

변형봉 센서 검증실험에 관한 연구

A Study on the Verification Test for a Deformable Rod Sensor

김 상 일*¹ Kim, Sang-Il
최 용 규*² Choi, Yong-Kyu
이 민 회*³ Lee, Min-Hee

Abstract

In the conventional axial load transfer analysis for composite piles (i.e., steel pipe pile filled with concrete), it was assumed that the concrete's strain is same as the measured steel's strain and the elastic modulus of the steel and the concrete calculated by formular as prescribed by specification is used in calculation of pile axial load. But, the pile axial load calculated by conventional method had some difference with the actual pile load. So, the behavior of a composite pile could not be analyzed exactly. Thus, the necessity to measure the strain for each pile components was proposed. In this study, the verification test for DRS (Deformable Rod Sensor) developed to measure the strain of each pile component (i.e., the steel and the concrete) was performed. In the calculation of pile axial load using the DRS, elastic modulus of concrete could be determined by the uniaxial compression test for the concrete cylinder samples made in the test site and an average tangential modulus in the stress range of $(0.2 \sim 0.6)f_{ck}$ was taken.

요 지

내부를 콘크리트로 속채움한 강관합성말뚝에 대한 기존의 하중전이 측정에서는 강관의 변형률만 측정하고 콘크리트의 변형률은 강관과 동일하다고 가정하였으며, 시방서에 규정한 방법으로 구한 강관과 콘크리트의 탄성계수를 이용하여 말뚝구성부재의 응력 및 축하중을 산정하였다. 그러나 강관의 변형률만 측정하여 강관과 콘크리트가 완전합성 거동하는 것으로 산정한 축하중은 실제 하중값과 상당한 차이를 보이고 있어 강관합성말뚝의 거동을 정확히 분석할 수 없었다. 따라서, 강관합성말뚝의 경우 각 구성부재의 변형률을 측정할 필요성이 제기되었다. 본 연구에서는 강관합성말뚝의 구성부재인 강재와 콘크리트의 변형률을 측정하는데 사용할 수 있도록 개발된 변형봉 센서에 대한 검증실험을 수행하였다. 변형봉 센서를 사용하여 말뚝축하중을 산정할 경우 콘크리트의 탄성계수는 현장에서 제작한 콘크리트 공시체의 압축강도 시험에서 구하도록 제안하였다. 즉, $(0.2 \sim 0.6)f_{ck}$ 의 응력 범위에 해당하는 평균접선기울기를 탄성계수로 사용하도록 제안하였다.

Keywords : Average tangential modulus, Composite pipe pile, DRS (Deformable Rod Sensor), Elastic modulus, Pile axial load distribution

*1 정회원, (주)상지엔지니어링 건축사사무소 (Member, Engrg., Associates, Inc.)

*2 정회원, 경성대학교 건설·환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept of Civil & Environmental Eng., KyungSung Univ., ykchoi@ksu.ac.kr)

*3 정회원, 부산대학교 대학원 토목공학과 박사수료 (Member, Ph.D Candidate, Dept. of Civil Eng., Pusan National Univ.)

1. 서론

기존의 현장타설말뚝에 대한 정재하 시험(하중전이 측정 실험 포함)에서는 진동식 센서 또는 전기저항식 센서를 철근에만 부착하여 철근의 변형률만 측정하고, 철근의 변형률과 콘크리트의 변형률이 동일하다고 가정하였다. 그리고 말뚝 구성부재인 철근과 콘크리트의 탄성계수는 시방서에서 제시한 식에 의해 산출된 값을 이용하여 말뚝구성부재의 응력 및 축하중을 산정하였다. 그러나 해상교량 기초공법중에서 강관 내부 속채움한 현장타설말뚝의 경우 강관 변형률만 측정하여 강관과 콘크리트가 완전합성거동하는 것으로 산정한 축하중은 실제의 값보다 1.7배정도 과대평가되고 있어 내부 속채움한 강관합성말뚝의 거동을 정확히 분석할 수 없었다. 따라서, 강관 내부 속채움한 강관합성말뚝에 대한 축하중을 정확하게 측정하기 위한 새로운 말뚝축하중 측정 방법 개발이 절실히 요구되고 있다.

이를 위해 말뚝의 정재하시험시 각 구성부재(콘크리트, 강관)별로 센서를 설치하여 부재의 정확한 변형률을 측정하고 시방서에서 규정한 강재의 탄성계수와 현장에서 제작된 콘크리트 공시체의 압축강도시험에서 구한 탄성계수를 사용하여 현장타설말뚝의 축하중을 산정하는 방법이 합리적인 것으로 판단된다.

강관 내부 속채움한 대구경 강관합성말뚝의 경우 말뚝 구성 부재별로 축하중을 측정한 사례는 찾아볼 수가 없었다. 통상적으로 강관의 변형률만을 측정하여 콘크리트 부재의 변형률도 동일하다는 가정하에 말뚝 구성 부재의 환산단면적을 고려하여 말뚝의 축하중을 산정해왔으나 무스트란셀과 같이 콘크리트의 응력을 직접 측정하려는 시도는 있었다(O'Neill 등, 1999).

본 연구에서는 현장에서 제작한 콘크리트 공시체의 압축강도 시험을 통하여 탄성계수를 구하고 강재와 콘크리트의 변형률을 각각 측정하기 위해 개발된 변형봉 센서의 실용화를 위한 검증시험을 수행하였다.

2. 전기저항식 변형봉센서

2.1 현장 설치 사례를 통한 센서들의 안정성 분석

현장에 시공된 각 말뚝에 대한 축하중계측용 센서의 설치수량, 오작동 및 작동불량 개소수 그리고 작동불량 사유 등을 표 1에 요약하였다. 각종 센서들의 현장 적용성은 주

로 광안대로 건설공사의 대구경 말뚝정재하시험 현장에서 검증하였으며 (부산광역시 건설본부, 2000), 포항연일대교 현장(동아건설(주), 2000)과 센텀시티 지하차도 현장(최용규, 2000)에서는 전기저항식 센서(변형봉센서 및 접촉형센서)의 적용성을 재검증하였다(정성기, 2001).

광안대로 건설공사 5공구현장에서는 전기저항식 철근접촉형 센서, 진동현식 센서, 진동피식 센서 등을 설치하였다. 진동식 센서는 콘크리트내부 매설형 센서를 사용하였으며, 시공사측에서는 주철근을 절단하여 진동식 센서를 설치하는 것을 허용하지 않았으므로 철근에 용접하여 고정된 마운팅블록을 이용하여 진동식 센서를 설치하였다. 철근용 센서의 경우 센서의 양단을 고정시켜 철근과 일체로 거동하게 하였으며, 콘크리트용 센서의 경우 센서의 한쪽 끝단만을 고정시켜 콘크리트와 함께 거동하도록 하였다. 진동현식 센서와 진동피식 센서의 경우 센서 설치시 손상, 용접 작업시 열에 의한 손상, 공사현장 부주의에 의한 손상, 콘크리트 타설시 손상, 방수 및 진동에 의한 손상 등에 의하여 오작동률이 29.0~44.2% 정도로 나타났다. 전기저항식 변형봉 센서와 전기저항식 강관접촉형 센서의 경우 센서 설치시 손상과 방수 및 방충에 의한 손상은 나타나지 않았으며 이 점이 진동식 센서보다 우수한 것으로 볼 수 있었다. 그러나, 센서 설치 후 보호용 채널을 용접하는 과정에서 발생하는 보호재와 연결전선의 손상 및 공사 현장에서 말뚝이나 철근망의 운반 및 설치 과정에서 발생하는 손상은 피할 수가 없었다. 그러나, 철근에 부가적으로 설치한 전기저항식 철근접촉형 센서의 경우, 브리지 형성을 위한 결선작업의 오류로 인하여 정확한 신호를 획득할 수 없었으므로 전기저항식 센서의 상대적인 우수성을 입증할 수가 없었다. 광안대로 건설공사 1공구현장에서는 강관부에 전기저항식 강관접촉형 센서를 설치하였으며 철근과 콘크리트부에는 실내에서 제작된 변형봉 센서를 설치하였으나 일부 계측위치에서는 변형봉 센서의 부족으로 인하여 진동식 센서를 설치하였다. 진동식 센서의 경우 5공구 현장에서 경험한 바와 같은 여러 가지 문제점들이 나타나 가급적 사용하지 않으려고 하였으나 변형봉 센서의 제작기간을 확보할 수 없는 공기의 시급성과 작업상의 어려움이 있어 일부 말뚝(대구경 반력 소켓말뚝)에는 진동식 센서를 설치하였다. 여기서, 오작동률은 전기저항식 강관접촉형 센서의 경우 20.6%, 변형봉 센서의 경우 22.5%, 그리고 진동식 센서의 경우 48.0~62.0%가 관찰되었다. 따라서, 지중에 매설된 현장타설말뚝의 경우 진동식 센서보다는 전기저항식 센서(변형봉 센서 및 강관접

