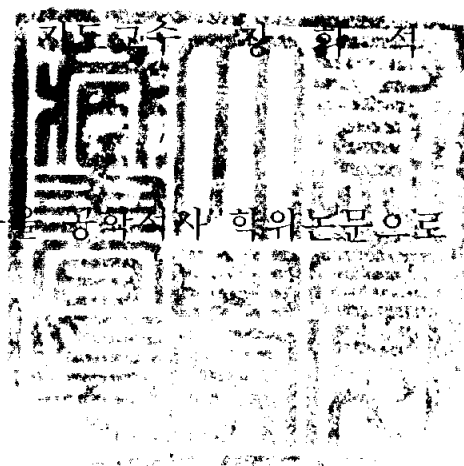


공학석사 학위논문

초기양생 중에 수직방향 연속진동을
받은 콘크리트의 강도 특성에
관한 실험적 연구

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2004년 2월

부경대학교 대학원

토목공학과

전 덕 준

전덕준의 공학석사 학위논문을 인준함

2003년 12월 26일

주 심 공학박사

국 승 규



위 원 공학박사

이 환 우



위 원 공학박사

장 희 석



목 차

그림 차례.....	ii
표 차례.....	iii
Abstract.....	iv
제 1 장 서론.....	1
1.1 연구배경 및 목적.....	1
1.2 연구범위 및 방법.....	2
제 2 장 문헌고찰.....	3
제 3 장 실험.....	16
3.1 사용재료와 배합설계.....	16
3.2 시험체 제작.....	17
3.3 실험변수.....	20
3.4 진동가력장치.....	20
3.5 실험방법.....	24
제 4 장 실험결과 및 분석.....	25
4.1 강도측정 결과.....	25
4.2 실험결과 분석.....	44
4.3 진동수의 변화에 따른 압축강도의 영향.....	45
4.4 재료분리 조사.....	49
제 5 장 결론.....	52
참고문헌.....	54

그림 차례

그림 2.1 실험장치의 개략도.....	3
그림 2.2 레이몬드 말뚝에서 채취된 코아의 위치.....	4
그림 2.3 진동을 받는 공시체의 배치도.....	5
그림 2.4 진동에 따른 콘크리트의 초기 압축강도의 경향.....	7
그림 2.5 진동가력시점의 변화에 따른 콘크리트 강도의 변화.....	11
그림 2.6 진동가력시간에 따른 압축강도의 변화.....	12
그림 2.7 진동가력시간에 따른 쏘갸인장강도의 변화.....	13
그림 2.8 진동가력시간에 따른 부착강도(수평-상)의 변화.....	13
그림 2.9 진동가력시간에 따른 부착강도(수평-하)의 변화.....	14
그림 2.10 진동가력시간에 따른 부착강도(수직)의 변화.....	14
그림 3.1 부착강도 측정용 시험체.....	17
그림 3.2 시험체명의 표기에 대한 설명.....	18
그림 3.3 진동가력장치의 개략도.....	21
그림 3.4 진동판의 제원.....	22
그림 3.5 진동가력장치의 사진.....	23
그림 4.1 진동가력시간에 따른 압축강도의 변화.....	26
그림 4.2 진동가력시간에 따른 압축강도의 변화 상세도.....	27
그림 4.3 진동가력시간에 따른 쏘갸인장강도의 변화.....	28
그림 4.4 진동가력시간에 따른 쏘갸인장강도의 변화 상세도.....	30
그림 4.5 진동가력시간에 따른 부착강도(수평-상)의 변화.....	34
그림 4.6 진동가력시간에 따른 부착강도(수평-상)의 변화 상세도.....	34
그림 4.7 진동가력시간에 따른 부착강도(수평-하)의 변화.....	37
그림 4.8 진동가력시간에 따른 부착강도(수평-하)의 변화 상세도.....	37
그림 4.9 진동가력시간에 따른 부착강도(수직)의 변화.....	40
그림 4.10 진동가력시간에 따른 부착강도(수직)의 변화 상세도.....	41
그림 4.11 진동속도(Hz)의 변화에 따른 강도의 영향.....	46
그림 4.12 진동속도(Hz)의 변화에 따른 강도의 영향 상세도.....	46
그림 4.13 기준공시체와 12시간 진동을 가한 쏘갸인장강도 측정용 시험체의 단면.....	49

표 차례

표 2.1 진동속도의 변화에 따른 압축강도.....	3
표 2.2. 시험체의 제원.....	8
표 2.3 시험체의 재하방법.....	9
표 2.4 단순보 거동시 시험체의 극한하중.....	9
표 2.5 연속보 거동시 시험체의 극한하중.....	10
표 2.6 피로강도(피로하중 반복회수 50만회).....	10
표 2.7 문헌고찰 결과표.....	15
표 3.1 골재의 물리적 특성치.....	16
표 3.2 배합설계표.....	16
표 3.3 실험변수.....	19
표 3.4 진동속도의 제원.....	20
표 3.5 기존의 교량에서 측정 한 진동 자료.....	21
표 4.1 압축강도의 증감율.....	26
표 4.2 쏘갠인장강도의 증감율.....	29
표 4.3 부착강도(수평)의 증감율.....	33
표 4.4 부착강도(수직)의 증감율.....	40
표 4.5 진동속도(Hz)의 변화에 따른 압축강도의 증감율.....	45

An Experimental Study on the Strength Characteristics of Concrete Subjected to Vertical Continuous Vibration during Initial Curing Period

Duk-Jun Jeon

*Department of Civil Engineering, Graduate School.
Pukyong National University*

Abstract

In construction site, there are some occasions where the concrete under initial curing is being affected by vibrations from nearby construction site or other vibration source. In this case, it is judged that these vibrations are giving effects to the concrete. According to the concrete code and design specification, concrete must be protected from any damaging actions during its initial curing stage. However, up to now, only partly there have been introduced some informations about vibration velocity allowed according to the time elapsed after casting concrete. Thus, it is required to establish an accurate evaluation concerning these vibrations that concrete under initial curing might be undertaken, and through this evaluation, it is also necessary to build up construction specification.

To cover the topics mentioned above, in this study following factors were chosen as experimental variables; vibrating time and vibrating velocity. The vibrating time was consisted of 3, 6, 9, 12 hrs. considering final set time of cement. And vibrating velocity was consisted of 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 kine being based on field survey and literature study.

Vibrating equipment was consisted of actuator and shaking table attached on it. Vertical direction vibration was given soon after casting

concrete, and strengths investigated after 28-days curing were compressive strength, splitting tensile strength, and bond strength. In addition, the material separation was investigated by observation of fracture surface of the specimen after test of splitting tensile strength.

From the above study, following conclusions were obtained.

- 1) The reduction ratio of the compressive strength was generally increased as the vibrating velocities increased but there was no constant tendency according to variation of the vibrating times.
- 2) The tensile strength was increased in the vibrating velocities of 0.25 kine and independent with the vibrating times, but in case of more higher vibrating velocities the strength showed generally decreasing tendency regardless of the vibrating times.
- 3) The bond strength was increased only in the range of 0.25~1.0 kine regardless of the vibrating times but was generally decreased in any other vibrating velocities. And the reduction ratio of bond strength was higher in upper placed horizontal steel bar than one placed in lower position.
- 4) It has been judged that there are no occurrence of material separation in the specimen due to the initial vibrations.

Key words : Concrete Strength, Vibrating velocity, Vibrating time, Material Separation

제 1 장 서론

1.1 연구배경 및 목적

최근의 차량 증가에 대한 대책으로 기존 교량의 차선 확폭을 하는 경우에서와 같이, 건설현장에서는 초기양생 중에 있는 콘크리트가 주위의 다른 진동원 혹은 인접한 공사현장으로부터 진동을 받는 경우가 흔히 발생한다. 즉, 건설 현장의 시공성에 절대적으로 의존하는 콘크리트 구조물이 초기 양생시에 주변의 진동으로부터 충분히 보호된다는 것은 어려운 경우가 많다. 그 결과 이러한 진동은 초기 양생중인 콘크리트에 영향을 줄 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 콘크리트 표준시방서¹⁾ 및 도로교 표준시방서²⁾에 따르면 콘크리트는 양생기간 중에 예상되는 진동, 충격, 하중 등의 유해한 작용으로부터 보호되어야 한다고 규정만 되어있고 아직까지 그 제한치는 명시되어 있지 않다. 따라서 콘크리트 초기 양생 기간 중에 발파 또는 파일 항타 등을 병행해야 하는 작업은 시공에 제한을 받게되고, 그 결과 공기지연 등으로 이어질 수 있음을 예상할 수가 있다.^{3,4)}

국외에서는 현장 타설 콘크리트 말뚝이 초기양생도중 진동을 받는 경우에 진동이 강도에 미치는 영향에 관한 연구가 이미 1929년부터 행해져 왔다.⁵⁾ 이 후로 기계진동, 발파진동, 교통진동 등의 다양한 진동에 대한 현장 실험과 실내실험이 이루어졌고, 그 결과 양생중인 콘크리트에 대한 진동의 제한치를 제시하고 있다.⁶⁾

국내에서도 1980년대 말부터 초기양생 중에 진동을 받는 시험체에 대한 실험이 시작되었고 1990년에는 대한주택공사에서 진동실험을 행하였다.⁷⁾ 본 연구실에서도 최근에 초기양생 중에 수평방향으로 최대 24시간까지 연속적으로 진동을 받은 콘크리트 공시체의 강도측정을 행하여 그 결과를 보고한 바 있다.²³⁾ 그러나 교량구조물 등에서는 구조 특성상 수평방향진동보다는 수직방향진동의 영향이 더 지배적일 것이라고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 초기 양생 중에 수직방향으로 연속진동을 받은 콘

크리트의 강도 특성에 대하여 실험을 통하여 조사하고, 추후 건설현장에서 진동의 기준치 제한을 설정하는데 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

1.2 연구범위 및 방법

콘크리트 양생도중에 고려될 수 있는 진동의 발생 요인에는 발파, 파일 향타 및 각종 건설기계의 진동 등이 있고, 진동원으로는 진동 로울러 및 다짐기, 차량 및 건설 중장비 등이 있다. 이들 진동들은 진동가력시간에 따라 연속적으로 가해지는 연속진동과 간헐적으로 가해지는 일시진동으로 구분할 수 있고, 또한 진동의 지배적인 작용 방향에 따라 수평진동과 수직진동으로 구분해볼 수가 있다.

본 연구에서는 교량구조물 등과 같이 수평방향보다는 수직방향의 진동 영향이 더 클 것으로 예상되는 구조물을 고려하고, 콘크리트 공시체에 일정 기간동안 연속적으로 수직진동을 가하여 이러한 진동이 초기양생중의 콘크리트에 미치는 영향을 실험적으로 조사하여 보았다.

진동의 평가에 가장 크게 영향을 미치는 진동속도와 진동가력시간을 실험변수로 하였는데 진동속도는 문헌연구^{1~23)}와 기존 교량에서 직접 측정한 진동자료를 바탕으로 하여 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0kine(=cm/sec)의 5종류로 하였다. 또한 진동가력시간은 3, 6, 9, 12시간의 4종류로 하였는데, 시멘트의 종결시간을 고려하여 최대 12시간까지로 하였다.

강도의 평가는 콘크리트 성능의 주된 평가기준이 되는 압축강도와, 쪼갬인장강도, 부착강도의 3가지로 하였다. 그리고 쪼갬인장시험이 끝난 시험체의 파단면을 조사하여 재료분리현상에 대하여도 조사하였다.

진동가력장치는 유압으로 제어되는 액츄에이터에 자체 제작한 진동판을 부착하여 만들었으며, 진동가력은 액츄에이터의 헤드부에 부착한 진동판을 상하방향으로 반복 운동시킴으로서 이루어졌다.

제 2 장 문헌고찰

Howes³⁾ 는 진동대 위에 6×12in 실린더 공시체를 설치하고 콘크리트 타설 후부터 한 시간 간격으로 일주일 동안 계속하여 진동을 가하였다. 진동은 현장에서 측정된 진동수를 고려하여 20~50Hz의 범위에서 1.6, 3.2, 5.0in/sec의 세 종류의 진동속도로 가해졌다. 압축강도, 인장강도 및 밀도 등이 양생 후 7일과 28일째 측정되었다. 이 중에서 압축강도에 대한 측정결과가 표 2.1에 주어져 있는데, 진동속도의 변화에 대하여 압축강도는 별다른 차이점을 보여주지 않았다.

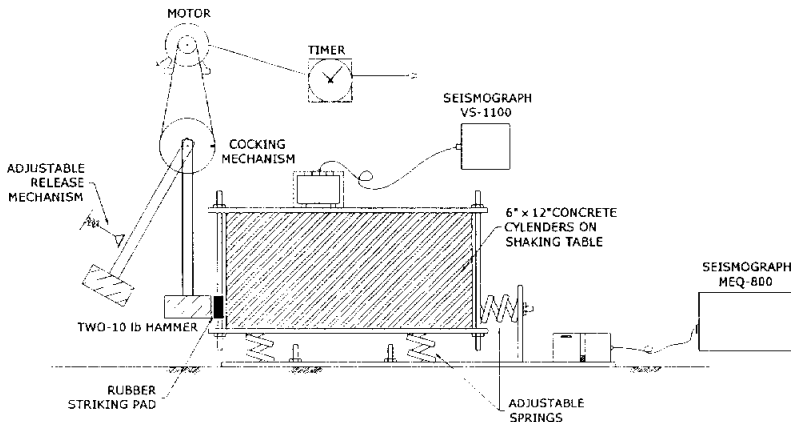


그림 2.1 실험장치의 개략도

표 2.1 진동속도의 변화에 따른 압축강도

구 분	시편 개수	평균압축강도 (psi)	표준편차 (psi)
7일 강도			
Control	60	2660	105
1.6 in/sec	20	2670	110
3.2 in/sec	20	2640	115
5.0 in/sec	22	2680	107
28일 강도			
Control	24	3730	125
1.6 in/sec	8	3750	95
3.2 in/sec	8	3790	105
5.0 in/sec	8	3800	90

인장강도와 밀도 등에 대하여도 진동을 받은 시험체와 무진동의 시험체 사이에 별 차이점이 없다고 하였다.

Bastian⁵⁾은 일시진동과 연속진동의 효과를 각각 조사하였다. 일시진동의 영향에서는 미국 미시간주 고속도로국에서 1929년에 행한 실험과 1961년에 캘리포니아 도로국에서 행한 실험을 인용하여 보고하였다. 그림 2.2에서와 같이 레이몬드 말뚝 시공과정을 이용하여 진동의 영향을 조사하였는데 PILE NO.1, PILE NO.2 및 PILE NO.3의 순서로 시공되었다. 시공순서에 따라 PILE NO.1은 콘크리트 타설 후 30분 및 6시간 뒤에 진동을 받았으며, PILE NO.2는 콘크리트 타설 후 5시간 30분 뒤에 한번의 진동을 받았고, PILE NO.3는 진동을 받지 않았으므로 강도비교를 위한 기준(control)시험체로 사용되었다. 46일간 양생 후 이들 세 개의 파일은 인발되었고, 그림 2.2에서의 빗금친 위치에서 강도시험을 위한 코아가 채취되었다.

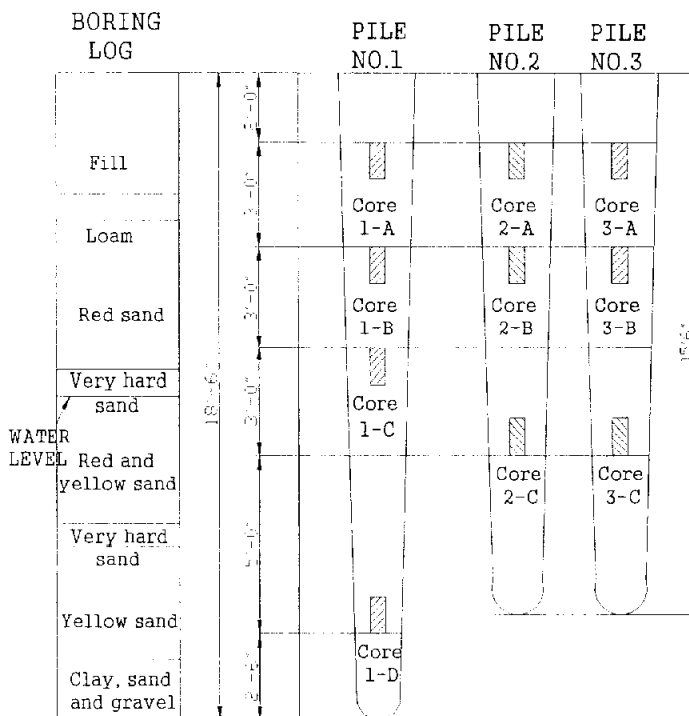
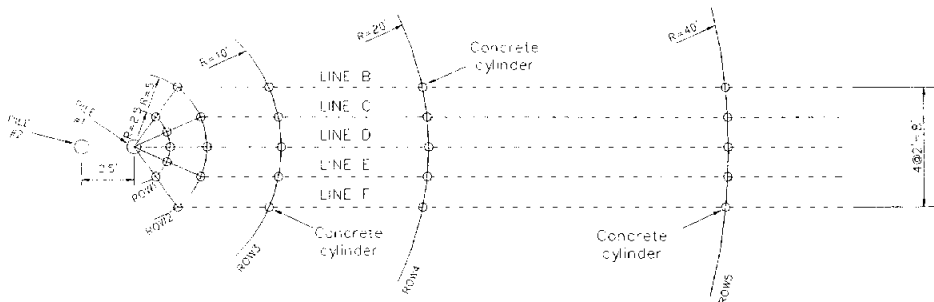


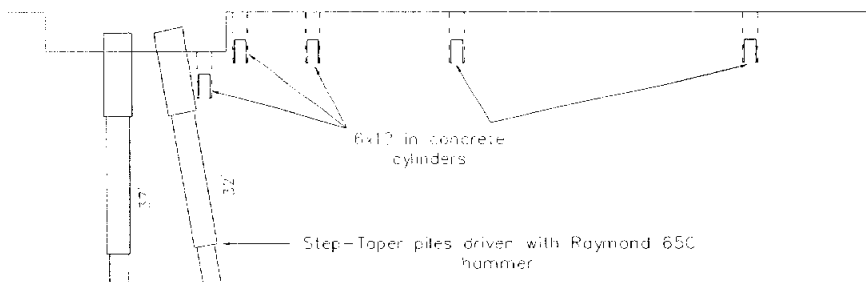
그림 2.2 레이몬드 말뚝에서 채취된 코아의 위치

타설 후 53일째에 압축강도 측정이 행해졌는데 진동을 받은 말뚝으로부터 얻어진 코아의 압축강도는 무진동의 말뚝으로부터 얻어진 값보다 더 크게 되었고 아울러 코아를 조사하여 재료분리가 일어나지 않았음을 밝혔다.

