

말뚝 부마찰력 저감용 역청재료의 유변학적 특성

Rheological Properties of Bitumen for Reducing Negative Skin Friction

박 태 순*¹ Park, Tae-Soon

윤 수 진*² Yoon, Soo-Jin

Abstract

This paper presents the rheological properties of bitumen for reducing negative skin friction. The bitumen has been widely used due to both the cost and construction effectiveness. Also, it is well known that the use of bitumen for reducing negative skin friction renders the best results among other available methods. Three different modified bitumens were used for the testing programs. The physical tests include the penetration, the softening point and penetration index. The rheological tests include phase angle, complex modulus, creep tests and flow tests. The tests were conducted at four different temperatures(15, 30, 45 and 60°C) in order to simulate the field condition. The test results were analyzed using the phase angle, $G^*/\sin \delta$, creep compliance and shear viscosity. The result of tests showed that the phase angle increased and $G^*/\sin \delta$ decreased with the increase of temperature. The creep compliance increased as the loading time increased. The difference of the creep compliance is detected as the time and temperature are varied, however, the difference of the shear viscosity is not significant among the samples tested in this study. The rheological properties of the bitumen also showed that the physical testing method and the temperature dependant testing method are somewhat limited to showing and expressing the full rheological properties of the modified bitumen. The introduction of the time and the temperature dependent testing method is necessary to find out the full rheological properties of the modified bitumen.

요 지

본 연구는 말뚝 부마찰력 저감용으로 사용하는 역청재료의 유변학적 특성을 분석한 결과이다. 역청재료는 효과적으로 부마찰력을 저감시키고 경제적인 장점으로 인하여 말뚝의 부마찰력 저감 공법으로 사용하여 왔다. 본 연구에서는 세 종류의 말뚝용 역청재료를 선택하여 비교 시험을 실시하였다. 물리적 특성시험으로는 침입도 시험, 연화점 시험 및 침입도 지수를 실시하였으며 유변학적 시험으로는 동적전단 유동기를 사용하여 위상각, 복합계수, 크리프시험 및 흐름시험을 시험온도 15, 30, 45 및 60°C에서 수행하였다. 시험 결과는 역청재료의 유변학적 특성을 나타내는 위상각, $G^*/\sin \delta$, 크리프 컴플라이언스 및 전단점도로 분석하여 상호 비교하였다. 시험 결과 온도와 위상각은 비례관계를 나타냈으며 $G^*/\sin \delta$ 는 반비례 관계를 보였다. 또한, 크리프 컴플라이언스는 하중시간이 증가함에 따라 증가하여 역청재료가 시간의 변화에 따라 점성유체로 작용하는 것으로 나타났다. 크리프시험으로 인한 시간 및 온도의 변화는 크리프 컴플라이언스 값을 크게 변화 시켰으나 전단점도의 변화는 그다지 심하게 나타나지 않아서 말뚝 역청재료의 평가에는 크리프 컴플라이언스를 측정 할 수 있는 크리프시험이 적절한 것으로 평가되었다. 본 연구에서 유변학적 시험을 실시한 결과 물리적 시험으로부터 분석할 수 없는 온도와 시간의 변화에 따른 역청재료의 특성변화를 상세하게 분석할 수 있었는데 이러한 시험 결과는 말뚝용 역청재료의 선정에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

Keywords : Creep compliance, Modified bitumen, Negative skin friction, Rheological property, Shear viscosity

*1 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 교수 (Members, Prof., Dept. of Civil Engrg. Seoul National Univ. of Technology, tpark@snut.ac.kr)

*2 정회원, 서울산업대학교 대학원 석사과정 (Members, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg. Seoul National Univ. of Technology)

1. 서론

국토 면적이 협소한 우리나라에서는 국가 경쟁력을 제고하고 수출 산업의 확대를 위하여 임해 공업단지 조성을 오래 전부터 추진 건설하여 왔다. 임해 공업단지의 건설은 주로 해안매립을 통하여 수행되어 왔는데 해안 매립지반의 경우 기초형식은 말뚝기초가 가장 보편적으로 채택되고 있다. 통상 말뚝기초 설계에 있어서 지지력이 가장 중요한 고려사항인데 해안매립지 같은 연약 지반이 존재하는 경우에는 부마찰력이 주로 설계하중의 주요 결정요소가 되는 경우도 있다.

부마찰력은 연약 압밀층 상부에 매립한 성토하중으로 인해 연약 압밀층이 장시간에 걸쳐 압밀침하 함으로써 말뚝의 변위보다 큰 값의 지반 하향 변이를 일으킴에 따라 말뚝에 걸리는 하향력(downdrag)을 의미한다. 이런 말뚝기초의 부마찰력 문제를 해결하기 위한 방법 중에 가장 보편적으로 지금까지 사용해온 방법은 말뚝 표면에 역청재료를 도장하는 방법이다. 이는 부마찰력이 발생하는 중립점 상부의 말뚝에 역청재료를 도장하여 지반이 침하 하더라도 말뚝체에는 마찰력이 작게 걸리도록 하는 방법으로 Bjerrum(1969)등에 의해서 본격적으로 연구되었으며 부마찰력을 최대 1/50정도까지 감소할 수 있는 것으로 보고되고 있다.

역청재료가 도장되어있는 말뚝에서는 지반이 침하함에 따라 일부 부마찰력이 발생하게 되는데 하중은 장시간에 걸쳐서 역청재료에 재하 되기 때문에 역청재료는 점성 유체로 거동하며 말뚝 설계 시에는 이 같은 부마찰력을 하중으로 취급하여야 한다. 부마찰력은 온도와 시간 및 재하속도에 영향을 받는 역청재료와 함수관계에 있으며 역청재료가 도장된 말뚝의 경우 생산, 저장, 운반 및 항타까지의 과정을 거치면서 다양한 온도 영역을 거치기 때문에 역청재료의 유변학적 특성을 고려한 시험결과는 올바른 역청재료의 선정에 매우 중요한 절차이나 지금까지는 주로 생산 메이커의 공급에만 의존하여 왔다.

부마찰력 저감용 역청재료는 외관상으로 재료의 양부 선정이 어려울 뿐만 아니라 그 품질도 일반적인 물리 시험방법으로는 차이점을 선별하기 어렵고 온도의 변화와 하중 작용 시간에 따라 역학적 성질이 변화하는 점탄성 특성을 지니고 있는 재료이기 때문에 도로포장용 역청재료와 마찬가지로 다양한 범위의 온도 변화와 하중 조건을 경험하게 된다.

