

Research Paper

충격공진법을 이용한 콘크리트 원판 시편의 탄성계수 추정에 크기 인자가 미치는 영향

Effect of Size Factor on Estimating Elastic Modulus of Disk-Shaped Concrete Specimen Using Impact Resonance Test

김민석¹ · 손정진² · 이창준³ · 정철우^{4*}

Kim, Min-Suk¹ · Son, Joeng Jin² · Lee, Chang Joon³ · Chung, Chul-Woo^{4*}

¹Master's Course, Graduate School, Chungbuk National University, Seowon-Gu, Cheongju, 286442, Korea

²Master's Course, Graduate School, Pukyong National University, Nam-Gu, Busan, 48513, Korea

³Professor, Department of Architectural Engineering, Chungbuk National University, Seowon-Gu, Cheongju, 286442, Korea

⁴Professor, Department of Architectural Engineering, Pukyong National University, Nam-Gu, Busan, 48513, Korea

*Corresponding author

Chung, Chul-Woo
Tel : 82-51-629-6084
E-mail : cwchung@pknu.ac.kr

ABSTRACT

In this work, a depth-by-depth evaluation on the deterioration of concrete is suggested by utilizing disk shaped concrete specimens. Dynamic elastic modulus of cylindrical concrete was measured using a free-free resonance column method and compared with dynamic elastic modulus of disk-shaped concrete measured by impulse excitation technique(IET) and impact resonance(IR). According to the results of the experiment, both IET and IR methods showed a smaller difference in dynamic elastic modulus with smaller deviation in data when thickness of the disk specimen was increased. This trend was more evident from dynamic elastic modulus measured by IR method compared to that measured by IET. Variation in data was also smaller with the IR result. To increase the accuracy of the data, it is recommended to use the IR method for disk specimen with a diameter of 100mm and a thickness of 25mm.

Keywords : concrete, disk, dynamic elastic modulus, impact resonance, impulse excitation technique

Received : November 7, 2022

Revised : December 13, 2022

Accepted : December 14, 2022

1. 서론

최근 대형 콘크리트 구조물에서 화재가 발생하여 재산 및 인명 피해가 발생함에 따라 화재 발생 이후 손상의 정확한 범위 진단과 그에 적절한 보수 대책에 대한 관심이 높아지고 있다[1]. 대형 콘크리트 구조물은 화재 발생 시 부분적인 피해를 입을 경우 전반적인 해체 후 재건축보다는 콘크리트의 열화가 진행된 부분을 진단하여 부분적인 보수 과정을 거치는 것이 합리적 이지만, 이를 위해 열화가 진행된 부분의 범위를 정확히 알아야 한다. 화재에 의한 피해를 입은 콘크리트 부재의 열화는 깊이 에 따라 열화 정도의 차이를 보이게 되는데, 화재로 인한 열화 깊이를 진단하기 위한 시험으로는 열중량분석[2], 페놀프탈레 인 용액을 이용한 중성화 깊이를 판단하는 방법[3] 등이 있다. 열중량분석법의 경우 시험 장비가 고가이며 현장 시험이 불가능하다. 또한 중성화 깊이 측정 방법의 경우 미량의 Ca(OH)₂만 존재하여도, 피해를 입지 않은 것처럼 판단될 수 있다는 단점이 존재한다. 또한 위의 두 방법은 화재에 의한 열화 깊이의 측정에만 활용이 가능하고, 해당 깊이에 존재하는 콘크리트의 역학적 열화정도를 정량적으로 평가할 수는 없는 방법으로 볼 수 있다.

선행 연구에 의하면 화재로 인하여 열화가 진행된 콘크리트 구조체에서 원통형 시편을 채취하여 탄성파 속도와 압축강



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 non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

도, 동탄성계수와 정탄성계수의 선형관계를 통하여 화재손상의 정도를 평가하는 방법을 활용하였다[4]. 그러나 이는 원통형 시편의 전체에 대한 열화의 정도만 정량적으로 파악 가능한 방법이며, 깊이별 콘크리트의 역학적 열화정도의 평가는 불가능하다. 콘크리트 부재의 깊이에 따른 열화의 정도를 정량적으로 평가하기 위해서는, 콘크리트 코어링을 통해 확보한 원통형 시험체로부터 일정 두께의 디스크 시험편을 제작하고, 각 깊이별 디스크 시험편의 동탄성계수를 측정하는 접근법이 필요하다[5-8].