또한 그림 2.3에서와 같이 PILE #1을 기준으로 반경 2.5~40ft의 둘레에 6×12in의 콘크리트 공시체들을 2in 깊이에 매설하고 진동가력시점을 달리 하여 진동을 가하였다. 즉 그림에서 LINE B에 있는 공시체들은 PILE #1과 PILE #2로부터 향타진동을 받기 139시간 전에 설치되었으며, LINE F에 위치한 공시체들은 4.5시간 전에 설치되었다. 이들 공시체들은 진동을 받은 후 이 위치에서 약 60일간 교란되지 않은 상태로 양생되었으며, 그 후 강도 측정이 행해졌다. 진동을 받은 공시체의 강도는 대체로 기준공시체의 강도보다 증가하는 경향이 있음을 보여주었다. 아울러 4.5시간 후에 진동을 받은 공시체의 강도가 상대적으로 크게 증가하였음을 보고하였다.



(a) Plan view



(b) Side view

그림 2.3 진동을 받는 공시체의 배치도

한편, 레이몬드 말뚝 시공과정을 통하여 연속진동의 효과를 조사하였다. 시공된 말뚝이 콘크리트 타설 후 약 7시간 동안 18ft 떨어진 곳에서의 과일 항타작업에 의하여 연속으로 진동을 받았으며 진동의 크기는 약 3in/sec 이었다. 콘크리트 타설 후 3일째 이들 말뚝으로부터 코아가 채취되고 다음 날 압축강도측정이 행해졌다. 측정결과 항타진동을 받은 말뚝으로부터 얻어진 코아의 압축강도의 평균치는 3443psi이었고 무진동 양생된 경우의 값은 3296psi로서, 항타진동을 받은 경우가 약 4% 더 높은 값을 나타내었다고 하였다.

Krell⁸⁾은 화력발전소의 설비확충 작업 도중, 기존의 콘크리트 기초부분이 신설 콘크리트 기초와 접합시공 되어야 하는 상황에서, 기존 콘크리트 기초 위에 있는 발전설비에 의한 진동이 양생중인 신설 콘크리트의 기초에 미치는 영향을 조사하였다. 기존 콘크리트 기초 위에 실린더 공시체를 설치하여 발전설비로부터 연속적인 진동을 받게 하였다. 가해진 진동속도는 0.2in/sec와 0.5in/sec 범위이며 타설 후부터 28일까지 연속으로 시험체에 진동을 가하였다. 시험체에 대하여 압축강도시험과 부착강도시험이 행해졌는데 시험결과, 진동을 받은 시험체의 압축강도가 진동을 받지 않은 기본시험체의 값보다 더 컸으며, 부착강도시험에서도 철근과 콘크리트 사이의 부착파괴는 생기지 않고 오히려 철근의 절단에 의하여 공시체의 파괴가 생겼다고 하였다.

대한주택공사⁹⁾에서는 양생중인 콘크리트와 모르타르 공시체에 대하여 진동가력시점을 변수로 한 실험에서 진동가력시점은 콘크리트를 몰드에 타설한 후 2, 3, 4, 5, 6, 72시간으로 하고, 진동가력기간은 20, 40, 80초의 세 경우로 하여 실험을 하였다. 진동속도는 최대진동속도를 12.0mm/sec, 제곱평균진동속도(RMS속도)를 3.0mm/sec로 하였다. 실험결과 콘크리트 타설 후 3~5시간 사이에 진동을 받으면 압축강도 및 부착강도가 떨어진다고 하

었다. 특히 압축강도는 기준시험체의 값 이하로 되었다.

권영웅¹⁰⁾은 모울드에 콘크리트를 타설한 후 임의로 정해진 시간 후에 쇠팅치로 모울드에 타격을 가하고 이 공시체들의 압축강도를 비교하였다. 첫 번째 공시체(A₁)는 2.5, 4.0, 5.5시간 후에 각각 30번씩의 타격을 받았다. 두 번째 공시체(A₂)는 2.5, 4.0, 5.5, 17.5시간 후에, 세 번째 공시체(A₃)는 2.5, 4.0, 5.5, 17.5, 20.5시간 후에, 그리고 네 번째 공시체(A₄)는 2.5, 4.0, 5.5, 17.5, 20.5, 65.5, 89.5, 113.5, 137.5시간 후에 각각 30번씩의 타격을 받았다. 공시체들의 3일, 7일 및 15일 강도를 비교한 결과를 그림 2.2에 나타내었는데, 콘크리트의 양생 초기에 가한 타격정도가 클수록 콘크리트 압축강도도 증가한다고 하였다.

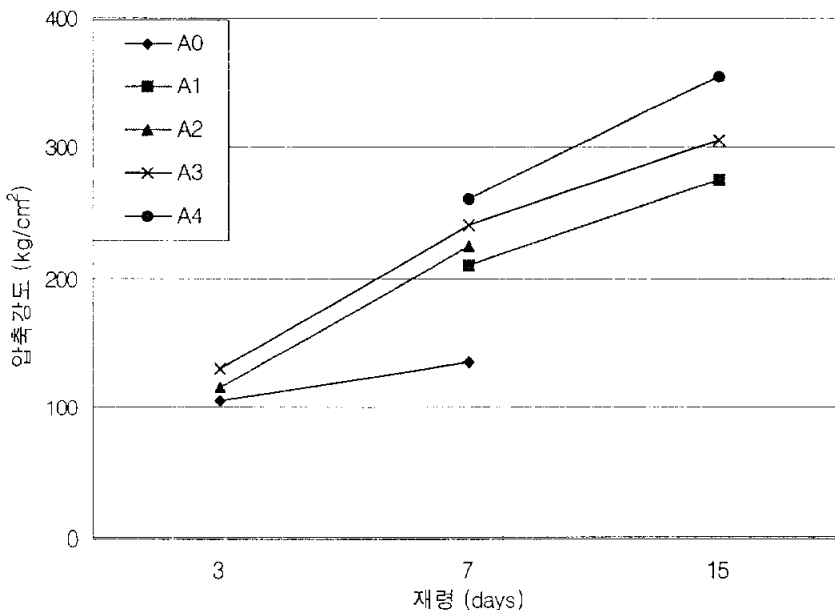


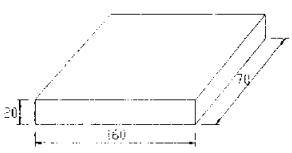
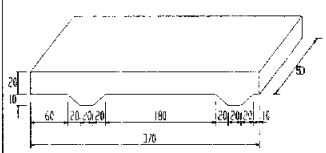
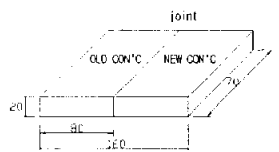
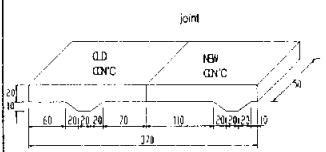
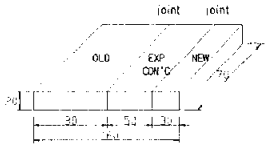
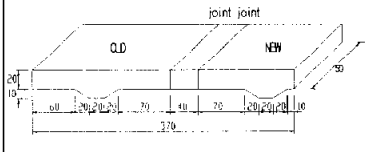
그림 2.4 진동에 따른 콘크리트의 초기 압축강도의 경향

홍순길 등^{11,12)}은 확폭교량 RC상판의 휨거동 및 피로거동에 관한 연구에서 진동이 양생중의 콘크리트에 미치는 영향을 연구하였다. 이들은 교량의 확폭시공법인 분리시공법 및 접합시공법 중에서 접합시공법을 택하는 경우,

콘크리트 양생시에 기설부 교량을 통과하는 차량에 의하여 발생한 진동이 신설부 교량에 미치는 영향을 조사하였다. 접합시공법을 다시 직접접합시공법과 무수축접합시공법으로 구분하고 각각 진동과 무진동의 경우에 대하여 휨파괴시의 극한하중을 비교하였으며, 기본시험체로서는 진동을 받지 않은 일체치기를 이용하였다.

시험체는 경부고속도로상에서 확폭시공 중에 있거나 또는 확폭완료된 4개 교량의 제원을 조사하여 표 2.2와 같이 제작하였다. 여기서 시험체는 교축의 직각 방향에 대하여 단순보 및 연속보 거동을 나타낼 수 있도록 2종류로 하였다. 시험체에 대한 진동조건은 고속도로상에 위치한 교량을 대상으로 실측한 자료 및 일본도로공단시험소의 자료를 근거로 하여 진동수 4Hz, 진폭 1mm로 하였다.

표 2.2 시험체의 제원(단위: cm)

	단순보	연속보
일체치기 시험체		
직접접합 시험체		
무수축접합 시험체		

진동은 신설부 콘크리트에 동바리를 설치하고 50ton용량의 피로시험기를 이용하여 가하였으며, 진동유지시간은 20시간으로 하였다. 시험체의 극

한하중은 표 2.3의 방법에 의하여 측정되었으며, 시험결과 극한하중은 표 2.4와 표 2.5과 같이 계산되었다. 이 표들로부터 단순보 거동으로 조사한 경우에는 각각의 시공방법에 있어서 극한하중은 기본시험체(일체치기)보다는 4.5~29.6% 작았지만, 진동시험체와 무진동시험체의 비교에 있어서는 진동 시험체에서 극한하중이 21.1%(3점 선하중 무수축접합의 경우)까지 증가되었다고 하였다. 그러나 연속보 거동으로 조사한 경우에는 시공방법에 따른 극한하중의 차이가 무시할 정도라고 하였다.

표 2.3 시험체의 제하방법(단위: cm)

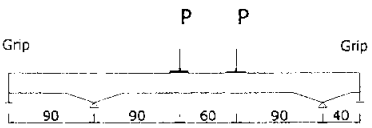
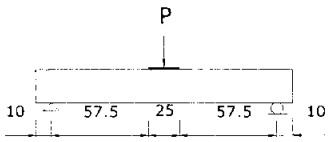
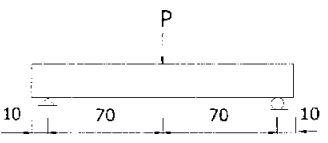
	단순보	연속보
4점 선하중		
3점 선하중		
집중하중		

표 2.4 단순보 거동시 시험체의 극한하중

시험체 종류		일체치기	직접접합 (무진동)	직접접합 (진동)	무수축접합 (무진동)	무수축접합 (진동)
극한 하중 (ton)	3점 선하중	28.6	27.3	27.0	24.7	29.9
	집중 하중	35.5	25.0	30.6	25.7	29.3

표 2.5 연속보 거동시 시험체의 극한하중

시험체 종류	일체치기	직접접합 (무진동)	직접접합 (진동)	무수축접합 (무진동)	무수축접합 (진동)
4점 선하중 (ton)	24.0	23.0	22.0	22.0	24.0

연속보 거동시에 피로하중 반복회수 50만회에 대한 피로강도를 표 2.6에 나타내었는데, 여기서 피로강도는 정적 극한하중에 대한 피로파괴하중의 비율을 가리킨다. 이 표로부터 양생중 진동의 영향은 확폭교량 상판의 피로거동에 큰 영향을 미치지 않는 요소라고 하였다.

표 2.6 피로강도(피로하중 반복회수 50만회)

시험체 종류	일체치기	직접접합 (무진동)	직접접합 (진동)	무수축접합, (무진동)	무수축접합 (진동)
피로강도 (%)	60.0	59.2	61.8	61.5	56.6

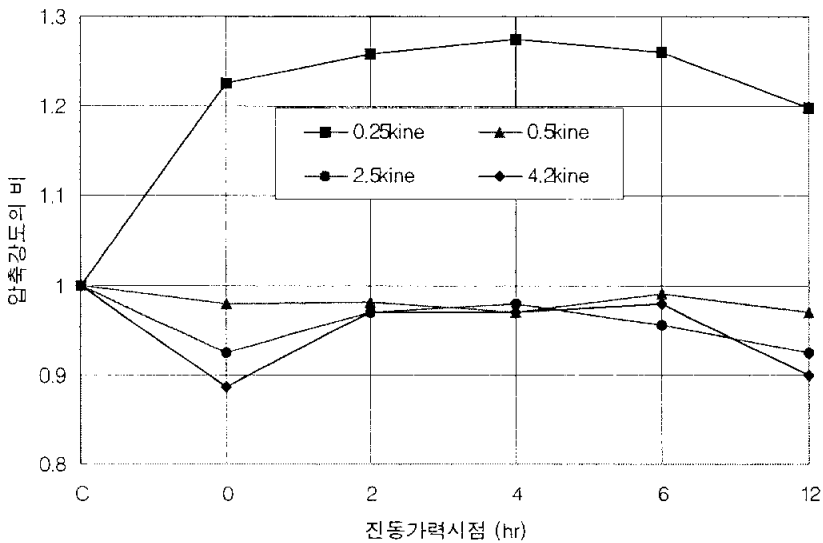
오병환 등¹³⁾은 도로의 보수보강 및 차선 확폭시 주변에서 발생하는 차량 등에 의한 진동이 양생초기의 콘크리트에 미치는 영향을 연구하였다. 실험변수를 진동속도, 진동가력시점으로 하고 콘크리트의 압축강도, 부착강도, 응결시간을 측정하였다.

진동속도는 0.25, 0.5, 2.5, 4.2cm/sec의 네 가지로 구분하였으며, 진동가력시점은 타설 직후, 2시간, 4시간, 6시간, 12시간 후의 다섯 가지로 하였다. 그리고 진동가력기간은 30분으로 일정하게 하였다.

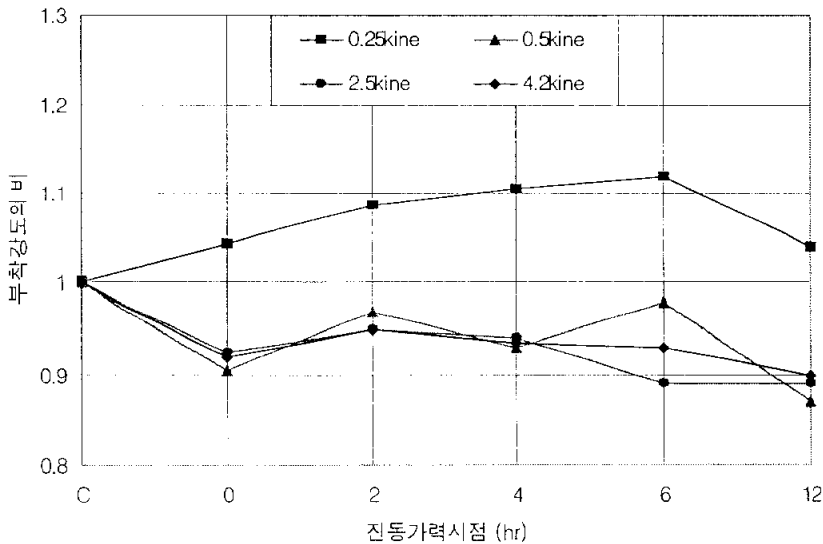
압축강도와 진동가력시점과의 관계를 그림 2.3(a)에 나타내었는데, 진동속도가 0.25cm/sec의 경우는 진동가력시점과 무관하게 기준시험체에 비하여 약 20% 정도 압축강도가 증가하였으며, 진동속도가 0.5cm/sec 이상의 경우에는 역시 진동가력시점과 무관하나 5~11%정도의 압축강도 감소를 나타낸다고 하였다. 또한 부착강도와 진동가력시점과의 관계를 그림 2.3(b)에서 보여주고 있다. 이 그림에서 진동속도가 0.25cm/sec의 경우에는 진동가력시점에

따라 부착강도가 5~11% 증가하는 데 반하여, 진동속도가 0.5cm/sec 이상의 경우에는 부착강도가 5~12% 감소한다고 하였다.

따라서 위의 실험결과들을 기초로 하여 재령 12시간 이내의 콘크리트에 대하여 진동규정치를 0.3cm/sec정도로 할 것을 제안하고 있다.



(a) 압축강도



(b) 부착강도

그림 2.5 진동가력시점의 변화에 따른 콘크리트 강도의 변화

한중기²³⁾ 등은 수평연속진동이 초기 양생중인 콘크리트에 미치는 영향에 관한 실험을 수행하였다. 실험변수로 진동속도와 진동가력시간을 택하고 콘크리트의 압축강도, 인장강도, 부착강도를 측정하였다.

진동속도는 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0kine의 다섯 가지로 구분하였으며, 진동가력시간은 타설 후 3시간, 6시간, 12시간, 24시간의 네 가지로 하였다.

실험 결과(그림 2.6~그림 2.10), 진동속도 0.25kine에서는 진동가력시간에 무관하게 강도의 감소가 거의 없었으므로, 이 값을 콘크리트 타설 직후 수평연속진동 가력시 강도에 영향을 미치지 않는 한계치로 고찰 할 수 있다고 하였다. 그러나 그 외의 경우에는 압축강도가 최대 38% 정도로 감소하며 다른 강도들도 감소하고 있으므로 수평연속진동이 콘크리트의 강도에 불리한 영향을 줄 수 있다고 분석하였다. 실험결과를 나타낸 그림 중에서 그림 2.8 및 그림 2.9의 부착강도(수평-상) 및 부착강도(수평-하)는 그림 3.1(b)에서 나타낸 철근에 대한 콘크리트의 부착강도를 의미한다.