표 1. 현장 설치 사례를 통한 센서들의 안정성 분석

적용현장	말뚝 종류	센서 종류	설치 개수	작동 개수	오작동 및 작동불량 개수	오작동 및 손상 원인
광안대로 5공구 현장 (2000)	현장타설말뚝 ($\phi = 1,000\text{mm}$)	전기저항식 철근접착형 센서	48	0 (0.0%)	48 (100.0%)	· 결선회로구성 오류로 인한 측정 불가
		진동현식 센서	52	37 (71.0%)	15 (29.0%)	· 센서 설치시 손상 · 방수, 진동에 의한 손상
		진동피식 센서	52	29 (55.8%)	23 (44.2%)	· 콘크리트 타설시 손상 · 용접 작업시 열에 의한 손상
광안대로 1공구 현장 (2000)	풍화암 및 암반 소켓말뚝 ($\phi = 1,000\text{mm}$) ($\phi = 2,500\text{mm}$)	변형봉 센서	132	102 (77.5%)	30 (22.5%)	· 용접 작업시 열에 의한 손상 · 공사시 부주의에 의한 손상
		전기저항식 강관접착형 센서	68	54 (79.4%)	14 (20.6%)	· c형강 용접 작업시 손상 · 공사시 부주의에 의한 손상
		진동현식 센서	96	50 (52.0%)	46 (48.0%)	· 센서 설치시 손상 · 방수, 진동에 의한 손상
		진동피식 센서	42	16 (38.0%)	26 (62.0%)	· 콘크리트 타설시 손상 · 용접 작업시 열에 의한 손상
포항연일 대교현장 (2001)	현장타설말뚝 ($\phi = 1,500\text{mm}$)	변형봉센서	20	18 (90.0%)	2 (10.0%)	· 센서 설치시 손상 · 용접 작업시 열에 의한 손상
		전기저항식 철근접착형 센서	8	8 (100.0%)	0 (0.0%)	
센텀시티 지하차도 현장 (2000)	개단강관말뚝 ($\phi = 609\text{mm}$)	변형봉센서	3	3 (100.0%)	0 (0.0%)	
		전기저항식 강관접착형 센서	46	41 (89.0%)	5 (11.0%)	· 용접 작업시 열에 의한 손상 · 항타에 의한 손상
남향대교 현장 (1997)	개단강관말뚝 ($\phi = 609\text{mm}$)	전기저항식 강관접착형 센서	52	49 (94%)	3 (6%)	· 용접 작업시 열에 의한 손상 · 항타에 의한 손상

비고 : 작동개수/오작동 및 작동불량개수 항의 ()안의 수치는 백분율을 나타냄

착형 센서)의 안정성이 상대적으로 우수한 것으로 판단되었다. 포항 연일대교 현장에서는 전기저항식 철근접착형 센서와 변형봉 센서를 설치하였다. 여기서, 전기저항식 철근접착형 센서의 경우는 오작동 개수가 나타나지 않았으며, 변형봉 센서의 경우 10.0%가 관찰되었다. 센텀시티 지하차도 현장에서는 전기저항식 변형봉 센서와 전기저항식 강관접착형 센서만을 설치하였으며, 손상률은 8.3%이내였다. 기타 현장에서 사용한 전기저항식 센서들의 현장 적용성 분석 결과도 표 1에 같이 수록하였다.

2.2 변형봉 센서의 제작 절차 및 설치 방법

변형봉 센서의 구성재료는 그림 1에서 볼 수 있으며, 강제 변형봉, 동종의 전기저항식 변형률계 4개, 강제 변형봉 표면 청소용품, 느리게 경화되는 강력접착제, 방수용 코팅재, 방수용 코팅재 및 도포재, 2차 방수용 실리콘 등으로 구성되어지며, 반드시 그림 2(a)와 같은 완전결선회로를 형성하여야 한다. 또한 변형봉 센서의 상세한 제원은 그림 3에 도시하였다.

전기저항식 변형봉 센서의 제작 과정은 다음과 같다. 먼저, 강제 변형봉의 표면을 연마하여 불순물을 제거하고

준비된 변형률계를 강력접착제로 강제 변형봉의 표면에 접착시킨다. 경화가 완료되면 4개의 변형률계에 연결된 터미널을 이용하여 완전결선회로를 이루게 한 후 인입용 전선과 인출용 전선을 연결한 후 센서부와 연결전선들이 대기에 노출되지 않도록 방수 처리를 하고 24시간 경과 후 고무패드(또는 아스팔트 패드)를 이용하여 방수처리를 한 다음 절연 테이프로 고무패드 위를 잘 감싸맨다.

변형봉 센서는 구조용 부재의 축방향에 평행하게 설치되어야 하는데, 콘크리트 센서의 경우 콘크리트에 확

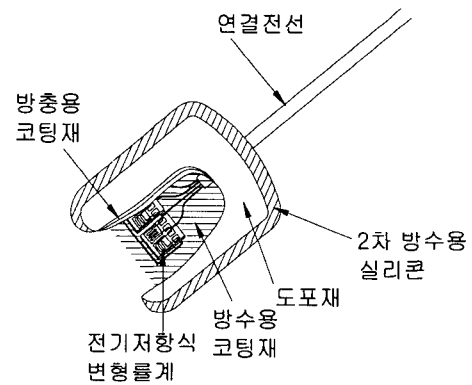
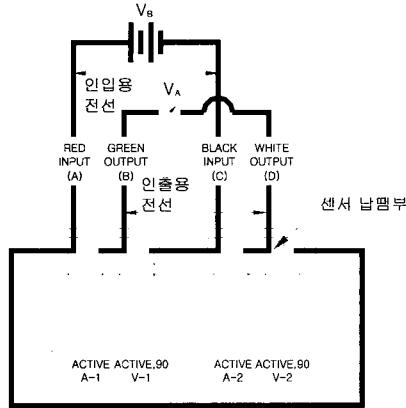


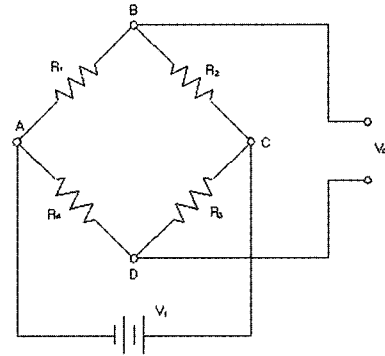
그림 1. 전기저항식 변형봉 센서의 절개도

실하게 매설되어야 하며 철근용 센서의 경우 구조용 부재와 같이 거동할 수 있도록 구조용 부재에 튼튼하게 고정되어야 한다. 이때, 구조용 부재에 고정할 경우에는 강재로 된 설치용 블록을 사용하여야 하는데, 현장타설