본 연구에서는 말뚝용 역청재료에 온도의 변화와 하

중 작용시간을 고려한 점탄성 특성을 분석할 수 있는 유변학적 시험을 실시하여 역청재료의 종류에 따라 말뚝용 역청재료도 서로 다르게 거동할 수 있다는 사실을 실험적으로 분석하였다.

2. 부마찰력

2.1 정의

선단지지말뚝이 포화된 점토층을 관통하여 지지층에 박혀 있는 경우에는 포화된 점토층 위에 새로운 성토를 하거나 지하수위가 저하됨으로써 점토층에 압밀침하가 발생하고 침하가 발생한 지층은 말뚝에 대해서 하향의 마찰력을 유발시키게 된다. 이러한 마찰력은 상향의 마찰력과는 반대로 말뚝에 재하되는 하중으로 작용하게 되며 이를 부마찰력(negative skin friction)이라 한다(그림 1 참조).

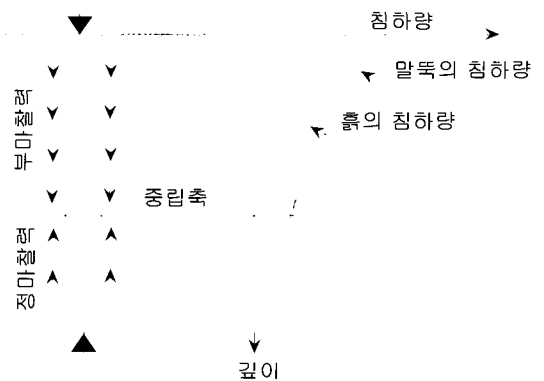


그림 1. 부마찰력의 정의(Briaud 와 Tucker,1997)

압축성이 있는 채움흙이나 압밀 중인 흙속에 관입되어 있는 말뚝의 경우 마찰력은 저항력이 상향으로 작용하나, 지반침하가 생기면 중립점 깊이 까지는 지반의 침하가 말뚝의 침하보다도 커지기 때문에 그 범위에서는 마찰력이 하향으로 작용한다. 이 상향과 하향의 마찰력을 구별하여, 상향을 정마찰력이라 하고, 하향을 부마찰력이라 하는데 하향력(downdrag)을 발생시키는 중요한 원인이 된다.

2.2 부마찰력 저감법

하향력(downdrag)현상은 연약지반의 침하현상에 의해 발생하며 주로 지표면에서 하중으로 작용하는 뒷채움 흙이나 과재하중으로 인한 것과, 지반층 자체의 압

밀, 말뚝 자체의 압밀, 지하수위의 저하, 동결된 흙의 해빙 등이 원인이 된다. 하향력을 줄일 수 있는 부마찰력 저감법은 다음과 같은 것들이 알려져 있다.

- (1) 선행하중을 미리 가해 지반 침하를 감소시키는 방법
- (2) 말뚝이나 주변 지반사이에 케이싱을 사용하여 직접적인 접촉을 피하는 방법
- (3) 전기 삼투압을 이용하여 말뚝주변에 물막이 층을 만드는 방법
- (4) 마찰을 감소시킬 수 있는 재료를 가지고 말뚝을 도장(coating)하는 방법
- (5) 말뚝 자체의 군효과(group effect)를 이용하는 방법

이러한 방법들 가운데 최근에는 말뚝에 역청재료를 도장하는 방법이 가장 널리 쓰이고 있으며 그 효과도 매우 큰 것으로 증명되었다. Bjerrum 외 2인(1969)이 본격적인 연구를 시작하여 Claesson과 Horvat(1974), Baligh 외 2인(1978), Clemente(1981) 그리고 Shibata 외 2인(1982)에 의한 시험결과 부마찰력의 저감효과는 80~90% 정도가 되는 것을 입증하였다. 그 이유는 역청재료가 말뚝 주변흙의 침하에 대하여 점착력을 가진 미끄럼층으로 작용했기 때문이라고 설명하고 있다.

그림 2는 역청재료를 도장한 말뚝의 부마찰력 발생 형태를 나타낸 것으로 실질적으로 부마찰력이 크게 감소하며 침하량과 하중에 대한 축력도 많이 감소하는 것을 알 수 있다.

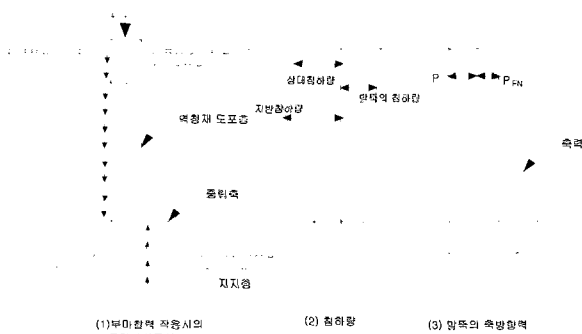


그림 2. 역청재료를 도장한 말뚝의 발생 형태

3. 역청재료의 유변학적 특성

3.1 역청재료의 정의

역청재료는 원어로는 비투멘(bitumen)으로 표기되는

단어으로써 아스팔트(asphalt)와 타르(tar)를 모두 포함하고 있는데, 이 두 재료는 서로 다른 재료이다. 아스팔트는 천연 아스팔트와 원유 아스팔트로 크게 나누어 질 수 있다. 천연 아스팔트는 호수의 바다, 고생대의 지층에서 동식물의 잔해가 지각의 변동과 오랜 시간동안 분해되어 자연적으로 생성된 아스팔트로 현재는 강상관 교량 포장에 원유 아스팔트를 첨가하여 방수층에 사용하거나 소성변형과 같은 포장 파손을 방지하기 위하여 첨가제로 사용되고 있다. 원유 아스팔트는 원유의 건류과정에 생산되는 부산물로서 현재 도로 포장용으로 사용되고 있는 아스팔트이다. 한편, 타르는 석탄의 건류 과정에서 발생하는 부산물로서 온도에 대한 변화가 심하여 원유 아스팔트의 등장 이후 현재는 도로 포장용으로는 거의 사용되지 않고 옥외 주차장 방수 표면처리, 지붕재료 등 극히 일부에 사용되고 있다. 말뚝 부마찰력 저감용 역청재료는 원유 아스팔트가 주재료로 사용되고 있으며 말뚝의 특성을 고려하여 도로 포장용 아스팔트와는 다른 화학 첨가물을 혼합한 개질(改質) 아스팔트를 사용하고 있다. 본 논문에서는 개질 아스팔트를 넓은 의미와 그 동안 지반공학자들이 사용해온 용어와 혼동을 피하기 위하여 역청재료로 표기하기로 한다.

