

중공형 RC 슬래브의 소음 및 진동 감쇠성능에 대한 연구

A Study on the Noise and Vibration Damping Performance of RC Hollow Core Slab

김동백^{1*} · 김인배² · 김종훈³ · 이재원⁴Dong Baek Kim^{1*}, In Bae Kim², Jong Hoon Kim³, Jae Won Lee⁴¹Professor, Department of Civil, Safety & Environment Engineering / Construction Engineering Research Institute, Hankyong National University, An Seong, Kyeong Ki, Republic of Korea²Professor, Department of Civil, Safety & Environment Engineering, Hankyong National University, An Seong, Kyeong Ki, Republic of Korea³Master's Course, Department of Civil, Safety & Environment Engineering, Hankyong National University, An Seong, Kyeong Ki, Republic of Korea⁴Master's Course, Department of Civil, Safety & Environment Engineering, Hankyong National University, An Seong, Kyeong Ki, Republic of Korea

*Corresponding author: Dong Baek Kim, dbkim@hknu.ac.kr

ABSTRACT

Purpose: To reduce the noise and vibration of reinforced concrete slab structures, the damping performance is to be performed experimentally after installing hollow core or filling it with liquid. **Method:** Using the hollow rate as an experimental variable, the damping ratio and stiffness of each test specimen at impact load are obtained to determine the difference between the damping ratio and stiffness of the numerical analysis. In addition, the damping effects are reviewed by comparing the difference in the damping ratio and stiffness of a test specimen filled with liquid 50% of the study. **Results:** Since the difference in resistance between a specimen with or without hollow core is 5%, it is judged that there is no structural problem, and the injection of liquid into the hollow core can increase the damping ratio, which can reduce noise or vibration. **Conclusion:** At less than 20% of hollow rate, there was little damping effect, and at 30%, damping effect was found. However, if liquid is injected into the hollow core of the specimen, damping rate is shown to increase, and the injection of liquid into the hollow part is believed to reduce noise or vibration.

Keywords: Noise and-Vibration, Damping-Performance, Damping Ratio, Difference of-Stress, Hollow Core Rate

요약

연구목적: 철근콘크리트 슬래브에 발생하는 소음 및 진동을 저감하기 위하여 중공부를 설치하거나 중공부에 액체를 채워 설치한 후 감쇠성능을 실험적으로 수행하고자 한다. **연구방법:** 중공율을 실험 변수로 하여, 충격하중을 가했을 때 각 시험체의 감쇠율과 강성을 구하여 수치해석에 대한 감쇠율과 강성의 차이를 알아낸다. 또한, 중공부의 50%를 액체로 채운 시험체의 감쇠율과 강성의 차이를 비교하여 감쇠효과를 검토한다. **연구결과:** 중공부가 있는 실험체와 없는 실험체의 내력의 차이는 5% 정도로 오차범위에 있으므로 구조적인 문제는 없는 것으로 판단되며, 중공부에 액체를 주입할 경우 감쇠율이 증가하므로 소음이나 진동도 저감할 수 있을 것으로 판단된다. **결론:** 중공율이 20%이하에서는 감쇠효과가 거의 없고, 30%일 때 감쇠효과가 나타났다. 그러나, 실험체의 중공부에 액체를 주입하였을 경우는 감쇠율이 증가하는 것으로 나타남으로, 중공부에 액체를 주입하면 소음이나 진동의 감쇠효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어: 소음 및 진동, 감쇠성능, 감쇠율, 내력의 차이, 중공율

