

충격반향기법을 이용한 화해를 입은 고강도 콘크리트의 탄성과 특성

이준철 · 이창준* · 김화중 · 이지희[†]

경북대학교 건축토목공학부, *충북대학교 건축공학과

Characteristics of Elastic Wave in Fire damaged High Strength Concrete using Impact-echo Method

Jun Cheol Lee · Chang Joon Lee* · Wha Jung Kim · Ji Hee Lee[†]

School of Architecture and Civil Engineering, Kyungpook National Univ.

*Dept. of Architectural Engineering, Chungbuk National Univ.

(Received August 13, 2014; Revised January 20, 2015; Accepted February 4, 2015)

요 약

본 연구에서는 충격반향기법을 이용하여 화해를 입은 고강도 콘크리트의 화재손상정도를 평가하였다. 100 MPa급의 고강도 콘크리트 시편을 제조하여 100~800 °C의 고온에 2시간 동안 노출한 후 충격반향기법의 응답스펙트럼을 이용하여 시편의 탄성과 속도를 측정하였으며, 이를 이용하여 동탄성계수를 산출하였다. 이후 직접 압축강도 실험을 통해 시편의 잔존압축강도와 정탄성계수를 측정하였다. 실험결과, 노출되는 온도가 높을수록 탄성파의 속도, 동탄성계수, 잔존압축강도, 정탄성계수가 저하되는 경향을 나타냈으며, 탄성파 속도와 압축강도, 동탄성계수와 정탄성계수는 선형적인 상관관계를 나타냈다. 따라서 충격반향기법을 이용하여 화해를 입은 고강도 콘크리트의 화재손상정도를 평가하는 것이 가능하다고 판단된다.

ABSTRACT

In this study, the damages of high strength concrete exposed to high temperature have been evaluated by the impact echo method. Elastic wave velocity and dynamic modulus of elasticity were measured by the impact echo method, and the compressive strength and the static modulus of elasticity were measured by the compression testing method after exposure to high temperature. The results showed that elastic wave velocity has a linear correlation with the compressive strength and dynamic modulus of elasticity has a linear correlation with static modulus of elasticity. Based on results, it is concluded that the impact echo method can be effectively applied to evaluate the mechanical properties of fire damaged high strength concrete.

Keywords : Impact echo method, Fire damage, Elastic wave velocity, Dynamic modulus of elasticity

1. 서 론

콘크리트는 고온 조건하에서 구성성분의 열화학적 분해로 인해 구조적인 내력이 크게 저하된다. 특히, 화재에 노출된 콘크리트의 경우 화재시의 온도, 노출시간, 노출정도 등 열을 받는 조건에 따라 손상의 정도가 달라지며 탄성계수, 압축강도 등의 역학적 성질이 크게 감소된다. 따라서 화해를 입은 콘크리트의 경우 재사용을 위한 안정성 검토 및 보수보강 판단을 위해서는 반드시 화재손상정도에 대한 평가가 이루어져야 한다.

화해를 입은 콘크리트 구조물의 화재손상정도를 평가하는 가장 신뢰도가 높은 방법은 현장 코어샘플링 방법이다.

이 방법은 현장에서 직접 채취된 코어 샘플을 이용하여 잔존압축강도와 같은 역학적 성질을 평가하고, 미세구조분석을 통해 손상의 원인을 규명할 수 있다. 하지만 이 방법은 구조물 전체의 화재손상을 평가하는데 있어서는 한계가 있다. 또한 화재손상범위가 광범위할 경우, 다량의 코어 채취가 필요하며 이로 인해 구조물의 추가손상을 유발할 수 있다는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제로 인해 화해를 입은 콘크리트의 화재손상정도를 평가하기 위해 슈미트해머를 이용한 표면반발경도법, 초음파 속도법 등의 비파괴 검사의 적용을 모색하는 연구가 많이 이루어지고 있는 실정이다⁽¹⁾.