콘크리트는 강재와 달리 굽은 골재가 포함된 비균질한 재료이다. 원통형 공시체 내에서 굽은 골재의 분포는 불규칙적으로 이루어져 있으며, 원통형 시편을 디스크 형태로 가공 시 디스크 내에 포함된 굽은 골재의 양 또한 동일하게 분포하지 않는다. 또한 원통형 시편을 디스크 형태의 시편으로 가공할 경우 가공 표면에 위치한 굽은 골재는 절단되어 원통형 공시체 내에 서와는 다른 형상을 가지게 되며, 가공 시 굽은 골재 주변의 천이영역에서의 미세 손상도 예상된다. 이러한 요인들로 인하여 원통형 시편의 동탄성계수 측정값과 디스크 시편의 동탄성계수 측정값은 차이가 발생할 수 있다. 그러나 이러한 부분을 확인하기 위한 디스크 시편과 원통형 시편의 동탄성계수의 차이에 대한 실험적 연구는 현재까지 진행된 적이 없다.

이에 본 연구에서는 콘크리트 디스크 시편의 동탄성계수와 콘크리트 원통형 시편의 동탄성계수에 차이가 있는지 확인하고, 시편의 지름, (두께)/(반지름)비율과 같은 시편의 형상과 측정 방법이 동탄성계수 측정값에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 또한 동탄성계수 측정 시 이에 적합한 디스크의 형상과 실험 방법을 제시하고자 한다.

2. 동탄성계수 측정방법

본 연구에서는 충격으로 인하여 발생한 탄성파에 대한 시편의 응답을 시간영역의(time domain) 데이터로 저장, 이를 FFT(Fast-Fourier Transform)를 이용하여 주파수 영역(frequency domain) 데이터로 변환하였으며, 이를 바탕으로 기본 진동 모드에서의 공진주파수를 계산하였다. 계산한 공진주파수로부터 압축파 및 전단파의 속도를 도출하면, 이를 바탕으로 시편의 동탄성계수를 구할 수 있다[9]. 본 장에서는 탄성파를 이용한 원통형 시편과 디스크 시편의 동탄성계수 측정법에 대해 소개하고자 한다.

2.1 양단자유공진주기법

양단자유공진주기법(FFRC; Free-Free Resonance Column)은 원통형 시편을 길이 방향으로 가진, 시편의 공진주파수를 측정하여 파의 진행속도를 도출하는 방법으로[10] 시험의 반복성이 뛰어나며 동탄성계수를 도출하는 과정이 간단하다는 장점이 있다. 본 시험의 방법을 Figure 1에 간단하게 나타내었다.

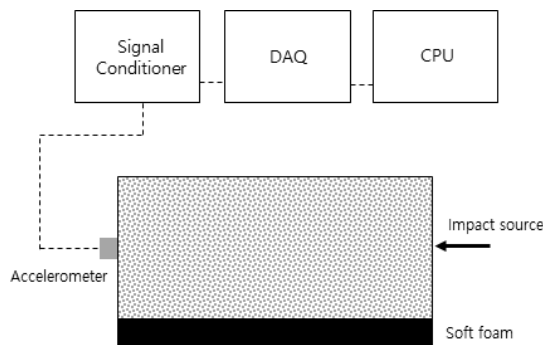


Figure 1. Schematic diagram of free-free resonance column method

양단자유공진주기법에서, 측방향 구속이 없는 원통형 시편의 경우 파의 전파 속도는 식 (1)과 같다.

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

V_L : 막대파의 속도
 E : 탄성계수
 ρ : 시편의 밀도

원통형 시편의 기본 진동모드에서 한 파장의 길이는 시편 길이의 두 배이며, 시편의 공명진동수를 알면 식 (2)를 이용하여 파의 전파속도를 알 수 있다.

$$V_L = f \times 2L \quad (2)$$

V_L : 막대파의 속도
 f : 공진주파수
 L : 시편의 길이

식 (1)과 식 (2)를 정리하여 도출한 식 (3)과 기본 진동모드에서의 공진주파수와 시편의 밀도, 길이를 이용하여 원통형 시편의 동탄성계수를 측정할 수 있다.

$$E = 4\rho L^2 f^2 \quad (3)$$

E : 탄성계수
 ρ : 시편의 밀도
 L : 시편의 길이
 f : 공진주파수

2.2 임펄스 기법(Impluse Excitation Technique)

Impulse Excitation Technique(IET)는 ASTM E1876-01[11]에 따른 시험법이다. 이는 콘크리트 원판 시편을 두 가지 방법으로 가진하여 얻은 각 진동 모드의 공진주파수의 비율, 시편의 지름, 두께, 질량과 ASTM E1876-01에서 제시한 푸아송 비와 형상계수를 바탕으로 시편의 동탄성계수를 측정하는 방법이다. 시험의 방법을 간단하게 Figure 2와 같이 나타내었으며, 시편의 재료물성, 형상, 각 모드에서의 공진주파수의 관계는 식 (4)에 나타내었다.

