표면파 속도를 이용한 슬립폼 시스템 상승 시기 결정에 관한 연구

A Study on the Determination of Slip-up Time for Slip-Form System using Surface Wave Velocity

김희석* · 김영진** · 진원종*** · 윤혜진****

Kim, Heeseok · Kim, Young Jin · Chin, Won Jong · Yoon, Hyejin

Abstract

The early setting time of concrete is an important factor determining the slip up velocity of the slip-form system. Accordingly, need is for a technique evaluating the early setting time in order to secure the safety of the slip-form system and the construction quality of concrete. This paper intends to estimate the early setting time by evaluating the setting degree of concrete using surface wave velocity so as to determine the slip up time of the slip-form system. Penetration resistance test and compressive strength test are performed first to clarify the relationship between the early setting time of concrete and the compressive strength. Then, compressive strength test and ultrasonic wave test are conducted to examine the relation between the compressive strength and the surface wave velocity. Continuous wavelet transform is adopted to measure the surface wave velocity. Numerical analysis is carried out to demonstrate the appropriateness of the application of continuous wavelet transform. Based on these results, the propagation velocity of the surface wave required for the slip up of slip-form system is suggested. Finally, a reduced model test of the slip-form system is conducted to verify the feasibility of the proposed surface wave velocity for the determination of the slip up velocity.

Keywords : *setting time, slip-form system, surface wave velocity, continuous wavelet transform*

요 지

슬립폼 공법에 있어서 초기경화시간은 콘크리트가 거푸집에서 안전하게 빠져나올 수 있는 균기를 갖게 되는 콘크리트 타설 후 경화시간으로써 슬립폼 시스템의 상승속도를 결정하는 중요한 요소이다. 따라서 슬립폼 시스템의 안전성 확보와 콘크리트의 시공품질을 확보하도록 초기경화시간을 파악하는 기술이 필요하다. 본 논문에서는 초음파를 이용하는 기법 중 표면파 속도를 이용하여 콘크리트의 경화정도를 파악하여 초기경화시간을 추정함으로써 슬립폼 시스템의 상승 시기를 결정하는 연구를 수행하였다. 관입저항시험과 압축강도시험을 수행하여 콘크리트의 초기경화시간과 압축강도와의 관계를 규명하였고, 또한 압축강도와 표면파 속도와의 관계를 규명하기 위해 초음파시험을 동시에 수행하였다. 표면파 속도를 측정하기 위해 연속웨이브릿변환을 사용하였으며, 이때 수치해석을 통해 연속웨이브릿변환의 사용에 대한 타당성을 입증하였다. 이로부터 슬립폼 시스템의 상승에 요구되는 표면파 전파속도를 제안하였으며, 슬립폼 시스템의 축소 모형실험을 수행하여 제안한 표면파 속도가 슬립폼 상승 시기를 결정하는데 사용될 수 있음을 입증하였다.

핵심용어 : 슬립폼 시스템, 초기경화시간, 표면파 속도, 연속웨이브릿변환

1. 서 론

슬립폼 공법의 경제성은 시공현장에서 요구되는 시공품질을 만족시키도록 슬립폼 시스템의 상승 속도를 적절히 유지하는데 달려있다. 여기서 슬립폼 시스템의 상승 설계 속도는 시멘트 종류와 혼화제, 그리고 슬립폼 거푸집 높이와 슬립폼 상승 장비의 성능 등이 충분히 고려되어 결정되어야 하며, 시공 중 슬립폼 시스템의 실제 상승 속도는 안전성 및 시공

품질의 확보를 위하여 반드시 사전에 결정된 상승 설계 속도보다 커서는 안 된다. 그러나 슬립폼 시스템의 상승 설계 속도가 결정되었다고 하더라도 시공 중 슬립폼 시스템의 상승속도는 현장에서 타설된 콘크리트의 초기경화 여부에 의해 결정되어야 한다. 이는 초기경화가 일어나지 않은 콘크리트를 슬립폼 거푸집 밖으로 노출시킬 경우 콘크리트가 흘러 내려 콘크리트의 강도발현이 충분하지 못하게 되거나 변형이 발생하게 되어 슬립폼 시스템의 안전성과 콘크리트 표면

*정회원 · 한국건설기술연구원, 박사후연구원 (E-mail : lagoon@kict.re.kr)

**정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원, 연구위원 (E-mail : yjkim@kict.re.kr)

***정회원 · 한국건설기술연구원, 수석연구원 (E-mail : wjchin@kict.re.kr)

****정회원 · 한국건설기술연구원, 전임연구원 (E-mail : hiyeon@kict.re.kr)

의 품질관리 문제 등이 발생할 수 있기 때문이다. 반면에 초기경화가 진행된 후 상당한 시간이 지나 거푸집의 탈형이 이루어질 경우 시공이음이 발생하거나 콘크리트와 거푸집 부착으로 인하여 슬립폼 상승력이 지나치게 커져 슬립폼의 변형 또는 안전성을 저해할 수 있다. 또한 공기가 길어지게 되어 공사비 증가 등의 문제가 발생할 수 있다.

