

충격 하중에 의한 콘크리트 재료의 손상에 관한 실험적 연구

송정언^{1)*}, 박 훈²⁾, 김승곤³⁾

Experimental Study on the Damage of Concrete Material by Impact Load

Jeong-Un Song, Hoon Park and Seung-Kon Kim

Abstract Although the number of blasting operations in urban area are growing, lesser attentions have been paid to the effects of impact load on nearby concrete structures. In this study, the properties of concrete were obtained by both the sonic velocity and Schmidt rebound tests, and the degree of damage in concrete material was evaluated by measuring the sonic velocity in sample before and after applying the impact load. The test results shows that the sonic velocity decreases with the increase of intensity of impact load, and the degree of damage in concrete samples is lower when the samples have higher strength and sonic velocity.

Key words Seismic-wave velocity, Rebound number, Compressive strength, Impact load

초 록 산업의 발달로 인해 도심지에서의 건물해체 및 발파공사가 증가하여 왔지만, 인접 구조물에 대한 영향 평가는 미미한 실정이었다. 본 연구에서는 탄성파속도 실험과 반발경도 실험으로 콘크리트 재료의 물성을 파악 하였고, 인접 구조물 부재의 내부 손상을 모사하기 위하여 콘크리트 재료에 충격 하중을 가하여 충격 전후의 탄성파속도를 도식화하였다. 결과적으로, 콘크리트 재료는 충격 하중에 따라 탄성파속도가 감소하는 경향을 보였고, 압축강도가 크고 탄성파속도가 빠른 재료일수록 충격 하중에 따른 손상이 작은 것으로 나타났다.

핵심어 탄성파속도, 반발경도, 압축강도, 충격 하중

1. 서 론

산업의 발달로 인해 수많은 콘크리트 구조물이 건설되었으며, 건물의 고층화와 함께 진동 및 소음, 내화 등에 안전한 콘크리트 구조물로 변화되어 가고 있다. 그러나 최근에 와서 기존 콘크리트 구조물의 노후화로 인해 도심지에서의 재개발이 시행되고 있고, 앞으로도 도심지 내에서의 건물해체 및 발파공사가 더욱 활발해질 것이며, 이로 인한 인접 구조물 및 민원

에 대한 환경적인 영향은 갈수록 더욱 심각해질 것이다. 개발로 인한 소음 및 진동, 풍압, 비산 및 분진 등은 시공사와 민원인들 간에 마찰 및 환경 분쟁의 주요 인이 된다. 이러한 분쟁을 해소하기 위해 다양한 규제 법안이 마련되어 인체 및 가축에 대한 환경 분쟁은 쉽게 해결될 수 있으나, 인접 건물에 대한 규제 법안은 공사 지점에서의 진동 수준으로 인한 허용기준(류창하, 2005)만 마련되어 있을 뿐 구조물의 내부 손상에 관해서는 배제되어 있다. 구조물의 콘크리트 부재가 노후화 되거나 연속적인 충격 등을 받게 되면 부재의 내부 손상이 발생하게 된다(장보안 외, 1998).

본 연구에서는 콘크리트 재료의 표면에서 탄성파속도와 반발경도를 측정하여 물성을 파악하였으며, 진동으로 발생하는 인접 구조물 부재의 내부 손상을 모사하기 위하여 콘크리트 재료에 가해지는 충격 하중

¹⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과 박사과정

²⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과 겸임교수

³⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과 교수

* 교신저자 : sjuda@jbnu.ac.kr

접수일 : 2009년 12월 2일

심사 완료일 : 2009년 12월 10일

게재 승인일 : 2009년 12월 15일

에 따라 측면에서의 탄성파속도를 비교하였고, 충격 하중 전후의 탄성파속도 양상을 도식화하였다.

2. 실험개요

콘크리트 재료의 물성을 파악하기 위한 방법으로는 재료의 밀도, 비중, 압축 및 인장강도, 전단강도, 점착중, 휨하중, 탄성파속도 등 다양한 실험들이 있지만, 현장에서 적용할 수 있는 가장 쉬운 방법은 압축강도를 도출할 수 있는 반발경도 실험과 탄성파속도 실험을 들 수 있다. 현재 시설물 및 건축물의 안전진단을 위한 비파괴검사로 위의 실험들이 적용되고 있고, 실험 결과의 정확성을 위해 많은 연구(서백수와 손권익, 2005; 김성범 외, 2007)가 진행되고 있다.

