

반복되는 동하중에 의한 구조물 상부바닥 균열 감소를 위한 진동저감 연구

전종균^{1*}, 박삼진¹, 박상곤¹, 김도영¹
¹선문대학교 기계공학과

A Study on How to Reduce Vibration in order to Decrease the Cracks that Form on the Upper Floor of a Structure due to Continuous Dynamic Loading

Chong-Keun Chun^{1*}, Sam-Jin Park¹, Sang-Gon Park¹ and Do-Young Kim¹

¹Department of Mechanical Engineering, Sunmoon University

요 약 본 연구에서는 반복되는 동하중에 의한 구조물 상부바닥에 나타나는 균열에 대한 연구를 수행하였다. 물류센터 상층 바닥슬라브에 균열발생 원인으로 의심되는 지게차의 진동이 향후 운영상에 문제가 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 주요지점에서 지게차의 운행/적하차시 발생하는 진동을 측정 및 분석 하였다. 측정된 진동을 바탕으로 진동허용규제치와 비교분석한 결과, 허용규제치를 초과하는 과도진동으로 판명되어 구조적 균열의 원인을 규명하였다. 또한 측정 결과 값을 바탕으로 범용 유한요소모델링 및 해석을 통해 진동저감을 위한 영향성을 평가하였다. 이에 따른 대책방안을 제시하였으며, 대책 안 시공 후 진동저감효과를 검증할 수 있었다.

Abstract In this study, we investigate the cracks that formed on the upper floor of the structures due to continuous dynamic loading. We explain the cause of floor slab cracks on the upper floor of the distribution center and discuss preventive measures that can enhance the center's functions and security. In order to explain how a forklift's excessive vibration can cause the cracks, we have measured and analyzed the vibration during a forklift's operation and discovered that the cracks form because the vibration exceeds the vibration criteria. Using a finite element modeling on such results, we have come up with optimal methods to reduce the vibration and confirmed their validity by measuring the vibration after implementing our methods.

Key Words : Floor slab cracks, Continuous dynamic loading, Vibration criteria, Optimal methods to reduce the vibration

1. 서론

1.1 연구목적 및 방법

구조물 설계는 진동원의 가진 특성에 대해 만족하는 설계가 요구된다. 진동원이란 진동의 발생을 유발하는 가진 특성이며, 가진 특성에 따라 진동응답 수준도 달라진다. 또한 구조물의 원활한 사용이 가능하기 위해서는 과도한 진동의 동하중조건을 제시한 진동허용규제치 준수

가 요구된다. 하지만 현재 물류센터 바닥슬라브가 지게차의 과도한 진동에 의해 구조적 균열이 발생하고 있다. 과도한 진동이란 구조물의 진동허용규제치 수준보다 높은 진동의 가진 특성을 말한다. 때문에 작업자들에게 심리적인 불안감 및 물적 피해를 주고 있다. 이에 본 연구에서는 주요지점에 지게차의 운행 및 작업 시 발생하는 과도 진동 특성이, 건물에 미치는 진동영향성을 평가 하고, 평가한 데이터를 바탕으로 제어 대책방안을 제시하고자 한다.

이 연구는 2010년도 선문대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

*교신저자 : 전종균(ckchun@sunmoon.ac.kr)

접수일 11년 01월 18일

수정일 (1차 11년 04월 03일, 2차 11년 04월 06일)

계재확정일 11년 04월 07일

1.2 연구동향

본 연구와 유사한 국내의 연구 동향을 살펴보면, 김이성 등[1]은 3축 가속도계의 발생전압은 이동하중의 영향에 따라 다르게 나타나는 것을 입증하였다. Neild 등[2]은 이 연구와 유사한 평가를 입증한바 있다. 조순호[3]의 연구는 간편 신호처리 및 해석을 통하여 신뢰성 있는 진동 기록을 확보하였으며, 진동이력 계측에 근거하여 실험방법의 개발 및 검증 하였다. 이강석 등[4]은 비선형 정적해석을 수행하여 구조물의 고유한 내진성능을 평가하고, 비선형 동적해석을 수행하여 내진성능을 정밀하게 평가하였다.

