

해저터널 급속차폐를 위한 팽창구조체의 마찰거동에 대한 연구

유광산¹ · 이지현² · 김연덕² · 김상환^{3*}

¹정회원, 유광건설 사장

²비회원, 호서대학교 토목공학과 석사과정

³정회원, 호서대학교 토목공학과 교수

Friction behaviour of inflatable structure system to protect rapidly flooding damages 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 is focused on the determination of friction parameter which is a predominant factor in the design of inflatable structure system. This inflatable structure system is very valuably used to protect passively and rapidly the possibilities of tunnel damages by flooding threats and unusual leakage to be occurred during and after underground infrastructure construction. In particular, this system should be necessary in subsea tunnel. This study presents the experimental results obtained from the relative friction characteristics tests of the fabric materials that constitute the inflatable structure. In order to evaluate the relative friction behaviour of the inflatable structure system, friction tests and scaled model tunnel friction tests are carried out. The friction tests are carried out to determine the friction coefficient for different surface conditions between tunnel and inflatable structure. These friction coefficients are then evaluated and compared with the result obtained from the model tunnel friction tests. Interaction behaviours between tunnel and system are also reviewed and described in this study. The results clearly show that the friction coefficients derived from scaled model slippage tests are about 12% lower than values obtained from the friction tests. In addition, this study will be necessary to verify the real friction behaviour with prototype tests before applying in practice.

Keywords: Inflatable structure system, Subsea tunnel, Friction test, Scaled model Slippage test

초 록: 본 연구는 팽창구조체 설계에서 중요한 인자인 마찰계수의 결정에 대하여 중점을 두었다. 팽창구조체는 지중 구조물 의 시공 및 운영 시 발생하는 돌발용수 및 이상누수에 의한 사고들에 대비한 많은 가치가 있는 수동적 급속차폐시스템이다. 특히 해저터널 에 있어서는 필수적이라고 할 수 있다. 본 연구는 팽창구조체를 구성하는 섬유재료의 상대적인 마찰거동에 대한 결과를 제시하였다. 이러한 마찰거동을 평가하기 위하여 마찰실험과 모형터널마찰실험을 실시하였다. 마찰시험으로부터 서로 다른 표면 조건에서 마찰계 수를 결정하였으며, 이 결과로 얻어진 마찰계수는 실질적인 모형 미끄럼시험 결과를 통하여 분석 비교하였다. 이 둘 결과로부터 터널과 팽창구조체 상호 마찰거동에 대하여 검토하였다. 이 연구 결과로부터 모형터널마찰실험으로부터 얻어진 마찰계수 값은 실내 마찰시험으로부터 얻은 마찰계수 값보다 약 12%작게 나타났다.

주요어: 팽창구조체, 해저터널, 마찰 실험, 모형터널마찰시험

*Corresponding author: Sang-Hwan Kim

E-mail: kimsh@hoseo.edu

Received January 18, 2016; Revised January 26, 2016;

Accepted January 28, 2016

1. 서론

대한민국의 인구 밀집도는 세계에서 면적이 1만 km²를 넘는 나라들 중 방글라데시, 대만에 이어 세계 3위이며, 국토의 2/3이 산악지형이면서 3면이 바다로 둘러싸인 국토가 매우 좁은 반도 국가이다. 이러한 지형적으로 불리한 조건을 가진 문제의 해결방안으로 대규모 지하공간의 건설, 지형적으로 불리한 조건을 극복하기 위한 사회간접시설의 지하화 등을 들 수 있으며 또한 선박을 이용하거나 육지와 섬, 섬과 섬 사이에 교량을 건설하는 대표적인 방법을 이용해왔다.

우리나라와는 달리 일찍이 건설기술이 발전한 노르웨이, 일본, 영국, 미국 등의 선진국에서는 친환경 녹색성장 기술 중 하나인 육상물류터널로서 기술적, 경제적인 파급효과가 매우 우수한 해저터널을 이미 1980년대부터 연구 및 건설이 활발히 이루어지고 있다. 또한 그와 관련된 해저터널 프로젝트 및 건설이 점점 증가하고 있다. 한편 국내에는 아직 해저터널의 건설 및 연구가 매우 부족할 뿐만 아니라 해저터널에 관련된 방수 대책 연구와 방재에 대비한 해저터널 시설물에 관련된 연구는 전무한 실정이다. 그러나 최근 범국가간의 교류 및 협력 증대를 위해 대륙간 또는 국가간을 연결하는 접근성 확보에 해저터널이 매우 중요하기 때문에 정부를 중심으로 해저터널 관련 기술개발을 추진하고 있다.

