

해저터널 급속차폐시스템의 Inflater 분할구조에 따른 터널 내 차수효율에 대한 실험적 연구

유광산¹ · 이지현² · 김연덕² · 김상환^{3*}

¹정회원, 유광건설 사장

²비회원, 호서대학교 토목공학과 석사과정

³정회원, 호서대학교 토목공학과 교수

Model testing of leakage effect due to multi-cell inflater of rapid protection system in subsea tunnel

Kwang-San Yoo¹, Ji-Hyun Lee², Yeon-Deok Kim², Sang-Hwan Kim^{3*}

¹Yookwang Construction Co., Ltd., President

²Dept of Civil Engineering, Hoseo University, Graduate student

³Dept of Civil Engineering, Hoseo University, Professor

ABSTRACT: This paper presents the study of leakage effect due to multi-cell inflater of rapid protection system to protect the possibilities of tunnel damages by flooding threats and unusual leakage to be occurred during and after subsea tunnel construction. Particularly, this protect system should be necessary in subsea tunnel. This research concentrates the physical model tests due to several multi-cell inflater to study protection capacity of leakage between the inflater and tunnel liner. A 27:1 small scale model are used in the model tests. The leakage rate, water pressure and axial displacement of inflater are measured during the model tests. According to the results, the minium leakage rate clearly shows in the case of two-cell inflater compared with in other cases. It is concluded that the results of this research will be very useful to understand the fundamental information of inflater structure design and development the technology of tunnel protection structures in the future.

Keywords: Subsea tunnel, Model testing, Multi-cell inflater, Leakage effect, Tunnel protection system

초 록: 본 논문은 해저터널 시공 및 운영 시 발생하는 돌발용수 및 이상누수에 의한 사고에 대비하기 위한 해저터널 급속차폐시스템의 Inflater 분할구조에 따른 터널 내 차수효율에 대한 실험적 연구이다. 해저터널 특성상 해수 유입 또는 지하수 유입, 호우로 인한 침수 등 물과 관련된 피해에 대한 방호시스템은 필수적이다. 이 연구에서는 이러한 급속차폐를 위해 고안된 Inflater 구조에 대하여 형태 및 분할에 따른 차폐능력, 누수량, 수압 그리고 축방향 변위 등을 연구하기 위하여 27:1 축소율을 적용한 실내모형을 다양한 Inflater 분할구조별로 실시하였다. 연구결과에 의하면 2분할 Inflater 구조인 경우가 다른 분할에 비해 시간당 누수량 및 축방향 변위가 낮아 차폐능력이 좋은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 해저터널의 제원에 따라 다소 차이는 있을 것으로 예측되나 기본적으로 차폐시스템 설계 및 개발기술 발전에 매우 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

주요어: 해저터널, 모형실험, Multi-cell inflater, 차수효과, 터널차폐시스템

*Corresponding author: Sang-Hwan Kim

E-mail: kimsh@hoseo.edu

Received April 15, 2015; Revised May 1, 2015;

Accepted May 6, 2015

Copyright ©2015, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

우리나라는 국토의 2/3 이상이 산악지형으로 형성되어 있어 지형활용도가 낮으며 지상 건설에 효율적이지 못하다. 또한, 삼면이 바다로 둘러싸여 있는 형태를 가지고 있으나 그 중 서해와 남해는 해안선이 단조롭지 않고 섬이 많아 사람 및 물류의 이동이 원활하지 못하다는 문제를 가지고 있다. 이러한 지형적으로 불리한 조건을 가진 문제의 해결방안으로 대표적으로 대규모 지하공간의 건설, 사회간접시설의 지하화를 들 수 있으며 또한 선박을 이용하거나 육지와 섬, 섬과 섬 사이에 교량을 건설하는 방법을 이용하였다. 그러나 최근에는 선박에 비해서 유지비용이 적게 들고 건설지역에 대한 대형선박의 운항이 용의한 해저 터널에 세계적으로 많은 관심이 쏠리고 있다. 또한 국토의 효율적 이용 및 환경 친화적인 사회기반시설 구축을 위하여 지하공간의 수요를 매년 증가하고 있으며, 우리나라는 국토 및 해안의 이점을 살려 주변 국가와 연결하여 세계 물류 및 관광 등 경제의 중심지로 발전되기 위하여 해저시설물의 건설이 필요한 시기이다.

한편 유럽, 일본, 중국 등 해외 건설시장에 있어서 해저터널과 관련된 프로젝트 및 건설이 증가하고 있지만 국내에서는 해저터널에 관련된 방수 연구와 해저 시설물에 관련된 연구가 거의 없는 실정이다(Shin, 2009).