Received | 22 May, 2019

Revised | 23 May, 2019

Accepted | 10 June, 2019

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

서론

최근에 콘크리트 구조물은 초고층화, 대형화, 장기간화 됨에 따라 하중을 적절히 분배와 처짐, 균열, 진동 등에 대한 사용성 검토가 매우 중요하며 부재의 경량화 및 고강도화가 필수 요소이다. 특히, 주거용으로 건설되는 공동주택의 경우 200mm 내외의 슬래브와 300mm 내외의 벽을 사이에 두고 생활공간이 구획되어 있으므로, 다른 공간에서 발생하는 생활소음이나 진동 등이 층간소음으로 비화되어 사회적인 문제가 되고 있다. 따라서 소음 및 진동에 관한 규제가 강화되고, 콘크리트 슬래브의 두께를 210mm 이상, 고유 진동수를 15Hz 이상으로 시공하도록 하는 등 두께와 강성을 향상시켜서 진동과 소음을 줄이기 위한 노력을 하고 있다. 또한, 최근에는 콘크리트가 가지는 강성을 일정 수준으로 유지하고, 단면 2차 모멘트 및 단면계수의 감소를 최소화하는 방법으로 중공체를 슬래브의 하층부에 시공하여 층간소음 및 부재의 자중을 줄이는 방법 등이 다양하게 연구되고 있으며 이중 상당 부분은 이미 상용화되고 있다.

본 연구에서는 크기가 다른 구(불)형 중공체를 슬래브의 하단에 시공한 후 충격하중을 가하여 중공율에 따른 진동 및 소음에 대한 감쇠율과 휨강성의 변화를 측정하고 그 결과를 중공체가 없는 시험체와 비교한다. 또한, 중공율이 20%인 중공체에 50%의 물을 채운 후 슬래브 하단에 시공한 후 충격하중을 가했을 때의 진동 및 소음에 대한 감쇠율을 측정하고, 그 결과를 중공체가 없는 시험체에 대한 경우와 비교한 후 실제 현장에의 적용 가능성을 알아보고자 한다.

연구동향

슬래브의 사용성 검토는 주로 철근콘크리트 휨부재의 처짐제한을 어떻게 할 것 인가에 대한 연구가 주로 이루어져 왔는데, 철도교량의 상호작용을 통한 교량의 단부에서의 처짐을 검토하는 실험을 수행하고 철도교량의 지지조건의 개선방향에 대한 연구가 있으며(Yoon et al., 2018). 콘크리트 일방향 슬래브에서의 프리스트레스트 적용성을 위한 사용성평가를 수행하고 중앙부 처짐량을 제한량에 대한 연구가 있다(Park et al., 2014). 또한, 프리스트레스트 콘크리트 부재에서 긴장재의 부착여부에 따른 슬래브의 장기처짐에 대한 해석프로그램을 제안하고 이를 실험을 통하여 증명한 연구도 있다(Moon et al., 1995).

한편 슬래브의 층간소음과 관련한 연구 중에는 공동주택 중량바닥 충격음 저감을 위한 기술개발의 기초연구가 있고(Bang et al., 2013), 공동주택의 천장틀 구조 변화에 따른 바닥충격음 차음특성 연구를 통하여 공동주택 일반적인 천장구조인 목재 반자틀 구조와 이의 단점을 보완한 경량철골 천장틀 구조에 따른 바닥충격음 차음 특성을 평가하여 목조 천장틀보다 경량철골구조 천장틀이 바닥충격음 차음성능에 효과적임을 연구한 결과도 있으며(Chung et al., 2002), 복합지지구조를 가진 뜬바닥 시스템을 통하여 슬래브의 강성증가 없이 완충재를 이용하여 뜬바닥 구조를 형성하면 중량충격음을 저감시킬 수 있다고 보고한 연구도 있다(Park et al., 2003).

이러한 연구들은 본 연구와 그 연구의 목표는 유사하지만 전술한 바와 같이 대부분 층간소음이나 진동원을 제거하기보다는 진동원을 분리하는 방향의 연구이므로 층간소음의 여지는 계속 남아있다. 따라서, 더욱 근원적인 층간소음 및 진동에 대한 연구와 구조적인 안전성까지 검증할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.