말뚝의 철근용 센서는 주철근에 마운틴 블록을 양쪽으로 고정시켜 설치하며 설치한 모습은 그림 4(a)와 같으며, 강관 내부 속 채움한 현장타설말뚝의 콘크리트용 센서는 주철근에 마운틴 블록을 한쪽으로만 고정시켜 설

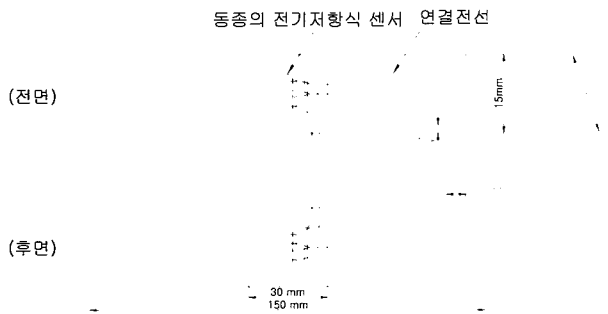


(a) 회로도

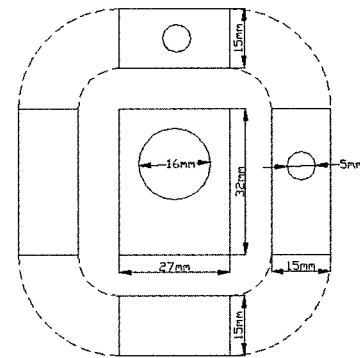


(b) 완전결선회로도

그림 2. 전기저항식 변형률 센서의 회로도

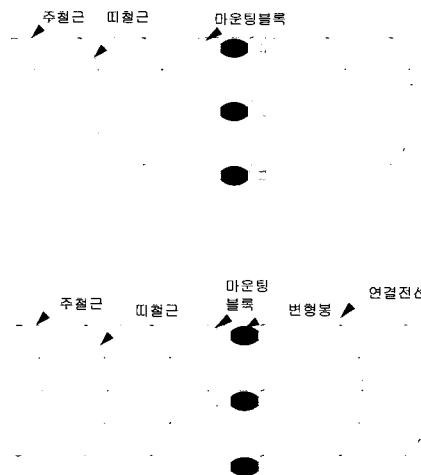


(a) 변형률 센서의 제원

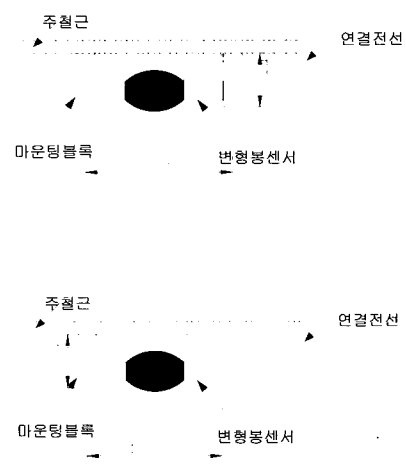


(b) 마운틴 블록 제원

그림 3. 변형률 센서와 마운틴 블록의 상세 제원



(a) 철근에 설치한 모습



(b) 콘크리트에 설치한 모습

그림 4. 변형률 센서를 현장타설말뚝에 설치한 모습

치하며, 매설된 모습은 그림 4(b)와 같다. 이렇게 설치된 변형봉 센서는 철근콘크리트 부재와 일체로 거동하게 되므로 각 부재에 발생하는 변형률, 응력 및 하중을 측정하는데 사용될 수 있다(최용규 등, 2000).

또한, 변형봉 센서의 장점은 실제 구조물의 축방향 변형률을 직접 계측할 수 있고, 측정 정도가 높다. 그리고, 고진동수의 동적 변형률의 측정이 가능하며, 현장 설치가 간편하고 지중매설시 방수, 방충처리에 대한 안정성이 우수하다. 단점은 센서와 연결전선의 보호용 강재(ㄷ형강 채널)의 용접시 열에 의한 손상이 있을 수도 있다.

3. 변형봉 센서의 검증 실험

검증 실험은 4단계 실험으로 구분하여 수행하였다. 1, 2 단계 실험에서는 진동식 센서와 전기저항식 센서의 적용 가능성을 확인하여 사용 가능한 센서를 선정하는 것이 목적이었다. 3, 4단계 실험에서는 선정된 변형봉 센서를 이용하여 축하중을 산정할 경우 사용될 특성치를 결정하는 것이 목적이었다.

1단계 실험에서는 설치가 간편한 것으로 알려져 있는 진동식 센서들의 말뚝기초에 대한 적용 가능성을 검증하는 것이 목적이었으며, 2단계 실험에서는 1단계 실험

에서 선정된 진동현식 센서와 전기저항식 센서들(자체 제작된 변형봉 센서와 변형판 센서) 중 적용성이 우수한 센서를 선정하는 것이 목적이었다.

말뚝의 축하중 산정을 위하여 변형봉 센서의 브리지 계수(Bridge factor)와 콘크리트의 탄성계수(E_c)가 필요하였는데, 변형봉 센서와 무근 콘크리트공시체에 대한 압축강도시험을 실시하여 결정하였다. 3단계 실험에서는 변형봉 센서의 변형률 측정시 사용될 브리지 계수를 결정하였고 4단계 실험에서는 콘크리트 부재의 축하중 결정시 사용될 콘크리트 부재의 탄성계수를 결정하였다.

검증 실험 수행 내용을 표 2에 요약하였다.

3.1 진동식 센서 검증실험

기존의 진동식 센서들의 적용성을 확인하기 위하여 진동현식 센서(VW)와 진동띠식 센서(VS)를 매설한 공시체를 A현장에서 제작하였다. 먼저 철근에 1개의 마운팅 블록과 2개의 마운팅 블록을 용접하여 진동식 센서의 끝단을 끼워 L형 렌치로 고정하였다. 이렇게 해서 진동식 센서의 한 끝만 고정한 경우는 콘크리트용 센서가 되고 진동식 센서의 양끝을 고정시킨 것은 철근용 센서가 된다. 그리고, 철근을 연직으로 모울드 중앙에 맞춘

표 2. 검증 실험 요약표

실험종류	실험 이름	실험 목적
1단계	진동식 센서 검증용 실험	· 기존의 진동식 센서들 (진동현식 및 진동띠식 센서)의 적용성 확보를 통한 센서 종류 선정
2단계	전기저항식 센서 검증용 실험	· 전기저항식 센서들 (변형봉 센서와 변형판 센서)에 대한 센서 종류 선정
3단계	변형봉 센서 압축재하 실험	· 변형봉 센서의 브리지 계수 결정
4단계	무근공시체 압축재하 실험	· 대상 현장에서 사용한 콘크리트의 탄성계수 (E_c) 결정

표 3. 진동현식 센서(VW) 및 진동띠식 센서(VS) 매설용 공시체 실험

공시체 번호	분류 기호	센서 종류		매설된 센서 종류	재하 반복횟수	파괴실험실시여부	비고
		C	S				
CS - 1	VWC - 1	○	×	VW	5	×	센서손상
	VSC - 1	○	×	VS	5	×	
CS - 2	VWC - 2	○	×	VW	5	×	
	VSC - 2	○	×	VS	5	×	
SS - 1	VWS - 1	×	○	VW	5	×	센서손상
	VSS - 1	×	○	VS	5	×	센서손상
SS - 2	VWS - 2	×	○	VW	5	×	센서손상
	VSS - 2	×	○	VS	5	×	

주 : 표 3에 사용한 분류기호는 다음과 같다.
 $XX^1X^2 - X^3$

여기서, ¹⁾ : 센서 종류 (VW : 진동현식, VS : 진동띠식)
²⁾ : 측정 항목 (C : 콘크리트 변형률, S : 철근 변형률)
³⁾ : 일련번호

후 콘크리트 배합 강도가 30 MPa인 A현장의 콘크리트를 넣어 공시체를 제작하였다. 표 3은 진동현식(VW) 및 진동떠식(VS) 센서용 공시체 실험 계획을 나타내었다. 각각 2개의 콘크리트용 센서와 철근용 센서를 매설한 공시체를 제작하였으나 일부 센서는 설치 당시 손상되어 측정이 제대로 되지 않았다. 공시체에 대한 일축압축 재하시험을 실시하여 변형률을 측정하였다. 진동식 센

서 검증을 위한 내용을 표 3에 요약하였다.