콘크리트 비파괴검사의 일환인 충격반향기법은 콘크리

[†]Corresponding Author, E-Mail: jihee@knu.ac.kr
TEL: +82-53-950-7315, FAX: +82-53-950-7315

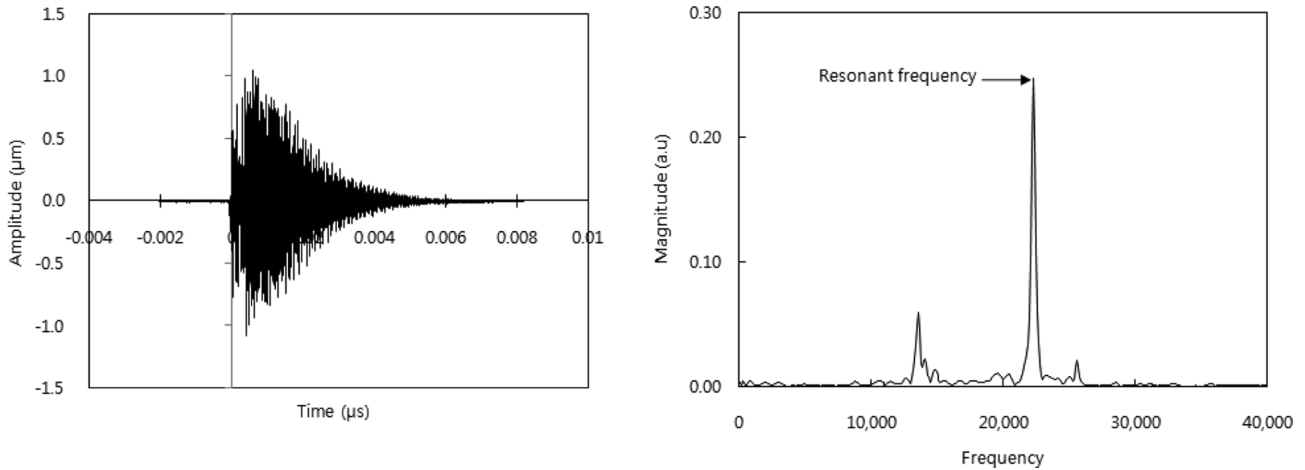


Figure 1. Conversion of time domain data to frequency domain data.

트 표면에 기계적 충격을 가하여 발생하는 탄성파의 응답을 분석함으로써 콘크리트 구조물의 품질을 평가하는 방법이다. Sansalone 등은 충격반향기법을 이용하여 콘크리트 슬래브의 품질 및 표면균열에 대한 연구를 수행하였으며^(2,3), Lin 등은 콘크리트 보와 기둥의 손상에 대한 연구를 수행하였다⁽⁴⁾. 충격반향기법을 이용해 콘크리트의 구조적인 성질을 규명하는 연구뿐만 아니라 Tawhed 등과 Kesner 등과 같이 시멘트 매트릭스에 있어서 에트링가이트 형성이나 알칼리실리카반응과 같은 재료적인 성질을 규명하는데 있어서도 이 방법을 사용하고 있다^(5,6). Ghorbanpoor 등은 충격반향기법이 시험방법의 단순성으로 인해 광범위한 콘크리트 구조물의 비파괴 검사에 있어서 아주 용이하며 사용되어질 수 있으며, 안전성으로 인해 화해를 입은 콘크리트 구조물의 화재손상정도를 평가하는데 유용한 방법이 될 수 있다고 했다⁽⁷⁾. 실제 Epasto 등은 화해를 입은 철근 콘크리트에 충격반향기법을 이용하여 충격신호의 연속 웨이블릿 변환을 통해 화재 손상정도를 평가하였다⁽⁸⁾. Shin 등은 단열패널로 피복된 콘크리트에 충격반향기법을 적용하여 탄성파 속도를 통해 콘크리트의 잔존압축강도를 평가하기도 하였다⁽⁹⁾.