3.2 점탄성 특성

역청재료는 물론 역청재료를 사용하여 제조된 복합재료는 온도와 하중작용시간(load frequency)에 크게 영향을 받는다. 따라서 역청재료의 역학적 성질은 현장에서 경험하게 되는 모든 온도와 하중 작용시간 영역의 조건들로부터 결정되어야 한다. 복합전단계수는 지속적으로 전단작용을 받는 조건하에서 재료가 가지고 있는 변형에 대한 전단저항력으로 탄성 및 점성의 두 부분으로 구성되며 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$G^* = G'(\omega) \sin \omega t + G''(\omega) \cos \omega t \quad (1)$$

여기서, G^* 는 복합전단계수로 불리는 역청재료의 특성이고, G' 는 저장계수, G'' 은 손실계수로 정의하고 있다. G' 과 G'' 의 비율이 $\tan \delta$ 이며 위상각(δ)이 작을수록 역청재료는 탄성거동을 하며, 이때 역청재료는 영구변형에 대한 저항성이 커진다. 또한 일정한 응력 하에서 수학적으로 하중주기 당 소산되는 일의 양(W)을 다음과 같이 표현할 수 있다(Bahia와 Anderson,1995).

$$W_c = \pi \times \sigma_o^2 \left[\frac{1}{G^* / \sin \delta} \right] \quad (2)$$

여기서, W_c : 매 하중주기에 분산된 일 양
 σ_o : 하중 재하에 적용된 응력
 G^* : 복합전단계수
 δ : 위상각

식 (2)는 하중주기 당 소산되는 일의 양이 $G^* / \sin \delta$ 와 반비례 관계가 있다는 것을 보여주는 방정식이다. 소산되는 일의 양은 δ 가 감소하거나 G^* 의 상승과 반비례 관계가 성립한다. G^* 의 증가는 역청재료의 강성이 커짐을 의미하고 δ 의 감소는 역청재료의 탄성이 커지는 것을 의미하기 때문에 고온 상태에서 변형에 대한 저항성이 커지게 된다. 따라서, 본 연구에서는 복합전단계수와 위상각의 조합의 $G^* / \sin \delta$ 를 산출하여 온도에 따른 역청재료의 점탄성 특성을 분석하였다.

3.3 크리프 컴플라이언스(Creep compliance)

말뚝에 도장된 역청재료 층은 온도의 변화와 하중 작용시간 변화에 따라 유변학적 특성을 보이게 된다. 탄성 거동 시에는 재하 시간이 짧고 변형이 작은 경우 역청재료의 전단강도는 지반의 전단강도보다 크게 된다. 반면 재하 시간이 길고 변형이 클 경우 역청재료의 전단강도는 지반의 전단강도보다 작게 되어 역청재료와 지반 사이에 지반 침하현상이 나타나게 된다(정 외2인,1996). 역청재료의 도장에 의한 부마찰력 감소 메커니즘은 역청재료-지반 사이에서의 전단거동과 크리프 컴플라이언스를 파악함으로써 가능한데 역청재료의 거동과 관련된 크리프 컴플라이언스는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$J(t) = \frac{\dot{\epsilon}}{\tau} \quad (3)$$

여기서, $J(t)$ = 크리프 컴플라이언스
 $\dot{\epsilon}$ = 전단 변형률
 τ = 전단 응력

식 (3)에서 크리프 컴플라이언스는 시간의 변화에 따라 변화하는 거동 특성에 의해 식 (4)와 같이 영역에 따라 세분할 수 있다.

$$J(t) = J_o + J_r(t) + J_n(t) \quad (4)$$

여기서, J_o = 순간 컴플라이언스
 $J_r(t)$ = 점탄성 컴플라이언스
 $J_n(t)$ = 완전 점성 컴플라이언스

또한, 말뚝 표면에 도장된 두께(h)에 작용하는 전단응력(τ)은 식 (5)와 같다.

$$\tau = G \times \frac{d}{h} = \frac{dS}{3h} \quad (5)$$

여기서, τ = 전단응력(N/m²)
 h = 도장된 역청재료의 두께(m)
 d = 지반의 침하량 (m)
 G = 도장층의 전단계수(N/m²)
 S = 도장된 역청재료의 스티프니스 계수(N/m²)= 2(1+ μ)G
 μ = 포아송비(0.5사용)

스티프니스와 크리프 컴플라이언스는 $S = \frac{1}{J(t)}$ 의 관계이므로 식 (3), (4) 그리고 (5)를 이용하여 전단응력과 크리프 컴플라이언스를 식 (6)으로 표현할 수 있다.

$$\tau = \frac{\dot{\epsilon}}{J_o + J_r(t) + J_n(t)} \cdot \frac{d}{h} \quad (6)$$

따라서 점탄성 특성을 가지는 역청재료의 전단응력을 구하기 위해서는 식 (6)에서의 크리프 컴플라이언스 $J(t)$ 가 중요한 인자가 된다.

3.4 시간-온도 중첩원리

특정 온도에서 하중이 작용하는 역청재료의 거동을 분석하는데 매우 오랜 시간이 소요된다. 실험적으로 측정할 수 있는 시간이 한정되어 있기 때문에 장기간의 역청재료의 거동을 분석하기 위해서 저온부터 고온까지의 온도에서 단시간 시험을 실시하여 그 결과를 하나의 기준온도로 중첩을 시키는 원리를 이용한다. 이 원리를 적용하여 작성된 역청재료의 거동에 대한 그래프를 마스터 곡선(master curve)이라고 한다. 그림 3은 각 온도에서 실시한 시험 결과를 하나의 마스터 곡선으로 작성한 그래프의 예이다. 역청재료는 낮은 온도에서는 장시간 하중 재하 효과를 높은 온도에서는 단시간 하중 재하 효과를 얻을 수 있으며 온도 보정 계수 값을 얻을 수 있기 때문에 시간-온도 중첩원리가 적용 가능하다.

