

일방향 철근 콘크리트 슬래브의 폭발 피해 분석을 위한 최적의 비파괴검사법에 관한 연구

이승재 · 오태근* · 박종일** · 김희식†

서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과 · *인천대학교 안전공학과 · **서울과학기술대학교 안전공학과
(2017. 6. 30. 접수 / 2017. 10. 9. 수정 / 2017. 10. 12. 채택)

The Study on the Optimal NDT Method for the Explosion Damage Analysis for One-way RC Slabs

Seoung-Jae Lee · Tae-Keun Oh* · Jong-Yil Park** · Hie Sik Kim†

Department of Electronic Engineering, University of Seoul

*Department of Safety Engineering, Incheon National University

**Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology

(Received June 30, 2017 / Revised October 9, 2017 / Accepted October 12, 2017)

Abstract : It is necessary to analyze on the compressive strength among material properties of concrete for confirming damages of architectures due to large explosion. A non destructive test is known as the representative methods estimating compressive strength and ultrasonic pulse velocity, rebound hardness test are widely used because of their simplicity, convenience. But combined method supplementing two types is applied at now as they are affected by the characteristics of test specimen. In this research to check damages on the members of structure before and after explosion, the characteristics of compressive strength are compared and analyzed through a real explosion test prior to full scale structures. The test results showed that the larger the TNT powder and the shorter the distance, the greater the decrease in strength before and after the explosion and that the largest displacement and moment for the explosive load and the greatest decrease in the strength at the central part. Due to the surface condition and the thickness variation of the concrete specimens, the standard deviation value is the smallest in the combining method of fusion of the ultrasonic method and rebound hardness method. Thus, the combining method can be one of appropriate methods to evaluate the strength in the reinforced concrete structures damaged by the explosion.

Key Words : one-way RC slab, explosion damage, ultrasonic pulse velocity, rebound hardness test, combining method

1. 서론

철근 콘크리트는 모든 실생활 전 분야에 걸쳐 널리 사용되고 있는 건설 부재이다. 흔히 쓰이고 있는 철근 콘크리트 구조물은 화재, 범죄, 테러, 전쟁 등과 같은 다양한 사회적인 위협에 쉽게 노출되어 있다. 이와 같은 위협들은 방화, 전기 발화 등에 의한 화재, 9.11 테러와 같은 비행체를 이용한 충돌 후 붕괴, 폭발물, 무기 등과 같은 폭발 피해 등이 있을 수 있다. 그 중에서도 폭발 피해는 화재, 충돌 후 반드시 수반되는 현상이므로 이에 대한 피해를 예측하고 그 결과를 분석하는 것은 중요한 사실이다.

그러나 건축물 전체에 대한 폭발 피해를 예측해서 실증 실험을 통해 결과를 분석하기에는 현실적으로 한계가 많다. 따라서 실제 구조물에 대한 예측과 분석에 선행하여 슬래브, 보와 같은 단위 구조의 부재에 관한 해석과 검증이 선행되어야 한다¹⁾.

콘크리트 구조물의 폭발 피해에 대한 내력을 평가하기 위해서는 콘크리트의 다양한 물성 요소 중 압축 강도에 대한 분석은 중요하다. 압축 강도를 확인할 수 있는 여러 방법 중에서도 비파괴검사가 상용화되어 있는데 그 중에서도 초음파 속도법, 반발경도법은 검사 방법이 단순하고 효율적이어서 검사 방법이 개발된 1960년대 이후로 지속적으로 적용되고 있다.

† Corresponding Author : Hie Sik Kim, Tel : +82-2-6490-2322, E-mail : hskim@uos.ac.kr

Department of Electronic Engineering, University of Seoul, 163 Seoulsiripdaero, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Korea

그러나 비파괴검사의 부정확성과 한계로 미국, 일본 등과 같은 국가에서는 압축 강도 추정을 불가능하거나 보조 수단으로 규정하고 있다. 다만 유럽 일부 국가에서는 규정하고 있으나 국내에서도 보완이 필요하다고 여겨지고 있는 상황이다²⁾.

본 연구에서는 일방향 철근 콘크리트 슬래브의 폭발에 의한 피해 예측을 위해 실제 폭발 실험을 통해 폭발 전후의 구조 부재의 손상 정도를 비파괴검사 중 초음파 속도법, 반발경도법과 두 방법을 융합한 복합법을 적용하여 분석, 평가하고 검증하였다.