이러한 해저터널은 육상터널과 여러 가지 면에서 커다란 차이가 있다. 사업지역이 바닷물로 덮여있어 특수한 조사기술들이 적용되어야 하며 조사결과의 해석에는 육상터널보다 더 많은 불확실성이 존재한다(Shin, 2006).

특히 해저 시설물 건설에 있어서 해저터널의 시공 및 운영 중 누수, 침수, 테러(폭발 등)에 따른 돌발 용수 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

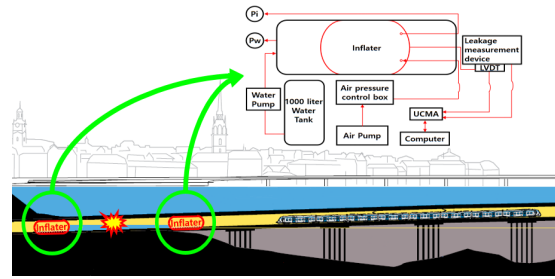


Fig. 1. Plan view of the rapid protection system used for testing

후에도 구조물 전체에 구조적인 안정성에 큰 위험을 초래할 수 있다.

따라서 해저터널 내에 팽창구조물을 터널벽면에 설치하게 되면, 폭발 등의 사고에 의해 시공 중 안정성과 완공 후 구조물 전체의 구조적 안정성에 문제를 일으키는 위험을 방지할 수 있을 뿐만 아니라 터널 내 인원들이 피난경로로 대피하는 시간을 증가시켜줄 수 있다. 그러므로 Fig. 1과 같은 시스템의 연구를 통해 급속차폐시스템을 개발하여 물적, 인적 자원의 피해를 최소화 시킬 필요가 있다(Yoo, 2015).

따라서 이 연구는 팽창구조체의 설계인자 중 매우 중요한 마찰계수에 대하여 마찰시험으로부터 얻은 마찰계수 값과 모형실험으로부터 얻어진 마찰계수 값을 비교하여, 실질적으로 팽창구조체 설계시 주요 설계인자인 마찰계수의 작용값을 제안하였다. 또한 팽창구조체와 터널과의 상호 마찰거동에 대하여서도 분석하였다.

2. 급속차폐시스템

2.1 개요

터널 시공 및 운영시 갑작스런 용수 및 이상 유입수가 유입되었을 때 팽창구조체가 터널 내 제한된 공간을 폐쇄시켜 유입수를 제어해 안전한 피난경로로 대피하는 시간을 늘려줄 수 있으며, 돌발용수에 효과적으로 대응할 수 있다. 급속차폐시스템은 방수문에 비해 순수설비 공사비 및 추가 공사비가 1/10로 저렴하

여 경제성 확보가 가능하고 유지관리 및 보수가 편리하다. 그리고 가벼운 소재로 만들어져 이동성 및 터널 형상의 주요 변경을 필요로 하지 않으므로 인적 및 물적 자원 등을 보호 할 수 있다. 이러한 급속차폐 시스템은 터널의 안정성 및 신뢰성을 향상시킬 수 있어 유입수를 제어하기 위해 사용되었던 여러 기존의 장치보다 매력적인 대안이 되고 있다.

실제 터널 크기의 급속차폐시스템을 제작 및 실험하기에는 연구적으로 많은 부분의 제약이 있다. 따라서 Scale factor 적용 및 터널의 조도(Roughness)를 고려한 모형실험을 실시해 터널벽면의 조도에 따른 팽창구조체 차폐효율 분석이 필요하다. 기본적인 팽창구조체의 기능은 터널 내 과도한 이상 유입수를 제어하여 터널 내 인적, 물적 피해를 최소화시키고 터널을 보호하는 역할을 수행하는 것이다. 따라서 팽창구조체는 터널의 급속차폐를 위해 고안된 설비구조물로 육상터널에 비해 정확실성이 많은 해저터널이라는 특성에 대하여 중요한 시스템이다.