IET시험법에서 서포트 지점과 S1, X1은 시편 반지름의 0.681배를 반지름으로 가지는 동심원 상에 위치한다. 1차 진동모드의 공진주파수는 Figure 2에서 X1지점을 가진, S1지점에서 측정한 공진주파수이며, 2차 진동모드의 공진주파수는 X2지점을 가진, S2지점에서 측정한 공진주파수이다.

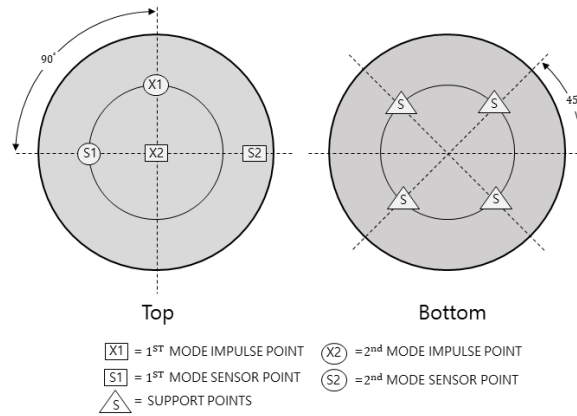


Figure 2. Schematic diagram of impulse excitation technique

$$f_i = \frac{K_i}{2\pi r^2} \sqrt{\frac{A}{\rho t}} \tag{4}$$

- f_i : 특정 모드에서의 공진주파수
- K_i : 특정 모드에서의 형상계수
- r : 디스크의 반지름
- A : 원판 상수 ($A = Et^3/[12(1-\mu^2)]$)
- E : 디스크의 동탄성계수
- t : 디스크의 두께
- ρ : 디스크의 밀도
- μ : 디스크의 푸아송 비

두 가지 모드의 공진주파수와 디스크의 지름, 두께, 질량을 이용하여 각 모드에서의 동탄성계수를 식 (5)를 이용하여 각각 계산한다. 계산에 필요한 푸아송 비와 형상계수는 ASTM E1876-01에 제시되어 있으며 디스크의 시편의 동탄성계수는 각 모드에서의 동탄성계수를 평균한 값이다.

$$E_i = [37.6991f_i^2 D^2 m (1-\mu^2)] / (K_i^2 t^3) \tag{5}$$

- E_i : 특정 모드에서의 탄성계수
- f_i : 특정 모드의 공진주파수
- D : 디스크의 지름
- m : 디스크의 질량
- μ : 디스크의 푸아송 비
- K_i : 특정 모드에서의 디스크 형상계수
- t : 디스크의 두께
- r : 디스크의 반지름

2.3 충격공진기법(Impact resonance test)

충격공진기법(IR; Impact Resonance)의 실험 방법을 Figure 3에 간단하게 나타내었으며 방법은 다음과 같다. 콘크리트 디스크 시편을 부드러운 폴리우레탄 폼 위에 거치하고 디스크 시편의 중앙에 가속도계를 위치시킨다. 직경 5mm의 쇠구슬로 시편의 중앙점의 근처를 가진하고 가속도계를 이용, 시편의 응답을 측정하여 공진주파수를 도출한다. 시편의 공진주파수, 디스크의 형상, 질량, Thick Plate Solution[12]을 이용하여 구한 진동수 파라미터를 식 (6)에 대입하여 디스크의 동탄성계수를 구할 수 있다[13]. 동탄성계수 추정에 필요한 진동수 파라미터는 MATLAB을 이용하여 프로그램을 제작, 반복 연산과정을 통해 푸아송 비, (두께)/(반지름) 비율별로 구하였으며 이를 Table 1에 나타내었다.