2. 실험 설계

2.1 재료 모델

본 실험에 사용한 시편은 2350 mm(길이)×1500 mm(폭)×150 mm(두께) [이하 RC150으로 표기], 2350 mm(길이)×1500 mm(폭)×200 mm(두께) [이하 RC200으로 표기] 철근 콘크리트 슬래브를 사용하였고, 일방향 조건을 위해 상부와 하부를 150 mm씩 고정 지지하였다. 각 부재의 배근도와 치수는 Fig. 1, 2와 같다.

비파괴검사는 다양한 방법이 있으나 실험적 간편성과 효율성으로 초음파 속도법(UPV : Ultrasonic Pulse Velocity), 반발경도법(RHT : Rebound Hardness Test), 그리고 두 방식을 융합한 복합법(CM : Combining Method)를 적용하였다³⁾. Fig. 3과 같은 시험격자를 이용하였고 슬래브 고정을 위한 지지대와 경계면에서의 반사파의 영향을 최소화하기 위해 슬래브의 양단으로부터 가로 110 mm, 세로 100 mm의 간격을 두었다. 시험격자의 크기는 가로 260 mm, 세로 265 mm이며 좌표는 가로 방향은 부재 좌측 부분부터 A, B, C, D, E,

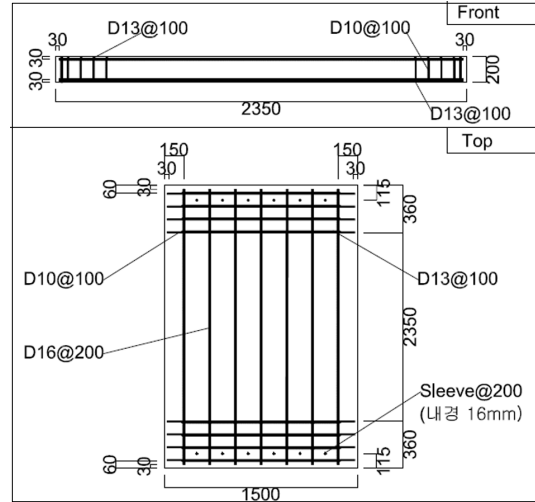


Fig. 2. Arrangement of bar for RC200 slab.

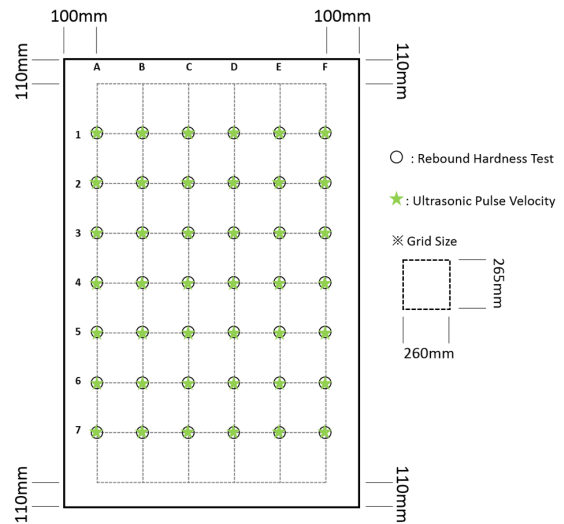


Fig. 3. Test grids of RC slabs.

F로 부여하고 세로 방향은 상단 부분부터 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7로 명명하였다.

2.2 손상 평가 방법

2.2.1 초음파 속도법 (UPV : Ultrasonic Pulse Velocity)

초음파 속도법은 대상 콘크리트 구조물을 통과하는 초음파 펄스 속도로부터 콘크리트의 압축강도를 추정하는 방법이다. 콘크리트에서 초음파 속도를 측정하는 방식은 Fig. 4와 같이 직접법, 간접법, 반직접법이 있으며 조건에 따라 적절한 방식을 선정해야 한다. 가능하다면 직접법을 사용하는 것이 가장 정확한 결과를 기대할 수 있으나, 불가피하게 간접법을 사용해야 하는 경우에는 일반적인 콘크리트에 대해 식 (1)을 이용하여 직접법에 의한 초음파 전파속도를 추정할 수 있다⁴⁾.