1.3 진동허용규제치

바닥슬라브의 미세균열은 지게차의 과대 하중과 지속적인 하중에 의해 크랙으로 진전 될 수 있다. 송지호 등[5]은 주기적인 과대하중에 의한 균열 열림점의 하중변동 연구를 수행해 입증한바 있다. 따라서 구조물의 진동허용 규제치를 준수하여 과도진동을 규명해야 한다. 본 연구에서의 진동허용규제치는 구조물에 입사되는 진동속도 규정치를 제시한 독일 DIN 4150 를 준수하였고 건물 피해 정도의 주파수 범위는 1~100 Hz 이며, Bachmann 등[6]이 제안하고 있는 인간 지각 기준에서도 1~100 Hz 까지 다룬다. 표 1은 각각의 건물 및 용도별 진동허용규제치를 나타낸 것이며 물류센터는 공장/작업장에 해당하는 것을 알 수 있다.

[표 1] ISO 사용 용도별 진동기준 (rms)

지역	시간	연속 또는 단속진동	하루 수회정도의 충격진동
주거지	낮 밤	1.0-2.0 cm/s ² 0.7 cm/s ²	15-45 cm/s ² 0.7-10.0 cm/s ²
사무실	낮 밤	2.0 cm/s ²	30-64 cm/s ²
공장, 작업장	낮 밤	4.0 cm/s ²	45-64 cm/s ²

DIN 4150 의 기준치에서는 Short-term과 Long-term으로 구분되며, 물류센터에서와 같이 매우 빈번하게 운행하는 지게차의 발생되는 진동상태는, 표 2의 Long-term vibration 의 상업용/산업용 건물 기준으로 적용하는 것이 바람직 할 것이라 판단된다. 또한 지속적인 진동에 의한 미세한 크랙의 미세 결함과, 구조물의 손상에 직접 영향을 주는 진동 사이에는 동적 진폭의 범위 차이가 나므로 알려져 있다. 표 3을 보면 지속적인 진동의 경우 총

격성 허용범위인 3~5 mm/s 정도의 진동 수준에서 미세 결함이 발생 할 수 있으며, 물류센터의 바닥슬라브가 지게차의 지속적인 진동에 의한 구조적 크랙의 발생 원인으로 규명하기에 적당한 조건이라 판단된다.

[표 2] 지속적인 진동 허용규제치 (DIN 4105, 1999)

Type of structure	Vibration velocity (mm/s)
상업용, 산업용 건물 및 이와 유사한 건물	10
주거용 및 이와 유사한 건물	5
진동에 취약한 건물 (문화재, 중요건물)	2.5

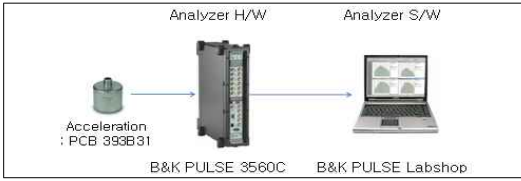
[표 3] 충격성 진동 허용규제치 (DIN 4105, 1999)

Type of structure	Vibration velocity (mm/s)		
	0 ~ 10 Hz	10 ~ 50 Hz	50 ~ 100 Hz
상업용, 산업용 건물 및 이와 유사한 건물	20	20 - 40	40 - 50
주거용 및 이와 유사한 건물	5	5 - 15	15 - 20
진동에 취약한 건물 (문화재, 중요건물)	3	3 - 8	8 - 10

2. 진동측정 및 분석

2.1 측정 및 분석 방법

물류센터 바닥슬라브에 지게차 운행 및 작업 시 진동 영향성을 확인/평가하고자, 주요 지점에서 수직 방향으로 진동을 측정/분석 하였다. 진동 영향성을 평가하기 위한 방법으로 지게차의 주행할시, 급제동할시, 적하차시를 측정하여 그 결과에 대해 분석하였다. 측정/분석 시에 사용되는 장비는 가속도계 (PCB) 와 FFT Analyzer (B&K) 가 사용되었으며 가속도계는 각 지점의 가속도를 측정 하였으며 FFT Analyzer (B&K)의 장비는 측정된 가속도를 FFT를 통한 주파수 영역에서 분석하기 위한 장치이다. 그림 1은 진동 측정 구성도를 나타낸다. 그림에서와 보는 바와 같이 지게차의 진동을 가속도 센서에서 Analyzer H/W로 진동 가속도가 측정되어 Analyzer S/W 로 주파수 영역의 데이터 분석이 이루어진다.