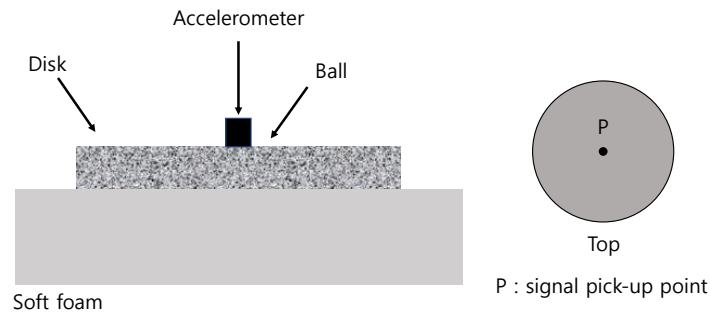


Figure 3. Schematic diagram of impact resonance test

$$E_d = 2(1 + \nu)\rho\left(\frac{\pi fd}{\Omega_0}\right)^2 \quad (6)$$

- E_d : 디스크의 동탄성계수
- Ω_0 : 기본 진동모드에서의 진동수 파라미터
- f : 디스크의 공진주파수
- ν : 디스크의 푸아송 비
- ρ : 디스크의 밀도
- d : 디스크의 지름

IR기법을 이용하여 동탄성계수 측정 시, 가정한 푸아송 비를 대입하여야 한다. 아래의 Table 1에서는 푸아송비가 0.2와 0.25일 때의 동탄성계수 추정값의 차이를 확인하기 위하여 (두께)/(반지름) 비율별 진동수 파라미터를 나타내었다.

Table 1. Frequency parameter

Thickness/radius	0.2	0.3	0.4	0.5
Poisson's ratio				
0.2	0.7545	1.0715	1.3385	1.5585
0.25	0.7885	1.1185	1.3935	1.6205

3. 실험 계획 및 방법

3.1 사용재료

본 실험에 사용된 시멘트는 밀도 3.15g/cm^3 인 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 굵은 골재는 최대치수가 25mm, 벌크 밀도(bulk specific gravity)는 2.53g/cm^3 , 유효 흡수율 1.5%, 단위용적중량 1640kg/m^3 인 것을 사용하였으며, 잔골재는 벌크 밀도 2.56g/cm^3 , 조립률 2.8, 유효 흡수율 1.73%인 것을 사용하였다. 공기연행제는 사용하지 않았으며, 실험을 위한 콘크리트의 배합은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Concrete mix proportion

W/b (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m^3)			
		Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate
50	40	170	340	744.57	1116.85

3.2 시험체 제작

콘크리트 원통형 시편의 제작 방법은 다음과 같다. 재료를 계량한 후 콘크리트 팬 믹서를 이용하여 건비빔을 30초 동안 실시, 계량한 배합수를 첨가하여 1분 30초 동안 비빔을 수행하였다. 이후 목표 슬럼프 76~127mm를 만족하는 비연행 콘크리트 반죽을 지름 50mm, 75mm, 100mm의 지름과 높이의 비가 1:2인 원통형 몰드를 사용하여 각 지름별 원통형 공시체를 2개씩 제작하였다. 1일간 밀봉양생을 수행하였으며, 재령 28일까지 일정한 수온($20 \pm 2^\circ\text{C}$)의 수조에서 수중 양생하였다. FFRC 기법을 수행하기 위하여 공시체의 상부를 공시체 절단기를 이용하여 평활하게 만든 후 실험을 수행하였으며 FFRC 기법 수행 후 원통형 공시체를 디스크로 가공하였다. 원통형 시편 가운데 첫 번째 실린더에서는 (두께)/(반지름)의 비율이 0.5, 0.2인 디스크로 번갈아가공하였으며, 각 비율별로 타설 밀면으로부터 순서를 지름 100mm인 경우를 예를 들어 Figure 4에 나타내었다. 두 번째 실린더에서는 (두께)/(반지름)의 비율이 0.4, 0.3인 디스크를 번갈아가공하였다. 실험에 이용된 시편의 종류와 개수는 Table 3에 나타내었으며, 동탄성계수의 측정은 2절에 언급된 방법을 이용하였다.

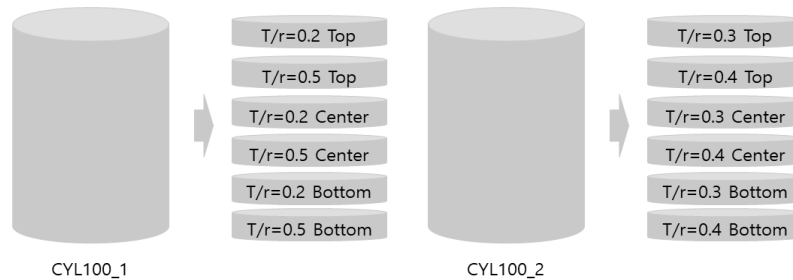


Figure 4. Schematic illustration for preparation of disk-shaped specimen

Table 3. Type and number of specimens(Unit : EA)