따라서 슬립폼 시스템의 상승은 콘크리트의 초기경화시간에 의해 결정된다. 그러나 초기경화시간은 단위 시멘트양과 콘크리트의 배합비뿐만 아니라 타설시 콘크리트의 온도, 계절적 영향, 지역적 영향, 슬립폼의 높이, 구조물의 두께 등 여러 현장 환경에 크게 영향을 받으므로 콘크리트 타설 전에 초기경화시간을 정확히 예측하는 것은 매우 어렵다. 이 때문에 현장에서는 검침봉을 슬립폼 거푸집 내에 타설된 콘크리트에 삽입하여 콘크리트의 경화정도를 기능공의 감각적인 경험치에 의해 파악하는 방법을 사용하여 초기경화 여부를 판별하고 있다(천재원 등, 1997). 그러나 이러한 방법만으로는 콘크리트의 초기경화시간을 정확히 판별하는 것이 어려워 전술한 안전성 및 콘크리트 품질 등의 문제점들을 피하는 것이 쉽지 않다. 결국 콘크리트의 경화정도를 정량적으로 판별할 수 있는 기술이 필요하며, 또한 연속적으로 시공이 이루어지는 슬립폼 공법을 고려하였을 때 이러한 기술은 연속적인 콘크리트 경화 정도의 판별이 가능하여야 한다.

콘크리트의 초기경화는 시멘트와 물의 수화작용에 의해 발생하게 되며 이때 일어나는 경화 현상에 의해 콘크리트의 강도가 발현되게 되므로 초기경화시간과 강도 발현 시점은 밀접한 관계가 있다(Reichverger & Jaegermann, 1980). 따라서 슬립폼 거푸집 내에 타설되는 콘크리트의 강도를 측정하면 콘크리트의 초기경화 여부를 판별할 수 있다. 여기서 콘크리트의 강도를 판별하기 위한 기법은 크게 역학적 기법(직접강도시험법, 반발경도법, 인발법, 관입저항법 등)과 초음파를 이용한 기법(초음파 속도법, 초음파 반사법, 충격반향기법, 공진주파수법, 음향방출법 등) 등으로 나눌 수 있다. 여기서 직접강도시험법, 관입저항법, 인발법은 공시체 제작이 요구된다는 점 때문에 연속적으로 시공이 이루어지는 슬립폼 시스템으로의 적용이 어려우며, 반발경도법은 콘크리트를 직접 타격해야 한다는 점과 초기재령콘크리트에 사용이 어렵다는 점 때문에 적용이 어렵다. 그러나 초음파를 이용한 기법은 콘크리트면에 초음파를 투과시켜 투과된 신호를 측정 및 분석하는 방법으로써 정량적이며 연속적으로 콘크리트의 경화정도를 파악할 수 있다는 장점이 있다. 특히 표면과 속도를 이용하는 기법은 표면을 따라 전파하는 표면파의 특성을 이용한 것으로써 표면과 속도의 변화를 통해 콘크리트의 경화정도를 알 수 있으며, 주탑과 같이 초음파를 투과시키기 어렵거나 투과 경로 상에 철근 등에 의한 반사파의 간섭이 많아 초음파 신호의 측정이 어려운 두께가 두꺼운 콘크리트 구조물에 적용이 적합하다. 따라서 본 논문에서는 표면과 속도를 이용하여 콘크리트의 경화정도를 측정하여 슬립폼 시스템의 상승 시기를 결정하는 연구를 수행하였다.

표면과 속도를 이용하여 슬립폼 시스템의 상승 시기를 결정하기 위해서는 콘크리트의 초기경화시간과 압축강도와

관계를 알 수 있어야 하며, 또한 콘크리트의 압축강도와 표면과 속도와의 관계를 알 수 있어야 한다. 따라서 본 논문에서는 콘크리트의 초기경화시간과 압축강도와의 관계를 규명하기 위해 관입저항시험(KSF 2436)과 압축강도 시험(KSF 2405)을 동시에 수행하였으며, 또한 동일한 시간에 표면과 전파 속도 측정 실험을 수행함으로써 콘크리트의 압축강도와 표면과 속도와의 관계를 규명 하였다. 이때 표면과 속도를 측정하기 위해 연속웨이브릿변환을 사용하였으며, 수치해석을 통해 연속웨이브릿변환의 사용에 대한 타당성을 입증하였다. 이로부터 슬립폼 시스템의 상승에 요구되는 표면과 전파속도를 제안하였으며, 이러한 표면과 속도가 슬립폼 시스템의 상승 시기를 결정하는데 활용될 수 있음을 확인하기 위하여 슬립폼 시스템의 축소 모형실험을 수행하였다.

2. 슬립폼 거푸집 탈형 강도

콘크리트의 거푸집 탈형강도와 관련한 국내 기준은 콘크리트 건설 제요령(한국콘크리트학회, 2002)에서 40MPa 이상의 고강도 콘크리트일 경우 8MPa, 콘크리트표준시방서(국토해양부, 2009)/가설공사표준시방서(건설교통부, 2006)/고속도로공사 전문시방서(한국도로공사, 2009) 등에서 5MPa, 터널표준시방서(국토해양부, 2009)에서 3MPa를 제시하고 있다. 그리고 해외에서는 ACI 318-05(Building Code Requirements for Structural Concrete, 2004), ACI 347-04(Guide to Formwork for concrete, 2005), EM 1110-1-2009 (Engineering and Design Architectural Concrete, 1997) 등에서 “콘크리트가 거푸집 제거에 따른 처짐이나 뒤틀림 등의 손상이 발생하지 않는 충분한 강도를 가지는 시기”로 설계자나 현장관계자가