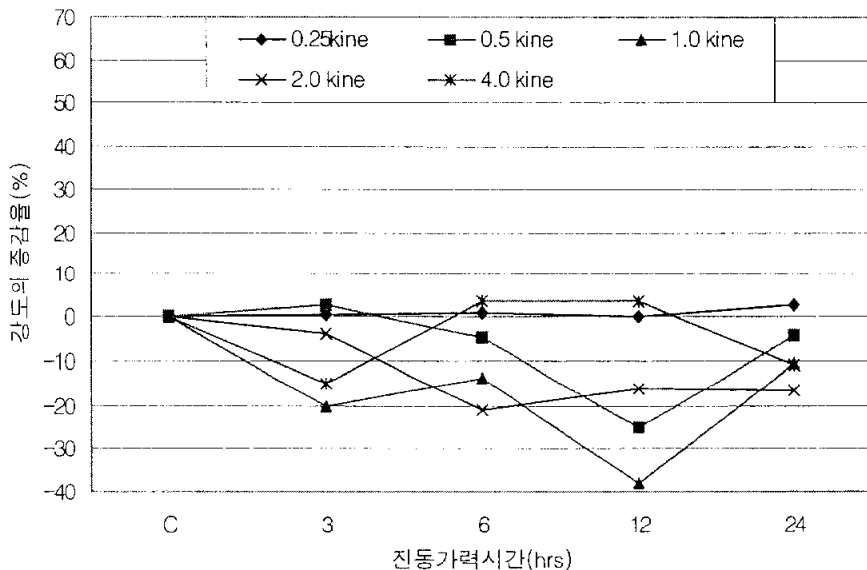


그림 2.6 진동가력시간에 따른 압축강도의 변화

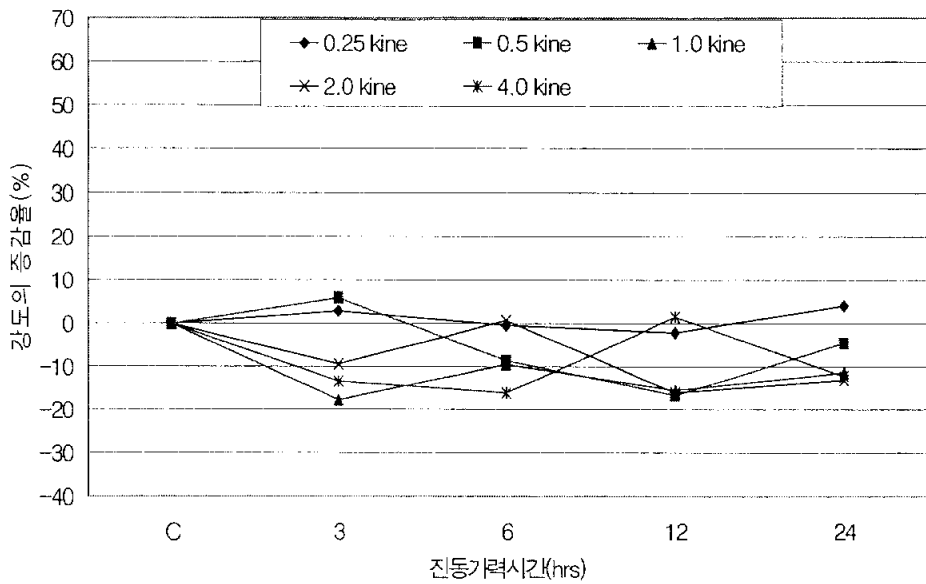


그림 2.7 진동가력시간에 따른 조인트강도의 변화

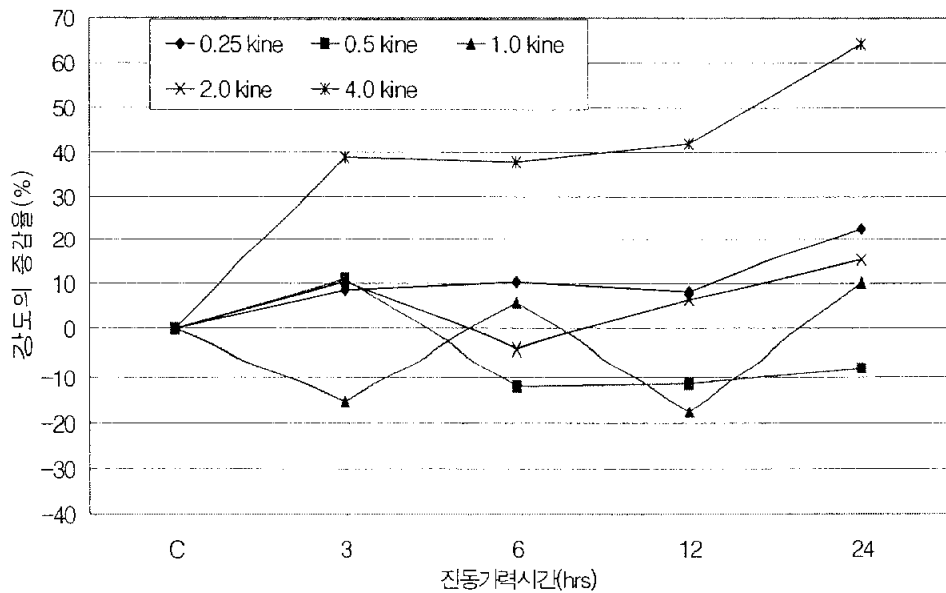


그림 2.8 진동가력시간에 따른 부착강도(수평-상)의 변화

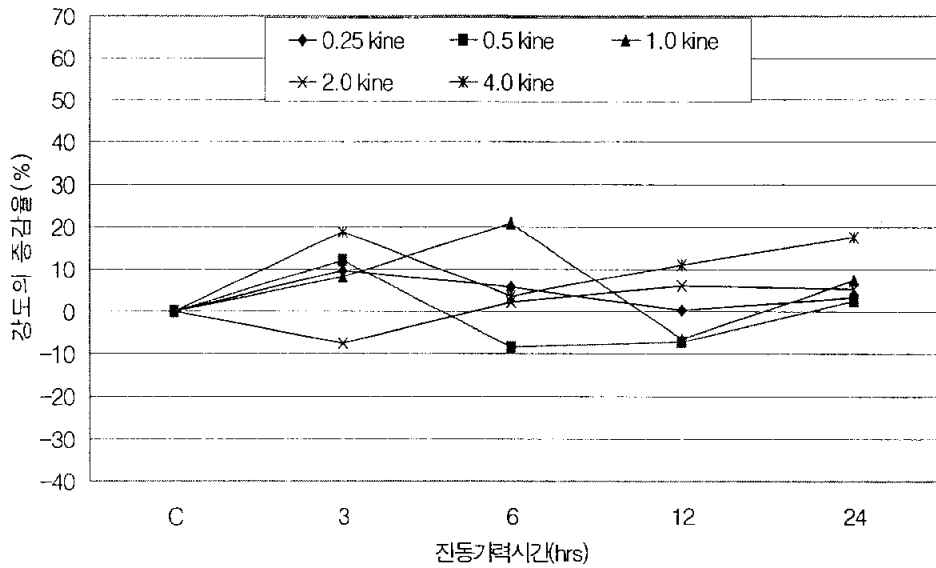


그림 2.9 진동가력시간에 따른 부착강도(수평-하)의 변화

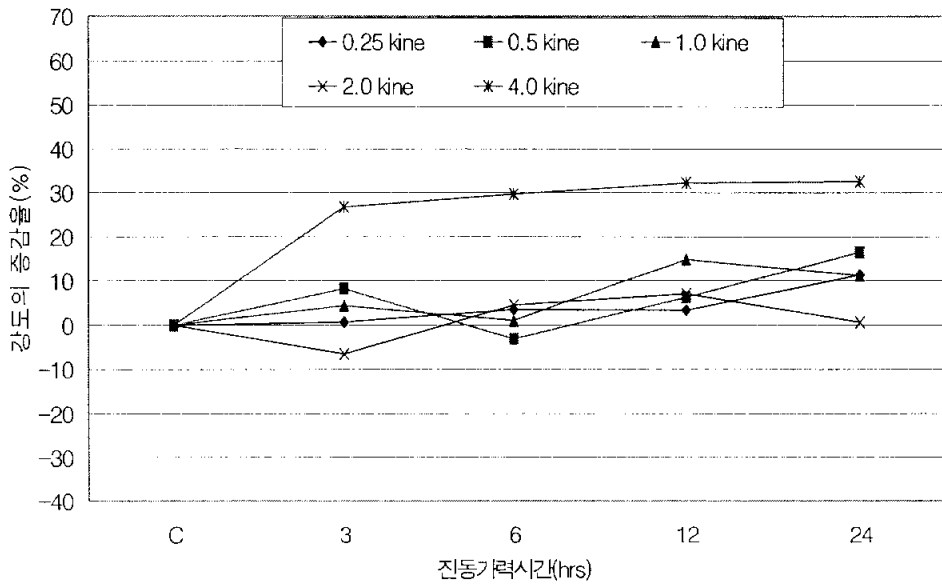


그림 2.10 진동가력시간에 따른 부착강도(수직)의 변화

앞에서 조사된 여러 문헌들의 고찰 결과를 정리하면 표 2.7과 같다.

표 2.7 문헌고찰 결과표

연구자	발표 년도	진동가력 시점	진동가력 시간	진동크기	시험결과
Howes	1979	콘크리트 타설 직후	한시간 간격으로 일주일 동안 연속	1.6, 3.2, 5.0in/sec	진동가력기간 및 진동속도의 변화에 대 하여 압축강도, 인장강도, 밀도 등이 진 동을 받은 시험체와 무진동 시험체 사 이에 별 차이점이 없음.
Bastian	1970	콘크리트 타설 후 30분 및 6 시간			진동을 받은 코아의 압축강도는 무진동 의 말쪽으로부터 얻은 코아의 압축강도 보다 더 큼.
		콘크리트 타설 직후	7시간	3in/sec	항타진동을 받은 시험체의 압축강도는 무진동 양생된 경우보다 약 4% 더 높 은 강도를 나타냄.
Krell	1979	콘크리트 타설 직후	28일 동안 연속	0.2~0.5 in/sec	압축강도시험에서 진동을 받은 시험체 의 값이 무진동의 경우보다 더 컸으며, 철근과 콘크리트사이 에 부착파괴는 생 기지 않고 오히려 철근의 절단에 의하 여 공시체의 파괴가 생김.
홍순길 등	1994	콘크리트 타설 직후	20시간	진동수: 4Hz, 진폭: 1.0mm	1)RC 상판 지지형태를 연속보로 가정 한 경우, 접합시공방법의 종류에 관계 없이 극한하중의 차이는 무시할 정도 임. 2)양생중에 가해진 진동은 확폭교량 상 판의 피로거동에 큰 영향을 미치지 않 는 요소임.
오병환 등	1998	콘크리트 타설 직후, 2, 4, 6, 12시간 후	30분	0.25, 0.5, 2.5, 4.2 cm/sec	압축강도는 진동가력시점과는 무관하며 진동속도가 0.25cm/sec의 경우는 기준 시험체에 비하여 20%정도 증가하였으 나, 진동속도가 0.5cm/sec이상의 경우에 는 5~11%정도 감소.
한중기 등	2000	콘크리트 타설 직후	3, 6, 12, 24시간	0.25, 0.5, 1, 2, 4 kine	진동속도 0.25kine에서는 진동가력시간 에 무관하게 강도의 감소가 거의 없었 으며, 그 외의 경우에는 압축강도가 최 대 38% 정도로 감소하며 다른 강도들 도 감소하고 있음.

제 3 장 실험

3.1 사용재료와 배합설계

시험체 제작에 사용된 시멘트는 제 1종 보통 포틀랜드 시멘트이고, 골재는 세척한 해사와 최대골재치수가 25mm인 쇄석을 사용하였으며 그 특성은 표 3.1과 같다.

표 3.1 골재의 물리적 특성치

항목 골재	G_{max} (mm)	비중	흡수율 (%)	조립률
잔골재	-	2.51	1.52	2.75
굵은골재	25	2.62	0.85	7.28

부착강도 측정을 위해 사용된 철근은 부착강도 측정방법인 KS F 2441에 의거하여 KS D 3504에 규정된 이형철근 D19로 하였고, 혼화제로 고성능 AE감수제를 사용하였으며 그 사용량은 시멘트 중량의 0.5%로 하였다. 물-시멘트비는 48%, 슬럼프는 12cm로 하여 재령 28일의 압축강도가 210kgf/cm^2 이 되도록 배합설계하였다. 콘크리트의 배합설계표는 표 3.2와 같다.

표 3.2 배합설계표

G_{max} (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	Proportion by unit weight (kg/m^3)				Admix- ture (g/m^3)
					W	C	S	G	
25	12	48	42.7	5.0	167	384	721	1010	1740

3.2 시험체 제작

본 연구에 사용된 시험체는 압축강도, 쪼갬인장강도, 부착강도 측정용으로 각각 KS F 2405, KS F 2423, KS F 2441 규격에 의거하여 제작되었다. 진동 작용시 콘크리트 내부의 물이 모울드 틈 사이로 새어 나갈 가능성이 있으므로 점도가 높은 구리스를 충분히 모울드의 내부에 도포하였다.

압축강도와 쪼갬인장강도 측정용 시험체의 크기는 각각 $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$, $\phi 15\text{cm} \times 30\text{cm}$ 로 하였다. 부착강도 측정용 시험체는 철근을 수직으로 매립한 경우와 수평으로 매립한 경우의 2가지로 하였으며, 크기는 수평철근용 시험체가 $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 30\text{cm}$, 수직 철근용 시험체가 $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 15\text{cm}$ 이다. 수평 철근용 시험체의 경우에는 상부와 하부에 각각 하나의 철근을 매립하였다. 이 때 철근은 녹방지제를 살포하여 두었다가 매립 직전에 깨끗이 닦아 사용함으로써 녹에 의한 부착강도의 변화를 방지하였다.

철근을 매립한 부착강도 측정용 시험체의 형상은 그림 3.1과 같다.

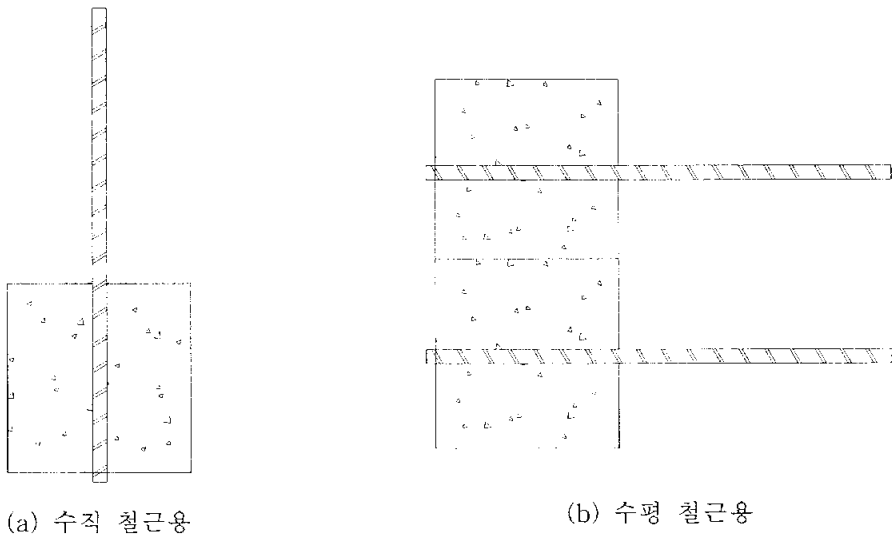


그림 3.1 부착강도 측정용 시험체

3.3 실험변수

실험변수는 진동속도와 진동가력시간으로 하였다. 진동속도는 문헌연구와 기존의 교량에서 측정된 진동수 분석결과를 바탕으로 0.25, 0.5, 1, 2, 4kine의 5종류로 하였고, 진동가력시간은 시멘트의 종결시간을 고려하여 최대치를 12시간으로 하는 3, 6, 9, 12시간의 4종류로 하였다. 진동가력시점은 콘크리트 타설 직후로 하였으므로 실험변수에 포함되지 않았다. 시험체명에 대한 구분은 그림 3.2에서 설명하였고, 진동속도와 진동가력시간을 조합한 실험변수를 표 3.3에 나타내었다.

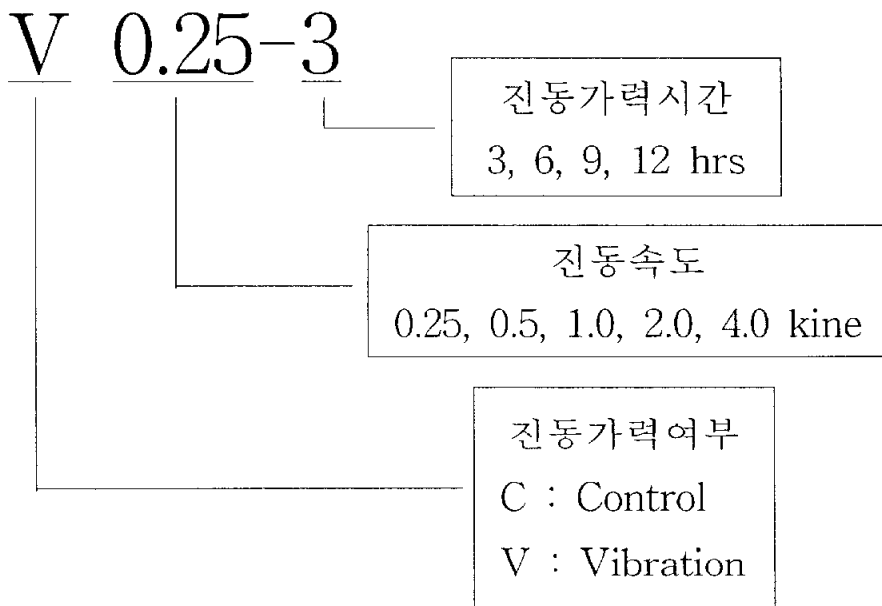


그림 3.2 시험체명의 표기에 대한 설명

표 3.3 실험변수

시험체명	진동속도 (kine)	진동가력시간 (hrs)
C0.25	0.25	0
V0.25 - 3		3
V0.25 - 6		6
V0.25 - 9		9
V0.25 -12		12
V0.5 - 3	0.5	3
V0.5 - 6		6
V0.5 - 9		9
V0.5 -12		12
C1.0	1.0	0
V1.0 - 3		3
V1.0 - 6		6
V1.0 - 9		9
V1.0 -12		12
V2.0 - 3	2.0	3
V2.0 - 6		6
V2.0 - 9		9
V2.0 -12		12
C4.0	4.0	0
V4.0 - 3		3
V4.0 - 6		6
V4.0 - 9		9
V4.0 -12		12

3.4 진동가력장치

진동가력장치는 MTS사의 25tonf의 액츄에이터와 자체 제작한 진동판을 반력벽에 연결된 강재 프레임 하면에 부착하여 구성하였다. 진동판은 구조 해석을 통하여 최대 처짐이 0.2mm이내가 되도록 판의 두께를 정하였다. 또한 진동판이 진동으로 인해 좌우 방향으로 이동하는 것을 방지하기 위하여 반력상에 부착시킨 보조 가이드를 진동판의 측면 프레임에 근접하여 위치 하도록 하였다. 그림 3.3과 그림 3.4에 진동가력장치의 개략도와 진동판의 구체적인 제원을 나타내었으며, 그림 3.5에 이 장치의 정면과 측면의 사진을 나타내었다.

실험에 사용된 진동속도는 부산시 수영구에 위치한 교량 2곳에서 실측한 진동자료 분석결과로부터 얻어진 진동수 10Hz를 고정값으로 한 후, 연직방향의 진폭만을 제어함으로써 요구되는 진동속도를 얻을 수 있었다. 동일한 방법으로 여러 번 반복하여 오차를 최대한 줄였으며, 표 3.4에 그 결과를 나타내었다. 또한 기존의 교량 2곳에서 측정한 진동자료는 표 3.5와 같다.

