

노후 콘크리트 재료의 물성 및 손상도에 관한 연구

송정언^{1)*}, 박 훈¹⁾, 김승곤¹⁾

A Study on the Physical Property and Damage Index of Decrepit Concrete Materials

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

Abstract Building demolition and blasting work in urban areas has a possibility which has an effect on the structural stability of nearby structures. In this study, the compressive strength and chemical composition of decrepit concrete materials were estimated by Schmidt rebound test and XRD phase analysis. The damage index of the concrete materials was calculated by measured P-wave velocities. It was revealed that the constituents of the concrete materials affect on the compressive strength. The damage index decreases with increasing compressive strength and decreasing impact energy.

Key words Compressive strength, X-Ray diffraction, Damage index, Impact force

초 록 도심지에서의 건물해체 및 발파공사로 노후된 인접 구조물의 구조적 안정성에 영향을 미칠 가능성이 있다. 본 연구에서는 노후 콘크리트 재료의 물성을 파악하기 위하여 반발경도에 의한 압축강도와 X선 회절 및 상 분석에 의한 성분 함량으로 상관성을 비교하였고, 충격 에너지에 의한 손상도 평가를 위해 측정된 탄성파 속도 값으로 손상도를 산출하였다. 결과적으로, 반발경도에 의한 압축강도와 재료의 성분 함량은 상관성이 있음을 확인하였고, 탄성파속도 값으로 산출된 손상도는 압축강도가 큰 재료일수록 작게 나타났고, 충격력이 작을수록 작게 나타났다.

핵심어 압축강도, X선 회절, 손상도, 충격력

1. 서 론

최근 콘크리트 구조물의 노후화로 인한 도심지에서의 재개발 및 발파해체 공사가 활발하게 진행되고 있고, 이로 인해 인접한 구조물들의 구조적 건전성 및 안전도 문제가 사회적인 이슈로 대두되고 있다. 공사로 인한 비산, 충격 진동 및 지반 진동 등 환경적인 오염원들에 따른 구조물의 손상 추정을 위한 연구가 수행(이상곤 외, 2010; 김지연 외, 2001; 천영수 외, 2000)되었지만, 직접 충격이나 진동으로 인한 전체적

인 구조물의 손상 평가로 주 부재에 대한 손상 평가를 보여줄 수는 없었다. 구조물의 안전성은 전체적인 구조적 강성도 중요하지만, 주 부재의 강성 변화가 더욱 중요하다. 주 부재가 노후화되거나 내부 손상을 입게 되면 강성의 변화로 순간적인 붕괴에 이르게 될 수도 있다. 본 연구에서는 노후화된 콘크리트 구조물의 손상 정도를 평가하기 위해 실험실에서 제작되어 5년 이상 경과된 무근콘크리트 재료를 대상으로 압축강도 산출 및 성분 함량 분석을 하여 물성을 평가하였고, 재료에 직접적인 충격을 가하여 충격 후 측정된 탄성파속도 값으로 손상도 변화 양상을 도시하였으며, 재료의 물성과 충격에너지에 따른 손상도를 비교하였다.

¹⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과

* 교신저자 : sjuda@jbnu.ac.kr

접수일 : 2010년 12월 15일

심사 완료일 : 2010년 12월 24일

게재 승인일 : 2010년 12월 28일

2. 콘크리트 재료의 물성 평가

재료의 물리적 성질을 평가하기 위한 방법으로 재료의 밀도, 비중, 압축 및 인장강도, 전단강도, 점하중, 휨하중, 탄성파속도 등 다양한 실험들이 있지만, 현장에서 표준 샘플을 획득하여 실험실에서 결과를 도출해야 하고, 현장의 여건에 따라서 표준 샘플을 획득하지 못하는 경우가 발생될 수 있다. 특히, 구조물의 경우 구조적 모멘트가 작용하고 있는 주 부재(기둥, 보, 내력벽)에서 표준 샘플을 획득하는 것은 안전상의 문제가 따른다. 따라서, 현재 시설물 및 건축물의 안전 진단을 위한 비파괴검사의 한 방법으로 압축강도를 산출해 내기 위한 반발경도가 이용되고 있다(권영웅, 1992; 이규동 외, 2006). 본 연구에서는 현장 적용성이 용이한 반발경도로 압축강도를 추정하였고, X선 회절 및 상 분석(Phase analysis)으로 콘크리트 재료의 성분을 분석하여 상관성을 규명하였다.

2.1 콘크리트 재료의 압축강도

시험에 사용된 콘크리트 재료는 150×150×600mm 규격의 무근콘크리트로서, Table 1에서 나타내고 있는 시멘트:모래:물 배합비를 가진 3개의 샘플로 반발경도 시험을 실시하였으며, 각각의 샘플은 NC-1, NC-2, NC-3으로 표기하였다. 반발경도 시험은 한국산업규격 KS F2730 규정(기술표준원, 2008)에 의거

Table 1. Compounding ratio of materials

Sample	Weight ratio			Cement /Water ratio
	Cement	Sand	Water	
NC-1	0.6	2.4	0.4	1.5
NC-2	0.4	2.6	0.4	1.0
NC-3	0.2	2.8	0.4	0.5

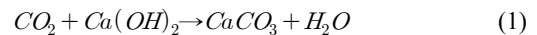
Table 2. Results of compressive strength