특히 해저 시설물 건설에 있어서 해저터널의 시공 및 운영 중 누수, 침수, 테러(폭발 등)에 따른 돌발용수 발생 시 터널 내의 유입수에 대한 제어용 고성능 차폐설비시스템과 이와 관련된 터널 내 수리거동 예측 기술 등에 대한 연구는 미비한 상태이므로 위와 같은 사고가 발생시 시공중 안전성뿐만 아니라 완공 후에도 구조물 전체에 구조적인 안정성에 큰 위험을 초래할 수 있다.

Table 1은 해외사례들을 분석한 결과로 1979년 일본의 세이칸 해저터널 시공 시 침수사고가 발생하여 공사비 및 공사기간의 증가뿐만 아니라 수십명의 인명피해 사례가 있었으며, 국내의 사례로는 수도권 한강지역의 지하철 공사 시 집중호우로 인한 터널 침수 피해가 여러 번 발생한 것을 들 수 있다(Lee, 2015). 이를 방지하기 위해 해저터널 시공, 운용중에 돌발용수로 인한 인적 물적 피해를 최소화 할 수 있는 Inflater

Table 1. Accident cases of flooding threats in tunnel

Construction site	Status and problems	Remarks
Denmark great belt strait (Subsea tunnel)	<ul style="list-style-type: none"> · Equipment trouble and tunnel damage collapse by inundation of seawater · Delay of construction period 	<ul style="list-style-type: none"> · Protection cofferdam design and using clay
Japan seikan tunnel (Subsea tunnel)	<ul style="list-style-type: none"> · Seawater inflow in soft rock by blasting · Increase of construction period (4 accidents of large ground water inflow occurs during construction) 	<ul style="list-style-type: none"> · Construction of waterproof dam, pre-reinforced grout and cofferdam construction, development of the bypass tunnel
Taiwan new yungchuen (Mountain tunnel)	<ul style="list-style-type: none"> · High water pressure · Grouting materials remove from the fractured and jointed ground 	<ul style="list-style-type: none"> · Drainage hole / drain tunnel construction and grouting reinforcement
Norway tunnel	<ul style="list-style-type: none"> · Tunnel face collapse and seawater inflow at the fractured zone 	<ul style="list-style-type: none"> · Drainage hole / drain tunnel construction and grouting reinforcement
New york (Subway tunnel)	<ul style="list-style-type: none"> · The flooding accident caused by storm and flood · Difficulty of recovery by flashover phenomenon · Traffic jamming and electric power cut off 	<ul style="list-style-type: none"> · Drainage hole / drain tunnel construction and grouting reinforcement
Seoul subway (Line No.2)	<ul style="list-style-type: none"> · Backflow and flooding caused by heavy rains and drainage clogging · Traffic jamming and metro station closure 	<ul style="list-style-type: none"> · After the facility closed, repairing of pumps and cleaning · Flooding barrier installation and maintenance of sewer

를 설치하여 돌발용수를 제어하여 대피가능 시간을 늘릴 수 있을 것이다.

현재 해외에선 홍수나 테러공격에 대비하기 위해 대형 풍선을 이용하여 유입수를 차단하는 Inflatable tunnel plug (X. Martinez et al, 2012), 지하철 Tunnel plug (P. Kenyon, 2012) 연구가 진행 중이다. 그러나 국내에서는 해저터널에 관한 연구는 전무한 실정이며, 유입수에 따른 돌발 용수에 신속한 대처가 필요한 차폐설비요소에 관한 기술 또한 미비한 실정이다 (Kim et al., 2003).

따라서 본 논문에서는 해저터널의 시공 및 운영 중 발생하는 사고사례 및 차폐설비 등을 조사 분석하였으며 이를 바탕으로 돌발용수 및 이상누수에 따른 대형 참사의 방호시스템으로 급속차폐시설의 설계 및 개발기술에 있어서 Inflater의 분할구조에 따른 터널 내 차수효율에 대하여 모형실험을 통한 실험적 연구 결과를 도출하였다.

2. Inflater 구조물 실험 장비

2.1 개요

Inflater는 이동성이 용이하도록 비교적 가벼운 소재로 만들어졌으며 경제적인 시스템을 가지고 있다. 그리고 Inflater를 이용하여 제한된 공간을 폐쇄시켜 돌발용수에 의한 사고발생시 대처시간을 증가시킬 수 있으며 낮은 무게가 터널 형상의 주요 변형을 필요로 하지 않으므로 인적 및 물적 자원 등을 보호할 수 있다.