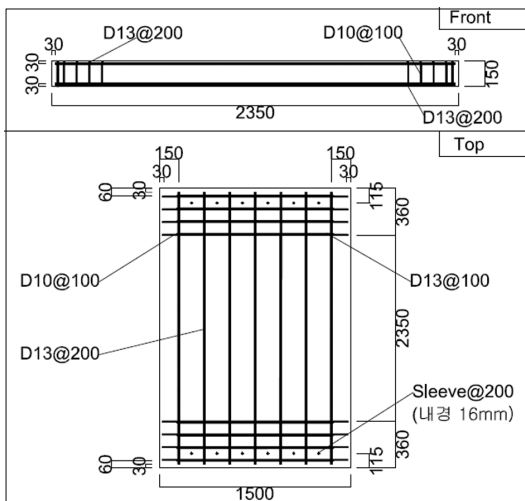


Fig. 1. Arrangement of bar for a RC150 slab.

$$V_d = 1.05 V_i \quad (1)$$

여기서 V_d 는 직접법에 의한 초음파 속도, V_i 는 간접법에 의한 초음파 속도를 나타낸다⁴⁾.

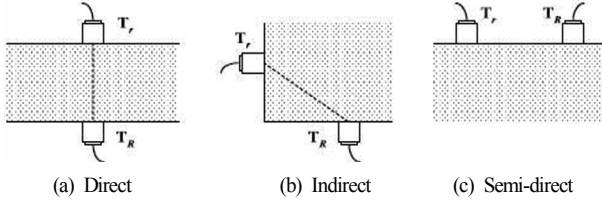


Fig. 4. Types of UPV measurement.

실제 실험에서는 직접법을 이용하여 MKC Korea 사의 Ultracon-170 장비에 실제 두께를 입력한 뒤 실험 위치에서 다수 측정하여 획득한 초음파 속도 데이터들의 평균값을 구했다.

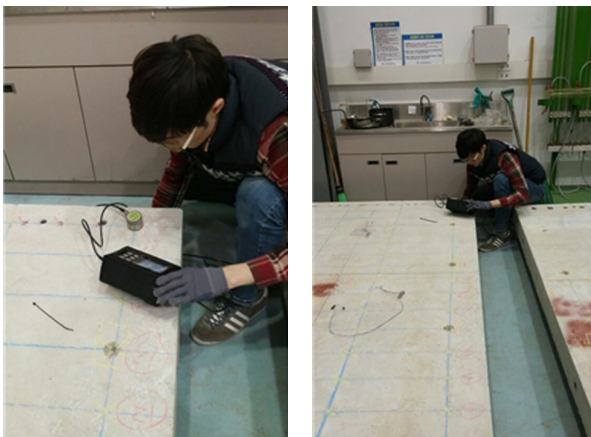


Fig. 5. UPV test.

2.2.2 반발경도법 (RHT : Rebound Hardness Test)

반발경도법은 콘크리트의 표면 경도를 측정하여 이를 근거로 콘크리트의 압축 강도를 판정하는 방식으로 슈미트 해머 방식이 가장 일반적이다. 슈미트 해머 방식은 콘크리트의 강도에 따라 달라지는 반발도를 이용하는 것으로 방법이 간단하나 콘크리트의 표면 품질과 타격 조건에 따라 결과에 영향이 있다. 반발도(R)와 콘크리트 압축 강도(F_c) 사이에는 실험을 통한 경험적 상관관계가 있으며 이를 이용하여 압축 강도를 추정하게 된다.⁴⁾

반발도는 표시된 그리드를 따라 스위스 procoq 사의 Silver schmidt를 이용하여 측정하였으며, 장비 패키지에 포함된 가이드를 따라 시험격자점을 중심으로 9개소를 타격한 평균값이 자동으로 장비에 표시되게 하였다.



Fig. 6. Rebound hardness test.

2.2.3 복합법 (CM : Combining Method)

복합 비파괴검사 중 복합법은 초음파 속도법과 반발경도법을 융합한 방법으로 개별 시험에 비해 신뢰도가 높다고 알려져 있다. 콘크리트 구조체에서 초음파 속도 실험을 실시한 후 동일 부위에 반발경도법을 수행하고 여기서 얻은 데이터를 복합 선형회귀 분석식을 얻기 위한 독립 변수로 사용한다. 또한 비파괴검사를 실시한 동일 부위에 코어를 채취하고 파괴 실험을 실시해 획득한 압축 강도를 종속 변수로 사용한다²⁾. 이와 같이 얻어진 식은 초음파 펄스속도나 반발경도만을 이용한 단일 비파괴검사 결과보다 더욱 정확한 강도 예측이 가능하며, Wiebenga에 의해 제안된 회귀분석 방정식을 적용할 수 있다⁵⁾.

$$\text{Log}S = aV + bR - c \quad (2)$$

여기서 S는 콘크리트 압축강도(MPa), V는 펄스 속도(m/sec), R은 Rebound number, a, b, c는 상수이다.

