

콘크리트 포장 슬래브의 변형률 측정에 관한 연구

A Study on the Strain Measurement of Concrete Pavement Slab

김 동 호* 전 성 일** 최 창 식** 윤 병 성** 윤 경 구***
Kim, Dong-Ho Jeon, Sung-Il Choi, Chang-Sik Yun, Byeung-Sung Yun, Kyong-Ku

Abstract

The purpose of this paper is to investigate for strain measurement of concrete pavement slab at field. The early-age behaviors of concrete pavement were measured using the strain gages. From the static and dynamic wheel loading tests, the outputs from each gages were recorded. The measured data, also, was compared to those from finite element analysis. The static wheel loading tests were performed in twice, and the dynamic wheel loading tests were performed at the speed 10km~50km. The results could be summarized as follows:

To embed the strain gage accurately and stably in concrete pavement, a chair and protective box must be used. The protective box must not be affected from the outside vibrating. From the results of early-age strain measurement, it was found that the strain varied at the maximum value of $180 \mu\epsilon$. From the results of static wheel loading tests, A1, A2 and B gages generally developed a consistent tendency. When comparing the results from the measured at field and the calculated by FEM analysis, the data of A1 and B gages were similar to that from theory. The values from the field test were generally higher than that from the theory. From the results of dynamic wheel loading tests, it was known that the measured strain at field became smaller as the truck speed became faster, indicating the maximum at the range of $12\sim 13 \mu\epsilon$.

키워드 : 변형률 게이지, 초기 거동, 거치대, 보호박스

Keywords : Strain gage, Early-age behaviors, Chair, Protective box

1. 서 론

최근, 한국도로공사 도로연구소에서는 우리나라의 환경 및 교통특성에 적합한 도로설계기술을 개발하고자 중부내륙고속도로에 시험도로를 건설하고 있다. 이는, 국내실정에 적합한 도로포장의 설계법 개발과 유지관리면에서 합리적인 방안이라고 할 수 있다.[2][4][5]

또한, 시험도로를 건설하고 설계인자의 측정과 수집을 위해서는 게이지를 매설한 후 계측이 필요하지만, 국내의 경우 도로포장체에 대한 변형률 게이지 매설 및 계측경험이 전무한 실정이다. 그러므로, 도로포장체에 사용할 게이지는 사전에 현장적용을 통하여 검증이 필요하며 이에 대한 선행연구가 필요하다.[4][5]

따라서, 본 연구에서는 콘크리트 포장체의 변형률 게이지 매설에 관하여 최적의 변형률 게이지 설치방안을 모색하고자 하였다. 또한, 실제 콘크리트 포장이 진행되고 있는 현장을 대상으로 여러 제조회사의 게이지 제품을 비교 평가하고, 정적 및 동적시험을 통하여 측정된 데이터를 수치해석 결

* 강원대학교 토목공학과 박사과정

** 강원대학교 토목공학과 석사과정

*** 강원대학교 토목공학과 조교수, 공학박사

과와 비교하여 현장 적용성을 검증하였다.

2. 현장실험

2.1 게이지 매설

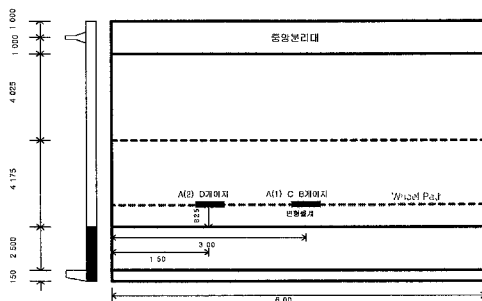
콘크리트포장 변형률게이지의 현장적용 실험은 중앙고속도로 11공구 단양~제천구간 현장에서 슬래브를 일정 구간별로 나누어 매설하였으며, 매설된 게이지는 진동현식(V.W type) 4개와 전기저항식(E.R type) 6개, 총 10개의 변형률 게이지를 매설하였다. 매설된 게이지의 현황은 다음 표 1과 같다.