Formula	Sample		
	NC-1	NC-2	NC-3
(1) $F_c = (13R_o - 184) \times a$	245.1	127.2	135.3
(2) $F_c = (10R_o - 110) \times a$	209.0	118.3	124.5
(3) $F_c = (7.3R_o + 100) \times a$	269.8	203.6	208.1
Average F_c (kgf/cm ²)	241.3	149.7	156.0

하여 각 샘플 당 3cm 간격으로 34개의 반발경도 값 (R_o)을 얻어 중심값으로부터 $\pm 20\%$ 이상 상회하는 값을 제거한 후 추정식에 의한 압축강도(F_c)를 산출하였다. 콘크리트는 양생 후 경과기간에 따라 재령계수가 변한다. 반발경도 시험에 사용된 샘플은 양생 후 5년 이상 경과된 노후 콘크리트 재료로서, 재령계수(a)는 0.65로 산정하였다(기술표준원, 2008). Table 2는 산출된 압축강도이며, 평균 압축강도 추정을 위해 (1)일본 재료학회식, (2)동경도 재료시험소식, (3)일본 건축학회식을 사용하였다. NC-1은 241.3kgf/cm², NC-2는 149.7kgf/cm², NC-3은 156.0kgf/cm²의 평균 압축강도를 나타내었다.

2.2 콘크리트 재료의 X선 회절 및 상 분석

콘크리트 재료의 성분을 분석하기 위해 각각의 샘플 표면에서 분말을 채취하여 XRD(X-Ray Diffraction) 및 SEM(Scanning Electron Microscope)분석을 수행하였다. 보통 포틀랜드 시멘트의 주성분은 CaO(석회)로서 60~70%를 차지하고, SiO₂(규산)가 15~25% 정도이다. 모래의 주성분은 SiO₂(규산)로서 80~90%를 차지하고 있다(이진웅 외, 2008). 일반적으로, 콘크리트 재료의 80% 이상이 Ca 원소와 Si 원소로서, 물과 반응해서 칼슘-실리케이트-겔과 Ca(OH)₂ 성분이 생성되면서 경화된다. 하지만, 콘크리트 재료의 재령이 오래되기 시작하면 공기 중의 이산화탄소가 시멘트 수화물과 반응하여 새로운 화합물이 생성된다. 화학식은 다음과 같다.



식 (1)과 같은 과정을 거쳐 콘크리트 재료 내의 시멘트 주성분이 CaCO₃ 성분의 형태로 잔재하게 된다. 본 연구에 사용된 콘크리트 재료는 5년 이상 된 무근 콘크리트로서, 콘크리트 탄산화가 진행되어 가고 있어 시멘트 주성분이 CaO 성분이 아닌 CaCO₃ 성분 형태로 나타나게 된 것이라 사료된다. XRD 기기의 정성·정량 분석에서도 시멘트 주성분인 CaO 성분은 분석되지 않았고, CaCO₃ 성분으로 분석되었다.

X선 회절은 물질 중에 원자가 어떻게 배열되어 있는가를 연구하는 실험 방법 중 하나로 회절에 사용되는 X선의 파장이 원자의 크기와 비슷하여, 각 원자에

의해 만들어지는 산란파가 서로 간섭하여 회절을 일으킨다. 실험에 사용된 XRD기기는 일본 Rigaku사의 D/Max-2500이며, Jade9.1 program으로 샘플의 정성·정량 분석을 하였다. 샘플의 정성 분석으로 SiO₂성분의 주 회절각은 26.6°(011), CaCO₃성분의 주 회절각은 29.4°(104)로 나타났다. SiO₂성분이 대부분을 차지하였고, CaCO₃성분은 주 회절각에서만 뚜렷하였다. 또한, 정성 분석을 실시한 샘플들의 성분 파악으로 정량 분석을 실시하였다. Fig. 1~3은 NC-1, 2, 3 샘플의 XRD 정성·정량 분석을 나타낸 것이다.

Table 3은 샘플들의 XRD 정량 분석 결과를 나타낸 것이다. 시멘트의 주성분인 CaCO₃성분의 함량(%)이 NC-1은 26.5%, NC-2는 15.2%, NC-3은 14.0%로 분석되었고, 모래의 주성분인 SiO₂성분의 함량(%)이

Table 3. Results of XRD quantitative analysis

Component \ Sample	NC-1	NC-2	NC-3
SiO ₂	73.5%	84.8%	86.0%
CaCO ₃	26.5%	15.2%	14.0%
Total	100%	100%	100%

NC-1은 73.5%, NC-2는 83.8%, NC-3은 86.0%로 분석되었다.

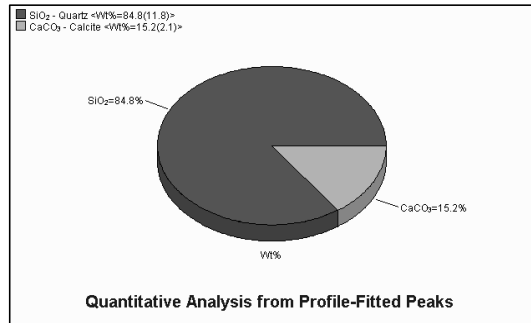
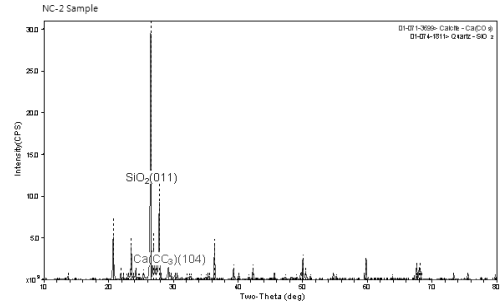


Fig. 2. XRD qualitative and quantitative analysis of NC-2.