Facaoaru는 복합 비파괴 검사법의 사용에 관한 가장 종합적인 자료를 발표하였으며, 표준 콘크리트 배합 시 초음파 펄스 속도와 반발경도 값만 알면 압축 강도를 확인할 수 있는 강도 환산 곡선을 만들었다. 특히 골재의 형태나 종류 또는 콘크리트 배합 시 다양한 변수들을 처리할 수 있는 보정 계수를 제시하였다. 이와 같은 복합 비파괴 검사법이 현장 콘크리트의 압축 강도 추정을 위해 루마니아의 여러 건축 현장에서 사용되었는데, 초음파 펄스 속도법과 반발경도법을 각각 사용하였을 때와 두 검사법을 복합적으로 사용하였을 때보다 정확한 강도 예측값을 보이고 있는 것으로 나타났다²⁾.

복합 비파괴 검사법을 사용함으로써 통계적으로 압축 강도의 추정 정도가 향상되는 원인은 정확하게 알려

저 있지 않으나, Elvery나 Forrester는 이러한 원인이 아마도 강도 추정의 정확도를 향상시킬 수 있는 실험 데이터 모집단을 증가시키기 때문이라 판단하고 있다²⁾. 그러나 Facaorau에 의한 복합 비파괴 검사법에 의한 강도 추정은 각각의 두 검사를 실시하여 얻어진 강도의 단순한 평균 강도가 아니라는 점이다. 복합 비파괴검사에 의한 강도 추정이 코어 또는 시편에 의해 얻어지는 실제 강도와 가장 가까운 결과치를 얻고 있기 때문에 그 신뢰도가 높다. 복합법을 이용한 강도 계측은 초음파 속도법, 반발경도법과 동일한 시험격자를 따라 총 42개소의 위치에 대해 수행되었다.

3. 실험 결과

3.1 실험 시편의 명명

실험 시편은 길이 2,350 mm, 폭 1,550 mm인 일방향 철근 콘크리트 슬래브 부재를 Table 1과 같이 2, 3, 4차 폭발 실험에 대해 슬래브 두께별로 두께가 150 mm인 부재는 RC150, 200 mm인 부재는 RC200으로 구분하고 각 검사법에 따른 결과를 정리하였다. 예를 들어 2차 실험의 폭발 전에 대한 두께 150 mm의 시편에 대해 초음파법의 시편은 2A1으로 호칭하고 이에 대한 초음파 속도는 2A1-초음파 속도, 추정 강도는 2A1-추정 강도와 같이 구분하였다.

한편 Table 1의 4B1, 4D1, 4D2, 4F1, 4F2 등에 X가 표시된 결과는 실험체 손상이 심하여 시험이 어려운 경우를 나타낸다. 단 4차 실험 후의 RC150B에 한하여 (4B2) 일부 영역에 대해 초음파속도법의 측정은 가능하였다.

Table 1. Naming of test specimens

Div.	UPV		RHT		CM	
	Before Explosion	After Explosion	Before Explosion	After Explosion	Before Explosion	After Explosion
2nd RC150	2A1	2B1	2C1	2D1	2E1	2F1
2nd RC200	2A2	2B2	2C2	2D2	2E2	2F2
3rd RC150A	3A1	3B1	3C1	3D1	3E1	3F1
3rd RC150B	3A2	3B2	3C2	3D2	3E2	3F2
3rd RC150C	3A3	3B3	3C3	3D3	3E3	3F3
4th RC150A	4A1	4B1	4C1	4D1	4E1	4F1
4th RC150B	4A2	4B2	4C2	4D2	4E2	4F2

3.2 폭발 실험 방법

폭발 전후 양상을 분석하기 위해 일방향 철근 콘크리트 슬래브 부재에 대해 폭발 하중으로써 TNT 화약을 적용하고 거리별로 부재를 배치하여 거리에 따른 피해 양상을 분석하였다. 각 차수별 실험 조건은 Table 2와 같다.