따라서 본 연구에서는 화해를 입은 콘크리트의 화재손상정도를 평가하기 위한 비파괴검사의 일환으로 충격반향기법의 적용가능성을 검토해보고자 한다. 이를 위해 100 MPa급의 고강도 콘크리트를 고온에 노출시킨 후 충격반향기법의 응답스펙트럼을 분석해 탄성파의 속도와 동탄성계수를 산출하여 잔존압축강도와 정탄성계수와 상관계수를 비교분석하고자 한다.

2. 충격반향기법

충격반향기법은 콘크리트의 표면에 충격을 가하여 생성되는 탄성파가 반사되어 표면으로 돌아오는 파형을 검토하여 콘크리트 구조체의 품질을 판정하는 기법이다. 여기

에서는 충격반향기법을 이용하여 발생하는 탄성파의 속도와 콘크리트 구조체의 동탄성계수를 산출하는 방법에 대해서 간단히 소개하도록 한다. 콘크리트 구조체 표면에 충격을 가하게 되면 탄성파가 유발되고, 탄성파는 구조체 내부로 전파되어 불연속면에서 반사되어 반향파를 발생시킨다. 이 반향파는 콘크리트 구조체 표면에서 다시 반사된다. 이러한 표면과 불연속면 사이에서 탄성파의 반복 반사작용으로 콘크리트 구조체는 공진상태가 유발된다. 공진시 충격을 가하는 두께(T)방향으로 발생하는 탄성파의 파장(λ)은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\lambda = 2T \quad (1)$$

발생하는 탄성파의 속도(V_p)는 콘크리트 구조체의 두께(T)와 공진주파수(f_r)를 이용하여 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$V_p = \lambda \cdot f_r \quad (2)$$

이때 공진주파수는 Figure 1과 같이 시간영역에서의 응답을 FFT 신호처리 기법을 통해 주파수 영역에서의 응답으로 변환하여 결정하게 된다⁽¹⁰⁾.

여기에서 콘크리트의 밀도(ρ)를 알고 있다면 탄성파 속도로부터 콘크리트 구조체의 동탄성계수는 식 (3)과 같이 산출할 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$E_d = \rho \cdot V_p^2 \quad (3)$$

3. 실험내용 및 방법

3.1 시편의 제작

본 실험에서는 압축강도 100 MPa급의 고강도 콘크리트를 시편으로 하였으며, 콘크리트의 배합비는 Table 1과 같다. 본 실험에서는 고강도 배합을 위해 최대치수 10 mm의 화강암류 부순자갈을 굵은 골재로 사용하였다. 고강도 콘

Table 1. Mixture Proportion of High Strength Concrete

W/B (%)	S/a (%)	SP (%)	Unit weight (kg/m ³)				
			Binder			Sand	Coarse aggregate
			OPC	Silica fume	Fly ash		
17	35	1.0	680	102	102	485	891

Note: W/B = water to binder ratio, S/a = sand to coarse aggregate ratio, SP = superplasticizer, OPC = ordinary portland cement

콘크리트의 경우 고온 노출시 내부 수분증발에 의한 폭렬현상이 발생할 수 있기 때문에 이를 방지하기 위해 본 실험에서는 콘크리트 배합시 폴리프로필렌 섬유 0.05 vol.%와 나일론 섬유 0.05 vol.%를 혼입하였다. 콘크리트 시편은 지름 50 mm, 높이 100 mm로 제작하였다. 제작된 시편은 타설 1일 경과 후 탈형하여 25일간 21 ± 1 °C의 수중에서 양생을 실시하였으며, 이후 시편의 수분함량을 일정하게 하기 위해 온도 23 ± 2 °C, 상대습도 60 ± 5%의 항온항습조에서 2일간 양생을 실시하였다.

