

# 물류센터 상층 바닥슬라브의 크랙발생 원인 규명 및 대책방안 연구

## Evaluation of and Solution for the Cause of Floor Slab Cracks on the Upper Floor of the Distribution Center

박상곤†, 이흥기\*, 백재호\*, 전중균\*\*

Sang-Gon Park, Hong-Ki Lee, Jae-ho Baek, Chong-Keun Chun

### 1. 건물 손상 진동허용규제치

반복적인 동적하중에 의해 구조물에 나타나는 동적 거동에 기인한 구조물의 손상이나 안정성을 평가하는 기준으로 구조물에 입사되는 진동에너지의 정도를 직접적으로 계량할 수 있는 진동속도로 허용 규제치를 제시한 독일 DIN4150-3(Effects of Vibration on Structures)이 널리 준용되고 있으며, 제안하고 있는 진동허용규제치는 <Table. 1>와 같다. 일반적으로 동적거동에 따라 구조 결함의 관점에서, 구조물의 직접적인 안정성에는 크게 영향을 주지 않는 미세한 크랙의 발생이나 진진 등의 미세 결함(minor damage)과 구조물의 손상에 직접 영향을 주는 손상(major damage)의 동적 진폭의 범위는 차이가 나는 것으로 알려져 있으며 지속적인 진동의 경우, DIN 4150에서 진동에 민감한 문화재와 같은 건물은 3mm/s, 그리고 사람이 상시 거주하는 주거지의 경우는 5mm/s로 진동 허용 기준을 적용하고 있고 있으며 이것은 3-5mm/s 정도의 진동 수준에서 미세 결함이 발생 할 수 있으며 기존 크랙의 진전등을 초래할 수 있다고 명시하고 있다. 현재 발파나 항타와 같은 실제 대규모 동하중이 발생하는 공사 현장에서 인접 구조물의 진동 안정성 기준도 이러한 보수적인 관점에서 제시되고 있는 실정이다.

<Table 1> Guideline values of vibration velocity to be used when evaluating the effects of long-term vibration on structures(1999, DIN4150)

건물의 등급	I	II	III
Type of structure	상업 혹은 산업용 건물	주거용 건물	진동에 취약한 건물
주파수별 허용 진동( mm/s)	10	5	2.5

### 2. 바닥슬라브 동특성 실험 및 진동측정

#### 2.1 물류센터별 동특성 실험 결과

물류센터 구조는 <Table 2>과 같다. A-물류센터는 철골구조로 슬라브는 10,000 X 17,000mm, 두께는 200mm이며,

B-물류센터는 철골구조(Truss 부재사용)로 슬라브는 12,000 X 15,000mm, 두께는 200mm이고, C-물류센터는 철골철근콘크리트구조로 슬라브는 10,000 X 14,000mm, 두께는 250mm이다. 바닥슬라브의 동특성을 산출하기 위해 A, B, C-물류센터에서 modal test를 수행하였다. <Table 3>은 물류센터별 동특성을 비교한 결과이며, A, B-물류센터는 바닥슬라브에 크랙 발생 및 진전등으로 인해 사용상 문제가 제기되었으며, 그 중 A-물류센터 바닥슬라브에 발생한 크랙은 안전진단 평가결과 구조물의 손상을 야기하는 수준인 관통크랙으로 확인되었다. C-물류센터는 기존 A, B-물류센터의 지게차 운행등으로 인한 크랙발생등의 문제로 인해 설계단계부터 지게차의 동하중(Dynamic Load)을 고려한 진동설계가 이루어졌으며, 완공 후 지게차 운행등으로 인한 바닥슬라브의 크랙 발생이 없었다. 각 물류센터의 바닥슬라브 동특성을 비교하여 보면 C-물류센터에 비해 A-물류센터는 동강성이 약 35%, B-물류센터는 약 28%가량 부족한 것을 알 수 있다.

<Table 2> 물류센터 구조 및 부재 사이즈

구조	부재	구조	부재
A-물류센터 (SS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>G1: H-1200x300x20x36</li> <li>G2: H-1200x300x25x40</li> <li>B1: H-1200x400x22x40</li> <li>B2: H-300x150x6.5x9</li> </ul>	B-물류센터 (SS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>G1: 상현-440x300x11x18 하현-440x300x11x18 웹-340x250x9x14</li> <li>G2: 상현-400x200x6x13 하현-200x200x6x13 웹-250x125x6x9</li> <li>B2: 상현-340x250x9x14 하현-294x200x6x12 웹-250x125x6x9</li> <li>B1: H-300x150x6.5x9</li> </ul>
C-물류센터 (SRC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>G1: H-1200x300x25x35</li> <li>G2: H-1200x350x30x35</li> <li>B1: H-900x300x16x28</li> <li>B2: H-250x125x6x9</li> </ul>		

<Table 3> 물류센터별 Point-mobility 비교

응답점	1st mode(m/s <sup>2</sup> /N)	동강성차이
A-물류센터	8.6Hz/3.80E-4	-35%
B-물류센터	8.1Hz/1.57E-4	-28%
C-물류센터	9.5Hz/1.74E-4	-

\*동강성 차이는 C-물류센터를 기준으로 산정함.