표 1. 변형률 게이지 매설현황

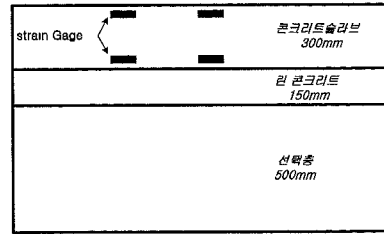
형식	제품명	수량	설치위치	비고
진동현식	A1, A2	2	슬래브 상단	국외
		2	슬래브 하단	
전기저항식	B	1	슬래브 상단	"
		1	슬래브 하단	
	C	1	슬래브 상단	"
		1	슬래브 하단	
D	1	슬래브 상단	"	
	1	슬래브 하단		

2.2 계측센서 설치단면 및 매설위치

그림 1은 콘크리트 포장의 설치단면 및 매설위치를 나타낸 것이다. 게이지의 설치위치는 하중재하로 인한 거동과 온도변화에 의한 슬래브내부의 거동을 잘 나타낼 수 있는 슬래브의 중앙부 상단과 하단에 매설하였다. 게이지 매설에서 슬래브 상단과 하단에 정확한 위치에 게이지를 위치시키기 위해 거치대(Chair)를 제작하여 사용하였으며, 패이퍼로부터 게이지를 보호하기 위해 게이지 보호박스(Protective box)를 제작하여 설치하였다.



(a) 평면도



(b) 측면도

그림 1. 게이지 설치단면 및 매설위치

2.3 게이지 매설방법

콘크리트 변형률 게이지는 런콘크리트 상단에 콘크리트 슬래브가 포설되기 전에 게이지 매설위치에 체어와 보호박스를 이용하여 설치하였다. 그림 2는 거치대(Chair)에 게이지를 거치한 형상을 나타낸 것이고, 그림 3은 보호박스를 설치한 모습을 나타낸 것이다.

본 연구를 통하여 정립한 게이지 매설과정은 다음과 같다.

