



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2017년 2월

석사학위논문

# 저주파 결함 탐지기를 이용한 하중단계에 따른 암석의 상태 평가

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김 중 혁

# 저주파 결함 탐지기를 이용한 하중단계에 따른 암석의 상태 평가

Evaluation of the rock state under load step using  
low-frequency ultrasonic flaw detector

2017년 2월 24일

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김 중 혁

# 저주파 결합 탐지기를 이용한 하중단계에 따른 암석의 상태 평가

지도교수 고 진 석

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 10월

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김 중 혁

# 김종혁의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 강 성 승 (인)

위 원 조선대학교 교수 장 일 식 (인)

위 원 조선대학교 교수 고 진 석 (인)

2016년 11월

조선대학교 대학원

## - 목 차 -

목차 .....	i
List of tables .....	ii
List of figures .....	iv
Abstract .....	vi
1. 서론 .....	1
2. 연구방법 .....	3
2.1 CND 시험기 .....	3
2.2 저주파 결합 탐지기 .....	5
2.3 측정방법 .....	7
2.4 시료의 물성 .....	8
3. 연구결과 .....	11
3.1 CND 시험기의 시료 속도 측정 .....	11
3.2 저주파 결합 탐지기의 속도에 따른 결합 .....	13
3.2.1 IG-1의 저주파 결합 탐지기 속도에 따른 결합 .....	13
3.2.2 IG-2의 저주파 결합 탐지기 속도에 따른 결합 .....	16
3.2.3 IG-3의 저주파 결합 탐지기 속도에 따른 결합 .....	19
3.2.4 IG-4의 저주파 결합 탐지기 속도에 따른 결합 .....	21
3.2.5 IG-5의 저주파 결합 탐지기 속도에 따른 결합 .....	24
3.3 실버슈미트 해머를 이용한 압축강도 환산 .....	27
3.4 하중 단계에 따른 저주파결합 탐지기 속도 .....	29
3.5 하중 단계별 저주파결합 탐지기 속도에 따른 결합 .....	32
4. 결론 .....	35
참고문헌 .....	37
부록 .....	39

## List of tables

Table 2-1. Variables for low-frequency ultrasonic flaw detector .....	5
Table 2-2. Physical properties and size of samples .....	9
Table 3-1. $V_p$ -wave velocity of samples by CND tester .....	12
Table 3-2. Q-values of IG-7 measured by silver Schmidt hammer .....	28
Table 3-3. Load steps for uniaxial compression test .....	28
Table 3-4. $V_p$ -wave velocity (m/s) of the x-, y-, z-axis directions on IG-7 measured by LFUFD .....	30
Table 3-5 $V_p$ -wave velocity (m/s) of the semi-direct directions on IG-7 measured by LFUFD .....	31
Table 3-6. Average of $V_p$ -wave velocities on IG-7 measured by LFUFD .....	33
Table 3-7. Variation of normalized $V_p$ -wave velocity on IG-7 .....	34
Table 1. $V_p$ -wave time, distance and velocity of the x-axis directions on IG-1 measured by LFUFD .....	39
Table 2. $V_p$ -wave time, distance and velocity of the y-axis directions on IG-1 measured by LFUFD .....	40
Table 3. $V_p$ -wave time, distance and velocity of the z-axis directions on IG-1 measured by LFUFD .....	41
Table 4. $V_p$ -wave time, distance and velocity of the semi-direct directions on IG-1 measured by LFUFD .....	42
Table 5. $V_p$ -wave time, distance and velocity of the x-axis directions on IG-2 measured by LFUFD .....	44
Table 6. $V_p$ -wave time, distance and velocity of the y-axis directions on IG-2 measured by LFUFD .....	45
Table 7. $V_p$ -wave time, distance and velocity of the z-axis directions on IG-2 measured by LFUFD .....	46
Table 8. $V_p$ -wave time, distance and velocity of the semi-direct directions on IG-2 measured by LFUFD .....	47
Table 9. $V_p$ -wave time, distance and velocity of the x-axis directions on IG-3	

measured by LFUFD .....	49
Table 10. $V_p$ -wave time, distance and velocity of the y-axis directions on IG-3 measured by LFUFD .....	51
Table 11. $V_p$ -wave time, distance and velocity of the x-axis directions on IG-4 measured by LFUFD .....	53
Table 12. $V_p$ -wave time, distance and velocity of the y-axis directions on IG-4 measured by LFUFD .....	55
Table 13. $V_p$ -wave time, distance and velocity of the z-axis directions on IG-4 measured by LFUFD .....	57
Table 14. $V_p$ -wave time, distance and velocity of the semi-direct directions on IG-4 measured by LFUFD .....	59
Table 15. $V_p$ -wave time, distance and velocity of the x-axis directions on IG-5 measured by LFUFD .....	62
Table 16. $V_p$ -wave time, distance and velocity of the y-axis directions on IG-5 measured by LFUFD .....	64
Table 17. $V_p$ -wave time, distance and velocity of the z-axis directions on IG-5 measured by LFUFD .....	66
Table 18. $V_p$ -wave time, distance and velocity of the semi-direct directions on IG-5 measured by LFUFD .....	68



## List of figures

Figure 2-1. Components of CND tester. ....	4
Figure 2-2. Components of low-frequency ultrasonic flaw detector. ....	6
Figure 2-3. Array methods of transducers, (a) direct method, (b) semi-direct method, (c) indirect method. ....	7
Figure 2-4. Sample of (a) IG-1, (b) IG-2, (c) IG-3, (d) IG-4, (e) IG-5, and (f) IG-7. ....	10
Figure 3-1. $V_p$ -wave velocity of (a) x-axis, (b) y-axis, (c) z-axis, and (d) semi-direct directions on IG-1 measured by LFUFD and CND. ....	14
Figure 3-2. $V_p$ -wave velocity distribution of (a) x-axis, (b) y-axis, and (c) z-axis directions on IG-1. ....	15
Figure 3-3. $V_p$ -wave velocity of the (a) x-axis, (b) y-axis, (c) z-axis, and (d) semi-direct directions on IG-2 measured by LFUFD and CND. ....	17
Figure 3-4. $V_p$ -wave velocity distribution of the (a) x-axis, (b) y-axis, and (c) z-axis directions on the IG-2. ....	18
Figure 3-5. $V_p$ -wave velocity of (a) x-axis, and (b) y-axis directions on IG-3 measured by LFUFD and CND. ....	20
Figure 3-6. $V_p$ -wave velocity distribution of (a) x-axis, and (b) y-axis directions on IG-3. ....	20
Figure 3-7. $V_p$ -wave velocity of (a) x-axis, (b) y-axis, (c) z-axis, and (d) semi-direct directions on IG-4 measured by LFUFD and CND. ....	22
Figure 3-8. $V_p$ -wave velocity distribution of (a) x-axis, (b) y-axis, and (c) z-axis directions on IG-4. ....	23
Figure 3-9. $V_p$ -wave velocity of (a) x-axis, (b) y-axis, (c) z-axis, and (d) semi-direct directions on IG-5 measured by LFUFD and CND. ....	25
Figure 3-10. $V_p$ -wave velocity distribution of (a) x-axis, (b) y-axis, and (c) z-axis directions on IG-5. ....	26
Figure 3-11. $V_p$ -wave velocity of (a) x-axis, (b) y-axis, and (c) z-axis directions with load steps on IG-7. ....	32

Figure 3-12. Variation of  $V_p$ -wave velocities with load steps, 50%, 60%, 70%, 80% on IG-7. .... 33

Figure 3-13. Normalized velocity of each axis direction with load step on IG-7. ... 34

## Abstract

### Evaluation of the rock state under load step using low-frequency ultrasonic flaw detector

By Jong-hyuck Kim  
Adv. Prof. : Chin-Surk Ko, Ph.D,  
Dept. of Energy and Resources Engineering  
Graduate School of Chosun University

The study is to evaluate quantitatively the flaws in the rock with low-frequency ultrasonic flaw detector method, one of the non-destructive test methods through load steps. For this purpose, the velocities by the CND tester and low-frequency ultrasonic flaw detector was performed on the square granite samples with various sizes. Then, applicability as the evaluation of rock flaws was identified with the low-frequency ultrasonic flaw detector method. In addition, the flaw state in granite was defined to analyze the velocities to three directions with the load steps, which was 50%, 60%, 70%, 80% of uniaxial compressive strength for granite. The results are as follows. By the results of the velocities by the CND tester and low-frequency ultrasonic flaw detector on the square granite samples with various sizes, an average velocity by CND was about 1890.8 m/s, and one by low-frequency ultrasonic flaw detector was about 1896.7 m/s in the sample of IG-1. In the case of IG-2, an average velocity by CND was about 1975.8 m/s, and one by low-frequency ultrasonic flaw detector was about 900.0 m/s. The difference between the two results was about 2.2 times. In the case of IG-3, an average velocity by CND was about 2730.0 m/s, and one by low-frequency ultrasonic flaw detector was about 1500.0 m/s. The difference between the two results was about 1.8 times. In the case of IG-4 with borehole and IG-5 without borehole in the sample, an average velocity by CND was about 2282.1 m/s and 2228.9 m/s, and one by

low-frequency ultrasonic flaw detector was about 1000.0 m/s and 900.0 m/s, respectively. The difference between the two results was about 2.3 and 2.5 times. Considering only the above results, an average velocity by the CND was totally lower than that by low-frequency ultrasonic flaw detector.

By the results of the velocity variation with the load steps of uniaxial compressive strength for granite of IG-7 estimated by silver Schmidt hammer test, the velocity tended to decrease at 50% to 70% of the load step, then to increase at 70% to 80% of the load step. This suggests that the microcracks in granite are closed at the low load step, then the new cracks are formed as the load step increases. The velocity are in the order of z-axis>y-axis>x-axis, which means that the new cracks have the greatest effect on x-axis velocity reduction.

In conclusion, the low-frequency ultrasonic flaw detector method can be applied to quantitative evaluation of flaws in rock, and it can be used to analyze the variation of velocity in each direction according to the load step.

# 1. 서론

국토의 효율적 이용을 위한 지하공간의 개발, 지하자원을 개발하기 위한 갱내 채굴, 방사성 폐기물 저장을 위한 지중처분장, 석유나 가스와 같은 에너지를 저장하기 위한 지하저장소, 그리고 고심도지하연구실 등 다양한 목적의 지하구조물 개발이 해마다 증가하고 있다. 이러한 지하구조물들은 개발하는 과정에서 뿐만 아니라 완료된 후에도 안정성 확보가 가장 중요한 사안 중의 하나이다. 따라서 지하구조물의 안정성을 평가하는 것이 필요하며, 이를 위한 다양한 평가 방법들이 제안되었다. 안정성 평가를 위한 방법은 크게 수치해석적 방법(장명환 외, 2000; 구청모 외, 2008; 유상량 외, 2011; Zhou et al., 2011; 이선길, 2014; 이철호 외, 2014)과 실험적 방법(Jean Hutchinson et al., 2002; 김종관 외, 2010; 강성승 외, 2013)들로 구분할 수 있다. 수치해석적 방법에서 장명환 외(2000)는 유한차분법에 근거한 FLAC 소프트웨어를 활용하여 터널의 안정성 평가를 수행한 바 있다. 구청모 외(2008)는 stability graph method와 최대 무지보 공동폭 곡선과 같은 경험적 방법을 이용하여 3차원 유한요소해석용 Visual FEA를 적용한 지하채광장 안정성 평가를 실시한 바 있다. 유상량 외(2011)는 범용구조해석프로그램인 MIDAS를 이용하여 콘크리트 교각 등에 대하여 변수별 유한요소 해석으로 안정성 검토 및 설계에 적용한 바 있다. Zhou 외(2011)는 Fisher discriminant analysis와 SVM methods를 이용하여 각 데이터에 의한 모델링 실시 후 분석하여 지하 채광장 기둥(Pillar)의 안정성 평가를 실시한 바 있다. 이선길(2014)은 연속체 해석이 가능한 범용 유한요소해석 프로그램인 MIDAS-GTS를 사용하여 지반구조물의 안정성 평가를 수행한 바 있다. 이철호 외(2014)는 주방식 지하구조물에서 수치해석 프로그램인 유한 차분법을 이용한 FLAC2D로 광주의 안정성 평가를 실시한 바 있다. 실험적 방법에서 Jean Hutchinson 외(2002)는 GPR (Ground penetrating radar), ERI (Electromagnetic radio imaging), Microgravity, Microwave radiometric, Resistivity method, Seismic cavity resonance 등을 이용하여 Crown pillar의 안정성 평가를 실시한 바 있다. 김종관 외(2010)는 갱도의 광주(Pillar)에서 시료 채취 후 단위중량, 탄성파속도, 일축압축강도, 인장강도, 탄성계수 등 측정하여 광주의 안정성 평가에 실험적 방법을 적용한 바 있다. 강성승 외(2013)는 저주파 결함 탐지기를 활용하여 화순 운주사 광배석불의 풍화상태를 분석하여 그 결과를 보고하였다.