표 1. 국내 슬립폼 거푸집 탈형 사례

시공현장	시공연도	거푸집 탈형 기준
여천탱크 터미널 공사	1993	콘크리트 압축강도 0.1MPa를 거푸집 탈형 기준으로 하였으나 연속적인 측정이 불가능하므로 철근을 콘크리트 내부에 밀어 넣어 경화콘크리트 위치를 점검하는 방법을 사용
서울외곽순환 고속도로 제5공구	1994	
대진고속도로 제2공구	1997	
영동고속도로 제3공구	1997	
서해안고속도로 제1공구	1998	
용담댐 이설도로	2001	
영동고속도로 제13공구	2000	
영동고속도로 제14공구	2001	
영동고속도로 제15공구	2001	
동해고속도로 제4공구	2004	
군산 곡물 Silo	2004	자체 제작한 관입저항시험기의 관입저항치가 20.5kg일 때를 기준으로 탈형
청주~상주간 고속도로 2공구	2007	
인천대교	2009	
이순신대교	2012	16mm 철근을 힘껏 눌렀을 때 근입이 되지 않는 두께(거푸집 내 굵은 콘크리트 높이가 30~38cm 이상, 75cm 이하)를 기준으로 탈형

직접 결정하도록 규정하고 있다. 한편 슬립폼 거푸집에 대한 탈형 기준은 ACI Committee 347(Formwork for concrete, 2005)에서 “경험있는 관리자가 변화하는 현장 조건을 반영하여 시공이음이나 콘크리트의 박리가 발생하지 않도록 슬립폼 내부의 콘크리트가 충분히 경화되었는지 검침봉을 이용하여 확인하여야 한다.”라고 제시하고 있다. 이와 같이 거푸집 탈형에 대한 콘크리트 강도기준은 일반 거푸집에 대해서만 제시되어 있을 뿐 슬립폼 거푸집에 대해서는 제시되어 있지 않은 실정이다.

따라서 슬립폼 공법이 적용되어 시공이 이루어진 국내의 교량현장에서는 ACI Committee 347에서 제시한 검침봉을 이용하거나 또는 관입저항치를 활용하는 방법이 사용되어 왔다. 표 1은 국내에서 슬립폼 공법으로 시공된 주탑이나 교각들의 거푸집 탈형에 대한 기준을 보여주고 있다. 표 1에서 알 수 있듯이 슬립폼 공법으로 시공된 국내 대부분의 현장은 구체적인 콘크리트 탈형강도에 대한 기준 보다는 표준 관입저항시험(KSF 2346)에 의한 간접적인 기준이나 철근을 콘크리트 내에 삽입하는 등의 기능공의 감각적인 경험에 의존하는 방법에 의해 슬립폼을 상승시키고 있다.

한편 Reichverger와 Jaegermann(1980)은 “슬립폼 시스템에서 거푸집 밖으로 노출된 콘크리트는 거푸집 내의 콘크리트 자중에 의한 압력(약 0.025MPa)을 저항해야 한다.”는 기본 가정아래 다양한 실험을 통하여 슬립폼 거푸집의 적절한 탈형강도를 제안하였다. 이들은 콘크리트 초기강도가 약 0.1~0.2MPa 이상에서 거푸집의 탈형이 이루어질 경우 콘크리트 28일 강도가 100% 발현되며, 변형 또한 상대적으로 작다는 실험 결과를 제시하였다. 본 논문에서는 이들이 제시한 실험결과(약 0.1~0.2MPa의 거푸집 탈형 강도)와 슬립폼 시스템의 상승 시기 결정에 기준이 되는 초기경화시간과의 관계를 알아보기 위해 관입저항시험(KSF 2436)과 압축강도 시험(KSF 2405)을 동시에 수행하였다. 표 2는 관입저항시험에서 초기경화의 기준이 되는 관입 저항치(3.5MPa) 이전과 이후에 대한 관입저항시험 및 압축강도시험 장면을 각각 보여준다. 여기에서 초기경화 이전에는 시멘트와 물의 수화작용이 발생하기 전이므로 관입저항시험에서 몰탈이 굳

그림 1. 관입저항시험 결과

그림 2. 압축강도시험 결과

지 않은 상태를 볼 수 있으며, 또한 압축강도시험에서 거푸집 제거 시 공시체가 형태를 갖추지 못하고 있음을 볼 수 있다.

그림 1은 콘크리트 배합에 사용된 시멘트 종류 및 양생온도에 따른 관입 저항시험에 의한 시험결과를 나타내며, 그림 2는 압축강도시험에 의한 시험 결과를 각각 보여준다. 그림 1에서, 24°C에서 타설된 고로슬래그시멘트(GGBS)의 경우 약

표 2. 콘크리트 관입저항시험 및 압축강도 시험

	초기경화(3.5MPa) 이전	초기경화(3.5MPa) 이후
관입 저항침에 의한 콘크리트의 응결시간 시험		
콘크리트의 압축 강도 시험		

5~6시간, 18°C에서 타설된 슬래그시멘트(S/C)의 경우 약 9~10시간, 5°C에서 타설된 보통포틀랜드시멘트(OPC)의 경우 약 12~13시간, 10°C에서 타설된 고로슬래그시멘트(GGBS)의 경우 약 14~15시간, 그리고 5°C에서 타설된 슬래그시멘트(S/C)의 경우 약 17~18시간에서 초결(3.5MPa)이 발생함을 볼 수 있는데, 이러한 초결 발생 시간에 해당하는 콘크리트의 압축강도는 그림 2에서 모두 약 0.1~0.2MPa임을 알 수 있다. 즉, Reichverger와 Jaegermann의 실험결과에 의한 슬립폼 거푸집의 탈형 강도 0.1~0.2MPa은 콘크리트의 초기경화가 발생한 직후에 발현됨을 알 수 있다.