즉, 터널 내에 돌발용수가 유입되었을시 사고발생 지역 주변의 Inflater를 작동시켜 돌발용수의 이동을 차단하여 물적 피해를 최소화 줄이며 인명 대피시간을 증가시켜 안전성을 높일 수 있을 것이다.

실제 터널에 맞는 크기의 Inflater를 제작하기에는 연구적으로 시간과 비용 측면에서 큰 어려움이 있다. 따라서 Scale factor를 고려하여 축소율을 적용한 실내

모형 실험을 통해 Inflater의 기초 거동에 대한 분석이 필요하다. 기본적으로 Inflater의 기능은 과도한 유입수를 막아 터널 내 인적, 물적 피해를 감소시키고 터널을 보호하는 역할을 수행하는 것이다. 따라서 Inflater는 터널의 급속차폐를 위해 고안된 설비구조물로 해저터널이라는 특성상 중요한 방호시스템이다.

본 연구에서는 Inflater의 메카니즘을 분석하기 위해 아크릴을 이용하여 터널라이닝 실내 모형실험 장비를 제작하고 원형, 2분할, 4분할 Inflater의 분할별 차폐능력과 형태 그리고 주입공기압에 따른 단위시간당 누수량, 수압, 축방향 변위를 분석하는 실험을 실시하였다.

2.2 실험장비 개발

Fig. 1은 모형실험을 위하여 적정한 터널단면 산출을 위해 Shield TBM공법으로 건설된 철도 및 지하철 터널의 직경을 분석한 결과이다. 철도 터널 직경 평균은 8.4 m, 지하철 터널 직경 평균은 7.7 m로 평균적인 터널의 직경은 약 8 m인 것으로 조사되었다.

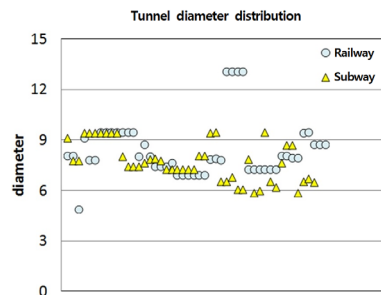


Fig. 1. Tunnel diameter (m)

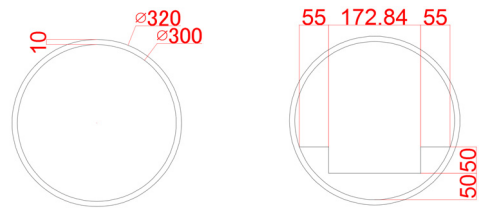
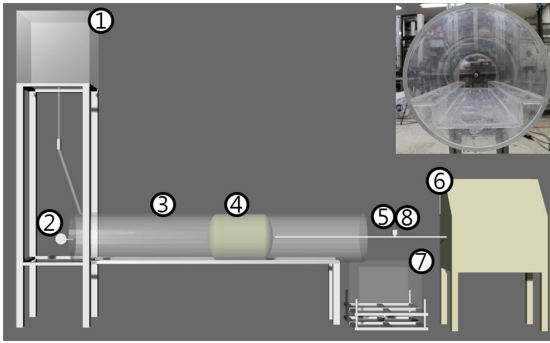


Fig. 2. Dimensions of model tunnel with facilities during and after construction

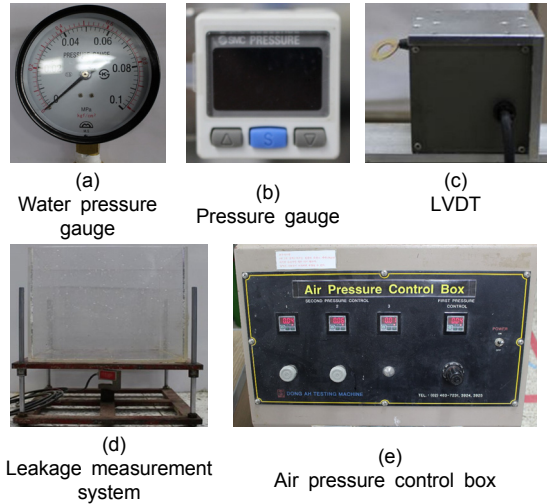


(1) Water tank, (2) Water pressure gauge, (3) Model tunnel
(4) Inflater, (5) Pressure gauge, (6) Air pressure control box
(7) Leakage measurement system, (8) LVDT

Fig. 3. Model test system of inflater

조사된 터널 평균 직경 8 m에 축소율 27:1을 적용하여 직경 300 mm, 길이 1,000 mm의 아크릴 투명관을 제작하였으며, Fig. 2에서 나타낸 것과 같이 시공 중 모형은 원형터널로, 운영 중 모형은 원형 터널에 축소율 27:1로 적용한 KTX-II 콘크리트 도상 및 설비제원을 추가하여 제작하였다. 전체적인 모형실험장치를 나타내면 Fig. 3과 같다.