콘크리트의 화재손상 정도를 평가하기 위해 28일간 양생된 시편을 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C를 목표온도로 하여 가열로에서 가열을 실시하였다. 가열로의 가열속도는 10 °C/min로 하였으며, 목표온도에 도달한 후 2시간 동안 가열온도를 유지시켜 시편의 내부수열온도가 가열로의 온도와 유사해지는 것을 확인한 후에 상온까지 자연 냉각시켰다. 이후 시편을 온도 23 ± 2 °C, 상대습도 60 ± 5%의 항온항습조에서 1일간 보관하였다.

3.2 실험방법

준비된 시편은 충격반향실험을 실시하여 탄성파의 속도와 시편의 동탄성계수를 각 온도별 시편 5개에 대해 평균하여 산출하였다. 충격반향실험의 전체적인 구성은 Figure 2와 같다. 충격원은 지름 5 mm, 중량 6.5 g의 쇠구슬을 이용하였으며, 신호조정기(signal conditioner)로는 초소형가속도계(PCB Inc. Model: 352A60)를 사용하였다. 시편에서 10 cm가량 떨어진 위치에서 쇠구슬로 타격을 하였으며, 감지된 신호는 동적신호획득장치(dynamic signal acquisition module)를 이용하여 신호를 획득하였으며 FFT 신호처리 기법을 통해 시간영역에서의 데이터를 주파수 영역에서의 신호로 변환하여 분석하였다. 주파수 영역으로 변환된 신호를 이용하여 공진주파수를 결정하였으며 탄성파의 속도

는 식 (2)와 같이 산출하였으며, 시편의 동탄성계수는 식 (3)과 같이 산출하였다. 한편 동탄성계수 산출에 사용된 콘크리트의 밀도는 시편의 중량을 부피로 나누어 단순 계산하였다.

화해를 입은 콘크리트의 잔존압축강도와 정탄성계수를 측정하기 위해 충격반향실험이 종료된 시편을 이용하여 압축강도 실험을 실시하였다. 콘크리트의 압축강도 실험은 KS F 2405⁽¹¹⁾에 의거 실시하였으며, 압축시 변형률의 측정은 JSCE-SF5⁽¹²⁾에 의거 실시하였다. 한편 콘크리트의 정탄성계수는 압축강도 실험에서 측정된 응력-변형률 곡선에서 최대응력의 1/3에 가장 근접한 측정값을 이용하여 산출하였다⁽¹³⁾. 측정된 압축강도와 정탄성계수는 각 온도별 시편 5개에 대해 평균하여 산출하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 잔존압축강도 및 정탄성계수

Figure 3은 고온 노출 후 콘크리트의 평균 잔존압축강도를 나타낸 것이다. 시편이 노출되는 온도가 상승함에 따라 잔존압축강도는 감소하는 경향을 나타냈으며, 특히 200 °C 이후에 현저한 압축강도의 저하를 나타냈다. 이는 기존의 연구결과들과 유사한 현상을 나타내고 있다^(14,15).

Figure 4는 온도에 따른 콘크리트 시편의 정탄성계수 변화를 나타낸 것이다. Wu⁽¹⁵⁾와 Poon⁽¹³⁾의 연구에서는 고강도 콘크리트에 있어서 200 °C에서 600 °C까지의 온도 노출 하에서 정탄성계수는 현저히 저하되며, 100 °C에서 200 °C까지의 온도와 600 °C에서 900 °C까지의 온도에서는 정탄성계수의 저하가 완만하다고 하였다. 본 실험결과에서도 기존의 연구와 유사하게 200 °C에서 600 °C까지의 구간에서 정탄성계수의 급격한 저하를 나타냈으며, 상온에서 200 °C까지의 온도구간과 600 °C에서 800 °C까지의 온도구간은 상대적으로 정탄성계수의 완만한 저하를 나타냈다.