Specimen Type	Diameter(mm)		
	50	75	100
Cylinder	2	2	2
Disk	12	11	12

4. 실험결과 및 분석

4.1 콘크리트 원통형 시편의 동탄성계수 측정결과

4.1.1 FFRC기법 실험 결과

콘크리트 원통형 시편과 콘크리트 디스크 시편의 동탄성계수의 차이를 확인하기 위하여 FFRC기법을 이용, 원통형 공시체의 동탄성계수 값을 측정하였다. Table 4는 원통형 시편의 동탄성계수 측정의 결과를 나타낸 것이다. 동탄성계수의 측정값의 평균은 39.3GPa이며, 지름 100mm인 두 번째 실린더의 동탄성계수 측정값이 비교적 높게 나타났다.

Table 4. Estimated dynamic elastic modulus of cylindrical specimen using free-free resonance column method

	Cyl50_1	Cyl50_2	Cyl75_1	Cyl75_2	Cyl100_1	Cyl100_2
Dynamic elastic modulus(GPa)	39.18	39.78	37.45	38.69	38.05	43.04

4.2 콘크리트 디스크 시편의 동탄성계수 측정결과

4.2.1 IET기법 실험 결과

콘크리트 원통형 시편을 (두께)/(반지름) 비율을 달리하여 가공, IET기법을 이용하여 디스크 시편의 동탄성계수를 측정하였다. Table 5에서는 IET기법을 이용한 디스크 시편의 동탄성계수 측정 결과와 모체인 원통형 시편의 동탄성계수 측정 결과를 나타내었다. 여기서 B, C, T는 디스크 시편의 원통형 시편 가공 전 타설 바닥면으로부터의 위치를 나타낸 Bottom, Center, Top을 의미한다(Figure 4 참조).

Table 5. Estimated dynamic elastic modulus of disk-shaped specimens using impulse excitation technique(Unit : GPa)

Thickness / Radius (Disk only)	Diameter(mm)		50		75		100	
	Cylinder	Disk	Cylinder	Disk	Cylinder	Disk	Cylinder	Disk
0.5	39.18	34.87(T)	37.45	48.71(T)	38.05	41.45(T)	37.84(C)	
		27.61(C)		43.23(C)		38.82(B)		
		30.45(B)		64.33(B)				
0.4	39.78	39.49(T)	38.69	45.78(T)	43.04	49.30(T)	48.08(C)	
		27.72(C)		47.95(C)		51.38(B)		
		27.01(B)		39.29(B)				
0.3	39.78	36.87(T)	38.69	-	43.04	43.16(T)	59.17(C)	
		40.90(C)		50.14(C)		54.34(B)		
		38.36(B)		54.62(B)				
0.2	39.18	17.25(T)	37.45	64.77(T)	38.05	38.23(T)	54.08(C)	
		51.55(C)		55.64(C)		52.63(B)		
		28.52(B)		81.00(B)				

Figure 5는 같은 형상을 가진 3개의 디스크의 동탄성계수 측정값의 평균을 디스크 시편의 모체인 원통형 시편의 동탄성계수 측정값으로 나눈 비율을 나타낸 그래프이다. 이 그래프에서 시편의 지름별, (두께)/(반지름) 비율별로 결과를 나타내었으

며, 그래프의 오차막대는 결과의 표준편차를 나타낸다. 모든 지름의 경우에서 디스크의 두께가 얇아짐에 따라(T/r 비율이 감소함에 따라) 동탄성계수 측정값의 비율과 비율의 표준편차는 대체로 증가하는 경향을 보이며 이 경향은 지름이 100mm인 경우에서 가장 명확한 것으로 확인되었다.