연구목적

본 연구에서는 철근콘크리트 구조물의 슬래브에서 발생하는 층간의 진동 및 소음을 줄이기 위하여 슬래브에 중공부를 두

고, 중공부의 크기를 변수로 하여 충격하중을 작용시킨 후 가속도계를 이용하여 진동량을 측정한다. 측정된 데이터는 수치해석을 통하여 슬래브의 감쇠율과 강성을 구하고 이를 비교 분석하여 철근콘크리트 중공부에 의한 감쇠율과 강성의 차이를 알아낸다. 이 과정을 반복하여 각 중공율에 따른 슬래브의 사용성을 검토하며, 중공부의 50%를 액체로 채운 시험체의 감쇠율과 강성의 차이를 비교하여 감쇠율의 변화에 따른 슬래브의 사용성 검토를 수행한다.

시험체의 제작

슬래브의 중공율에 따른 진동영향을 실험을 통해 평가하기 위하여 시험체는 Table 1과 같이 5개를 제작하였으며, 주철근은 상하부 모두 D13을 사용하여 150mm 간격으로 배근하였으며, 시험체의 제원은 폭 600mm, 길이 3600mm로 제작하였다. 또한, 시험체가 중공슬래브인 점과 공동주택의 표준 바닥구조를 고려하여 총높이를 210mm로 계획하여 제작하였다. 시험체의 개수는 중공률을 0.0%, 10%, 20%, 30%하여 4개, 중공율 20%에 액체를 50% 채운 시험체 1개를 계획하였고, 콘크리트의 설계기준강도는 21MPa로 배합설계를 하였으며, 철근의 항복강도는 400MPa를 기준으로 계획하였다.

Table 1. Design of Specimens

Specimens	Reinforcement	Hollow Core rate	Remarks
S-0		0%	Slab Dimension : 600W×3,600L×210H Hollow Core Type : Sphere $f_y = 400Mpa, f_{ck} = 21Mpa$
S-1	Upper : D13@150	10%	
S-2	Lower : D13@150	20%	
S-3		30%	
S-2W		20%	Same Dimension with 50% Liquid

중공형 시험체 제작

시험체의 타설 후 콘크리트의 압축강도를 측정하기 위하여 9개의 표준 공시체를 제작하여 표준양생을 실시하였으며, 28일 압축강도 실험을 수행한 결과, 24.0MPa의 압축강도를 가지고 있는 것으로 나타났다. 4개의 중공 슬래브 실험체는 하부철근을 조립한 후 중공재를 설치하고 상부철근을 조립했으며, 콘크리트의 타설은 중공부가 있는 하부를 먼저하고, 상부 슬래브 및 벽체를 타설하는 과정으로 수행하였다(Fig. 1).



Fig. 1. Production of Hollow Core Specimens

중공부에 액체를 채운 시험체 제작

제작한 5개의 시험체는 고정장치를 사용하여 중공재의 부력을 방지하였으며, 5개의 시험체는 모두에 대해서 충격진동실험을 수행하고, 이 중에서 3개의 시험체 즉, 액체에 의한 충격진동의 감쇠성능을 확인하기 위하여 중공부가 없는 실험체, 중공율이 20%이며 액체를 채운 시험체와 액체를 채우지 않은 실험체의 3개 시험체에 대해서는 구조성능실험을 병행하도록 계획하였다. 특히, 액체로 인한 감쇠율의 변화를 확인하기 위한 실험을 하기 위하여 중공율이 20%인 시험체에는 중공체에 50%의 물을 채워 넣고 상부 철근과 하부철근 사이에 고정하였다(Fig. 2).



Fig. 2. Production of Hollow core Specimen with Liquid

실험의 수행

슬래브의 충격진동 실험

슬래브의 고유진동수 및 감쇠율을 측정하는 충격진동실험을 Fig. 3과 같이 수행하였다. 실험은 슬래브의 중앙부에서 10cm 떨어진 지점에 해머로 6회를 타격하였고, 1회 타격 후, 5분간 데이터를 취득한 후 다음 타격을 수행하였다. 또한, 데이터의 취득은 슬래브의 위치에 따른 감쇠성능을 알아보기 위하여 종방향과 횡방향에 모두 4개의 가속도계를 배치하여 측정하였다. 또한, 실험은 진동을 측정하고자 하는 슬래브에 가속도센서를 부착하되 부재의 강성을 알 수 있도록 질량을 측정하였으며, 측정된 데이터는 저주파에서의 물리량을 측정하게 되며 저주파 성분의 전기적 잡음을 포함하고 있으므로 Low Pass Filter를 통하여 데이터를 보정한다(Fig. 4).

