

말뚝 부마찰력 저감용 역청재료의 시험방법과 선정기준

박태순*, 윤수진**

1. 머리말

말뚝에 작용하는 부마찰력으로 인한 말뚝 지지력의 감소와 구조물 기초의 부등침하에 대한 문제는 오래 전부터 지적되어 왔다. 국내에서 부마찰력에 의한 피해가 본격적으로 문제화 된 것은 연약 지반 상에 장대 강관말뚝을 시공하여 대형구조물을 건설하게 된 1960년대부터라고 할 수 있다. 그 이후로 말뚝기초의 부마찰력 문제를 해결하기 위한 여러 가지 방법이 시도되고 있는데 가장 보편적인 방법으로 말뚝에 역청재료를 도장하는 방법이 사용되고 있다. 이는 역청재료의 선정과 도장방법이 적절하게 실시되었을 경우에 부마찰력을 최대 50배정도 감소할 수 있는 것으로 보고되고 있다.

기초 기술자들에게 있어서 부마찰력 계산과 설계보다 더 어려움을 주는 사항은 고품질의 역청재료를 어떻게 선택할 것인가 하는 문제이다. 지금까지 부마찰력 저감용 역청재료는 메이커에서 제시하는 품질 시험 결과에 어쩔 수 없이 의존하여 왔으며 지반기술자가 실제적으로 역청재료에 대한 평가를 실시하지 못하고 있는 것이 현실이다. 더욱이 최근 출하되고 있는 말뚝용 역청재료는 여러 화학재료가 첨가된 특수 개질 역청재료(modified bitumen)가 사용되고 있어서 지금까지의 역청재료의 평가에 사용해 왔던 침입도 또는 점도 시험으로는 역청재료가 가지고있

는 고유의 점탄성 특성을 정확하게 분석할 수 없는 실정이다.

고품질의 역청재료는 말뚝의 저장기간동안 중력(무게) 및 온도 하에서 변형이 발생하지 않으며, 파일 항타시의 동적 응력 아래에서도 과도하게 변형되지 않아야 한다. 또한 침하가 진행되는 동안의 하향력(downdrag)에 의하여 인장하중을 거의 받지 않아야 하며, 도장하는 동안 흙의 토립자가 과도하게 침투하지 않아야 하는 조건을 만족하여야 한다.

우리 나라에서는 지금까지 부마찰력 저감용 역청재료의 선정기준을 단지 침입도와 연화점시험을 이용하여 아스팔트 바인더의 물리적 특성만을 고려하여 역청재료를 선정하여 왔으며 더구나 지반 공학자들은 역청재료에 대하여 생소하기 때문에 재료 선정 과정을 위에서 언급한 것처럼 메이커의 서험성적서에 의존하고 있는 실정이다. 그러나, 고품질 개질 역청재료가 생산됨에 따라 새로운 개념의 역청재료의 유변학적(rheological) 특성을 고려한 새로운 시험 및 선정 방법이 필요하게 되었으며 중요한 절차로 부각되고 있다. 이미 선진국가에서는 이러한 점들을 감안하여 역청재료의 유변학적 특성을 고려한 부마찰력 역청재료의 설계와 시험에 사용하고 있다.

본고는 온도, 하중 및 시간의 변화에 따라 성질이 변하는 역청재료의 유변학적 특성에 따른 점탄성 시험방법 및 이론을 소개하고 고품질의 부마찰력 저감용 역청재료의 선정기준에 대한 동향과 지식을 지반 기술자들에게 제공하기 위하여 작성하였다.

*1 정희원, 서울산업대학교 건설학부 토목공학과 조교수(tpark@snut.ac.kr)

** 정희원, 서울산업대학교 건설학부 토목공학과 대학원 (naya0730@em-pal.com)

2. 역청재료의 거동

역청재료의 거동은 온도와 재하 시간에 따라 좌우되기 때문에 이 두 요소는 동일한 의미로 사용될 수 있다. 그림 1은 시간과 온도의 함수로써의 역청재료의 거동을 나타낸 것으로 재하 속도를 느리게 하는 것은 고온에서 역청재료의 거동과 같은 효과를 나타내고, 재하 속도를 빠르게 하는 것은 저온에서의 거동특성과 동일한 효과가 나타나는 것을 볼 수 있다.