표 3.4 진동속도의 제원

진동속도(kine)	0.25	0.5	1.0	2.0	4.0
진동수(Hz)	10	10	10	10	10
진폭(mm)	±0.0342	±0.0700	±0.1320	±0.2780	±0.5280

표 3.5 기존의 교량에서 측정한 진동 자료

구 분	측 점		kine	Hz
교량 1	center	1	0.076	9.0
		2	0.648	6.0
		3	0.381	8.0
	지간1/4	1	0.127	9.0
		2	0.546	9.0
		3	0.114	14.0
	지점	1	0.152	8.0
		2	0.140	10.0
교량 2	center	1	0.838	4.0
		2	2.460	4.0
		3	1.450	3.0
	지간1/4	1	0.406	5.0
		2	0.495	4.0
		3	0.775	4.0
	지점	1	0.267	6.0
		2	0.572	6.0

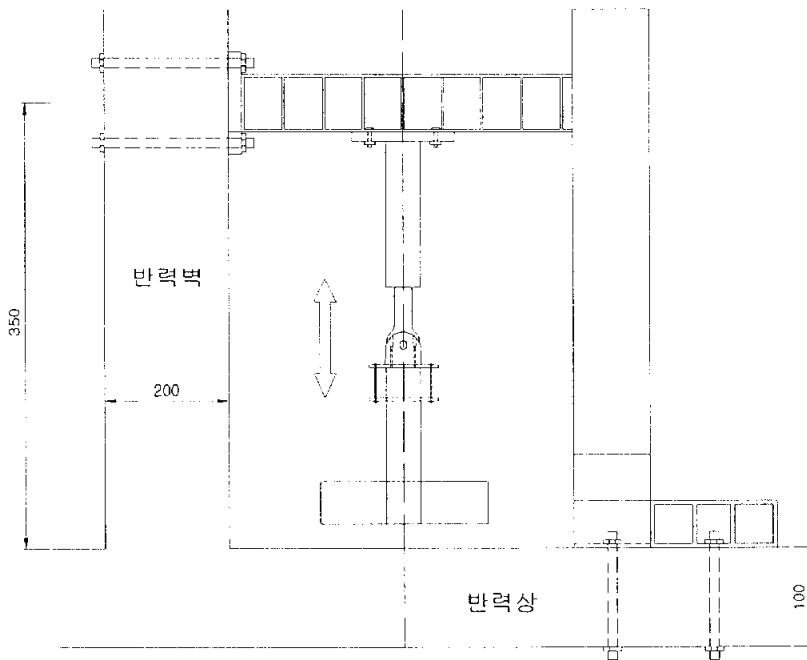
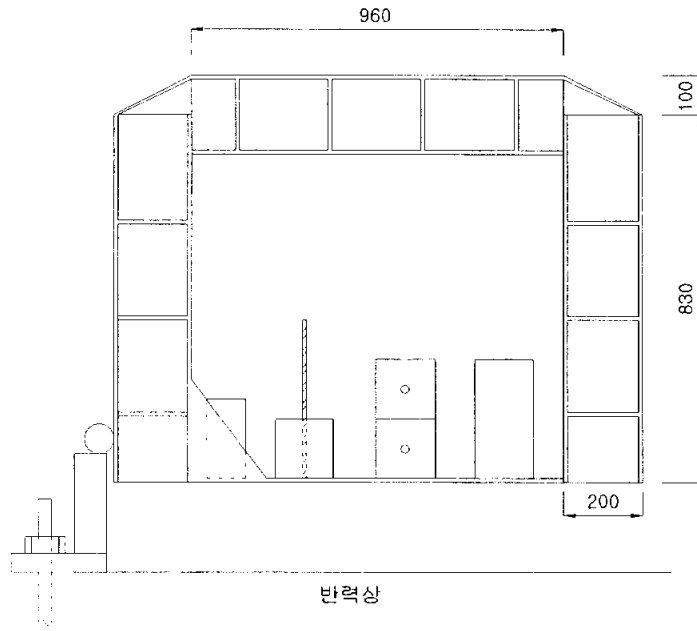
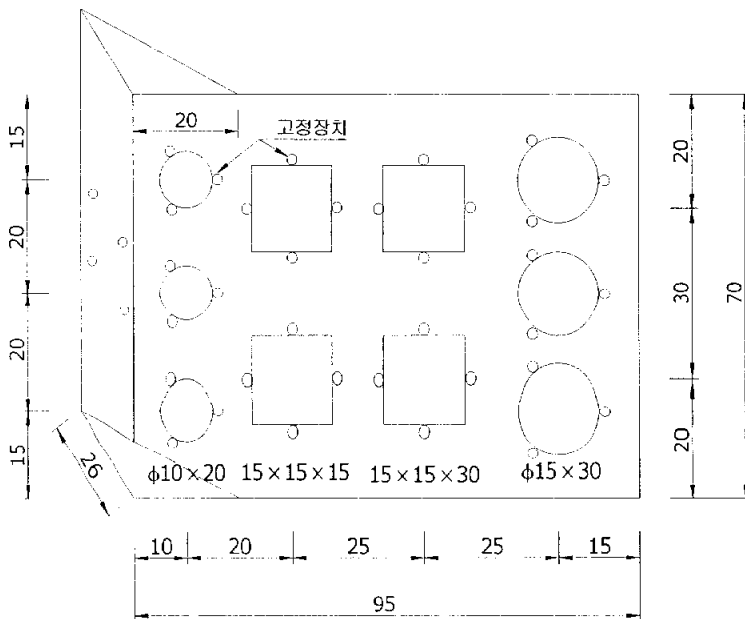


그림 3.3 진동가력장치의 개략도 (단위:cm)



(a) 진동판의 정면

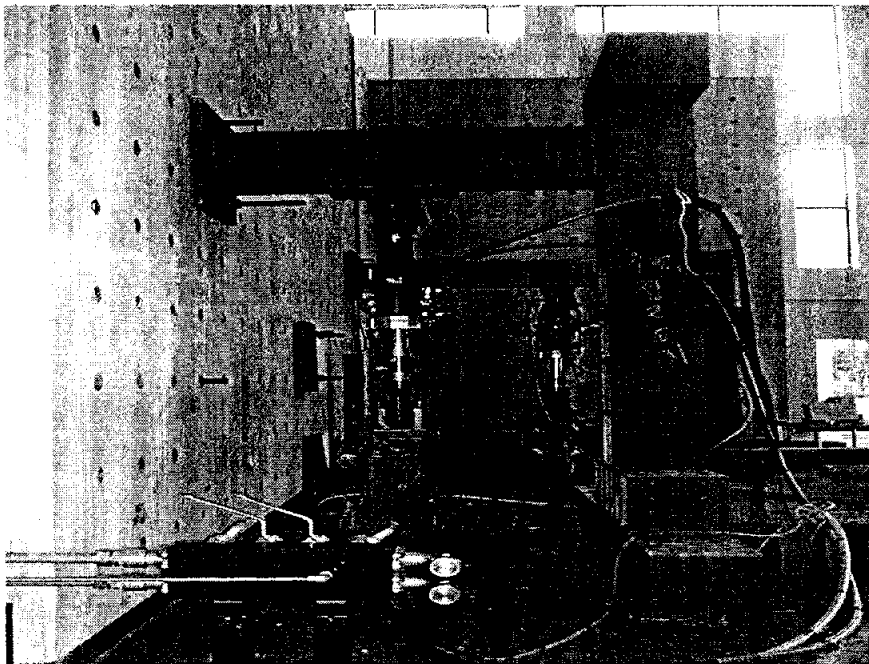


(b) 진동판의 상면

그림 3.4 진동판의 제원 (단위: cm)



(a) 정면도



(b) 측면도

그림 3.5 진동가력장치의 사진

3.5 실험방법

비빔은 재료가 분리되지 않고 잘 혼합되도록 하기 위해서 시멘트, 골재만을 넣고 60초간 건비빔한 후, 물과 혼화제를 넣고 180초간 추가로 비빔을 하였다. 비빔이 끝난 콘크리트는 신속히 몰ULD 내에 채워서 다짐을 함과 동시에 공기량과 슬럼프를 측정하였다. 다짐은 직경 16mm의 봉으로 다짐을 하였으며 압축강도 측정용 몰ULD는 2층 11회, 쪼개인장강도 측정용 몰ULD는 3층 25회, 그리고 부착강도 측정용 몰ULD는 15cm 높이마다 25회 다졌다. 콘크리트내의 공기는 기포가 표면으로 활발히 상승하지 않을 때까지 충분히 제거하였다. 그리고 기포가 제거된 몰ULD를 진동판 위에 배치 및 고정시킨 후 10Hz에서 sine파로 진동가력을 실시하였다.

진동가력 시점부터 24시간 뒤에 켈핑을 하였고 다시 24시간 뒤에 탈형하여 $20\pm3^{\circ}\text{C}$ 의 수중에서 양생하였다. 28일의 양생이 끝나면 시험체의 표면수를 제거하고 강도를 측정해서 기준시험체의 값과 비교하였다. 강도 측정 후 쪼개인장강도 측정용 시험체를 조사하여 육안으로 재료분리 발생 여부를 조사하였다.

제 4 장 실험결과 및 분석

4.1 강도측정 결과

진동을 가한 시험체와 기준시험체(Control)의 강도측정결과를 진동가력 시간에 따른 강도의 변화로 나타내면 표 4.1~표 4.4와 그림 4.1~그림 4.10과 같다. 한 그림에 여러 개의 그래프가 교차하고 있어서 경향을 분별하기에 어려움이 있으므로 각각의 시험체에 대하여 개개의 그래프를 따로 나타낸 것을 추가하였다.

기준시험체의 강도는 각각의 진동속도 및 진동가력시간에 따른 시험체를 동시에 제작하여 기준 강도를 얻으려고 하였으나, 믹서기의 용량 부족으로 0.25kine, 2.0kine, 4.0kine에서 진동을 받지 않은 시험체를 따로 제작하고 이들로부터 측정된 평균값을 기준시험체의 강도로 사용하였다. 따라서 표 4.1~표 4.5에서 괄호 안의 값이 평균치이며 기준시험체의 값으로 사용되었다.

강도의 증감율은 기준시험체의 강도를 기준으로 하여 백분율로 나타내었으며 그 적용식은 식 (4.1)과 같다.

$$\text{강도의 증감율(\%)} = \frac{\text{진동을 가한 시험체의 강도}(S_V)}{\text{기준 시험체의 강도}(S_C)} \times 100 - 100 \quad (4.1)$$

표 4.1 압축강도의 증감율

진동속도 (kine)	강도(kgf/cm ²)	진동가력시간(hrs)			
	증감율(%)	3	6	9	12
0.25	S_C	239.4(222.0)			
	S_V	185.4	212.2	210.7	192.5
	증감율	-16.5	-4.4	-5.1	-13.3
0.5	S_V	185.7	200.7	205.0	187.7
	증감율	-16.4	-9.6	-7.7	-15.4
1.0	S_C	200.4(222.0)			
	S_V	192.5	192.8	195.0	192.8
	증감율	-13.3	-13.2	-12.2	-13.2
2.0	S_V	167.8	180.0	175.9	160.0
	증감율	-24.4	-18.9	-20.8	-27.9
4.0	S_C	200.9(222.0)			
	S_V	166.5	174.2	175.5	148.3
	증감율	-25.0	-21.5	-21.0	-33.2

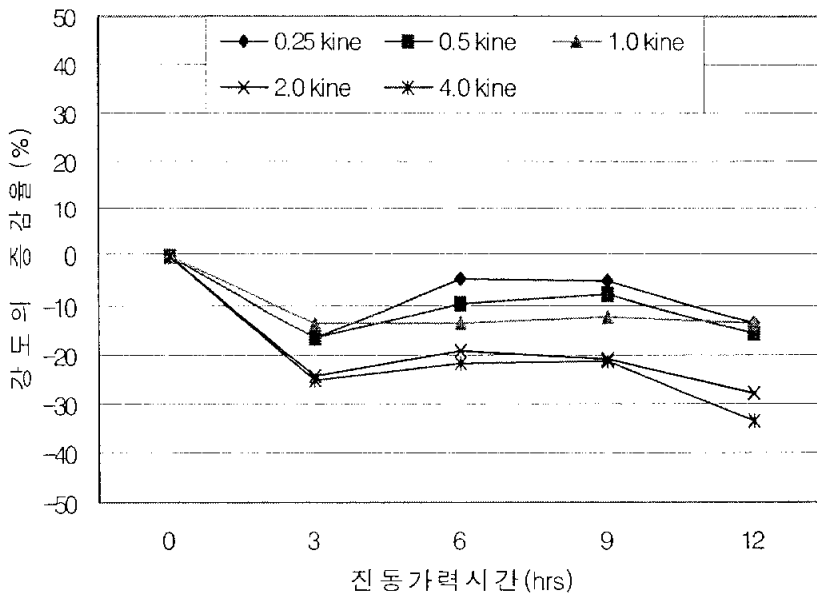
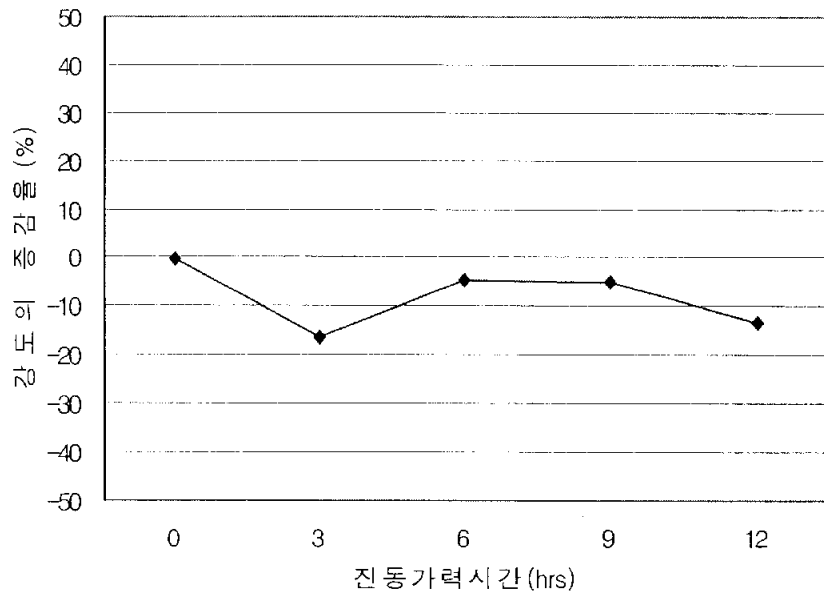
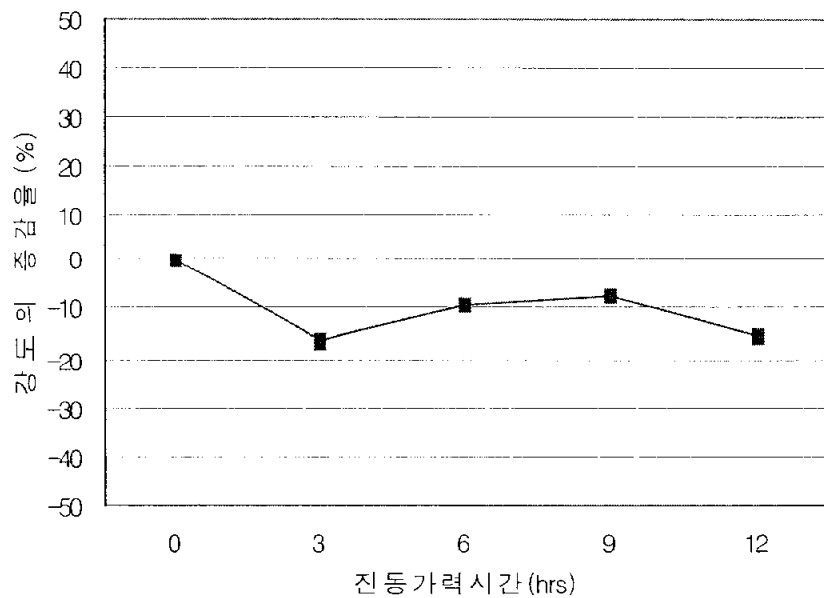


그림 4.1 진동가력시간에 따른 압축강도의 변화

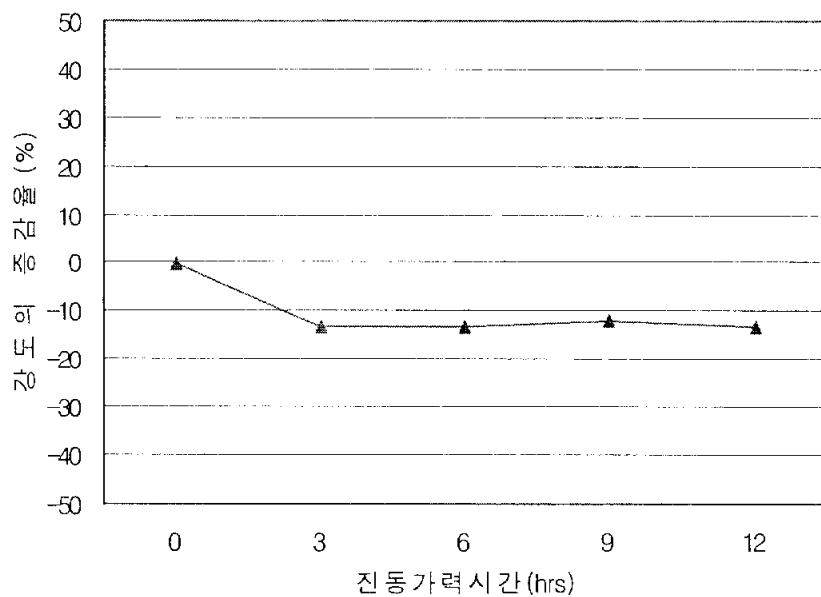


(a) 0.25 kine

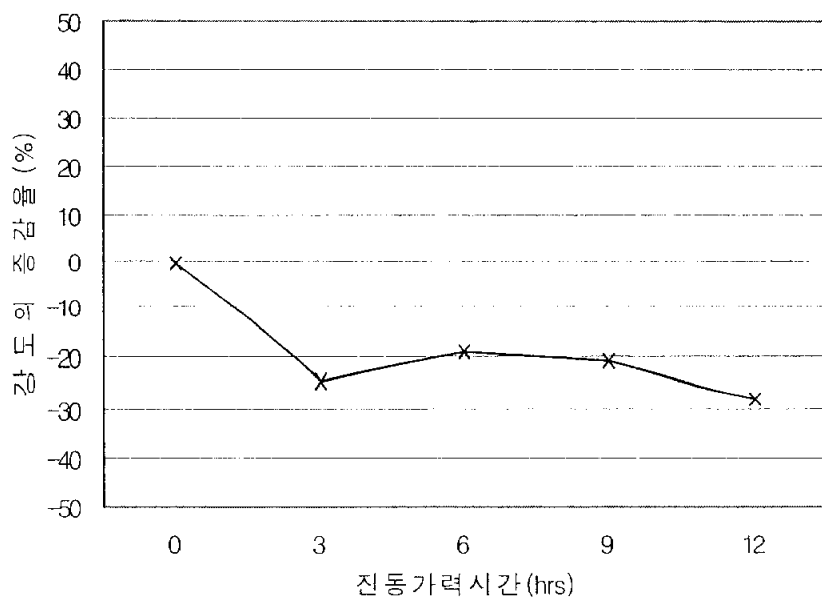


(b) 0.5 kine

그림 4.2 진동가력시간에 따른 압축강도의 변화 상세도 (계속)