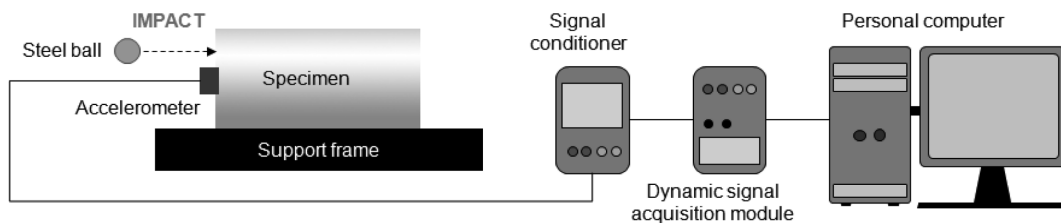


Figure 2. Test setup for impact echo method.

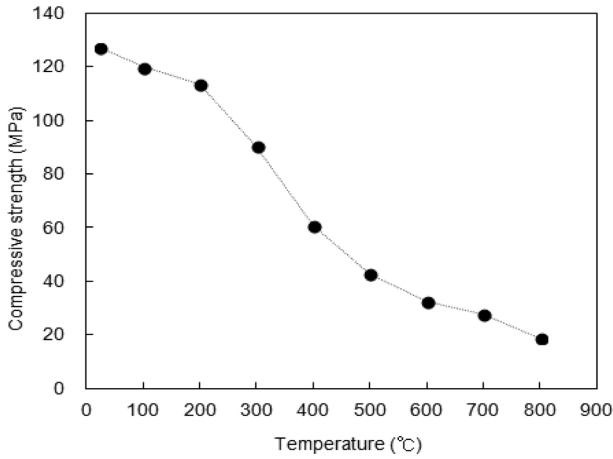


Figure 3. Compressive strength of concrete after exposure to high temperature.

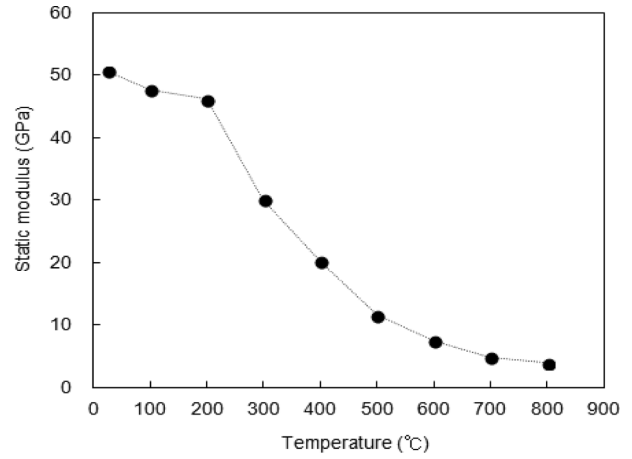


Figure 4. Static modulus of elasticity after exposure to high temperature.

4.2 충격반향기법 응답스펙트럼 및 동탄성계수

Figure 5는 충격반향기법에 의해 측정된 고온 노출 후 콘크리트 시편의 주파수 영역에서의 응답스펙트럼을 나타낸 것이다. 시편의 가열온도에 따라 충격반향 응답스펙트럼에서

잡음이 발생하지만 피크의 크기가 매우 큰 공진주파수가 형성되는 것을 파악할 수 있었다. 전체적으로 시편이 노출되는 온도가 높을수록 충격반향기법에서 측정된 공진주파수는 저주파수 대역으로 이동하는 경향을 나타냈