기존연구에서 실내모형실험 했던 아크릴 모형터널은 팽창구조체와 아크릴 벽면과의 마찰력이 작아 정확한 차폐효율을 분석할 수 없었다(Yoo, 2015). 따라서 본 연구에서는 터널 벽면과의 조도에 따른 차폐효율을 분석하기 위해 마찰 실험기를 제작하였으며 실제 터널 벽면과 팽창구조체의 마찰력에 따른 차폐효율을 분석하기 위해 콘크리트 시편을 제작하였다. 그리고 2-Cell 팽창구조체의 경우 팽창구조체끼리 맞닿는 부분의 마찰력과 터널 벽면과 맞닿는 부분의 마찰력이 달라 차폐효율에 영향을 줄 수 있어 나일론 시편을 제작하였다. 그 외 에폭시 페인트 시편 및 마찰 테이프 시편은 팽창구조체와 터널 벽면과 맞닿는 부분의 마찰력이 크거나 작을 경우 어떠한 차폐효율을 보이는지 분석하기 위해 추가적으로 제작하여 총 4가지의 시편으로 실험 및 분석하였다. 그리고 기존 연구와는 달리 벽면의 조도를 고려한 콘크리트 흡관을 사용하여 실제 터널과 유사한 조건을 가진 모형터널과 실험 장비를 제작하였다. 팽창구조체로 모형터널(콘크리트)

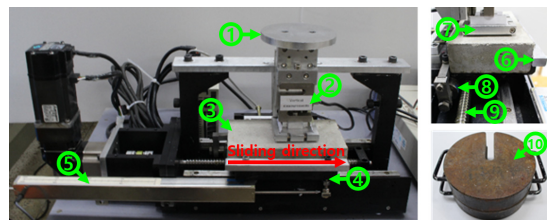
터널)에서의 차폐효율과 팽창구조체의 미끄러질 때 공기압과 수압을 얻기 위한 실험을 실시하였다. 이러한 시험결과들로부터 팽창구조체와 터널과 상호 마찰거동 뿐 만 아니라 마찰시험으로부터 얻은 마찰계수 값과 모형실험으로부터 얻어진 마찰계수 값을 비교하여 실질적으로 팽창구조체 설계시 주요 설계인자인 마찰계수의 작용값을 제안하였다.

3. 팽창구조체 재료 마찰 실험

3.1 실험장비

이 연구에서 마찰시험을 위하여 제작한 마찰시험장치는 Fig. 2와 같다.

축방향 이동은 Fig. 2의 (1)로, 시편의 고정은 (6)으로, 실험에 쓰일 섬유는 (7)에 고정하였다. 수직력과 수평력은 Fig. 2의 (2), (8)로 측정하였다. 실험 시 각종 제어와 계측은 Fig. 3에서 보여주는 것과 같이



(1) Weight holder for implementation of normal force, (2) Load cell, (3) Sliding specimen, (4) Sliding plate, (5) LVDT, (6) Plate lip, (7) Fabric holding fixture, (8) Load cell, (9) Linear actuator for implementation of horizontal force, (10) Normal weight

Fig. 2. Mechanical components of friction machine



Data logger, Data logger software

Fig. 3. Data acquisition device (left), Data acquisition system program (right)

전용제어 시스템과 프로그램을 이용하여 모든 측정값을 관리하였다.

3.2 실험 방법

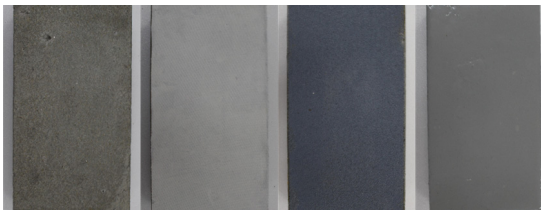
이 실험은 팽창구조체와 해저터널 벽면의 조도 차이에 따른 마찰계수를 구하기 위해 Fig. 4와 같이 4종류의 시편을 제작하였다.

Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 (2)에 해당되는 부분은 터널의 규모가 커서 팽창구조체를 2개로 분할하여 (2-cell) 적용할 경우로 팽창구조체간의 마찰거동을 측정할 수 있도록 시편을 추가로 제작하였다.

그 외의 마찰 테이프 시편과 에폭시 페인트 시편은 팽창구조체가 팽창할 경우 터널 벽면과의 조도보다 마찰력이 높거나 낮을 경우의 마찰계수를 분석하기 위해 제작하였다.

이와 같이 터널벽면과의 마찰계수의 차이에 의한 마찰거동에 대한 실험과정을 설명하면 다음과 같다.