3. 초기경화 시간과 슬립폼 시스템의 상승 속도

슬립폼 공법의 경제성은 슬립폼 시스템의 상승 속도를 빠르고 적절하게 유지하는데 달려있다. 따라서 슬립폼 시스템의 상승 장비 성능을 향상시키거나 콘크리트의 초기경화시간에 영향을 적게 받도록 슬립폼 거푸집의 높이를 높여 슬립폼 시스템의 상승 속도를 빠르게 함으로써 슬립폼 공법의 경제성을 향상시킬 수 있다. 그러나 자재수급이나 철근 조립 속도, 또는 콘크리트 품질 문제 등으로 인하여 슬립폼 시스템의 상승 속도를 증가시키는데 한계가 있다. 따라서 이러한 현실적인 제한 사항들로 인해 최대 4m/day 정도 속도로 슬립폼 시스템을 운영할 수 있으며, 이때 슬립폼 시스템에서의 거푸집 높이는 일반적으로 그림 3과 같이 약 125cm를 사용하고 있다.

시공중 슬립폼 시스템의 안전성 및 콘크리트 표면관리를 위해 거푸집 내부는 약 15cm 정도의 굳지 않은 콘크리트와 약 65~80cm의 경화중인 콘크리트, 그리고 약 25~40cm의 초기경화시간이 도달된 굳은 콘크리트로 구성되어있다. 슬립폼 시스템의 상승 속도는 콘크리트의 초기경화시간에 의해 영향을 받는데 초기경화시간은 콘크리트의 경화 속도에 따라 결정된다. 콘크리트의 경화 속도는 계절적, 지역적, 슬립폼의 높이, 콘크리트의 강도 및 슬럼프, 구조물의 두께 등 여러 요인에 따라 좌우되므로 필요에 따라 조강재나 지연재를 사용하여 콘크리트의 경화 속도를 단축 또는 지연하여 슬립폼의 상승을 조절하고 있다. 여름 공사는 경화속도가 빠르므로 탈형된 콘크리트에 특별한 보양방법을 사용하여 수분 증발을 막아 슬립폼 시스템의 상승속도를 빠르게 할 수 있다. 그러나 재료의 공급 및 공급 설비의 과다로 인한 작업인원 및 장비의 증가 등이 발생하여 비경제적이 될 수 있다. 겨울공사는 콘크리트의 경화 속도가 늦으므로 조강재 등과 보온설비를 설치하고 상승속도를 어느 정도 확보하여 시간당 작업 물량을 조절하여야 한다.

그림 3에서 초기경화시간 도달 콘크리트의 높이가 25~40cm를 미달하게 되면 슬립폼 시스템의 안전성과 콘크리트 표면 관리 문제 등이 발생할 수 있으므로 상승속도는 감소되어야 하고, 초과하면 공기가 지나치게 길어질 수 있으므로 상승속도는 증가되어야 한다. 만약 상승속도를 증가시키는 것이 불가능하다면 콘크리트 타설층의 두께는 감소하게 된다. 이와 같은 슬립폼 시스템의 상승 속도(V_{slip})는 콘크리트 타설 후 콘크리트가 슬립폼 거푸집 밖으로 노출되는 거리(슬립폼 거푸집 내의 콘크리트 높이)를 초기경화시간(t_{set})

그림 3. 슬립폼 거푸집

그림 4. 초기경화시간과 상승높이

으로 나눈 것과 같으므로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 초기경화시간은 콘크리트가 거푸집에서 안전하게 빠져나올 수 있는 굳기를 갖게 되는 콘크리트 타설 후 경화시간(hr)이므로 콘크리트 타설 후 콘크리트가 슬립폼 거푸집 밖으로 노출되는 시간과 같다. 따라서 슬립폼 거푸집 내의 콘크리트 높이(H)와 슬립폼 시스템의 1일 상승 높이(h)와의 관계를 식 (2)와 같이 유도할 수 있다.

$$V_{slip} = \frac{100H}{t_{set}} \quad (1)$$

$$t_{set} = \frac{H \times (24 - \alpha)}{h} \quad (2)$$

그림 4는 식 (2)의 초기경화시간과 슬립폼 시스템 1일 상승 높이와의 관계를 표현한 것으로서 슬립폼 시스템의 1일 상승 높이는 초기경화시간에 반비례함을 알 수 있다. 따라서 슬립폼 시스템의 1일 상승높이가 결정되면 콘크리트의 초기경화시간을 결정할 수 있으며 식 (1)을 이용하여 슬립폼 시스템의 상승 속도를 결정할 수 있다. 또한 시공 중 초기경화시간을 측정하면 슬립폼 시스템의 1일 상승 높이를 예측할 수 있다. 식 (1)에서 V_{slip} 은 슬립폼 상승 속도(cm/hr), H 는 슬립폼 거푸집 내의 콘크리트 높이(m), 그리고 t_{set} 은 콘크리트의 초기경화시간(hr)을 각각 나타낸다. 그리고 식 (2)에서 α 는 1일 중 작업 휴지 시간(hr)을, h 는 슬립폼 시스템 1일 상승 높이(m)를 각각 나타낸다.

4. 표면파 속도 측정을 통한 슬립폼 시스템 상승시기 결정

4.1 매질에서의 표면파 진행

슬립폼 시스템을 상승시키기 위해서는 그림 3의 초기경화 시간에 도달한 콘크리트가 확보되어야 한다. 콘크리트의 초기경화 여부는 콘크리트의 강도 발현 시점과 밀접한 관계가 있으므로 슬립폼 시스템 거푸집 내에 타설된 콘크리트의 강도를 측정함으로써 슬립폼 시스템을 상승시키는데 필요한 초기경화시간 도달 콘크리트 높이를 측정할 수 있다. 콘크리트 강도를 측정하기 위한 기법 중 초음파를 이용하는 기법은 정량적이며 시공 중 연속적으로 적용이 가능하므로 주탑 시공에 필요한 모든 공정이 연속적으로 이루어지는 슬립폼 시스템으로의 적용이 용이하다.