본 연구에서는 화강암을 대상으로 저주파 결합 탐지기를 이용하여 하중단계에 따라 화강암 내부의 상태 변화를 정량적으로 나타내고자 하였다. 본 연구를 위하여 먼저 다양한 크기의 정방형 화강암 시료를 제작하였다. 둘째, 각 시료에 대한 CND와 저주파 결합 탐지기 측정과 그 결과를 비교하여 저주파 결합 탐지기의 결합 평가 적용성을 확인하였다. 셋째, 하중단계를 설정하기 위하여 실버슈미트해머를 이용한 화강암의 강도를 추정한 후 하중단계를 최대 강도의 50%, 60%, 70%, 80% 등 네 가지 경우로 설정하였다. 마지막으로 하중단계에 따른 세 방향의 속도분포를 분석하여 화강암 내 결합 상태를 평가하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 CND 시험기

고체 물질의 통과하는 초음파의 속도는 물체 고유의 밀도와 탄성에 의존한다. 물질의 특성은 물질 고유의 탄성적 강성에 연관된다. 따라서 이러한 소재에 대해 초음파의 속도측정은 물질의 품질과 탄성을 추정할 수 있다. CND 시험기(Concrete Non-Destructive Tester)에 사용되는 주파수는 펄스 진동주파수이다. 펄스 속도는 일반적으로 물질의 특성에 의존한다. 초음파 펄스의 도달시간과 속도의 측정으로 물질의 상태를 평가할 수 있다. 콘크리트, 암석류 및 목재류의 검사에 사용되는 초음파의 주파수는 금속류탐상에 사용되는 주파수에 비해 훨씬 낮은 주파수를 사용한다. 주파수가 높아질수록 펄스 전파 폭은 더욱 좁아지지만, 펄스진동에 감쇄 폭은 더욱 더 커진다. 매질 내에서 파가 전달되는 거리는 다음 공식에서와 같이 파의 속도로부터 유추할 수 있다.

$$V = \frac{L}{T} \quad (1)$$

여기서, V : 파의 도달 속도

L : 파가 이동한 최단 거리

T : 파의 전달시간

경로길이와 전달시간은 약 ±1%의 정확도로 측정할 수 있다. 장비에 표시되는 시간은 발신 센서로 부터 생성된 펄스가 물질을 통과하여 수신 센서에 도달 할 때 초기파가 감지된 시간을 나타낸다. 화면 표시기에는 표시된 파형은 초기파 도달 시 취득된 파형을 표시한다. CND 시험기의 특징 및 장점은 초음파의 속도와 전달시간의 측정하여, 비 금속류의 강도를 추정할 수 있다. 최신 디지털 기술을 활용하여, 물질 내부의 특성을 시험할 수 있으며, 소재의 건전도와 균열의 깊이를 측정할 수 있다. SD 메모리를 이용하여 장비에 저장된 데이터를 분석용 컴퓨터로 저장하고 분석할 수 있다. 분석된 결과는 보고서 형태로 프린터 출력할 수 있다.

이 기기를 숙지하는 방법으로는 전압변화가 심한 환경에서의 사용을 피하고, 장비의 특성상 오차가 발생하지 않도록 접지가 되어 있는 전원콘센트를 사용한다. 정밀 계측기이므로 결선이나 운반도중 진동이나 충격을 가하지 않도록 항상 주의 하며 습도가 높은 곳을 피하도록 한다(강성승 외 2013). CND 시험기는 센서, 케이블, 기준시료, CND 시험기로 구성되어있다(Figure 2-1).

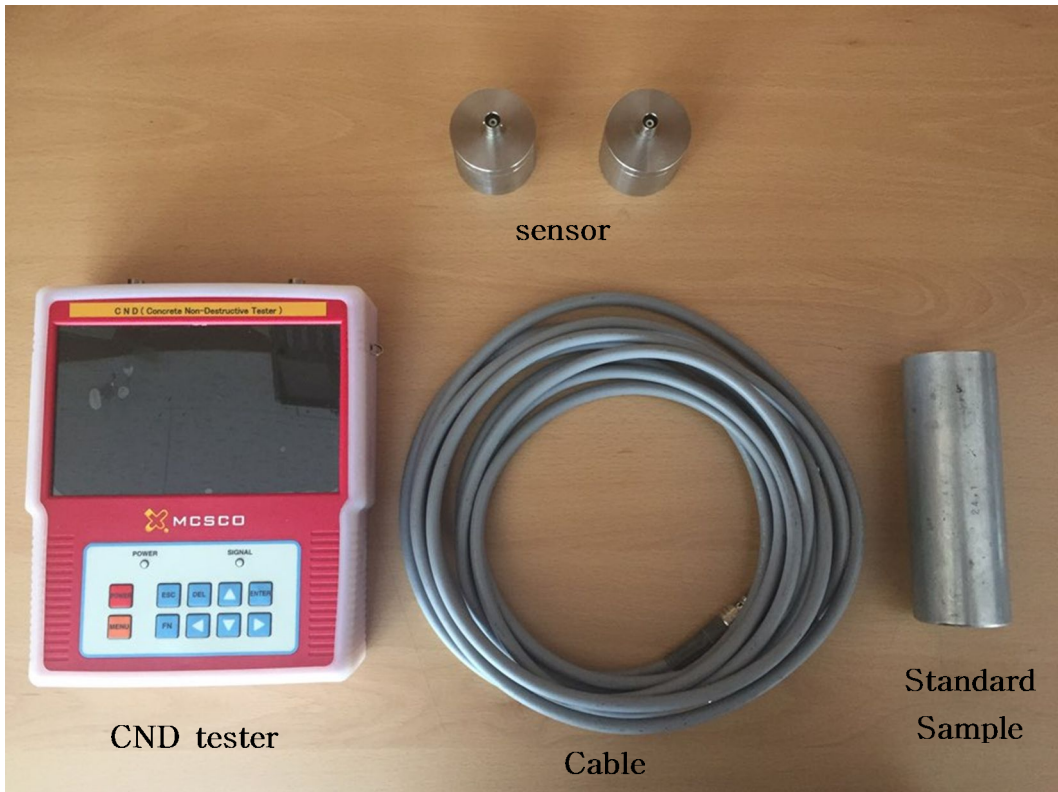


Figure 2-1. Components of CND tester.



## 2.2 저주파 결합 탐지기

비파괴 탐사장비인 휴대용 저주파 결합 탐지기(Low-Frequency Ultrasonic Flaw Detector, LFUFD, 코세코 Model No. A1220 Monolith)는 본체A1220, M2103 sensor, M2502 sensor, S1803 sensor, LEMO double cable로 구성되어 있다(Figure 2-2). 이 장비는 측정 대상의 두께 및 시간을 측정하는데 적용할 수 있으므로 균열 깊이와 초음파 도달 속도를 알아낼 수 있다. 데이터 자료는 시험한 대상의 초음파 속도를 review, band, map 등 세 가지 형태로 저장된 파일을 통해서 확인 할 수 있다. 측정 데이터가 실시간 파형으로 나타나는 리뷰모드(review mode)는 디스플레이의 측정 파형을 통하여 측정 부위에 대한 신호값, 전파시간, 측정 깊이를 확인할 수 있다. 일직선상에 측정 구간을 설정하여 측정 시 감지기를 설정한 스텝만큼 이동하며 시편을 탐사하는 밴드모드(band mode)가 있다. 맵모드(map mode)는 밴드모드와 같이 측정 시편의 면적에 대한 단면을 연속적으로 탐사하는 형태이다(이찬우, 2013). 이 저주파 결합 탐지기를 사용해서 초음파 측정으로 인해 신뢰도가 높은 속도 값을 알아내기 위해 우리는 리뷰모드를 이용해 측정한다. 저주파 결합 탐지기의 기본 설정은 Table 2-1과 같이 설정 하였다.

Table 2-1. Variables for low-frequency ultrasonic flaw detector

Probe Frequency (KHz)	100
Zero Offset ( $\mu$ s)	18
Velocity (m/s)	values by CND
Scale X	$\mu$ s
Pulse (V)	200
Periods Number	1.0
Sounding (Hz)	Maximum 20



Figure 2-2. Components of low-frequency ultrasonic flow detector.

M1803 센서는 미소 면적에 대하여 속도를 측정하기 때문에 속도가 비교적 정확하게 측정되며 대상의 평균적인 속도보다는 미소 면적에 대한 속도만 나오게 된다. 때문에 바로 옆의 포인트라 해도 속도차이가 클 수 있다. 이로 인해 그 포인트의 결함 상태를 속도에 의해 나타낼 수 있다. M2103 센서는 단일 센서(M1803 sensor)가 일정한 간격을 두고 여러 개 모여 있는 센서이다. 이 센서는 센서가 다량 모여 있지만 각각 속도를 측정하는 것이 아니고 각 센서의 평균으로 측정 된다. 때문에 미소 면적의 속도측정 보다는 CND 시험기와 같이 시료의 평균적인 속도만 측정 된다. 이로 인해 결함 존재의 유무보단 대략적인 결함의 정도만 평가 할 수 있다. M2502 센서는 M2103 센서와 같이 평균적인 속도를 측정한다. 이 센서의 정확한 측정 용도는 미소 규모의 결함보다는 큰 결함을 측정 부분으로부터 깊이로 측정 되는데 현재까진 적용 가능성을 알 수 없기 때문에 추후에 연구를 해볼 필요가 있다고 사료된다.

본 연구에서는 M1803 센서를 이용하여 측정을 하고 분석을 하였는데 속도그래프에서 속도가 측정 포인트별로 들쭉날쭉 한 것을 알 수 있다. 그 이유는 앞에서 언급 했듯이 미소 면적으로 각 포인트별 속도를 측정하였기 때문이다.

## 2.3 측정방법

측정방법은 시편의 표면에 감지기를 배열하는 방법에 따라 직접법(Direct Method), 간접법(Indirect Method), 반간접법(Semi-Direct Method)등으로 나눌 수 있다(Figure 2-3)(이찬희 외, 2009). 직접법으로는 감지기의 배열을 측정대상 시편을 사이에 두고 서로 마주보게 배치하여 측정하는 법이다. 석탑과 같은 대형 석조문화재의 경우 탐촉자의 접근이 용이하지 않아 측정 자체가 불가능하다는 단점이 있다(이찬우, 2013). 또한, 간접법과 반 간접법은 직접법으로 측정이 불가능할 때 탐촉자의 배열을 바꾸어 측정하는 방법이다. 간접법은 발신, 수신 감지기를 모두 시편의 동일 표면에 두고 측정하는 법이고, 반 간접법은 감지기의 배열을 측정대상 시편과 90도로 하여 배치하고 측정한다. 이 때 측정 거리는 발신단과 수신단의 최단거리로 한다. 반 간접법의 경우 지향성이 상대적으로 떨어져 직접법의 초음파 속도보다 항상 낮은 값을 보인다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 반 간접법 및 간접법으로 측정된 초음파 속도는 직접법의 속도에 맞춰 보정을 해야 할 필요성이 있다(이찬우, 2013).

본 연구에서는 직접법과 반 간접법을 이용하여 시간을 측정하였다. 직접법으로는 한 축씩 x, y, z 축 결함을 파악하기 위하여 시간을 측정하였고 반 간접법으로는 z-xy 면 즉, 한 면에 45° 만큼 기울어진 대각면의 시간 측정으로 결함을 파악하기 위해 이용하였다. 이 두 가지 측정법을 이용하여 최종실험인 하중 단계에 따른 속도 변화를 관찰하기 위하여 일축 압축을 실시하였고 하중 단계에 따른 속도변화를 측정하였다.

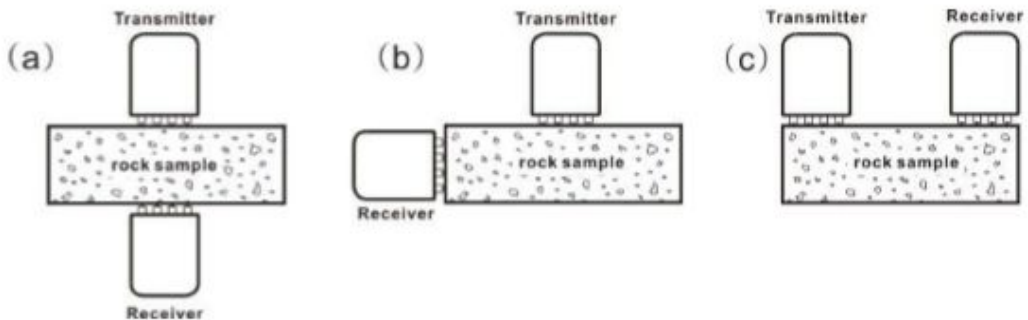


Figure 2-3. Array methods of transducers, (a) direct method, (b) semi-direct method, (c) indirect method(이찬우, 2013).