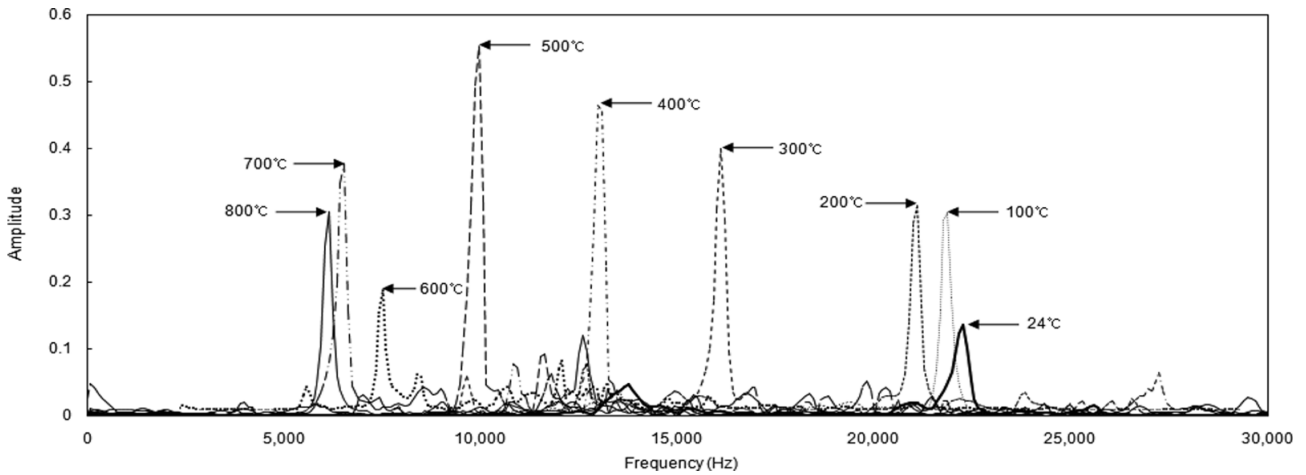


Figure 5. Response spectrum after exposure to high temperature.

Table 2. Calculation of Dynamic Modulus

Temperature (°C)	Peak of frequency on spectrum (Hz)	Density (g/cm ²)	Velocity (m/s)	Dynamic modulus (GPa)
24	22,128	2.48	4,425	48.48
100	21,835	2.46	4,367	46.83
200	21,230	2.37	4,246	42.76
300	16,284	2.33	3,256	24.72
400	13,125	2.30	2,625	15.87
500	10,097	2.30	2,019	9.38
600	6,542	2.28	1,308	3.90
700	5,859	2.25	1,171	3.09
800	5,269	2.20	1,053	2.44

다. 공진주파수는 200 °C에서 600 °C의 온도구간에서 급격한 이동을 나타냈으며, 상온에서 200 °C까지의 온도구간과 600 °C에서 800 °C의 온도구간에서는 상대적으로 공진주파수의 이동폭이 작은 것으로 나타났다. 상온에서 측정된 시편의 공진주파수와 대비하여, 200 °C의 경우 4%, 600 °C의 경우 70%, 800 °C의 경우 76%가 저주파수 영역으로 이동하는 것으로 나타났다.

Table 2는 충격반향기법에 의해 측정된 공진주파수를 이용하여 산출된 탄성파의 속도와 시편의 동탄성계수를 나타낸 것이다. 시편이 고온으로 노출됨에 따라 탄성파의 속도와 동탄성계수는 저하되는 경향을 나타냈다. 온도에 따른 압축강도 및 정탄성계수의 거동과 유사하게 200 °C에서 600 °C의 온도구간에서 탄성파의 속도와 동탄성계수의 급격한 저하가 나타났으며, 상온에서 200 °C까지의 온도구간과 600 °C에서 800 °C의 온도구간에서는 상대적으로 완만한 저하가 나타났다.

4.3 충격반향기법과 압축실험간의 상관관계

Figure 6은 화해를 입은 콘크리트의 충격반향기법을 통해 획득된 탄성파의 속도와 압축실험을 통해 획득된 잔존 압축강도와의 상관관계를 나타낸 것이며 Figure 7은 충격반향기법을 통해 획득된 동탄성계수와 압축실험을 통해 획득된 정탄성계수의 상관관계를 나타낸 것이다. 탄성파 속도-잔존압축강도의 관계와 동탄성계수-정탄성계수의 관계는 매우 선형적인 상관관계를 나타내고 있음을 알 수 있다.