초음파를 이용하는 기법은 초음파 속도법, 초음파 반사법, 충격반향기법, 공진주파수법, 음향방출법 등이 있으며, 이중 초음파 속도법은 초음파를 콘크리트 표면에 발생시켜 수신점에서 측정된 신호의 속도를 분석하는 방법으로써 콘크리트의 경화가 진행됨에 따라 빨라지는 초음파의 특성을 이용하는 방법이다. 여기서 초음파는 불가청주파수인 20kHz 이상의 파를 의미하며 매질의 표면을 타격하여 발생시킬 수 있는데, 이러한 경우 발생되는 진동은 전체에너지의 약 7%가 압축파(P파), 약 26%가 전단파(S파), 그리고 약 67%가 표면파(R파)의 형태로 매질을 전파하게 된다(그림 5). 이때 압축파와 전단파의 경우 그림 6과 같이 방사형으로 매질을 전파하게 되는데 콘크리트 구조물의 표면에 발생시킬 경우 철근, 골재, 또는 구조물의 두께 등의 영향으로 반사파가 발생하게 된다. 이때 반사면에서는 모드변환(mode conversion)

그림 5. 탄성파의 진폭 및 에너지 분산(Wood, 1968)

그림 6. 압축파와 전단파에 의한 반사파

이 발생하게 되어 반사된 압축파와 전단파는 뒤섞여 구조물 내부를 전파하게 되므로 주탑 등과 같이 초음파가 투과해야 할 두께가 두꺼우며 더구나 철근과 같은 반사체가 있는 구조물의 경우 적용이 어렵다.

그러나 표면파는 표면에서 멀어질수록 급격한 감쇄가 발생하는데 콘크리트 구조물의 표면에 발생시킬 경우 심부의 철근이나 구조물 두께의 영향을 받지 않고 표면을 따라 전파하게 되어 반사파의 영향이나 모드변환 등의 문제가 발생하지 않으므로 슬립폼 공법으로 시공이 이루어지는 구조물과 같이 표면에서의 콘크리트 강도 발현 특성이 중요한 구조물에 효과적으로 적용될 수 있다. 이러한 표면파의 전파특성을 확인하기 위해 그림 7의 모형을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 그림 8은 해석에 사용된 요소(2DOF)를, 그림 9는 하중곡선을 각각 나타낸다. 그리고 표 3은 수치해석에 사용된 재료의 물성을 나타낸다. 그림 9에서 Paraxial 경계란 파 진행문제의 수치해석시에 경계면에서 반사파를 제거하기 위한 흡수경계조건의 하나로서, 경계면에서 반사파를 제거하므로 적은양의 요소를 사용하여 파진행 문제를 효과적으로 해석할 수 있게 한다. 그러나 우수한 성능에 비해 경계조건이 편미분 방정식으로 구성되어 있어 유한요소해석으로의 적용이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 김희석 등

그림 7. 수치모형

그림 8. 9절점 등매개변수요소

그림 9. 하중곡선

표 3. 수치해석 재료물성

탄성계수 (N/m ²)	포아송비	밀도 (kg/m ³)
34×10 ⁹	0.22	2400

그림 10. 응력파의 전파

그림 11. 초음파 신호

(2007)에 의해 제안된 범함수를 이용하여 Paraxial 경계조건을 유한요소해석에 적용하였으며, 이를 위해 식 (3)의 요소행렬을 경계면에 적용하였다. 시간적분을 위해 음해법(Implicit method)인 평균 가속도법(averaged acceleration method)을 사용하였으며 적분시간각은 $1\mu \text{ sec}$ 를 적용하여 $140\mu \text{ sec}$ 까지 해석을 수행하였다.

$$\int_V \rho \Psi^T \Psi dV \Delta + \int_S \Psi^T \mathbf{P} \mathbf{G} \Psi dS \Delta + \left\{ \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} dV + \int_S \Psi^T (\mathbf{P} \mathbf{B}_x + \mathbf{C}_1 \mathbf{B}_x + \mathbf{C}_2 \mathbf{B}_y) ds \right\} \Delta = \int_V \Psi^T \mathbf{f} dV \quad (3)$$

식 (3)에서 Ψ 는 보간함수행렬, $\mathbf{C}$ 는 재료상수행렬, $\mathbf{f}$ 는 체적력(body force)벡터이며, $\mathbf{P}$, $\mathbf{C}_1$, $\mathbf{C}_2$, $\mathbf{G}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{B}_x$, $\mathbf{B}_y$ 등은 아래와 같이 정의된다.

$$\Psi = \begin{bmatrix} \psi_1 & \psi_2 & \dots & \psi_n & 0 \\ 0 & \psi_1 & \psi_2 & \dots & 0 & \psi_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & 0 \\ c_{12} & c_{22} & 0 \\ 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{Bmatrix} f_x \\ f_y \end{Bmatrix}$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \gamma_1 & 0 \\ 0 & \gamma_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 \\ 0 & c_{66} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 0 & c_{12} \\ c_{66} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1/\alpha & 0 \\ 0 & 1/\beta \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \psi_{1,x} & 0 & \psi_{2,x} & 0 & \dots & \psi_{n,x} & 0 \\ 0 & \psi_{1,y} & 0 & \psi_{2,y} & \dots & 0 & \psi_{n,y} \\ \psi_{1,y} & \psi_{1,x} & \psi_{2,y} & \psi_{2,x} & \dots & \psi_{n,y} & \psi_{n,x} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_x = \begin{bmatrix} \psi_{1,x} & 0 & \psi_{2,x} & 0 & \dots & \psi_{n,x} & 0 \\ 0 & \psi_{1,x} & 0 & \psi_{2,x} & \dots & 0 & \psi_{n,x} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_y = \begin{bmatrix} \psi_{1,y} & 0 & \psi_{2,y} & 0 & \dots & \psi_{n,y} & 0 \\ 0 & \psi_{1,y} & 0 & \psi_{2,y} & \dots & 0 & \psi_{n,y} \end{bmatrix}$$

여기서 γ_1 과 γ_2 는 penalty 상수, $c_{11} \sim c_{66}$ 는 재료상수, α 와 β 는 압축파 및 전단파의 속도를, 그리고 ψ 는 보간함수를 각각 나타낸다.