4종류의 시편은 17.5 cm × 10 cm 크기로 움직이지 않도록 고정되어있는 Sliding plate를 3 cm/min의 일



(a) Concrete (b) Nylon (c) Friction tape (d) Epoxy

Fig. 4. Test materials of specimen

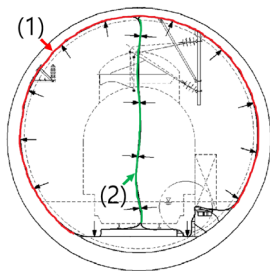


Fig. 5. 2-Cell inflator

Table 1. Test cases

Case	Specimen		Normal force (N)	Contact area (cm ²)	No. of specimens
	Sliding	Fixed			
1	Concrete	Nylon fabric	137.2	25	5
2			274.4	25	5
3	Nylon		137.2	25	5
4			274.4	25	5
5	Friction tape		137.2	25	5
6			274.4	25	5
7	Epoxy paint		137.2	25	5
8			274.4	25	5

정한 속도로 축방향 이동시켰으며, 이때 5 cm × 5 cm 크기의 고정된 나일론 섬유에 수직력을 137.2와 274.4 N으로 가해 각각 실험을 진행하였다. 이때 고정된 나일론 섬유에 가해지는 수직력이 정확한지 확인하기 위해 중간에 로드셀을 부착하여 측정하였으며 고정된 나일론 섬유가 시편에 잘 맞닿지 않으면 편마찰로 인해 정확할 실험 결과가 분석되지 않으므로 고정된 나일론 섬유와 시편이 잘 맞닿는지 확인하였다. 그리고 Sliding plate가 움직이는 축방향 이동거리는 LVDT를 이용하여 측정하였고 실험 시간은 축방향 이동하는 시편의 이동하는 거리를 고려하여 100초로 결정하였다.

상기 마찰실험을 위한 시편들로부터 실시한 실험조건들을 정리하면 Table 1과 같다.

3.3 실험결과

3.3.1 Concrete-Nylon

Fig. 6은 콘크리트 시편에 수직력 137.2, 274.4 N 조건에 대한 마찰실험 결과를 분석하여 변위발생에 따른 마찰계수 변화를 나타내는 결과이다. 이 결과로부터 수직력을 작게 한 경우가 크게 한 경우보다 더 큰 마찰계수를 갖는 것으로 나타났다. 그리고 초기보다 20~50 mm 이동할 때 마찰계수는 일정한 값을 유지하였다. 이 실험으로부터 얻은 마찰계수의 값은

0.79~0.86의 범위이며, 평균 마찰계수는 0.83인 것으로 나타났다.

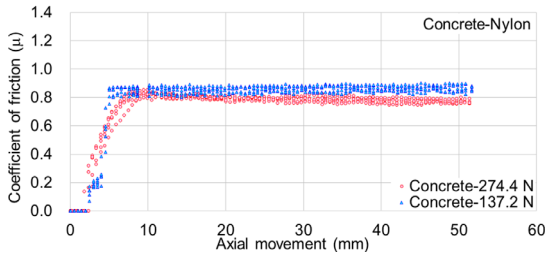


Fig. 6. Concrete-Nylon friction test [N=137.2, 274.4 N]

3.3.2 Nylon-Nylon

Fig. 7은 나일론 시편에 수직력을 137.2, 274.4 N 조건에 대한 마찰실험 결과를 분석하여, 변위발생에 따른 마찰계수 변화를 나타내는 결과이다. 이 결과로부터 수직력을 작게 한 경우가 크게 한 경우보다 더 큰 마찰계수를 갖는 것으로 나타났다. 그리고 초기보다 20~50 mm 이동할 때 마찰계수는 일정한 값을 유지하였다. 이 실험으로부터 얻은 마찰계수의 값은 0.55~0.61의 범위이며, 평균 마찰계수는 0.58인 것으로 나타났다.

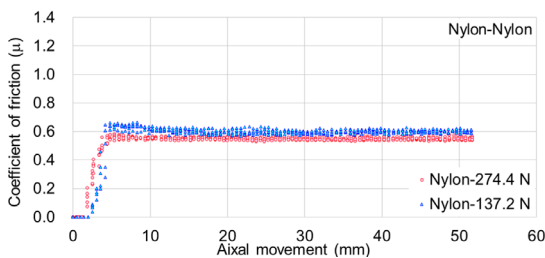


Fig. 7. Nylon-Nylon friction test [N=137.2, 274.4 N]

3.3.3 Friction tape-Nylon

Fig. 8은 마찰 테이프 시편에 수직력을 137.2, 274.4 N 조건에 대한 마찰실험 결과를 분석하여 변위발생에 따른 마찰계수 변화를 나타내는 결과이다. 이 결과로부터 수직력 137.2 N의 경우 4.48 mm 이동하였을 때 1.302의 최대 마찰계수를 보여 주었으며, 274.4 N의 경우 7.18 mm 이동하였을 때 1.062의 최대 마찰

계수를 보여주었다. 또한 수직력을 작게 한 경우가 크게 한 경우보다 더 큰 마찰계수를 갖는 것으로 나타났다. 그리고 초기보다 40~50 mm 이동할 때 마찰계수는 일정한 값을 유지하였다. 이 실험으로부터 얻은 마찰계수의 값은 0.91~0.97의 범위이며, 평균 마찰계수는 0.94인 것으로 나타났다.