2.1 탄성파속도 실험

탄성파속도 측정 방법은 비파괴실험으로 초음파 펄스가 시료 내부에 전파하는 속도를 직접 측정하는 투과법과 경계면에서 반사 펄스를 이용하는 방법이 있는데, 본 연구에서는 초음파 측정기를 사용하여 직접 투과법으로 탄성파속도를 구하였다. 실험에 사용된 초음파 측정기 E46(110V, 60Hz)은 초음파가 송신부로부터 시료를 거쳐 수신부에 이르는데 소요되는 10^{-6} 초까지의 통과시간을 측정할 수 있으며, 2.5, 1.5, 0.5kV의 출력단자가 있으나, 초음파의 감쇠를 적게 하고 배후 소음을 최소화하기 위해 0.5kV의 단자를 사용하였다. 시료와 송수신부의 접촉상태가 불량하면 속도측정에 큰 오차가 발생할 수 있으므로 그리스를 접촉면에 도포하였다. 탄성파속도(P-wave)는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$V_p = \frac{l}{t} \times 10^6 \quad (1)$$

V_p : 시료의 P파속도(m/s),

l : 시료의 길이(m),

t : 초음파 통과시간(μ sec)

2.2 반발경도 실험

반발경도 실험(이규동 외, 2006)은 테스트해머를 이용하는 방법이 널리 이용되고 있으며, 슈미트해머의

콘크리트 표면 타격 반발도와 콘크리트 압축강도 사이에 상관관계가 있다는 실험적 입증에 근거하고 있다. 이 실험은 10cm이상의 두께를 가진 시료에서 측정이 가능하고, 하나의 시료 당 20개 이상의 경도 값을 얻어야하며, 중심 값을 기준으로 ± 6 이상의 값을 제한 나머지 값들의 평균값으로 시료의 압축강도를 산출할 수 있다. 보편적으로 사용되고 있는 추정식은 일본 재료학회식, 동경도 재료시험소식, 일본 건축학회식이며 각각의 추정식은 다음과 같다.

· 일본 재료학회식:

$$F_c = (13R_b - 184) \times a \quad (2)$$

· 동경도 재료시험소식:

$$F_c = (10R_b - 110) \times a \quad (3)$$

· 일본건축학회식:

$$F_c = (7.3R_b + 100) \times a \quad (4)$$

F_c : 압축강도(kgf/cm²),

R_b : 반발경도,

a : 재령계수

3. 실험방법

실험에 사용된 콘크리트 재료는 15×15×60cm 규격으로, 시멘트와 모래를 물과 혼합하여 만든 모르타르 재료이다. 서로 다른 조성비로 만들어진 3개의 콘크리트 재료를 사용하여 실험을 수행하였다. Table 1은 콘크리트 재료의 조성비를 나타낸 것이다.

3.1 탄성파속도 실험

표면에서의 초음파 통과시간 측정

콘크리트 재료의 표면을 5cm 간격으로 grid하여 층

Table 1. Compounding ratio of materials

No	Weight ratio			Cement /Water ratio
	Cement	Sand	Water	
1	0.6	2.4	0.4	1.5
2	0.4	2.6	0.4	1.0
3	0.2	2.8	0.4	0.5

격 하중을 가하기 전에 표면에서의 이격거리별 초음파 통과시간을 측정하였다. Fig. 1은 표면에서의 초음파 통과시간을 측정하기 위한 장치를 도시한 것이다.

측면에서의 탄성파속도 측정

콘크리트 재료의 측면에서 5cm 간격으로 통과시간을 측정하였고, 충격 하중을 가하기 전의 각 지점에서의 탄성파속도와 1차 충격 및 2차 충격 하중 후의 각 지점에서의 탄성파속도를 산출하였다. Fig. 2는 측면에서의 탄성파속도를 측정하기 위한 장치를 도시한 것이다. 충격 하중은 1m 높이에서 동일 지점에 낙하하는 Steel ball의 무게로 산정하였고, Steel ball은 0.22, 0.44, 0.88kg을 사용하였으며, 각 5회씩 총 15회의 충격 하중을 1회 충격량으로 하였다. 충격량은 1m 높이에서 낙하하는 Steel ball의 무게로 얻어지는 에너지(E)의 양으로서, 콘크리트 재료에 가해지는 충격 하중의 1회 충격량은 6.6 J로 산출되었다. Fig. 3은 충격 하중을 가하기 위한 실험 장치를 도시한 것이다.