3.2 전기저항식 센서 검증실험

전기저항식 센서 검증실험으로서 진동현식 센서와 전기저항식 센서들(변형봉 센서와 변형판 센서)에 대한 응력-변형률 곡선의 탄성변형 거동과 적용성을 확인하기 위한 실험을 실시하였다. 변형봉 센서(ER), 변형판 센서(EP) 그

표 4. 2차 예비 실험

공시체 번호	분류 기호	형상	보호구 설치여부	매설된 센서 종류	반복재하 횟수
CN - 1 (콘크리트)	VWCN - 1	원형	×	진동현식 (VW)	3
	ERCN - 1		×	변형봉 (ER)	2
	EPCN - 1		×	변형판 (EP)	2
CP - 2 (콘크리트)	VWCP - 2	정방형	○	진동현식 (VW)	3
	ERCN - 2		○	변형봉 (ER)	3
	EPCP - 2		○	변형판 (EP)	3
SN - 3 (철근)	VWSN - 3	원형	×	진동현식 (VW)	3
	ERSN - 3		×	변형봉 (ER)	2
	EPSN - 3		×	변형판 (EP)	2
SP - 4 (철근)	VWSP - 4	정방형	○	진동현식 (VW)	3
	ERSP - 4		○	변형봉 (ER)	3
	EPSP - 4		○	변형판 (EP)	3

주 : 표 4에서 사용한 분류기호에 대한 설명은 다음과 같다.

$$XX^1X^2X^3 - X^4$$

- 여기서, ¹⁾: 센서종류 (VW : 진동현식, ER : 전기저항식 변형봉, EP : 전기저항식 변형판)
²⁾: 측정항목 (C : 콘크리트 변형률, S : 철근 변형률)
³⁾: 보호구 사용여부 (N : 미사용, P : 사용)
⁴⁾: 일련번호

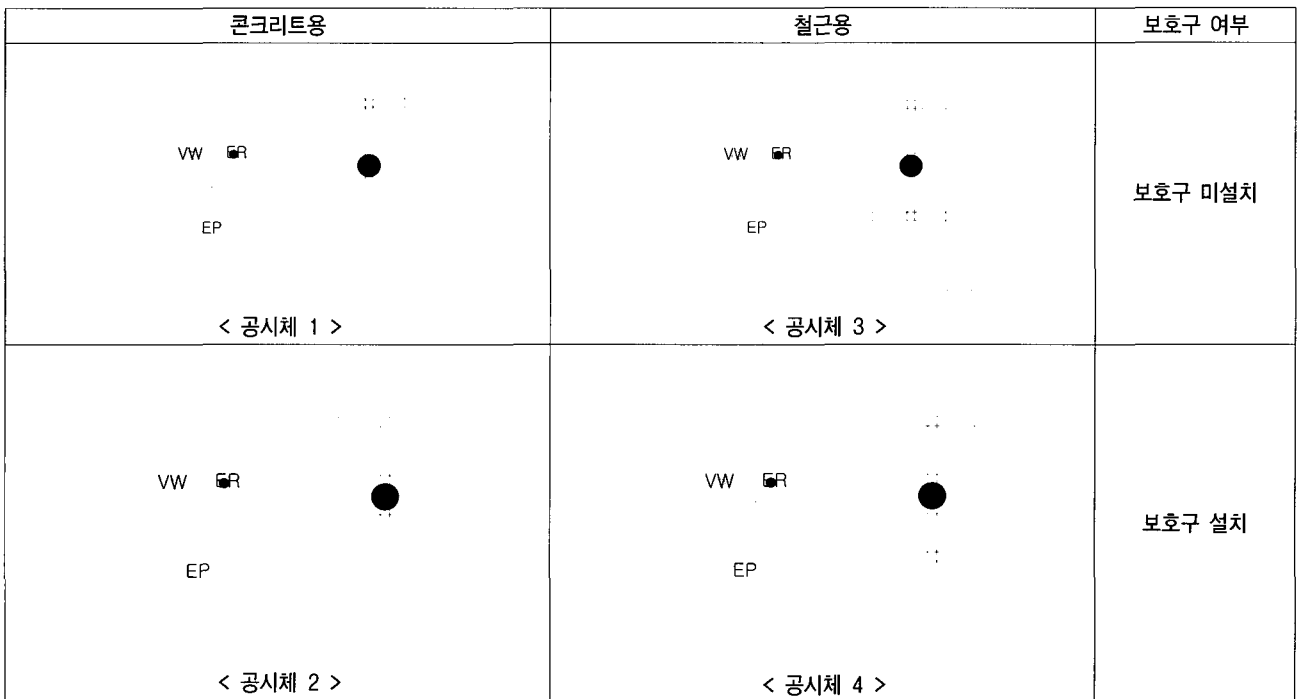


그림 5. 시험 공시체와 센서들의 배치 상태

리고 진동현식 센서(VW)들을 매설하여 공시체를 제작하였는데, 각각 철근과 콘크리트 센서용으로 한 개씩 제작하였다. 각 센서들에는 보호구 설치 조건(설치 및 미설치)을 달리하였으며, 공시체의 형상을 원주형과 각주형으로 구분하여 제작하였다. 모두 4개의 공시체를 제작하였다.

먼저, 콘크리트 센서용 공시체에서는 한 개의 마운팅블록을 철근(D32)에 용접하여 고정시켰다. 그리고, 각 공시체에는 진동현식 센서, 변형봉 센서 그리고 변형판 센서를 120° 간격으로 D32의 철근 주위에 설치하였으며, 보호구 설치조건을 변화시켜 2개의 공시체를 제작하였다. 철근용 센서의 경우 2개의 마운팅블록을 사용하여 센서의 양 끝을 철근(D32)에 고정시켰으며, 철근과 일체로 거동할 수 있도록 하기 위하여 마운팅 블록을 철근에

튼튼하게 용접하였다. 직경 150 mm이고 높이 300 mm인 공시체 모델드의 중심축에 철근을 연직방향으로 배치하였다. 그리고 실험실에서 배합한 배합강도가 30 MPa인 콘크리트를 넣어 공시체를 제작하였다. 표 4에 구체적인 실험 내용을 수록하였으며, 그림 5에는 시험공시체와 센서들의 배치 상태를 모식적으로 나타내었다.

