

## 페타이어 고무분말과 골재를 혼입한 폴리우레탄 복합재료의 감쇠 특성

# Damping Characteristics of Polyurethane Composites Incorporating Recycled Rubber Particles and Aggregates

박세연<sup>1</sup> · 최정일<sup>2</sup> · 황재승<sup>3</sup> · 이방연<sup>3\*</sup>

Se Eon Park<sup>1</sup> · Jeong-Il Choi<sup>2</sup> · Jae-Seung Hwang<sup>3</sup> · Bang Yeon Lee<sup>3\*</sup>

(Received June 15, 2020 / Revised September 20, 2020 / Accepted September 22, 2020)

The purpose of this study is to investigate the damping properties of polyurethane composites incorporating waste tire rubber powder and preplaced coarse aggregates. Four types of polyurethane-based composites were manufactured, and longitudinal impact tests were performed. And vibration signals in the time domain and frequency domain were measured and values of damping ratio for each specimen were calculated. Test results showed that the damping ratios of polyurethane composites, in which the amount of polyurethane was reduced by 10.6% and 21.2% through incorporation of rubber particles, were 8.4% and 4.6% lower than that of pure polyurethane. The damping ratio of the polyurethane composite produced in a similar manner to the precast concrete production method was found to be 22% lower than that of pure polyurethane, however, the amount of polyurethane was reduced by 50% and the stiffness was 25.7 times higher than that of pure polyurethane.

**키워드** : 폴리우레탄, 고무분말, 굵은 골재, 감쇠비

**Keywords** : Polyurethane, Rubber particle, Coarse aggregate, Damping ratio

## 1. 서론

자동차 산업의 발달로 전 세계에서 연간 15억개의 타이어가 생산되고 있으며, 매년 거의 1억 개의 타이어가 서비스 수명을 끝내고 그 중 50% 이상이 처리 없이 매립지나 쓰레기로 버려지는 것으로 알려져 있다(Siddique et al, 2004). 2030년까지 이 수치는 연 1억 2천만건에 이를 것으로 예상되고 있으며, 최소한 축적된 타이어를 포함하여 정기적으로 5천만 개의 타이어를 폐기해야 한다(Azevedo et al, 2012). 그러나 이를 적절하게 처리·재활용 할 수 있는 시설이 없어 발생된 페타이어가 무단 방치되거나 단순하게 소각 처리되어 환경오염이 심해지고 있다(Shen et al, 2013).

건설 산업은 환경 친화적인 원료를 찾거나 콘크리트의 골재로 고체 폐기물을 사용하는 연구가 진행되었으며, 그 중 페타이어 고

무를 시멘트 콘크리트에 혼합하여 일부 천연 골재를 대체하는 연구가 대표적이다(Segre and Joekes 2000; Mohammed et al, 2012; Eiras et al, 2014). 이러한 연구를 통하여 페타이어의 단순 매립과 소각을 줄여 환경오염 방지에 효과가 있고, 자연 골재 일부를 절약할 수 있어 환경 친화적이며 경제성을 높일 수 있다(Najim and Hall 2012). 그러나 일반적으로 고무분말 함량이 증가하면 감쇠 성능은 증가하나 기계적 성질은 감소하는 것으로 나타난다(Lin et al, 2010). 이는 고무분말 자체의 감쇠와 시멘트 페이스트 사이 계면에서의 감쇠에 의해 감쇠 성능이 증가하는 반면 강도 및 강성 측면에서 시멘트 페이스트에 비해 낮은 강도와 강성을 지닌 고무분말이 결점으로 작용하기 때문이다. 따라서 고무의 감쇠 성능을 가지면서 콘크리트와 유사한 특성을 갖는 재료를 개발하거나 모재의 성질이 고무와 유사한 성질을 갖는 경우 기존 연구에서 나타난 단점을 피할 수 있다.

\* Corresponding author E-mail: bylee@jnu.ac.kr

<sup>1</sup>전남대학교 건축학부 연구원 (School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea)

<sup>2</sup>전남대학교 바이오하우징연구소 박사후 연구원 (School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea)

<sup>3</sup>전남대학교 건축학부 교수 (School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea)

이 연구에서는 고무와 유사한 화학적 성질을 갖는 유기계 재료인 폴리우레탄을 결합재로 사용하여, 페타이어 고무분말의 혼입량에 따른 폴리우레탄 복합재료의 감쇠성능과 강성 증진 목적으로 굽은 골재를 사전채움하여 제작한 폴리우레탄 복합재료의 감쇠성능을 조사하고자 한다.