3.2 반발경도 실험

콘크리트 재료의 중심점으로부터 상하좌우 3cm 간격으로 34개의 지점을 설정하여 반발경도를 측정하였다. Fig. 4는 반발경도 실험 장치를 도시한 것이다.

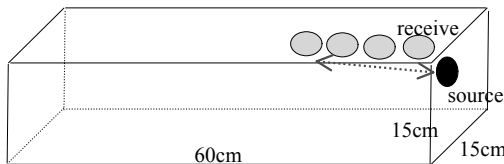


Fig. 1. Description of seismic-wave velocity test in surface.

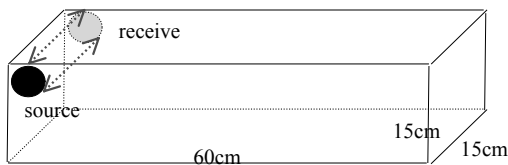


Fig. 2. Description of seismic-wave velocity test in side.

4. 실험결과 및 분석

4.1 콘크리트 표면에서의 탄성파속도

탄성파속도는 재료의 내부 공극 및 균질성, 강도에 따라 차이가 난다(이상은, 1998). Fig. 5는 조성비가 다른 콘크리트 재료의 표면에서 측정된 초음파 통과시간을 도시한 것이다. 시멘트와 모래의 조성비가 다르게 만들어진 콘크리트 재료는 각각 NC-1, 2, 3 샘플로 표기 하였다. 탄성파속도 측정기의 송신기는 한 지점에 고정을 시키고, 수신기를 거리에 따라 이격하여 초음파 통과시간을 측정하였는데, 이격거리에 따른 초음파 통과시간의 비로서 콘크리트 재료의 상관성을 고찰하였다. Fig. 5를 보면 알 수 있듯이, NC-1, 2, 3 샘플들 모두 0.99이상의 결정계수를 보였고, 이로 인해 재료의 물성이 균질함을 알 수 있었다. 탄성파속도 측정기의 송신기와 수신기가 멀어질수록 NC-1 샘플이 NC-2, 3 샘플들보다 빠른 통과시간을 보였는데, 이는 NC-1 샘플이 NC-2, 3 샘플들보다 공극이 적고 강도가 큰 물성을 가지고 있음을 보여 주는 결과이다. NC-2 샘플과 NC-3 샘플은 큰 차이를 보이지 않았다.

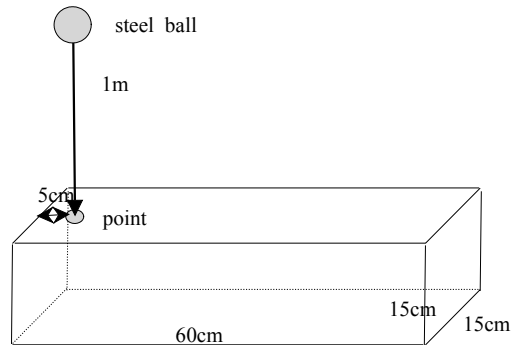


Fig. 3. Description of impact load test.

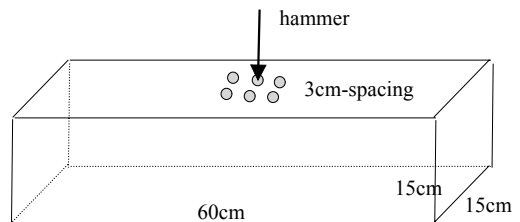


Fig. 4. Description of rebound number test.