3.3 변형봉 센서 압축재하 실험

변형봉 센서에 대한 압축재하 실험의 목적은 센서의 적용성을 확인하고 변형봉 센서의 브리지 계수를 결정하기 위한 것이다. 직경 15mm, 길이 150mm의 변형봉에는 4개의 전기저항식 변형률계를 이용한 완전결선형

표 5. 변형봉 센서의 압축재하 시험

센서 번호	분류 기호	방충재료사용 여부		반복재하 횟수	파괴실험 실시여부	비고
		A	R			
ERA - 1	ERAQ(V)-1	○	×	3	×	
	ERAQ(H)-1					
	ERAF-1					
ERA - 2	ERAQ(V)-2	○	×	3	×	
	ERAQ(H)-2					
	ERAF-2					
ERA - 3	ERAQ(V)-3	○	×	3	×	
	ERAQ(H)-3					
	ERAF-3					
ERA - 4	ERAQ(V)-4	○	×	1	×	편심으로 인한 변형봉의 손상
	ERAQ(H)-4					
	ERAF-4					
ERR - 1	ERRQ(V)-1	×	○	3	×	
	ERRQ(H)-1					
	ERRF-1					
ERR - 2	ERRQ(V)-2	×	○	2	×	
	ERRQ(H)-2					
	ERRF-2					
ERR - 3	ERRQ(V)-3	×	○	1	×	편심으로 인한 변형봉의 손상
	ERRQ(H)-3					
	ERRF-3					
ERR - 4	ERRQ(V)-4	×	○	2	×	
	ERRQ(H)-4					
	ERRF-4					

주 : 표 5에서 사용한 분류기호는 다음과 같다.

$$XX^{(1)}X^{(2)}X^{(3)}(X)^{(4)} - X^{(5)}$$

- 여기서, ¹⁾ : 센서 종류 (ER : 전기저항식 변형봉센서)
²⁾ : 방충재 재료 (A : 아스팔트 방충패드, R : 고무 방충패드)
³⁾ : 결선 형태 (Q : 4분 회로, F : 완전결선 회로)
⁴⁾ : 4분회로의 센서 접착방향 (V : 연직방향, H : 수평방향)
⁵⁾ : 일련번호

(Full bridge circuited) 센서와 1개의 변형률계를 변형봉의 축방향과 횡방향으로 접착시켜 4분회로형(Quarter bridge) 센서 2개를 설치하였다. 여기서, 아스팔트 패드만 사용한 것과 고무패드만 사용한 것을 각각 4개씩 제작하였다. 시험순서는 먼저 공시체의 중심축을 가압판의 중심축에 일치시켰다. 그리고 일정한 속도로 단계별 하중(20, 40 kN)을 재하(Loading)하고 하중값을 기록한 다음 하중을 제거(Unloading)하는 과정을 3~4회 반복하였다. 변형봉 센서 8개를 위와 같은 방법으로 실험하였다. 변형봉 센서의 변형률은 공시체 중간 부분에 대한 평균 변형률을 측정하는 것이 정확한 실험방법이나 본 실험에서는 실제로 측정하지 못하였다. 따라서, 강재의 경우 재료의 성질이 균질하여 항복응력의 90% 정도까지는 탄성거동하는 것으로 알려져 있으므로 실제 작용된 하중의 크기와 시방서에서 규정한 탄성계수 값을 이용하여 계산한 변형률을 계산하였다. 실험 도중 변형봉의 축 중심과 재하대의 중심을 제대로 맞추지 못한 경우에는 압축재하 실험 도중 편심하중이 작용하여 변형봉 자체가 휘어지는 현상이 발생하기도 하였다. 표 5에 실험 내용을 나타내었다.

3.4 무근공시체 압축강도 시험

무근콘크리트 공시체에 대한 압축강도 시험은 콘크리트의 탄성계수(E_c)를 파악하기 위하여 실시하였다. 일반적인 계산공식에 의해 계산된 탄성계수($E_{c,cal}$)를 사용하지 않고, 현장에서 배합된 콘크리트를 이용하여 제작된 공시체에 대한 압축강도 시험에서 구한 탄성변형 구

간의 평균기울기를 탄성계수(E_c)로 이용하기 위한 것이다. 무근공시체는 A현장과 B현장에서 각각 제작하였다. A현장에서는 3개의 공시체를 제작하였는데 일부 공시체의 경우 시간의 경과에 따라 두번에 걸쳐 압축강도 시험을 하였다. B현장에서는 A현장과 동일한 방법으로 공시체 10개를 제작하였으며, 일부 공시체의 경우 두번에 걸쳐 압축강도 시험을 하였다. A현장의 경우 탄성거동 범위까지만 재하하여 콘크리트의 파괴강도를 확인하지 못하였으며 1개 공시체에 대하여 파괴강도를 확인하였다. 반면, B현장의 경우, 대부분의 공시체에 대하여 파괴될 때까지 하중을 재하하여 콘크리트의 파괴강도를 확인하였다. 표 6에 무근공시체에 대한 실험내용을 요약하였다.

시험순서는 먼저 준비된 공시체의 위·아래 각각

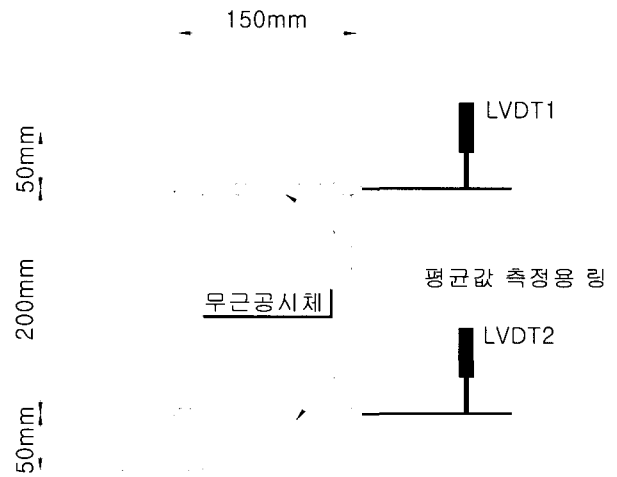


그림 6. 무근공시체 압축강도 시험 단면도

표 6. 무근공시체의 압축강도 시험

공시체 번호	반복재하 횟수	파괴실험 실시여부	비고
NC - 1	5	×	A현장 공시체 (1차 시험)
NC - 2	5	×	
NC - 3	5	×	
NC - 1'	4	○	A현장 공시체 (2차 시험)
YC - 1	3	×	B현장 공시체 (1차 시험)
YC - 2	3	×	
YC - 3	3	×	
YC - 4	1	○	
YC - 5	4	○	
YC - 6	4	○	
YC - 7	4	○	
YC - 8	4	○	
YC - 9	4	○	
YC - 10	4	○	
YC - 3'	2	○	B현장 공시체 (2차 시험)

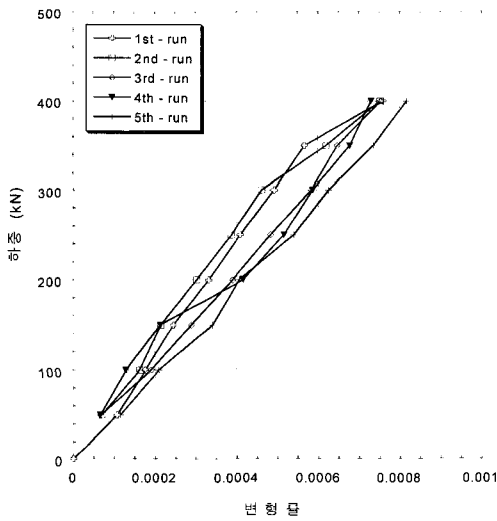
5cm정도 떨어진 위치에 평균 변위 측정용 링을 설치하고 링사이의 간격을 측정하였다. 그리고 하중재하시 전 단면에 동시에 접촉하도록 공시체의 중심축을 가압판의 중심에 일치시키고 변위 측정용 다이얼 게이지(또는 LVDT)를 각각 설치하였다. 공시체에 충격을 주지 않도록 일정한 속도(초당 200~300 kPa)로 하중을 가하고 각 하중단계별 변위를 기록한 다음 하중을 제거한 뒤 위 과정을 3~5회 반복 실시하였다. A현장 공시체 3개와 B현장 공시체 10개를 위와 같은 방법으로 실험하였다. 그림 6에는 무근공시체 압축재하시험 모습을 도시하였다.