## 2. 실험 재료 및 방법

### 2.1 실험 재료

결합재로 사용된 액상형 폴리우레탄은 주재인 우레탄과 경화제를 무게 비율 1:1로 혼합한 것이며, 주제와 경화제의 성질은 Table 1과 같다. 주재인 우레탄은 단분자(Monomer)이지만 경화제에 의해 중합반응이 일어나 우레탄들이 결합되어 폴리우레탄이 형성된다. 주제와 경화제를 혼합한 후 가사 시간은 약 40분이다. 페타이어 고무분말의 크기는 0.375 $\mu\text{m}$ ~2000 $\mu\text{m}$ 이며, 평균 직경은 308 $\mu\text{m}$ 로, 입도 분포 곡선은 Fig. 1과 같고, 밀도는 1.13g/cm<sup>3</sup>이다. XRF(X-ray

Table 1. Properties of polyurethane

Material	Specific gravity	Viscosity (mPa.s)	Tensile strength* (MPa)	Elongation* (%)
Urethane	1.05	2,000~4,500	3.53	195
Hardener	1.35	2,000~6,000		

\* Measured by uniaxial tension test

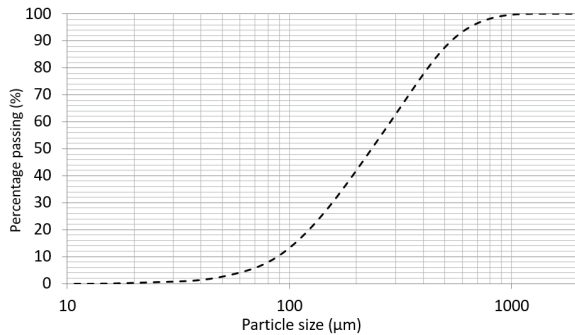


Fig. 1. Size distribution of rubber particle

Table 2. Properties of rubber particle

Material	Chemical composition(%)								
	ZnO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CuO	Cl	etc.
Rubber particle	41.7	21.3	15	9.4	3	2.4	2.03	1.7	3.65

fluorescence) 기법으로 측정된 고무분말의 화학적 성분은 Table 2와 같다. 사용한 굽은 골재의 밀도는 2.66g/cm<sup>3</sup>이며, 최대 치수는 13mm이다.

### 2.2 배합 및 제조 방법

Table 3은 이 연구에서 조사한 배합을 나타낸다. 기준 배합은 PU로 순수 폴리우레탄이다. PU-T 시리즈 배합은 고무분말이 폴리우레탄의 감쇠비에 미치는 영향을 평가하기 위한 배합으로서 PU-T10은 폴리우레탄 무게대비 10%의 고무분말을 혼입하였으며, PU-T20은 20% 혼입한 배합이다. PU-PA-T 배합은 폴리우레탄의 사용량을 줄이고, 강성을 증가시키기 위한 배합이다. PU-PA-T 배합의 경우 프리팩트 콘크리트 제조 방식과 유사하게 골재를 몰드에 채워 넣은 후 액상의 폴리우레탄을 골재 사이로 주입하여 제작하였다. 사용한 골재의 밀도와 무게를 통해 계산한 골재의 부피는 전체에서 약 50%를 차지하였다.

감쇠성능을 측정하기 위하여 40mm × 40mm × 160mm 실험체를 각 배합별로 3개씩 제조한 후 폴리우레탄이 충분히 경화될 수 있도록 2일 동안 양생하였다. 탈형 후 재령 28일까지 20°C ± 1°C의 항온실에서 기건 양생을 실시하였다.