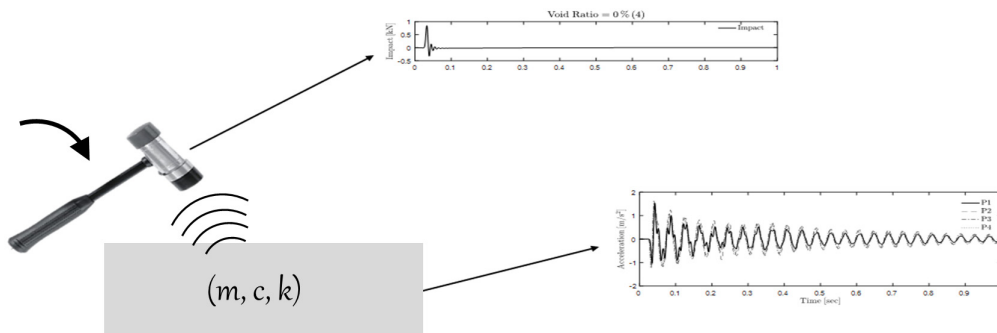


Fig. 3. Concept of Impact Vibration Test

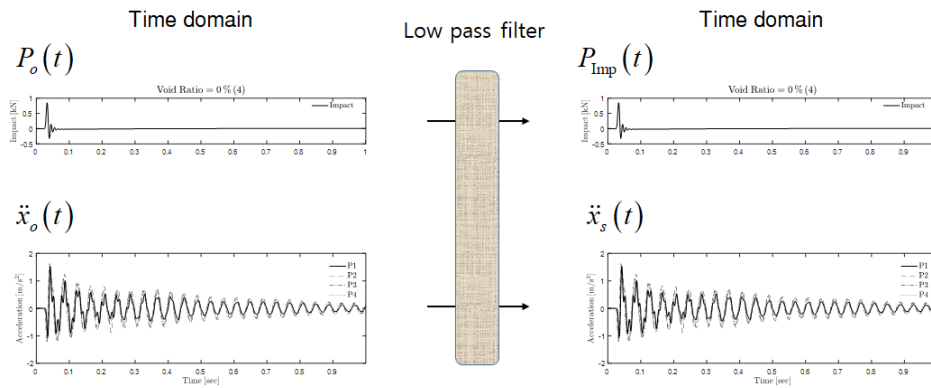


Fig. 4. Filtering of Measured Acceleration

이렇게 얻어진 데이터는 시간 이력에 따라 시간 차원(Time Domain)에서 얻어진 데이터이므로 시간의 변화에 따른 구조물의 가속도 변화를 알 수 있으나 입력되는 에너지의 분포는 알 수 없다. 그러나 FFT변환(Fast Fourier Transform)을 이용하여 데이터를 주파수 영역(Frequency Domain)으로 변환하면 해당 구조물이 어떤 진동수 영역에서 에너지가 집중하는 것을 볼 수 있으며, 이는 이 구조물의 강성과 밀접한 영향을 가지는 것을 알 수 있다(Fig. 5).