온도가 충분히 높을 때(약 100℃) 역청재료는 모티오일과 같은 윤활유의 점성유체를 나타내고 온도가 낮을 때(약 0℃이하)는 거의 탄성체와 같은 거동을 한다. 역청재료는 실제적으로 이 두 가지 특성을 모두 가지는 점탄성 유체의 거동을 한다. 이런 역청재료의 유변학적 거동특성은 강성도(stiffness)와 크리프 컴플라이언스(creep compliance) 그리고 전단 점도(shear viscosity)로 나타낼 수 있다. 먼저 강성도는 하중재하 시간과 온도의 함수로 응력과 변형사이의 관계를 나타내며 식 1과 같이 정의된다.

$$S(t, T) = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1)$$

위의 식에서 S = 강성도 (ψ 또는 kg/cm^2)

t = 하중재하시간

T = 온도

σ = 축응력

ϵ = 축변형

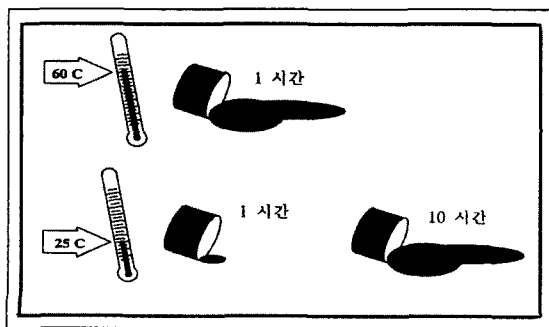


그림 1. 역청재료의 시간-온도 관계

하중재하 시간이 짧거나 저온이면, 역청재료는 거의 탄성체와 같은 거동을 하며, 이때의 강성도는 탄성계수와 비슷하다. 그리고 하중재하 시간이 길거나 고온일 때의 강성도는 일정비율로 감소하며 이때의 거동은 순수한 점성으로 간주 할 수 있다. 또한 강성도와 역수관계를 가지는 크리프 컴플라이언스는 탄성계수(Young계수)의 역수로써 시간에 의한 응력과 변형률의 관계를 나타내며 식 2로 정의된다.

$$D(t) = \frac{\epsilon(t)}{\sigma} \quad (2)$$

위의 식에서 D(t) = 크리프 컴플라이언스

σ = 응력

$\epsilon(t)$ = 일정한 응력하의 시간 중
속적 변형률

지반 침하에 의해서 말뚝에 발생하는 부마찰력은 하중이 되어 장기간에 걸쳐 말뚝에 재하되므로 역청재료는 이러한 재하 하중으로 인해 시간의 흐름에 따라 점성유체로 거동하게 된다. 점도는 역청재료의 상수는 아니지만 점도가 큰 재료는 높은 전단응력(τ)을 가지며, 전단변형률($\dot{\gamma}$)과 온도에 영향을 받게된다.

역청재료의 점도를 측정하기 위한 시험으로는 중력식 비스코메타 (gravity-flow viscometer, 동점점도)(ASTM D 2170)와 진공식 비스코메타 (vacuum-capillary viscometer, 절대점도) 그리고 콘-플레이트 비스코메타(cone-plate viscometer)(ASTM 3205)가 사용되고 있다. 점도시험 방법은 역청재료의 온도에 따라 측정 방법이 달라지는데 60℃보다 낮은 온도에서 시험할 경우 콘-플레이트 비스코메타를 사용하고, 60℃와 135℃ 사이에서는 진공식 비스코메타를, 135℃이상의 온도에서는 중력식 비스코메타를 사용한다. 이러한 점도시험의 문제점은 단지 한 온도에 대한 점도 값만이 측정 가능하다는 것과 말뚝용 역청재료로 사용할 경우 역청재료에서 발생하는 전단 변형률 값을 알 수 없다는 것이다. 따라서 이러한 점도시험 방법으로는 말뚝용 역청재료의 거동특성을