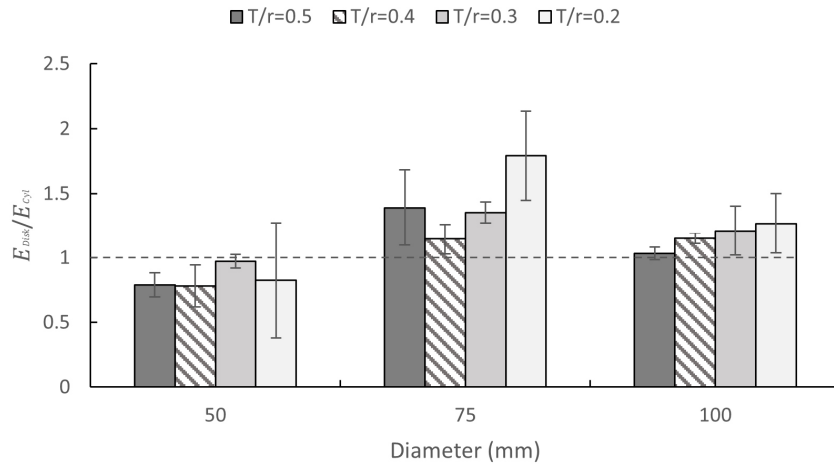


Figure 5. Results from impulse excitation technique

4.2.2 충격공진기법 시험결과

Table 6에서는 푸아송 비 값을 0.2로 가정하였을 경우의 IR기법을 이용한 디스크 시편의 동탄성계수와 그 모체인 원통형 시편의 동탄성계수의 측정값을 나타내었다. 여기서, (두께)/(반지름) 비율 0.3, 지름 75mm인 디스크 시편 중 Top에 해당하는 디스크는 디스크 시편 가공 중 디스크 시편이 손상되어 유실되었다.

Table 6. Estimated dynamic elastic modulus of disk-shaped specimens using impact resonance test(Unit : GPa)

Thickness / Radius (Disk only)	Diameter(mm) 50		Diameter(mm) 75		Diameter(mm) 100	
	Cylinder	Disk	Cylinder	Disk	Cylinder	Disk
0.5		39.4(T)		44.9(T)		40.6(T)
	39.18	32.5(C)	37.45	41.9(C)	38.05	38.9(C)
		34.7(B)		41.5(B)		41.3(B)
0.4		41.1(T)		45.2(T)		50.0(T)
	39.78	32.6(C)	38.69	45.2(C)	43.04	46.4(C)
		32.0(B)		41.7(B)		47.2(B)
0.3		40.2(T)		-		42.4(T)
	39.78	43.2(C)	38.69	42.1(C)	43.04	51.9(C)
		41.6(B)		49.8(B)		49.3(B)
0.2		42.0(T)		45.2(T)		37.7(T)
	39.18	58.0(C)	37.45	41.0(C)	38.05	47.7(C)
		45.8(B)		56.0(B)		46.3(B)

Figure 6는 IR기법을 이용하여 시편의 지름별, (두께)/(반지름) 비율별로 측정된 디스크 시편의 동탄성계수를 원통형 시편의 동탄성계수로 나눈 비율을 나타낸 그래프이다. IR기법을 이용한 디스크시험의 동탄성계수 측정 실험 결과, 디스크 시편의 지름이 동일한 경우 두께가 얇아질수록 디스크 시편의 동탄성계수 측정값을 원통형 시편의 동탄성계수 측정값으로 나눈 비율은 증가하였으며, 비율의 표준편차 또한 순차적으로 증가하였다. 이러한 경향은 시편의 지름이 감소한 경우에도 여전히 유효하며, 시편의 지름이 감소하면 시편의 두께가 감소함에 따른 동탄성계수 측정값 비율의 증가 폭과 비율의 표준편차 증가 폭이 증가함을 확인하였다.

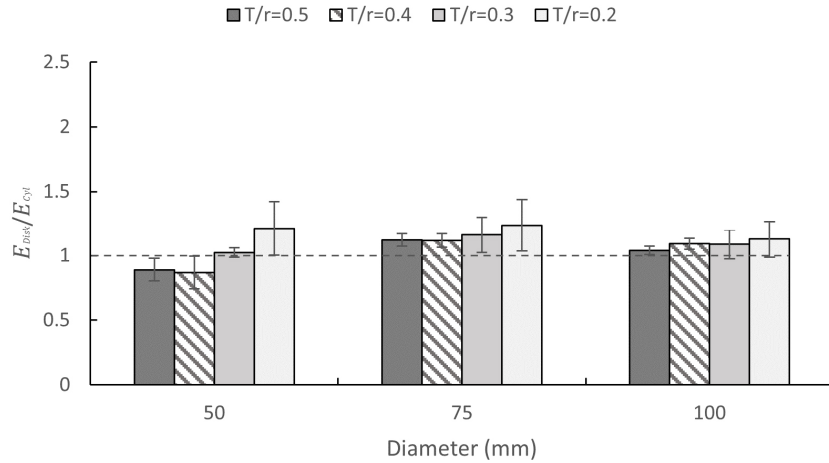


Figure 6. Results of impact resonance test result

4.2.3 IET기법과 충격공진기법의 비교

IET기법을 이용한 디스크 시편의 동탄성계수 측정 실험 결과, 지름 100mm의 경우 디스크와 원통형 시편의 동탄성계수 추정값의 차이와 추정값의 변동성이 지름 75mm, 50mm의 경우와 비교하여 작은 것으로 확인되었다. 지름 75mm, 50mm인 시편의 IET 실험 결과 IR 실험 결과와는 달리 디스크 시편과 원통형 시편의 동탄성계수 추정값의 차이와 추정값의 변동성이 지름 100mm인 시편에 비하여 크게 나타나는 것은(서포트 지점의 위치와 충격 지점에 따라 측정값의 표준편차가 증가함), 시편의 작은 크기로 인한 사용성의 문제로 사료된다.