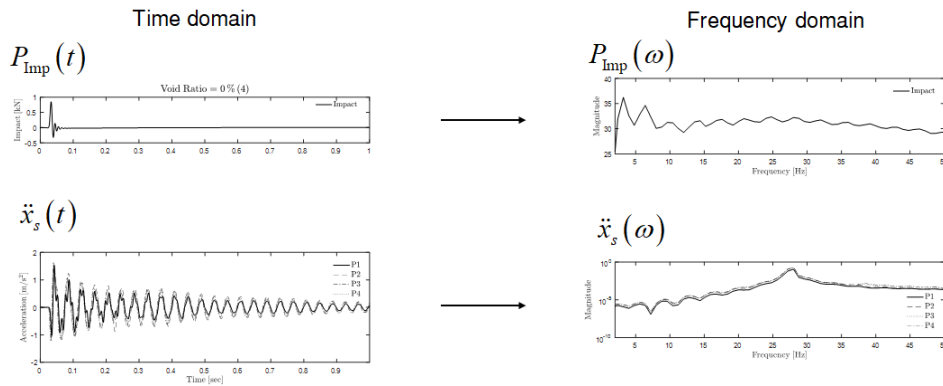


Fig. 5. Transformation of Predominant Frequency of Slabs Using FFT

반복운동을 하는 비감쇠 자유진동에서의 질량과 강성의 관계는 식 (1)로 정의할 수 있으며, 물체의 고유 진동수는 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$m\ddot{v}(t) + kv(t) = 0 \tag{1}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{2}$$

감쇠율은 자유진동을 하는 물체가 어떠한 저항에 의한 손실을 나타내는 물리량으로 이전 진폭의 손실 감쇠 능률인데, 본 연구에서는 슬래브에서의 가속도를 측정하였으므로 진동수 응답에 의한 감쇠율을 제시하는 HPB (Half Power Bandwidth) 법에 기초해 식 (3)으로 감쇠율을 측정하였다(Fig. 6).

$$\text{여기서, } \xi = \frac{|f_a - f_b|}{2f_n} \tag{3}$$

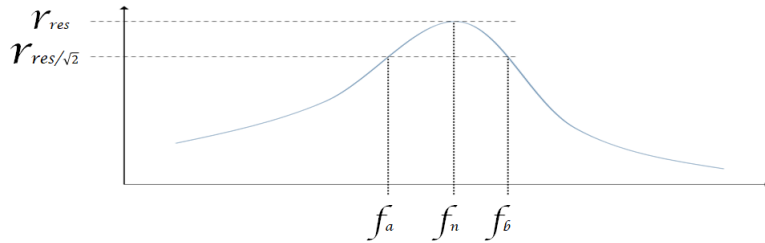


Fig. 6. Measurement of Damping Rate with HPB

슬래브 구조 성능시험

철근콘크리트 슬래브의 휨성능 시험은 중공부가 없는 시험체 1개, 중공부를 두되 액체를 넣지 않은 시험체 3개, 중공부에 액체를 포함한 시험체 1개, 총 5개에 대하여 실시하였으며, 시험은 모멘트 결과분석이 용이하도록 Fig. 7과 같이 일정 구간을 두어 4점 휨시험을 진행하였으며, 슬래브의 곡률을 산정하고자 5점의 처짐을 측정하였다.

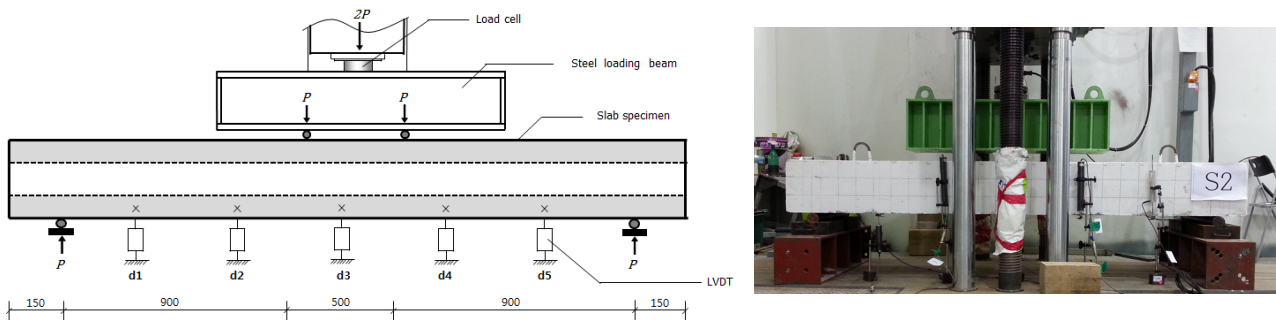


Fig. 7. Performance Test of Hollow Core Slab

시험결과 및 고찰

슬래브 충격진동시험 결과

소음 및 진동이 중공율에 따라라 변화하는 지의 여부를 확인하기 위하여 철근콘크리트 슬래브의 중공율을 고려하여 충격 진동시험을 수행하고, 중공율이 20%인 시험체에 액체를 50% 투입하고 구조성능을 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