## 2.2 물류센터별 지게차 진동측정 결과

각 물류센터에서 지게차 운행으로 인한 과진동을 측정하는 결과는 <Table 4>와 같다. 물류센터내 과진동을 유발하는 진동원은 물품 이동 및 적재시 이용되는 지게차이며, 과진동이 유발되는 지게차 작업은 크게 주행, 급제동, 적재물 적하차로 나눌 수 있다. 이 중 가장 큰 진동을 발생시키는 작업은 적재물 적하차로 B-물류센터의 경우 20.1mm/s로 진동허용규제치를 약 2배가량 초과하였다. A-물류센터의 경우 바닥슬라브에 발생한 크랙으로 인해 구조에 영향을 줄 수 있다는 안전진단 결과에 따라 구조물에 진동영향을 최소화시키기 위해 지게차 급제동 및 적하차로 인한 진동수준을 측정하지 못하였다. 그러나 지게차 주행시 발생하는 진동수준은 B-물류센터의 약 2배를 넘어서고 있어 적하차시 20mm/s이상의 진동이 발생될 것으로 예상된다. 물류센터별로 설계된 하중이 다르며, 실제 내부에서 사용되는 지게차의 재원은 각기 다르며, 현장에서 진동측정시 사용된 지게차는 아래와 같다.

- A물류센터 : 지게차 3.5ton(적재중량 : 0.85ton)
- B물류센터 : 지게차 5.5ton(적재중량 : 1.00ton)
- C물류센터 : 지게차 8.0ton(적재중량 : 1.00ton)

<Table 4> 물류센터별 지게차 진동측정 결과

응답점	진동속도 (mm/s)	진동 허용규제치
A-물류센터	주행 9.62	-크랙 유발 : 5mm/s (DIN4150)
B-물류센터	주행 4.47	
B-물류센터	급제동 3.69	-손상 : 10mm/s (DIN4150)
	적하차 20.1	
C-물류센터	주행 1.71	-손상 : 10mm/s (DIN4150)
	급제동 2.79	
	적하차 4.05	

## 2.3 물류센터 지게차 진동저감대책

상층 바닥슬라브에 크랙 발생등의 문제가 된 A, B-물류센터는 과진동을 유발하는 지게차의 동적 하중에 대한 고려가 제대로 이루어지지 않았으며, C-물류센터는 기본 설계단계에서 지게차에 대한 진동설계가 고려되었다. 크랙 발생으로 인한 물류센터의 구조적 문제가 제기된 A, B-물류센터에 대해 진동저감 및 크랙 보강을 위한 대책을 위해 범용 유한요소해석의 동적해석/모델화를 통해 진동저감을 위한 영향성을 평가하였다.

지게차 운행으로 인한 과도한 진동을 억제하고 미세크랙 손상과 향후 크랙발생을 제어하기 위한 동적 구조 대책은 <Table 5>와 같다. A-물류센터는 크랙등의 문제가 없는 C-물류센터에 비해 1st mode에서 mobility가 약 2배이상 높으며 동강성도 약 35%가량 낮아 상층 바닥슬라브에 철판 5mm시공과 더불어 동조질량댐퍼(TMD)를 설치하였으며,

B-물류센터의 경우 철판 7mm 시공하였다.

<Table 5> 동적 구조 대책에 따른 동특성 해석 결과

응답점	1st mode(m/s <sup>2</sup> /N)	동적구조대책
A-물류센터	보강 전 8.6Hz/3.80E-4	동조질량댐퍼(TMD) + 철판 5mm 시공
	보강 후 8.5Hz/2.02E-4 11.2Hz/1.15E-4	
B-물류센터	보강 전 8.1Hz/1.57E-4	철판 7mm 시공
	보강 후 8.8Hz/1.13E-4	
C-물류센터	9.5Hz/1.74E-4	-

동적구조보강안으로 시공한 후 물류센터별로 진동을 측정하는 결과 A-물류센터의 경우 약 2.9배가량 진동수준이 줄었으며, B-물류센터의 경우 1.5~2.3배가량 진동수준이 줄었다.

<Table 6> 동적 구조 대책에 따른 진동측정 결과

응답점	진동속도 (mm/s)	진동 허용규제치
A-물류센터	주행 대책 전 9.62	-크랙 유발 : 5mm/s (DIN4150) -손상 : 10mm/s (DIN4150)
	주행 대책 후 3.30	
B-물류센터	주행 대책 전 4.47	
	주행 대책 후 2.75	
	급제동 대책 전 3.69	
	급제동 대책 후 2.40	
적하차	대책 전 20.1	
	대책 후 8.77	

## 3. 결론

본 연구에서는 물류센터 상층 바닥슬라브의 크랙 원인을 규명하고 최적의 진동저감대책으로 건물의 사용성 및 안전성을 도모하고자 하였다. 지게차의 과도진동에 의해 구조적 크랙 발생을 규명하기 위해, 지게차의 운행 및 적하차시 진동을 측정/분석한 결과, 진동허용규제치를 초과하여 구조적 크랙의 원인을 규명할 수 있었다. 이러한 측정 결과값을 바탕으로 유한요소모델링 및 해석을 통하여, 최적의 진동 저감대책을 제시하였으며, 대책안 시공 후 진동을 측정하는 결과 진동저감효과를 검증할 수 있었다.