그림 10은 그림 7의 수치해석 결과를 보여준다. 여기서 방사형으로 전파하는 압축파 및 전단파와 표면에 에너지가 집중되어 전파하는 표면파를 관찰할 수 있다.

그림 11은 그림 7에 대한 초음파 실험 결과이며, 가진점

으로부터 수신점 거리(l)에 따른 초음파 신호를 나타낸다. 여기서 동그라미 부분이 표면파를 나타내는데 다른 신호들과 섞여 있음을 볼 수 있다. 이는 표면파의 전파 속도가 압축파나 전단파에 비해 상대적으로 느려(전단파 속도의 약 90~94%), 매질을 진행할 경우 선행하는 압축파 및 전단파와 섞여서 진행하기 때문으로써 시각적으로 표면파만을 판별해 내는 것이 어려움을 알 수 있다.

4.2 연속웨이블릿변환을 이용한 표면파 속도의 측정

그림 5와 같이 표면파는 가장 많은 에너지(전파에너지의 약 67%)를 가지고 전파하므로 연속웨이블릿변환을 이용하여 표면파를 검출할 수 있다(Shin 등, 2007). 그림 12는 그림 7의 진동원에서 우측으로 각각 $19.2\text{mm}(l_1)$ 와 $86.4\text{mm}(l_2)$ 떨어진

그림 12. 수신점 신호

그림 13. 수신점 신호의 CWT

어진 표면에 위치한 수신점에서 측정된 신호를 나타내며, 그림 13은 그림 12의 연속웨이블릿변환(Continuous Wavelet Transform) 값을 나타낸다.

식 (4)는 그림 13을 얻기 위해 사용된 연속웨이블릿변환을 나타내며, 식 (5)는 식 (4)에서 사용된 Morlet의 모웨이블릿(mother wavelet)을 나타낸다. 식 (4)에서 $g(t)$ 는 그림 12의 입력신호이며, a 는 압축계수를, b 는 전이계수를 각각 나타낸다.

$$W(b, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4)$$

$$\psi(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \cos(5t) \quad (5)$$

전술한 바와 같이 표면파는 가장 많은 에너지(약 67%)를 가지고 전파하므로 그림 13에서 가장 큰 값을 가지는 점들이 각각 l_1 과 l_2 지점에서 표면파가 지나가는 시간으로 추정할 수 있으며, 따라서 l_1 과 l_2 점들에서의 시간 차이(ΔT)로 두 개의 수신점 거리(l_2-l_1)를 나누게 되면 표면파의 속도를 식 (6)에 의해 구할 수 있다.

$$V_R = \frac{l_2 - l_1}{\Delta T} \quad (6)$$

그림 14는 식 (4)~식 (6)에 의해 산정된 표면파 속도와 해석해인 식 (7)(지표면을 따라 전파하는 압축파 및 전단파에 대한 포텐셜을 지표면에서의 traction 경계조건에 삽입하여 산정한 표면파 속도에 대한 특성방정식)에 의해 산정된 표면파 속도와 오차를 나타내는 것으로서, 모든 거리는 식 (8)의 표면파 파장(wave length)으로 나누어 줌으로써 정규화시켰다. 식 (7)에서 V_B , V_S 및 V_R 은 압축파, 전단파 및 표면파의 속도를 각각 나타낸다. 식 (8)에서 T 는 표면파 1 파장의 주기를 나타내며 표면파 파장은 진동원의 접촉시간에 종속적이므로, 여기서는 수치해석에 사용된 그림 9의 접촉시간(30μ sec)을 적용하였다.

$$\left(2 - \frac{V_R^2}{V_S^2}\right)^2 - 4 \left(1 - \frac{V_S^2 V_R^2}{V_P^2 V_S^2}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{V_R^2}{V_S^2}\right)^{1/2} = 0 \quad (7)$$

$$\lambda_R = V_R \times T \quad (8)$$

그림 14에서 두 개의 수신점사이의 거리가 표면파 파장의 0.07배일 경우 진동원과 거리에 상관없이 과도한 오차가 발생함을 볼 수 있다. 이는 두 개의 수신점 거리가 표면파 파장과 비교하여 지나치게 짧아 연속웨이블릿변환 시 각각의 수신점에서 잘못된 표면파 도달 시간이 측정되기 때문으로 판단된다. 그러나 진동원과 첫 번째 수신점사이의 거리를 표면파 파장의 약 0.3배 이상으로 하고, 두 개의 수신점 거리를 표면파 파장의 약 0.3배 이상으로 했을 때 수치해석에 의해 구한 표면파 속도가 특성방정식에 의해 구한 해석값과 약 10% 미만의 차이를 나타냄을 볼 수 있다. 따라서 두 개의 수신점 거리와 진동원과 첫 번째 수신점 거리를 표면파 파장의 약 0.3배 이상 유지하면 10%이내의 오차를 가지고 표면파 속도를 식 (4)~식 (6)에 의해 추정할 수 있음을 알 수 있다.