Fig. 4는 모형실험장치의 주요 구성요소를 나타낸 것으로 모형터널에는 유입되는 물의 수압을 측정하기 위하여 (a) Water pressure gauge를 설치하였고 터널



(1) Water tank, (2) Water pressure gauge, (3) Model tunnel
(4) Inflater, (5) Pressure gauge, (6) Air pressure control box
(7) Leakage measurement system, (8) LVDT

Fig. 4. Measurement equipment

내 Inflater의 내부 공기압을 측정하기 위해 Inflater에 (b) Pressure gauge를 연결하였다. 또한 돌발용수에 의한 Inflater의 축방향 변위를 측정하기 위해서 (c) LVDT를 설치하였으며 모형실험 중 Inflater의 누수개소를 통해 누출되는 누수량을 측정하기 위해 (d) Leakage measurement system을 제작 설치하였다. 또

Table 2. Types of multi-cell model inflaters

Section	1-Cell inflater	2-Cell inflater	4-Cell inflater
Front			
Side			

한 Inflater내의 압력은 (e) Air pressure control box를 이용하여 소정의 압력을 유지시켰다.

실제터널에서는 철로, 통신장비, 환기시설 등이 존재하기 때문에 이를 고려하기 위해 모형실험에 사용된 Inflater의 외경은 모형터널직경보다 약 10% 증가시킨 직경 340 mm와 길이 680 mm로 제작하였다. Inflater 형태는 Table 2에 나타난 것과 같이 원형과 2분할, 4분할 세 가지 형태로 설계 제작하였으며, 소재는 공기가 빠지지 않고 밀폐되도록 내피는 연질 PVC로 제작하고 외피는 나일론 재질섬유에 패턴을 넣어 2겹으로 설계하여 제작되었다.

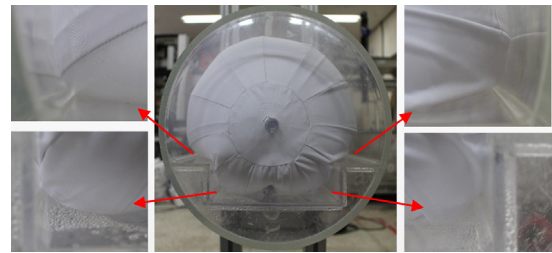
2.3 실험 방법

본 기초 모형실험은 Inflater의 형태와 주입공기압에 따른 차폐효율을 비교하기 위하여 Table 3과 같이 3가지 형태의 Inflater에 0.1 bar, 0.15 bar의 공기압을 각각 주입하여 총 6가지의 실험 case를 실시하였다.

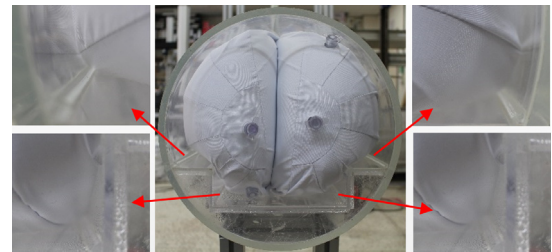
실험에 앞서 모형터널 내에서 Inflater의 형태관찰을 위해 Fig 5과 같이 모형터널 내에 각 형태별 Inflater를 넣은 후 공기를 주입하여 팽창시켰다. 원형 터널의 경우 3가지 형태의 Inflater 모두 누수개소 없이 모형터널에 가득 채워졌다. 하지만 철도 모형터널의 경우 3가지 형태의 Inflater 모두 슬라브 부분에서 누수개소가 관찰되었다.

본 실험에서 모형터널과의 수두차가 100 cm인 가로, 세로, 높이 50 cm의 정사각형 아크릴 수조에 물을 채웠다. 그리고 누수량을 측정을 위하여 모형터널

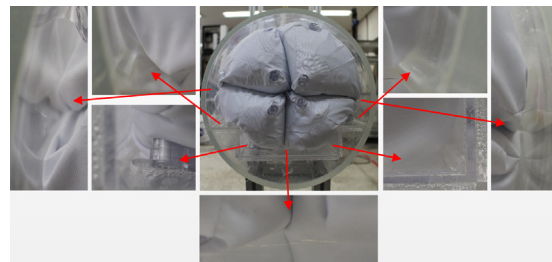
입구 하단에 Leakage measurement system를 설치하였으며 모형터널 내 돌발용수의 수압을 측정하기 위해 Water pressure gauge를 설치하였다. 모형터널 내에 Inflater를 넣고 Pressure gauge와 Air pressure control box를 연결하여 각각의 Inflater에 0.1 bar, 0.15 bar의 공기압을 일정하게 주입하여 Inflater의 내부공기압이 유지되도록 하였고 LVDT를 Inflater에 연결하였다. 그 후 모형터널과의 수두차에 의해 직경 30 mm 호스를 통해 모형터널 내부로 급격하게 유입되도록 밸브를 열었다. 특히 수두차를 일정하게 유지시키기 위하여 수조 안의 물을 계속적으로 공급하였다. 그 후 Inflater의 돌발용수 차폐능력과 분할에 따른 단위시간당 누수량, 수압, 축방향 변위 그리고 Inflater