## 2.4 시료의 물성

저주파 결합 탐지기 및 CND 시험기 속도 측정 전에 각각 시료의 물성 값을 참고하여 최종 실험인 하중 단계에 따른 속도를 측정하였다. 최종적으로 일축압축을 각 단계별로 하중을 주어서 속도가 어떤 경향을 보이는지 분석하기 위함이다. 본 연구에서 물성은 비중(Specific gravity), 흡수율(Water absorption ratio), 공극률(Porosity), 탄성과 속도(Seismic velocity), 인장강도(Tensile strength), 일축압축강도(Uniaxial compressive strength), 영률(Young's modulus), 포아송비(Poisson's ratio), 길이(Length)를 고려하였다(나태유, 2013). 각 시료의 물성 값과 시료는 Table 2-2와 Figure 2-3과 같다.

Table 2-2. Physical properties and size of samples

Sample	Specific gravity	Water absorption ratio (%)	Porosity (%)	Seismic velocity (m/s)
IG-1	2.64	0.20	0.6	1611
IG-2	2.64	0.23	0.6	1505
IG-3	2.64	0.20	0.6	1611
IG-4	2.64	0.23	0.6	1505
IG-5	2.64	0.23	0.6	1505
IG-7	2.64	0.23	0.6	1505
	Tensile strength (MPa)	Uniaxial compressive strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
IG-1	-	160.40	28.34	0.27
IG-2	7.97	195.38	53.45	0.37
IG-3	-	160.40	28.34	0.27
IG-4	7.97	195.38	53.45	0.37
IG-5	7.97	195.38	53.45	0.37
IG-7	7.97	195.38	53.45	0.37
Size				
	X-axis (mm)	Y-axis (mm)	Z-axis (mm)	
IG-1	105	103	103	
IG-2	129	123	124	
IG-3	294	298	294	
IG-4	153	151	157	
IG-5	153	154	153	
IG-7	81	80	85	



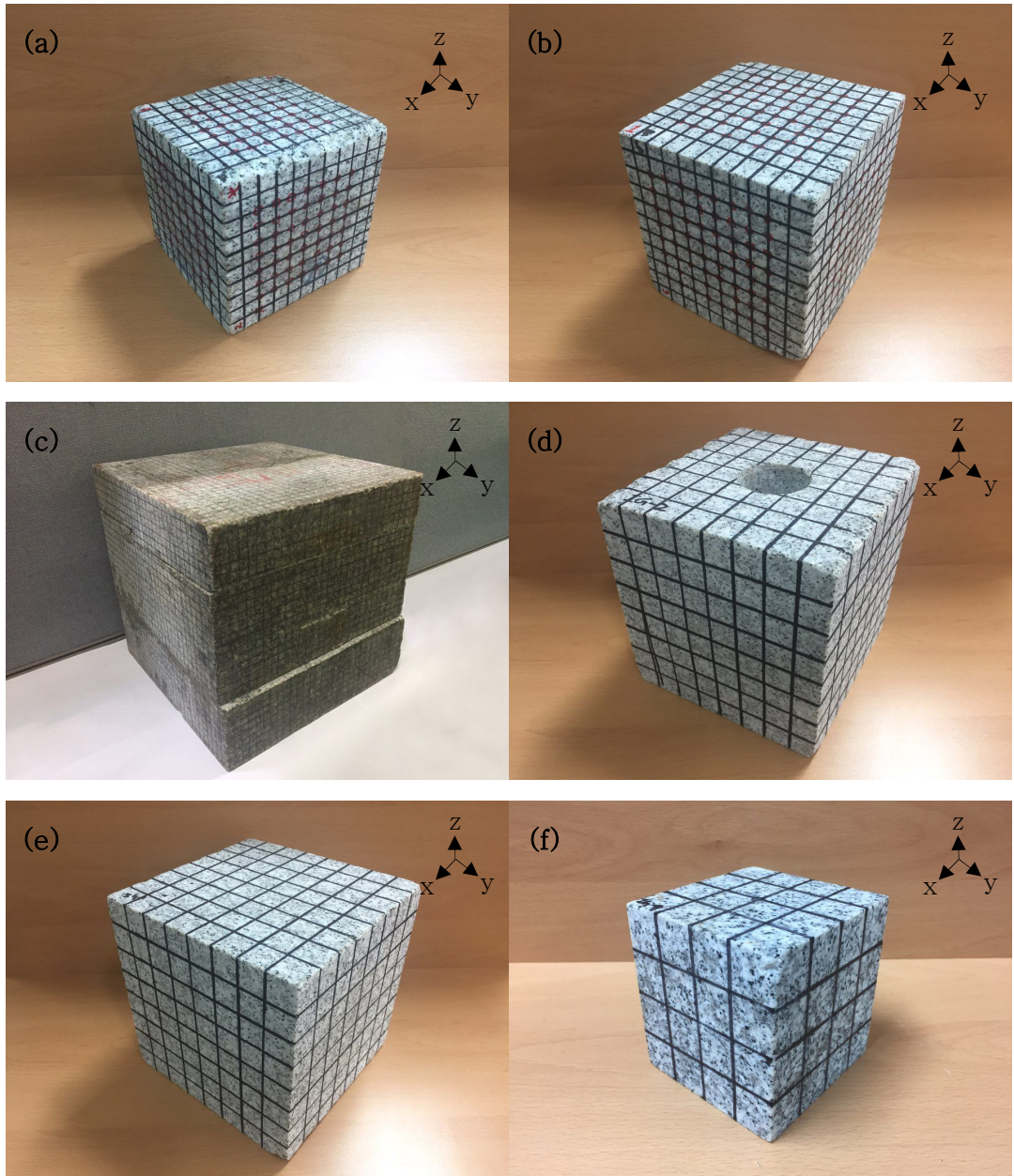


Figure 2-4. Sample of (a) IG-1, (b) IG-2, (c) IG-3, (d) IG-4, (e) IG-5, and (f) IG-7.

### 3. 연구결과

CND 시험기와 저주파결합 탐지기를 이용하여 각 시료들의 속도를 구하였다. CND 시험기로 측정된 속도와 저주파결합 탐지기로 측정된 시간을 이용하여 속도 비교를 실시하였다. CND 시험기는 속도로 직접 표현되고 저주파결합 탐지기는 시간으로 데이터 값이 표현된다. 때문에 저주파결합 탐지기의 시간을 이용하여 길이를 알기 때문에 속도를 쉽게 구할 수 있다.

데이터 측정 시 시료에 임의의 포인트를 지정하였고 각 포인트별로 속도를 측정하였다. 각 포인트별로 측정한 데이터를 이용하여 속도를 각각 비교하고 결합 여부를 예측하였다. 좀 더 자세한 결합 여부를 알아보기 위해 저주파 결합 탐지기의 데이터만을 이용하여 속도 모델링 작업을 실시하였다. 모델링 작업은 속도만을 이용하여 속도 포인트별로 색 표현을 하였고 각각의 색을 3D 모델링한 시료에 적용하여 결합 여부를 평가하였다. 속도 구간을 각각의 색으로 구분하였기 때문에 결합 여부는 시각적으로 확인하여 평가 할 수 있다.

#### 3.1 CND 시험기의 시료 속도 측정

CND 시험기를 이용하여 측정한 결과 Table 3-1과 같고 평균속도는 IG-1 1890.8 m/s, IG-2 1975.8 m/s, IG-3 2730.0 m/s, IG-4 2282.1 m/s, IG-5 2228.9 m/s, IG-7 1642.17 m/s로 측정되었다. IG-1과 IG-2와 IG-7은 평균속도가 2000 m/s 보다 낮은 값으로 측정되었고 세 개의 시료는 2000 m/s 이상의 속도로 측정되었다. IG-3와 같은 경우는 z축에 수직하게 두 개의 절단면이 있고 이것을 접착제로 접합하여 인위적으로 경계면을 만들어 냈기 때문에 절단면이 생기기 전의 시료 일 때 보단 속도가 현저하게 낮게 측정될 것으로 생각하였지만 예측과는 다르게 오히려 다른 시료들보다 속도가 높게 측정된 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 파의 속도와 밀도의 관계에 있다고 할 수 있다. 파는 매질의 밀도와 큰 연관이 있다. 보통은 암석의 밀도가 크다고 생각 할 수 있겠지만 접착제의 밀도가 더욱 커진다면 속도가 더 빠르게 될 것이다. 때문에 IG-3의 속도가 다른 시료들 보다 빠르게 측정됐다고 사료된다.

Table 3-1.  $V_p$ -wave velocity of samples by CND tester

Sample No.	X-axis (m/s)	Y-axis (m/s)	Z-axis (m/s)	Average
IG-1	2000.0	1819.8	1852.5	1890.8
IG-2	1969.5	1921.9	2036.1	1975.8
IG-3	2620.3	2824.6	2745.1	2730.0
IG-4	2253.3	2166.4	2426.6	2282.1
IG-5	2203.1	2147.8	2335.9	2228.9
IG-7	1687.5	1690.7	1548.3	1642.2



## 3.2 저주파 결합 탐지기의 속도에 따른 결합

저주파 결합 탐지기를 이용하여 시간을 측정하였고 그에 따라 속도를 계산하였다. 그 속도를 이용하여 속도구간을 나누고 그에 따라 3D 모델링한 시료에 적용하여 해석하였다. 속도는 각 시료마다 속도 기준이 다르기 때문에 다르게 설정하였고 각 시료의 특성에 따라 속도 분류를 하였다. 이 속도에서 절대적인 결합의 여부를 평가하기 보다는 비교적인 결합 여부를 분석 하였다. Figure 3-1과 같이 각 시료들의 축에 따른 속도를 그래프로 표현하였고 그 속도에 대하여 분석을 실시하였다. 또한 직접법뿐만 아니라 반 간접법으로 측정하여 각 시료의 평균적인 부분도 분석하였다. CND의 속도를 기준으로 두고 저주파 결합 탐지기에 의한 각 포인트별 속도로 분석하여 결합 여부를 평가하였다.

### 3.2.1 IG-1의 저주파 결합 탐지기 속도에 따른 결합

그래프에서 파란 줄이 CND 시험기의 속도이고 빨간 점들이 저주파 결합 탐지기의 속도이다. CND 시험기의 속도와 차이가 큰 부분들은 결합이 어느 정도 존재한다고 판단할 수 있다.

Figure 3-1은 저주파 결합 탐지기로 측정된 IG-1의 x, y, z축에 대한 속도를 나타낸 것이다. x축에 대한 저주파 결합 탐지기 속도분포를 나타내는 Figure 3-1(a)의 경우 저주파 결합 탐지기의 평균속도는 1896.7 m/s로 CND의 평균속도인 2000 m/s보다 약간 낮게 나타났다. y축에 대한 저주파 결합 탐지기 속도분포를 나타내는 Figure 3-1(b)을 보면, 저주파 결합 탐지기의 평균속도는 1603.8 m/s로 CND 평균속도인 1819.8 m/s보다 낮게 측정 되었다. 이 결과는 x축의 결과보다 낮은 값을 보여 y축이 x축보다 속도 저하를 일으키는 결합 인자가 더 많음이 있음을 의미한다. 즉, 결합 면이 x축에 미치는 영향보다 y축에 미치는 영향이 더 크다는 것을 보여준다. z축에 대한 저주파 결합 탐지기 속도분포를 나타내는 Figure 3-1(c)을 보면, 저주파 결합 탐지기의 평균속도는 1453.9 m/s로 CND 평균속도인 1852.5 m/s보다 낮게 측정 되었다. 반간접법에 대한 저주파 결합 탐지기 속도분포를 나타내는 Figure 3-1(d)를 보면, 저주파 결합 탐지기의 평균속도는 2030.1 m/s로 CND 평균속도인 1890.8 m/s보다 낮게 측정 되었다. 평균 속

도의 차이만을 고려해 볼 때 결합 면은 z축에 가장 큰 영향을 미치고 있으며, 그다음으로 y축, x축 순으로 판단된다. 종합해보면 IG-1의 x축과 같은 경우는 CND 시험기 속도와 비교했을 때 전반적으로 낮은 것으로 판단되었다. 이와 같은 결과는 내부에 약간의 결합이 있을 것으로 판단된다. y축과 z축 또한 비슷한 경향을 보였고 결합이 있을 것으로 판단하였다.

