

PZT 파우더 첨가에 따른 티타늄 파우더/폴리머 콘크리트 복합재료의 진동 특성 및 압축 물성 분석

박재현** · 김석룡* · 김경수* · 김건* · 김석호* · 이범주* · 정안목** · 안종욱** · 김선주* · 이시맥* · 유형민*†

Effects of PZT Powder on Vibration and Compression Properties of Ti Powder/Polymer Concrete Composites

Jaehyun Park**, Seok-Ryong Kim*, Kyoung-Soo Kim*, Geon Kim*, Seok-Ho Kim*, Beom-Joo Lee*,
Anmok Jeong**, Jonguk An**, Seon Ju Kim*, Si-Maek Lee*, Hyeong-Min Yoo*†

ABSTRACT: In this study, Ti powder/Polymer concrete composites were processed by adding the PZT powder, one of the piezoelectric materials, to improve the vibration damping effect of Polymer concrete. Ti powder was added at a constant ratio in order to maximize the vibration damping effect using the piezoelectric effect. Three types of composite material specimens were prepared: a specimen without PZT powder, specimens with 2.5 wt% and 5 wt% of PZT powder. The vibration characteristics and compression properties were analyzed for all specimens. As a result, it was confirmed that as the addition ratio of PZT powder increased, the Inertance value at the resonant frequency decreased due to the piezoelectric effect when the vibration generated from Ti powder/polymer concrete was transmitted. Especially, the Inertance value was decreased by about 19.3% compared to the specimen without PZT at the resonant frequency. The change in acceleration with time also significantly decreased as PZT powder was added, confirming the effect of PZT addition. In addition, through the compression strength test, it was found that the degree of deterioration in compression properties due to the addition of PZT up to 5 wt% was insignificant, and it was confirmed that the powder was evenly dispersed in the composites through the cross-sectional analysis of the specimen.

초 록: 본 연구에서는 기존 폴리머 콘크리트의 진동 감쇠 효과를 향상시키기 위해 압전 재료 중 하나인 PZT 파우더를 첨가하여 티타늄 파우더/폴리머 콘크리트 복합재료를 제작하였다. 티타늄 파우더는 압전 효과를 이용한 진동특성 변화를 극대화하기 위해 일정한 비율로 유지하였고, PZT 파우더를 첨가하지 않은 시편, PZT 파우더를 2.5 wt%, 5 wt% 첨가한 세 가지 종류의 복합재료 시편을 제작하였으며, 모든 시편에 대해 진동 특성 및 압축 물성 분석을 진행하였다. 그 결과, PZT 파우더 첨가 비율이 높아질수록 티타늄 파우더/폴리머 콘크리트에서 발생한 진동이 전달될 때 압전 효과로 인해 공진주파수에서 전달 함수 Inertance 값이 작아지는 것을 확인하였고, 특히 PZT 파우더 5 wt% 첨가 시편의 경우, 공진주파수에서 Inertance 값은 PZT가 첨가되지 않은 시편에 비해 약 19.3% 감소하는 것으로 나타났다. 시간에 따른 가속도 변화 폭 역시 PZT 파우더가 첨가됨에 따라 크게 감소하는 것으로 나타나 PZT 첨가에 따른 효과를 확인할 수 있었다. 또한, 압축강도 시험을 통해 5 wt%까지의 PZT 첨가에 의한 압축 물성 저하 정도는 미미한 것으로 나타났고, 시편 단면 분석을 통해 파우더가 고르게 분산된 것을 확인하였다.