- ① 게이지 설치 전 선행테스트를 실시하여 게이지의 상태를 점검한다. 와이어의 길이를 충분히

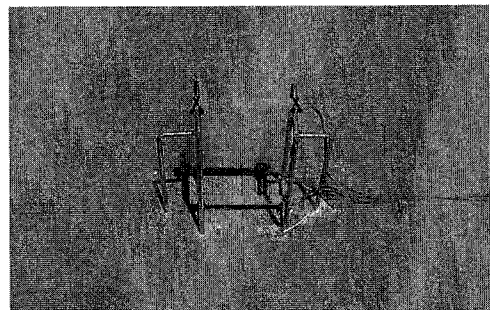


그림 2. 거치대를 이용한 게이지 설치

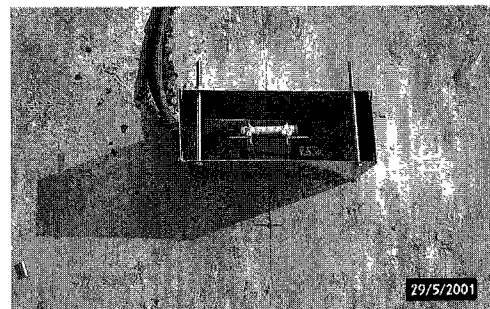


그림 3. 게이지 보호박스 설치

- 확보하기 위해서는 연결와이어를 사전 준비한다.
- ② 정밀측량으로 게이지 매설위치를 표시한다. 이때, 페이지의 진동기가 보호박스를 손상하지 않도록 위치선정에 주의해야 한다.
 - ③ 정밀측량으로 정해진 매설위치는 스프레이 등을 이용하여 린콘크리트 상단에 표시하며, 포설 후 보호박스 제거와 차량시험등을 위해 그 위치를 기록해 둔다.
 - ④ 게이지 거치대가 위치 할 린콘크리트 표면에 그라인더 등을 이용하여 돌출된 부분을 평탄하게 고른다.
 - ⑤ 매설할 게이지를 거치대의 중앙부에 결속선 등을 이용하여 고정하며, 상단 게이지와 하단 게이지의 결속 위치가 동일하도록 한다. 이때 게이지에 무리한 힘이 가해지지 않도록 적당한 힘으로 고정시킨다.
 - ⑥ 게이지가 설치된 거치대는 월트건을 이용하여 린콘크리트 상단에 표시된 매설위치에 단단히 고정시킨다.
 - ⑦ 게이지 보호박스를 고정하기 위해 보호박스의 앵커못이 들어갈수 있도록 콘크리트를 드릴 등을 이용하여 천공한다.
 - ⑧ 보호박스를 설치한다.
 - ⑨ 포설시 페이지의 페도 트랙에 의한 리드와이어의 손상을 방지하기 위하여 커터기를 이용해 일직선으로 린콘크리트를 절단한 다음 브레카를 이용하여 절단된 린콘크리트를 약 10~12 cm정도로 굴착하여 와이어를 콘크리트로 매설한다.
 - ⑩ 페이지가 지나가기 약 5분전에 게이지가 설치된 보호박스 내부와 그 주위를 콘크리트로 다짐봉등을 이용하여 공극이 생기지 않도록 충분히 다진다.
 - ⑪ 페이지가 지나가기 직전 페이지의한 게이지의 손상과 매설위치의 변화를 줄이기 위해서 보호박스와 거치대 주위를 콘크리트로 충분히 보호한다.
 - ⑫ 페이지가 지나간 후 매설된 게이지의 보호박스는 위 ③에서 측량으로 얻어진 자료를 이용하여 제거한다.
 - ⑬ 보호박스 제거로 교란된 포장체의 표면을 흡수를 이용하여 평탄하게 마무리한다.
 - ⑭ 포설이 완료되면 매설된 각각의 게이지를 테스트하여 그 상태를 점검하고 데이터를 기록한다.

3. 재하시험

3.1 정적 재하시험

정적 재하시험은 콘크리트 포장 시공 후 2회에

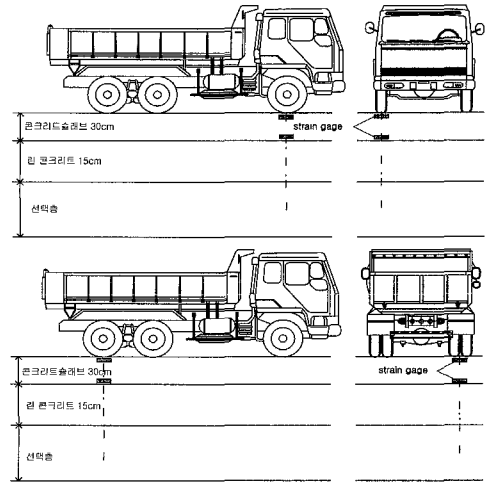


그림 4. 정적 재하시험 모식도

걸쳐 재하시험을 수행하였다 1차 재하시험은 콘크리트 포설 후 52일에 수행하였고 2차 재하시험은 포설 후 72일에 수행하였다. 재하방법은 15톤 덤프 트럭에 토사를 만재한 후 앞바퀴와 뒷바퀴를 게이지가 매설된 콘크리트 위에 재하하여 약 3분간 1분 간격으로 데이터를 측정하여 기록하였다.

그림 4는 정적 재하시험을 나타낸 그림이며, 하중은 전륜하중과 후륜 하중으로 나누어 재하하였다.

3.2 동적 재하시험

동적 재하시험은 트럭의 가속거리 문제에 의해 주행속도를 10, 20, 30, 40, 50km/hr로 변화시키며 측정하였다. 게이지의 매설위치를 청색테이프표시하여 운전자의 정확한 운행에 따른 차량하중이 게이지의 매설지점을 통과하도록 하였다. 현장의 공정이 진행되는 관계로 50km/hr 이상의 주행속도에 대해서는 측정이 불가능하였다.

동적 재하시험에서 진동원식 변형률 게이지는 측정이 불가능하며, 전기저항식 변형률 게이지 B와 C에 대하여 수행하였다.

4. 시험결과 및 고찰

4.1 초기변형률 측정결과

그림 5~6은 콘크리트 포장이 완료된 후 100시간까지 초기 양생기간동안의 콘크리트 포장 슬래브에 대한 초기거동을 측정하여 도시하여 나타낸 것이다. 콘크리트 포설 직후 변형률 게이지의 초기 데이터를 측정하고 약 40시간이 경과된 후 주기적으로 데이터 측정을 실시하였다. 측정시간은 일일 최대 온도변화가 예상되는 오전 6시, 10시, 14시 및 22시로 하여 5일간 측정하였다.