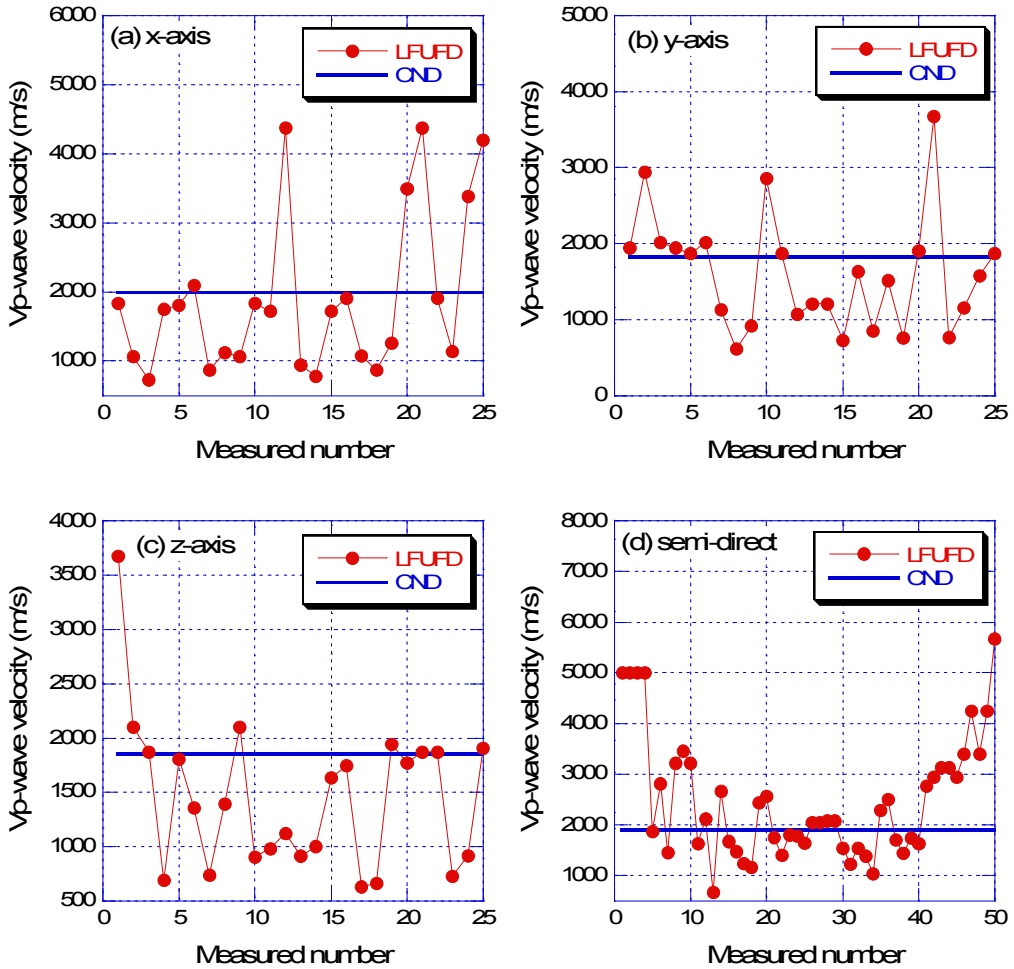


Figure 3-1.  $V_p$ -wave velocity of (a) x-axis, (b) y-axis, (c) z-axis, and (d) semi-direct directions on IG-1 measured by LFUFD and CND.

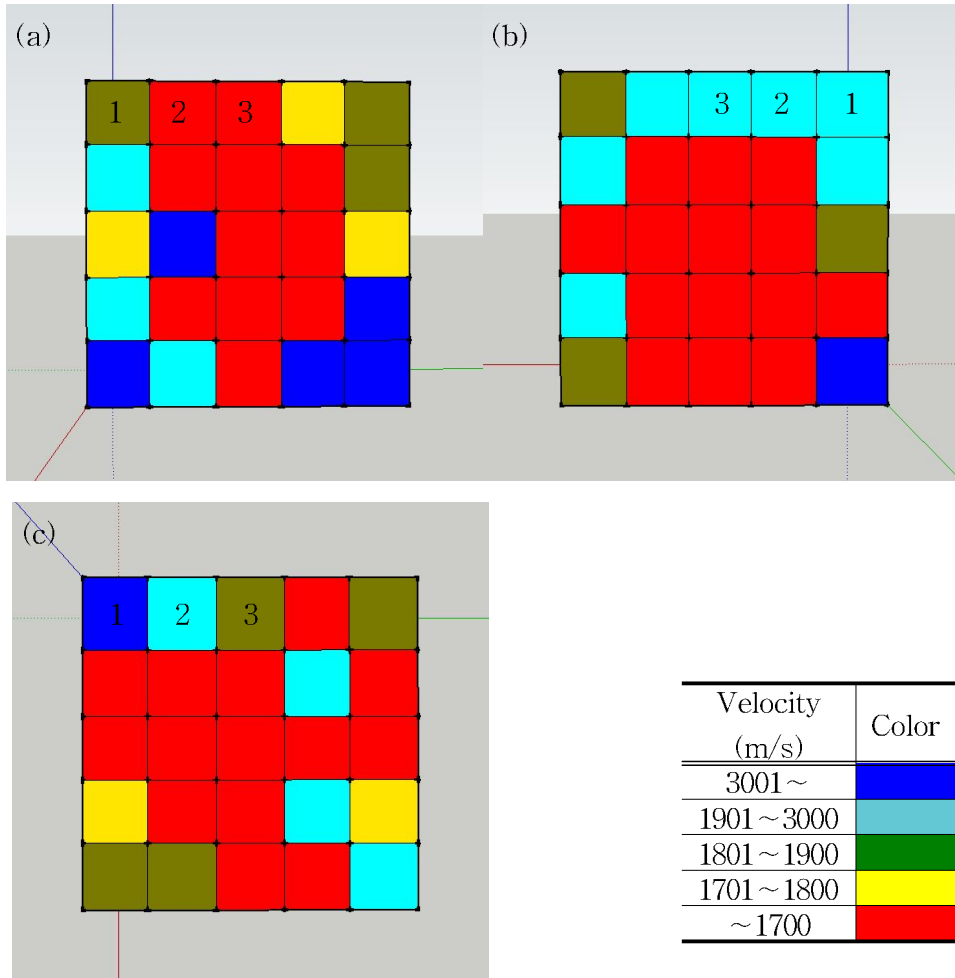


Figure 3-2.  $V_p$ -wave velocity distribution of (a) x-axis, (b) y-axis, and (c) z-axis directions on IG-1.

Figure 3-2는 저주파 결함 탐지기에 의해 각 포인트의 속도를 각각 표현한 것이고 그에 따른 속도를 임의의 구간으로 나눠 비교 분석하였다. 빨간색 부분이 많이 보이는데 앞서 보여준 IG-1의 속도 그래프와 마찬가지로 내부 결함이 많이 보이는 것으로 판단된다. IG-1 시료와 같은 경우는 결 부분의 결함은 거의 존재 하지 않고 중심부분을 기준으로 그 주위에 방사형으로 결함이 있을 것으로 판단된다. 또한 IG-1 이외의 시료와 비교 했을 때에도 CND 시험기의 속도와 저주파 결함 탐지기의 속도 평균이 근접한 것으로 보아 결함이 비교적 적은 편이고 신선한 상태에 가깝다는 것을 알 수 있다.

### 3.2.2 IG-2의 저주파 결합 탐지기 속도에 따른 결합

Figure 3-3은 저주파 결합 탐지기로 측정된 IG-2의 x, y, z축에 대한 속도를 나타낸 것이다. x축에 대한 저주파 결합 탐지기 속도분포를 나타내는 Figure 3-3(a)의 경우 저주파 결합 탐지기의 평균속도는 864.2 m/s로 CND의 평균속도인 1969.5 m/s보다 약간 낮게 나타났다. y축에 대한 저주파 결합 탐지기 속도분포를 나타내는 Figure 3-3(b)을 보면, 저주파 결합 탐지기의 평균속도는 861.6 m/s로 CND 평균속도인 1921.9 m/s보다 낮게 측정되었다. 이 결과는 x축의 결과와 비슷한 값을 보여 x축과 y축이 속도 저하를 일으키는 결합 인자가 비슷하게 있음을 의미한다. 즉, 결합면이 x축과 비슷하게 존재 한다는 것을 의미하며 결합 면이 x축에 미치는 영향과 y축에 미치는 영향이 비슷하다는 것을 보여준다. z축에 대한 저주파 결합 탐지기 속도분포를 나타내는 Figure 3-3(c)를 보면, 저주파 결합 탐지기의 평균속도는 1021.9 m/s로 CND 평균속도인 2036.1 m/s보다 낮게 측정되었다. 반간접법에 대한 저주파 결합 탐지기 속도분포를 나타내는 Figure 3-3(d)를 보면, 저주파 결합 탐지기의 평균속도는 1356.7 m/s로 CND 평균속도인 1975.8 m/s보다 낮게 측정되었다. 평균 속도의 차이만을 고려해 볼 때 결합면은 z축에 가장 큰 영향을 미치고 있으며, 그다음으로 y축, x축 순으로 판단된다. 종합해보면 IG-2의 x축과 같은 경우는 CND 시험기 속도와 비교했을 때 전반적으로 낮은 것으로 판단되었다. 이와 같은 결과는 내부에 약간의 결합이 있을 것으로 판단된다. y축과 z축 또한 비슷한 경향을 보였고 결합이 있을 것으로 판단하였다.

IG-2시료와 같은 경우에는 저주파 결합 탐지기의 속도가 전반적으로 CND 시험기의 속도보다 느리다는 것을 알 수 있다. 화강암 시료이고 외부적으로 충격을 가하지 않았기 때문에 거의 신선한 상태라고 할 수 있는 시료임에도 불구하고 실측치는 300 m/s에서 800 m/s까지의 분포가 가장 많이 차지하고 있다. x축 하나의 데이터로 비추어 보면 기계적인 오류이거나 측정 당시 측정 방법의 오류 정도로 생각 할 수도 있겠지만 우리 연구에서는 x축, y축, z축의 3가지 방향으로 측정하였고 이 데이터로 3차원 모델링을 실시하여 결합을 예측하였기 때문에 오류라고 생각하기 보단 실제 결합의 존재로 판단할 수 있다. 때문에 이와 같은 결과가 나왔다고 생각 할 수 있다. 결과적으로 IG-2 시료는 전반적으로 결합이 골고루 분포하고 있고 비교적 결합이 적은 부분도 존재한다고 사료된다.

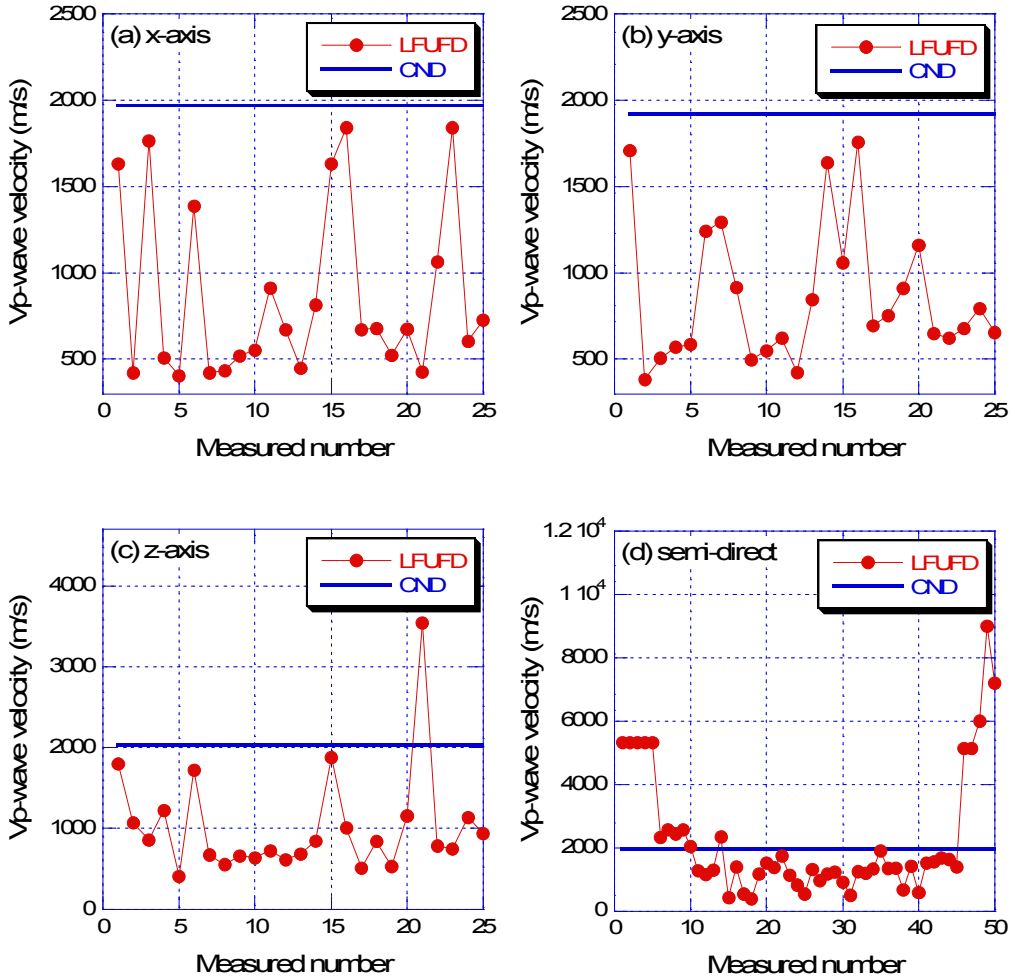


Figure 3-3.  $V_p$ -wave velocity of the (a) x-axis, (b) y-axis, (c) z-axis, and (d) semi-direct directions on IG-2 measured by LFUFD and CND.