Key Words: 폴리머 콘크리트(Polymer concrete), 복합재료(Composite materials), 타이타늄산 지르콘산 연(PZT), 진동 특성(Vibration property), 압축 강도(Compression strength)

Received 4 June 2022, received in revised form 13 June 2022, accepted 17 June 2022

*School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education (KOREATECH)

*†School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education (KOREATECH), Corresponding author (E-mail: yhm2010@koreatech.ac.kr)

**Smart Manufacturing System R&D Department, Research Institute of Clean Manufacturing System, Korea Institute of Industrial Technology

1. 서론

최근 도시화와 산업화를 통한 과도한 인구 밀집으로 인해 생활 소음 배출원에 따른 층간 소음 그리고 공장 소음에 의한 피해가 급격히 증가하고 있다. 진동에 관한 문제는 크게는 건물의 구조적 손상을 일으킬 수도 있으며, 작게는 거주자에게 불쾌함을 유발할 수 있다. 최근 정온한 환경의 조성에 대한 관심이 증가하면서 공동주택의 설비로부터 발생하는 소음의 저감에 대한 관심이 높아지고 있다. 대표적인 예로 엘리베이터 설비는 모터에 의해 층간으로 빠른 속도로 움직이면서 다양한 소음원으로 작용함으로써 설비 근처에 위치한 거주공간에 구조기인 소음 발생을 유발하고 있다. 이는 진동에 의해 발생하는 소음이 고체를 매질로 하여, 벽을 타고 흐르는 바닥 충격음과 관련이 있다. 위층 혹은 옆집의 어른 보행, 어린이 뛰 등에 의해 발생하는 무겁고 지속시간이 긴 충격음은 낮은 주파수(500 HZ 이하)로 구성되어, 고체인 벽을 타고 흐르며 소음을 유발하는 것이다. 이는 최근 대한민국의 공동주택 주거 형태인 콘크리트 위주의 벽식 구조와도 큰 연관이 있다. 건설비 절감을 위해 기둥 없이 벽이 천장을 받치는 형태인 벽식 구조는 바닥 소음이 벽을 타고 아래로 전달되는 정도가 상대적으로 크기 때문에 층간 소음에 취약할 수밖에 없다. 또한 단단한 콘크리트 특성상 소음 및 진동에 대한 감쇠 성능이 적기 때문에 충격에 의한 소음은 당연하다[1-3].

이러한 문제를 해결하기 위하여 기존 시멘트를 결합제로 제작되고 있는 콘크리트를 에폭시를 결합제로 사용한 콘크리트로 대체하여 진동 감쇠 효과를 보이고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있고, 대표적인 압전 재료 중 하나인 타이타늄산 지르콘산 연(Lead zirconate titanate, PZT)을 복합재료에 적용하여 전도성이 있는 저항체를 통해 PZT의 변형으로부터 생성되는 전기에너지를 이동, 최종적으로 열에너지로 소산시켜 진동 감쇠에 이용하고자 하는 노력들도 최근에 행해지고 있다[3-13]. 본 연구에서는 골재와 에폭시를 혼합하고 전도성 물질로 티타늄 파우더를 첨가한 티타늄 파우더/폴리머 콘크리트 복합재료를 제작하였고, 이러한 폴리머 콘크리트의 진동 감쇠 효과를 극대화하기 위해 PZT를 파우더 형태로 첨가하여 그 효과를 알아보하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 재료 및 시편 제작

에폭시는 국도화학의 YD-128, 경화제로는 KH-816 제품을 사용하였다. 전도체 및 저항체로 이용하기 위해 평균 직경 44 μm 의 티타늄 파우더를 사용하였으며, PZT 파우더는 평균 직경 1 μm , 밀도 7.7 g/cm^3 , 압전상수 $d_{31} = -185 \times 10^{-12} \text{ m/V}$, $d_{33} = 392 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 를 가지는 아이에스테크놀로지 사 PC-50 제품을 사용하였다. 폴리머 콘크리트 시편은 Silica sand

Table 1. Mixing ratio of polymer concrete

Specimen	Mixing ratio (wt.%)			
	Silica sand #4	Silica sand #6	Epoxy	Ti powder
Ti powder/Polymer concrete composites	18	38	20	24



Fig. 1. Test specimens

(4호, 6호)를 골재로 이용하여 에폭시, 티타늄 파우더와 함께 제작하였으며 상세한 배합비는 Table 1과 같다. 해당 배합비를 유지하면서 PZT 파우더를 2.5 wt%, 5 wt% 첨가하여 Fig. 1과 같이 PZT 파우더를 첨가하지 않은 0 wt% 시편, 2.5 wt% 첨가 시편, 5 wt% 첨가 시편 3종류를 제작하여 실험에 이용하였다.