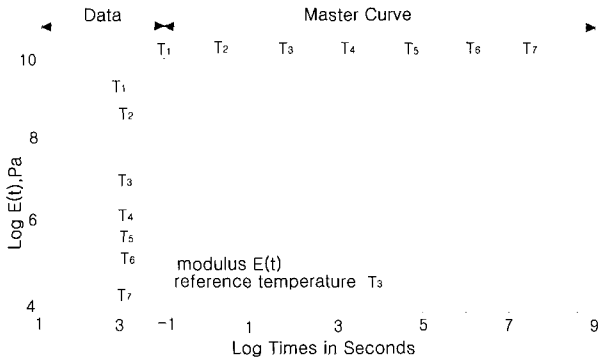


그림 3. 마스터 곡선 예(Aklonis와 Macknight,1983)

이 원리를 이용하여 본 연구에서는 크리프시험과 흐름 시험을 실시한 후 시간과 하중조건을 재현하여 말뚝용 역청재료에 대한 전체적 거동특성을 분석하였다.

3.5 점도(Viscosity)

지반 침하에 의해서 말뚝에 발생하는 부마찰력은 하중이 되어 장기간에 걸쳐 말뚝에 재하되므로 역청재료는 이러한 재하 하중으로 인해 시간의 흐름에 따라 점성 유체로 거동하게 된다. 점성유체의 거동은 일반적으로 식 (7)과 같이 정의될 수 있다.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (7)$$

여기서, τ = 전단응력

η = 점도

$\dot{\gamma}$ = 전단 변형률

전단변형률($\dot{\gamma}$)이 증가할 때 점도(η)는 감소하게 된다. 그림 4에서 알 수 있듯이 역청재료는 비선형의 점성 재료이기 때문이다. 점도는 유체흐름의 저항치로 나타내어지며 단위는 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 로 표현된다. 점도는 역청재료의 상수는 아니지만 점도가 큰 재료는 높은 전단응력을 가지며, 전단변형률과 온도에 영향을 받게된다. 그림 4의 윗 그림에서 보듯이 일정한 온도에서 점도가 증가하면 전단변형률은 감소하는 것을 볼 수 있다. 물론 전단변형률이 증가함에 따라 전단응력도 증가할 수는 있으나 비율 즉, 점도는 감소한다. 그림 4의 아래 그림에서는 온도가 증가함에 따른 전단변형률과 전단응력의 관계를 보여주는 것으로 주어진 전단변형률에 대해 온도가 증가할수록 점도가 감소한다는 것을 나타내고 있다.

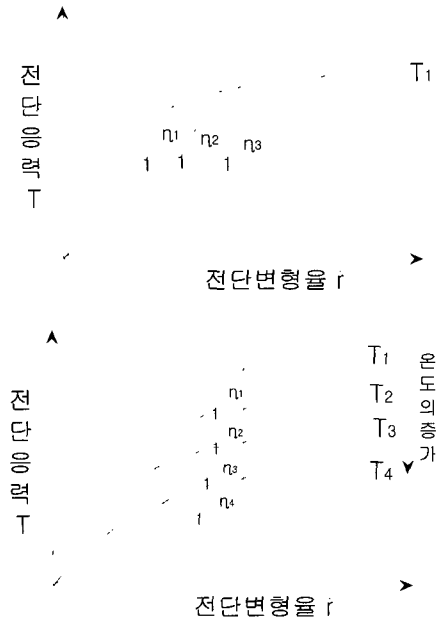


그림 4. 점도에 대한 전단변형률($\dot{\gamma}$)과 온도의 영향(Briaud,1997)

4. 유변학적 특성시험 및 결과 분석

4.1 역청재료의 선정 기준

역청재료의 등급과 품질확인을 위해서 실시되는 현행 시험방법으로 침입도 시험과 점도 시험이 있다. 그림 5는 25℃에서의 침입도 시험과 60℃에서 점도시험(절대점도)그리고 135℃에서의 점도시험(동점도)을 수행하여 역청재료의 온도변화에 대한 민감성을 나타낸 것이다. 그림 5에서 보인 세 종류의 역청재료는 모두 지방규정에 합격한 상태이지만 전체 온도영역에서 보면 매우 다른 특성을 보이고 있다. 역청재료 1과 역청재료 3

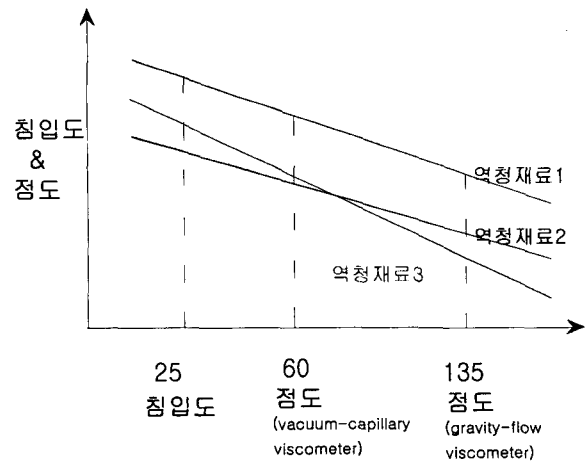


그림 5. 역청재료의 온도 민감성(Asphalt Institute,1995)

은 저온에서는 동일한 특성과 안정성을 보이거나 고온에서는 서로 다른 성질을 나타낸다. 따라서 단지 한 온도로 규정되어 있는 침입도 시험(25℃)과 점도시험(60℃)은 저온에서부터 고온까지의 전반적인 온도특성을 파악하기가 어려움으로 역청재료의 품질과 성능을 판단하기에는 부적합하다.

4.2 시험재료

본 연구에서는 국내에서 생산되고 있는 말뚝용 역청재료 2종류(기호명: sample A 및 sample B)와 일본에서 생산된 말뚝용 역청재료 1종류(기호명: sample C)를 수집하여 시험을 실시하였다. 최근 생산되고 있는 말뚝용 역청재료는 온도 변화에 대한 민감성 저감과 내구성 증대를 위하여 원유 아스팔트에 고무계통의 열가소성 탄성중합체인 SBS(styrene-butadiene-styrene block co-polymer)와 같은 고분자(polymer) 개질재(modifier)를 첨가하고 메이커에서 개발한 화학첨가제를 사용하여 말뚝 부마찰력 저감용 역청재료로 사용하고 있다. 이러한 고분자 아스팔트는 온도 변화에 대한 저항성이 우수하고 장기간의 하중 작용에도 변형이 작게 발생하기 때문에 최근 도로 포장용으로 많이 사용되고 있는 실정이다.