Table 3. Mixtures

Mixture	Matrix	Rubber particle amount	Aggregate	Manufacture method
PU	PU	-	-	A
PU-T10		10wt.% of polyurethane	-	
PU-T20		20wt.% of polyurethane	-	
PU-PA-T		10wt.% of polyurethane	Normal aggregate	B

PU : Polyurethane

A : Normal mix

B : Preplaced aggregate and the injection of Polyurethane composite

### 2.3 실험 방법

각 배합별 감쇠비를 측정하기 위하여 ASTM C215(2014)에 규정된 충격 가진 실험 방법을 사용하였다. 먼저 실험체의 진동특성을 계측하기 위하여 Fig. 2와 같이 실험체의 왼쪽에 가속도계(PCB 353B16, PCB Piezotronics, Inc, 미국)를 부착하였다. 그리고 충격을 가하기 위하여 직경 12.5mm의 쇠구슬을 이용하여 실험체의 오른쪽 면을 타격하였다. 계측 신호는 데이터 수집 시스템(PCB

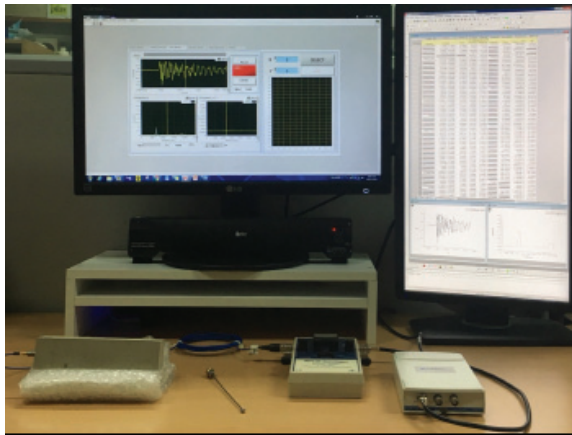


Fig. 2. Impact test setup for measuring damping ratio

480B21, PCB Piezotronics, Inc, 미국 및 NI USB-5132, National)을 사용하여 획득하였다. 측정 결과의 신뢰성을 높이기 위하여 각 실험체별로 5회 반복하여 실험을 실시하였다.

계측된 시간 영역의 가속도 신호는 고속 푸리에 변환(Fast Fourier transformation)을 통해 주파수 영역의 신호로 변환하였다. 감쇠비는 공진 주파수( $f_0$ )와 진폭의  $1/\sqrt{2}$  크기에 해당하는 진동수( $f_1, f_2$ )를 선형보간 추정을 통해 구하고, 하프 파워 방법(half power bandwidth method)을 사용하여 식 (1)을 통하여 계산하였다.

$$\xi = \frac{f_2 - f_1}{2f_0} \quad (1)$$

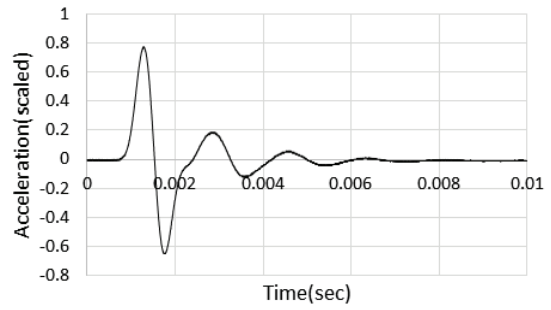
### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1. 시간 영역 가속도 신호 분석

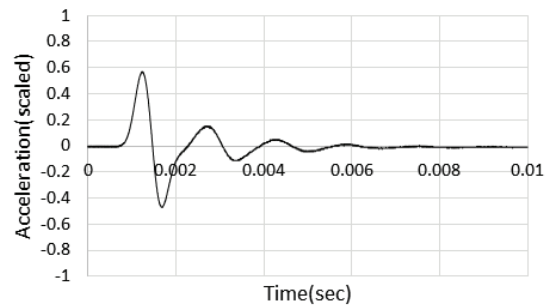
Fig. 3은 각 배합별 대표 실험체의 시간영역 가속도 신호 그래프를 나타낸다. 시간영역 가속도 신호에서 진동 폭이 감소되는 속도는 감쇠비에 의해 결정되며, 감소 속도가 빠를수록 재료의 감쇠비가 크다는 것을 의미한다.

Fig. 3에 나타난 바와 같이 골재를 혼입하지 않은 PU, PU-T10, PU-T20 배합의 진동 감쇠 특성은 유사하게 나타난 반면 골재를 혼입한 PU-PA-T 배합은 다른 배합들에 비하여 최대 진폭 사이에서 시간이 짧게 나타났다. 이를 통하여 PU-PA-T 배합이 다른 배합들에 비하여 강성이 크다는 것을 알 수 있다.