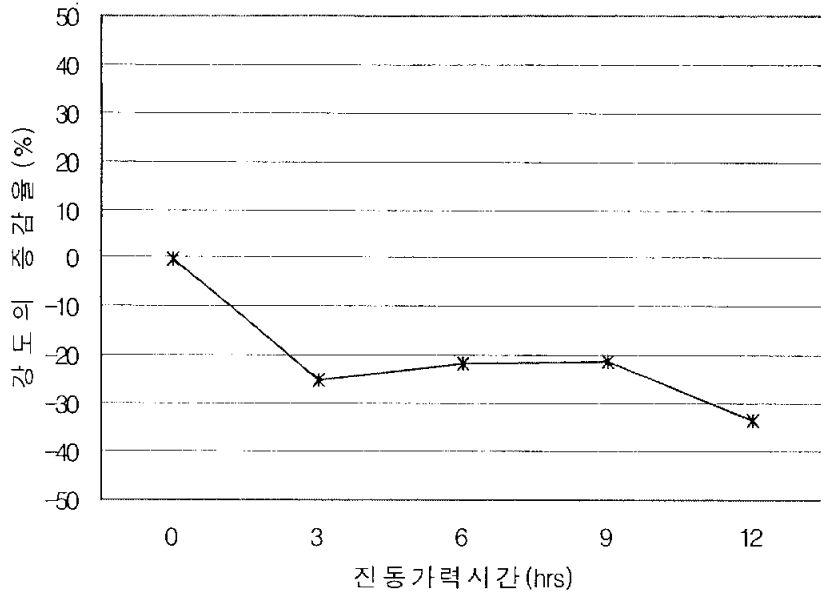


(c) 1.0 kine



(d) 2.0 kine

그림 4.2 진동가력시간에 따른 압축강도의 변화 상세도 (계속)



(e) 4.0 kine

그림 4.2 진동가력시간에 따른 압축강도의 변화 상세도

표 4.2 인장강도의 증감율

진동속도 (kine)	강도(kgf/cm ²)	진동가력시간(hrs)			
	증감율(%)	3	6	9	12
0.25	S_C	21.5(21.3)			
	S_V	21.7	23.2	21.7	21.5
	증감율	1.8	8.9	1.9	0.6
0.5	S_V	20.2	21.3	21.5	20.1
	증감율	-5.5	0.0	0.5	-5.7
1.0	S_C	19.9(21.3)			
	S_V	20.1	22.0	21.2	19.4
	증감율	-5.9	3.1	-0.6	-9.3
2.0	S_V	19.9	19.4	20.1	17.2
	증감율	-6.9	-9.1	-5.9	-19.5
4.0	S_C	22.1(21.3)			
	S_V	19.9	19.6	19.2	17.3
	증감율	-6.9	-8.3	-9.9	-19.1

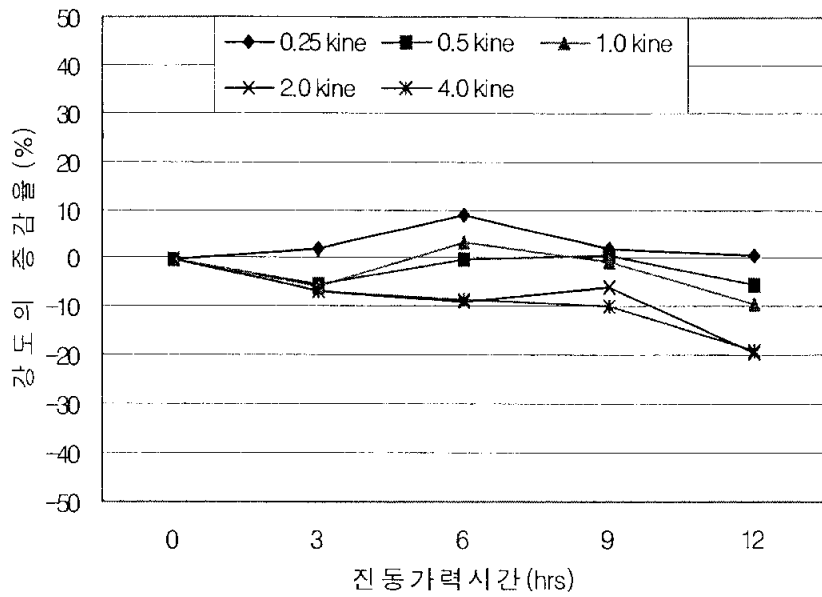
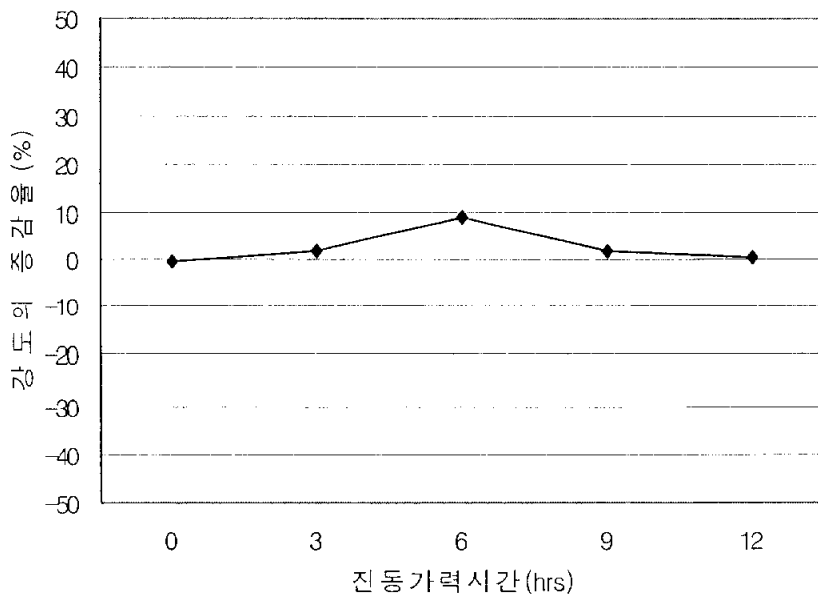
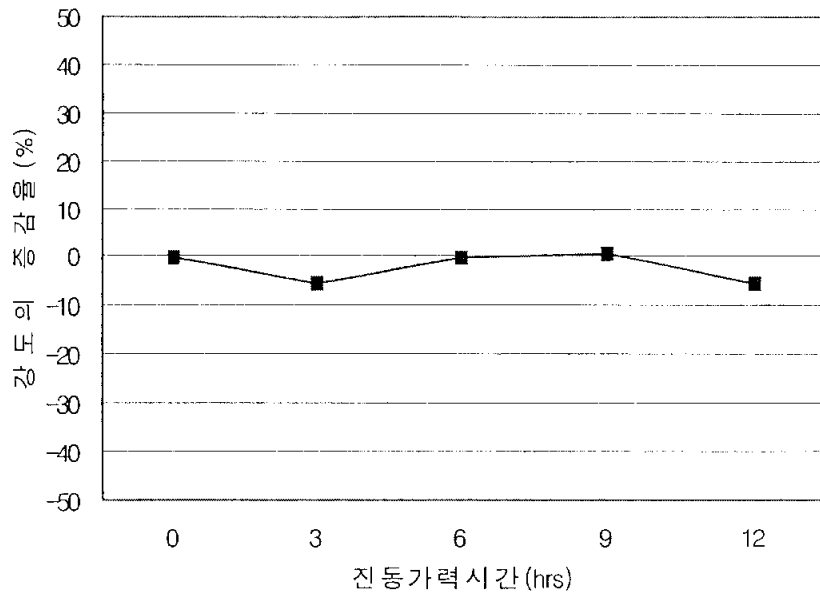


그림 4.3 진동가력시간에 따른 조인트장강도의 변화

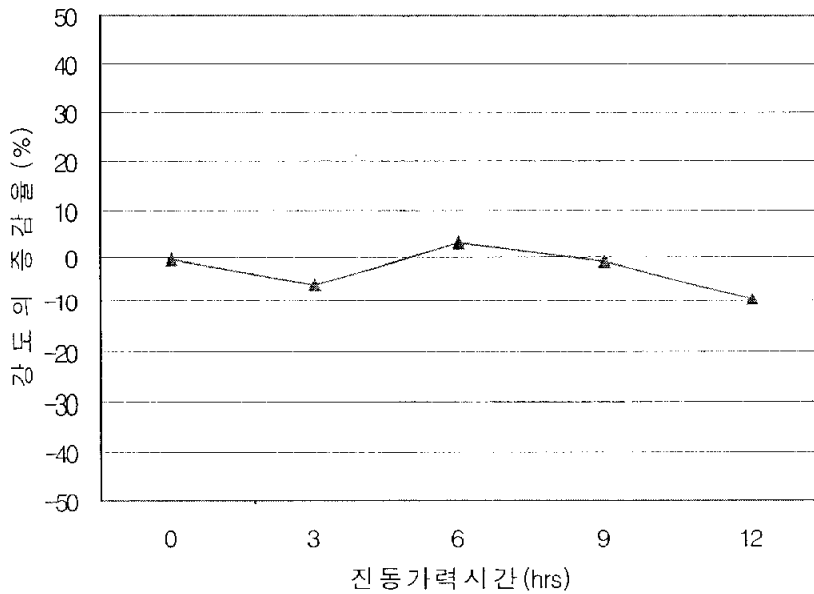


(a) 0.25 kine

그림 4.4 진동가력시간에 따른 조인트장강도의 변화 상세도 (계속)

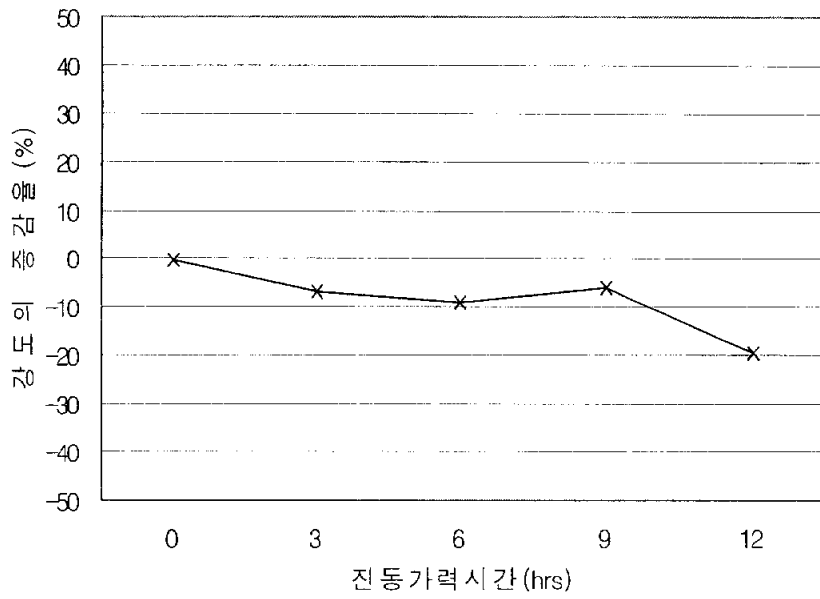


(b) 0.5 kine

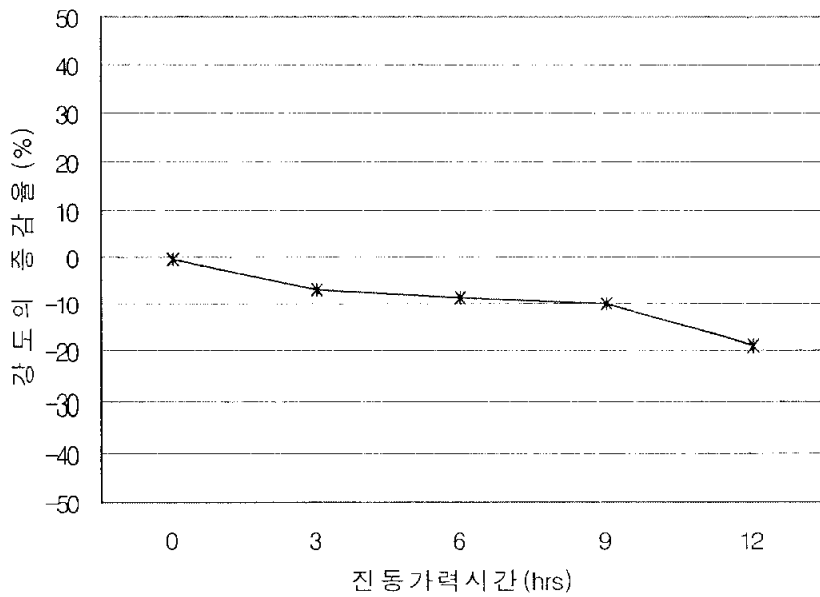


(c) 1.0 kine

그림 4.4 진동가력시간에 따른 조깅인장강도의 변화 상세도 (계속)



(d) 2.0 kine



(d) 4.0 kine

그림 4.4 진동가력시간에 따른 조깅인장강도의 변화 상세도

표 4.3 부착강도(수평)의 증감율

진동속도 (kine)	위 치	강도(kgf/cm ²)	진동가력시간(hrs)			
		증감율(%)	3	6	12	24
0.25	상	S_C	48.4(49.7)			
		S_V	59.1	44.4	50.9	41.5
		증감율	19.0	-10.5	2.4	-16.3
	하	S_C	64.5(60.3)			
		S_V	62.5	59.8	60.6	55.7
		증감율	3.6	-0.8	0.5	-7.7
0.5	상	S_V	53.2	37.8	52.3	53.7
		증감율	7.2	-23.8	5.4	8.2
	하	S_V	56.6	58.4	59.6	65.2
		증감율	-6.2	-3.1	-1.2	8.1
1.0	상	S_C	58.5(49.7)			
		S_V	48.8	50.1	55.5	31.0
		증감율	-1.7	0.9	11.8	-37.5
	하	S_C	56.8(60.3)			
		S_V	62.6	58.2	53.4	50.5
		증감율	3.8	-3.5	-11.4	-16.3
2.0	상	S_V	41.3	32.6	47.6	37.3
		증감율	-16.9	-34.3	-4.2	-24.9
	하	S_V	50.6	54.3	52.9	44.2
		증감율	-16.0	-10.0	-12.2	-20.3
4.0	상	S_C	42.0(49.7)			
		S_V	49.2	41.6	30.2	37.5
		증감율	-0.9	-32.0	-26.0	-23.5
	하	S_C	56.1(60.3)			
		S_V	47.5	46.6	54.0	44.2
		증감율	-21.3	-22.7	-10.4	-26.7

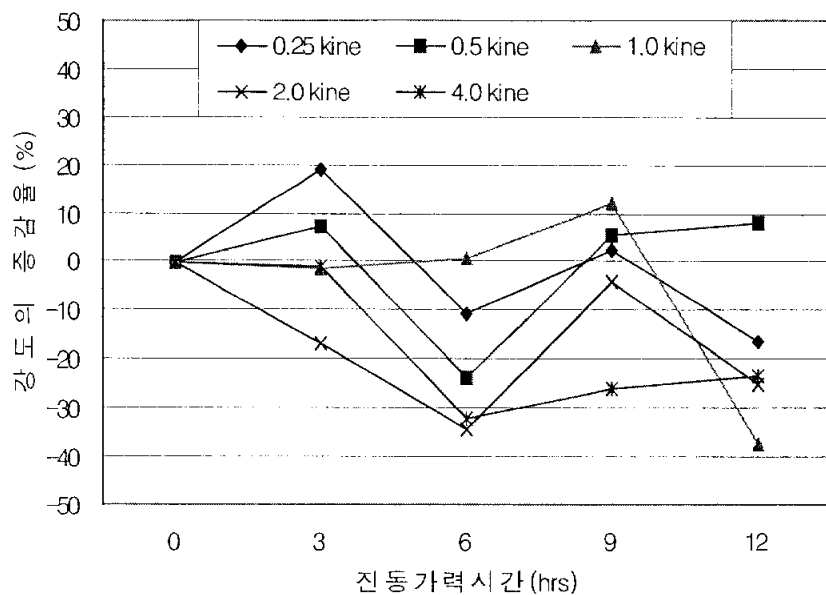
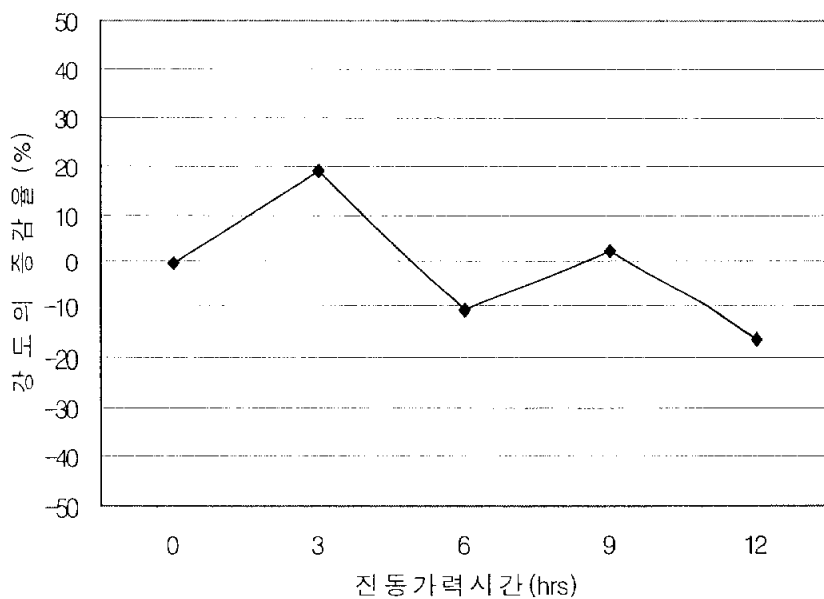
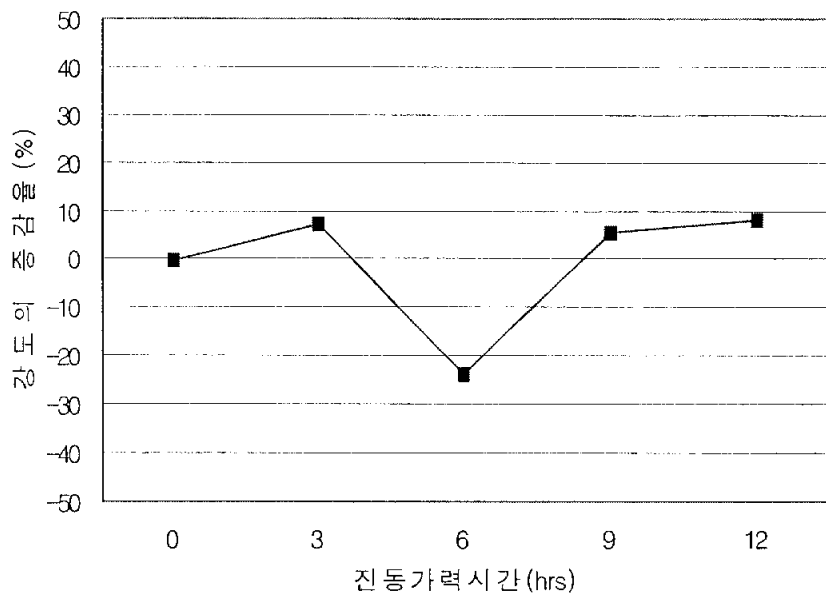