역청재료의 물리적 특성 시험을 위해서 침입도 시험(KS M 2252)과 연화점 시험(KS M 2250)을 실시하였으며 침입도와 연화점으로부터 침입도지수(penetration index, PI)를 구하여 온도에 대한 민감성을 분석하였다. 표 1은 각각의 시료들에 대한 물리적 성질을 정리한 것이다.

표 1. 샘플에 대한 물성시험 결과

샘플	침입도 25℃, 0.1mm	연화점 ℃	PI
sample A	41	73	3.6
sample B	31	77	2.7
sample C	40	79	2.8

표 1의 물성 시험결과로부터 sample B가 다른 역청재료에 비하여 단단한 재료라는 것을 알 수 있으나 연화점은 세 재료 모두 비슷한 결과를 보이고 있다. 도로포장용 일반 아스팔트의 경우 PI의 범위는 -1 과 1 사이이고 -2 이하 일 경우 온도 변화에 매우 민감한 아스팔트로 취급하고 있다. 시험 결과에서 나타난 것처럼 말뚝용 역청재료는 개질 효과로 인하여 이 범위를 벗어나고 있어서 PI로는 역청재료의 성능을 구분하기는 어렵다.

4.3 유변학적 특성 시험 방법

역청재료의 유변학적 특성을 측정하기 위하여 사진 1의 독일 Physica사의 동적전단유동기(dynamic shear rheometer, DSR)를 사용하였다. 동적전단유동기(dynamic shear rheometer, DSR)는 다양한 점탄성 재료특성을 시험할 수 있는 시험장비이다.

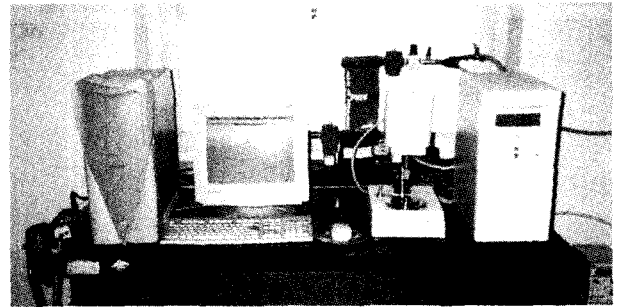


사진 1. 동적전단유동기(dynamic shear rheometer, DSR)

(1) 복합전단계수 및 위상각 측정 시험

본 연구에서는 복합전단계수(European Commission Directorate General Transport, 1999)를 결정하는데 사용되는 시험은 식 (8)에서처럼 주파수 Fr 또는 각속도 ω 를 가진 sinusoidal 비틀림과 힘 $F(t)$ 를 시편에 가하여 온도별로 실시하여 역청재료의 위상각(δ)과 온도에 대한 공용인자인 $G^*/\sin \delta$ 을 측정하였다. 시험은 20, 40, 60 및 80℃에서 실시하여 온도 변화에 따른 복합전단계수와 위상각의 변화를 비교 분석하였다.

$$F(t) = F_0 \sin(\omega t) = 2\pi Fr \quad (8)$$

여기서, $F(t)$: 시편에 가해지는 힘

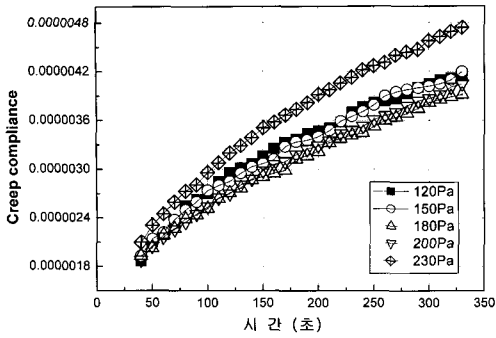
F_0 : 초기의 힘

ω : 각속도

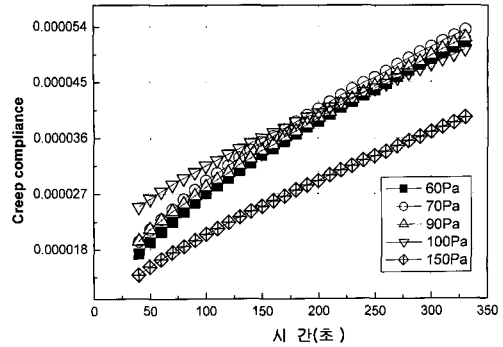
Fr : 주파수

(2) 크리프시험(Creep test)

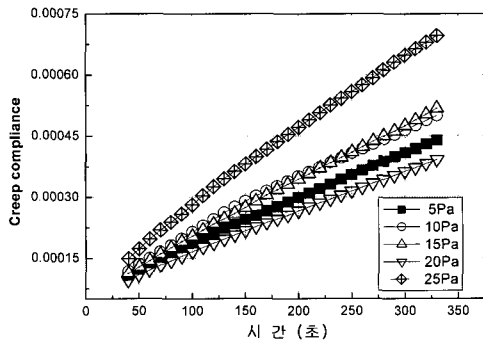
크리프시험은 일정한 원력을 가하면서 시간의 변화에 따라 역청재료에서 나타나는 변형을 측정하고 응력과 변형의 관계로부터 크리프 컴플라이언스(creep compliance)를 구할 수 있다. 크리프시험에서는 우선 각각의 시험 온도에 대하여 시험하중을 변화시키면서 그 역청재료가 가지고 있는 선형점탄성 영역을 구한 후 선형점탄성 영역내의 응력 범위에서 시험을 실시한다. 역청재료는