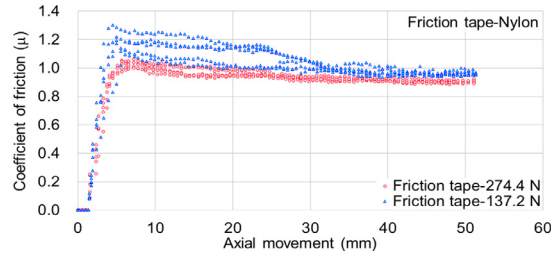


Fig. 8. Friction tape-Nylon friction test [N=137.2, 274.4 N]

3.3.4 Epoxy coating-Nylon

Fig. 9는 에폭시 페인트 시편에 수직력을 137.2, 274.4 N 조건에 대한 마찰실험 결과를 분석하여 변위 발생에 따른 마찰계수 변화를 나타내는 결과이다. 이 결과에서는 수직력의 크기에 따라 마찰계수의 변화는 작게 나타났다. 그리고 초기보다 20~50 mm 이동할 때 마찰계수는 일정한 값을 유지하였다. 이 실험으로부터 얻은 마찰계수의 값은 0.3~0.32의 범위이며, 평균 마찰계수는 0.31인 것으로 나타났다.

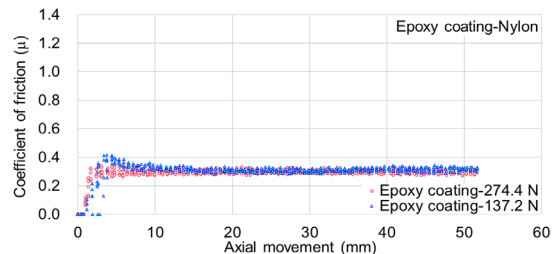


Fig. 9. Epoxy coating-Nylon friction test [N=137.2, 274.4 N]

3.3.5 마찰계수 비교 분석

상기와 같이 4종류의 시편에 137.2, 274.4 N 2가지의 수직력을 주고 진행한 마찰실험 결과들을 통계적으로 분석하여 요약하면 Table 2와 같이 정리할 수 있다.

Table 2. Summary of testing results

Specimen	Normal force [N]	Peak horizontal force		Individual friction coefficient [μ]	Average friction coefficient [μ]
		Average [N]	Std. Dev.		
Concrete	137.2	117.89	0.05	0.86	0.83
	274.4	216.09	0.25	0.79	
Nylon	137.2	83.10	0.06	0.61	0.58
	274.4	151.12	0.08	0.55	
Friction tape	137.2	132.69	0.07	0.97	0.94
	274.4	249.80	0.08	0.91	
Epoxy	137.2	43.22	0.08	0.32	0.31
	274.4	82.22	0.1	0.3	

이러한 결과를 통하여 각 조건별 실험결과들로부터 마찰계수를 비교 하여 나타내면 Fig. 10과 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 10에서 보여주는 것과 같이 4가지의 시편 중에 마찰 테이프 시편의 경우 평균 마찰계수가 0.97로 가장 높게 나타났으며, 에폭시 페인트 시편에서 0.32로 가장 낮은 평균 마찰계수를 보여주었다. 그리고 모든 경우 마찰계수들은 수직력의 크기가 클 경우가 작을 경우보다 작은 경향을 보여 주었다.

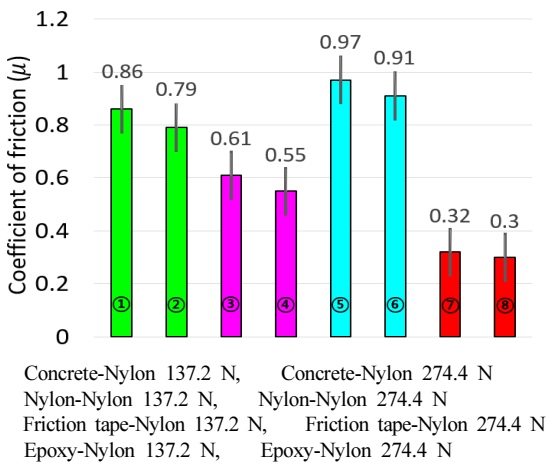


Fig. 10. Each specimen normal force level

4. 팽창구조체 설계 시 마찰계수 적용

팽창구조체의 설계는 상기 마찰실험으로부터 얻어 마찰계수를 통하여 적용하여야 하나 실질적으로는 다음과 같은 영향으로 실험결과를 직접적으로 사용하는 것은 문제가 있을 수 있다.