중공율에 따른 슬래브의 감쇠율과 고유 진동수를 정리하면 Table 2와 같으며, 중공율에 따른 감쇠율 및 고유 진동수의 변화는 미미한 것으로 나타났다. 그러나 중공율이 30% 이상으로 증가하면 감쇠가 다소 증가하며 액체를 주입한 S-2W 시험체의 경우, 다른 시험체보다 감쇠율이 비교적 크게 발생하였다(Fig. 8).

Table 2. Results of Impact Vibration Test

Specimens	Hollow Rate	Damping Ratio	Natural Frequency
S-0	0%	1.21%	24.8Hz
S-1	10%	1.11%	26.4Hz
S-2	20%	1.25%	27.2Hz
S-3	30%	1.86%	28.0Hz
S-2W	20%	7.08%	26.4Hz

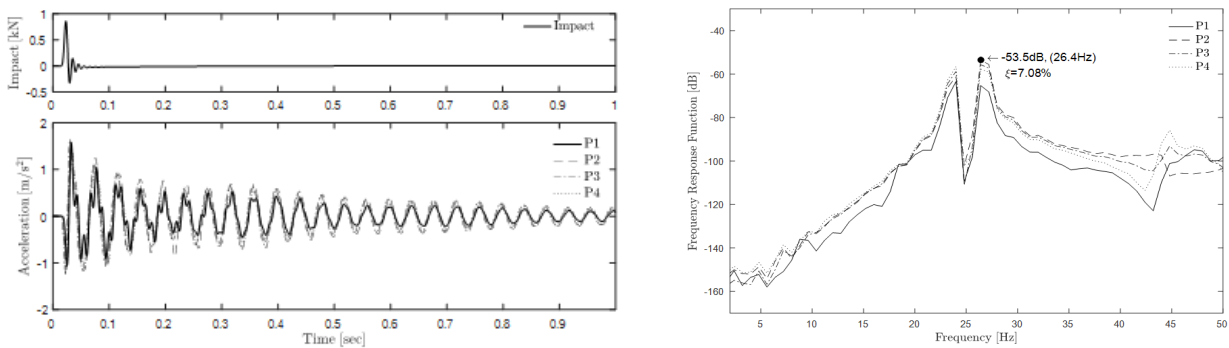


Fig. 8. Impact Test Results of Specimen with 20% Hollow Rate and 50% Liquid

슬래브 구조성능실험 결과

중공율 및 액체주입에 따른 구조성능 저하 정도를 판단하기 위한 구조성능 시험결과 Table 3과 같으며 이를 그래프로 나타내면 Fig. 9와 같다. 중공율이 0%인 시험체의 최대하중에 비해 속이 빈 중공 시험체는 5% 내력이 감소하였으며, 액체가 주입된 시험체는 동일한 성능을 나타내고 있으므로 구조성능의 변화는 없는 것으로 판단된다. 따라서 중공부에 액체를 주입할 경우 구조적 성능의 감소는 없고, 감쇠율은 증가함으로 진동 및 소음의 저감도 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3. Results of 4 Point Bending Test about Hollow Core Slabs

Specimens	Maximum Load (kN)	Maximum Displacement (mm)
S-0	62.4	64.2
S-2	58.8	53.6
S-2W	62.7	63.9