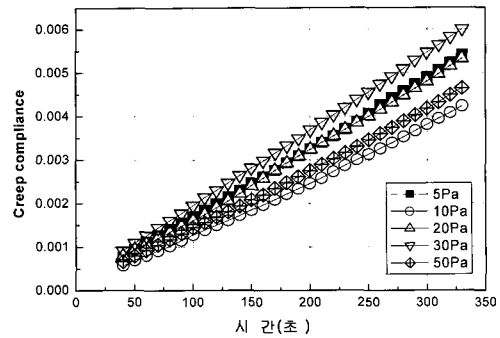
15°C에서의 선형점탄성 영역



30°C에서의 선형점탄성 영역



45°C에서의 선형점탄성 영역



60°C에서의 선형점탄성 영역

그림 6. 선형점탄성 영역의 하중조건시험

점탄성 재료이기 때문에 점성과 탄성을 지니고 있는 범위 내에서 시험을 실시하여 그 재료가 지니고 있는 고유의 특성을 분석할 수 있는데 선형점탄성 영역이란 응력과 변형이 선형관계를 이루고 있는 영역으로 시험전 이 영역을 찾아내는 것은 매우 중요하다. 그림 6은 선형점탄성 영역의 하중조건을 보여주고 있다. 그림 6에서 볼 수 있는 것처럼 15°C, 30°C 및 45°C에서는 크리프 컴플라이언스가 응력의 변화에 대하여 거의 일정한 값을 보이다가 어느 순간 응력을 증가시킬 경우 크리프 컴플라이언스 값의 차이가 발생하는 것을 볼 수 있는데 이로부터 선형점탄성 영역을 구할 수 있다. 본 연구에서 사용한 세 시료의 선형점탄성 영역은 온도별로 차이를 보이고 있으나 재료별로는 크게 차이를 보이지 않았다. 한편, 60°C에서는 온도가 고온화 됨에 따라 점성이 지배적이므로 비선형거동을 보여 선형점탄성 영역을 구할 수 없었으며 그 결과도 많은 오차를 발생시키기 때문에

표 2. 선형점탄성 영역의 하중조건

온도(°C)	선형 점탄성 영역의 하중(Pa)
15	200
30	100
45	20

크리프시험은 60°C를 제외한 세 온도에서 실시하였다. 각각의 온도에서 구한 선형점탄성 영역의 하중조건은 표 2와 같다. 표 2에서 볼 수 있는 것처럼 시험 온도가 상승함에 따라 선형점탄성 영역의 하중 값은 감소하고 있는데 이는 역청재료가 온도 상승에 의해 점성유체화되어 간다는 것을 실험적으로 알 수 있는 결과이다.

또한 크리프시험을 실시한 후 시간-온도 중첩원리를 적용하여 저온에서 고온까지의 광범위한 마스터 곡선으로부터 실제로 환경 적인 조건들을 고려한 역청재료의 성능을 비교하였다.

(3) 흐름시험(Flow test)

점도시험은 역청재료의 점성을 측정하기 위해 사용되어 오던 전형적인 시험법으로 일반적으로 중력식 비스코메타(gravity-flow viscometer)와 진공식 비스코메타(vacuum-capillary viscometer)를 사용하고 있다. 이들 시험법은 ASTM D 2170, ASTM D 2171 그리고 ASTM D 3205에 서술되어 있는데, 이런 전형적인 점도시험의 한계는 단지 한 온도에 대한 점도 값만이 측정 가능하고 전단변형률 값을 알 수 없다는 것이다. 따라서 본 연구에서는 고분자의 연구에 기초적으로 사용되는 흐름시

험을 응용하여 지반 침하에 의해서 말뚝에 발생하는 부마찰력과 역청재료 간의 흐름거동을 모사 하였다. 본 연구에서는 전단변형률은 0.01(1/sec)~100(1/sec)으로 변화시켜 전단점도를 측정하였으며, 시험온도는 크리프시험과 동일하게 수행하였다.

4.4 유변학적 특성 시험 결과

(1) 복합전단계수 및 위상각

각 말뚝용 역청재료의 복합전단계수(G^*)와 위상각(δ)은 작용하중 주기와 온도에 따라 차이를 보였다. 저온에서는 그림 7에 보인 것처럼 탄성체와 같은 거동을 하나 고온에서는 점성유체로 거동하기 때문에 고온에서 $G^*/\sin \delta$ 값이 현저하게 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구에 사용된 역청재료 중 sample B는 위상각의 변화가 작은 동시에 $G^*/\sin \delta$ 의 값도 크게 나타나고 있어서 전단변형에 대한 높은 저항성이 예상된다. 참고로 일반 도로용 아스팔트인 경우 60℃에서 위상각은 70~80°, $G^*/\sin \delta$ 의 값은 1.5~3kPa을 나타낸다.

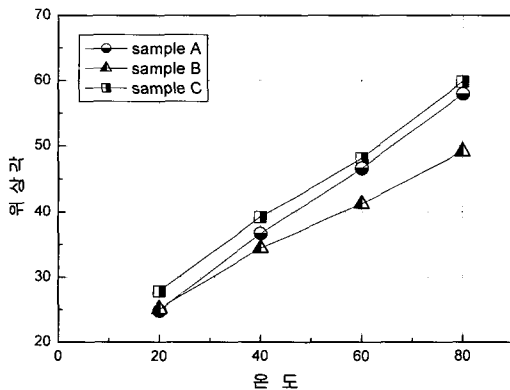
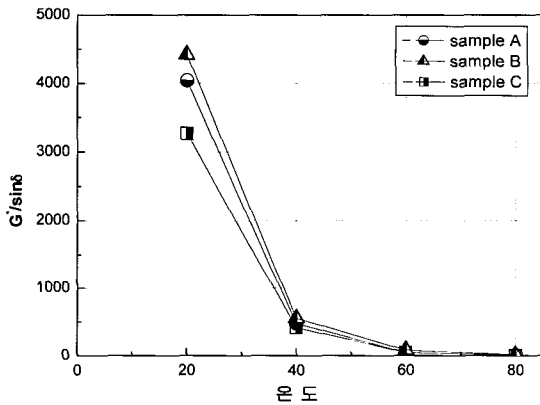