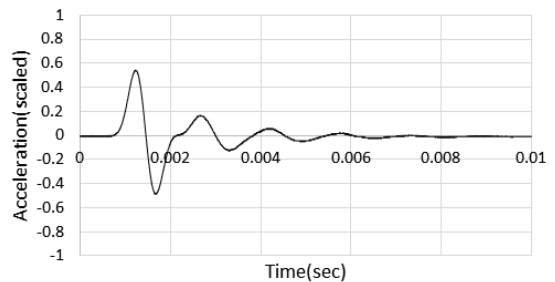
진폭 감쇠량을 보면 순수 폴리우레탄인 PU 배합이 첫 번째 진폭이 약 0.8이고 두 번째 진폭이 0.2로 약 75% 감소한 반면 나머지



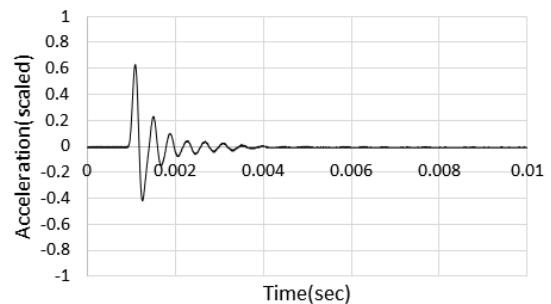
(a) PU



(b) PU-T10



(c) PU-T20



(d) PU-PA-T10

Fig. 3. Time history of acceleration in each representative specimen

배합들은 약 0.6에서 0.2로 감소하였다. 이를 통하여 PU 배합의 감쇠성능이 가장 우수함으로 알 수 있다.

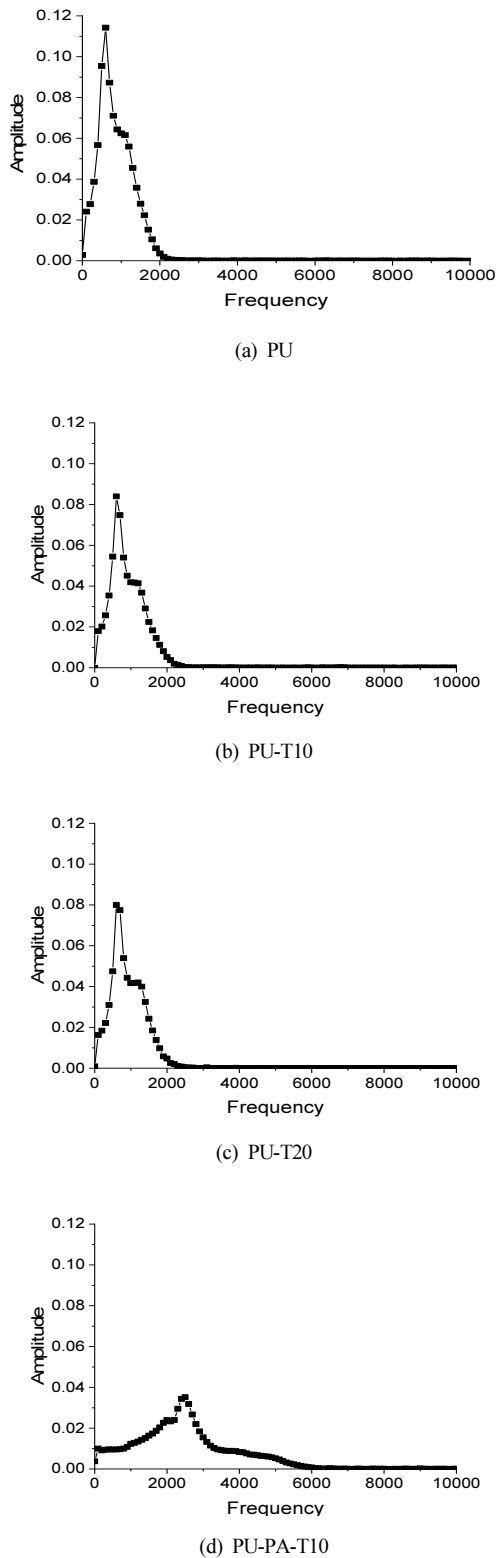


Fig. 4. Spectrum of acceleration in each representative specimen

### 3.2 주파수 영역 진폭 신호 분석

Fig. 4는 배합별 시간영역 가속도 신호를 고속 푸리에 변환해 얻은 주파수 영역 신호를 나타낸다. Fig. 4를 통해 각 배합별로 공진주파수에 차이가 있는 것을 알 수 있으며, 특히 골재를 혼입한 PU-PA-T 배합의 공진주파수가 큰 것을 알 수 있다.