[그림 1] 현장 진동 측정 구성도



[그림 2] 물류센터 전경 및 균열 발생 현황



[그림 3] 상온센터 3층 진동 측정 지점

그림 2와 그림 3에서 보는바와 같이 진동 영향성을 평가하고자, 주요지점을 총 7지점으로 구분하여 측정을 수행 하였다. 주요지점의 선정 기준은 지게차의 운행구간 중 주 이동구간과 최대 균열 발생 지점 및 최대 진폭 발생 지점으로 선정하였다. 측정 시 한 지점 당 각 20분간 5회씩 레코딩을 수행하였으며 그에 따른 측정 평균 데이터 중 최대 진동 값을 선정하였다. 또한 장단기 적하차 반복수에 따른 균열 관찰은, 진동 측정이 진행된 시점에서 이미 구조물에 균열발생으로 인한 문제가 야기된 상태였다. 따라서 초기 균열시점에서 진행된 균열 양상을 관찰하기에는 어려움이 있었다. P-4, P-5 지점은 랙(Rack)과 랙 사이 공간이 협소하여 측정의 어려움이 있어 지게차가 다니는 위치에서 랙 하나를 사이에 두고 측정을 수행하였다.

[표 4] 각 위치별 진동 측정 결과(진동가속도)

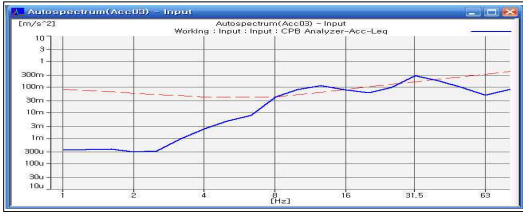
응답점		주파수 (Hz)	진동가속도 (cm/s ²)	사용성 진동 허용 규제치
Point-①	주행	12.5	0.848	4.0 cm/s ² (ISO, 작업장)
	급제동	16.0	2.26	
	적하차	31.5	27.8	
Point-②	주행	8.0	1.47	
	급제동	8.0	1.03	
	적하차	8.0	4.95	
Point-③	주행	6.3	0.606	
	급제동	16.0	0.62	
	적하차	31.5	5.95	
Point-④	주행	10.0	0.356	
	급제동	10.0	0.35	
	적하차	10.0	6.68	
Point-⑤	주행	8.0	0.279	
	급제동	12.5	0.321	
	적하차	25.0	11.4	
Point-⑥	주행	25.0	0.99	
	급제동	6.3	1.41	
	적하차	25.0	18.2	
Point-⑦	주행	2.5	1.25	
	급제동	12.5	0.565	
	적하차	10.0	23.7	

※ Point-④, ⑤에서의 측정위치는 지게차로부터 약 5m 가량 이격지점에서 측정함. 그외는 1.2m 이격지점에서 측정.

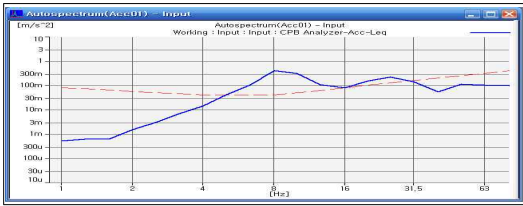
2.2 측정 및 분석 결과

지게차의 운행 및 적재물 적하차시에 진동 영향성 수준을 측정된 결과 값을 통하여, 2가지 관점의 평가로 구분하여 분석을 수행하였다. 첫째로 건물의 사용성 관점에서의 평가 측정 결과 값은 표 4와 같다. 표 1의 물류센터 구조물 사용성 진동 허용규제치는 공장/작업장의 4.0 cm/s² 로 규제하고 있다. 측정 결과값 표 4를 분석하면 모든 7지점의 가속도는 진동 허용규제치 수준을 넘어서고 있는 것을 확인 할 수 있으며, 특히 Point-① 지점에서 가속도는 진동 허용규제치를 약 6배가량 초과하고 있어 작업자들의 심리적인 불안감을 유발할수 있는 수준이다. 또한 진동측정 위치별 지게차의 주행, 급제동, 적하차로 나누어 진동측정을 수행 시 그 중 지게차의 적하차시에 진동 가속도가 크게 발생하고 있다. 이는 지게차에 적재물을 적하차 작업 시 충격성 진동이 발생되고 있으며, 평상시 지게차 운전자들은 다량의 작업량을 소화하기 위해 적재물을 급격하게 적하차하는 작업습관과도 연관이 있는 것으로 판단된다. 그림 4는 적재물 적하차 시 진동가속도가 가장 많이 초과된 Point-1(a) 지점과 가장 적게 초과된 Point-2(b) 지점의 진동 가속도 그래프를 나타낸 것