- 팽창구조체 재료의 휨강성에 따른 터널접촉면적의 변화의 영향
- 팽창구조체가 팽창시 정확한 형상유지의 어려운 터널형성에 대한 영향
- 터널내부의 시설물의 간섭에 의한 영향
- 터널내부의 이물질 또는 유입수에 대한 영향

따라서 팽창구조체 설계인자로 마찰계수에 대하여서는 상기의 영향에 따라 식 (1)과 같이 마찰영향계수를 적용하여 보정 사용되어야 할 것이다.

$$\mu' = \alpha \mu \quad (1)$$

여기서 $\alpha = f(F_{EI}, F_s, F_f, F_w)$ 는 마찰영향계수로 F_{EI} 는 팽창구조체의 휨강성 영향인자, F_s 는 터널 모서리 형상에 대한 영향인자, F_f 는 터널내부 시설물에 대한 영향인자, 그리고 F_w 는 터널내부의 이물질 또는 표면의 습기 및 물에 의한 영향인자들에 의하여 결정 계수이다.

이 장에서는 이러한 영향계수의 적용에 대한 일반적인 경향을 알아보기 위하여 팽창구조체 재료에 대한 마찰실험에서 얻은 마찰계수와 팽창구조체 모형마찰실험으로부터 얻어진 마찰계수들을 상호비교 분석하여 설계 시 일반적으로 고려해야 할 영향계수와 마찰거동에 대하여 제시하였다.

모형마찰실험을 위하여 모형 팽창구조체를 설계, 제작하고 모형터널(D=300 mm)에서 실질적으로 실험을 실시하였다. 이 실험은 영향계수의 경향을 검증하는 실험으로 터널벽체가 콘크리트이고 팽창구조체가 나일론인 경우에 대하여서만 실시하였다.

팽창구조체 모형마찰시험에 대하여 설명하면 다음과 같다.

4.1 실험장비

팽창구조체 재료에 대한 마찰시험으로부터 얻어진 마찰계수의 설계 시 적용을 평가하기 위하여 팽창구조체 모형마찰시험을 실시하였다.

Fig. 11은 급속차폐시스템인 팽창구조체 축소모형 미끄럼시험 전경 및 주요 구성요소를 나타낸 것이다.

모형터널에는 유입되는 물의 수압을 측정하기 위하여 수압계를 설치하였고, 터널 내 팽창구조체의 내부 공기압을 측정하기 위한 공압계를 연결하였다. 또한 수압을 가하기 위한 펌프를 설치하였으며 팽창구조체의 축방향 변위를 측정하기 위해서 LVDT를 설치하였다. 팽창구조체의 내부 압력은 공기압 조절 시스템을 이용하여 일정 압력을 유지시켰다. 모형실험을 통하여 팽창구조체 내부 공기압, 축방향 변위 등을 측정하고 데이터 로거를 사용하여 측정값을 데이터화 하였다. 실제터널조건을 모사하기 위하여 모형 터널 내부는 터널내부 시설물을 고려한 단면형상으로 제작하였다. 특히 모형실험에 사용된 팽창구조체의 외경은 팽창효과를 발휘하도록 모형터널직경, 300 mm 보다 약 10% 증가시켜 직경 320 mm로하고 팽창구조체의 길이도 팽창구조체의 1.5D (480 mm)로 설계 제작하였다. 모형실험에 이용된 팽창구조체는 Fig. 12와 같다.

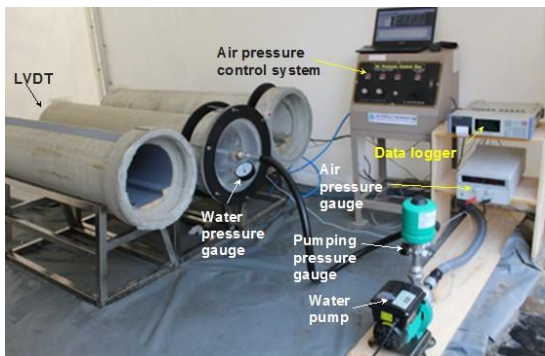


Fig. 11. Model friction test equipment

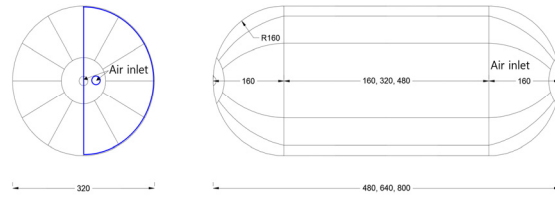


Fig. 12. Inflater general dimensions (1.5D, 2D, 2.5D)