그림 4.5 진동가력시간에 따른 부착강도(수평-상)의 변화

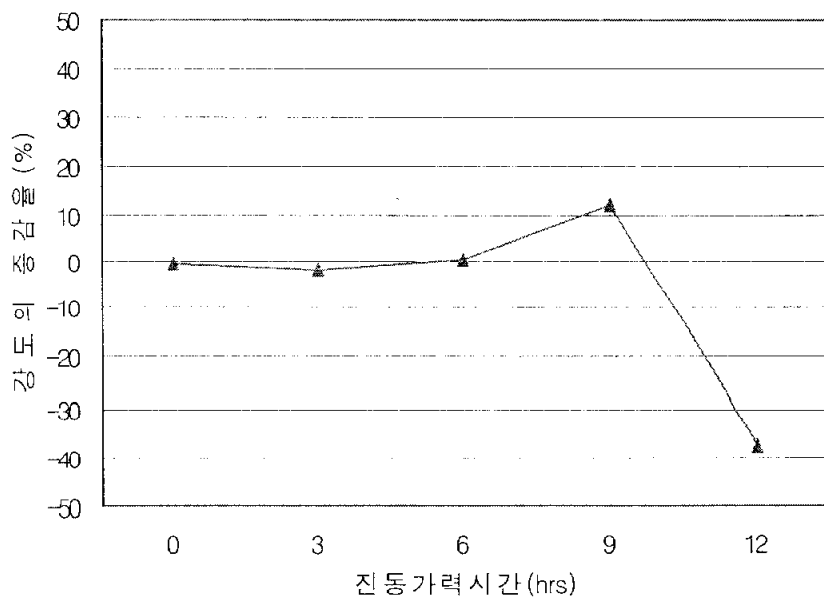


(a) 0.25 kine

그림 4.6 진동가력시간에 따른 부착강도(수평-상)의 변화 상세도 (계속)

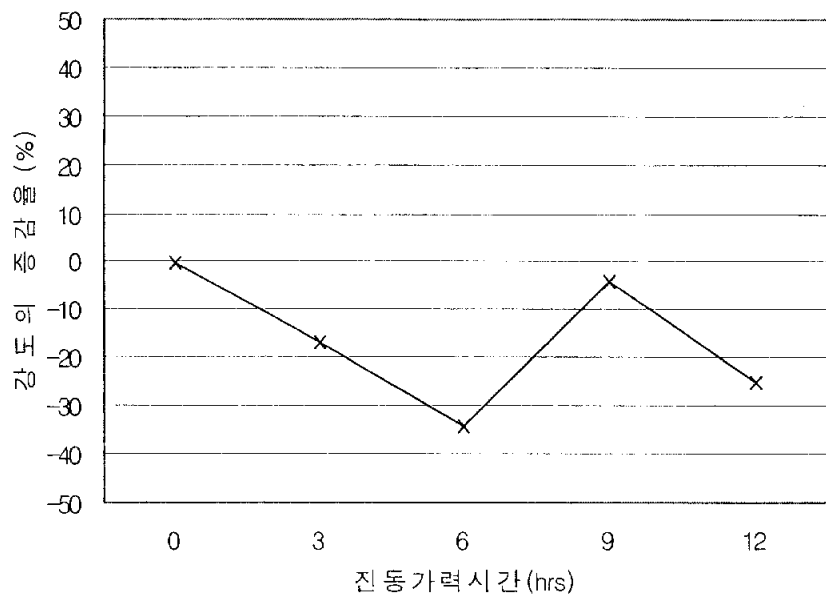


(b) 0.5 kine

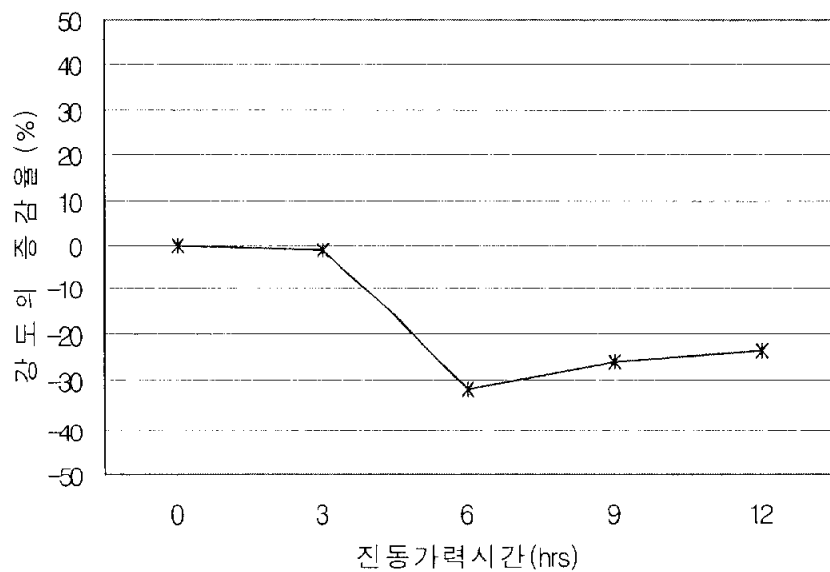


(c) 1.0 kine

그림 4.6 진동가력시간에 따른 부착강도(수평-상)의 변화 상세도 (계속)



(d) 2.0 kine



(e) 4.0 kine

그림 4.6 진동가력시간에 따른 부착강도(수평-상)의 변화 상세도

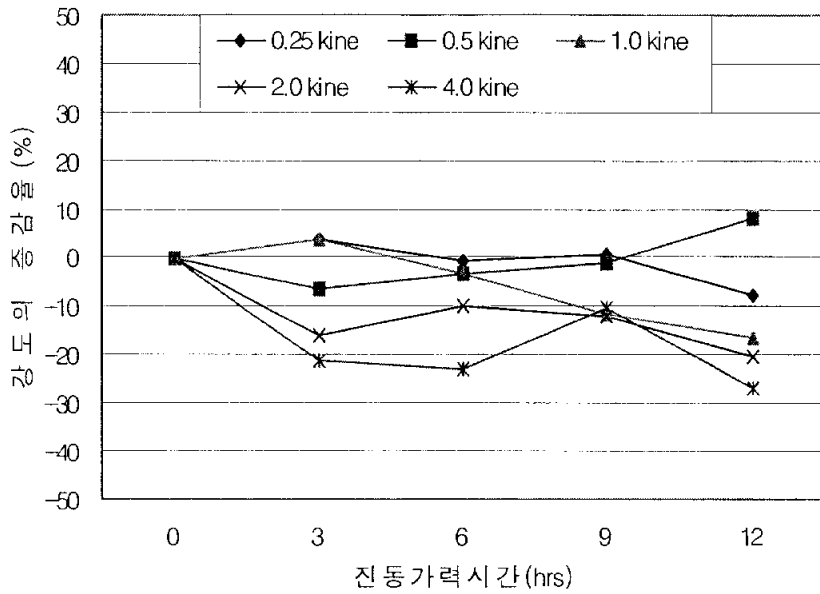
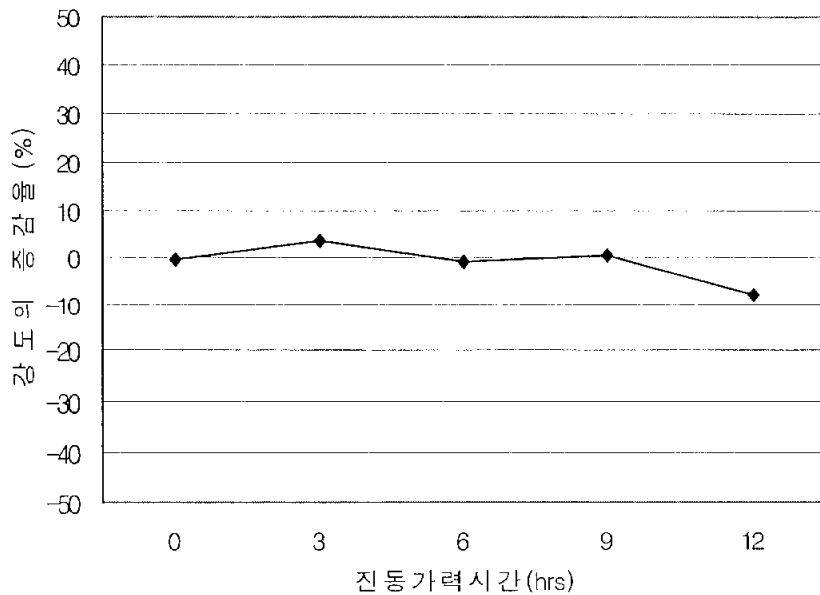
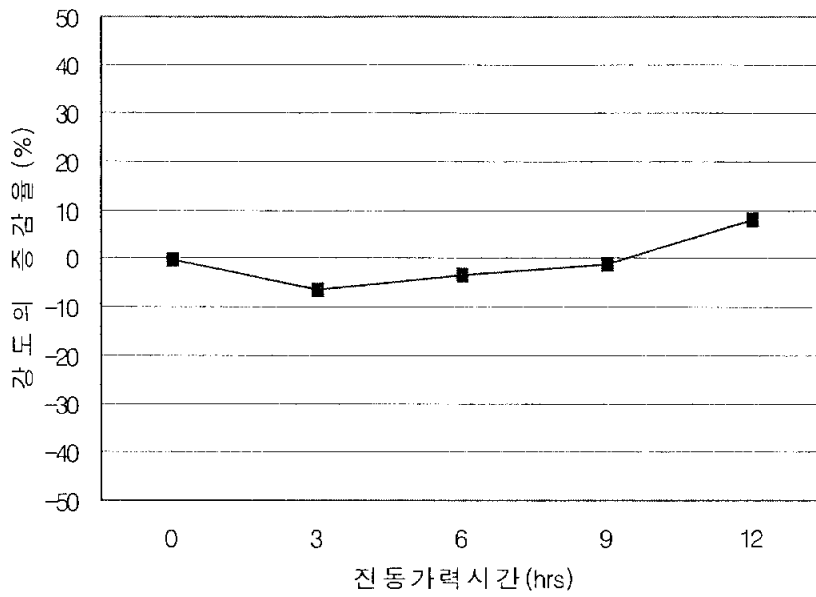


그림 4.7 진동가력시간에 따른 부착강도(수평-하)의 변화

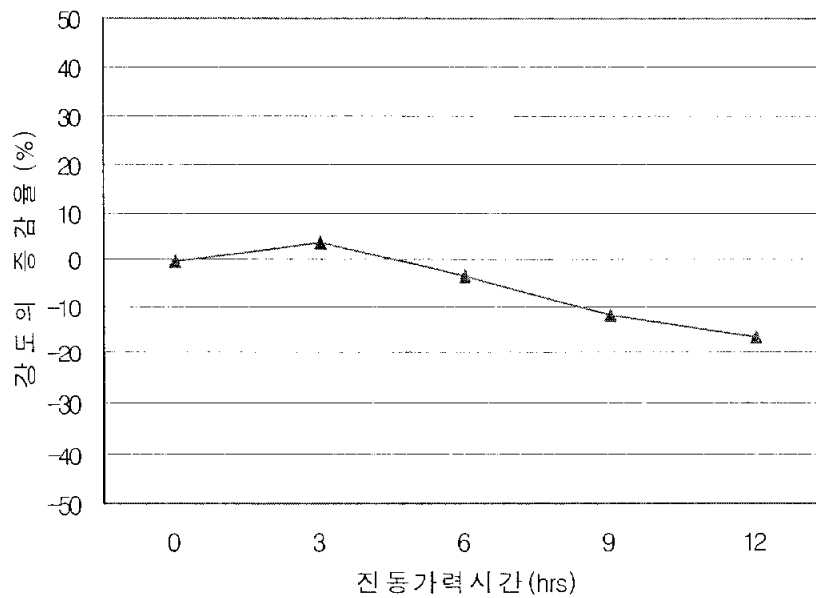


(a) 0.25 kine

그림 4.8 진동가력시간에 따른 부착강도(수평-하)의 변화 상세도 (계속)

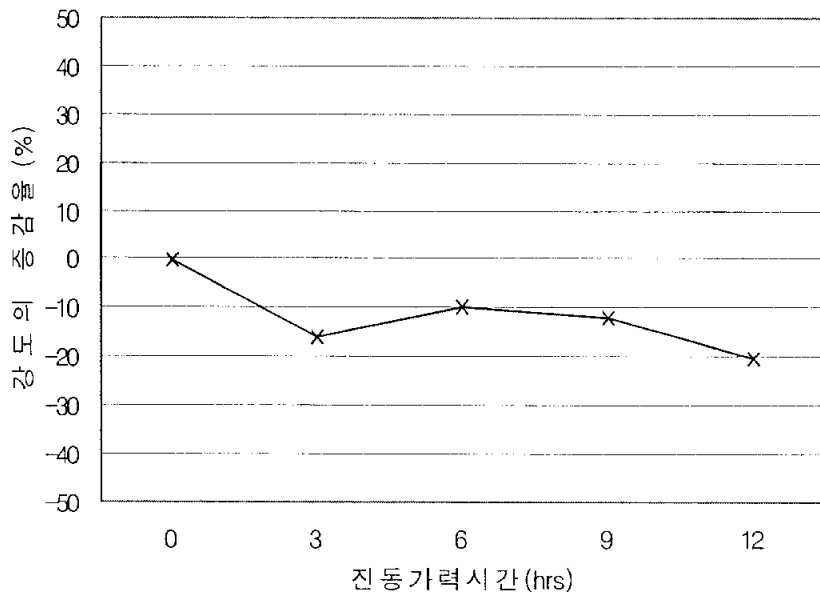


(b) 0.5 kine

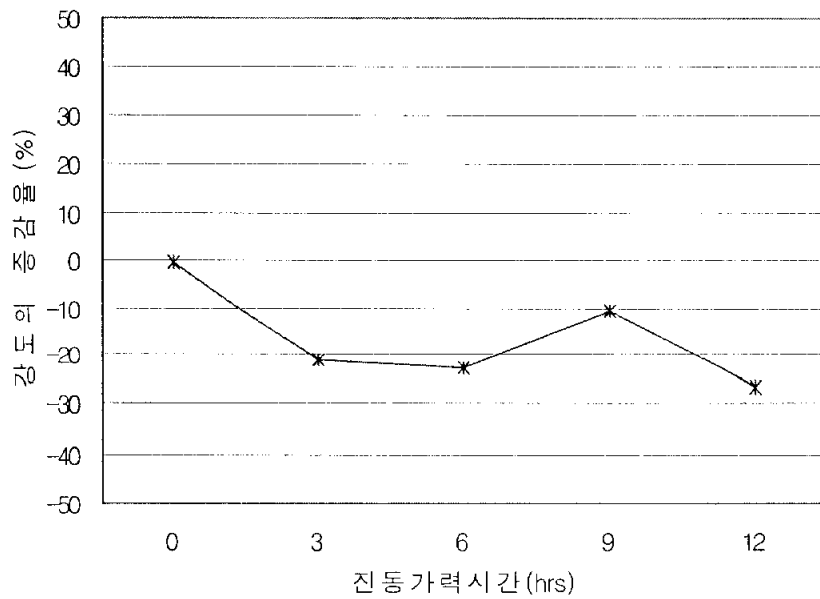


(c) 1.0 kine

그림 4.8 진동가력시간에 따른 부착강도(수평-하)의 변화 상세도 (계속)



(d) 2.0 kine



(e) 4.0 kine

그림 4.8 진동가력시간에 따른 부착강도(수평-하)의 변화 상세도

표 4.4 부착강도(수직)의 증감율

진동속도 (kine)	강도(kgf/cm ²)	진동가력시간(hrs)			
	증감율(%)	3	6	9	12
0.25	S_C	78.9(70.5)			
	S_V	80.3	87.1	71.1	71.1
	증감율	14.0	23.6	0.9	0.9
0.5	S_V	78.3	93.4	69.3	74.9
	증감율	11.0	32.5	-1.6	6.3
1.0	S_C	70.0(70.5)			
	S_V	76.9	87.7	77.8	72.7
	증감율	9.2	24.5	10.4	3.2
2.0	S_V	57.5	66.1	50.3	71.2
	증감율	-18.4	-6.2	-28.6	1.1
4.0	S_C	62.6(70.5)			
	S_V	63.2	65.4	58.9	41.8
	증감율	-10.3	-7.2	-16.5	-40.7