4. 실험 결과 및 분석

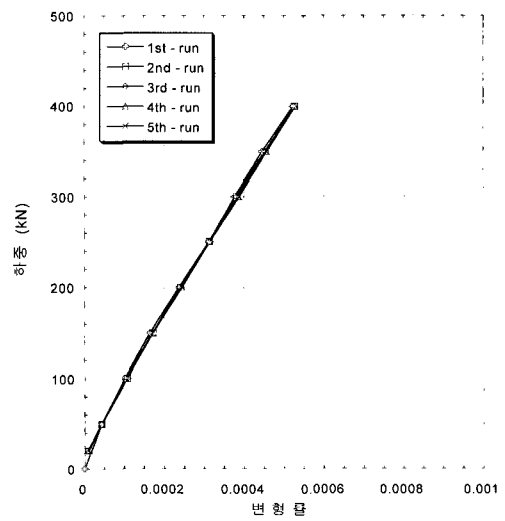
4.1 1단계 실험 결과 및 분석

진동현식(VW) 및 진동띠식(VS) 센서를 매설한 공시체에 대한 검증실험의 대표적인 결과를 그림 7과 8에 도시하였는데, 각 반복재하단계의 하중과 진동현식 및 진동띠식 센서의 변형률과의 관계를 나타내었다.

1단계 실험에서는 기성제품인 진동현식 센서와 진동띠식 센서의 적용성을 파악하기 위해 실험을 실시하였는데 그림 7과 8에서 알 수 있듯이 진동띠식 센서 보다는 진동현식 센서의 적용성이 좋았다. 진동띠식

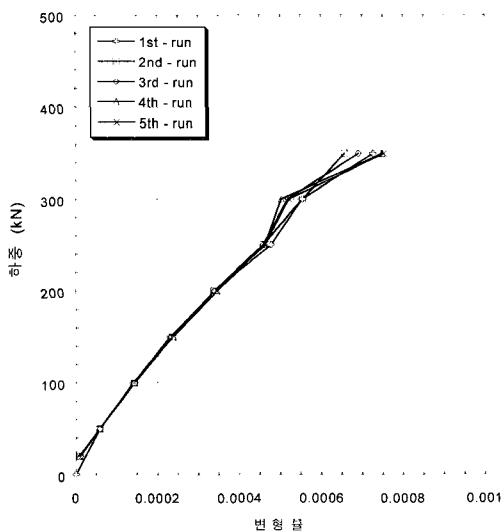


(a) VWC-1

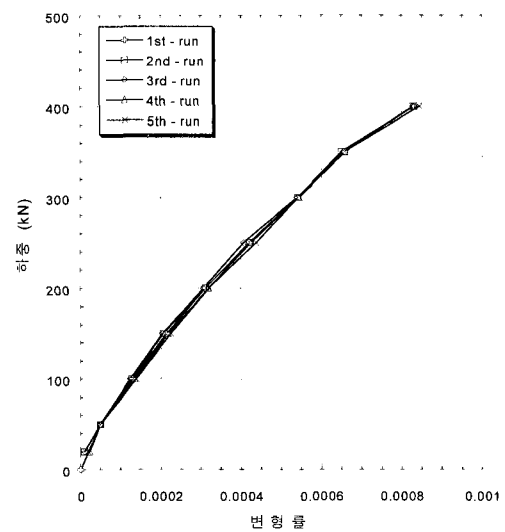


(b) VWC-2

그림 7. 진동현식 센서를 이용한 각 하중 단계에 따른 대표적인 하중 - 변형률 관계



(a) VSC-2



(b) VSS-2

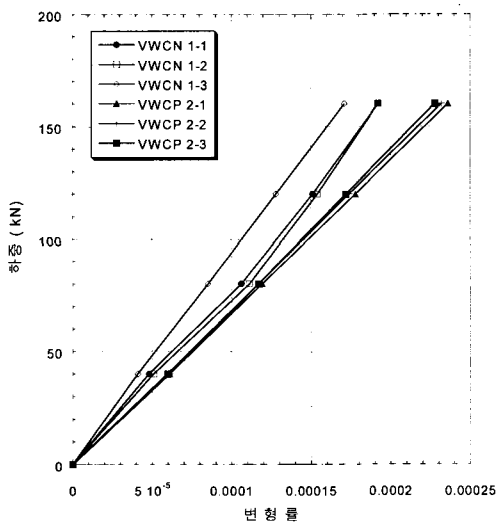
그림 8. 진동띠식 센서를 이용한 각 하중 단계에 따른 대표적인 하중 - 변형률 관계

센서의 경우 그림 8에서 볼 수 있듯이 탄성변형 구간에서도 하중-변형률 관계가 대체로 비선형적으로 나타나고 있으며 약 250 kN 이상의 하중에서는 매우 불안정하게 작동하였다. 그러나, 진동현식 센서의 경우 약간의 분산을 보이는 경향도 부분적으로 나타났으나 진동피식 센서보다는 안정적인 경향을 나타내었다. 표 1에서 언급한 바와 같이 진동식 센서의 경우 설치시의 손상과 방수 및 방충에 의한 손상 등으로 인하여 전기저항식 센서보다는 손실률이 대체로 높은 것으로 나타났다.

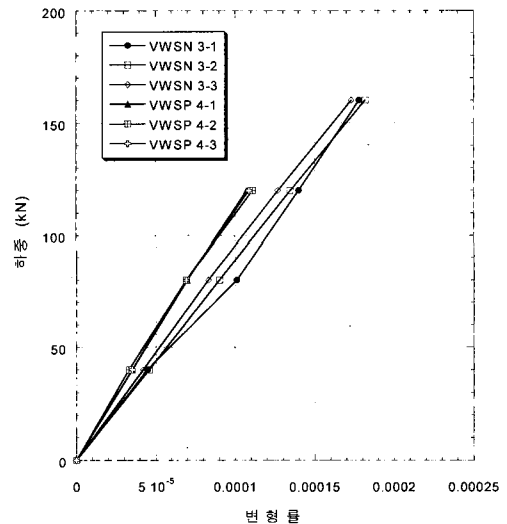
4.2 2단계 실험 결과 및 분석

2단계 실험용 공시체 검증 실험의 대표적인 결과를 그림 9~11에 도시하였는데, 진동현식 센서, 변형봉 센서, 그리고 변형판 센서에 대한 각 하중 단계의 하중-변형률 관계를 나타내었다. 또한, 각 그림에는 보호구가 설치된 센서(P)와 보호구가 설치되지 않은 센서(N)에 대한 실험결과를 함께 도시하였으며, 2~3회의 반복재하 실험 결과를 같이 도시하였다.

2단계 실험에서는 진동현식 센서, 변형봉 센서, 변형판 센서의 적용성을 파악하기 위한 실험을 실시하였는

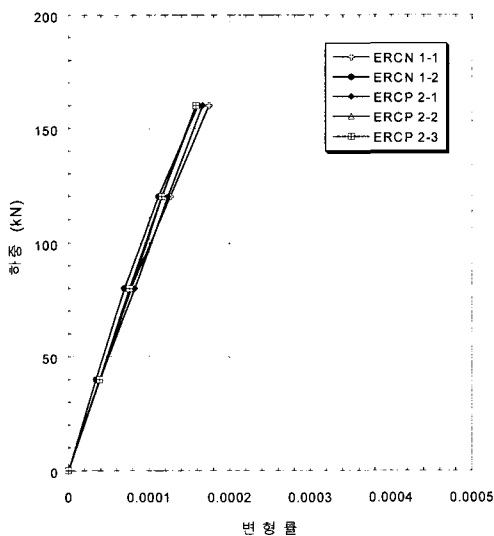


(a) 하중 - 변형률 곡선(콘크리트 센서용 공시체)

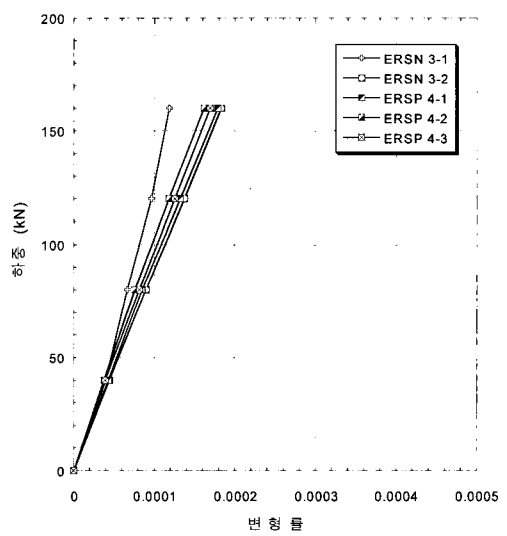


(b) 하중 - 변형률 곡선(철근 센서용 공시체)