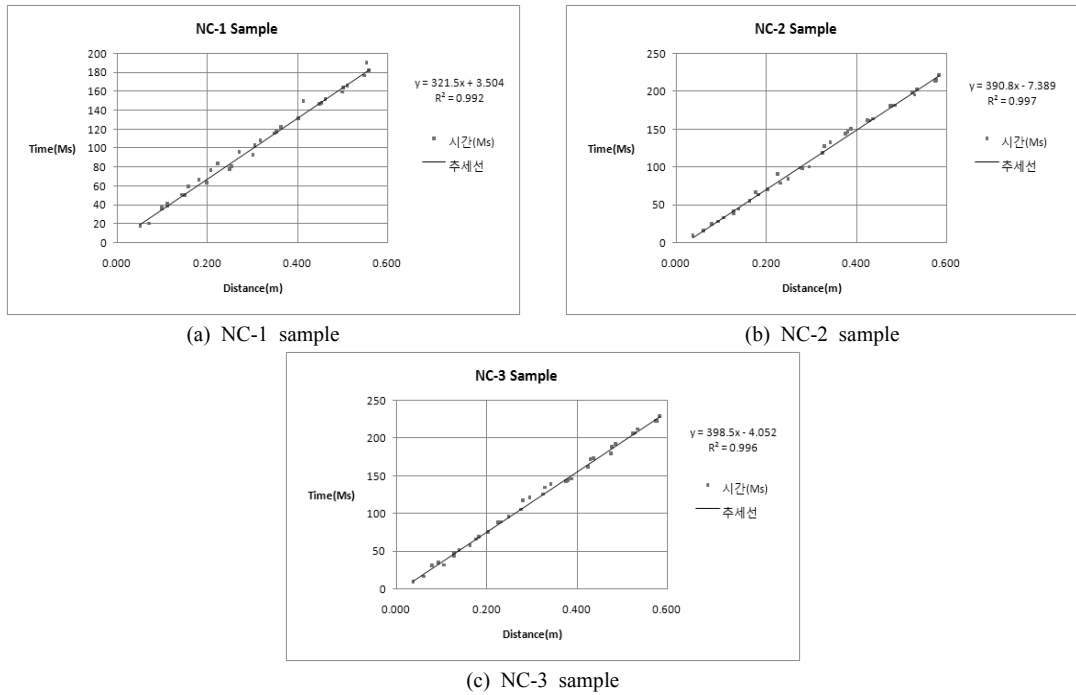


Fig. 5. Seismic-wave penetration time in surface.

Table 2. Results of rebound number test

No	NC-1		NC-2		NC-3		No	NC-1		NC-2		NC-3	
	R_o	R_o'	R_o	R_o'	R_o	R_o'		R_o	R_o'	R_o	R_o'	R_o	R_o'
1	34	39	18	25	18	24	19	43	45	30	30	30	31
2	34	39	20	25	19	26	20	43	45	30	31	31	32
3	35	40	23	25	21	26	21	44	46	30	31	31	32
4	36	41	25	25	24	26	22	44	48	30	31	31	32
5	37	41	25	26	26	26	23	45	48	31	32	32	32
6	39	41	25	26	26	27	24	45	48	31	32	32	32
7	39	42	25	26	26	28	25	45	48	31	32	32	32
8	40	42	26	27	26	28	26	46	48	32	33	32	32
9	41	42	26	27	27	28	27	48	48	32	33	32	33
10	41	42	26	27	28	30	28	48		32	34	32	33
11	41	42	27	28	28	30	29	48		33	34	32	34
12	42	43	27	29	28	30	30	48		33		33	34
13	42	43	27	29	30	30	31	48		34		33	
14	42	43	28	29	30	30	32	48		34		34	
15	42	43	29	30	30	30	33	50		35		34	
16	42	44	29	30	30	30	34	52		39		35	
17	43	44	29	30	30	31							
18	43	45	30	30	30	31	Ave.	42.9	43.7	28.9	29.2	29.2	30.0

4.2 콘크리트 표면에서의 반발경도

반발경도는 재료의 압축강도를 간접적으로 도출해 낼 수 있는 효과적인 요소이다. Table 2는 조성비가 다른 콘크리트 재료의 표면에서 34개의 지점을 설정하여 슈미트해머 타격 후 측정된 값을 나열한 것이다. R_b 는 34개의 지점에서 슈미트해머 타격에 의해 측정된 값들이고, R_b' 는 오차범위를 초과하는 값들을 뺀 값들이다. NC-1 샘플은 43.7, NC-2 샘플은 29.2, NC-3 샘플은 30.0의 평균값을 보였다. Table 3은 추정식 (2)~(4)에 의해 산출된 압축강도이다. 추정식에 의한 산출값들이 차이를 보여 어느 하나의 추정식의

로 판단하기가 어려울 것으로 사료되어 산출된 값들의 평균치로 압축강도를 비교하였다. 또한, 콘크리트 재료가 제작된 지 3년 이상 된 것으로 파악되어 재령 계수를 0.63으로 산정하였다. NC-1 샘플은 237.3 kgf/cm², NC-2 샘플은 145.1 kgf/cm², NC-3 샘플은 150.2 kgf/cm²의 압축강도를 나타내었는데, 이는 표면에서의 초음파 통과시간을 측정하여 얻은 결과와 비교해 볼 때 동일한 결과임을 알 수 있었고, 초음파 통과시간과 콘크리트 재료의 압축강도 간에 상관성이 있음을 확인할 수 있었다.