각 배합별 공진주파수, 동탄성계수, 감쇠비는 Table 4에 제시되어 있다. 공진주파수 측면에서 PU 배합과 PU-T 배합은 600Hz이며, PU-PA-T 배합은 2,500Hz로 PU 배합에 비해 4.17배 높은 공진주파수를 갖는 것으로 나타났다. 순수 폴리우레탄인 PU 배합의 감쇠비는 22.61%로 측정되었다. 고무분말을 혼입한 PU-T10과 PU-T20 배합은 PU 배합에 비하여 폴리우레탄의 부피가 각각 10.6%와 21.2% 감소하였지만, 감쇠비는 각각 8.4%와 4.6%만 감소되는 것으로 나타났다. 이를 통하여 폴리우레탄 사용량을 감소시키면서 감쇠비 저하는 크지 않은 고감쇠 재료의 제조가 가능함을 확인하였다.

골재를 사전채움 후 공극에 액상형 폴리우레탄과 고무분말을 혼합한 복합재료를 주입해 제작한 PU-PA-T 배합의 감쇠비는 17.57%로 PU 배합에 비해 폴리우레탄의 혼입량은 50% 줄고, 감쇠 성능은 22% 저하되는 것으로 나타났다. 즉, 프리팩트 콘크리트 제조 방법과 동일한 방법으로 제작하면 감쇠 성능의 저하에 비하여 폴리우레탄의 사용량을 획기적으로 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 프리팩트 콘크리트 제조 방법으로 골재를 사전에 채우게 되면 골재들이 접촉하게 되어 진동이 발생하였을 때 골재의 맞물림에 의해 에너지가 소산되고 골재와 폴리우레탄의 계면에서도 에너지가 소산되기 때문인 것으로 판단된다.

Table 4. Resonant frequency, Dynamic modulus, and damping ratio of each mixture

Mixture	Resonant frequency(Hz)	Dynamic modulus* (MPa)	Damping ratio (%)
PU	600	44.9	22.61 ± 0.39
PU-T10	600	45.4	20.72 ± 0.45
PU-T20	600	45.4	21.58 ± 0.82
PU-PA-T10	2,500	1205.0	17.57 ± 0.38

\* : KS F 2437

질량-스프링-감쇠시스템의 공진주파수( $\omega_d$ )는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$W_d = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{c^2}{4m^2}} = \sqrt{\frac{k}{m}} (1 - \xi^2) \quad (2)$$

여기서  $k$ 는 강성,  $m$ 은 질량,  $c$ 는 감쇠 계수,  $\xi$ 는 감쇠비를 나타낸다. 감쇠비는 다른 값에 비하여 상대적으로 작으며, 기여도가 낮기 때문에 실질적으로 공진주파수는 강성과 질량의 비에 의해 결정된다. 따라서 동일부피라고 가정하였을 때 질량을 알면 상대적 강성비를 알 수 있다.

각 배합별 계산한 비중은 PU 배합이 1.200, PU-T10 배합이 1.193, PU-T20 배합이 1.186, PU-PA-T10 배합이 1.927로 나타났다. PU-T 시리즈 배합의 이론적으로 계산한 강성은 PU 배합에 비해 2.1%~2.3% 낮으며, PU-PA-T배합의 강성은 PU 배합에 비하여 25.73배 높은 것으로 나타났다. 이를 통하여 굵은 골재와 고무분말을 활용하면 폴리우레탄의 사용량을 줄이면서 높은 감쇠 성능과 강성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 페타이어 고무분말과 굵은 골재를 혼합한 폴리우레탄 복합재료의 감쇠성능을 조사하였다. 이를 위하여 감쇠 성능이 우수한 폴리우레탄을 페타이어 고무분말로 일 부 대체하고, 골재 사전 채움 후 공극에 주입하여 실험체를 제작하였다. ASTM C215(2014)에 규정된 충격 가진 실험 방법으로 감쇠 성능을 측정하였으며, 실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 폴리우레탄의 감쇠비는 22.61%로 나타났으며, 이는 일반적으로 알려진 콘크리트의 감쇠비 2%에 비해 10배 이상 높은 성능이다.
- 2) 고무분말을 폴리우레탄의 무게 대비 10%와 20%를 혼합한 PU-T10과 PU-T20 배합의 감쇠비는 각각 20.72%와 21.58%로 나타났다. PU 배합에 비해 폴리우레탄 부피가 10.6%와 21.2% 줄어든 반면 감쇠성능은 8.4%와 4.6%만 감소하였다. 이를 통해 적정량의 고무분말 혼입을 통하여 감쇠성능 저하가 크지 않으면서 보다 경제적인 고감쇠 재료를 제조할 수 있는 것을 확인하였다.
- 3) 프리팩트 콘크리트 제조 방식과 유사하게 골재를 몰드에 채워 넣은 후 액상의 폴리우레탄을 골재 사이로 주입하여 제작한 PU-PA-T 배합의 감쇠비는 17.57%로 나타났다. 이는 PU 배합에 비해 22% 감소한 감쇠 성능이었지만 폴리우레탄의 혼입량은 50% 줄이고 25.73배 높은 강성을 지닌 것으로 나