그림 5는 콘크리트 포장 슬래브 상단과 하단에 매설된 C 게이지에 대한 시간에 따른 변형을 측정 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 콘크리트가 응결 이후 경화되는 과정에서 일일 온도변화에 따른 슬래브의 거동양상을 볼 수 있다. 슬래브는 낮에 온도가 최대가 되며, 밤이되면 온도가 내려간다. 따라서, 포장 슬래브의 깊이에 따라 온도가 변화될 수 있으며 이로 인해 와핑(warping) 현상의 결과로 데이터의 변화를 설명할 수 있다. 슬래브의 하단에 비하여 상단에서 이러한 경향이 잘 나타나 있다. 이로서 일일 최대 변형률의 변화폭은 약 180 $\mu\epsilon$ 를 상회하는 것으로 나타났다.

그림 6은 게이지 종류에 대하여 측정 시간에 따른 슬래브 상단의 변형을 측정결과를 나타낸 것이다. A1, A2 및 C 게이지의 측정결과는 시간에 따라 유사한 경향을 나타내고 있으나, D 게이지는 상반된 결과를 보이고 있다. 이는 콘크리트 포설 과정에서 게이지가 손상을 받고 매설위치가 변화되었을 가능성과 게이지 자체의 내구성이나 안정성이 미흡한 결과로 판단된다.

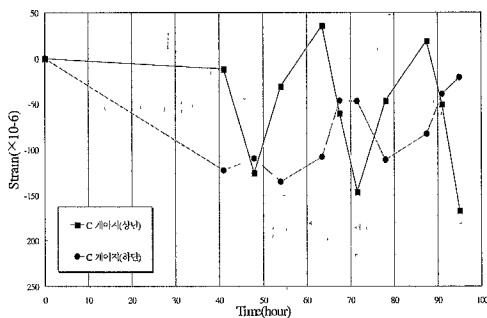


그림 5. C게이지의 초기 변형률 측정결과

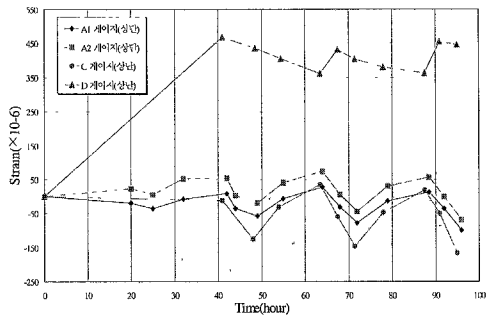


그림 6. 게이지 종류별 슬래브 상단의 초기 변형률 측정결과

4.2 정적 재하시험 결과

그림 7~14는 매설된 게이지에 대하여 정적 재하시험 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 게이지 종류에 따라 측정결과가 다양하게 나타났으며, 1차와 2차에 걸쳐 측정된 결과도 다양한 양상을 볼 수 있다.

1차 정적 재하시험은 그림 7~10에 나타내었다. 1차 정적재하시험에서 전륜하중에 의한 콘크리트 슬래브의 상단 변형률은 $-2\sim-16\mu\epsilon$ 로 측정되었고, 전륜하중에 의한 슬래브의 하단 변형률은 $6\sim40\mu\epsilon$ 로 측정이 되어 게이지 종류에 따라 차이를 나타내고 있다. 후륜하중에 의한 슬래브의 상단 변형률은 $-6\sim-29\mu\epsilon$ 로 나타나 전륜하중에 비하여 크게 나타났으며, 하단에서는 $3\sim19\mu\epsilon$ 로 측정 되었다. 2회에 걸쳐 수행된 정적재하 시험에서 측정결과가 다르게 나타날 수 있는 요인은 대기조건(온도, 건습등), 재하차량의 하중과 재하시 측정지점의 오차 가능성이 결과에 다소 영향을 미칠것으로 판단된다. 2차 정적 재하시험 결과는 그림 11~그림 14에 나타내었다.

본 실험에서 사용한 4가지의 게이지중 1, 2차에 걸쳐 일관성이 있는 데이터를 보여주는 것은 A게이지(A1,A2)와 B게이지로 나타났으며, C게이지와 D게이지에서 측정된 데이터는 전반적으로 크게 나타났다. 또한, 초기 변형률 측정결과와 비교하여 고찰할 때 D게이지의 결과를 신뢰할 수 없을 것으로 보여지며, 전반적으로 데이터의 일관성이 떨어지는 것으로 판단된다.