개방형 실리콘 몰드를 사용하여 시편을 제작하였으며, 각 케이스 별로 제작한 시편의 크기는 30 mm × 12 mm × 100 mm이다. Table 1에서 나타난 배합비대로 혼합물을 만들고 Shear mixer를 이용해 5분간 교반시킨다. 교반 후 혼합물은 에폭시가 충분히 경화될 수 있도록 상온에서 48시간 유지하였다. 시편을 제작할 때 금속 입자가 무거우면 에폭시가 경화되기 전에 폴리머 콘크리트 한 면으로 가라앉는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 이를 균일하게 분산시키기 위해 스톡스 법칙을 이용한 혼합물 내에서의 중단 속도를 고려하여 다른 금속에 비해 낮은 밀도(4.5 g/cm^3)를 가지는 티타늄 파우더를 사용하여 제작 시 침전을 최소화하고자 하였다.

2.2 진동 특성 분석

복합재료의 진동 특성을 확인하기 위해 가진을 통한 진동 응답을 확인하였다. 진동 응답 확인을 위한 실험 구성은 Fig. 2와 같다.

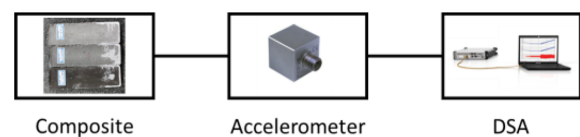


Fig. 2. Measurement block diagram of Testbed

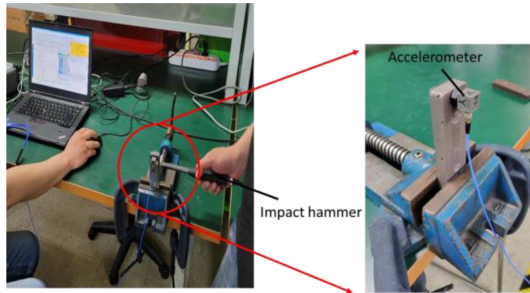


Fig. 3. Impact test of composites

복합재료에 부착된 가속도 센서를 이용해 충격에 대한 응답을 측정한다. 측정 신호는 DSA(Digital Signal Analyzer)를 통해 주파수 응답을 분석할 수 있다. Fig. 3에 가진 실험에 대해 나타내었다. 복합재의 한쪽 끝은 고정시키고 자유단 쪽에 가속도 센서를 부착한다.

임팩트 해머를 이용해 복합재에 충격을 가한 후 가속도 센서를 이용해 복합재의 충격에 의한 응답 신호를 측정하였다. 본 연구에서는 주파수(Frequency, ω)에 대한 응답함수를 힘(입력값), 가속도(출력값) 비로 표현한 Inertance로 나타내었고, 그 식은 아래와 같다[10].

$$\text{Inertance(가속도/힘)}: A(\omega) = \frac{(j\omega)^2 X(\omega)}{F(\omega)} \left[\frac{\text{ms}^{-2}}{\text{N}} \right]$$

2.3 압축 물성 시험

건축물에 사용되는 구조재료에서 가장 기본적이고 중요한 기계적 물성인 압축강도를 살펴보았다. 일반적으로 구조재료에 particle이 첨가되면 기계적 강도가 저하되는 경향을 보이기 때문에[14] PZT 첨가에 따른 압축강도의 변화를 살펴보고자 하였다. 압축 물성 시험은 만능시험기(Universal Testing Machine)를 사용하여 시험 속도 3 mm/min로 압축강도 시험을 진행하였다. 사용한 시편의 두께는 12 mm, 너비 15 mm이고, Strain에 따른 Stress를 측정하여 나타내었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 진동 특성