Table 3. Results of compressive strength

추정식	NC-1	NC-2	NC-3
일본 재료학회	242.0	123.2	129.8
동경도 재료시험소	206.0	114.7	119.7
일본 건축학회	264.0	197.3	201.0
평균 압축강도	237.3	145.1	150.2

4.3 콘크리트 측면에서의 탄성파속도

콘크리트 재료의 내부 손상을 모사하기 위해 측면의 탄성파속도를 동일 지점에서 직접 투과법으로 측정하였고, 식 (1)에 의해 계산되었다. 충격 하중은 콘크리트 재료 표면의 동일 지점에 낙하하는 Steel ball의 충격량으로 산정하였다. Fig. 6은 콘크리트 재료에 충격 하중을 가하기 전과 1, 2회 충격 하중을 가한 후

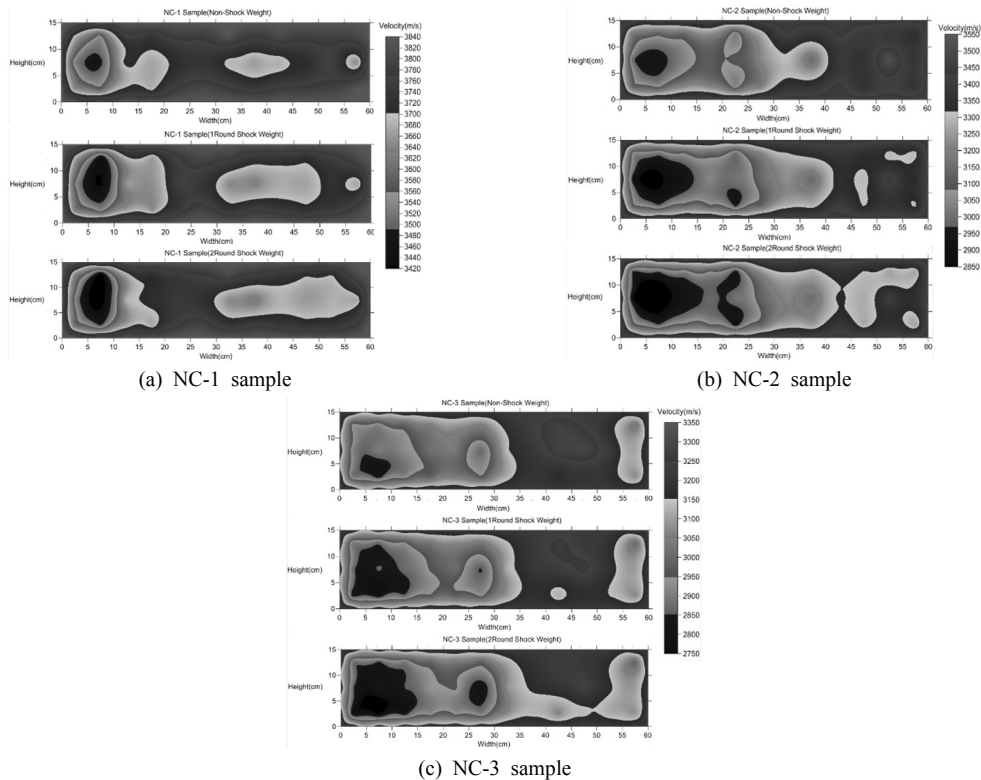


Fig. 6. Description of seismic-wave velocity before and after impact load.