명확하게 나타낼 수 없다는 한계에 부딪히게 된다. 따라서, 이러한 한계점을 해결하기 위해서 레오메타(Rheometer)를 이용하여 시험한 전단점도는 고분자 재료의 연구에 사용되는 시험법으로 전단 변형률에 대해 마스터(Master) 곡선을 작성하여 여러 온도에서 변화하는 전단점도를 나타낼 수 있다는 장점이 있으며 역청재료와 같은 점탄성 재료의 특성을 분석하는데 매우 유용한 방법이다. 레오메타 시험으로부터 얻은 전단점도는 전단응력과 식 3과 같은 관계가 있다(이 관계를 Cox-Mertz의 법칙이라고 부른다).

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (3)$$

위의 식에서 τ = 전단 응력
 η = 전단 점도
 $\dot{\gamma}$ = 전단 변형률

3. 시험방법

3.1 Van der Poel의 노모그래프

1954년 Van der Poel이 점탄성을 정의하기 위하여 탄성계수의 함수로써 역청재료의 구조적 특성을

나타내는 강성도(stiffness)를 도입하였다. 또한 역청재료의 강성도를 구할 수 있는 노모그래프를 제시하였는데 이 노모그래프는 아스팔트의 연화점(Ring&Ball)과 침입도 지수PI(PenR&B)를 알면 임의의 온도에서의 강성도를 구할 수 있는 원리로 순수한 역청재료의 시험을 기초로 하여 개발되었기 때문에 개질 역청재료 또는 제품에 적용하기는 적당하지 못하다. 따라서 개질 역청재료용 노모그래프를 새로이 개발하거나 현장에서 발생할 수 있는 넓은 범위의 온도와 하중조건을 재현 할 수 있는 레오메타(rheometer)와 같은 시험을 사용하여 직접 측정하여야 한다.

3.2 레오메타 시험

역청재료의 유변학적 시험에 사용되는 레오메타 중에 가장 대표적인 레오메타는 동적전단유동기(dynamic shear rheometer, DSR)이다. 동적전단유동기는 유변학 특성시험을 양방향 반복회전 모드(oscillatory mode)와 일방향 회전모드(rotational mode)를 선택하여 다양한 환경 및 조건하에서의 역청재료, 고무, 플라스틱 이외에 각종 점탄성 재료의 유변학적 시험을 수행할 수 있는 분석장비이다. 그림 2는 동적전단유동기로 수행 할수 있는 두 가지 시험

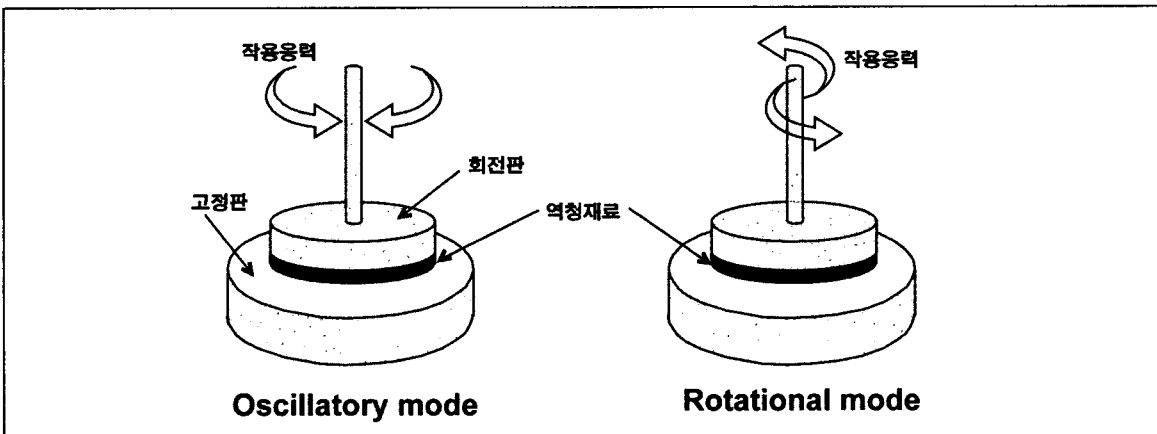


그림 2. 동적전단유동기(Dynamic Shear Rheometer, DSR)의 시험모드

모드를 보인 것이다. 시험 모드는 사용되는 재료의 특성과 하중 조건 등을 고려하여 정하게 된다. 말뚝용 역청재료의 경우는 일방향 회전모드를 사용하지만 도로용 역청재료의 경우에는 양방향 반복회전모드를 사용하여 시험을 수행한다.