각 시편에 임팩트 해머를 이용하여 충격을 가한 직후의 시간에 대한 시편 끝단의 가속도 측정 결과는 Fig. 4와 같다. 각 케이스 별 3회 반복하여 실험을 진행하였으며 대표 결과값을 그래프로 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 PZT를 첨가하지 않은 시편이 PZT를 첨가한 시편에 비해 진동이 비교적 길게 유지되는 것으로 나타났다. 즉, 진동 발생 시 첨가된 PZT의 압전 효과에 의한 에너지 손실로 인해 시편의 진동 변화 폭이 크게 감소하는 것으로 보인다.

또한, 이러한 진동 특성 변화 경향을 한 번 더 확인하기 위해 주파수에 따른 전달함수 Inertance 값을 Fig. 5에 나타

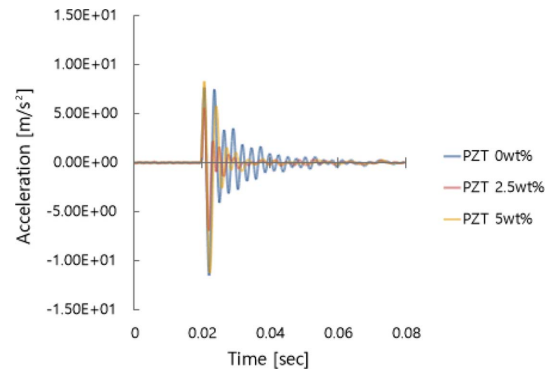


Fig. 4. Acceleration response of composites

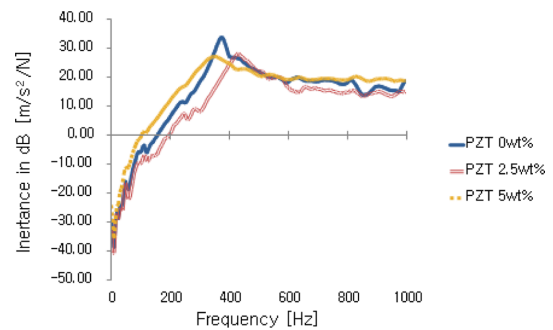


Fig. 5. Impact response result of composites

Table 2. Inertance value at resonance frequency

Type	Resonance frequency (Hz)	Inertance (dB)
PZT 0 wt%	376	33.7
PZT 2.5 wt%	430	28.1
PZT 5 wt%	352	27.2

내었다. 3가지 시편 모두 공진주파수는 400 Hz 부근에서 나타났으며, 그 때의 Inertance 값을 dB로 Table 2에 나타내었다. PZT 파우더를 첨가하지 않은 시편에서는 그 값이 33.7 dB로 나타났으며, PZT 2.5 wt% 첨가 시편은 28.1 dB, PZT 5 wt% 첨가 시편은 27.2 dB로 PZT 파우더 함량이 높을수록 Inertance 값이 각각 16.6%, 19.3% 만큼 감소하는 경향을 보였다. 이는 시간에 따른 가속도 측정결과와 마찬가지로 충격이 전달될 때 PZT 파우더가 변형되어 전기에너지를 발생시키고, 이러한 전기에너지가 열로 바뀌어 전달되는 에너지가 감소하는 것으로 보인다.