직접법 값들과 마찬가지로 반 간접법 값들도 평균적으로 값이 작게 측정됐다. 결과적으로 전반적인 결함이 많을 것으로 판단하고 과도하게 높은 값들이 나온 것은 저주파 결함 탐지기의 적용 범위적인 문제로 생각된다. 측정거리의 적용 범위를 확실하게 알 수는 없지만 대략적으로 1.5 cm 내외의 길이에서는 시간이 매우 작게 나오는 것으로 판단되므로 현재의 값들 중 높은 수치의 속도들은 평균에 제외하여 분석 하였다.

IG-1과 비교하였을 때 전반적으로 속도의 평균이 낮게 나왔기 때문에 결함이 많다고 할 수 있다. 또한 IG-1과 IG-2의 CND 시험기 속도 평균을 비교 했을 때 IG-2의

속도 평균이 IG-1의 평균 속도 보다 약 100 m/s 정도 빠르다. 하지만 전반적인 저주파 결합 탐지기 속도는 IG-1보다 IG-2가 더 느리기 때문에 결합이 더 많다고 생각할 수 있다.

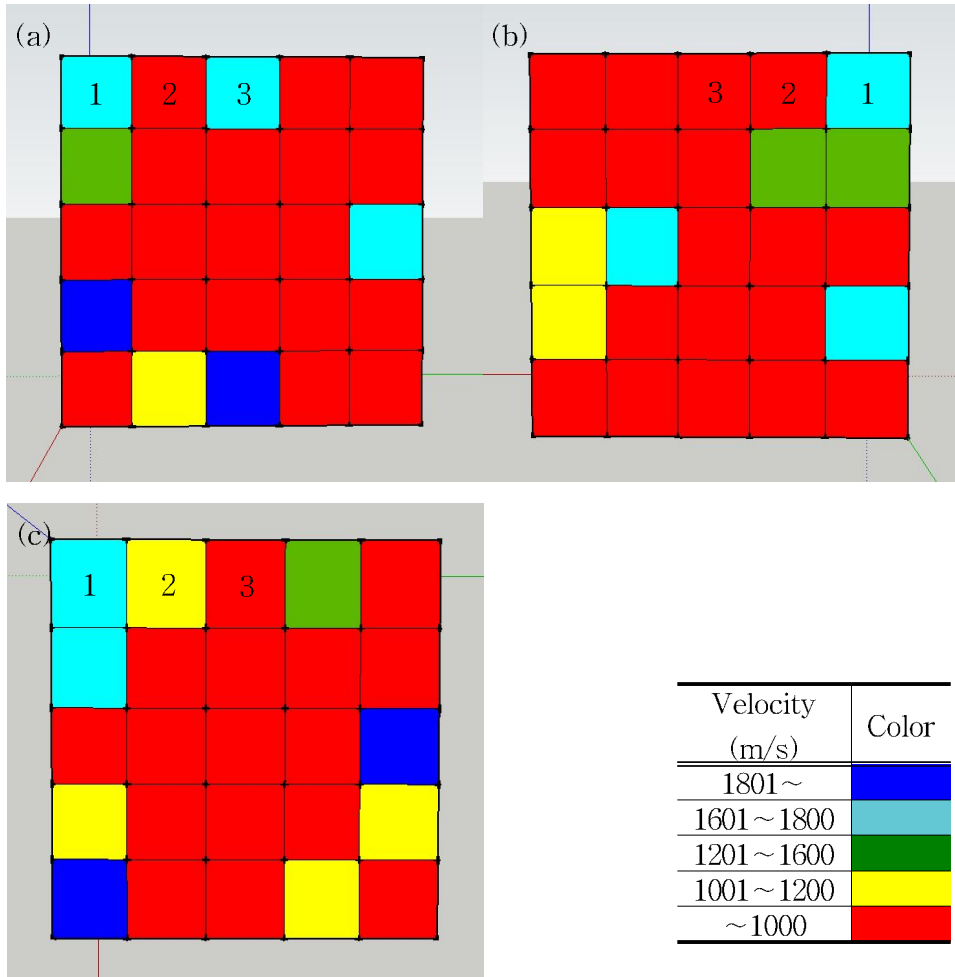


Figure 3-4.  $V_p$ -wave velocity distribution of the (a) x-axis, (b) y-axis, and (c) z-axis directions on the IG-2.

위에서 언급한 바와 같이 전반적으로 결합이 많을 것으로 판단하였고 결합이 퍼져 있는 만큼 큰 규모의 결합 보다는 미소 규모의 결합이 골고루 분포하며 Figure 3-10의 (a) 와 (c)에서처럼 중심에서 방사형으로 결합이 분포하여 최 외곽까지 연장돼 있을 것으로 사료된다.

### 3.2.3 IG-3의 저주파 결합 탐지기 속도에 따른 결합

Figure 3-5은 저주파 결합 탐지기로 측정된 IG-3의 x, y, z축에 대한 속도를 나타낸 것이다. x축에 대한 저주파 결합 탐지기 속도분포를 나타내는 Figure 3-5(a)의 경우 저주파 결합 탐지기의 평균속도는 1472.6 m/s로 CND의 평균속도인 2620.3 m/s보다 매우 낮게 나타났다. y축에 대한 저주파 결합 탐지기 속도분포를 나타내는 Figure 3-5(b)을 보면, 저주파 결합 탐지기의 평균속도는 1597.1 m/s로 CND 평균속도인 2824.6 m/s보다 낮게 측정 되었다. 이 결과는 x축의 결과와 비슷한 값을 보여 x축과 y축이 속도 저하를 일으키는 결합 인자가 비슷하게 있음을 의미한다. 즉, 결합면이 x축과 비슷하게 존재 한다는 것을 의미하며 결합 면이 x축에 미치는 영향과 y축에 미치는 영향이 비슷하다는 것을 보여준다. 이는 결합이 x축과 비슷하게 존재 한다는 것을 의미하며 결합 면이 x축에 미치는 영향과 y축에 미치는 영향이 비슷하다는 것을 보여준다. 평균 속도의 차이는 x축 약 1150 m/s와 y축 1230 m/s로 보아 결합 면이 x축보다 y축에 더 큰 영향을 미치고 있다. 종합해보면 IG-3의 x축과 같은 경우는 CND 시험기 속도와 비교했을 때 전반적으로 매우 낮은 것으로 판단되었다. 이와 같은 결과는 내부에 많은 결합이 있을 것으로 판단된다. y축 또한 비슷한 경향을 보였고 결합이 있을 것으로 판단하였다.

IG-3시료와 같은 경우에는 z축 방향으로 수직한 두 개의 절단면이 존재하여 z축의 저주파 결합 탐지기는 측정이 불가능 하였다. 절단면과 같은 경우는 임의 적으로 절단을 하여 그 면을 접착제로 붙여놓았기 때문에 파가 거의 흡수 되어 측정이 되지 않았다. CND 시험기의 속도와 같은 경우에는 다른 시료들과 다르게 비교적 빠른 속도로 측정 되었다. 때문에 저주파 결합 탐지기의 속도 또한 평균 속도는 빠른 편이었다. 하지만 결합 적으로 판단하였을 때 절단면 주변으로 약간의 결합이 발생하는 것을 Figure 3-6에서 알 수 있다. Figure 3-6으로 보아 비교적 결합이 적은 시료이다. 하지만 절단면을 인위적으로 생성하면서 발생한 충격으로 인하여 Figure 3-6 (a)와 같이 절단면 주변에 약간의 결합들이 좀 더 존재하였다. 그러나 평균속도로 보아 그 값이 더 작은 IG-1과 IG-2의 시료보단 비교적 결합이 작을 것으로 판단된다.

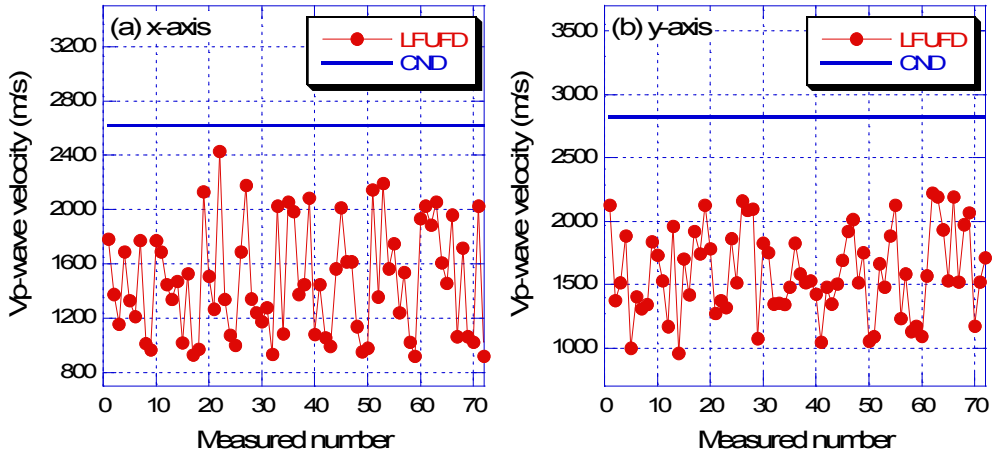


Figure 3-5.  $V_p$ -wave velocity of (a) x-axis, and (b) y-axis directions on IG-3 measured by LFUFD and CND.

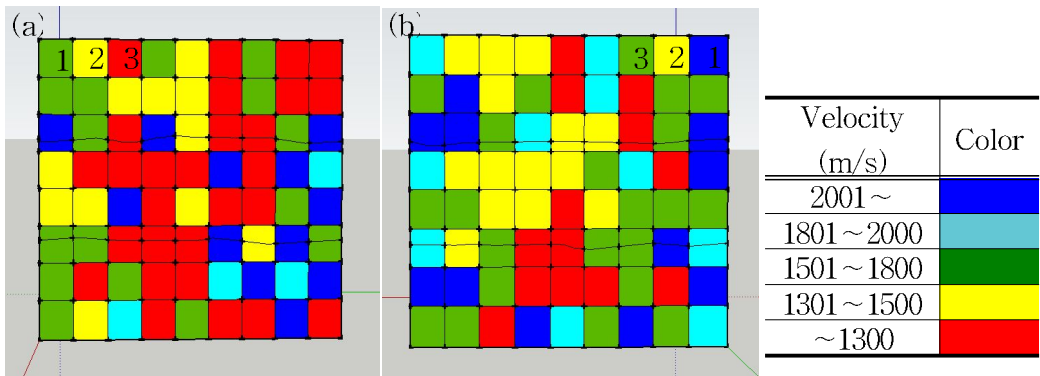


Figure 3-6.  $V_p$ -wave velocity distribution of (a) x-axis, and (b) y-axis directions on IG-3.