이다. 그림에서 보듯이 진동 가속도의 가장 높은 주파수 영역은 31.5 Hz 이며, 가장 낮은 주파수 영역은 8 Hz 이다.



(a)



(b)

[그림 4] 측정지점 Point-1, Point-2 적하차시에서의 진동 가속도 그래프

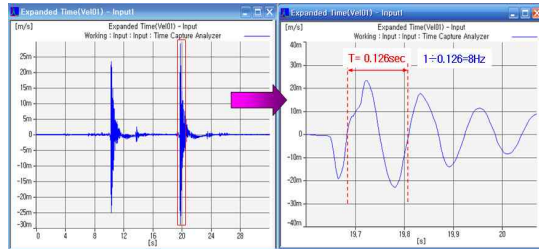
[표 5] 각 위치별 진동 측정 결과(진동속도)

응답점	주파수 (Hz)	진동속도 (mm/s)	손상 진동 허용 규제치
Point-①	주행	10.0	1.75
	급제동	17.0	0.83
	적하차	18.0	12.3
Point-②	주행	8.2	3.79
	급제동	9.0	2.95
	적하차	8.0	23.1
Point-③	주행	7.8	1.26
	급제동	11.1	1.05
	적하차	8.6	8.23
Point-④	주행	8.5	0.578
	급제동	9.4	0.516
	적하차	9.8	2.44
Point-⑤	주행	8.2	0.835
	급제동	8.4	0.556
	적하차	26.0	6.31
Point-⑥	주행	9.2	4.47
	급제동	9.9	3.69
	적하차	8.5	20.1
Point-⑦	주행	11.6	2.4
	급제동	8.0	1.21
	적하차	9.4	17.2

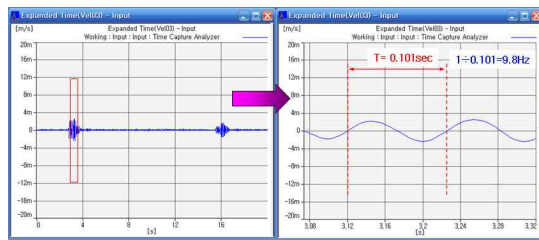
※ Point-④, ⑤에서의 측정위치는 지게차로부터 약 5m 가량 이격지점에서 측정함. 그외는 1-2m 이격지점에서 측정.

둘째는 건물의 손상 관점에서의 평가이며, 진동 영향성 평가 결과 값은 표 5와 같다. DIN 4150 을 준용한 건물 손상 관점에서 평가하면 건물의 진동 측정/분석 결과에서 알 수 있듯이 Point-4 지점을 제외하고 모두 5 mm/s 이상의 진동 진폭을 나타내고 있다. 즉 표 3과 같이 미세 균열의 발생을 포함한 구조물의 미세 결함의 허용 규제치 범위를 상회하는 구조물의 동적 거동을 보여 주고 있다.

적재물 적하차시 충격성 진동으로 인해 10 mm/s 를 넘어서는 구간은 총 4지점(Point-1, 2, 6, 7) 에서 나타나고 있다. 표 3의 상업용 구조물의 손상 허용규제치 기준을 초과하고 있으며, 특히 Point-2 지점에서는 23.1 mm/s 로 기준치를 약 2.3 배가량 넘어서고 있는 매우 큰 진동을 나타내고 있다. 다른 지점에 비해 진동수준이 다소 낮은 Point-4, 5 지점은 그림 2에서 보듯이 랙(Rack)과 랙사이 공간이 협소하여 측정의 어려움이 있어 지게차가 다니는 위치에서 랙 하나를 사이에 두고 측정을 수행하였으며, 측정 장비와 지게차 동선간의 거리가 약 5 m 가량 떨어져서 측정이 수행된 관계로 진동수준이 낮게 측정된 것으로 판단된다. 그림 5, 그림 6은 지게차 적재물 적하차시 측정값이 가장 높은 Point-2 지점과, 측정값이 가장 낮은 Point-4 의 진동 속도 그래프를 나타낸 것이다.