3.2 압축 강도

시편의 압축강도 시험 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Strain에 따른 Stress 결과를 나타내었으며, PZT 파우더 첨가에 따른 압축강도 변화를 살펴보았다. PZT 파우더가 첨가되더라도 압축강도 그래프는 유사한 양상을 보였고, 각 시편에서의 압축강도 값을 나타낸 Table 3으로부터 압축강도는 PZT

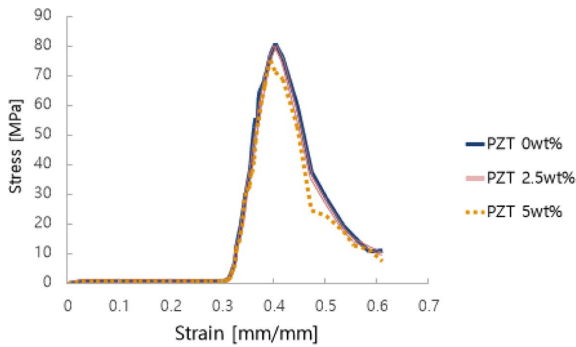


Fig. 6. Compression test results

Table 3. Maximum compression strength of composites

Type	Compression strength (MPa)
PZT 0 wt%	81.0
PZT 2.5 wt%	80.4
PZT 5 wt%	75.3

를 첨가하지 않은 시편에서 81 MPa, PZT 2.5 wt% 첨가 시편은 80.4 MPa, PZT 5 wt% 첨가 시편에서는 75.3 MPa의 압축강도 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 PZT 5 wt% 첨가 시편에서 압축강도가 다소 낮아지기는 하지만 PZT 파우더 첨가에 따른 급격한 압축 물성 변화는 없다는 것을 확인할 수 있다. 대부분의 경우에서 particle 형태의 강화재가 첨가되면 기계적 물성이 저하되는 것이 일반적이거나 급격한 물성 저하가 시작되는 강화재 첨가량은 경우에 따라 상이하다. 본 시험의 경우 PZT 파우더 2.5 wt% 첨가에서 약 1%, 5 wt% 첨가에서 약 7% 압축 강도 저하를 보이는 것을 알 수 있고, 7%의 압축 강도 저하가 되더라도 건축 구조물로 사용하기에 문제가 없는 수준이기 때문에 진동 흡수 효과를 위해 티타늄 파우더/폴리머 콘크리트 복합재에 PZT 파우더를 5 wt%까지 첨가하는 것은 무방할 것으로 판단된다.

3.3 단면 분석

파우더를 첨가한 복합재료를 사용하여 실험을 진행하였기 때문에 기존에 설계한 성능을 그대로 구현하기 위해서는 시편 제작 시 파우더가 기지재에 잘 분산되는 것이 전제 조건이다. 이를 확인하기 위해 주사전자현미경(Scanning electron microscope, SEM)을 이용한 시편 단면 분석을 진행하였다. PZT 함량이 가장 많은 5 wt% 시편을 사용하여 측정하였으며 그 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 평균 1 μm 직경을 가지는 PZT 파우더가 분산되어 있는 것을 확인할 수 있고, 티타늄 파우더 또한 고르게 분산되어 있는 것을 확인할 수 있다.

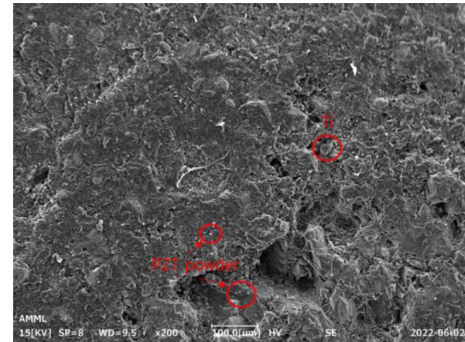


Fig. 7. SEM image of composites (PZT 5 wt%)