Table 2. Condition of explosion test

Test Round	Name of Specimen	Weight of TNT (kg)	Standoff Distance (m)
2	RC150	100	15
	RC200		
3	RC150A	100	10
	RC150B		
	RC150C	50	4.5
4	RC150A	100	5
	RC150B		7

3.3 초음파 속도법

초음파 속도법을 이용한 강도 추정에는 Table 3의 식들을 적용하였다. 예를 들어 2차 실험 시편 RC150에 대한 폭발 전후의 초음파 속도와 추정 강도값은(2A1, 2B1) Table 4, 5에 나타내었다. 또한 측정된 초음파 속도와 추정된 압축 강도의 분포를 쉽게 확인하기 위해 MATLAB을 이용하여 Fig. 7의 Contour plot으로 표현하였다.

Table 3. Prediction equations of compressive strength by UPV⁶⁾

Div.	Prediction Equation
Architectural Institute of Japan.	$F_c = 215 V_p - 620$
J. Pysiaki	$F_c = 92.5 V_p^2 - 508 V_p + 782$
KEPCO Research Institute	$F_c = 339.1 V_p - 1107$

F_c : Compressive Strength (kg/cm²) V_p : P-wave velocity(km/s)

Table 4. Measured UPV and estimated compressive strengths for 2A1

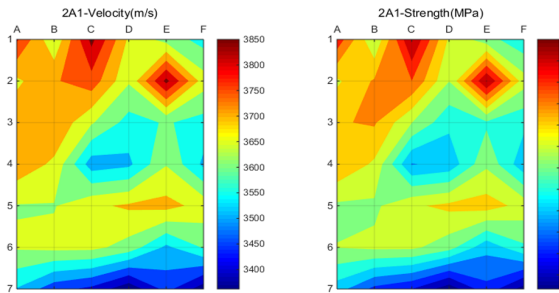
No	Test Point	Arrival time (μ s)	Vp (m/s)	Architectural Institute of Japan (MPa)	J. Pysiaki (MPa)	KEPCO Research Institute (MPa)	Avg (MPa)
1	A-1	40.7	3808	19.47	18.5	18.06	18.67
2	A-2	42	3690	16.98	16.36	14.13	15.82
}							
41	F-6	43	3605	15.19	14.97	11.31	13.82
42	F-7	46	3370	10.24	11.81	3.5	8.51

Table 5. Measured UPV and estimated compressive strengths for 2B1

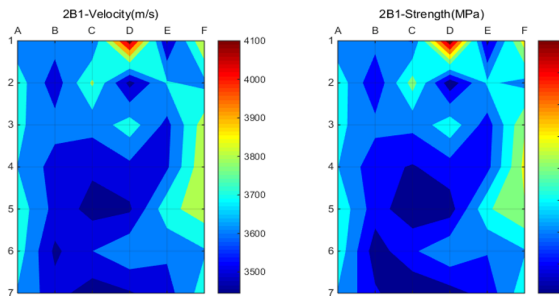
No	Test Point	Arrival time (μ s)	Vp (m/s)	Architectural Institute of Japan (MPa)	J. Pysniak (MPa)	KEPCO Research Institute (MPa)	Avg (MPa)
1	A-1	41.2	3638	15.89	15.49	12.41	14.59
2	A-2	40.0	3753	18.31	17.47	16.23	17.33
}							
41	F-6	40.7	3690	16.98	16.36	14.13	15.82
42	F-7	40.0	3753	18.31	17.47	16.23	17.33

Table 7. Measured rebound values and estimated compressive strengths for 2C1

No	Test Point	Rebound No. (n=9)	Society of Materials Science, Japan (MPa)	Japan Testing Center For Construction Materials (MPa)	EMPA (MPa)	Avg. (MPa)
1	A-1	25	13.82	13.72	13.87	13.80
2	A-2	32	22.74	20.58	23.92	22.42
}						
41	F-6	26.5	15.73	15.19	16.02	15.65
42	F-7	29.5	19.55	18.13	20.33	19.34



(a) 2A1



(b) 2B1

Fig. 7. Estimated UPV and compressive strength for 2A1 and 2B1.

3.4 반발경도법

측정된 반발도를 이용한 강도추정식은 Table 6과 같다. 예를 들어 2차 실험 RC150에 대한 폭발 전후의 반발도 및 추정 강도는 Table 7, 8과 같다. 또한 측정된 반발도 및 추정된 압축 강도의 분포를 쉽게 확인하기 위해 MATLAB을 이용하여 Fig. 8의 Contour plot으로 표현하였다.