4.2 실험방법

모형실험방법은 우선 팽창구조체를 터널 내에 넣어 30 kPa의 압력을 유지하도록 공기압 조절 시스템으로 조절하여 일정하게 주입하였다. 팽창구조체 내부 공기압은 공압계로부터 측정하고 확인하였다. 그리고 유입수로 인한 팽창구조체의 축방향 변위를 측정하기 위해 LVDT를 팽창구조체에 연결하였으며 수압을 측정하기 위해 모형터널 후면에 수압계를 설치하였다. 마지막으로 펌프를 이용하여 물을 팽창구조체 후면에 가득 채우는 것으로 팽창구조체 모형 미끄럼 시험을 위한 준비를 끝냈다. 그 후 구조팽창체 배면에 수압을 증가에 따른 팽창구조체의 이동을 동시에 측정하였다. 이 연구의 경우 모형실험은 일반적인 터널 표면조건인 콘크리트 경우에 대하여 5회 반복 실험을 실시하였다.

4.3 실험결과

상기 실험방법에 따라 모형 콘크리트 터널에서 모형 팽창구조체를 이용하여 5회에 걸친 실험을 실시하여 팽창구조체의 내부공기압, 터널에 가해진 수압 및 시간당 축방향 변위를 측정하고 분석하였다. 실험 결과들을 통계적으로 분석하여 대표적인 결과를 나타내면 Fig. 13과 같다.

이 결과로부터 팽창구조체의 내부공기압력이 30 kPa를 유지하고 터널의 수압을 증가시켰을 때 급격하게 축방향 변위가 증가하는 지점의 수압은 65 kPa로 나타났다. 이러한 결과에 따라 이론적으로 모형터널에서의 마찰계수를 예측하면 실질적으로 실내시험결

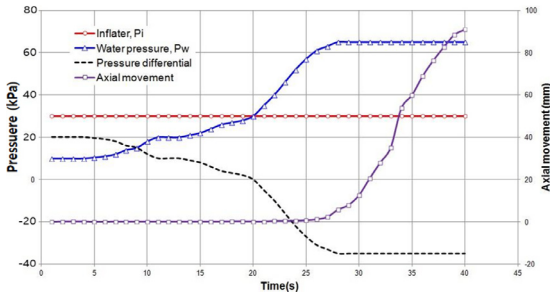


Fig. 13. Model tunnel friction test results

과보다 크게 나타나게 된다. 그러나 앞에서 설명한 마찰영향계수(α)의 인자들을 모형실험 시 관찰된 결과로부터 고려하여 유도해 보면 Table 3과 마찰계수는 실내마찰시험결과와 비교해 볼 때 작게 나타나게 된다.

이 결과로부터 팽창구조체 설계 시 재료마찰시험으로부터 얻은 마찰계수보다는 작게 적용하여야 하며, 이 연구로부터 일반적인 콘크리트 라이닝 터널에

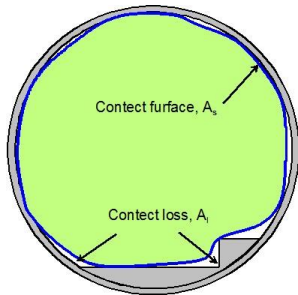


Fig. 14. Contact surface ratio

Table 3. Shows the investigation result dring model tunnel friction test

Items	Values	Remarks
Model Tunnel Dia.	30 cm	
Effective tunnel section area	671.4 cm ²	
Effective tunnel section perimeter	28 cm	
Ratio of contact surface	50 %	from Fig. 14
Derived friction coefficient, μ'	0.73	
Material friction coefficient, μ	0.83	from Table 2
Friction influence coefficient, α	0.88	

나일론 팽창구조체를 적용할 경우 약 12%작게 적용하는 것이 적절할 것으로 나타났다. 따라서 향후 재료별 재료에 대한 마찰시험으로부터 얻은 마찰계수는 설계 적용 시 마찰영향계수를 고려하여 적용되어야 할 것이다.