먼저, 일방향 회전모드(rotational mode)는 일정한 전단응력(shear stress)을 시료에 가하면서 시간의 경과에 따라 변화하는 크리프 컴플라이언스(creep compliance)와 전단점도 (shear viscosity, η)를 각 온도별로 구할 수 있으며 양방향 반복회전모드(oscillatory mode)는 전단응력 또는 변형(shear stress /strain)을 일정한 온도에서 주기를 변화시키면서 복합계수, 저장계수, 손실계수 및 위상각을 구해낼 수 있다. 표 1은 동적전단유동기(dynamic

shear rheometer, DSR)로 측정할 수 있는 역청재료의 유변학적 특성 시험방법들을 나타낸 것이다. 장기간의 하중과 전단력이 작용하는 경우 즉, 역청재료가 도장된 말뚝의 경우 흐름시험 또는 크리프 시험을 사용하여 역청재료의 유변학적 거동특성을 파악하는 것이 적합하다.

그림 3과 그림 4는 말뚝 부마찰력 역청재료를 이용하여 크리프 시험과 흐름 시험을 수행한 결과를 나타낸 것으로 두 시험 모두 Boltzman의 시간-온도 중첩원리를 이용한 마스터 곡선으로 나타낸 것이다. (기준온도:30℃, 기준온도 이외의 온도 :15℃, 45℃) 그림 3에서는 시간이 경과함에 따라 역청재료의 크리프 컴플라이언스는 서로 다른 거동을 나타내며 그림 4에서는 전단 변형율이 증가함에 따라 역청재료

표 1. 유변학 측정시험법

시험방법	모드		
크리프 시험 (creep test)	일방향회전모드 (rotational mode)	전단 응력 일정	변형/감성도 계수
흐름 시험 (flow curvw)	일방향 회전모드 (rotational mode)	전단 응력 일정	점도/항복응력
진폭 시험 (amplitude sweep)	양방향 반복회전모드 (oscillatory mode)	여러 온도에서 전단 응력 증가	선형 점탄성 영역 (LVE 선정)
주파수 시험 (frequency sweep)	양방향 반복회전모드 (oscillatory mode)	여러 온도에서 frequency를 증가	점탄성특성 계수산출
시간변화 시험(time-test) 온도변화 시험(temp-test)	일방향/양방향 반복회전모드	frequency와 전단 응력 일정	시간과 온도의 함수로써의 특성과파악