의 탄성파속도 분포를 도식화한 것이다. Fig. 6을 보면 알 수 있듯이, NC-1, 2, 3 샘플들 모두 충격 하중이 가해지면 충격 지점으로부터 탄성파속도가 현저히 느려지는 경향을 볼 수 있었다. 이는 충격 하중으로 인해 콘크리트 재료에 내부 손상이 발생된 것으로 사료된다. Table 4는 콘크리트 재료의 각 지점에서 충격 하중 전과 후의 탄성파속도를 나열한 것이다. N/S는 충격 하중을 가하지 않았을 때, 1R/S와 2R/S는 각각 1회 및 2회의 충격 하중을 가했을 때의 탄성파속도

값을 의미한다. 충격 하중을 가하기 전의 탄성파속도 평균값은 각각 3719.6m/s, 3245.3m/s, 3067.6m/s, 1회 충격 하중 후의 탄성파속도 평균값은 각각 3692.6m/s, 3175.0m/s, 3035.7m/s, 2회 충격 하중 후의 탄성파속도 평균값은 각각 3684.6m/s, 3147.9m/s, 3004.3m/s로 산출되었다. 충격 하중을 가하기 전과 2회의 충격 하중을 가한 후 탄성파속도 값의 차이를 비교한 결과, NC-1 샘플은 35.0m/s, NC-2 샘플은 97.4m/s, NC-3 샘플은 63.3m/s의 감소 값을 보였다. 이로 인해 압축

Table 4. Results of seismic-wave velocity test before and after impact load

No	NC-1			NC-2			NC-3		
	N/S	1R/S	2R/S	N/S	1R/S	2R/S	N/S	1R/S	2R/S
1	3807.1	3816.8	3816.8	3099.2	3080.1	3092.8	2924.0	2803.7	2747.3
2	3797.5	3759.4	3694.6	3042.6	2958.6	2947.0	2901.4	2777.8	2722.3
3	3787.9	3712.9	3703.7	3205.1	3112.0	3092.8	2970.3	2840.9	2798.5
4	3816.8	3731.3	3740.6	3198.3	3080.1	3073.8	3042.6	2947.0	2912.6
5	3778.3	3731.3	3768.8	3018.1	2924.0	2895.8	3092.8	2964.4	2924.0
6	3836.3	3787.9	3816.8	3178.0	3112.0	3112.0	3042.6	2924.0	2879.1
7	3778.3	3807.1	3768.8	3363.2	3282.3	3268.0	3184.7	3086.4	3067.5
8	3787.9	3768.8	3740.6	3363.2	3282.3	3239.7	3239.7	3178.0	3131.5
9	3731.3	3658.5	3703.7	3456.2	3416.9	3386.0	3282.3	3112.0	3055.0
10	3759.4	3694.6	3676.5	3348.2	3304.0	3268.0	3239.7	3164.6	3131.5
11	3537.7	3416.9	3386.0	3416.9	3363.2	3348.2	3171.2	3144.7	3112.0
12	3694.6	3676.5	3632.0	3363.2	3296.7	3246.8	3012.0	3061.2	3073.8
13	3632.0	3797.5	3667.5	2970.3	2890.2	2830.2	2907.0	2868.1	2840.9
14	3768.8	3731.3	3685.5	2935.4	2851.7	2819.5	2912.6	2868.1	2840.9
15	3703.7	3667.5	3658.5	3042.6	2918.3	2918.3	2929.7	2873.6	2857.1
16	3676.5	3676.5	3685.5	3118.5	3055.0	2994.0	3018.1	2958.6	2947.0
17	3658.5	3632.0	3614.5	3105.6	3012.0	3018.1	3042.6	3018.1	2964.4
18	3685.5	3640.8	3640.8	3225.8	3157.9	3138.1	2862.6	2835.5	2788.1
19	3731.3	3731.3	3722.1	3311.3	3239.7	3225.8	3144.7	3125.0	3086.4
20	3712.9	3768.8	3750.0	3131.5	3138.1	3151.3	3205.1	3205.1	3164.6
21	3667.5	3649.6	3722.1	3393.7	3348.2	3333.3	3282.3	3232.8	3198.3
22	3722.1	3667.5	3694.6	3355.7	3296.7	3275.1	3296.7	3268.0	3253.8
23	3472.2	3416.9	3393.7	3529.4	3464.2	3424.7	3225.8	3191.5	3171.2
24	3529.4	3546.1	3537.7	3370.8	3325.9	3340.8	3105.6	3092.8	3092.8
25	3797.5	3797.5	3778.3	3164.6	3036.4	2924.0	2868.1	2873.6	2857.1
26	3787.9	3740.6	3722.1	3105.6	2994.0	2952.8	2793.3	2846.3	2824.9
27	3778.3	3712.9	3722.1	3125.0	3073.8	3024.2	2901.4	2924.0	2879.1
28	3778.3	3740.6	3740.6	3232.8	3125.0	3067.5	2964.4	3018.1	2976.2
29	3740.6	3768.8	3768.8	3012.0	2982.1	2907.0	3030.3	3061.2	3024.2
30	3778.3	3722.1	3731.3	3275.1	3205.1	3232.8	2941.2	3018.1	2970.3
31	3807.1	3797.5	3797.5	3440.4	3311.3	3318.6	3118.5	3138.1	3112.0
32	3778.3	3740.6	3768.8	3378.4	3355.7	3275.1	3198.3	3212.0	3191.5
33	3676.5	3640.8	3667.5	3448.3	3386.0	3363.2	3151.3	3268.0	3232.8
34	3703.7	3658.5	3667.5	3393.7	3340.8	3304.0	3191.5	3212.0	3205.1
35	3562.9	3521.1	3472.2	3378.4	3289.5	3253.8	3178.0	3184.7	3157.9
36	3640.8	3605.8	3588.5	3333.3	3289.5	3260.9	3061.2	2988.0	2970.3
Ave.	3719.6	3692.6	3684.6	3245.3	3175.0	3147.9	3067.6	3035.7	3004.3