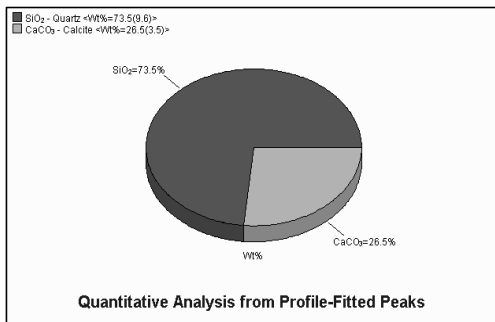
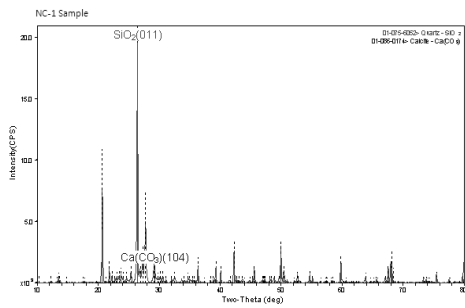


Fig. 1. XRD qualitative and quantitative analysis of NC-1.

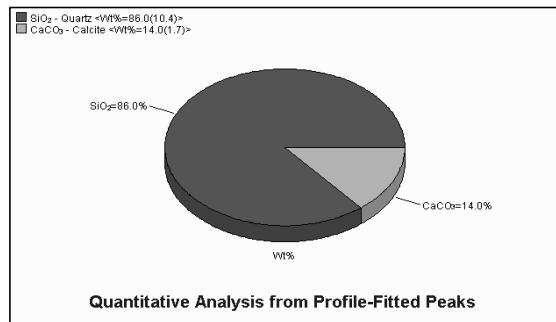
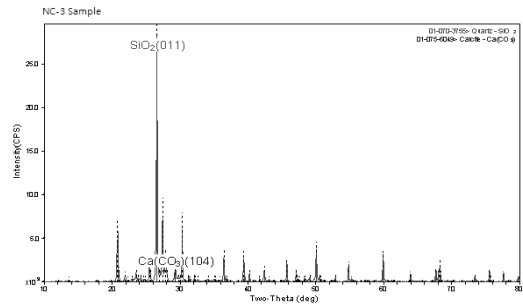


Fig. 3. XRD qualitative and quantitative analysis of NC-3.

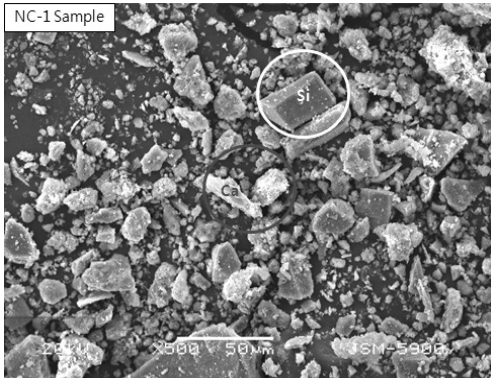


Fig. 4. SEM phase analysis of NC-1.

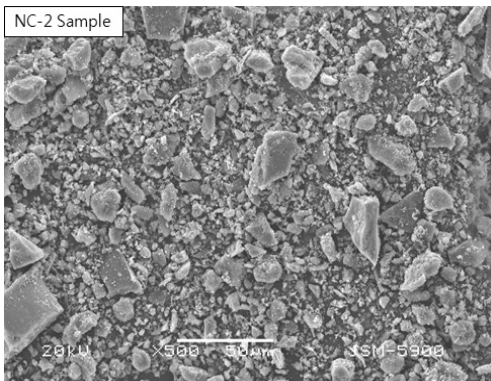


Fig. 5. SEM phase analysis of NC-2.

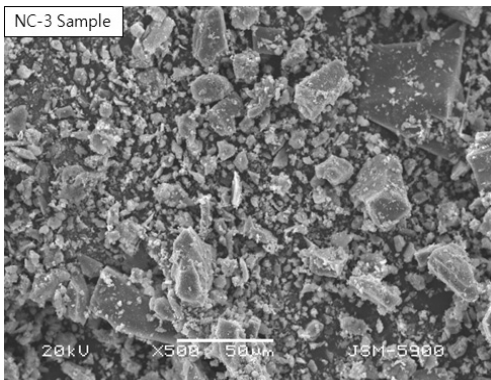


Fig. 6. SEM phase analysis of NC-3.

실험에 사용된 SEM기기는 일본 Jeol사의 JSM-5900이며, X선 회절 분석에 사용된 분말 샘플을 가지고 상 분석을 실시하였다. 또한, 상 분석 데이터를 통해 샘플의 주 원소인 Si원소와 Ca원소에 대한 함량(%)

Table 4. Results of SEM element analysis

Sample Element	NC-1	NC-2	NC-3
Si K	71.15% (185cps)	74.47% (175cps)	74.55% (205cps)
Ca K	28.85% (75cps)	25.53% (60cps)	25.45% (70cps)
Total	100%	100%	100%

분석도 실시하였다. Fig. 4-6은 NC-1, 2, 3 샘플의 SEM의 상 분석을 나타낸 것이다.