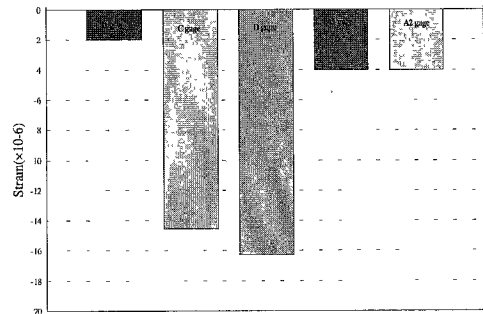


그림 7. 전륜하중에 의한 CP슬래브 상단 변형률 측정치(1차재하시험)

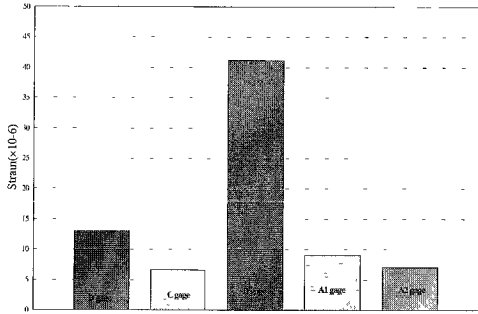


그림 8. 전문하중에 의한 슬래브 하단 변형률 측정치(1차재하시험)

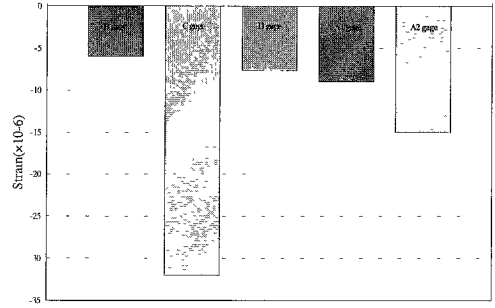


그림 11. 전문하중에 의한 슬래브 상단 변형률 측정치(2차재하시험)

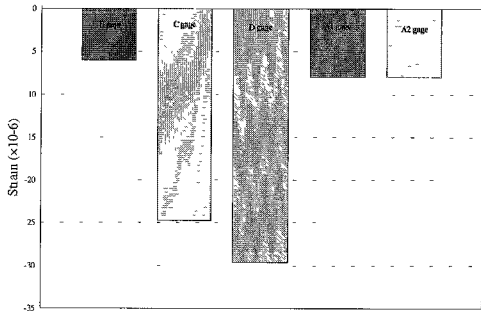


그림 9. 후륜하중에 의한 슬래브 상단 변형률 측정치(1차재하시험)

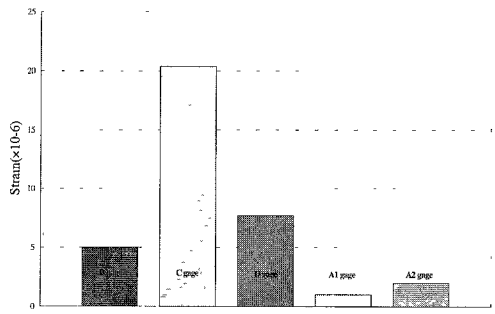


그림 12. 전문하중에 의한 슬래브 하단 변형률 측정치(2차재하시험)

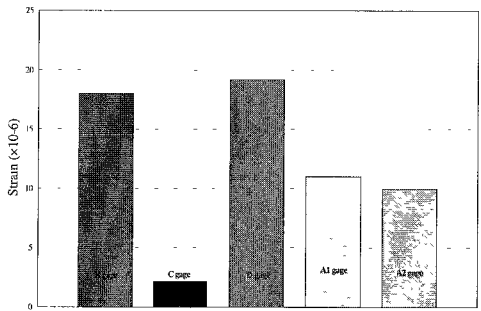


그림 10. 후륜하중에 의한 슬래브 하단 변형률 측정치(1차재하시험)