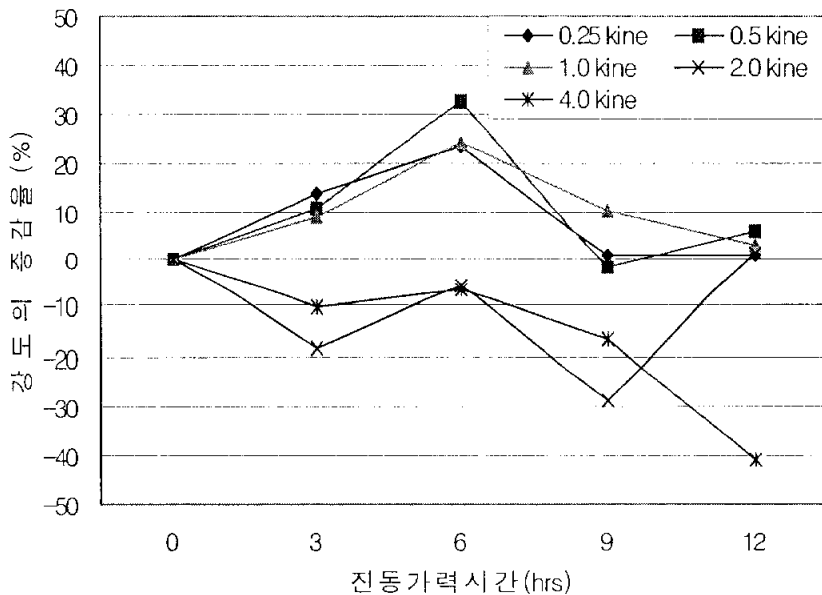
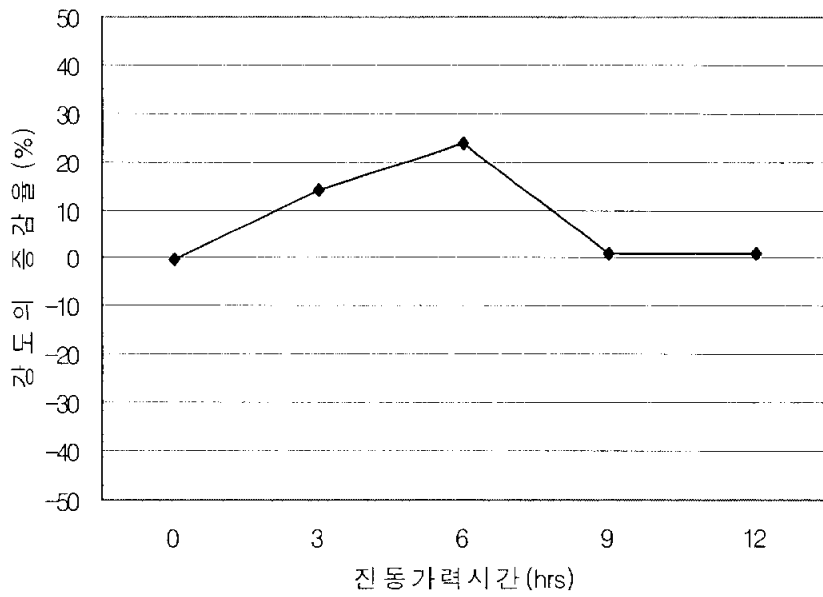
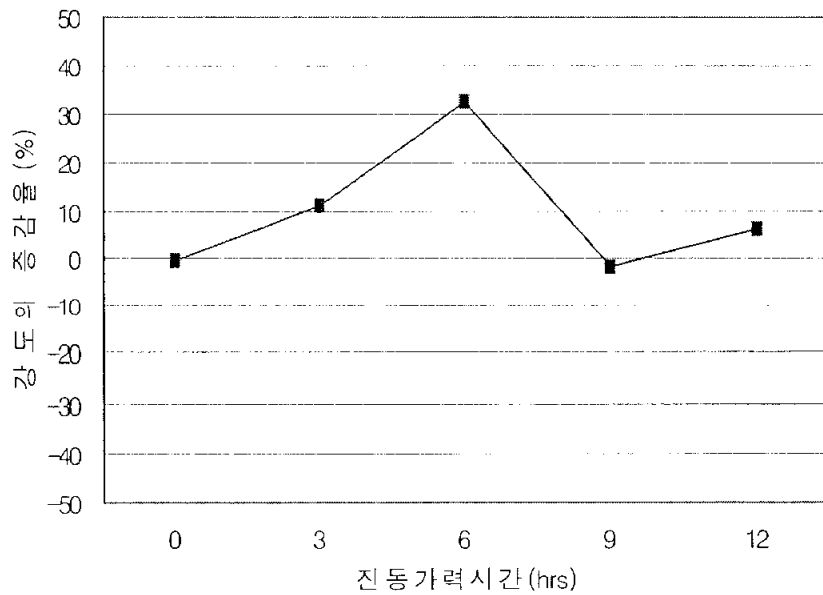


그림 4.9 진동가력시간에 따른 부착강도(수직)의 변화

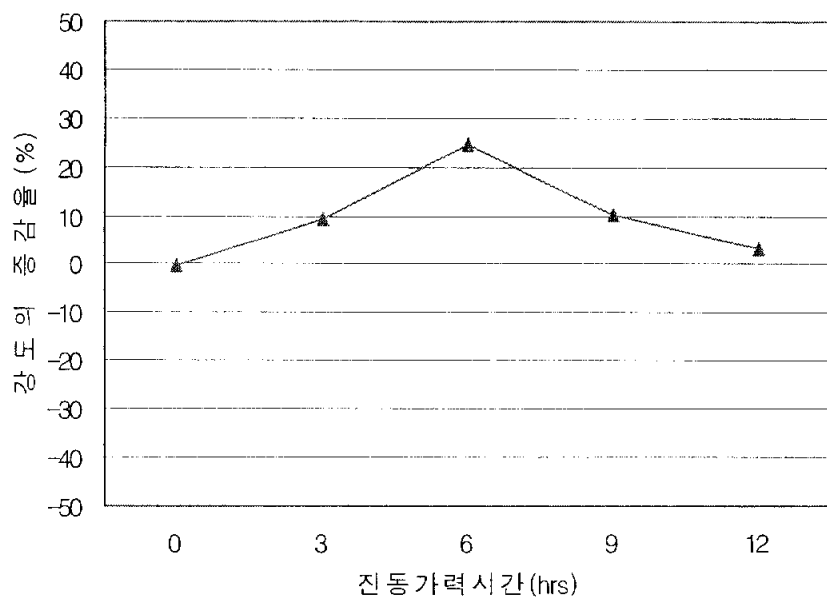


(a) 0.25 kine

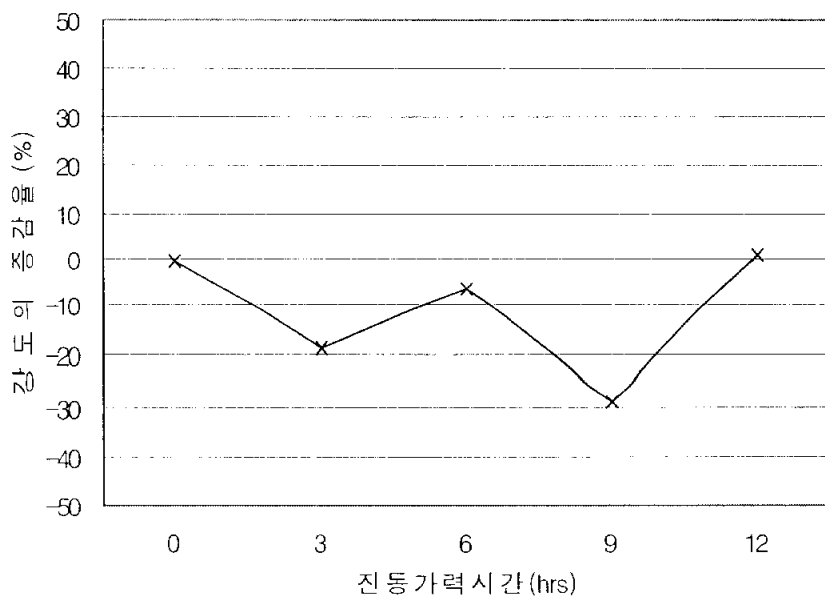


(b) 0.5 kine

그림 4.10 진동가력시간에 따른 부착강도(수직)의 변화 상세도 (계속)

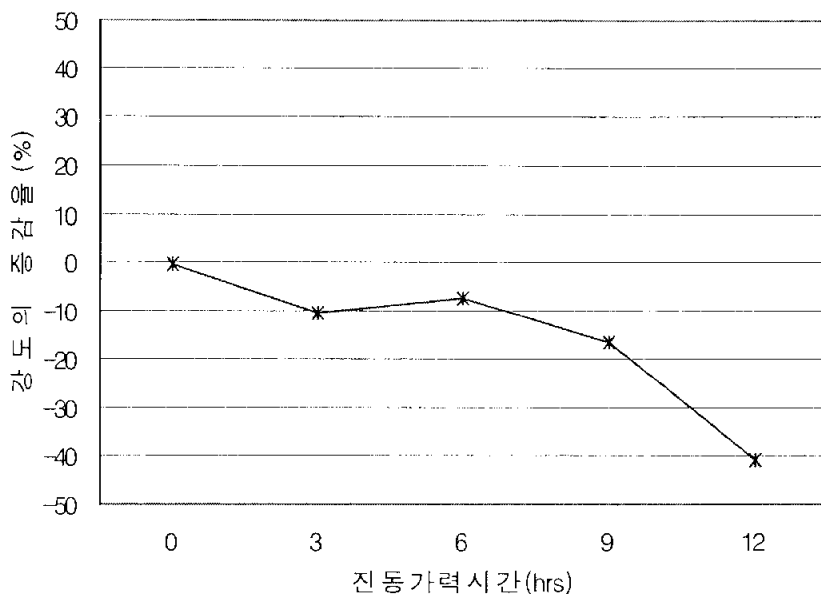


(c) 1.0 kine



(d) 2.0 kine

그림 4.10 진동가력시간에 따른 부착강도(수직)의 변화 상세도 (계속)



(e) 4.0 kine

그림 4.10 진동가력시간에 따른 부착강도(수직)의 변화 상세도

4.2 실험결과 분석

실험결과 압축강도는 양생중 수직진동의 영향을 받으면 진동속도가 증가함에 따라 강도의 감소율이 전반적으로 증가하는 경향(최소 감소량: 0.25kine으로 6시간 가력시 4.4%, 최대 감소량: 4.0kine으로 12시간 가력시 33.2%)을 보여주었으나, 진동가력시간에 따라서는 일정한 경향을 나타내지 않았다. 강도 감소의 원인으로서 콘크리트가 진동을 받음으로 인해 비정상적인 응결이 이루어지기 때문으로 판단이 된다.

인장강도는 0.25kine에서는 진동가력시간에 관계없이 강도가 증가하였지만(최대 증가량: 6시간 가력시 8.9%, 최소증가량: 12시간 가력시 0.6%), 진동속도가 더 커지면 전반적으로 감소하는 경향(최대 감소량: 2.0kine으로 12시간 가력시 19.5%)을 보여주었으며 역시 진동가력시간과는 무관하였다.

부착강도는 수직철근 부착강도의 경우에만 0.25~1.0kine에서 진동가력시간에 관계없이 강도가 증가하였으며(최대 증가량: 0.5kine으로 6시간 가력시 32.5%, 최소 증가량: 0.25kine으로 9시간 가력시 0.9%, 단, 0.5kine으로 9시간 가력시만 1.6% 감소함), 그 외의 경우에는 일정한 경향을 보여주지 않았고 전반적으로 감소하였다. 또한 수평철근의 부착강도에서 위쪽에 위치한 철근의 부착강도는 아래쪽에 위치한 철근의 부착강도보다 감소량이 증가하였다.(위쪽 수평철근 부착강도 최대 감소량: 1.0kine으로 12시간 가력시 37.5%, 아래쪽 수평철근 부착강도 최대 감소량: 4.0kine으로 12시간 가력시 26.7%).

4.3 진동수의 변화에 따른 압축강도의 영향

진동의 변화에 따른 콘크리트 압축강도의 영향을 타 문헌^{10,11)}에서 사용된 진동치를 이용하여 추가적으로 조사하여 보았다. 이 문헌에서는 진동속도 4Hz, 진폭 1mm로 한 조건을 본 실험에서 사용한 진동판에서 적용해본 결과 진동속도가 2.85kine에 해당됨을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 진동수의 변화에 따른 강도의 영향을 조사하기 위하여 진동속도를 2.85kine으로 고정시키고, 진동수를 4, 6, 8Hz로 변화시켰으며, 이에 따른 진폭은 각각 1, 0.67, 0.495mm로 됨을 반복 측정을 통하여 알 수 있었다.

표 4.5에 2.85kine에 가까운 2.0 및 4.0kine에서 얻어진 압축강도값(표 4.1 참조)과 4, 6, 8Hz에서 측정된 강도값들을 함께 나타내었다. 이 값들을 비교해볼 때 진동수가 작아짐에 따라 압축강도의 감소율이 작아지지만, 진동수의 변화에 따라 일정한 경향을 나타내는 것은 아님을 알 수 있었으며, 추후 이에 대한 조사가 더 필요할 것으로 판단되었다.

표 4.5 진동속도(Hz)의 변화에 따른 압축강도의 증감율

진동속도	강도(kgf/cm ²)	진동가력시간(hrs)			
	증감율(%)	3	6	9	12
2.0kine	S_C	222.0			
	S_V	167.8	180.0	175.9	160.0
	증감율	-24.4	-18.9	-21.0	-27.9
4.0kine	S_C	222.0			
	S_V	166.5	174.2	175.5	148.3
	증감율	-25.0	-21.5	-21.0	-33.2
2.85kine (4Hz,1mm)	S_C	222.0			
	S_V	233.5	220.8	188.4	226.8
	증감율	5.2	-0.5	-15.1	2.1
2.85kine (6Hz,0.67mm)	S_C	222.0			
	S_V	210.4	186.8	214.2	205.6
	증감율	-5.2	-15.9	-3.5	-7.4
2.85kine (8Hz,0.495mm)	S_C	222.0			
	S_V	222.4	216.8	223.7	229.1
	증감율	0.2	-2.3	0.8	3.2

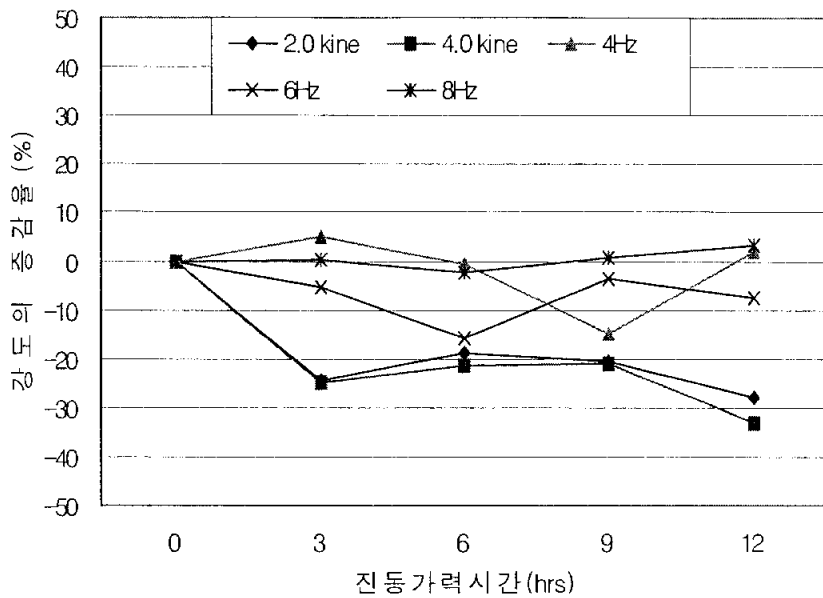
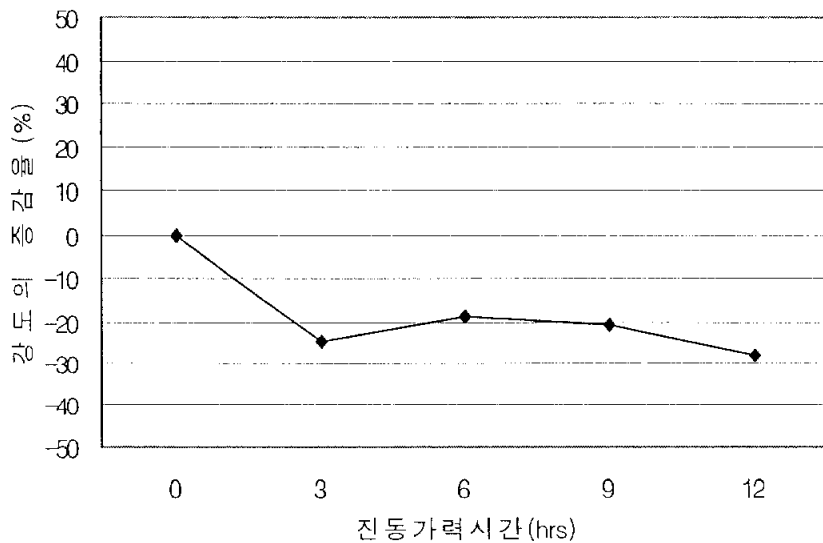
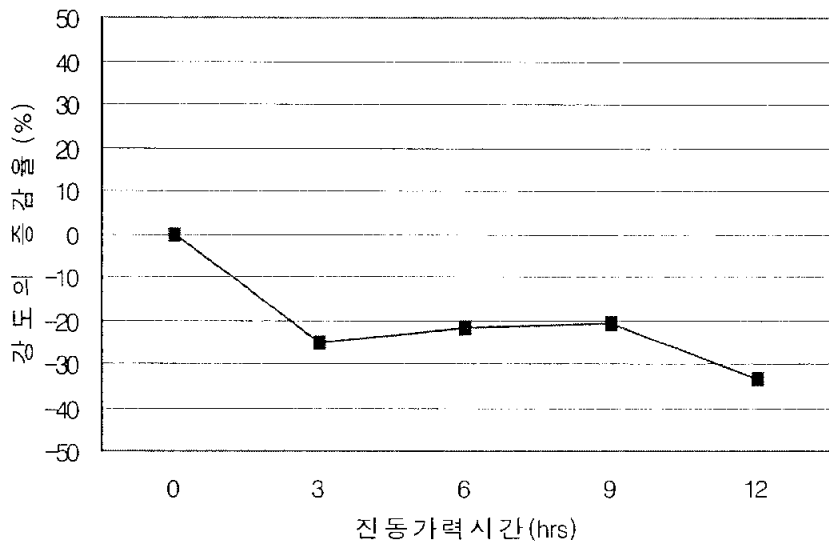


그림 4.11 진동속도(Hz)의 변화에 따른 강도의 영향

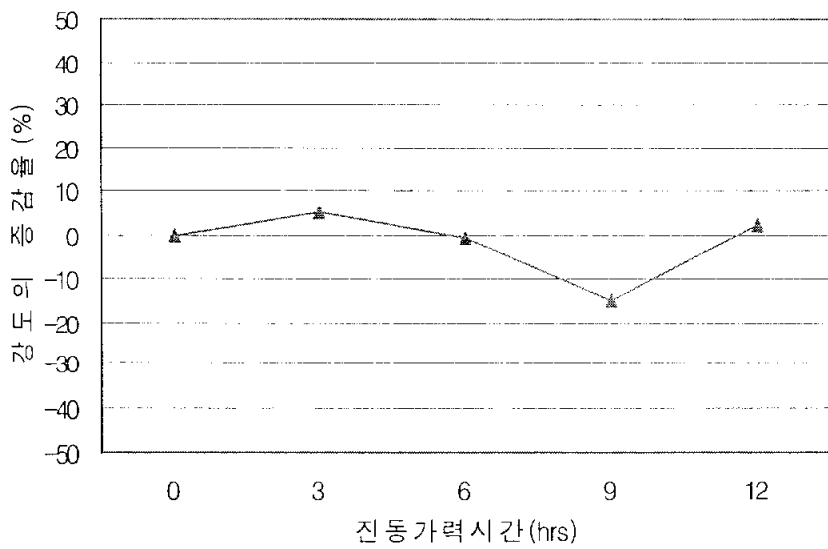


(a) 2.0kine

그림 4.12 진동속도(Hz)의 변화에 따른 강도의 영향 상세도 (계속)