(a) 1-Cell inflater



(b) 2-Cell inflater



(c) 4-Cell inflater

Table 3. Test cases

Case	Model inflater	Air pressure
1	1-Cell inflater	0.1 bar
2	1-Cell inflater	0.15 bar
3	2-Cell inflater	0.1 bar
4	2-Cell inflater	0.15 bar
5	4-Cell inflater	0.1 bar
6	4-Cell inflater	0.15 bar

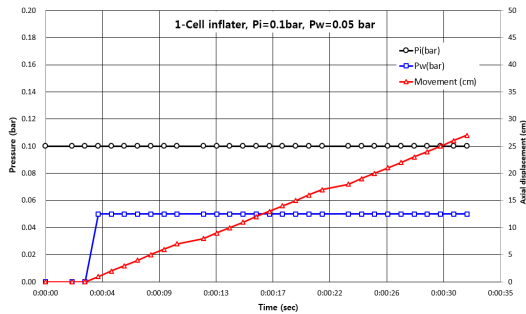
Fig. 5. Types of multi-cell inflaters

내부공기압을 측정하였다.

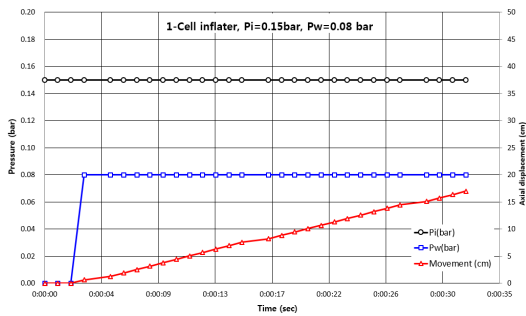
2.4 실험 결과

2.4.1 원형 Inflater

Fig. 6은 철도모형터널 내에서 원형 Inflater에 공기압 주입기를 이용해 내부 공기압을 0.1 bar, 0.15 bar로 주었을 때 시간당 수압, 축방향 변위의 결과 그래프이다. Inflater 내부 공기압을 $P_i = 0.1$ bar로 주었을 때 Inflater에 작용하는 수압은 $P_w = 0.05$ bar로 측정 되었으며 축방향 변위는 모형 터널 내 물이 가득 차기 시작한 시점부터 실험 종료 될 때까지 일정하게 증가되어 최종적으로 27 cm 이동하였다. 내부 공기압을 $P_i = 0.15$ bar로 주었을 때 Inflater에 작용하는 수압은 $P_w = 0.08$ bar로 측정 되었으며 축방향 변위 또한 일정하게 증가하여 최종적으로 17 cm 이동하였다.



(a) $P_i = 0.1$ bar

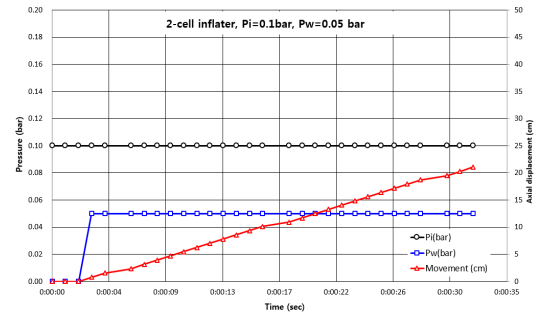


(b) $P_i = 0.15$ bar

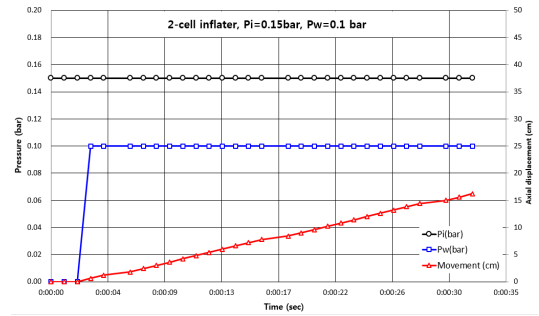
Fig. 6. Water pressure & axial displacement with time for 1-cell inflater