Table 7과 Table 8은 지름 100mm인 시편을 IR기법과 IET기법을 이용하여 구한 디스크 시편의 동탄성계수 측정 실험 결과를 원통형 시편의 동탄성계수로 나눈 형태로 나타낸 것이며, 여기서 S.D는 표준편차를 의미한다. 이에 따르면, IET기법과 IR기법 모두에서 T/r 비율이 감소할수록 디스크 시편의 동탄성계수를 원통형 시편의 동탄성계수로 나눈 비율과 이 값의 표준편차가 증가하는 경향이 나타났으며, 그 증가 비율은 IR기법보다 IET기법을 이용한 결과에서 비교적 크게 나타났다.

Table 7. Result of test using impulse excitation for specimens with a diameter of 100mm

T/r ratio	Items					S.D
	Bottom	Center	Top	Average		
0.5	1.0201	0.9944	1.0893	1.0346	0.0491	
0.4	1.1936	1.1170	1.1453	1.1520	0.0388	
0.3	1.2624	1.3746	1.0027	1.2132	0.1908	
0.2	1.3830	1.4212	1.0046	1.2696	0.2303	

Table 8. Result of impact resonance test for specimens with a diameter of 100mm

T/r ratio \ Items	Bottom	Center	Top	Average	S.D
0.5	1.0656	1.0025	1.0472	1.0384	0.0324
0.4	1.0756	1.0570	1.1395	1.0907	0.0433
0.3	1.1198	1.1790	0.9629	1.0872	0.1116
0.2	1.1891	1.2233	0.9671	1.1265	0.1391

4.2.4 고찰 및 추후연구

본 연구에서는 물시멘트비 50%인 콘크리트를 대상으로 실험을 진행하였고, 지름 100mm 두께 25mm 이상인 디스크형 시편이 정확하게 동탄성계수를 측정할 수 있는 것으로 확인되었다. 디스크형 공시체를 활용한 깊이별 열화도 측정법을 적용하기 위해서는, 본 연구에서 제시된 형상비율이 다양한 물시멘트비를 가지는 콘크리트에서도 직접 적용이 가능한지의 여부 및 탄성계수에 큰 영향을 주는 골재의 체적비 등에 의한 영향을 추가 검증할 필요가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 콘크리트 원통형 시편과 디스크 시편의 동탄성계수의 차이를 확인하기 위하여, 양단자유공진주기법, IET 기법, 및 IR기법을 활용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 디스크의 두께가 두꺼울수록, 지름이 클수록 디스크 시편의 동탄성계수 측정값의 표준편차가 작게 나타났다.
- 2) 디스크가 두꺼울수록 디스크 시편의 동탄성계수 측정값이 원통형 시편의 동탄성계수 측정값에 가깝게 나타났다.
- 3) 콘크리트의 깊이별 역학적 열화의 정도를 평가하기 위하여서는 지름 100mm, 두께 25mm 이상의 시편을 IR기법을 이용하여 디스크 시편의 탄성계수 측정하는 것이, 동탄성계수 측정의 정확도 측면에서 가장 유리한 것으로 나타났다.

요약

본 연구에서는 디스크형 공시체를 활용하여 콘크리트의 깊이별 열화도를 평가하기 위한 방법을 개발하고자 하였다. 이를 위해 원통형 콘크리트 시편의 동탄성계수는 양단자유공진주기법을, 디스크형 콘크리트 시편의 동탄성계수는 임펄스 기법과 충격공진기법을 활용하여 측정하였고, 이를 비교 분석하였다. 실험 결과, 임펄스 기법 및 충격공진기법 모두 동일한 지름 일 경우 두께가 두꺼워지면 디스크 시편의 동탄성계수는 원주형 공시체의 동탄성계수에 가깝게 측정되었으며, 그 값의 변동성은 줄어들었다. 또한 같은 (두께)/(반지름) 비율일 경우 지름이 증가하면 디스크 시편의 동탄성계수 측정값의 변동성은 감소하였고, 이러한 경향은 충격공진기법을 이용한 측정에서 더욱 분명하게 나타났다. 디스크의 동탄성계수 측정 시 지름 100mm, 두께 25mm의 시편에 대해 충격공진기법을 이용하는 것이 오차율을 줄일 수 있는 방법으로 확인되었다.