[그림 5] 측정지점 Point-2 에서의 지게차 적재물 적하차로 인한 진동 그래프

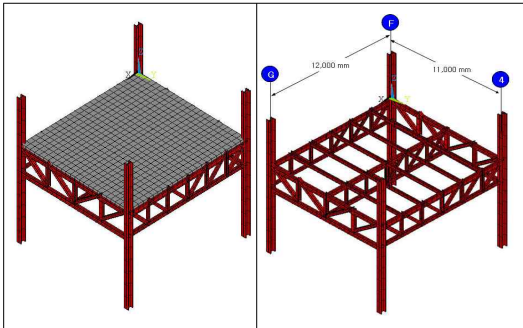


[그림 6] 측정지점 Point-4 에서의 지게차 적재물 적하차로 인한 진동 그래프

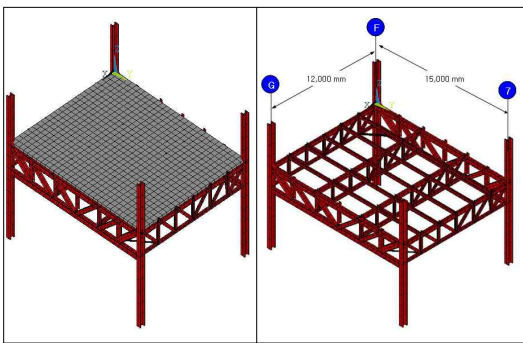
3. 진동 저감 대책

3.1 구조물 해석 모델링

지게차로 인한 충격성 진동으로 인해 구조물에 미치는 진동을 저감하기 위해, 영향성을 평가하기 위한 범용 유한요소해석(ANSYS) 프로그램을 통해 동적해석을 수행하였다. 일반적으로 사용하는 범용 유한요소 해석 프로그램의 경우 내연적 시간 적분 방법(Explicit Method)을 사용하고 있으나, 본 연구에서는 시간에 따라 가속도 값에 변화를 줄 수 있는 외연적 시간적분방법 (Explicit Method)을 사용하여 동적해석을 수행하였다. 현장에서 진동 측정된 결과를 바탕으로 진동수준이 가장 높게 나타나는 Point-2, 6 지점을 3차원 유한요소 모델링 하였다. 사용한 유한요소는 Beam, Solid, Shell 요소를 이용하였으며, 입력 하중은 실측에서 측정한 힘 값을 입력하여 해석을 수행하였다. 그림 7과 그림 8은 Point-2, 6의 동적해석 모델링을 나타낸 것이다.



[그림 7] Point-2 지점 동적해석 모델링



[그림 8] Point-6 지점 동적해석 모델링

3.2 에폭시 수지 주입 대책

물류센터 바닥슬라브에 발생한 균열의 양상은 지게차가 다니는 구간에 주로 발생한다. 일반적으로 건물의 균

열보수 대책으로 많이 이용되는 에폭시 수지 주입 방법은 기존 균열의 보수에는 적절하다. 하지만 방수성과 내구성이 향상 될 수는 있으나, 향후 지속적인 충격성 진동이 예상되는 본 구조물에서는 균열부분에서 충격성 진동에 의한 피로파괴가 예상된다. 따라서 대한건축학회[7]에서도 허용을 허가한 미세균열에 폭 0.3 mm 이상의 저압 저속의 에폭시 수지 주입, 바닥슬라브 표면 코팅을 수행한 후 주기적으로 진동측정 및 균열 진전을 체크하는 대책 안을 제안한다.