4.3 슬립폼 시스템 상승시기 결정

Shin 등(2007)은 표면파가 가장 많은 에너지를 가지고 전파한다는 것을 이용하여 웨이블릿변환을 통한 표면파 속도를 측정하여 콘크리트의 강도를 추정한 바 있다. 여기서는 콘크리트 타설 후 48시간 이후에 표면파 속도와 콘크리트 강도의 관계를 제시하고 있다. 그런데 콘크리트 타설 후 약 15시간 이내에 상승이 이루어져야 하는 슬립폼 시스템에는 적용하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 콘크리트 타설 후 24시간 이내의 초기재령 콘크리트에 대한 표면파 속도 측정을 위해 그림 15의 실험을 수행하였다. 그림 15에서 초음파

그림 14. 진동원 및 수신점 거리에 따른 오차

그림 15. 표면파 전파 속도 측정 실험

그림 16. Wavelet 변환에 의한 표면파 도달시간

발수신기를 통해 발생한 전기적 신호는 초음파 탐촉자를 통해 물리적 신호로 전환되어 콘크리트를 통해 전달되게 된다. 그리고 이 신호는 다시 초음파 탐촉자를 통해 전기적 신호로 전환된 후 초음파 발수신기를 통해 증폭되며 디지털 오실로스코프에 보내지게 되어 컴퓨터에 저장되게 된다. 저장된 신호는 압축파, 전단파 및 표면파가 섞여 있으므로 이중 표면파만을 검출해내기 위해 전술한 웨이블릿변환을 수행하여 그림 16과 같이 표면파 도달 시간(ΔT)을 산정하였다.

이때 그림 15에서 두 개의 초음파 탐촉자 사이의 거리 (5cm~25cm)를 그림 16에서 산정된 표면파 도달 시간으로 나누어 콘크리트에서의 표면파 전파 속도를 산정하였다(그림 17). 그림 18은 그림 15의 표면파 전파 속도 측정 실험결과와 이와 동시에 수행된 그림 2의 콘크리트 압축강도 시험결과를 같이 나타낸 것으로써 표면파 속도에 따른 콘크리트 압축강도의 관계를 보여준다. 여기서 약 500m/s의 표면파 속도를 전후로 콘크리트의 초기경화가 발생(압축강도 0.1MPa~0.2MPa)하는 것을 볼 수 있다. 따라서 그림 18로부터 슬립폼 시스템을 상승시키기 위해 슬립폼 거푸집 내에 타설된 콘크리트에서의 표면파 전파 속도를 약 500m/s 이상으로 설정하여야함을 알 수 있다.

4.4 표면파 속도를 이용한 슬립폼 시스템의 축소 모형실험

본 논문에서 제안한 500m/s의 표면파 전파 속도를 기준으로 상승하는 슬립폼 시스템의 축소 모형실험을 수행하였다. 그림 19와 그림 20, 그림 21과 그림 22는 각각 동절기와 하절기에 수행된 슬립폼 시스템의 축소 모형실험과 이에 따른 표면파 전파 속도를 나타낸 것이다. 표면파 전파 속도를 측정하기 위해 그림 23의 초음파 발수신 장치와 그림 24의 표면파 해석 프로그램(KSWIS)을 개발하여 적용하였다. 콘크리트 타설은 높이 20cm씩 1시간(하절기)~2시간(동절기) 간

그림 17. 콘크리트 양생시간에 따른 표면파 속도

그림 18. 표면파 속도에 따른 콘크리트 강도

그림 19. 슬립폼 시스템 축소 모형 실험(동절기)

격으로 타설하였으며, 표면파 전파 속도를 측정하여 500m/s 이상일 경우 슬립폼 모형을 20cm씩 상승시켰다.

그림 20과 그림 22에서 표면파 속도가 500m/s를 초과한 후 급격히 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 슬립폼 모형의 상승에 따른 것으로써, 그림 23의 초음파 발수신 장치가 슬립폼 모형의 상승에 의해 초기경화가 발생하지 않은 콘크리트에 도달하여 초음파 전파 속도를 측정하였기 때문이다. 그림 20과 그림 22에서 슬립폼 시스템의 첫 번째 인상 후에 표면파 속도가 불안정하게 측정된 것을 볼 수 있는데, 이는 최초 콘크리트 타설 후 콘크리트와 슬립폼 거푸집과의 부착을 방지하기 위하여 콘크리트의 초기경화가 발생하기 이전에 슬립폼 시스템을 상승시켰기(2.5cm) 때문이다. 그리고 그림 22의 5번째 상승 전후에 표면파 속도가 측정이 안 된 것을 볼 수 있는데, 이는 실험 중 과전압에 의한 표면파 측정 기기의 고장으로 인해 표면파 속도를 측정할 수 없었기 때문이다.

그림 25와 그림 26은 초기경화가 발생하기 전과 후(표면

그림 20. 표면파 속도에 따른 슬립폼 시스템 상승(동절기)

그림 21. 슬립폼 시스템 축소 모형 실험(하절기)

그림 22. 표면파 속도에 따른 슬립폼 시스템 상승(하절기)

그림 23. 초음파 발수신 장치

파 전파 속도 500m/s 기준)에 슬립폼 모형을 상승시켰을 경우에 대한 콘크리트 면을 각각 나타낸다. 그림 25에서 초기

그림 24. 표면파 해석 프로그램(KSWIS)

그림 25. 콘크리트 면(500m/s 이하)

그림 26. 콘크리트 면(500m/s 이상)