Table 4는 샘플들의 원소 함량 분석을 나타낸 것이다. 원소 함량 분석은 Si와 Ca의 두 원소를 대상으로 수행되었으며, 감응도(Intensity)에 따른 백분율(%)로 분석하였다. 여기서, cps는 count per second로서 감응도의 표준 단위이다. 샘플의 Ca원소 함량(%)이 NC-1은 28.85%, NC-2는 25.53%, NC-3은 25.45%로 분석되었고, Si원소 함량(%)이 NC-1은 71.15%, NC-2는 74.47%, NC-3은 74.55%로 분석되었다.

3. 콘크리트 재료의 손상 평가

시설물 및 건축물의 안전진단 지침에 의한 비파괴 검사 시스템이 많은 연구를 통해 정형화되어 가고 있지만, 아직도 주 부재에 대한 손상 정도를 수치화하거나 도식화하기에는 더 많은 연구가 필요한 실정이다. 구조물의 강성을 변화시킬 수 있는 주 부재의 균열, 내부결함, 내부공극 등은 외부의 직접적인 충격이나 지반의 입자진동으로 더욱 가속화시키고, 더 나아가서는 붕괴에 이르게 할 수도 있다. 이러한 주 부재의 내부 손상을 가장 빨리 알아낼 수 있는 방법이 초음파 탐상 시험이다. 초음파 탐상 시험으로 구조물의 음속, 판 두께, 균열 깊이, 피복 두께, 내부공극 및 강도를 측정할 수 있다(임정방부, 1997). 본 연구에서는 직접 투과법으로 초음파 통과시간을 측정하여 각 위치별 탄성파속도를 추정하고, 동일한 충격 포인트에 충격을 가한 후의 탄성파속도를 산출하여 콘크리트 재료의 손상 정도를 파악하였다.

3.1 콘크리트 재료의 손상도

콘크리트 구조물의 주 부재에서의 손상은 구조물

자체의 강성을 변화시킬 수 있다. 특히, 건물해체공사 및 발파공사로 발생하는 비석에 의한 직접 충격과 충격에 의한 진동은 주 부재에 대한 손상에 영향을 주게 되며, 이러한 직접적인 충격이나 충격에 의한 진동은 충격에너지와 밀접한 관계에 있다. 따라서, 콘크리트 재료에 직접적인 충격에너지를 가하여 충격 후의 손상도를 비교하였다. 콘크리트 재료의 손상도는 초음파 탐상 시험의 직접 투과법(입정방부, 1997)에 의한 탄성파속도 값으로 도출하였다. 탄성파속도는 콘크리트 재료 측면의 36개 측정 포인트에서 초음파측정기(E46, 60Hz)의 송수진기로 측정된 초음파 통과 시간으로 산출되었고, 충격 후의 탄성파속도는 콘크리트 재료 표면의 충격 포인트에 동일한 충격에너지를 가한 후 동일 측정 포인트에서 측정된 초음파 통과 시간으로 산출되었는데, 이전의 연구(송정언 외, 2009)에서 산출된 탄성파속도 값을 사용하여 콘크리트 재료의 손상 정도를 평가하였다. Fig. 7은 샘플의 탄성파속도 측정 포인트를 도시한 것이다.

손상된 콘크리트 재료에 대한 손상도의 평가는 일반적으로 손상역학에서 사용되는 손상도 평가식을 사용하였다(Kim et al., 1998).

$$\text{손상도}(w) = 1 - \left(\frac{V_{p-after}}{V_{p-before}} \right)^2 \quad (0 < w < 1) \quad (2)$$

여기서 $V_{p-after}$ 는 충격 후 콘크리트 재료의 P파속도, $V_{p-before}$ 는 충격 전 콘크리트 재료의 P파속도를 나타낸다. 식 (2)에 의해 산출된 1Round와 2Round

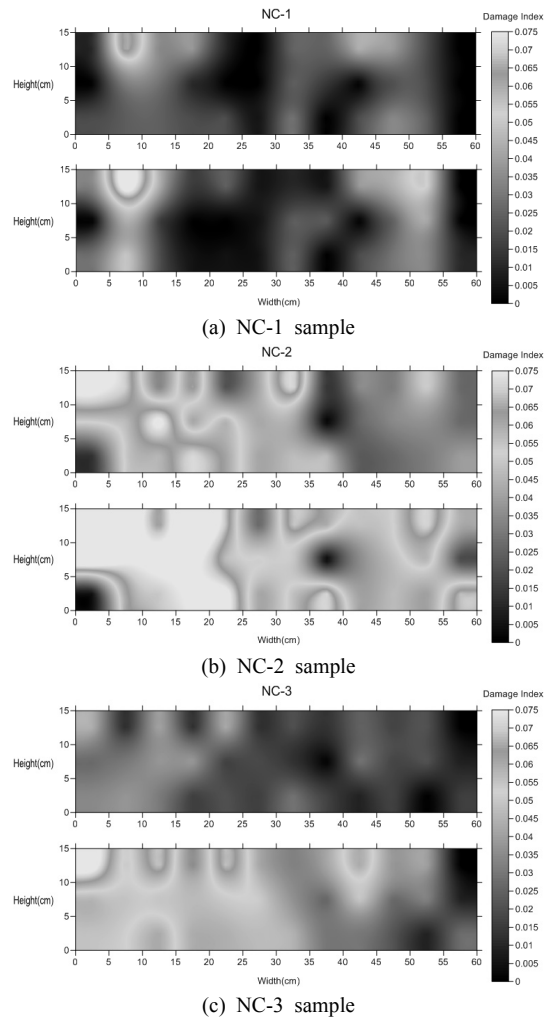


Fig. 8. Description of damage index after 1Round and 2Round impact.