일반적으로 콘크리트가 고온의 영향을 받는 경우 내부 미세구조의 변화로 인해 역학적 성질이 저하되게 된다. 이러한 미세구조의 변화는 탄성파의 산란에도 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이로 인해 명확한 탄성파의 속도를 측정하는 것이 매우 어렵다. 특히 폭렬을 방지하기 위해 유기섬유가 포함되는 고강도 콘크리트의 경우는 고온에 노출될 경우 내부공극의 변화가 발생하는 등 미세구

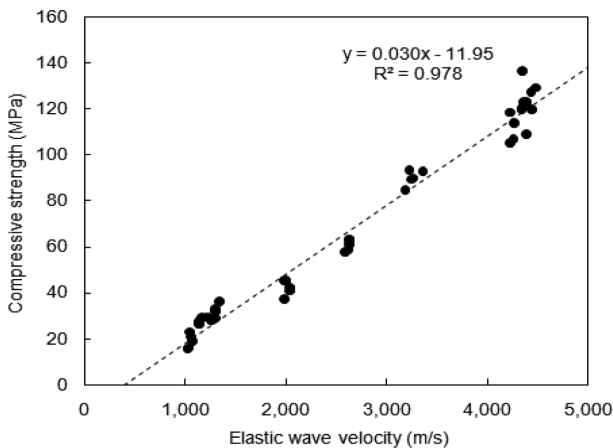


Figure 6. Relationship between compressive strength and elastic wave velocity for the concrete exposed to high temperature.

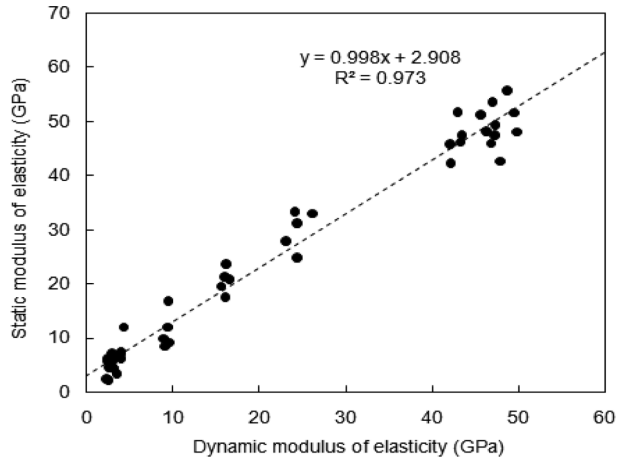


Figure 7. Relationship between static modulus of elasticity and dynamic modulus of elasticity for the concrete exposed to high temperature.

조의 변화가 더욱 심하게 된다. 그럼에도 불구하고 본 실험의 결과에서 알 수 있듯이 충격반향기법에서는 Figure 5에서와 같이 탄성파의 산란이 공진주파수의 위치에서 상대적 크기에만 영향을 미치며 공진주파수의 위치에는 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 이는 충격반향기법을 이용하여 고온의 영향을 받은 단열피복된 콘크리트의 화재손상을 평가한 Shin의 연구결과와 부합한다⁹⁾. 따라서 충격반향기법에서는 명확한 공진주파수의 위치를 결정할 수 있으며 이를 통해 계산되어지는 탄성파의 속도도 명확하게 산출되어질 수 있다. 탄성파 속도의 명확성과 탄성파 속도와 잔존압축강도간의 선형적인 상관관계를 통해 100 °C에서부터 800 °C까지의 온도구간에서 화해를 입은 100 MPa급 고강도 콘크리트의 잔존압축강도와 정탄성계수 등의 화재손상정도를 충격반향기법을 이용하여 평가할 것이 가능하다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 100 °C에서부터 800 °C까지 매 100 °C의 고온에서 화해를 입은 100 MPa급 고강도 콘크리트의 화재손상정도를 평가하기 위해 충격반향기법을 적용하였으며 결론은 다음과 같다.