### 3.2.4 IG-4의 저주파 결합 탐지기 속도에 따른 결합

Figure 3-7은 저주파 결합 탐지기로 측정된 IG-4의 x, y, z축에 대한 속도를 나타낸 것이다. x축에 대한 저주파 결합 탐지기 속도분포를 나타내는 Figure 3-7(a)의 경우 저주파 결합 탐지기의 평균속도는 1009.8 m/s로 CND의 평균속도인 2253.3 m/s보다 매우 낮게 나타났다. y축에 대한 저주파 결합 탐지기 속도분포를 나타내는 Figure 3-7(b)을 보면, 저주파 결합 탐지기의 평균속도는 829.3 m/s로 CND 평균속도인 2166.4 m/s보다 낮게 측정 되었다. 이 결과는 x축의 결과보다 낮은 값을 보여 y축이 x축보다 속도 저하를 일으키는 결합 인자가 더 많음이 있음을 의미한다. 즉, 결합 면이 x축에 미치는 영향보다 y축에 미치는 영향이 더 크다는 것을 보여준다. z축에 대한 저주파 결합 탐지기 속도분포를 나타내는 Figure 3-7(c)를 보면, 저주파 결합 탐지기의 평균속도는 1244.2 m/s로 CND 평균속도인 2426.6 m/s보다 낮게 측정 되었다. 반간접법에 대한 저주파 결합 탐지기 속도분포를 나타내는 Figure 3-7(d)를 보면, 저주파 결합 탐지기의 평균속도는 1486.4 m/s로 CND 평균속도인 2282.1 m/s보다 낮게 측정 되었다. 평균 속도의 차이만을 고려해 볼 때 결합 면은 y축에 가장 큰 영향을 미치고 있으며, 그다음으로 x축, z축 순으로 판단된다. 종합해보면 IG-4의 x축과 같은 경우는 CND 시험기 속도와 비교했을 때 전반적으로 낮은 것으로 판단되었다. 이와 같은 결과는 내부에 약간의 결합이 있을 것으로 판단된다. y축과 z축 또한 비슷한 경향을 보였고 결합이 있을 것으로 판단하였다.

IG-4 시료와 같은 경우에는 특수하게 z축 방향으로 시추공이 존재한다. 이는 같은 물성의 시료인 IG-5와 비교하기 위함이기도 하다. IG-4와 같은 경우 CND 시험기의 속도 평균은 2282.1 m/s로 비교적 양호한 속도를 갖고 있다. 결합 적인 부분을 보았을 때 저주파 결합 탐지기의 속도평균은 낮은 편에 속한다. 이는 내부의 결합이 많이 존재한다는 것을 의미한다. 하지만 특수하게 만들어 놓은 시추공 부분의 결합으로 생각 되진 않는다. 그 이유는 같이 측정한 IG-5의 시료와 비교 했을 때 결합의 경향이 크게 차이가 나지 않기 때문이라고 보여 진다.

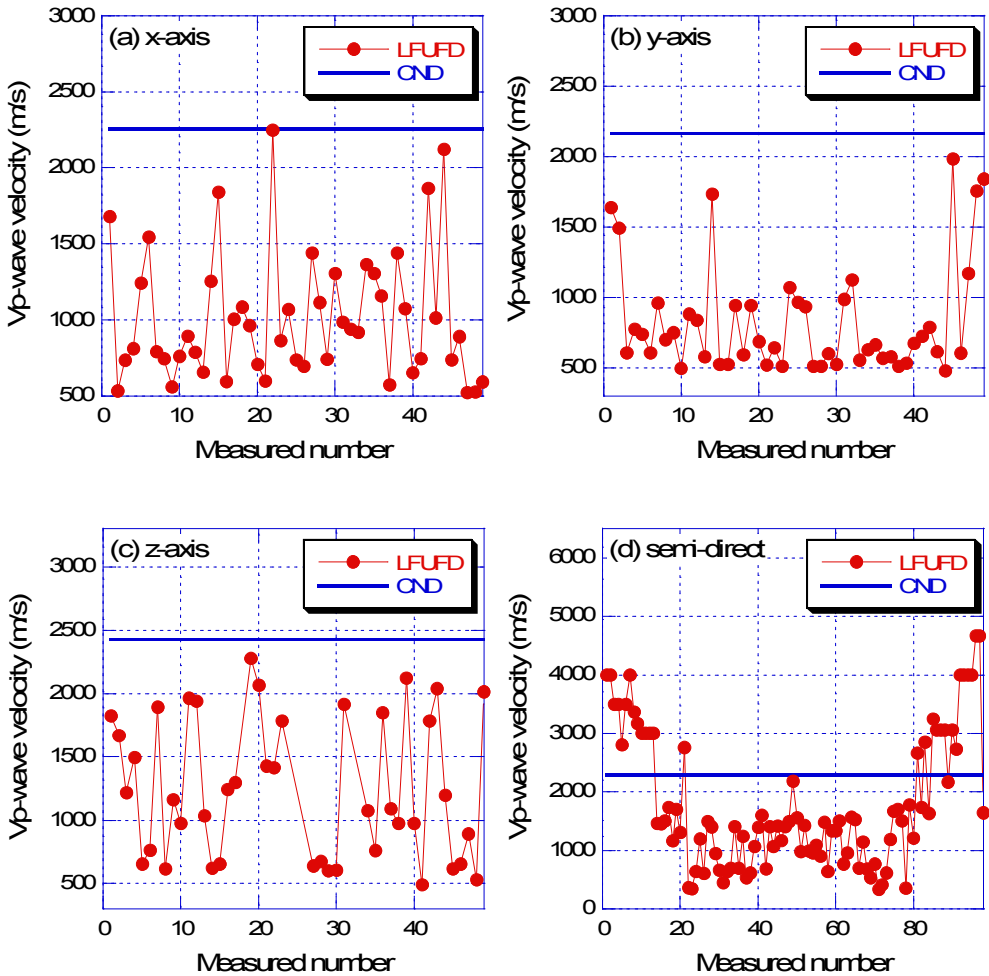


Figure 3-7.  $V_p$ -wave velocity of (a) x-axis, (b) y-axis, (c) z-axis, and (d) semi-direct directions on IG-4 measured by LFUFD and CND.

앞서 언급했듯이 Figure 3-8과 Figure 3-10을 비교했을 때 결함의 경향이 비슷하다. Figure 3-8을 보면 전반적인 결함이 보인다. IG-4와 같은 경우는 시추공 부분이 존재하는데 암석에서 보단 공기 중의 파 속도가 더 느리기 때문에 Figure 3-8 (a), (b)의 중심부에서 저주파 결함 탐지기의 속도가 더 느려져야 한다. 하지만 중심부 주변보다 약간 빠르다는 것을 보여준다. 이와 같은 경우에는 균열은 규모가 크기 때문이라고 생각 된다. 전기에서도 전기가 흐를 때 저항이 낮은 쪽으로 흐르려고 하는 성질이 있다. 따라서 중심의 공기 중으로 파가 진행하기 보단 시추공 면을 따라 진행했기 때문이라

고 생각할 수 있다. z축의 속도가 좀 더 빠른 것을 보면 시추공 부분이 영향을 미치고 있다고 생각할 수는 있다. 그러나 그 또한 IG-5의 경우도 비슷한 경향을 띄기 때문에 관련이 없다고 판단된다.

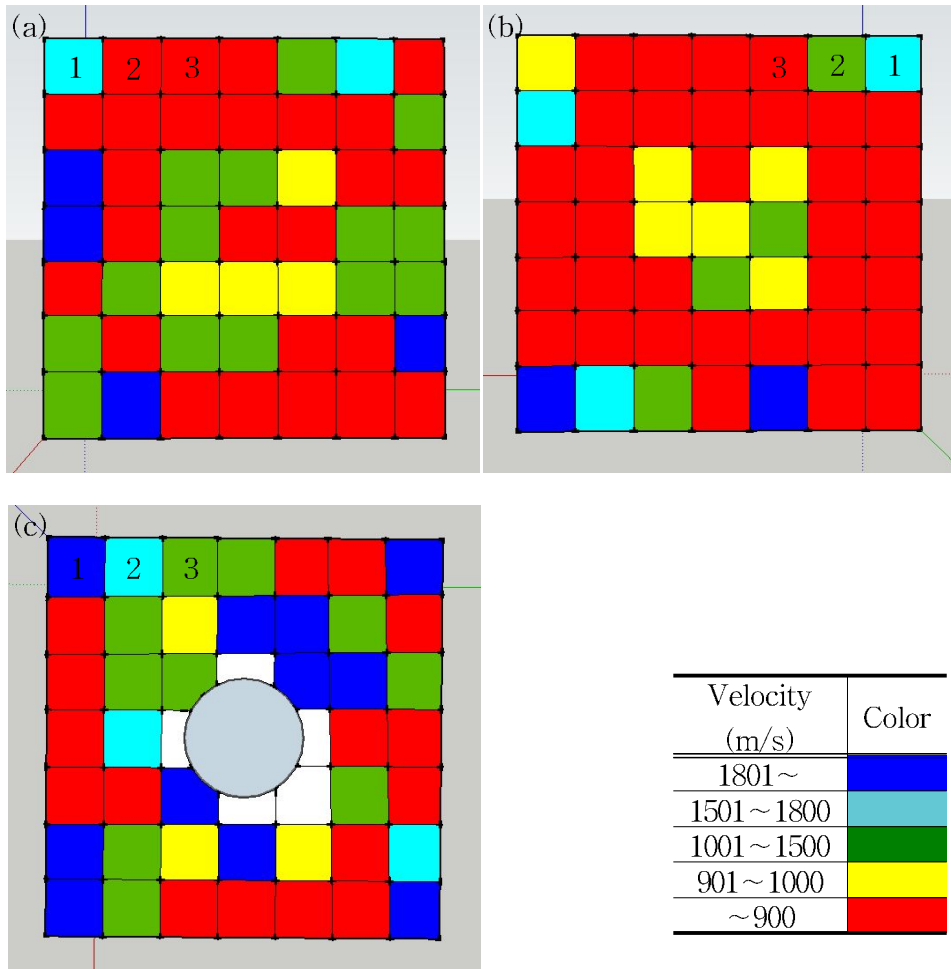


Figure 3-8.  $V_p$ -wave velocity distribution of (a) x-axis, (b) y-axis, and (c) z-axis directions on IG-4.

### 3.2.5 IG-5의 저주파 결합 탐지기 속도에 따른 결합

Figure 3-9는 저주파 결합 탐지기로 측정된 IG-5의 x, y, z축에 대한 속도를 나타낸 것이다. x축에 대한 저주파 결합 탐지기 속도분포를 나타내는 Figure 3-9(a)의 경우 저주파 결합 탐지기의 평균속도는 839.1 m/s로 CND의 평균속도인 2203.1 m/s보다 매우 낮게 나타났다. y축에 대한 저주파 결합 탐지기 속도분포를 나타내는 Figure 3-9(b)을 보면, 저주파 결합 탐지기의 평균속도는 848.0 m/s로 CND 평균속도인 2147.8 m/s보다 낮게 측정 되었다. 이 결과는 x축의 결과보다 낮은 값을 보여 y축이 x축보다 속도 저하를 일으키는 결합 인자가 더 많음이 있음을 의미한다. 즉, 결합 면이 x축에 미치는 영향보다 y축에 미치는 영향이 더 크다는 것을 보여준다. z축에 대한 저주파 결합 탐지기 속도분포를 나타내는 Figure 3-9(c)를 보면, 저주파 결합 탐지기의 평균속도는 986.1 m/s로 CND 평균속도인 2335.9 m/s보다 낮게 측정 되었다. 반간접법에 대한 저주파 결합 탐지기 속도분포를 나타내는 Figure 3-9(d)를 보면, 저주파 결합 탐지기의 평균속도는 1653.9 m/s로 CND 평균속도인 2171.6 m/s보다 낮게 측정 되었다. 평균 속도의 차이만을 고려해 볼 때 결합 면은 z축에 가장 큰 영향을 미치고 있으며, 그다음으로 y축, x축 순으로 판단된다. 종합해보면 IG-5의 x축과 같은 경우는 CND 시험기 속도와 비교했을 때 전반적으로 낮은 것으로 판단되었다. 이와 같은 결과는 내부에 약간의 결합이 있을 것으로 판단된다. y축과 z축 또한 비슷한 경향을 보였고 결합이 있을 것으로 판단하였다.

IG-5 시료와 같은 경우에는 IG-4의 시료와 비교 분석하기 위한 시료로서 시추공 여부에 따른 속도분포의 변화를 보기 위함이다. IG-5와 같은 경우 CND 시험기의 속도 평균은 2228.9 m/s로 비교적 양호한 속도를 갖고 있다. 결합 적인 부분을 보았을 땐 저주파 결합 탐지기의 속도평균은 낮은 편에 속한다. 이는 내부의 결합이 많이 존재한다는 것을 의미한다. IG-4와 비교 했을 때 속도 분포가 비슷한 경향을 띄고 있다.