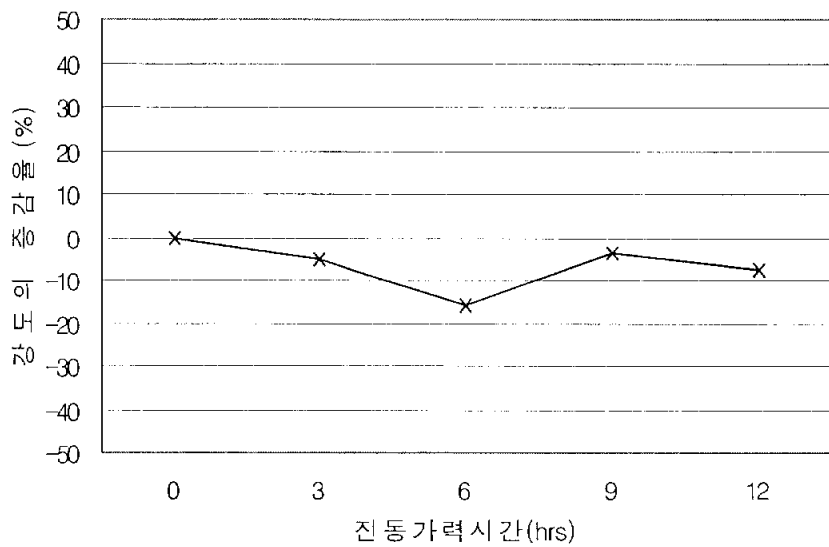


(b) 4.0kine

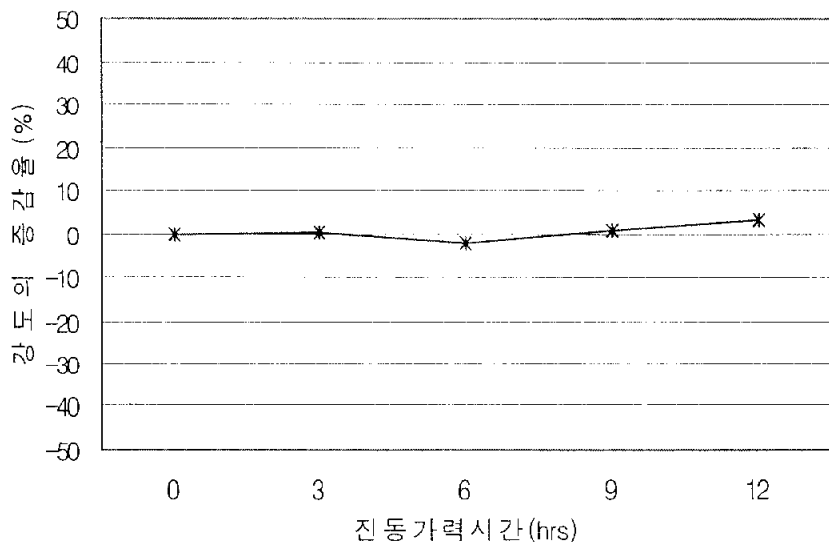


(c) 4Hz

그림 4.12 진동속도(Hz)의 변화에 따른 강도의 영향 상세도 (계속)



(d) 6Hz

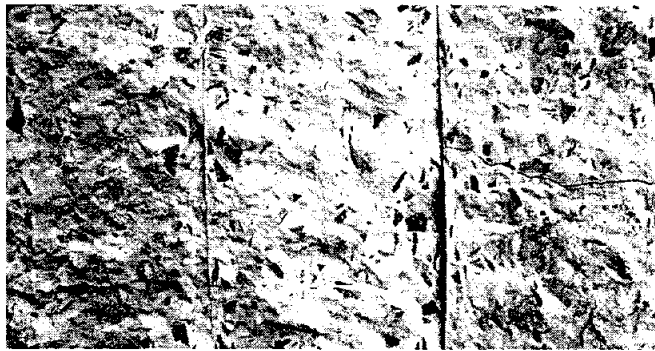


(e) 8Hz

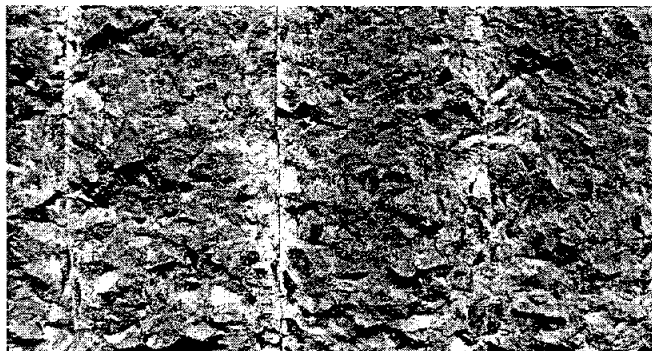
그림 4.12 진동속도(Hz)의 변화에 따른 강도의 영향 상세도

4.4 재료분리 조사

재료분리 여부는 쪼갬인장강도 측정 후 얻어진 시험체의 파단면을 육안으로 세밀히 관찰함으로써 판별하였다. 그림 4.15에 기준시험체와 각 진동 속도에 대하여 최장 진동가력시간인 12시간동안 진동을 받은 쪼갬인장시험체의 파단면 사진들을 나타내었다. 이들 사진에서 볼 수 있듯이 진동에 의해 시험체 상부의 골재가 전체적으로 약간씩 하강한 것은 볼 수 있었으나 강도나 내구성에 영향을 미칠 정도의 심각한 재료분리는 발생하지 않았다.

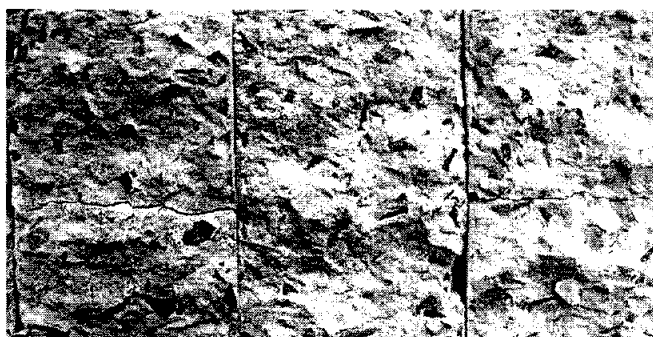


(a) Control

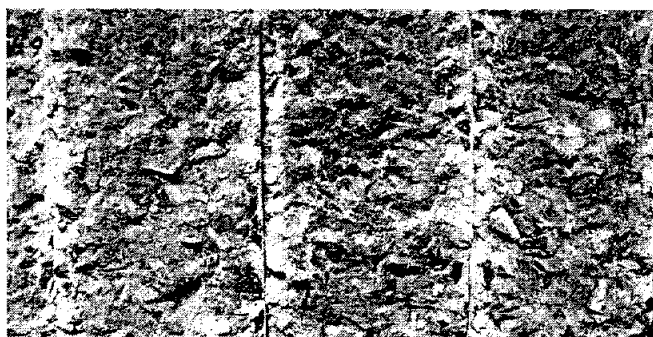


(b) 0.25kine-12hrs

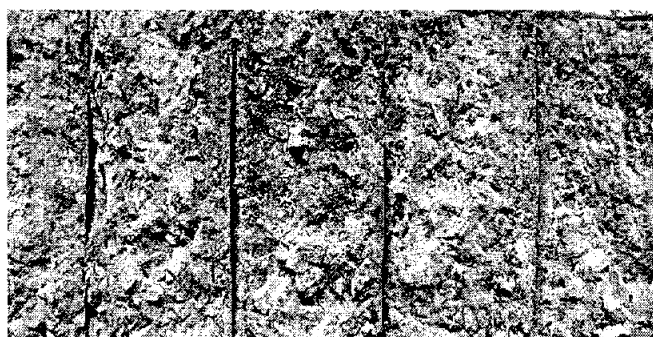
그림 4.13 기준공시체와 12시간 진동을 가한 쪼갬인장강도 측정용 시험체의 파단면 (계속)



(c) 0.5kine-12hrs

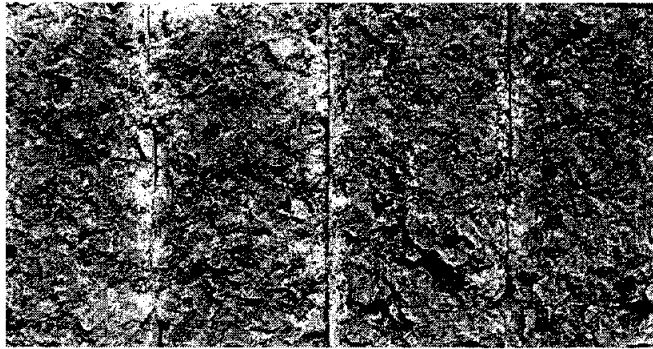


(d) 1.0kine-12hrs



(e) 2.0kine-12hrs

그림 4.13 기준공시체와 12시간 진동을 가한 쏘갸인장강도
측정용 시험체의 파단면 (계속)



(f) 4.0kine-12hrs

그림 4.13 기준공시체와 12시간 진동을 가한 포갠장강도
측정용 시험체의 파단면

제 5 장 결 론

초기양생중인 콘크리트에 수직연속진동이 미치는 영향을 조사하기 위한 본 연구에서, 콘크리트의 강도와 재료분리에 미치는 영향을 실험을 통하여 분석해본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 초기양생중 수직진동의 영향을 받으면 압축강도는 진동속도가 증가함에 따라 강도의 감소율이 전반적으로 증가하는 경향을 보여주었으나, 진동가력시간에 따라서는 일정한 경향을 나타내지 않았다.
2. 인장강도는 0.25kine에서는 진동가력시간에 관계없이 강도가 증가하였지만, 진동속도가 더 커지면 강도가 전반적으로 감소하는 경향을 보여주었으며 역시 진동가력시간과는 무관하였다.
3. 부착강도는 수직철근 부착강도의 경우에만 0.25~1.0kine에서 진동가력시간에 관계없이 강도가 증가하였으며, 그 외의 경우에는 일정한 경향을 보여주지 않았고 전반적으로 감소하였다. 또한 수평철근의 부착강도에서 위쪽에 위치한 철근의 부착강도는 아래쪽에 위치한 철근의 부착강도보다 감소량이 증가하였다.
4. 동일 진동속도에서 진동수의 변화에 따른 강도의 영향을 조사해본 결과 진동수가 작아짐에 따라 압축강도의 감소율이 작아지지만, 진동수의 변화에 따라 일정한 경향을 나타내는 것은 아님을 알 수 있었으며, 추후 이에 대한 조사가 더 필요할 것으로 판단되었다.
5. 진동에 의해 시험체 강도나 내구성에 영향을 미칠 정도의 심각한 재료분리는 발생하지 않았다.

이상과 같이 초기양생 중에 받는 진동이 콘크리트의 강도에 불리한 영향을 미친다면, 향후 초기양생 기간 중 진동요인을 제어해야 하는 시간의 간격 등에 관한 조사가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 한국콘크리트학회 (1999), 건설교통부 제정 콘크리트 표준시방서.
2. 한국도로교통협회 (1999), 건설교통부 제정 도로교표준시방서.
3. Howes, E. V. (1979), Effects of Blasting Vibrations on Curing Concrete, *Proceedings, 20th U.S. symposium on Rock Mechanics, Austin, Texas*, pp. 455~460.
4. Hulshizer, A. J. (1996), Acceptable Shock and Vibration Limits for Freshly Placed and Maturing Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 6, pp. 524~533.
5. Bastian, C. E. (1970), The Effects of Vibrations on Freshly Poured Concrete, *Foundation Facts*, Vol. 6, No. 1, pp. 14~17.
6. Akins, Kenneth P. Jr and Dixon, Donald E. (1979), Concrete Structures and Construction Vibrations, *ACI SP-60*, pp. 213~247.
7. 임종석 외 (1990), 진동이 주변구조물 및 콘크리트 경화에 미치는 영향, 대한주택공사
8. Krell, William C. (1979), Effect of Coal Mill Vibration on Fresh Concrete, *Concrete International: Design and Construction*, Vol. 1, No. 12, pp. 31~34.
9. 권영웅 (1988), 진동이 콘크리트의 초기강도에 미치는 영향에 대하여, 대한주택공사, 주택 제 49호, pp. 95~100.
10. 대한주택공사 (1990.6), 진동이 주변구조물 및 콘크리트 경화에 미치는 영향
11. 홍순길, 장동일 (1994), 확폭교량 RC상판의 휨거동에 관한 연구, 콘크리트학회지, 제6권 3호, pp. 152~161.
12. 홍순길, 장동일 (1994), 확폭교량 RC상판의 피로거동에 관한 연구, 콘크리트학회지 제6권 6호, pp. 143~150.

13. 오병환, 송혜금, 조재열 (1998), 진동이 양생초기 콘크리트에 미치는 영향에 관한 연구, 콘크리트학회지 제10권 5호, pp. 81~87.
14. Sawyer, D. H. and Lee, S. F. (1956) The Effects of Revibration on Properties of Portland Cement Concrete, *ASTM Proceedings*, Vol. 56, pp. 1215~1228.
15. Vollick, C. A. (1958) Effects of Revibration Concrete, *ACI Journal*, Vol. 29, No. 9, pp. 729~732.
16. Cannon, Robert W. (1974) Compaction of Mass Concrete with Vibratory Roller, *ACI Journal*, Vol. 71, No. 10, pp. 506~513.
17. ACI Committee 309 (1981) Behavior of Fresh Concrete During Vibration, *ACI Journal*, Jan-Feb, pp. 36~53.
18. John F. W. (1981) Construction Vibrations: State-Of-The-Art, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 107, No. GT2, pp. 167~181.
19. 정하선, 권영웅, 오용복 (1991), 콘크리트 강도의 진동에 관한 연구, 한국 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, pp. 37~40.
20. 윤상천, 지남용, 이리형 (1996), 진동다짐이 굳지 않은 콘크리트의 거동에 미치는 영향평가를 위한 실험연구, 대한건축학회 논문집, 12권 3호, pp. 203~211.
21. 윤영수, 장영일, 이승훈 (1996), 말뚝항타에 의한 진동발생이 콘크리트에 미치는 영향에 관한 실험적 연구, 대한토목학회 논문집, 제 6권, 제1~5호, pp. 515~526.
22. 이지은, 권영웅 (2000), 진동이 양생중인 콘크리트에 미치는 영향에 관한 연구, 한국콘크리트학회 봄학술 발표회 논문집, pp. 97~102.
23. 한중기, 장희석, 김명식 (2000), 수평연속진동이 초기양생 중인 콘크리트의 강도에 미치는 영향에 관한 실험적 연구, 대한토목학회 학술발표회 논문집(I), pp. 404~410.

감사의 글

학부 3학년말 처음 이 연구실에 들어와 중기선배, 점심선배와 생활 할 때가 얼마 되지 않은 것 같은데 벌써 대학원 2년 과정을 마치고 졸업을 하게 되었습니다. 선배님들의 많은 충고와 격려가 저에게는 큰 힘이 되고 의지가 되었지만 막상 선배님들이 졸업하면서 처음에는 혼자 이 연구실을 지키기는 것이 무척 쓸쓸하고 힘들었습니다. 그러나 항상 장희석 교수님의 따뜻한 배려와 보살핌이 있어 저에게 아주 큰 힘이 되어 아무 탈없이 졸업을 하게 되었습니다. 이제서야 이 논문을 통해 저에게 큰 힘과 용기를 주신 분들께 다시 한번 감사의 마음을 표현하고자 합니다.

저희가 사소한 일 처리를 하더라도 잘하면 아낌없으신 칭찬과 격려를 해주시고 조금의 실수라도 범할 때는 엄하게 꾸중을 해주셨어 매사에 신중을 기할 수 있게 해 주신 장희석 교수님께 특히 감사의 뜻을 전하며 사회에 나가더라도 교수님의 소중한 가르침을 가슴 깊이 새겨 누구나 인정할 수 있는 성실한 제자가 되도록 하겠습니다.

이 논문이 완성되기까지 바쁘신 와중도 불구하고 저의 논문을 세심하게 심사를 해 주신 국승규 교수님과 이환우 교수님께 다시 한번 고개 숙여 감사를 드립니다. 아울러 토목에 대한 전반적인 지식을 배양해 주신 김상용 교수님, 손인식 교수님, 김종수 교수님, 이동욱 교수님, 김명식 교수님, 이종출 교수님, 이영대 교수님, 이종섭 교수님, 정진호 교수님, 정두희 교수님, 이상호 교수님께 이 글을 통해 다시 한번 감사를 드립니다.

부경대학교 연구실의 선배로서 항상 어려움이 있을 때 충고와 격려를 해 주신 손병락, 정태환, 한중기, 심점식 선배님께 감사를 드립니다. 또한 저와 같이 학기 중이나 방학 중에 세미나를 같이 하며 고생하신 산업대학원 송원영, 이동원, 송규황 형님들께도 감사를 드리며, 지금은 개인적인 사정으로 잠시 휴학중이지만 대학원 생활에서 참 의지를 많이 했던 동기 동준, 컴퓨터에 대한 전반적인 지식을 넓혀준 재환이형과 도영, 상민이 그리고 그 외에 동기들에게 감사를 드립니다. 늦게 들어와 몸이 좋지 않은데도 저의 일을 도와 고생하고 있는 박현영 후배, 조금 있으면 대학원에 들어오는 재룡동이 형수 후배께도 또한 감사를 드리며, 아무쪼록 아무 탈없이 교수님 가르침을 잘 받아 졸업하기를 바랍니다.

학생이라 돈도 없어 힘들어 할 때 술 친구가 기꺼이 되어준 기연이, 씨레기 민규, 조똥아 이 인훈, 부환, 토목계 선배 재봉, 유부남 정구, 똥팔이 설표, 공노비 규희, 전화 할 때 마다 야간인 경준, 그 외에 해당되는 여자친구들, 또 없나(?). 다시 한번 동술협회 친구들이 있어 무사히 졸업을 하게 되어 감사의 마음을 전합니다.

가장 힘들 때 부모님과 같이 격려와 충고를 해주신 매형, 그리고 누님, 항상 고맙게 생각합니다. 힘들게 저의 뒷바라지를 해주심에 감사를 드리며 앞으로 기대에 어긋나지 않게 열심히 살겠습니다. 또한 삼촌을 잘 따르는 이쁜 세림이와 귀여운 은정이가 있어 삼촌이 집에 가도 즐겁게 해줘서 고맙게 생각합니다.

마지막으로 불철주야로 타지 생활을 걱정해 주시고 뒷바라지 해주신 어머님께 이 논문을 바칩니다.