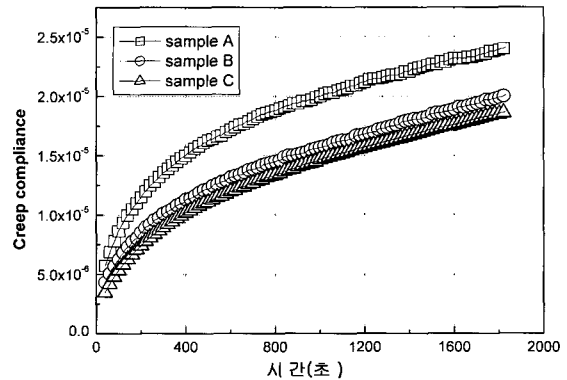
그림 7. 역청재료의 위상각과 $G^*/\sin \delta$

(2) 크리프시험

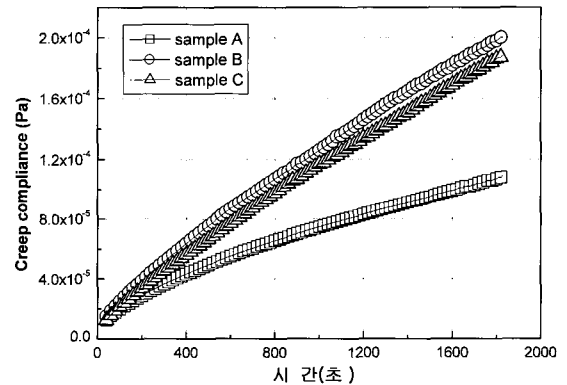
크리프 컴플라이언스는 강성의 역수로서 온도와 시

간의 변화에 따라 크리프 컴플라이언스 값의 변화가 작을수록 변형에 대한 저항성이 크다고 할 수 있다. 그림 8은 크리프 컴플라이언스 측정 결과이다.

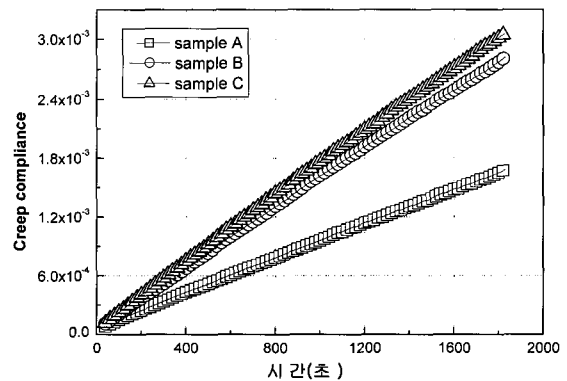
크리프시험의 경우 시간이 흐를수록 역청재료의 크리프 컴플라이언스는 증가하며, 고온에서는 거의 선형적인 거동특성을 나타내는 것으로 보아 역청재료에 점성 거동이 지배적임을 알 수 있다. 시험 결과 sample A의 경우 저온(15℃)에서는 다른 두 역청재료에 비하여 크리프 컴플라이언스가 크게 나타나고 고온(45℃ 및 60℃)에서는 작게 나타나서 강성이 매우 큰 재료임을 알 수 있다. 복합



30℃에서의 크리프시험



45℃에서의 크리프시험



60℃에서의 크리프시험

그림 8. 각 온도에서의 크리프 컴플라이언스

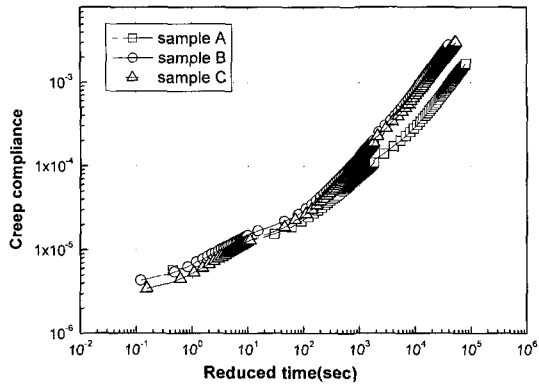


그림 9. 시간-온도 중첩원리를 이용한 마스터 곡선

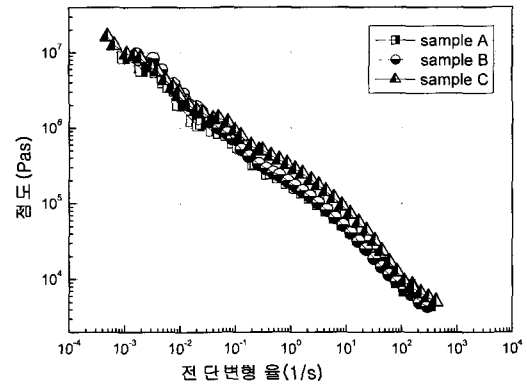
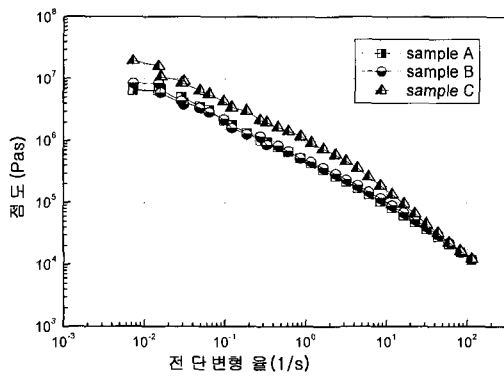


그림 11. 각 온도에서 흐름시험 마스터 곡선

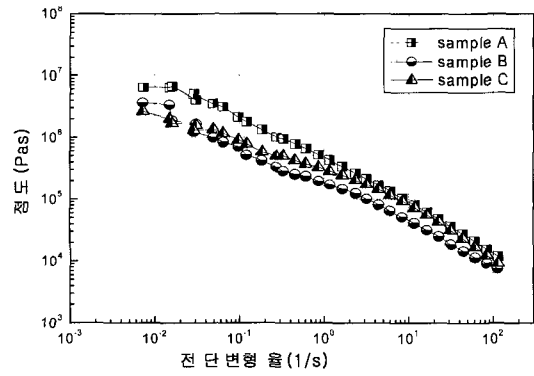
전단계수 및 위상각 측정 결과에서는 sample B가 탄성 복원력이 가장 우수한 것으로 나타났으나 이 시험 결과는 온도 변화만을 고려한 시험 결과로써 말뚝과 같이 오랜 시간 동안 하중을 받는 기초 구조물인 경우 온도 및 하중 작용시간을 동시에 고려한 크리프시험 결과가 말뚝용 역청재료의 성능을 보다 더 정확하게 나타내 주게된다. 그림 9에 보인 것처럼 시간-온도 중첩원리를 이용한 마스터 곡선을 작성하여 분석한 결과 sample A가 시간이 길어질수록 크리프 컴플라이언스 값이 작아지는 결과를 보여서 다른 역청재료에 비하여 성능이 우수한 것으로 나타났다.