2.4.2 2분할 Inflater

Fig. 7은 철도모형터널 내에서 2분할 Inflater에 공기압주입기를 이용해 내부 공기압을 0.1 bar, 0.15 bar로 주었을 때 시간당 수압, 축방향 변위의 결과 그래프이다. Inflater 내부 공기압을 $P_i = 0.1$ bar로 주었을 때 Inflater에 작용하는 수압은 $P_w = 0.05$ bar로 측정 되었으며 축방향는 모형 터널 내 물이 가득 차기 시작한 시점부터 실험종료 될 때까지 일정하게 증가되어 최종적으로 21 cm 이동하였다. 내부 공기압을 $P_i = 0.15$ bar로 주었을 때 Inflater에 작용하는 수압은 $P_w = 0.1$ bar로 측정 되었으며 축방향 변위 또한 일정하게 증가하여 최종적으로 16 cm 이동하였다. 주어진 조건 내에서는 Inflater의 변위속도가 급격하게 상승하는 경우는 없었다.



(a) $P_i = 0.1$ bar



(b) $P_i = 0.15$ bar

Fig. 7. Water pressure & axial displacement with time for 2-cell inflater

2.4.3 4분할 Inflater

Fig. 8은 철도모형터널 내에서 4분할 Inflater에 공기압주입기를 이용해 내부 공기압을 0.1 bar, 0.15 bar로 주었을 때 시간당 수압, 축방향 변위의 결과 그래프이다. Inflater 내부 공기압을 $P_i = 0.15$ bar로 주었을 때 Inflater에 작용하는 수압은 $P_w = 0.09$ bar로 측정 되었으며 축방향 변위는 모형 터널 내 물이 가득 차기 시작한 시점부터 실험 종료 될 때까지 일정하게 변위가 증가되어 최종적으로 30 cm 이동하였다. 내부 공기압을 $P_i = 0.1$ bar로 주었을 때 Inflater에 작용하는 수압은 $P_w = 0.05$ bar로 측정 되었으며 축방향 변위는 또한 일정하게 증가하여 최종적으로 23 cm 이동하였다.

위의 결과를 토대로 2분할 Inflater가 원형과 4분할에 비하여 축방향 변위가 가장 작게 측정되었으며 이는 터널벽과의 밀착효과가 높다는 것을 의미한다. 또한 2분할 Inflater에서 내부공기압이 높을수록 더욱

더 효과적인 것으로 나타났다.

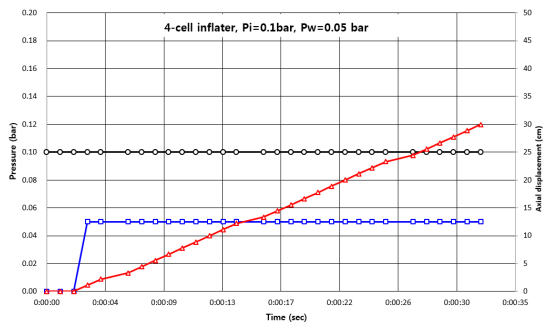
3. 결과 분석 및 고찰

3.1 누수현황 효과 분석

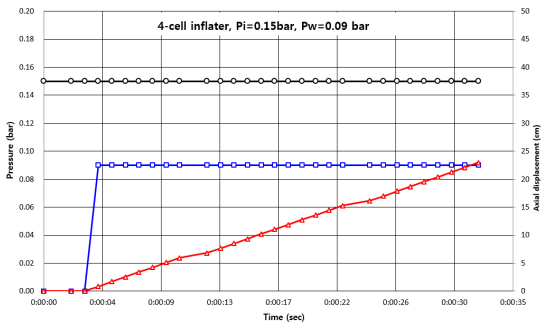
아크릴 수조에 들어있는 100L의 물을 수두차를 이용하여 모형터널로 흘려보내 철도 모형터널 내 Inflater를 관찰한 결과 3가지 형태의 Inflater 모두 철도 모형터널에 가득 채워졌지만 Fig. 5에서 보여주는 것과 같이 하부 슬라브 부분에서 누수개소가 관찰되었다. 특히 4분할 Inflater에서 가장 많은 누수개소가 관찰되었고 2분할 Inflater, 원형 Inflater 순으로 많은 누수개소가 관찰되었다. 2분할과 4분할 Inflater의 경우 각각 Inflater 맞닿는 부분에서 누수가 관찰 되었지만 누수개소의 크기가 작아 그 양이 미미한 것으로 측정되었으며 하부 슬라브 부분의 누수는 원형 Inflater보다 누수량이 현저히 감소 된 것을 볼 수 있었다. 실험결과를 비추어 보았을 때 궤도도상부분 또는 기타 터널내 설치되는 시설을 고려하여 Inflater 형상을 설계해야 할 것이다.