강도가 크고 탄성파속도가 빠른 NC-1 샘플이 NC-2, 3 샘플들보다 충격 하중에 의한 손상이 작다는 것을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 충격이나 진동으로 인해 발생하는 인접 구조물의 부재에 대한 내부 손상을 모사하기 위해 콘크리트 재료에 충격 하중이 가해질 때 산출되는 탄성파속도의 분포 양상을 도식화하여 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 콘크리트 재료의 표면에서 측정된 초음파 통과시간과 반발경도로서 재료의 균질성과 압축강도를 파악할 수 있었다.
- 2) 콘크리트 재료의 측면에서 직접 투과법으로 측정된 탄성파속도 분포 양상을 분석한 결과, 충격 하중이 가해질수록 탄성파속도가 느려지는 경향을 보였다. 이는 충격 하중에 의해 재료 내부에서의 손상이 탄성파속도를 느려지게 하는 원인일 것이라 판단된다.
- 3) 콘크리트 재료의 측면에서 측정된 탄성파속도의 평균값을 충격 하중 가하기 전 과 1차 및 2차 충격 하중 후로 비교한 결과, 압축강도가 크고 탄성파속도가 빠른 재료일수록 충격 하중에 의한 손상이 작게 나타났다.

- 4) 인접 구조물의 주 부재에서 시공 전후의 탄성파속도 분포 양상을 도식화한다면 부재 내부의 손상을 확인할 수 있을 것이라 판단되며, 이러한 분석 요소들이 설계 기준에 적용되기 위해서는 향후 정확한 분석 Tip이 요구되고, 지속적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 류창하, 2005, 구조물에 대한 국외 발파 진동 허용 규제기준 분석, 화약발파, Vol. 23, No. 3, pp. 1-10.
2. 장보안, 김영화, 김재동, 이찬구, 1998, 피로하중에 의한 포천화강암의 미세균열 발달특성, 대한지질공학회지, Vol. 8, No. 3, pp. 275-284.
3. 서백수, 손권익, 2005, 노후된 콘크리트 구조물의 안전도 평가를 위한 초음파기법의 주파수 및 시간영역 해석에 관한 연구, 터널과 지하공간, Vol. 15, No. 5, pp. 352-358.
4. 김성범, 홍성욱, 조영상, 2007, 응력파 기반 표면파기법 및 충격반향기법을 이용한 콘크리트 구조물의 압축강도 및 결함 추정에 관한 연구, 대한건축학회지, Vol. 23, No. 10, pp. 35-42.
5. 이규동, 임홍철, 임병호, 2006, 노후아파트 현장에서 콘크리트 압축강도 추정, 한국건축시공학회지, Vol. 6, No. 1, pp. 155-158.
6. 이상은, 1995, 화강암의 역학적 이방성 및 균열제어 발파에 관한 연구, 공학박사 학위논문, 전북대학교, pp. 37-57.



송 정 언

전북대학교 자원에너지공학과 박사과정

Tel : 063-270-3691
E-mail : sjuda@jbnu.ac.kr



박 훈

전북대학교 자원에너지공학과 겸임교수

Tel : 02-834-4590
E-mail : hujin@jbnu.ac.kr



김 승 곤

전북대학교 자원에너지공학과 교수

Tel : 063-270-2364
E-mail : kimsk@jbnu.ac.kr