4. 결론

본 연구에서는 PZT의 압전효과를 이용한 티타늄 파우더/폴리머 콘크리트 복합재료의 진동 특성 변화를 확인하고자 하였다. 임팩트 해머를 이용한 가진 실험 결과, PZT 파우더를 첨가하지 않은 시편과 첨가한 시편의 시간에 따른 가속도 변화는 큰 차이를 보였고, PZT를 첨가한 시편에서 가속도 변화 폭이 시간에 따라 빠르게 감소하는 것을 보였다. 이와 유사한 경향으로, PZT 함량이 클수록 공진주파수 영역에서 Inertance 값 또한 작아지는 것을 확인하였다. 이는 첨가된 PZT의 영향으로 보이며 시편 내부에 고르게 분산되어 있는 PZT가 진동이 일어날 때에 운동에너지를 전기에너지 바꾸고 PZT 그 자체에서 소산되는 열과 전체 시편에서 약 24% 가량 차지하고 있는 티타늄 파우더로 전달된 전기에너지가 열에너지로 소산되기 때문이라고 판단된다. 또한, 압축강도 평가 결과로부터 PZT 파우더 첨가에 따라 기계적 물성 저하가 급격하게 발생하는 것이 아닌 것을 확인하였기 때문에 이러한 PZT, 티타늄 파우더를 첨가한 폴리머 콘크리트를 제작하고 적용함으로써 향후 건축물에 사용되는 구조재료의 불필요한 진동 전달을 최소화할 수 있을 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원을 통해 수행되었습니다. (20017202).

REFERENCES

1. Park, S.H., and Lee, P.J., "Effects of Floor Impact Noise on Psychophysiological Responses", *Building and Environment*, Vol. 116, 2017, pp. 173-181.
2. Kim, E.S., "Sound and the Korean Public: Sonic Citizenship in the Governance of Apartment Floor Noise Conflicts", *Science as*

- Culture*, Vol. 25, No. 4, 2016, pp. 538-559.
3. Orak, S., "Investigation of Vibration Damping on Polymer Concrete with Polyester Resin", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 2, 2000, pp. 171-174.
 4. Wong, W.G., Fang, P., and Pan, J.K., "Polymer Effects on the Vibration Damping behavior of Cement", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 15, No. 6, 2003, pp. 554-556.
 5. Kim, S.J., "Vibration and Damping Characteristic of Composite Laminates Embedding Directional Damping Materials", *Composites Research*, Vol. 16, No. 5, 2003, pp. 39-44.
 6. Abdel-Fattah, H., and El-Hawary, M.M., "Flexural Behavior of Polymer Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 13, No. 5, 1999, pp. 253-262.
 7. Gorninski, J.P., Dal Molin, D.C., and Kazmierczak, C.S., "Study of the Modulus of Elasticity of Polymer Concrete Compounds and Comparative Assessment of Polymer Concrete and Portland Cement Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 11, 2004, pp. 2091-2095.
 8. Vipulanandan, C., and Paul, E., "Characterization of Polyester Polymer and Polymer Concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 5, No. 1, 1993, pp. 62-82.
 9. Jo, B.W., Park, S.K., and Kim, D.K., "Mechanical Properties of Nano-MMT Reinforced Polymer Composite and Polymer Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 1, 2008, pp. 14-20.
 10. Kim, J.J., and Kim, J., "Analytical Study on Vibrational Properties of High Damping Polymer Concrete", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 24, No. 5, 2020, pp. 119-125.
 11. Kim, J.J., and Shim, H.B., "Experimental Study on Vibration Reduction Characteristics of Polymer Concrete", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 23, No. 7, 2019, pp. 58-65.
 12. Kim, S.Y., Tanimoto, T., Uchino, K., Nam, C.H., Nam, S., and Lee, W.I., "Effects of PZT Particle-enhanced Ply Interfaces on the Vibration Damping Behavior of CFRP Composites", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 42, No. 10, 2011, pp. 1477-1482.
 13. Zhang, C.H., Hu, Z., Gao, G., Zhao, S., and Huang, Y.D., "Damping Behavior and Acoustic Performance of Polyurethane/lead Zirconate Titanate Ceramic Composites", *Materials & Design*, Vol. 46, 2013, pp. 503-510.
 14. Yang, Z., Fan, J., Liu, Y., Nie, J., Yang, Z., and Kang, Y., "Effect of the Particle Size and Matrix Strength on Strengthening and Damage Process of the Particle Reinforced Metal Matrix Composites", *Materials*, Vol. 14, No. 3, 2021, p. 675.