키워드 : 콘크리트, 디스크, 동탄성계수, 충격공진기법, 임펄스기법


Funding


This work was supported by the Energy R&D Program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea

(No.20217910100100) .

ORCID

Min-Suk Kim,  <http://orcid.org/0000-0002-7373-4916>

Joeng Jin Son,  <http://orcid.org/0000-0003-2843-4997>

Chang Joon Lee,  <http://orcid.org/0000-0002-9856-8846>

Chul-Woo Chung,  <http://orcid.org/0000-0002-3157-7676>

References

1. Ryu EM, Lee YK, Kim HS, Shin YS. Performance and evaluation method of concrete structures after fire; A state-of-the-art review. Proceedings of the Korea Institute of Fire Science and Engineering Conference; 2015 Nov 12-13; Iksan, Korea. Seoul (Korea): International Journal of Fire Science and Engineering; 2015. p. 181-2.
2. Lim GS, Han SH, Han JH, Yoon CW, Han MC, Han CG. Assessment of fire damage of 21 MPa-class concrete using thermogravimetric analysis. Proceedings of the Korean Institute of Building Construction Conference; 2021 May 20-21; Jeju, Korea. Seoul (Korea): The Korea Institute of Building Construction; 2021. p. 243-4.
3. Byun YH, Ryu DW. An experimental study on the diagnosis and evaluation of damage characteristics of fire damaged concrete by strength level: in relation to carbonation depth. Journal of Korean Society of Hazard Mitigation. 2017 Dec;18(6):19-23. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2017.17.6.19>
4. Lee JC, Lee CJ, Kim WJ, Lee JH. Characteristics of elastic wave in fire damaged high strength concrete using impact-echo method. Fire Science and Engineering. 2015 Feb;29(1):1-6. <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2015.29.1.001>
5. Dilek U, Reis E. Comparison of nondestructive evaluation findings, constrained and unconstrained wave speeds, dynamic moduli, and poisson's ratio of core specimens from a concrete structure damaged by fire. Journal of Performance of Constructed Facilities. 2015 Oct;29(5): 53-60. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000548](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000548)
6. Park GK, Yim HJ. Evaluation of fire-damaged concrete: An experimental analysis based on destructive and nondestructive methods. International Journal of Concrete Structures and Materials. 2017 Sep;11(3):447-57. <https://doi.org/10.1007/s40069-017-0211-x>
7. Park SJ, Yim HJ, Kwak HG. Nonlinear resonance vibration method to estimate the damage level on heat-exposed concrete. Fire Safety Journal. 2014 Oct;69:36-42. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.07.003>
8. Park SJ, Yim HJ. Evaluation of material properties of fire-damaged concrete under post-fire curing regimes using impact resonance vibration method. Journal of the Korea institute for Structural Maintenance and Inspection. 2017 Sep;21(5):42-8. <https://doi.org/10.11112/jksmi.2017.21.5.042>
9. Lee BJ, Kee SH, Oh TK, Kim YY. Evaluating the dynamic elastic modulus of concrete using shear-wave velocity measurements. Advances in Materials Science and Engineering. 2017 Jul;2017(5):1651753. <https://doi.org/10.1155/2017/1651753>
10. Bang ES, Park SG, Kim DS. Evaluating shear wave velocity of rock specimen through compressional wave velocities obtained from ffric and ultrasonic velocity methods. Geophysics and Geophysical Exploration. 2013 Nov;16(4):250-6. <https://doi.org/10.7582/GGE.2013.16.4.250>
11. ASTM International. ASTM E 1876-01 Standard test method of dynamic young's modulus, shear modulus, and poisson's ratio

by impulse excitation of vibration. PA: American Society for Testing and Materials; 2002. 16 p.

12. Hutchinson JR. Axisymmetric flexural vibrations of a thick free circular plate. *Journal of the Applied Mechanics*. 1979 Mar; 46(1):139-44. <https://doi.org/10.1115/1.3424485>
13. Kim DH, Im JH, Kim YS. Determination of dynamic modulus of thin-disk-shaped asphalt concrete specimens using impact resonance test. *International Journal of Highway Engineering*. 2016 Aug;18(4):37-45. <https://doi.org/10.7855/IJHE.2016.18.4.037>