그림 9. 진동현식 센서를 매설한 공시체에 대한 하중 - 변형률 곡선

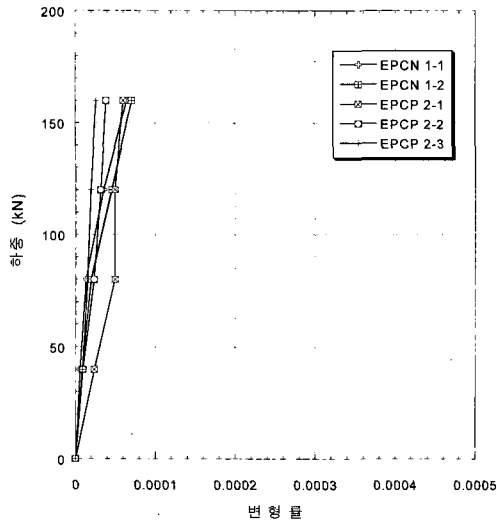


(a) 콘크리트 센서용 공시체

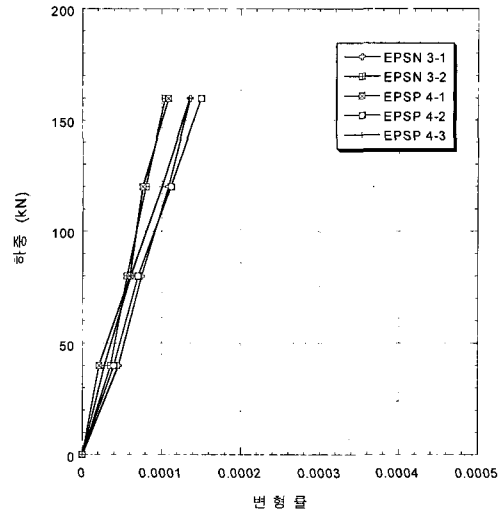


(b) 철근 센서용 공시체

그림 10. 변형봉 센서를 매설한 공시체에 대한 하중 - 변형률 관계



(a) 콘크리트 센서용 공시체



(b) 철근 센서용 공시체

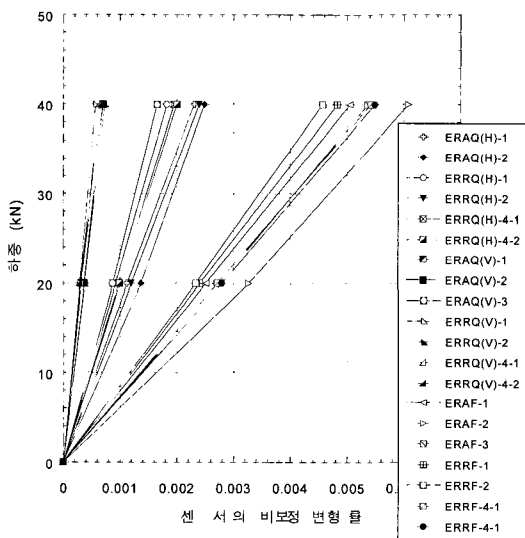
그림 11. 변형판 센서를 사용한 공시체에 대한 하중 - 변형률 관계

데, 그림 9~11에서 볼 수 있듯이 보호구의 사용 여부에 상관없이 변형봉 센서의 적용성이 가장 좋았다. 변형봉 센서는 각 하중 단계에 따른 변형률의 증가가 일정하게 선형적으로 나타난 반면 변형판 센서의 경우 센서의 양 끝단을 고정시킨 철근용 센서는 어느 정도 탄성적인 거동을 보였으나 센서의 한 끝단을 고정시킨 콘크리트용 센서는 탄성적인 거동을 나타내지 못하였다. 따라서, 각 하중 단계의 하중과 변형률 관계에서 탄성적인 거동을 잘 반영하고 있는 전기저항식 변형봉 센서의 적용성이 가장 좋은 것으로 판단하였다.

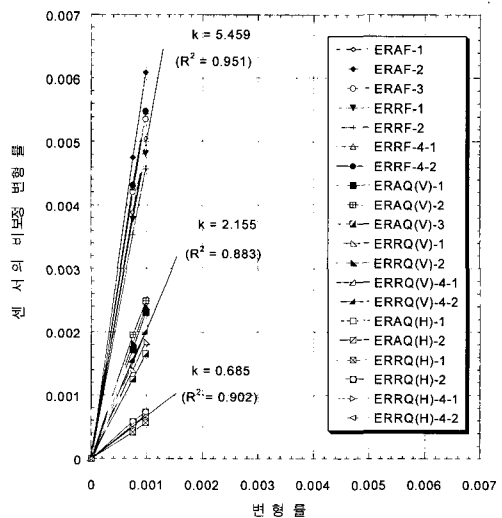
4.3 변형봉 센서의 브리지 계수 결정 실험 결과 및 분석

변형봉 센서에 대한 압축재하 실험 결과를 그림 12에 도시하였는데, 방층 재료를 구분하지 않고 도시하였다. 그림 12의 (a)에는 재하하중과 센서의 비보정 변형률의 관계를 도시하였으며, (b)에는 센서의 비보정 변형률과 변형률과의 관계를 도시하였다.

변형봉 센서의 압축재하 실험 결과로부터 각 결선방식에 따른 변형률 보정계수 k 를 구하였다. 아스팔트패드를 사용한 경우 변형률 보정계수는 완전결선형 전기저항식 변형봉 센서의 경우 5.66, 수직방향 1게이지 변형



(a) 하중 - 센서의 비보정 변형률 관계



(b) 센서의 비보정 변형률 - 변형률 관계

그림 12. 변형봉 센서에 대한 실험 결과의 요약

봉 센서의 경우 2.20, 수평방향 1게이지 변형봉 센서의 경우 0.69였다. 고무패드를 사용한 경우, 변형을 보정계수는 완전결선형 변형봉 센서의 경우 5.26, 수직방향 1게이지의 경우 2.11, 그리고 수평방향 1게이지의 경우 0.68이었다. 아스팔트 패드를 사용한 경우와 고무패드를 사용한 경우의 변형을 보정계수는 거의 비슷하였으므로 방층 재료의 차이에 따른 보정은 필요 없는 것으로 판단하였다. 따라서, 평균적인 변형을 보정계수를 완전결선형의 경우 5.46, 수직방향 1게이지의 경우 2.16, 그리고 수평방향 1게이지의 경우 0.69로 결정할 수 있었다.

4.4 콘크리트의 탄성계수 결정 실험 결과 및 분석

콘크리트 공시체 압축강도 시험 결과를 통하여 제시된 각 탄성계수의 정의는 다음과 같으며, 그림 13에 모식적으로 나타내었다.