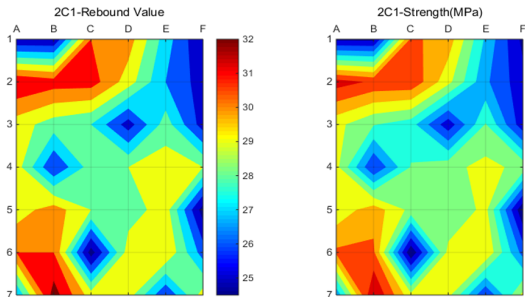
Table 6. Prediction equations of compressive strength by schmidt hammer test⁷⁾

Div.	Prediction Equation
EMPA Science and Technology	$F_c = 14.66R - 225$
Society of Materials Science, Japan	$F_c = 13R - 184$
Japan Testing Center For Construction Materials	$F_c = 10R - 110$

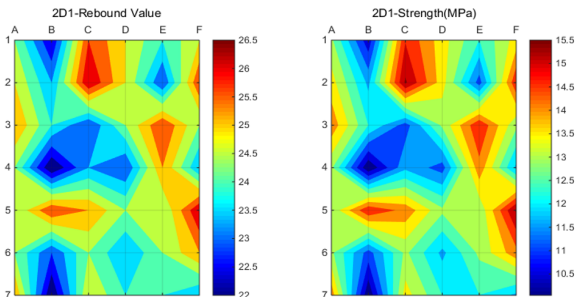
F_c : Compressive Strength (kg/cm²) R : Rebound Number

Table 8. Measured rebound values and estimated compressive strengths for 2D1

No	Test Point	Rebound No. (n=9)	Society of Materials Science, Japan (MPa)	Japan Testing Center For Construction Materials (MPa)	EMPA (MPa)	Avg. (MPa)
1	A-1	24.5	13.18	13.23	13.15	13.10
2	A-2	25.0	13.82	13.72	13.87	13.72
}						
41	F-6	25.5	14.46	14.21	14.59	14.34
42	F-7	23.5	11.91	12.25	11.71	11.87



(a) 2C1



(b) 2D1

Fig. 8. Estimated rebound values and compressive strength for 2C1, 2D1.

3.5 복합법

측정된 반발도와 초음파 속도를 이용한 복합법에 대

한 강도추정식은 Table 9와 같다. 예를 들어 2차 실험 RC150에 대한 폭발 전후의 추정 강도는 Table 10, 11과 같다. 또한 계측된 추정 압축 강도의 분포를 쉽게 확인하기 위해 MATLAB을 이용하여 Fig. 9의 Contour plot으로 표현하였다.

Table 9. Prediction equation of compressive strength in a combining method with UPV and Rebound hardness test⁵⁾

Div.	Prediction Equation
Architectural Institute of Japan	$F_c = 8.2R + 269V - 1094$
RILEM	$\log_{10} F_c = 0.01149R + 0.3794V + 1$

F_c : Compressive strength (kg/cm²), R : Rebound number
 V: ultrasonic pulse velocity(km/sec)

Table 10. Estimated compressive strengths for 2E1 in associated with UPV and rebound number

No	Test Point	Rebound No. (n=9)	Vp (m/s)	Architectural Institute of Japan (MPa)	RILEM (MPa)	Avg. (MPa)
1	A-1	25	3808	13.26	14.33	13.8
2	A-2	32	3690	15.77	15.56	15.7
}						
41	F-6	26.5	3605	9.11	12.49	10.8
42	F-7	29.5	3370	5.33	11.01	8.2

Table 11. Estimated compressive strengths for 2F1 in associated with UPV and rebound number

No	Test Point	Rebound No. (n=9)	Vp (m/s)	Architectural Institute of Japan (MPa)	RILEM (MPa)	Avg. (MPa)
1	A-1	24.5	3638	8.38	12.19	10.3
2	A-2	25.0	3753	11.81	13.66	12.7
}						
41	F-6	25.5	3690	10.55	13.1	11.8
42	F-7	23.5	3753	10.6	13.13	11.9

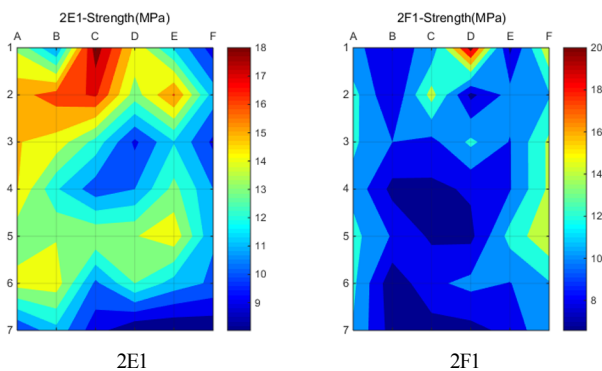


Fig. 9. Estimated compressive strength of 2E1, 2F1 by combined method.