5. 결론 및 제언

본 연구에서는 터널 시공 및 운영 시 갑작스런 용수 및 이상 유입수가 유입되었을 때 유입수를 감지하여 급속 자동 팽창하여 터널 내 제한된 공간을 차폐시켜 사고로 인한 물적, 인적 피해를 최소화 할 수 있는 팽창구조체의 설계를 위한 기초적인 연구이다. 팽창구조체의 설계인자 중 매우 중요한 마찰계수에 대하여 마찰시험으로부터 얻은 마찰계수 값과 모형실험으로부터 얻어진 마찰계수 값을 비교하여 실질적으로 팽창구조체 설계시 주요 설계인자인 마찰계수의 작용 값을 제안하였다. 또한 팽창구조체와 터널과의 상호 마찰거동에 대하여서도 분석하였다. 이 연구를 위하여 마찰시험기와 모형 터널마찰시험장치를 제작하고 실험 및 분석하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 팽창구조체를 구성하는 재료와 터널 벽면의 조건에 따른 마찰실험을 실시하여 각 조건에 따른 마찰계수를 선정하여 제시하였다. 마찰계수는 연직응력이 클 경우 작을 경우보다 작게 얻어졌다. 마찰계수의 경우 마찰 테이프의 경우 0.94로 가장 크게 나타났다. 이러한 결과로부터 팽창구조체 설계시 재료와 터널 벽면의 개량 등을 고려하여 경제적인 설계를 유도할 수 있을 것으로 판단되었다.
2. 터널모형 마찰실험에서는 터널의 벽면이 콘크리트이고 나일론재질 팽창구조체의 경우 모형터널 마찰실험에 얻어진 마찰계수는 재료의 마찰실험에서 얻어진 마찰계수보다 약 12% 정도 작게 나타났다. 따라서 재료적인 마찰실험으로 얻은 마찰계수를 설계시에는 마찰영향계수를 고려하여 적용

- 되어야 할 것으로 판단되었다. 또한 설계 시 팽창구조체의 재료와 터널벽체의 조건에 따른 마찰영향 계수를 산정하여 설계에 적용하여야 할 것이다.
- 향후 팽창구조체의 재료에 대한 장기적인 내구성 해결을 위해서 기존의 외피 위에 다른 재질의 외피를 혼용하여 마찰력을 높여 차폐효율을 증가시키는 기술개발이 요구된다. 또한 강한 마찰력에도 손상이 적은 외피의 개발이 요구된다.

감사의 글

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

References

- Barbero, E.J., Sosa, E.M., Martinez, X., Gutierrez, J.M. (2013), "Reliability design methodology for confined high pressure inflatable structures", *Engineering Structures*.
- Kim, N.Y., "Subsea tunnel research trends for the maximization of the national transportation network hub", *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, pp. 38-42.
- Lee, C.R. (2014), "A fundamental study on inflator structure to protect the tunnel damage due to flooding threats", Master's Thesis.
- Martinez, X., Davalos, J., Barbero, E., Sosa, E., Huebsch, W., Means, K., Banta, L., Thompson, G. (2012), "Inflatable plug for threat mitigation in transportation tunnels", *Society for the Advancement of Material and Process Engineering 2012 Conference*, Baltimore, MD.
- Park, S.H., An, S.J., Han, S.J., Yoo, Y.H. (2015), "Simulation study of smoke spread prevention using air curtain system in rescue station platform of undersea tunnel", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, pp. 257-266.
- Park, U.S., Shin, H.S., Hong, E.S. (2007), "Trends of Investigation and Design for Subsea Tunnels", *Journal of Korean Society of civil engineers*, pp. 29-41.
- Shin, H.S. (2009), "Technology aspects of subsea tunnels", *Korean Geo-Environmental Conference*, pp. 147-157.
- Shin, H.S., Park, U.S. (2006), "Design trend analysis over the case of a foreign subsea tunnel", *Korean Society for Rock Mechanics Conference*, pp. 184-193.
- Sill, J.J., Means, K.H., Sosa, E.M., Barbero, E.J. (2013), "Friction and leakage characteristics of confined, reduced-scale inflatable structures", *VI International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures*.
- Sosa, E.M., Thompson, G.J., Barbero E.J. (2014), "Testing of full-scale inflatable plug for flood mitigation in tunnels", *VI International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures*.
- Sosa, E.M., Thompson, G.J., Barbero, E.J., Ghosh, S., Peil, K.L. (2014), "Friction characteristics of confined inflatable structures", *Friction-a springerpen journal* Vol. 2, No. 4, pp. 365-390.
- Yoo, K.S., Lee, J.H., Kim, Y.D., Kim, S.H., "Model testing of leakage effect due to multi-cell inflator of rapid protection system in subsea tunnel", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, pp. 295-303.