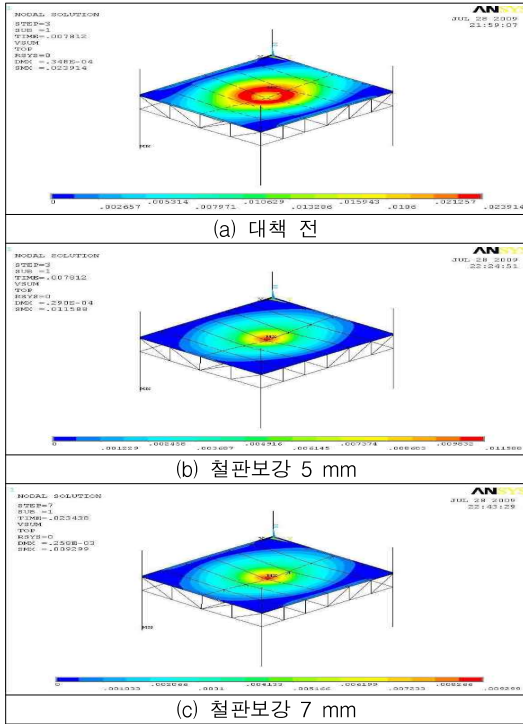
3.3 철판 보강안 대책 및 해석

물류센터 바닥슬라브에 지게차 운행 및 적재물 적하차시 발생하는 충격성 진동을 제어하기 위해서는 바닥슬라브의 강성 증가 및 집중하중 분배에 유리한 철판보강안을 제안한다. 진동이 가장 많이 발생하는 구간인 Point-2, 6 지점을 기준으로, 철판보강 시 진동저감 효과를 그림 9와 그림 10에 나타내었다. 표 6은 수치로 표현한 해석 예측한 결과 값이며, 표 6에서 보듯이 Point-2 지점의 경우 현재 진동허용규제치를 약 2.3배 가량 초과하고 있으나, 철판 5 mm 보강 시 11.59 mm/s 로 허용규제치를 약간 초과하며, 7 mm 보강 시 9.29 mm/s 로 허용규제치를 만족할 것으로 판단된다.

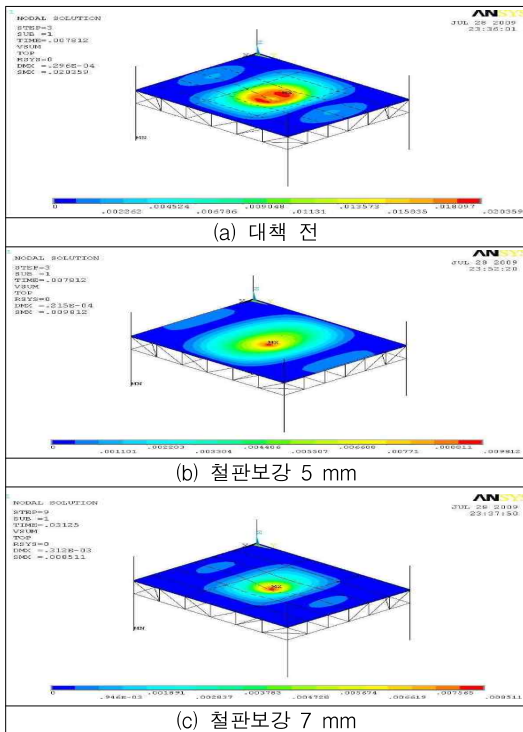
[표 6] 진동대책 수행 후 진동 응답 평가 결과

응답점	Point-②	Point-⑥
대책 전	23.1 mm/s	20.1 mm/s
대책 후 (철판 5mm 보강)	11.59 mm/s	9.81 mm/s
대책 후 (철판 7mm 보강)	9.29 mm/s	8.51 mm/s
손상 진동 허용규제치	10 mm/s (DIN 4150)	

그림 9와 그림 10에서, 대책 전 및 철판보강은 중심축을 기준으로 동일외력에 대한 응답 범위를 보여준다. 보는바와 같이 대책 전에서는 중심축을 기준으로 외력에 대한 응답 범위가 구조물 상으로 넓게 퍼져있으며 규제치를 초과하는 진동을 나타낸다. 철판보강에서는 외력에 대한 응답 범위가 대책 전과 비교하면 동일 외력에 대한 진동응답이 확연히 줄어든 것을 확인할 수 있으며 규제치를 준수하는 진동을 나타낸다.