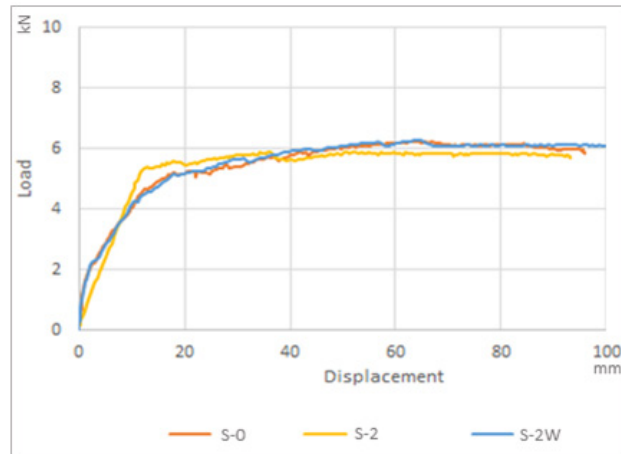


Fig. 9. Comparison of Bending Ability of Specimens with 20% Hollow Rate and with 0%

결론

철근콘크리트 슬래브의 진동 및 소음에 대한 중공 슬랩의 영향을 파악하기 위하여, 철근콘크리트 슬래브의 중공율을 고려한 충격진동 시험과 구조성능 시험을 수행한 후 검토 및 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 중공율이 20% 이하인 경우는 중공율이 증가함에 따라 충격진동에 대한 감쇠율이 증가하는 경향을 보이나, 그 변화가 작아서 실무적으로 기대하기는 불가능한 수준이다. 다만, 중공율이 30%에 이를 경우 어느 정도 감쇠의 증가를 기대할 수 있다고 사료된다.
- 2) 중공율이 30% 이하인 경우에 대하여 휨성능 실험을 수행한 결과 내력저하는 5% 정도이므로 구조성능에는 문제가 없는 없지만, 중공율이 30% 이상인 경우는 구조적 안정성에 문제가 있으리라 예상됨으로 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.
- 3) 중공율 20%인 시험체의 중공부에 액체를 주입하였을 경우는 감쇠율이 크게 증가하는 양상으로 볼 때, 중공체에 액체를 주입하면 충격진동에 대한 감쇠율이 증가하리라 예상되고 실무에서 진동 및 소음을 줄이는 데 적용할 가능성이 있다고 사료된다.
- 4) 본 연구에서는 중공체에 액체로 물을 넣었으나, 다양한 중공율과 다양한 점성을 가진 액체를 넣은 경우의 진동 및 소음에 대한 감쇠효과는 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

References

- [1] Bang, J.D., Lee, B.S., Kim, S.Y., Chun, Y.S., Kim, H.J., Cho, W.J., Yoo, S.Y., Kim, O.H. (2013). A Study on the Direction of Technology Development for the Reduction of Heavy Floor Impact Sound in Apartment Houses. Korea Land & Housing Corporation Research Report, pp. 176-182.
- [2] Chung, H.W., Gi, N.G., Song, M.J., Kim, S.W. (2002). "A Study on the Reduction Characteristics of Floor Impact Sound Insulation Due to the Ceiling Frame Structures in Apartment Houses." Journal of the Korean Society of Noise and Vibration Engineering, Vol. 12, No. 8, pp. 573-580.

- [3] Moon, J.H., Lee, L.H. (1995). "Analytical Method of Prestressed Concrete Members with Unbonded Tendons." Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 8, pp. 75-86.
- [4] Park, H.E., Kim, M.S., Lee, Y.H. (2014). "A Parametric Study of Deflection Analysis of the Prestressed Concrete One-Way Slab for Serviceability Assessment." Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 27, No. 6, pp. 525-532.
- [5] Park, Y.H., Jeong, H.D., Oh, H.J. (2003). "Floating Floor of Multi-Supporting System." Journal of the Korean Society of Noise and Vibration Engineering's Science and Technology, pp. 928-931.
- [6] Yoon, J.C., Lee, C.J., Jang, S.Y., Choi, S.H., Park, S.H., Jung, H.S. (2018). "Analysis of Track-Bridge Interaction and Retrofit Design for Installation of CWR on Non-ballasted Railway Bridge." Journal of Korean Society for Urban Railway, Vol. 6, No. 4, pp. 383-392.