3.2 누수량 효과 분석

시간당 누수량에 대한 실험결과는 Fig 9에서 보이는 것과 같다. 철도터널을 모사한 모형 터널에 원형, 2분할, 4분할 Inflater를 설치하여 0.1 bar, 0.15 bar의



(a) $P_i = 0.1$ bar



(b) $P_i = 0.15$ bar

Fig. 8. Water pressure & axial displacement with time for 4-cell inflater

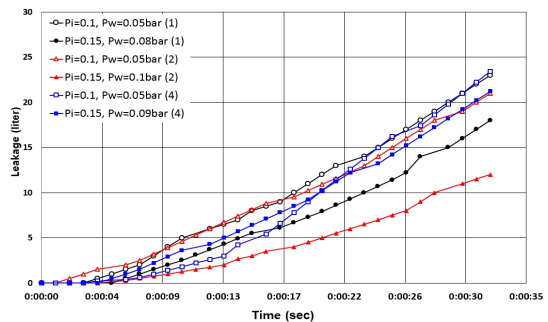


Fig. 9. Leakage with time

공기압을 주입하였을 때 터널 내 유입량에 따른 누수량을 비교 분석한 결과이다. 먼저 Inflater의 내부 공기압을 0.1 bar로 유지하였을 때 2분할 Inflater의 경우 $P_w = 0.5$ bar가 작용하였고 다른 분할형태에 비하여 누수량이 21 ℓ로 가장 적게 측정 되었다. 그리고 Inflater 내부 공기압을 0.15 bar로 유지하였을 때 역시 2분할 Inflater에 $P_w = 0.1$ bar가 작용하였으며 12 ℓ로 누수량이 가장 적게 나타났다. 시간당 누수량이 적을수록 효율적이기 때문에 2분할 Inflater가 다른 분할에 비해 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

3.3 축방향 변위 분석

Fig. 10은 단위 시간당 축방향 변위에 대한 실험결과로서 각 분할별 Inflater 내에 0.1 bar, 0.15 bar의 다른 공기압을 주입하고 비교분석하였다.

먼저 Inflater 내부 공기압을 0.1 bar로 유지하였을 때 2분할 Inflater의 경우 $P_w = 0.05$ bar가 작용하고 다른 분할 형태에 비하여 축방향 이동거리가 가장 적은 21 cm로 관찰되었다. 그리고 Inflater 내부 공기압을 0.15bar로 유지 하였을 때 2분할 Inflater에서 $P_w = 0.1$ bar가 작용하고 이 내부 압력에서도 축방향 이동거리가 16 cm로 가장 적게 나타났다. 이는 2분할의 경우가 터널벽체와 밀착효과가 크다는 것을 나타낸다. 즉, 축방향 이동거리가 적을수록 차폐효과는 유리하므로 축방향 변위에 있어서도 2분할 Inflater가

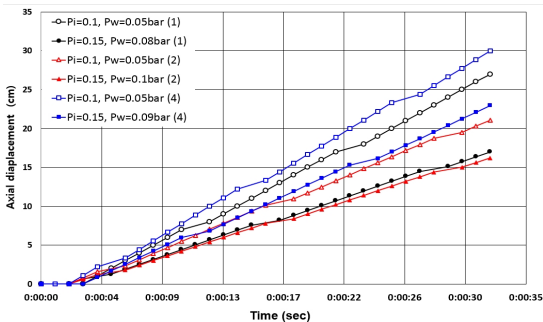


Fig. 10. Displacement graph of the time axis direction

다른 분할에 비해 차폐능력이 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

3.4 축방향 변위에 따른 누수량 분석

축방향 변위당 누수량에 대한 실험결과는 Fig. 11에서 보이는 것과 같다. 각 분할별 Inflater 내에 0.1 bar, 0.15 bar의 공기압을 주입하였다. 먼저 Inflater 내부 공기압을 0.1 bar로 유지하였을 때 2분할 Inflater에서 $P_w = 0.05$ bar가 작용하였고, 축방향 변위는 21 cm 이동하였으며 누수량이 21 ℓ로 다른 형태의 Inflater에 비하여 축방향 변위 및 누수량이 가장 적은 것으로 관찰되었다. 그리고 내부 공기압을 0.15 bar로 유지하였을 때 2분할 Inflater에 $P_w = 0.1$ bar가 작용하였고 축방향 변위가 16 cm에 누수량 12 ℓ로 이 공기압에서 또한 축방향 이동 및 누수량이 다른 분할형태에 비하여 가장 적게 나타났다. 위의 결과를 토대로 축방향 변위가 적으며 누수량이 적은 것은 2분할 Inflater가 종합적으로 판단하여 차폐능력이 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