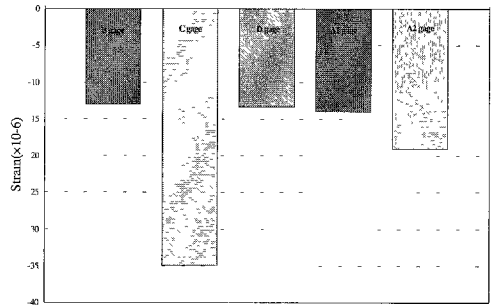


그림 13. 후륜하중에 의한 슬래브 상단 변형률 측정치(2차재하시험)

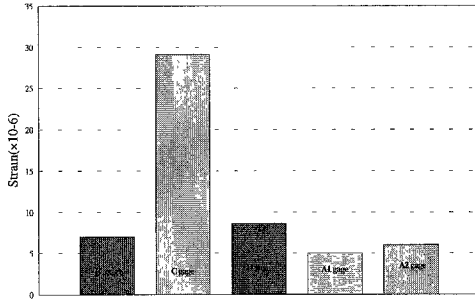


그림 14. 후류하중에 의한 슬래브 하단 변형률 측정치(2차재하시험)

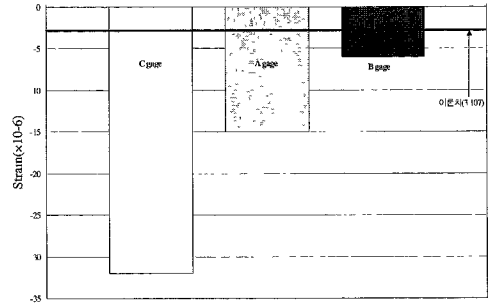


그림 15. 슬래브 중앙 상단 전류하중

4.3 유한요소해석과 정적재하시험 결과

표 2는 콘크리트포장 전용해석 프로그램인 ILLI-SLAB를 이용하여 유한요소 해석결과를 나타낸 것이며, 그림 15~18는 유한요소해석 결과를 실험결과와 비교하여 나타낸 것이다. 표 2에 나타낸 해석결과는 게이지별 매설위치와 슬래브 표면에서 게이지의 매설깊이를 고려하여 계산하였다. 그림 5~8에서 굵은 실선으로 나타낸 것이 ILLISLAB를 이용한 해석결과를 나타낸 것이다.

그림 5와 7의 슬래브 상단의 실험결과와 B게이지가 해석결과와 가장 근접하게 나타났으며, 그림 6과 8의 슬래브 하단의 실험결과와 전류하중과 후류하중 모두 A1게이지와 B게이지가 이론치와 유사한 결과를 나타내었다.

이렇게 해석결과와 실험결과가 대체로 유사하게 나타난 데이터는 전반적으로 작게 평가된 것으로 판단된다. 이것은 정적 재하시험이 일일 최대온도를 나타내는 오후 시간에 실시되어 온도에 따른 영향이 내재된 것으로 보이며, 해석시 이러한 요소가 고려되지 못하는 점과 게이지 설치와 매설과정, 차량하중 재하에서의 측정 오차등과 같은 원인을 최소화 하여야 할 것으로 판단된다.

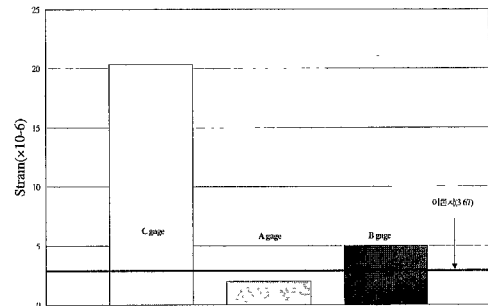


그림 16. 슬래브 중앙 하단 전류하중

표 2. ILLI-SLAB를 이용한 유한요소 해석결과

게이지 종류	게이지 매설위치	전류하중 (με)	후류하중 (με)
A1게이지	슬래브 상단	3.107	6.502
B게이지			
C게이지	슬래브 하단	3.67	7.683