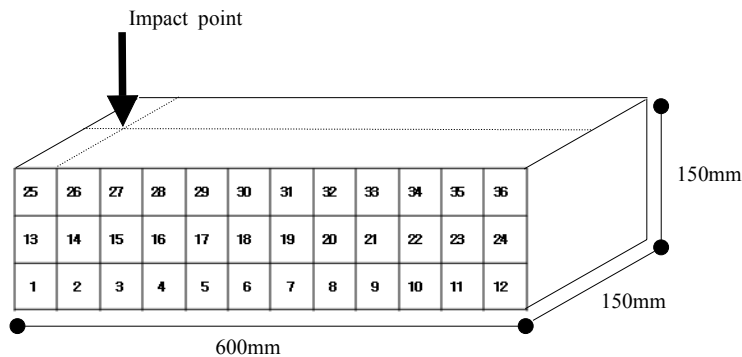


Fig. 7. Measurement point of seismic-wave velocity.

충격 후 측정 포인트에서의 손상도는 Table 5에서 보여주고 있다. Round는 충격에너지의 총 양에 따른 총 충격횟수를 나타낸다. NC-1과 NC-2는 0.22kg, 0.44kg, 0.88kg의 질량을 가진 구형 추를 가지고 총 15회의 충격을 가하였고, NC-3은 0.22kg, 0.28kg, 0.44kg의 질량을 가진 구형 추를 가지고 총 25회의 충격을 가하였으며, NC-1, NC-2, NC-3 모두 Round당 충격에너지의 총 양은 75.46 *Joules*로 동일하였다. NC-1은 1Round 충격 후 평균 손상도가 0.0189, 2Round 충격

후 평균 손상도가 0.0214로 산출되었고, NC-2는 1Round 충격 후 평균 손상도가 0.0431, 2Round 충격 후 평균 손상도가 0.0597로 산출되었으며, NC-3은 1Round 충격 후 평균 손상도가 0.0211, 2Round 충격 후 평균 손상도가 0.0413으로 산출되었다. 또한, 충격을 가장 직접적으로 받는 25~26번 측정 포인트에서 가장 큰 손상도를 보였는데, NC-1은 1Round 충격 후의 손상도보다 2Round 충격 후의 손상도가 소폭 증가하는 것으로 나타났고, NC-2와 NC-3의 경우

Table 5. Results of damage index after 1R and 2R Impact

Point No.	NC-1		NC-2		NC-3	
	1R-Impact	2R-Impact	1R-Impact	2R-Impact	1R-Impact	2R-Impact
1	0.0191	0.0285	0.0123	0.0041	0.0342	0.0488
2	0.0233	0.0503	0.0545	0.0619	0.0376	0.0520
3	0.0242	0.0195	0.0572	0.0689	0.0309	0.0605
4	0.0193	0.0049	0.0726	0.0764	0.0160	0.0432
5	0.0199	0.0050	0.0614	0.0794	0.0203	0.0439
6	0.0051	0.0051	0.0411	0.0411	0.0160	0.0470
7	0.0296	0.0247	0.0476	0.0558	0.0291	0.0451
8	0.0000	0.0000	0.0476	0.0721	0.0171	0.0296
9	0.0199	0.0199	0.0226	0.0402	0.0087	0.0299
10	0.0344	0.0296	0.0263	0.0474	0.0171	0.0213
11	0.0248	0.0344	0.0311	0.0398	0.0000	0.0084
12	0.0000	0.0101	0.0392	0.0681	0.0159	0.0275
13	0.0000	0.0000	0.0532	0.0921	0.0266	0.0449
14	0.0316	0.0447	0.0562	0.0774	0.0304	0.0486
15	0.0291	0.0147	0.0800	0.0800	0.0379	0.0489
16	0.0097	0.0000	0.0403	0.0782	0.0391	0.0466
17	0.0000	0.0000	0.0593	0.0555	0.0160	0.0507
18	0.0000	0.0050	0.0417	0.0537	0.0188	0.0514
19	0.0241	0.0241	0.0427	0.0509	0.0125	0.0367
20	0.0145	0.0240	0.0000	0.0000	0.0000	0.0252
21	0.0000	0.0000	0.0266	0.0352	0.0299	0.0505
22	0.0195	0.0242	0.0349	0.0475	0.0174	0.0259
23	0.0198	0.0437	0.0366	0.0585	0.0212	0.0335
24	0.0000	0.0000	0.0264	0.0177	0.0082	0.0082
25	0.0098	0.0336	0.0793	0.1463	0.0444	0.0825
26	0.0672	0.0839	0.0706	0.0960	0.0111	0.0502
27	0.0342	0.0436	0.0325	0.0635	0.0412	0.0696
28	0.0386	0.0148	0.0656	0.0996	0.0118	0.0346
29	0.0100	0.0248	0.0198	0.0686	0.0430	0.0689
30	0.0000	0.0050	0.0423	0.0257	0.0117	0.0418
31	0.0251	0.0102	0.0736	0.0695	0.0205	0.0325
32	0.0247	0.0050	0.0134	0.0602	0.0127	0.0413
33	0.0443	0.0395	0.0358	0.0487	0.0247	0.0602
34	0.0392	0.0440	0.0309	0.0522	0.0168	0.0372
35	0.0199	0.0535	0.0519	0.0724	0.0209	0.0411
36	0.0000	0.0000	0.0261	0.0430	0.0000	0.0000
ave.	0.0189	0.0214	0.0431	0.0597	0.0211	0.0413