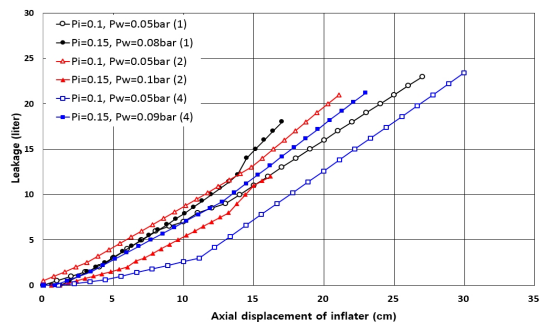


Fig. 11. Leakage vs. axial displacement

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 터널 내 돌발유수가 발생하였을 시 급속 팽창하여 사고 피해를 최소화 할 수 있는 Inflater 구조물에 대한 기초적 연구를 수행하였으며, 실제 터

널과 유사하게 제작된 실내모형실험을 실시하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실내모형실험을 통해 누수량 측정결과를 분석한 결과 Inflater를 2분할로 나누면 하부 슬라브 부분의 빈공간에 Inflater가 채워지면서 다른 분할에 비하여 누수개소로부터의 누수량이 적다. 그리고 원형에 Inflater를 이용하는 것보다 2분할 Inflater를 이용하는 것이 Inflater가 부풀어 오르는 시간을 단축시킬 수 있어 2분할 Inflater가 해저터널에 적합한 것으로 관측되었다. Inflater에 수압이 가해지면 압박으로 인해 전면부가 압축되며, 수압이 증가함에 따라 내부에 공기압이 가해지면서 Inflater의 측면이 팽창하여 복잡한 형상의 터널과의 부착효율이 높아져 Inflater의 마찰이 증가될 것이다. 수압의 영향으로 2분할 된 Inflater의 사이가 벌어질 것으로 예상하였지만 실험결과 Inflater 내부공기압이 서로 상승하여 터널 측면과의 빈 공간을 메워 누수를 제어함으로써 2분할 Inflater가 원형 Inflater보다 효과적으로 누수를 제어하는 것으로 나타났다.
2. 실내모형실험을 통해 축방향 변위 측정결과를 분석한 결과 Inflater 내부공기압을 증가할 경우 누수량 및 변위가 적게 나타났으며 원형, 2분할, 4분할 Inflater 중 2분할 Inflater의 경우 누수량과 축방향 변위가 가장 적게 나타나는 것을 알 수 있었다. 따라서 2분할 Inflater가 차폐효과가 유리하다고 판단되며 향후 설계시 고려되어야 할 것이다.
3. 향후 터널의 내부 실질적인 형상에 따른 Inflater 구조물의 마찰 메커니즘을 중점적으로 다룰 필요가 있다. 또한 Inflater 설계 시 적용하고자 하는 터널의 크기 및 형태에 따라 고려하여야 하여 다양한 터널 사고 시나리오를 적용한 실내모형실험 및 실험실 실험이 필요하고, Inflater의 재료 및 형태에 따른 차폐효과에 대한 실험적 연구가 필요

하다고 판단된다.

4. 이상과 같이 본 연구구결과는 해저터널 차폐시설 중 하나인 Inflater에 대한 분할효과에 대한 근본적인 연구로써 이결과를 통하여 향후 Inflater의 설계 및 개발기술 향상에 매우 유용하게 활용될 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발, 13건설연구T01)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Peter Kenyon (2012), "35,000 Gallons of prevention-containing a tunnel flood with an inflatable stopper", Tunnel talk
2. Kim, Y.I., Cho, S.K., Kim, D.H., Lee, D.H., Lee, I.M. (2003), "Protection measures against water hazards in construction of the subaqueous tunnel under the Han river in the Bundang railway", Korean society of civil engineers of conference, pp. 369-393.
3. Lee, C.R. (2014), "A fundamental study on Inflater structure to protect the tunnel damage due to flooding threats", Master's Thesis.
4. Shin, H.S. (2009), "Technology aspects of subsea tunnels", Korean Geo-Environmental Conference, pp. 147-157.
5. X. Martinez, J. Davalos, E. Barbero, E. Sosa, W. Huebsch, K. Means, L. Banta, G. Thompson (2012), "Inflatable plug for threat mitigation in transportation tunnels", Society for the Advancement of Material and Process Engineering 2012 Conference, Baltimore, MD.