4. 결과 분석

TNT 폭발 후 콘크리트 슬래브의 손상 정도를 평가하기 위해 초음파 속도법, 반발경도법, 복합법을 이용하였으며 요약하면 Table 12와 같다.

Table 12. Summaries of estimated compressive strength(Unit, MPa)

Div	UPV				RHT				CM			
	Before Explosion		After Explosion		Before Explosion		After Explosion		Before Explosion		After Explosion	
	Avg	Center	Avg	Center	Avg	Center	Avg	Center	Avg	Center	Avg	Center
2nd RC150	14.6	14.1	14.7	13.1	18.0	17.5	13.0	12.5	12.6	11.9	10.4	8.8
2nd RC200	25.2	25.7	16.6	11.9	27.7	29.4	12.0	11.5	26.6	28.0	11.4	7.5
3rd RC150A	13.7	14.0	10.9	5.7	24.5	25.4	18.1	15.9	14.8	15.5	9.5	4.1
3rd RC150B	14.3	12.9	10.7	8.0	24.2	24.9	18.3	17.5	15.2	14.3	9.7	6.9
3rd RC150C	17.3	17.4	8.4	12.8	25.4	24.7	18.3	19.5	18.4	18.1	7.3	11.8
4th RC150A	18.2	20.6	X		22.0	22.2	X		17.5	19.6	X	
4th RC150B	19.3	19.6	X		23.6	21.9	X		19.2	18.6	X	

초음파 속도법으로 구한 압축강도는 2차 실험의 RC200의 경우를 제외하고는 15~19 MPa 범위에 있었으며 반발경도법, 복합법에 의해 추정된 강도보다는 작게 산정되었다. 이는 초음파 속도 산출시 모든 계측점에 대한 두께 계측이 정확히 이루어지지 않은 것으로 판단된다. 설계배합강도가 21 MPa이고 76일에서의 압축강도가 22 MPa인 점을 고려해 보면 두께의 정확한 계측이 불필요한 반발경도법으로 산출된 추정 압축강도가 실제와 유사하다고 판단되나, 비파괴시험에 의한 추정값과의 오차가 다소 크므로 슬래브에서의 코어채취에 의한 강도계측과의 비교가 필요하다고 판단된다.

초음파 속도법, 반발경도법, 복합법에 의해 다양한 시편에 대한 폭발 전후의 평균 강도값의 감소를 비교했을 때 약 2~15 MPa의 다양한 범위로 나타났으며 TNT 화약량이 증가할수록 그 강도 감소폭이 큼을 확인할 수 있었다. 특히 폭발 전후를 Contour plot에서 살펴보면 중앙 부분(최대 모멘트 부위)에서 최대 강도 감소가 발생하였으며 중앙 부분에서 멀어질수록 강도 감소폭이 작아짐을 알 수 있었다. 이는 Table 12에서 폭발 전후의 평균 강도값 차이보다 중앙 부분의 강도 감소가 현저히 크다는 것으로 추론할 수 있다.

Table 13에서는 초음파 속도법과 반발경도법의 최대, 최소값, 표준편차를 비교하였다. 표에서 보는 바와 같

Table 13. Max, Min and Std(Standard deviation) for UPV and RHT (Unit, MPa)

Div.	UPV						RHT					
	Before Explosion			After Explosion			Before Explosion			After Explosion		
	Max	Min	Std	Max	Min	Std	Max	Min	Std	Max	Min	Std
2nd RC150	20.1	8.3	2.7	21.1	10.2	3.0	23.1	13.1	2.8	15.6	10.0	1.4
2nd RC200	39.0	18.9	3.7	37.2	6.6	6.7	36.0	19.9	4.1	18.1	8.2	2.3
3rd RC150A	19.4	8.2	2.6	18.2	-16.3	6.3	32.7	18.1	3.5	25.6	5.2	4.7
3rd RC150B	19.9	6.3	3.1	68.6	-10.0	11.6	30.8	18.7	2.9	24.4	10.0	3.5
3rd RC150C	23.5	9.4	2.8	21.1	-24.8	11.2	30.8	20.6	2.5	27.6	0.4	5.5
4th RC150A	23.2	12.9	2.5				28.8	8.8	3.5			
4th RC150B	23.5	14.3	1.9				32.1	18.7	2.6			