2Round 충격 후의 손상도가 1Round 충격 후의 손상도보다 2배 정도 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 콘크리트 재료의 동일 충격 포인트에 1Round와 2Round 충격을 가한 후 산출된 손상도의 변화 양상을 도시한 것이다. NC-1은 1Round 충격을 가했을 때 보다 2Round 충격을 가했을 때 충격 포인트에서 아래로 손상도의 증가가 뚜렷한 것으로 나타났지만, 콘크리트 재료의 전반적인 손상도를 보았을 때 우측면으로의 손상도 변화는 큰 차이를 보이지 않았다. NC-2와 NC-3은 1Round 충격을 가했을 때 보다 2Round 충격을 가했을 때 더욱 큰 손상도 변화를 보였고, 전반적으로 콘크리트 재료의 충격 포인트에 가해진 충격의 증가가 손상도 증가로 이어졌다.

3.2 충격에너지와 물성에 따른 손상도의 상관성

충격에너지는 콘크리트 재료의 동일 포인트에 1m 높이에서 낙하하는 구형 Steel ball의 위치에너지로 산정하였다. 충격에너지의 산정은 다음의 식 (3)으로

산출하였다.

$$E(Joules) = m \times g \times h \tag{3}$$

여기서 m 은 Steel ball의 질량(kg), g 는 중력가속도 (m/sec^2), h 는 낙하 높이(m)를 나타낸다. Table 6은 산출된 샘플의 충격에너지 값을 보여 주고 있다. NC-1, NC-2는 Round당 75.46 Joules의 충격에너지와 15번의 충격횟수로 충격을 가하였고, NC-3은 Round당 75.46 Joules의 충격에너지와 25번의 충격횟수로 충격을 가하였다. 또한, 1번의 충격에 따른 최대 충격력은 NC-1과 NC-2는 8.62kgf, NC-3는 4.31kgf로 산출되었다.

Fig. 9는 2Round 충격 후 산출된 NC-1과 NC-2의 손상도를 비교한 것이다. 2차에 걸쳐 75.46 Joules의 동일한 충격에너지가 가해진 콘크리트 재료는 물성에 따라 다른 손상도를 나타냈다. 압축강도가 크고 콘크리트 재료의 시멘트 성분 함량이 높은 NC-1이 NC-2

Table 6. Results of the impact energy measurement

Sample Mass	NC-1			NC-2			NC-3		
	Round (times)	Impact energy (Joules)	Max. Impact force	Round (times)	Impact energy (Joules)	Max. Impact force	Round (times)	Impact energy (Joules)	Max. Impact force
0.22kg	5	10.78	2.16	5	10.78	2.16	7	15.10	2.16
0.28kg	0	0	0	0	0	0	11	30.18	2.74
0.44kg	5	21.56	4.31	5	21.56	4.31	7	30.18	4.31
0.88kg	5	43.12	8.62	5	43.12	8.62	0	0	0
Total	15	75.46		15	75.46		25	75.46	

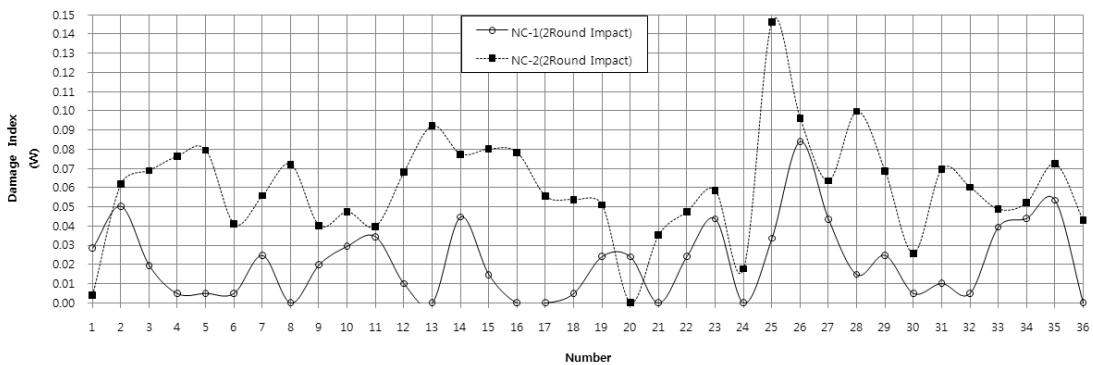


Fig. 9. Comparison of damage index between NC-1 and NC-2.