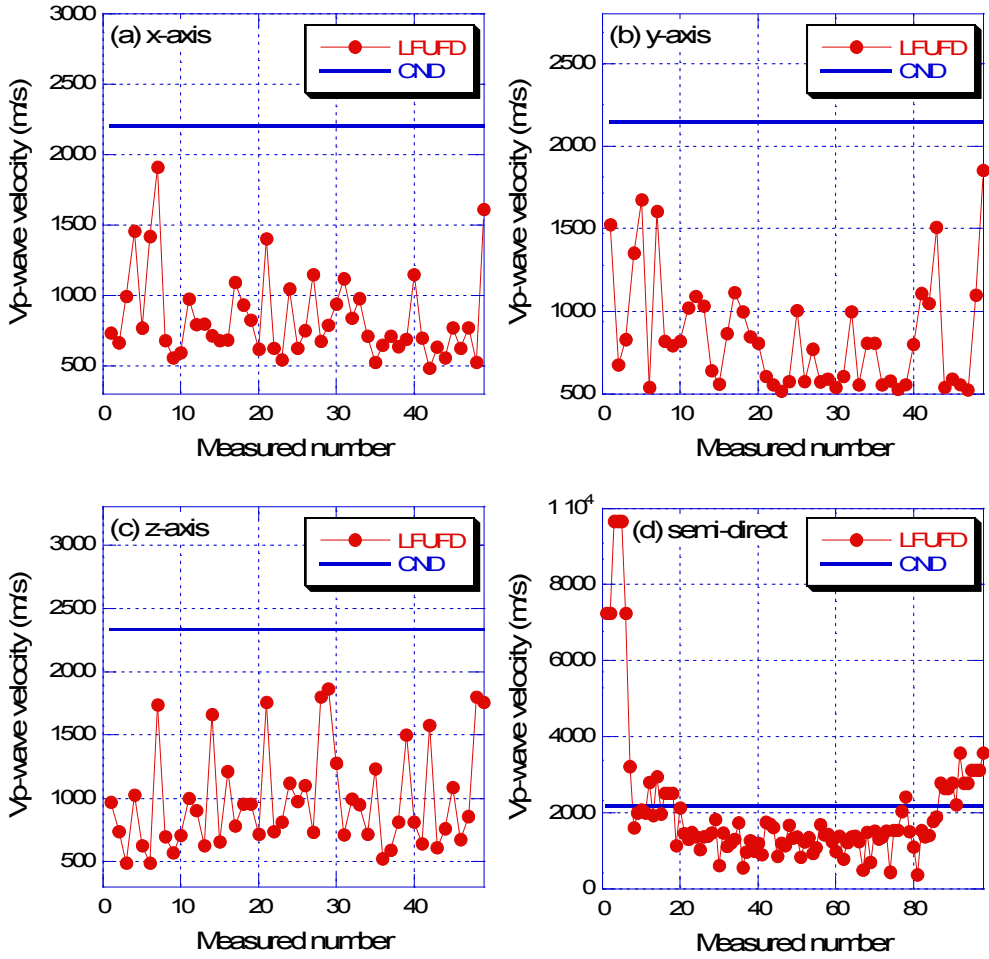


Figure 3-9. V<sub>p</sub>-wave velocity of (a) x-axis, (b) y-axis, (c) z-axis, and (d) semi-direct directions on IG-5 measured by LFUFD and CND.

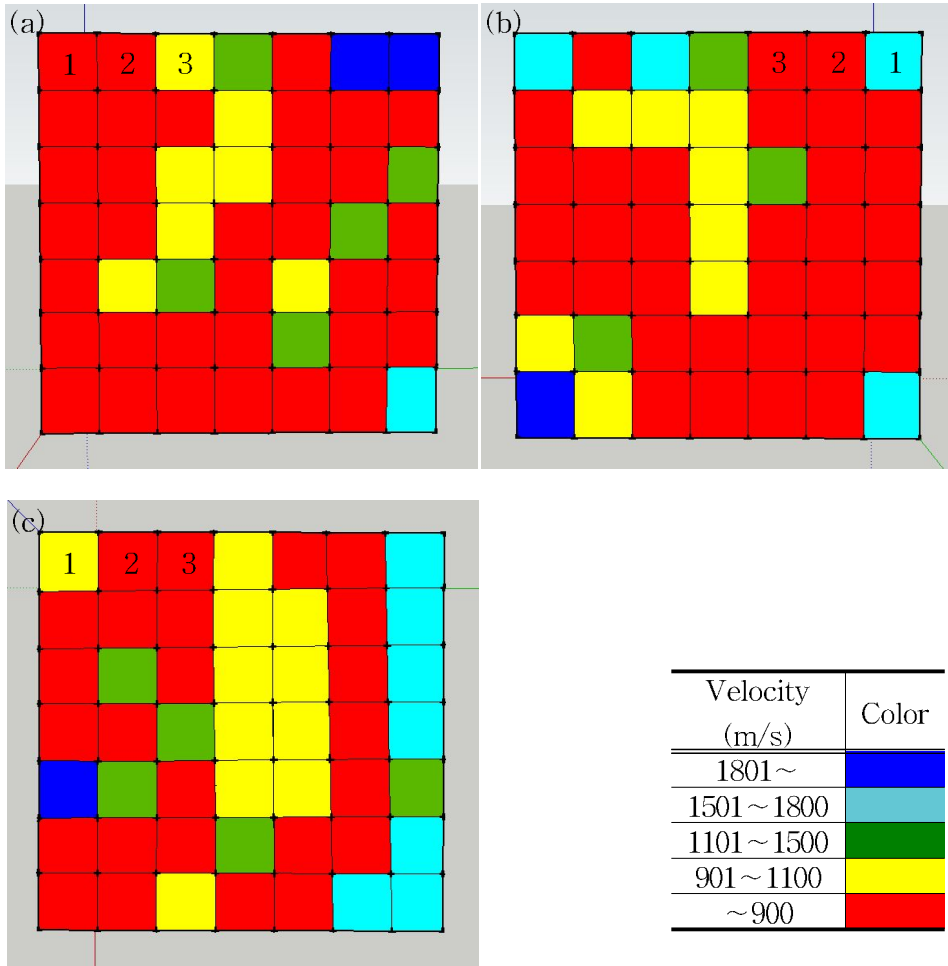


Figure 3-10.  $V_p$ -wave velocity distribution of (a) x-axis, (b) y-axis, and (c) z-axis directions on IG-5.

결함의 분포는 IG-4와 비슷한 경향을 띄고 있으며 전반적으로 결함 많다고 나타난다. IG-4와 차이점은 시추공 부분이 없다는 것인데 이에 의한 결함의 분포는 차이가 없다(Figure 3-10). 앞서 언급한 바와 같이 결함 평가에 있어서 시추공 부분 같은 큰 규모의 결함은 측정이 불가능하며 시추공에 의한 결함 분포의 변화도 미미하다고 판단된다.

### 3.3 실버슈미트 해머를 이용한 압축강도 환산

본 연구에서 사용된 실버슈미트(Silver Schmidt) 해머는 스위스 Proceq SA의 실버슈미트 L-type 해머이다. 이 실버슈미트 해머는 전자장비가 결합된 슈미트 해머로서 기존의 슈미트 해머와 몇 가지 점에서 차이가 있다. 기존 슈미트 해머는 타격 플런저의 기계적 이동인 R값을 측정하는 반면, 실버슈미트 해머는 타격 직전과 직후의 속도를 측정하여 측정 시편에 축적된 에너지를 계산하는 실제 반발계수 Q값을 측정한다. 또한 슈미트해머의 경우 타격 방향에 따른 보정이 필요하지만 실버슈미트 해머는 타격 방향에 대한 보정이 필요하지 않다(임현수 외, 2015). 시료의 일축압축을 실시하기 전 IG-7 시료의 하중을 파악하기 위하여 실버슈미트 해머를 이용하여 Q값을 측정하였고 경험식 (2)를 이용하여 하중을 계산하였다.

$$0.081527 + 0.51667Q + 0.018534Q^2 \quad (2)$$

Q값은 각 면당 20회를 실시하였고 그 값들은 Table 3-2에 나타냈다. 각 면 값의 최솟값과 최댓값을 뺀 후에 18개 값을 이용하여 평균을 구하였다. 그 평균을 이용하여 일축 압축강도를 추정하였고 그에 따른 Q값의 평균은 62.64가 나왔다. 이 Q값의 평균을 식 (2)에 대입하여 계산하면 강도가 약 105 MPa이 되고 하중으로 변환하기 위해  $\text{kgf/cm}^2$ 으로 환산 하고난 후에 면적을 이용하여 각각의 하중을 계산하였다 (Table 3-3).

Table 3-2. Q-values of IG-7 measured by silver Schmidt hammer

	X-axis	Y-axis	Z-axis
1	59.5	65.5	66.5
2	60.5	65.5	65.5
3	64.5	61.5	67.0
4	60.0	64.0	64.5
5	60.5	61.0	63.0
6	64.0	64.5	60.5
7	63.0	61.5	63.5
8	64.5	60.0	63.5
9	62.0	59.5	61.5
10	64.5	58.5	66.5
11	60.5	56.0	61.0
12	63.0	63.5	61.5
13	65.0	62.5	65.5
14	63.5	62.5	66.5
15	62.5	60.0	65.5
16	63.5	60.5	64.5
17	65.0	62.5	62.5
18	61.0	58.0	59.5
Average	62.6	61.5	63.8
Total average		62.6	

하중 단계는 일축압축강도의 50%, 60%, 70%, 80% 하중으로 진행하였다. 따라서 각 단계에 따른 하중을 먼저 계산하고 그에 알맞은 일축압축시험을 실시하였다. 각 하중은 Table 3-3과 같다.

Table 3-3. Load steps for uniaxial compression test

Load step (%)	X-axis (ton)	Y-axis (ton)	Z-axis (ton)
Initial	72.6	73.5	69.2
50	36.3	36.7	34.6
60	43.5	44.1	41.5
70	50.8	51.4	48.4
80	58.1	58.8	55.3



### 3.4 하중 단계에 따른 저주파결합 탐지기의 속도

하중은 일축 압축기를 이용하여 IG-7 시료 물성치에 맞는 하중으로 압축을 실시하였다. 그에 따라 저주파 결합 탐지기를 이용하여 시간을 측정하고 속도를 계산하였다. 본 연구에서 사용된 일축압축 시험기는 DAEKYOUNG TECH & TESTER MTG. Co. Ltd.(Model No. DTU-900HC series)의 만능재료 시험기로 최대 용량은 150 ton이다.

하중단계에 따라 일축압축시험을 실시한 후 저주파 결합 탐지기에 의해 속도를 측정하였으며 그 결과는 Table 3-4, -5, -6, -7에 정리하였다. x축의 경우 하중을 주기 전의 평균속도는 800.2 m/s이고 일축압축강도의 50% 하중이 주어졌을 때 평균속도는 552.0 m/s, 60% 일 때 481.1 m/s, 70% 일 때 348.5 m/s, 그리고 80% 일 때는 385.3 m/s를 각각 보였다. y축의 경우 하중을 주기 전의 평균속도는 717.6 m/s이고 일축압축강도의 50% 하중이 주어졌을 때 평균속도는 646.4 m/s, 60% 일 때 571.9 m/s, 70% 일 때 439.2 m/s, 그리고 80% 일 때는 620.5 m/s로 x축과 비슷한 경향으로 초기 속도에서 점점 느려지다 80%에서만 다시 빨리지는 경향을 보이고 있다. 하지만 z축의 경우 하중을 주기 전의 평균속도가 711.3 m/s이고 일축압축강도의 50% 하중이 주어졌을 때 평균속도는 762.6 m/s로 약간 증가한 것을 볼 수 있다. 그러나 경향을 중점으로 보았을 때는 60% 일 때 711.6 m/s, 70% 일 때 533.5 m/s, 그리고 80% 일 때 701.8 m/s로 x축, y축의 경향의 차이점이 없는 것으로 나타났다. 또한 반 간접법으로 측정한 결과도 초기속도평균은 1632.7 m/s, 50% 일 때 1725.1 m/s, 60%일 때 1160.0 m/s, 70%일 때 706.8 m/s, 그리고 80%일 때 1940.2 m/s로 같은 경향을 보였다(Table 3-4).