이 반발경도법에서 최대/최소값의 차이가 크며, 표준편차 또한 초음파 속도법에 비해 다소 값이 큼을 알 수 있다. 이는 반발경도법은 시편 표면 상태에 따라 영향을 크게 받기 때문이라고 분석된다. 그러므로 콘크리트 표면 상태가 고르지 못하면 강도 추정에 오차가 클 수 있으므로 초음파법과 반발경도법을 융합한 복합법으로 추정하는 것이 가장 적절한 방법이라고 판단된다.

TNT 폭발 후의 초음파법, 반발경도법으로 추정된 강도값에 대한 표준편차값의 폭이 큰 것은 콘크리트의 손상이 영역별로 차이가 크고 다르기 때문이다. 또한 TNT 폭발 전후의 손상 정도를 정확히 비교하고 검증하기 위해서는 콘크리트 슬래브에서의 코어채취에 의한 강도계측값이 필요할 것이다.

5. 결론

일반적인 건축 구조물에서 사용되고 있는 철근 콘크리트가 TNT 화약에 노출되어 피폭되었을 때 폭발 피해 특성을 예측하고 분석하기 위해 본 연구를 수행하였다. 부재의 경계조건은 일방향으로 주었으며 철근 콘크리트 슬래브를 시편으로 선정하여 실제 화약 기폭 실험을 통해 그 영향을 확인하였다. 부재의 손상 정도를 확인할 수 있는 콘크리트 물성 요소들 중 압축 강도를 분석하고자 다양한 비파괴 검사법들 중에서도 초음파 속도법과 반발경도법, 그리고 복합법을 적용하여 비교 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- TNT 화약량이 크고 기폭점으로부터 거리가 짧을 수록 폭발전후의 강도 감소폭이 크다는 사실을 확인하

였다.

- 폭발하중에 대한 변위 및 모멘트가 가장 크고 또한 피폭영향이 가장 큰 중앙부분에서의 강도 감소폭이 가장 큼을 확인하였다.

- 콘크리트의 표면 상태 및 두께변화를 고려하였을 때 초음파법과 반발경도법을 융합한 복합법이 통계적으로 안정적인 값을 산출할 수 있을 것이라고 판단된다.

시편의 두께 계측에서 발생할 수 있는 오차가 있는 초음파 속도법, 시편의 표면 상태에 따라 반발도가 영향을 받을 수 있는 반발경도법을 보완한 복합법으로 콘크리트 압축강도를 추정하는 것이 가장 적절한 방식이라고 본 연구를 통해 입증하였다. 추후 연구 방향으로 실제 건축물 피해를 분석하기에 앞서 슬래브, 보, 기둥 등과 같은 구조 부재들을 다양한 화약량, 경계조건, 이격거리에 따른 실증 실험을 통해 폭발 전후의 피해 양상을 분석해야 할 것이라고 판단된다.

References

- 1) E.S. Cho, H.j. Jang, J.Y. Park, T.K. Oh and Y.H. Lee, "Experimental Evaluation of a Steel Plate Subjected to Blast Loading", Spring Conference in The Korea Institute For Structural Maintenance and Inspection, pp.121-124, 2015.
- 2) H. S. Hahn, "Estimation of Concrete Strength by Non-destructive Combined Method and its Application", Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol.12, No.1, pp. 35-39, 1992.
- 3) I. Facaoaru, "Non-Destructive Testing of Concrete in Romania, Symposium on NDT of Concrete and Timber", Institute of Civil Engineers, London, pp. 39-49, 1970.
- 4) V. M. Malhotra and N. J. Carino, "CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete", CRC Press, Boca Raton, 1991.
- 5) J.G. Wiebenga, "A Comparison between Various Combined Non-Destructive Testing Methods to Derive the Compressive Strength of Concrete", Instituut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies, 1968.
- 6) M.H. Lee and C.W. Choi, "A Study on the Minimum Number of Rebound Number Test and Pulse Velocity Method for Estimating Compressive Strength of Concrete", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.16, No. 6, pp.833-840, 2004.