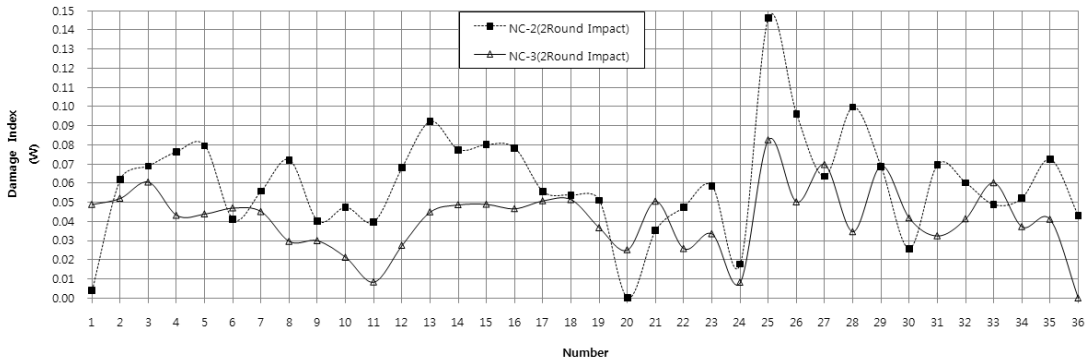


Fig. 10. Comparison of damage index between NC-2 and NC-3.

보다 작은 손상도를 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 10은 2Round 충격 후 산출된 NC-2와 NC-3의 손상도를 비교한 것이다. NC-2와 NC-3은 2장에서 도출된 결과와 같이 유사한 압축강도와 시멘트 성분 함량을 가지고 있는 콘크리트 재료이다. 따라서, NC-2와 NC-3은 동일한 콘크리트 재료로 간주하고 동일한 물성을 가질 때 Round당 충격에너지의 양도 75.46 Joules로 같지만 최대 충격력이 다른 두 샘플의 손상도를 비교하였다. 전반적으로 충격횟수는 적지만 최대 충격력이 큰 NC-2의 손상도가 NC-3보다 크게 나타났고, 충격 포인트에서 가장 가까운 25~26번 측정 포인트에서는 2배 정도의 손상도 차이를 보였다.

4. 결과 및 토의

노후 콘크리트 재료의 압축강도를 반발경도에 의해 산출한 결과, NC-1은 241.3kgf/cm², NC-2는 149.7 kgf/cm², NC-3은 156.0kgf/cm²의 평균 압축강도를 나타냈다. 또한, X선 회절 및 상 분석 결과, 콘크리트 재료의 시멘트 주성분인 CaCO₃성분의 함량(%)이 NC-1은 26.5%, NC-2는 15.2%, NC-3은 14.0%로 분석되었고, 콘크리트 재료의 주원소인 Ca원소 함량(%)이 NC-1은 28.85%, NC-2는 25.53%, NC-3은 25.45%로 분석되었다. X선 회절에 의한 재료의 정량 분석 결과로 보듯이, CaCO₃성분의 함량(%)이 가장 높은 NC-1이 압축강도도 가장 크게 나타났고, NC-2와 NC-3은 CaCO₃성분의 함량(%)이 ±1%이내의 오차 범위에서 유사하게 나타났으며, 압축강도 또한

±3.15kgf/cm²이내의 오차 범위에서 거의 유사하게 나타났다. 상 분석에 의한 원소 함량(%) 분석 결과를 비교하더라도, NC-1이 NC-2와 NC-3보다 Ca원소 함량(%)이 다소 높게 나타났고, NC-2와 NC-3은 거의 유사하게 나타났다. 콘크리트 재료의 압축강도는 재료의 배합비에 따라 달라지는데, 시멘트:모래:물 비에서 시멘트의 배합량에 따라 강도의 척도를 가능할 수 있지만, Table 1에서 보여 주듯이 초기 콘크리트 재료의 배합비에서 시멘트 배합비와 성분 분석에 의한 성분 함량은 다소 차이가 있었는데, 이는 콘크리트 재료의 노후화 진행에 따른 콘크리트 재료의 탄산화로 인한 것이라 사료된다.

노후 콘크리트 재료의 손상도를 평가하기 위하여 직접 투과법으로 탄성파속도를 측정하여 손상도를 산출한 결과, NC-1의 평균 손상도는 1Round 충격 후 0.0189, 2Round 충격 후 0.0214로 나타났고, NC-2의 평균 손상도는 1Round 충격 후 0.0431, 2Round 충격 후 0.0597로 나타났으며, NC-3의 평균 손상도는 1Round 충격 후 0.0211, 2Round 충격 후 0.0413으로 나타났다. 충격 포인트에서 가장 가까운 25~26번 측정 포인트에서의 손상도는 NC-1이 최대 0.0839로 나타났고, NC-2는 최대 0.1463, NC-3은 최대 0.0825로 나타났다. 또한, 콘크리트 재료에 따라 1Round 및 2Round 충격 후의 손상도를 도시한 결과, NC-1은 충격 포인트 아래의 측정 포인트에서만 큰 손상도 변화 양상을 보였고, NC-2와 NC-3은 전체적인 손상도 증가 양상을 보였다. 콘크리트 재료의 물성과 충격에너지에 따라 손상도를 비교한 결과, 압축강도가 크고 콘