타났다. 이를 통하여 굵은 골재와 고무분말을 활용하면 폴리우레탄의 사용량을 줄이면서 높은 감쇠 성능과 강성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

#### Conflict of interest

None.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(19CTAP-C151882-01)에 의해 수행되었습니다.

#### References

Azevedo, F., Pacheco-Torgal, F., Jesus, C., De Aguiar, J.B., Camões, A.F. (2012). Properties and durability of HPC with tyre rubber wastes, *Construction and Building Materials*, **34**, 186–191.

Chung, K.H., Hong, Y.K. (1999). Introductory behavior of rubber concrete, *Journal of Applied Polymer Science*, **72(1)**, 35–40.

Eiras, J.N., Segovia, F., Borrachero, M.V., Monzó, J., Bonilla, M., Payá, J. (2014). Physical and mechanical properties of foamed Portland cement composite containing crumb rubber from worn tires, *Materials & Design*, **59**, 550–557.

Eldin, N.N., Senouci, A.B. (1994). Measurement and prediction of the strength of rubberized concrete, *Cement and Concrete Composites*, **16(4)**, 287–298.

Lin, C.Y., Yao, G.C., Lin, C.H. (2010). A study on the damping ratio of rubber concrete, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, **9(2)**, 423–429.

Mohammed, B.S., Hossain, K.M.A., Swee, J.T.E., Wong, G., Abdullahi, M. (2012). Properties of crumb rubber hollow concrete block, *Journal of Cleaner Production*, **23(1)**, 57–67.

Najim, K.B., Hall, M.R. (2012). Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete, *Construction and Building Materials*, **27(1)**, 521–530.

Segre, N., Joekes, I. (2000). Use of tire rubber particles as addition to cement paste, *Cement and Concrete Research*, **30(9)**, 1421–1425.

Shen, W., Shan, L., Zhang, T., Ma, H., Cai, Z., Shi, H. (2013). Investigation on polymer-rubber aggregate modified porous concrete, *Construction and Building Materials*, **38**, 667–674.

Siddique, R., Naik, T.R. (2004), Properties of concrete containing scrap-tire rubber-an overview, Waste Management, **24(6)**, 563-569.

### 페타이어 고무분말과 골재를 혼입한 폴리우레탄 복합재료의 감쇠 특성

이 연구의 목적은 페타이어 고무분말을 혼입한 폴리우레탄 복합재료와 굵은 골재를 사전채움하고 폴리우레탄을 주입한 폴리우레탄 복합재료의 감쇠성능을 평가하는 것이다. 이를 위하여 총 4 종류의 폴리우레탄 기반 복합재료를 제조하였고, 충격 가진 실험을 실시하였다. 실험을 통하여 시간 영역과 주파수 영역에서의 진동특성을 계측한 후 감쇠비를 계산하였다. 실험 결과, 고무분말을 혼입하여 폴리우레탄의 양이 각각 10.6%와 21.2% 줄어든 실험체들의 감쇠비는 순수한 폴리우레탄 실험체에 비하여 각각 8.4%와 4.6% 낮은 것으로 나타났다. 프리팩트 콘크리트 제조 방법과 유사한 방법으로 제조한 폴리우레탄 복합재료의 감쇠비는 순수 폴리우레탄에 비하여 22% 낮은 것으로 나타났지만 폴리우레탄 혼입량은 50% 감소하였으며, 강성은 25.7 배 높은 것으로 나타났다.