- E_m : 탄성 구간내의 평균접선 탄성계수
- E_i : 초기접선 탄성계수
- E_t : 파괴강도의 1/3점에서의 접선 탄성계수
- $E_{1/2}$: 할선 탄성계수(압축파괴강도의 50%의 응력까지의 탄성계수)
- $E_{1/3}$: 할선 탄성계수(압축파괴강도의 33%의 응력까지의 탄성계수)
- E_f : 초기파괴 탄성계수
- E_{fcal} : 파괴시 탄성계수(계산식 $E = 15,000 \sqrt{f_{ck}}$ '으로 구한 탄성계수)

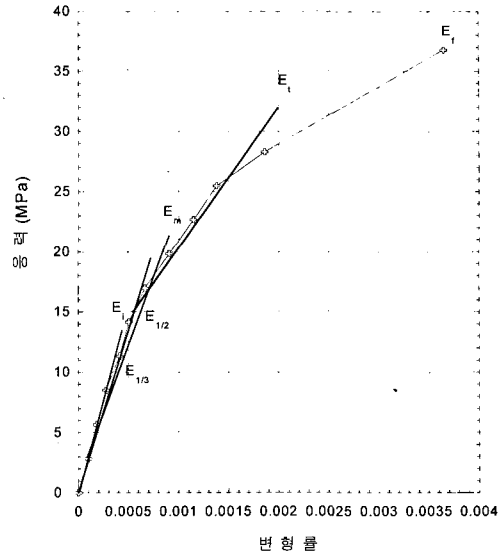
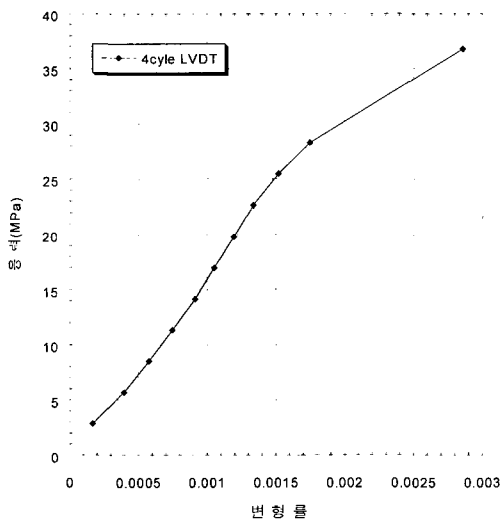


그림 13. 여러 가지 방법들에 의하여 정의된 탄성계수

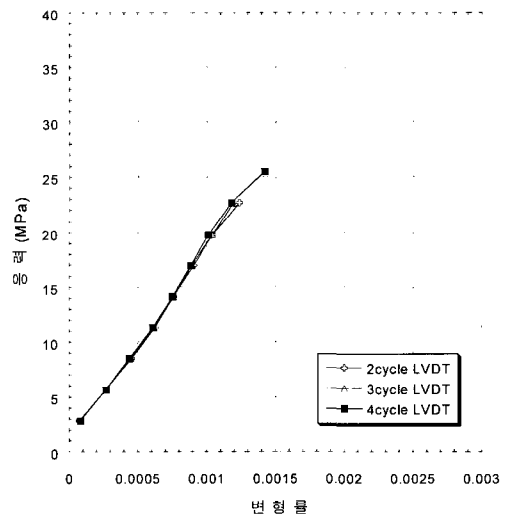
- E_{cal} : 계산식으로 구한 탄성계수($E = 15,000 \sqrt{f_{ck}}$)
- f_i : 초기 탄성구간의 압축응력
- f_r : 최종 탄성구간의 압축응력
- f_{ck}' : 압축강도 시험에서 구한 파괴강도
- f_{ck} : 콘크리트 설계기준강도

무근공시체에 대한 대표적인 압축강도 시험 결과를 그림 14에 도시하였다. 각 그림에는 응력 - 변형률의 관계를 나타내었는데, B현장에서 제작한 무근공시체에 대한 대표적인 응력 - 변형률 관계를 나타내었다.

본 연구에서는 말뚝시공현장에 타설한 콘크리트를 이용하여 제작된 공시체에 대한 압축강도 시험으로부터



(a) YC-3'



(b) YC-6

그림 14. B현장에서 제작한 무근공시체에 대한 응력 - 변형률 관계의 대표적인 예

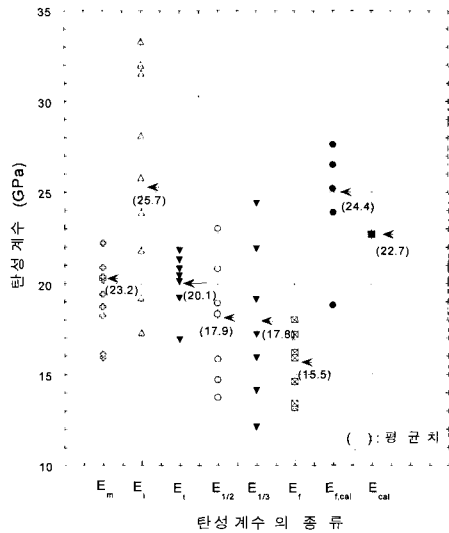


그림 15. 탄성계수의 범위 (B현장의 경우)

터 탄성계수를 결정하는 것이 타당한 것으로 판단되었다. 실제말뚝에서 수행된 축하중 측정결과를 토대로 반경험적으로 콘크리트의 탄성계수를 추정하였는데 여기서, $(0.2 \sim 0.6)f_{ck}$ 의 응력범위에 해당하는 평균 접선기울기($E_{c,m}$)가 가장 신뢰성 있는 값으로 나타났다. A현장 공시체의 탄성계수는 4개의 공시체에 대한 평균값으로 19.75 GPa을 선정하였으며 B현장 공시체의 탄성계수는 10개의 공시체에 대한 평균값으로 23.2 GPa을 선정하였다. 그림 15에는 B현장에서 제작된 공시체에 대한 압축강도 시험으로부터 결정한 여러 가지 탄성계수값을 도시하였다. 여기서, 시방서 규정에 의해 구한 탄성계수($E_{c,cal}$)는 압축강도 시험에서 측정한 탄성계수($E_{c,m}$)의 약 1.1배 정도의 차이를 나타내었다.

5. 결론

강관 내부 속채움한 현장타설말뚝의 말뚝축하중 산정을 위하여 각 구성부재 (강관 및 콘크리트)별 변형률 측정에 활용할 수 있는 전기저항식 변형봉 센서 검증시험

을 수행하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 여러현장에서 수행된 말뚝축하중 측정시험 사례를 분석한 결과, 본 연구에서 현장타설말뚝의 축하중 측정용 센서로 사용한 전기저항식 변형봉 센서는 현장에서 설치작업이 용이하였고, 현장 작업시 손상을 최소화할 수 있는 장점이 있었다. 또한, 현장 적용성도 기존의 진동식 센서보다 훨씬 우수하였다.
- (2) 변형봉 센서를 사용하여 말뚝축하중을 산정할 경우 콘크리트의 탄성계수를 신뢰성있게 추정해야 하는데 현장에서 제작한 콘크리트 공시체 압축강도 시험으로 구하는 방법을 제안하였다. 즉, 응력-변형을 관계가 선형적으로 나타나는 구간인 $(0.2 \sim 0.6)f_{ck}$ 의 응력 범위에 해당하는 평균접선기울기를 사용하도록 제안하였다.

참고 문헌

1. 동아건설산업주식회사 (2000), “포항연일대교 개채공사 말뚝정재 하시험 보고서”, 2000. 9.
2. 부산광역시 건설본부 (2000), “광안대로 건설공사 대구경 말뚝 정재하시험과 수치해석을 통한 말뚝기초의 안정성 검토 보고서”, 2000. 2.
3. 이원제 (2000), “광섬유 센서를 이용한 매입말뚝의 하중전이측정 및 지지력 특성연구”, 고려대학교 대학원 토목환경공학과 공학박사학위 논문.
4. 정성기 (2001), “변형봉센서를 이용한 대구경 현장타설말뚝의 하중전이 거동에 관한 연구”, 동아대학교 대학원 박사학위 논문, 2001. 8.
5. 최용규, 정창규, 김상일 (2000), “안전결선회로를 가진 전기저항식 변형봉센서”, 대한민국 특허 출원번호 10-2000-035816.
6. 최용규 (2000), “부산센텀시티 지하차도 건설공사의 강관말뚝정재하시험 및 하중전이측정 연구 보고서”, 2000. 10
7. O'Neill, M. W. and Reese, L. C. (1999), “Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods”, Publication No. FHWA-IF-99-025(ADSC-TL-4).

(접수일자 2002. 12. 30, 심사완료일 2003. 9. 20)