- 1) 화해를 입은 콘크리트에 충격반향기법을 적용한 결과 응답스펙트럼에서 뚜렷한 공진주파수의 변화를 발견할 수 있었으며, 이를 이용하여 명확한 탄성파의 속도를 산출할 수 있었다.
- 2) 탄성파의 속도는 콘크리트의 잔존압축강도와 선형적인 관계를 나타냈으며, 탄성파의 속도를 이용하여 산출된 콘크리트 동탄성계수는 압축실험을 통해 산출된 정탄성계수와 선형적인 관계를 나타내고 있음을 알 수 있었다.
- 3) 따라서 충격반향기법을 이용하여 화해를 입은 고강도

콘크리트의 화재손상정도를 평가하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2011-0023579) 및 국토교통부가 주관하고 국토교통과학기술진흥원이 시행하는 2014년도 첨단도시개발사업 09첨단도시A01 과제에 의해 수행됨.

References

1. R. Felicetti, "The Drilling Resistance Test for the Assessment of Fire Damaged Concrete", *Cement and Concrete Composite*, Vol. 28, No. 4, pp. 321-329 (2006).
2. M. Sansalone and N. J. Carino, "Detecting Delaminations in Concrete Slabs with and without Overlays Using the Impact-echo Method", *ACI Materials Journal*, Vol. 86, No. 2, pp. 175-184 (1989).
3. M. Sansalone, J. M. Lin and W. B. Street, "Determining the Depth of Surface-opening Cracks Using Impact-generated Stress Waves and Time-of-flight Techniques", *ACI Materials Journal*, Vol. 9, No. 2, pp. 168-177 (1998).
4. Y. Lin and M. Sansalone, "Detecting Flaws in Concrete Beams and Columns Using the Impact-echo Method", *ACI Materials Journal*, Vol. 89, No. 4, pp. 394-405 (1992).
5. W. F. Tawhed and S. L. Gassman, "Damage Assessment of Concrete Bridge Decks Using Impact-echo Method", *ACI Materials Journal*, Vol. 99, No. 3, pp. 273-281 (2002).
6. K. Kesner, M. Sansalone and P. W. Poston, "Detection and Quantification of Distributed Damage in Concrete Using Transient Stress Waves", *ACI Materials Journal*, Vol. 101, No. 4, pp. 318-326 (2004).
7. A. Ghorbanpoor and N. Benish, "Non-destructive Testing of Wisconsin Highway Bridge", *Wisconsin Highway Research Program Final Report*, Wisconsin Department of Transportation (2003).
8. G. Epasto, E. Proverbio and V. Venturi, "Evaluation of Fired-damaged Concrete Using Impact Echo Method", *Materials and Structures*, Vol. 43, pp. 232-245 (2010).
9. S. W. Shin, S. Y. Kim and J. S. Kim, "Applicability of Impact-echo Method for Assessment of Residual Strength of Fire-damaged Concrete", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 17, No. 5, pp. 105-112 (2013).
10. IAEA, "Guidebook on Non-destructive Testing of Concrete Structures" (2002).
11. KS F 2405, "Method of Test for Compressive Strength of Concrete" (2010).
12. JSCE, "JSCE-SF5: Method of Test for Compressive Strength and Compressive Toughness of Steel Fibre-Reinforced Concrete", *Concrete Library of JSCE* (1984).
13. C. S. Poon, Z. H. Shui and L. Lam, "Compressive behavior of Fiber Reinforced High Performance Concrete Subjected to Elevated Temperature", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 12, pp. 2215-2222 (2004).
14. C. S. Poon, S. Azhar and Y. L. Wong, "Performance of Metakaolin Concrete at High Temperatures", *Cement and Concrete Composite*, Vol. 25, No. 1, pp. 83-89 (2003).
15. B. Wu, X. P. Su and J. Yuan, "Effect of High Temperature on Residual Mechanical Properties of Confined and Unconfined High Strength Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 99, No. 4, pp. 399-479 (2004).