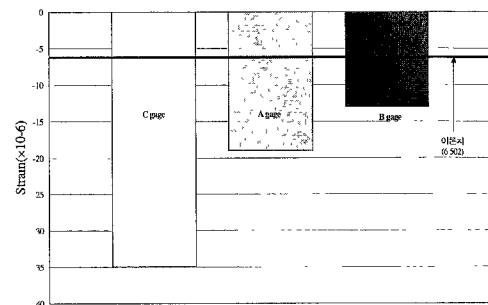


그림 17. 슬래브 중앙 상단 후류하중

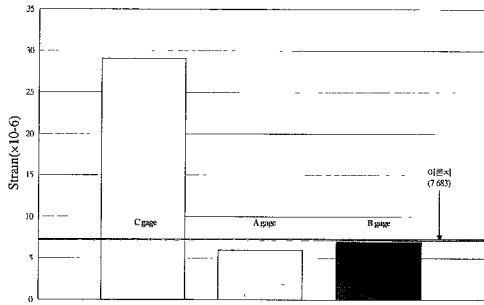


그림 18. 슬래브 중앙 하단 후륜하중

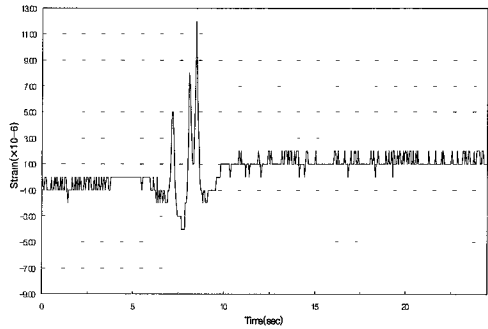


그림 19. 동적 재하시험 결과(10km/hr, 슬래브 하단, B게이지)

4.4 동적 재하시험 결과

동적 재하시험은 포장슬래브에 매설된 게이지의 재하속도별 데이터의 변화와 경향을 파악하기 위하여 실시 하였으며, 주행속도를 10, 20, 30, 40, 50km/hr로 변화시키며 게이지의 매설위치를 청색 테이프로 표시하여 차량하중이 게이지의 매설지점을 통과하도록 유도 하였다. 현장의 공정이 진행되는 관계로 50km/hr 이상의 주행속도에 대해서는 측정이 불가능하였다. 동적 재하시험은 진동현식의 게이지는 측정이 불가능하며, 전기저항식의 B와 C 게이지에 대하여 수행하였다.

표 3은 주행속도에 따른 최대 변형률을 나타낸 것이며, 그림 19~22는 동적 재하시험결과를 나타낸 것으로 10km/hr와 50km/hr 주행시의 측정된 데이터를 B게이지와 C게이지 별로 나타낸 것이다.

B와 C게이지 모두 주행속도가 증가에 따라 변형률의 진폭과 주기가 감소하는 것으로 나타났으며, B와 C게이지 모두 주행속도별 데이터가 대체로 유사한 것으로 나타났으며, 최대 변형률은 12~13 $\mu\epsilon$ 정도로 나타났다.

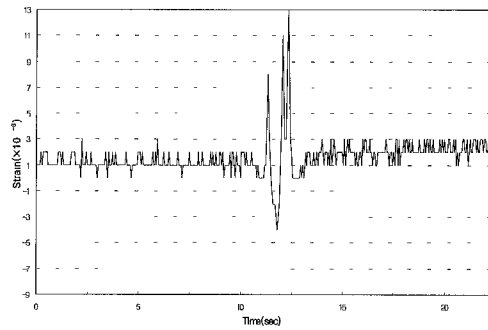


그림 20. 동적 재하시험 결과(10km/hr, 슬래브 하단, C게이지)

표 3. 주행속도에 따른 최대 변형률

위치	게이지 종류	최대 변형률 ($\mu\epsilon$)				
		10km	20km	30km	40km	50km
슬래브 상단	B	-7	-5	-6	-5	-5
	C	-5	-8	-8	-8	-6
슬래브 하단	B	12	9	9	8	4
	C	13	11	10	8	12

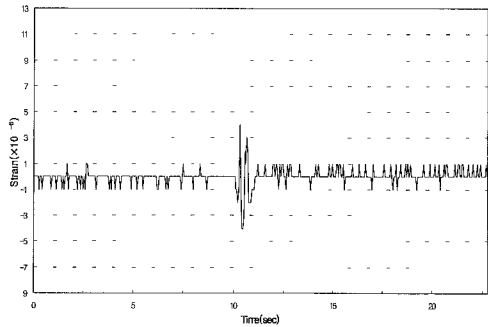


그림 21. 동적 재하시험 결과(50km/hr, 슬래브 하단, B게이지)