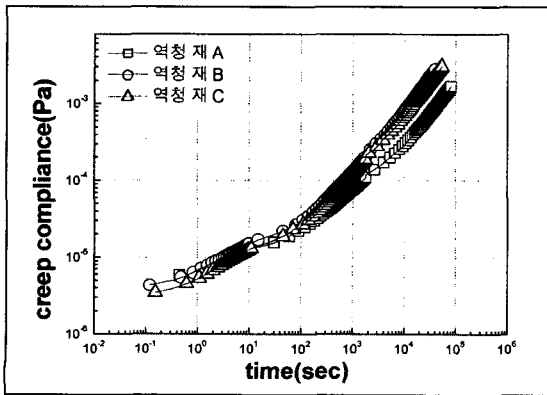


그림 3. 크리프 컴플라이언스의 마스터 곡선

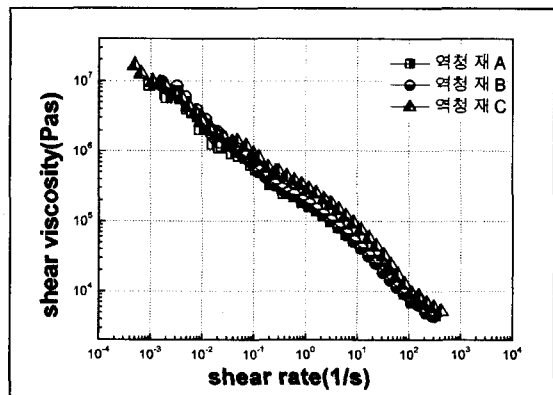


그림 4. 전단점도의 마스터 곡선

의 점도는 감소하며 역청재료는 비슷한 거동 특성을 나타내었다.

4. 선정기준

4.1 현행기준

역청재료의 안정성을 도모하기 위한 일반적인 역청재료의 현행 시험방법으로 침입도 시험과 전형적인 점도 시험이 있다. 침입도 시험과 점도 시험은 역청재료의 거동에 대한 온도의 영향을 측정하는데 사용되며 그림 5는 전형적인 점도 시험의 두 온도와 침입도 시험 온도에서의 역청재료의 거동을 나타내고 있다.

그림 5에서 보인 세 종류의 역청재료는 모두 시방 규정에 합격한 상태이지만 전체 온도영역에서 보면 매우 다른 특성을 보이고 있다. 역청재료 A와 C는 저온에서는 동일한 특성과 안정성을 보이지만 고온에서는 매우 다른 성질을 나타낸다. 이렇게 저온에서부터 고온까지의 전반적인 온도의 특성을 파악하기에는 단지 한 온도로 규정되어 있는 침입도 시험(25℃)과 점도 시험(60℃, 135℃)으로는 온도변화에 민감성을 보이는 역청재료의 품질을 판단하기에는 부적합하다.

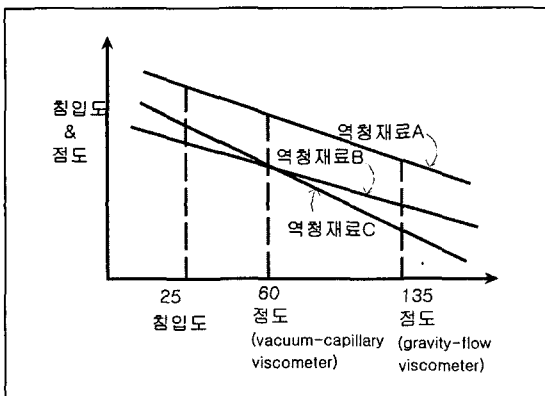


그림 5. 역청재료의 온도 감온성

4.2 새로운 선정기준

이미 선진국가에서는 현행기준과 개질역청재료의 생산과 일반 역청재료의 거동특성이 다르다는 점을 감안하여 유변학적 특성을 고려한 시험을 실시하여 부마찰력 역청재료의 선정과 시험에 사용하고 있는 실정이다. 1997년 Briaud외 2인은 NCHRP 보고서에서 역청재료의 새로운 선정기준을 표 3과 같이 제안하였으며, 이 제안을 사용 할 경우 각각의 기준을 이용한 역청재료의 선택 방법 및 시험 절차는 다음과 같다.

1. 역청재료에 가해지는 전단 응력(τ)을 구한다.
2. 역청재료에 가해지는 전단 변형률($\dot{\gamma}$)을 계산한다
3. 필요한 점도 $\eta_{req} = \tau / \dot{\gamma}$ 를 계산한다

역청재료의 선정기준에 따른 점도와 전단 변형률을 구하는 공식은 표 3과 같이 정리 된다.

4. 역청재료의 점도는 반드시 η_{req} 에 비하여 크거나 작아야 한다.
(선정기준에 따라 역청재료의 점도가 크거나 작아 질 수 있다.
예) 저장 및 타입기준은 $\eta > \eta_{req(저장)}$ 의 조건을 만족해야 한다.

하향력(downdrag) 선정기준은 $\eta > \eta_{req(하향력)}$ 의 조건을 만족해야 한다.)