[그림 9] Point-2 지점 진동저감 해석 결과



[그림 10] Point-6 지점 진동저감 해석 결과

4. 결론

본 연구에서는 바닥슬라브가 지게차의 과도진동에 의해 구조적 균열이 발생한 것을 규명하고 진동저감 대책 방안을 제시하여 구조물의 원활한 사용이 가능하도록 도모하고자 하였다. 지게차의 운행 및 적하차시 진동 측정/분석을 반복적으로 모니터링 하여 측정된 결과, 7지점에서 진동 가속도 및 속도가 진동허용규정치의 범위를 초과하여 구조적 균열의 원인을 규명하는데 입증 할 수 있었다. 따라서 측정된 결과 값을 바탕으로 유한요소모델링 및 해석을 통한 진동저감 영향성을 평가 하였다. 이에 따른 최적의 대책방안으로 에폭시 수지 주입과 철판보강안을 제시하였으며, 대책방안에 대한 진동 응답 해석 결과도 허용규제치를 초과하지 않는 9.29 mm/s, 8.51 mm/s로 해석되었다. 따라서 향후 지게차의 운행 및 적하차시의 구조적 균열에 대한 안정성과 균열의 저감을 입증할 수 있었으며 저감예측 자료로의 활용이 가능할 것이라 판단된다.

통상 구조물에 발생하는 균열의 여러 원인 중에서 시공 시 콘크리트 타설 직후 진동유입이나 콘크리트 양생 과정에서 발생하는 미세균열 등의 원인이 있을 수 있다. 하지만 본 연구에서는 이미 균열이 발생, 진행된 구조물에 대한 진동측정 및 진동대책을 제시하고 균열과 진동과의 원인규명을 목적으로 하고 있어, 시공불량으로 인한 부분에 대해 사전조사는 이루어지지 않아 향후 연구가 필요한 부분이다. 다만 현재 과도 균열이 발생한 구간에서 균열이 발생하지 않은 구간에 비해 진동수준이 높게 나타나고 있어 균열 원인을 진동과 관련이 있는 것으로 판단한다.

참고문헌

- [1] 김이성, 윤승현, 박강근, “이동 가진원에 따른 철근 콘크리트 판에서의 진동평가”, 한국공간구조학회지, Vol. 7, pp. 83-90, 2007.
- [2] S.A. Neild, P.D. McFadden and M.S. Williams, "Damage Assessment in Concrete Beams using Non-linear analysis of Vibration Measurement", Key Engineering Materials, Vol. 245-246, pp. 557-564, 2003.
- [3] 조순호, "진동계측에 의한 고층건물의 동적성능 추출", 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 341-348, 2009.
- [4] 이강석, 위경두, 김용인, 이현호, "비선형 해석법에 의

한 철근콘크리트 건물의 내진성능평가", 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 245-252, 2009.

- [5] 송지호, 김정엽, "변동하중하의 피로균열진전과 닫힘 거동", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 201-206, 1995.
- [6] H. Bachmann and W. Ammann, "Vibration in structures, induced by man and machine", Structural Eng. Document, pp. 58-66, 1987.
- [7] "건축 구조설계기준", 대한건축학회, 2008.

전 중 균(Chun-Chong Keun)

[정회원]



- 1980년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1985년 12월 : University of California, Los Angeles (공학석사)
- 1991년 6월 : University of California, Los Angeles (공학박사)

• 1992년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

응용역학, 진동제어

박 삼 진(Sam-Jin Park)

[정회원]



- 1977년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1979년 8월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학석사)
- 1984년 1월 : Case Western Reserve Univ. 기계공학과 (공학박사)
- 1984년 4월 ~ 1994년 2월 : 한국기계연구원 CAD/CAM실 실장, 책임연구원

• 1994년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

기계설계, CAD

박 상 곤(Sang-Gon Park)

[정회원]



- 1998년 2월 : 부경대학교 기계공학과 (공학사)
- 2000년 8월 : 부경대학교 소음진동공학과 (공학석사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학과 (박사과정)

<관심분야>

소음/진동, 구조해석

김 도 영(Do-Young Kim)

[정회원]



- 2010년 2월 : 선문대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학과 (석사 과정)

<관심분야>

유한요소해석, 응용역학, 진동제어