuchi, An implicit method for transient gas flows in pipe networks, International Journal of Heat and Fluid Flow 1994, 15, 378-383.
- [19] K. M. Shyue, An Efficient Shock-Capturing Algorithm for Compressible Multicomponent Problems, Journal of Computational Physics 1998, 142, 208-242.

주 의

1. 이 보고서는 국토해양부에서 시행한 건설기술 혁신사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토해양부에서 시행한 건설기술 혁신사업연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.