5. 흐름 시험(flow curve)을 실시하여 시간의 함수로써 η 와 $\dot{\gamma}$ 의 곡선을 작성한다.
(마스터 곡선 작성)
6. 위의 순서에 의해 구한 결과를 마스터 곡선 상에 각각의 선정기준에 해당하는 점도를 표시하고 선정기준과 비교한다.
7. 각 조건을 만족하는 점도가 결정되면 마지막 단계로 토립자의 침투에 대한 기준 만족여부를 결정한다.

표 3. 역청재료의 선정기준에 따른 점성과 전단 변형률

기준	역청재		
	저장에 대한 기준		
점도(η)	$\eta_{storage} = \frac{\rho g t_{st} d^2}{h}$	$\eta_{driving} = \frac{\gamma_s t d}{h}$	$\eta_{downdrag} = \frac{\tau_{bit} d}{S}$
전단 변형률(γ)	$\gamma_{storage} = \frac{hd}{t_{st}}$	$\gamma_{driving} = \frac{hd}{t_v}$	$\gamma_{downdrag} = \frac{\dot{S}}{d}$
변수	$\gamma_{storage}$ = 전단 변형률 d = 도장의 두께 h = 역청재료가 흐를 때 허용되는 거리 t_{st} = 예상되는 최대 저장기간	h = 역청재료와 흙의 경계면에서 해머를 사용시 설계에 의해 허용되는 거리 d = 도장두께 t_v = 해머가 작용하는 동안 변위(h)에 대한 시간	S = 침하율 τ_{bit} = 일반적으로 흙의 마찰력 τ_s 의 1/10과 같다

맺음말

부마찰력의 저감을 위해 말뚝 표면에 도포하는 역청재료는 지반공학자들에게 다소 생소한 재료로서 제조사의 생산과 공급에 의해 품질이 관리 및 의존되어 왔다. 그러나 설계과정 중에 부마찰력의 발생 여부는 매우 중요한 설계변수의 하나이고 이를 방지 또는 최소화하기 위하여 사용되는 역청재료에 대한 시험방법과 선정기준이 명확하게 설정되어야 한다. 이러한 방법으로 본고에서는 역청재료에 대한 유변학적 시험방법과 새로운 선정기준에 대하여 소개하였다. 본 기사가 향후 고품질의 부마찰력 저감용 역청재료를 도장한 말뚝의 사용에 있어 저장에서부터 항타 및 역청재료의 점탄성 거동까지 말뚝에서 발생하는 부마찰력 저감을 위한 설계와 시공에 도움이 될 것으로 기대하는 바이다.

참고문헌

1. 김승록, "Complex Industrial Fluids (Polymeric System)"
2. 김진곤, "점탄성", 제3회교분자아카데미, 1995, pp.

- 371~406
3. 유수완, "SL Pile의 부마찰력 저감효과에 관한 연구", 석사학위논문, 고려대학교, pp.19~21
4. 이규환, 심민보, 이장덕, 이송, "모형말뚝에 작용하는 부마찰력 특성연구", 대한 토목공학회 제 3-5권 1998년 pp.71~725
5. 이장오, "부마찰력 저감 말뚝기초의 설계와시공", 대한토질공학회지, 제5권1호, pp.88~90
6. 정상섭, "단독말뚝과 군말뚝의 Downdrag", 대한 토목공학회 제 4권 1993년 pp.259~268
7. 한국도로포장공학회 기술강좌, "수퍼페이브 제 1단계 시험 및 개요", pp. 18~32
8. Briaud, J.L., and Tucker, L. M.(1997). "Design and Construction Guidelines for Downdrag on Uncoated and Bitumen-Coated Piles", NCHRP Rep393, Transp.Res. Board, Washington, D.C.,198.
9. Carl Redel, M. ASCE, "Reducing Negative Friction with Bitumen Slip Layers", Journal of Geotechnical Engineering 1975 vol.101 no7~no12
10. Jean-louis Briaud, Fellow, ASCE "Bitumen selection for Reduction of Downdrag on Piles" Journal of Geotechnical Engineering 1997 vol.123 no12 pp. 1127~1134