경화 이전(표면파 전파 속도 500m/s 이전)에 슬립폼 모형을 상승시켰을 경우 콘크리트면에 문제가 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이는 철근 노출 및 콘크리트 강도저하로 이어질 수 있어 구조물의 안전성에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 그러나 그림 26에서 초기경화 이후(표면파 전파 속도 500m/s 이후)에 슬립폼 모형을 상승시켰을 경우 콘크리트면에 문제가 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 슬립폼 시스템을 상승시키는 기준으로써 표면파 전파 속도를 이용하는 방법이 유용하게 활용될 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 슬립폼 시스템의 상승시기를 결정하기 위한 연구를 수행하였다. 표면파 전파 속도와 슬립폼 시스템 상승 시기와의 관계 규명을 위해 관입저항시험, 압축강도시험, 그리고 표면파 전파 속도 측정 실험을 동시에 수행하였으며,

이를 통해 슬립폼 시스템 상승에 요구되는 표면과 전파 속도를 제안하였다. 그리고 제안한 표면과 속도를 이용하여 슬립폼 시스템의 축소 모형 실험을 수행하였다. 이를 통한 본 논문의 결론은 아래와 같다.

1. 슬립폼 시스템의 상승 시기는 콘크리트의 초기경화시간에 따른 압축강도에 의해 결정되며 미리 설정된 콘크리트 강도의 발현 시점을 파악하면 슬립폼 시스템의 상승 시기를 결정할 수 있다.
 2. 표면과 속도를 이용하여 콘크리트의 경화 정도를 측정하는 방법은 콘크리트 표면을 따라 전파하는 표면파의 특성을 이용하므로 철근 등에 의한 반사파의 영향이 적으며, 슬립폼 시스템과 같이 콘크리트의 표면강도가 중요한 시스템에 있어서 효과적으로 적용될 수 있다.
 3. 연속웨이브릿변환을 이용하여 표면과 속도를 산정할 경우 진동원과 첫 번째 수신점과의 거리 및 두 수신점 사이의 거리를 표면파 파장의 약 0.3배 이상으로 유지하였을 때 10% 미만의 오차가 발생하는 것을 확인하였다.
 4. 초기재령 콘크리트에서의 표면과 전파 실험을 수행한 결과 약 500m/s의 표면과 속도를 전후로 슬립폼 시스템 상승에 필요한 콘크리트의 압축강도가 발현되는 것을 확인하였다.
 5. 슬립폼 시스템의 축소 모형 실험을 통해 본 논문에서 제안한 500m/s의 표면과 전파 속도가 슬립폼 시스템의 상승 시기를 결정하는데 활용될 수 있음을 확인하였다.
- 본 논문에서 제안한 슬립폼 시스템 상승에 요구되는 표면과 전파 속도에 대한 신뢰성 및 정밀도를 보다 향상시키기 위해서는 향후 콘크리트의 다양한 배합 및 양생온도 조건 하에서의 표면과 전파 속도 측정 실험이 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 2009년도 건설기술혁신사업 초장대교량사업단 과제인 “콘크리트 고주파 가설장비 및 공법개발”(과제번호: 08 기술혁신-E01)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 건설교통부(2006) **가설공사표준시방서**, 건설교통부.
 국토해양부(2009) **콘크리트표준시방서**, 국토해양부.
 국토해양부(2009) **터널표준시방서**, 국토해양부.
 김희석, 이종세(2007) 파진행 문제를 위한 Paraxial 경계조건의 유한요소해석, **한국전산구조공학회 논문집**, 한국전산구조공학회, 제20권 제3호, pp. 303-309.
 이회근, 이광명(2002) 초음파 속도 모니터링에 의한 고강도 콘크리트의 응결 평가, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 14 No. 6, pp. 973-981.
 천재원, 이영철(1997) 서해대교현장 슬립폼공법 시험시공(Mock-up Test), **대림기술정보 '97 여름**, pp. 99-107.
 최병선(2005) **Wavelet 해석**, 세경사.
 한국도로공사(2009) **고속도로공사 전문시방서**, 한국도로공사.
 한국콘크리트학회(2002) **콘크리트 건설 제요령**, 한국콘크리트학회.
 ACI 318-05 (2004) *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, ACI 318.
 ACI 347-04 (2005) *Guide to formwork for concrete*, ACI 347.
 Bedford, A. and Drumheller, D. S. (1996) *Elastic wave propagation*, John Wiley & Sons Ltd. New York.
 EM 1110-1-2009 (1997) *Engineering and design architectural concrete*, EM.
 Graff, K. F. (1975) *Wave motion in elastic solids*, Ohio State University Press.
 Hurd, M. K. (2005) *Formwork for Concrete*, ACI 347.
 Pauw, A. (1960) Static modulus of elasticity of concrete as affected by density, *Proceedings, ACI Journal*, Vol. 57, No. 6, pp. 679-687.
 Reddy, J. N. (2006) *An introduction to the finite element method*, McGraw-Hill, New York.
 Reichverger, Z. and Jaegermann, C. (1980) Optimal regime in slip form concreting, *Materiaux et Constructions*, Vol. 18, No. 74, pp. 109-113.
 Shin, S. W., Yun, C. B., Opovics, J. S., and Kim, J. H. (2007) Improved Rayleigh wave velocity measurement for nondestructive early-age concrete monitoring, *Research in Nondestructive Evaluation, American Society for Nondestructive Testing*, Vol. 18, pp. 45-68.
 Viktorov, I. A. (1967) *Rayleigh and Lamb waves, Physical theory and applications*, Plenum Press, New York.
 Woods, R. D. (1968) Screening of surface waves in soils, *J. Soil Mech. Founds Div., ASCE*, pp. 951-79.

(접수일: 2012.5.11./심사일: 2012.6.10/심사완료일: 2012.6.20)