(3) 흐름시험 결과

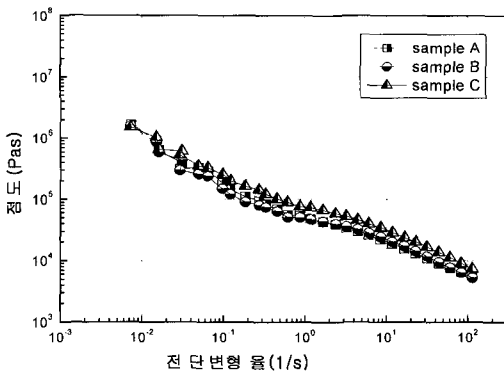
지반 침하에 의해서 말뚝에 발생하는 부마찰력이 하중으로 장시간에 걸쳐 말뚝에 재하되면 역청재료는 점성유체의 거동을 보이게 된다. 이를 모사하기 위한 흐름시험을 실시한 결과 그림 10과 그림 11의 그래프를 얻었다. 그림 10과 그림 11에서 알 수 있듯이 주어진 전단 변형률에 대해 온도가 증가할수록 점도가 감소한다는 것과 전단 변형률이 클수록 점도는 감소한다는 것을 알 수 있으며 본 연구에 사용된 말뚝용 역청재료는 전단 변형률에는 모두 유사한 점성거동을 보이는 것으로 나타



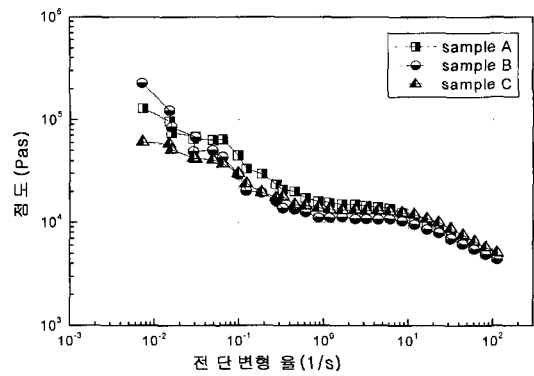
15°C에서의 흐름시험



30°C에서의 흐름시험



45°C에서의 흐름시험



60°C에서의 흐름시험

그림 10. 각 온도에서 흐름시험 결과

나서 말뚝용 역청재료의 성능 측정에는 크리프시험이 적절한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 말뚝의 부마찰력 저감을 위해 말뚝 표면에 도장하는 역청재료에 대한 유변학특성 시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 유변학특성 시험은 물리적 특성 시험으로부터 분석할 수 없는 온도 및 시간의 변화에 따른 점탄성 특성을 하중 및 환경조건에 맞게 분석할 수 있음은 물론 물리적 특성시험과 동시에 실시함으로써 말뚝용 역청재료의 성능을 재료의 특성에 맞게 현실적으로 정확한 분석을 실시할 수 있었다.
- (2) 온도 변화만을 고려하여 시험한 결과에서는 sample B가 탄성 복원력이 우수한 것으로 나타났으나 하중 작용 시간을 동시에 고려한 경우 sample A의 크리프 컴플라이언스의 변화가 작고 수치도 작게 나와서 sample A가 우수한 것으로 판단되며 말뚝 역청재료의 평가는 시간 및 온도의 변화를 동시에 고려하는 것이 필요하다.
- (3) 흐름시험 결과 말뚝용 역청재료는 주어진 전단변형률에 대해 온도가 증가할수록 그리고 전단 변형률이 커질수록 점도가 감소하는 것으로 나타났다.
- (4) 말뚝기초의 하중작용 시간 및 기초로서의 메커니즘을 고려할 때 크리프시험 및 흐름시험은 말뚝용 역청재료의 평가시험으로 적절한 것으로 판단되며 특히, 개질 역청재료를 사용 할 경우 개질로 인한 역청재료의 성능을 구분하기 위해서는 크리프시험의 도입이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 한국대학교육협의회 대학교수 국내교류 연구비 지원에 의한 것임.

참고 문헌

1. 정상삼, 이상원, 조성한(1996), "역청재료 도장말뚝의 하향력 해석", 대한토목학회논문집, 제16권, 제3-5호, pp.445-453.
2. Asphalt Institute Superpave Series No.1(1995), Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing, *Asphalt Institute Executive Offices and Research Center*, USA, pp.12.
3. Baligh, M. M., Figi, H. and Vivatrat, V.(1978), Design of Bitumen Coating to Reduce Downdrag on Piles, *Constructed Facilities Division*, Dept. of Civil Eng., MIT, Research Report R78-5, pp.143.
4. Bjerrum, L., Johannessen, I. J. and Eide.(1969), "Reduction of Negative Friction on Steel Piles to Rock", *Proc. 7th International Conferences in Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.2, pp.27-34.
5. Bahia, H. U., Anderson, D. A.(1995), "Strategic Highway Research Program Binder Rheological Parameters: Background and Comparison with Conventional Properties", *Transportation Research Record*, No.1488, pp.32-39.
6. Briaud, J. L.(1997), "Bitumen Selection for Reduction of Downdrag on Pile", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.123, No.12, pp.1127-1134.
7. Briaud, J. L. and Tucker, L.(1997). "Design and Construction Guidelines for Downdrag on Uncoated and Bitumen-Coated Piles", NCHRP Report393, *Transportation Research Board*, Washington D.C., pp.7-80.
8. Claessen, A.I.M. and Horvat, E.(1974), "Reducing Negative Skin Friction with Bitumen Slip Layers", *Journal of the Geo. Eng. Div.*, ASCE, Vol.100, No.GT8, Paper10764, pp.925-944.
9. Clemente, F.M.(1981), "Downdrag on Bitumen Coated Piles in a Warm Climate", *Proceedings of the 10th International Conferences in Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Vol.2, pp.673-676.
10. European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research(1999), "Cost333 Development of New Bituminous Pavement Design Method", *European Commission Directorate General Transport, Belgium*, pp.120.
11. John J. A., William J. M.(1983), Instruction to Polymer viscoelasticity, *John Wiley&Sons, Inc.*, New York, pp.44.
12. Shibata, T., Sekiguchi, H. and Yukiitomo, H.(1982), "Model Test and Analysis of Negative Friction Acting on Piles", *Soil and Foundations*, Vol.22, No.2.

(접수일자 2003. 3. 14, 심사완료일 2003. 5. 9)