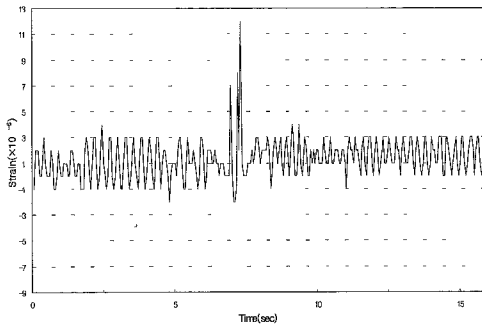


그림 22. 동적 재하시험 결과(50km/hr, 슬래브 하단, C게이지)

5. 결 론

본 연구에서는 현장에서 콘크리트 포장 슬래브에 변형률 게이지를 매설하고 정적 재하시험 및 동적 재하시험을 실시하고 데이터를 분석 한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 콘크리트포장 슬래브의 변형률 게이지 매설은 안정적이고 정교한 매설을 위해 게이지 거치대와 보호막스를 사용하여야 하며, 거치대는 게이지의 종류에 따라 폭과 높이를 조절해야 하고, 보호막스는 페이퍼의 진동기에 의한 영향을 받지 않도록 해야 할 것으로 판단된다.
2. 슬래브의 초기변형률 측정결과 일일 최대 온도 변화에 따라 측정변형률의 최대 변화폭은 약 $180\mu\epsilon$ 를 상회하는 것으로 나타났다.
3. 2회의 정적 재하시험을 실시한 결과 A1, A2 및 B 게이지가 대체로 일관성있는 경향을 나타내었으며, 온도변화에 따른 초기변형률 측정결과에 비하여 재하시험에서의 데이터가 낮게 나타났다.
4. 유한요소 해석결과와 정적 재하시험 결과를 비교하였을 때 A1, B 게이지가 이론치와 유사하게 나타났으나 대체로 이론치가 실측치에 비하여 작게 나타났다.
5. 동적 재하시험 결과 주행속도가 증가할수록 변형률이 작게 나타났으며, 최대 변형률은 12~13 $\mu\epsilon$ 정도로 나타났다.

참고문헌

[1] 신공항건설공단, 인천국제공항 포장시험시공용역 종합보고서, 1998
 [2] 윤경구, 최준성, 김도형, "시험도로의 건설과 한국 도로포장 설계법 개발" 도로포장공학회지 1(1), 10월, pp.45-55, 1999
 [3] 한국도로공사, 시멘트 콘크리트 포장체의 응력

분포에 관한 연구, 1992
 [4] 한국도로공사, 시험도로의 건설과 운영에 관한 연구(I), 도로연 98-67-23, 1998
 [5] 한국도로공사, 시험도로의 건설과 운영에 관한 연구(II), 도로연 99-47-14, 1999
 [6] Deusen, David A. V., Newcomb, David E., Labuz, Joseph F., "A Review of Instrumentation Technology for the Minnesota Road Research Project", University of Minnesota Dept. of Civil and Mineral Engineering, Final Report 1989-1992, Report No. FHWA/MN/RC-92/10, April, 1992
 [7] Imad L. Al-Qadi, Walid M. Nassar, Amara Loulizi, Gerardo W. Flintsch and Thomas E. Freeman, "Flexible Pavement Instrumentation at The Virginia Smart Road", Transportation Research Board 79th Annual Meeting January 9-13, 2000, Washington, D.C., 2000
 [8] Seong Min, Kim, "Dynamic Response of Layered Media to Moving Constant and Harmonic Load", KSCE, Vol.2, No.3, September, pp.233-241, 1988
 [9] Sargand, Shad M., "Development of an Instrumentation Plan for the Ohio SPS Test Pavement(DEL-23-17.48)", Ohio University Department of civil Engineering, Final Report, Report No. FHWA/OH-94/019, July, 1994
 [10] Sebaaly, P. E., Tabatabaee, N., "Influence of Vehicle Speed on Dynamic Loads and Pavement Respond," TRR 1410, National Research Council, Washington, D. C., pp.107-114, 1993