크리트 재료의 시멘트 주성분인 CaCO_3 성분의 함량이 높은 NC-1이 NC-2보다 손상도가 작게 나타났고, 동일한 재료 상에서 충격에너지의 양은 Round당 75.46 Joules으로 같지만 최대 충격력이 큰 NC-2가 NC-3보다 손상도는 크게 나타났다. 콘크리트 재료의 손상도는 재료의 압축강도와 성분 함량에 따라 달라진다는 것을 알 수 있었고, 콘크리트 재료에 가해지는 충격에너지의 총 양 뿐만 아니라 충격의 크기와의 관련이 있는 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 노후화된 구조물의 손상 정도를 평가하기 위해 실험실에서 제작되어 5년 이상 경과된 콘크리트 재료를 대상으로 물성을 파악하여 상관성을 비교하였고, 콘크리트 재료에 충격을 가하여 충격 후의 탄성파속도를 측정하고 손상도를 산출하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 반발경도로 측정한 콘크리트 재료의 압축강도와 콘크리트 재료의 성분 함량을 비교하기 위해 X선 회절 및 상 분석을 실시한 결과, NC-1이 241.3 kgf/cm^2 로 가장 큰 압축강도 값을 나타냈고, 콘크리트 재료의 시멘트 주성분인 CaCO_3 성분의 함량과 Ca원소의 함량도 NC-1이 26.5%, 28.85%로 가장 높게 나타났다. 또한, NC-2는 각각 149.7 kgf/cm^2 , 15.2%, 25.53%, NC-3은 각각 156.0 kgf/cm^2 , 14.0%, 25.45%의 값을 나타냈고, NC-2와 NC-3의 압축강도 오차 값은 $\pm 3.15\text{kgf/cm}^2$, 성분 함량 오차 값은 $\pm 1\%$ 이내였다. 콘크리트 재료의 압축강도와 성분 함량에 대한 관계는 상관성이 있는 것으로 판단되지만, 측정 값의 정확성 및 오차 값의 축소를 위해 더 많은 연구가 요구된다.
- 2) 콘크리트 재료의 손상도를 평가하기 위해 측정 포인트에서 충격 후의 탄성파속도를 측정하여 산출된 손상도를 비교한 결과, NC-1의 평균 손상도는 1Round 충격 후 0.0189, 2Round 충격 후 0.0214, NC-2의 평균 손상도는 1Round 충격 후 0.0431, 2Round 충격 후 0.0597, NC-3의 평균 손상도는 1Round 충격 후 0.0211, 2Round 충격 후 0.0413의 값을 보였으며, NC-1이 NC-2, NC-3보다 가장

작은 손상도를 나타냈다. 또한, NC-1은 충격 포인트에서 가장 가까운 측정 포인트에서 손상도 변화 양상이 두드러졌으며, NC-2와 NC-3은 전반적인 손상도 증가 양상을 나타냈다.

- 3) 콘크리트 재료의 물성과 충격에너지에 따른 손상도를 비교한 결과, 압축강도가 크고 시멘트 주성분인 CaCO_3 성분이 높은 NC-1이 NC-2보다 작은 손상도를 나타냈고, 압축강도, CaCO_3 성분 및 충격에너지의 양은 유사하지만 최대 충격력이 큰 NC-2가 NC-3보다 손상도가 크게 나타났다. 동일한 충격에너지가 가해질 때 서로 다른 물성을 가진 콘크리트 재료는 압축강도와 성분 함량에 따라 손상도가 달라지고, 동일한 물성의 콘크리트 재료 일지라도 재료 표면에 가해지는 최대 충격력이 크면 재료에 더 큰 손상을 줄 수 있다고 판단된다.

참고문헌

1. 권영웅, 1992, 실존콘크리트 구조물의 강도 추정에 관하여(I), 대한건축학회지, Vol. 36, No. 1, pp. 112-118.
2. 기술표준원, 2008, 한국산업규격 KS F2730: 콘크리트 압축강도 추정을 위한 반발경도 시험방법, 지식경제부 기술표준원, pp. 1-13.
3. 김지연, 임홍철, 2001, 지반진동으로 인한 철근콘크리트 구조물의 손상도 추정, 대한건축학회지, Vol. 21, No. 2, pp. 225-228.
4. 송정언, 박훈, 김승곤, 2009, 충격 하중에 의한 콘크리트 재료의 손상에 관한 실험적 연구, 화약·발파, Vol. 27, No. 2, pp. 26-32.
5. 이규동, 임홍철, 임병호, 2006, 노후아파트 현장에서 콘크리트 압축강도 추정, 한국건축시공학회지, Vol. 6, No. 1, pp. 155-158.
6. 이상곤, 강추원, 장호민, 류복현, 김장원, 송하림, 김승은, 2010, 발파하중 및 비석의 충격에 의한 광주의 지반진동의 예측 연구, 화약·발파, Vol. 28, No. 1, pp. 1-10.
7. 이진용, 박운제, 이채규, 2008, 콘크리트구조물 유지관리, 구미서관, 서울, pp. 9-27.
8. 이정방부, 1997, 콘크리트구조물의 비파괴검사, 과학기술, 서울, pp. 3-91.
9. 천영수, 박지영, 2000, 진동측정을 이용한 구조물의 손상추정기법, 한국강구조학회지, Vol. 12, No. 4, pp. 220-227.
10. Kim, D.S and M.K. McCarter, 1998, Quantitative Assessment of Extrinsic Damage in Rock Materials, Rock Mech. Rock Engng., Vol. 31, No. 1, pp. 43-62.

**승 정 언**

전북대학교
자원·에너지공학과
박사과정

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

**박 훈**

전북대학교
자원·에너지공학과
겸임교수

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

**김 승 곤**

전북대학교
자원·에너지공학과
교수

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