Table 3-4.  $V_p$ -wave velocity (m/s) of the x-, y-, z-axis directions on IG-7 measured by LFUFD

Axis \ Load step		Initial	50%	60%	70%	80%	
		x-axis		771.4	540.0	482.1	285.2
1		686.4	529.4	675.0	445.1	336.1	
2		1080.0	582.7	409.1	385.7	378.5	
3		852.6	268.2	794.1	292.4	349.1	
4		975.9	757.0	447.5	445.1	509.4	
5		723.2	316.4	389.4	288.3	288.3	
6		686.4	871.0	349.1	401.0	632.8	
7		526.0	460.2	468.2	306.8	445.1	
8		900.0	642.9	315.2	287.2	275.5	
9		Average	800.2	552.0	481.1	348.5	385.3
Average		714.3	1081.1	661.2	278.7	446.9	
1		327.9	315.0	941.2	354.0	512.8	
2		579.7	388.3	522.9	655.7	1000.0	
3		987.7	833.3	509.6	381.0	720.7	
4		963.9	597.0	479.0	416.7	329.2	
5		672.3	792.1	640.0	592.6	606.1	
6		975.6	869.6	615.4	307.7	442.0	
7		317.5	634.9	506.3	258.1	526.3	
8		919.5	306.5	271.2	708.0	1000.0	
9		Average	717.6	646.4	571.9	439.2	620.5
Average		850.0	867.3	850.0	817.3	858.6	
1		691.1	934.1	850.0	825.2	858.6	
2		752.2	787.0	894.7	281.5	534.6	
3		512.0	1011.9	322.0	352.7	521.5	
4		427.1	570.5	1164.4	1103.9	1180.6	
5		509.0	772.7	702.5	422.9	708.3	
6		620.4	620.4	269.0	266.5	318.4	
7		691.1	625.0	643.9	357.1	696.7	
8		1349.2	944.4	708.3	374.4	639.1	
9		Average	711.3	792.6	711.6	533.5	701.8
Average							

Table 3-5  $V_p$ -wave velocity (m/s) of the semi-direct directions on IG-7 measured by LFUFD

Load step No.	Initial	50%	60%	70%	80%
1	1166.7	1166.7	1166.7	1076.9	1076.9
2	9333.3	9333.3	3111.1	145.8	7000.0
3	1647.1	1647.1	1555.6	1120.0	3111.1
4	2590.9	1900.0	1900.0	655.2	1781.3
5	1583.3	1017.9	190.6	298.4	425.4
6	655.2	686.7	1075.5	262.7	1781.3
7	500.0	1118.4	1011.9	289.1	965.9
8	442.7	1118.4	352.7	977.0	1024.1
9	449.7	1180.6	416.7	841.6	1103.9
10	578.2	904.3	955.1	850.0	340.0
11	1164.4	809.5	491.3	625.0	290.1
12	611.5	1287.9	372.8	483.0	1118.4
13	2478.3	425.4	1000.0	179.2	934.4
14	215.1	1140.0	1075.5	395.8	982.8
15	186.3	678.6	1239.1	206.5	1187.5
16	1120.0	1037.0	1076.9	3111.1	2800.0
17	3500.0	2800.0	2333.3	127.9	2000.0
18	1166.7	2800.0	1555.6	1076.9	7000.0
Average	1632.7	1725.1	1160.0	706.8	1940.2

### 3.5 하중 단계별 저주파결합 탐지기 속도에 따른 결합

하중 단계별로 일축 압축을 실시하였고 그에 따른 속도 또한 측정하였다. 그 속도에 따라서 3D 모델링한 시료에 적용하였고 경향을 분석하였다. 모델링한 결과 암석의 하중 단계에 따른 결합의 경향은 Figure 3-11과 같이 압축할수록 결합이 증가하는 추세를 보였다. 이는 압축을 할수록 좀 더 견고해진다고 생각 할 수 있는데 50% 이하 일 때는 견고해지고 단단해지는 경향일 수 있으나 50% 이상의 하중을 받을 경우에는 미소결합이 증가한다는 것을 알 수 있다.

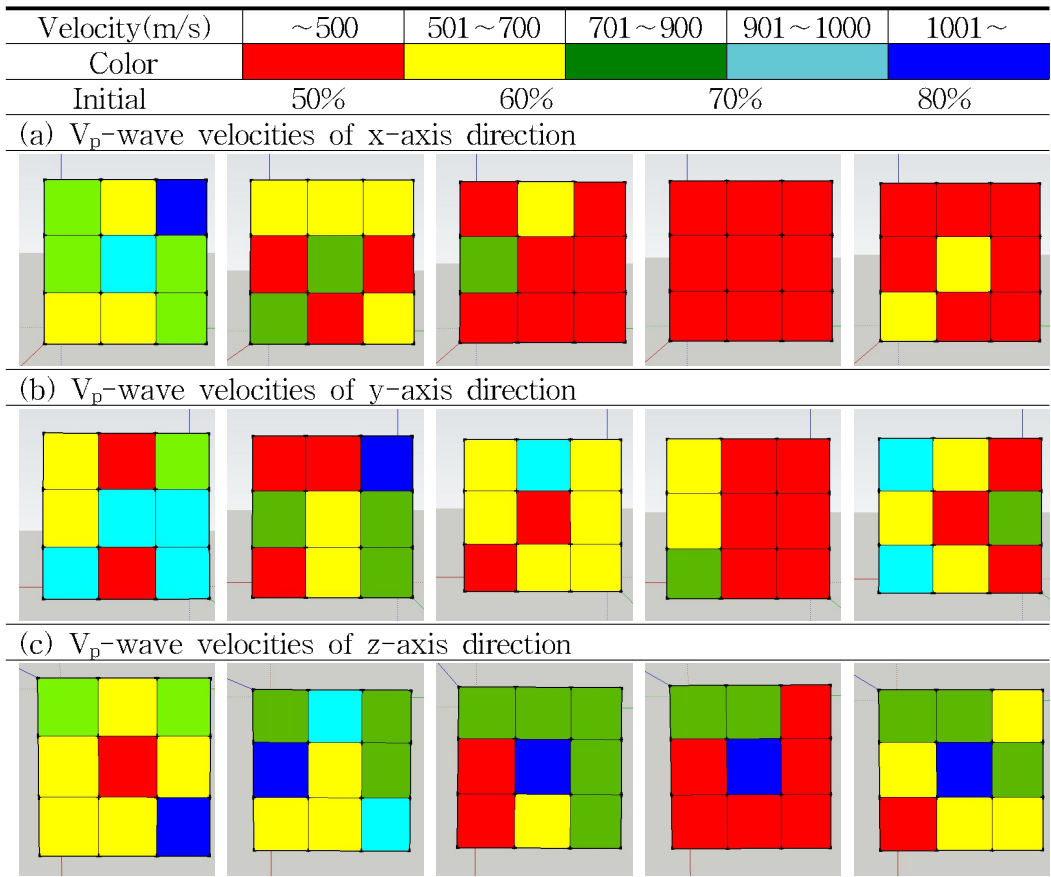


Figure 3-11.  $V_p$ -wave velocity of (a) x-axis, (b) y-axis, and (c) z-axis directions with load steps on IG-7.

Table 3-6. Average of  $V_p$ -wave velocities on IG-7 measured by LFUFD

Load step \ Axis	Initial	50	60	70	80
X-axis	800.2	552.0	481.1	348.5	385.3
Y-axis	717.6	646.4	571.9	439.2	620.5
Z-axis	711.3	792.6	711.6	533.5	701.8
Average	743.0	663.7	588.2	440.4	569.2

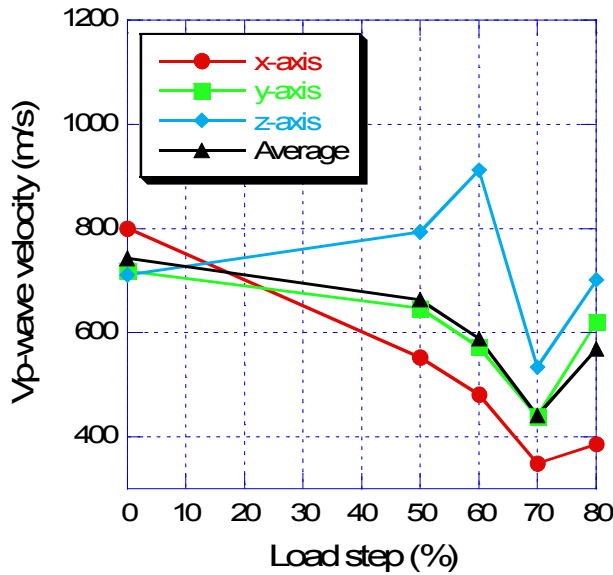


Figure 3-12. Variation of  $V_p$ -wave velocities with load steps, 50%, 60%, 70%, 80% on IG-7.

IG-7의 저주파 결합 탐지기 평균속도를 각 축마다 하중에 따라 분류 하였고 축에 대하여 평균까지 계산하여 분석하였다(Table 3-8). Figure 3-12에서 볼 수 있듯이 x축, y축 z축 모두 비슷한 경향을 보인다. 하지만 z축의 경우 하중단계 50% 까지 속도가 천천히 증가하다 50%~60% 구간에서 급격히 증가하고 60%~70% 구간에서 급격하게 감소하는 경향을 보였다. 이러한 사실은 하중단계에 따라 암석 내 미세 균열들의 발달 정도가 달라지기 때문에 결과적으로 측정된 저주파 결합 탐지기의 속도도 하중단계에 따라 달라짐을 의미한다. x축, y축 그리고 평균값들은 그 경향을 아주 정확히 보여주고 있다. z축과 같이 증가하는 경우는 초기 균열이 좀 더 존재하기 때문에 그 균열들이 다른 축들과 다르게 좀 더 높은 하중까지 균열의

감소 경향을 보이다 60% 이상의 하중에서 다른 축과 같은 경향을 보이기 때문으로 판단된다. 하지만 평균 속도로 봤을 때는 강도 하중의 50%이상 줄 경우 70%하중 선까지는 감소하는 경향을 보이다 70%이상의 하중에는 다시 속도가 증가하는 경향을 보여준다.

초기속도에서 하중단계에 따라 측정된 속도를 나눈 정규화 속도 결과는 Table 3-9에 정리하여 Figure 3-13에 나타냈다. 앞서 언급한 바와 같이 50%에서 70% 구간은 속도가 감소하는 구간으로 새로운 균열들이 발생하는 구간들이다. 발생빈도는 그래프의 기울기로 알 수 있다. 그래프의 기울기가 비교적 가파를 경우는 균열이 급격하게 많이 발생 했다는 것을 알 수 있다. 때문에 50%에서 60% 구간보다는 60%에서 70%구간에서 좀 더 빠르게 많은 양의 균열이 발생한 것을 알 수 있다. 그리고 70%에서 80% 하중 구간에서는 앞서 만들어진 균열이 압축되면서 감소한다고 판단된다.

Table 3-7. Variation of normalized  $V_p$ -wave velocity on IG-7

Load step Axis	Initial	50%	60%	70%	80%
X-axis	1.00000	0.68983	0.60122	0.43552	0.48150
Y-axis	1.00000	0.90078	0.79696	0.61204	0.86469
Z-axis	1.00000	1.11430	1.00042	0.75004	0.98664
Average	1.00000	0.89327	0.79166	0.59273	0.76608

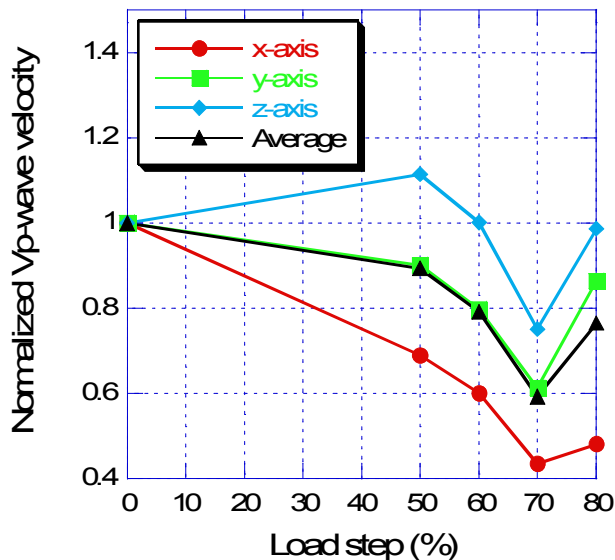


Figure 3-13. Normalized velocity of each axis direction with load step on IG-7.

## 4. 결론

본 연구는 비파괴시험법의 하나인 저주파 결합 탐지기법을 이용하여 하중단계에 따른 암석 내부의 결합 상태를 정량적으로 나타내는데 있다. 이를 위하여 다양한 크기의 정방형 화강암 시료에 대해 CND와 저주파 결합 탐지기 측정을 실시하여 그 결과로부터 저주파 결합 탐지기법의 암석 결합 평가법으로서의 적용성을 확인하였다. 그리고 대상 화강암에 대한 일축압축강도의 50%, 60%, 70%, 80% 등 네 가지 경우의 하중단계에 따른 세 방향의 속도를 분석하여 화강암 내 결합 상태를 평가하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

다양한 크기의 정방형 화강암 시료에 대한 CND와 저주파 결합 탐지기 측정결과를 살펴보면, IG-1시료의 경우 CND 평균속도는 1890.8 m/s이며, 저주파 결합 탐지기의 평균속도는 1896.7 m/s로 두 결과 모두 비슷하게 나타났다. IG-2시료의 경우 CND 평균속도는 1975.8 m/s인 반면, 저주파 결합 탐지기의 평균속도는 약 900.0 m/s로 두 결과가 약 2.2배의 차이를 보였다. z축에 수직하게 절단한 후 실리콘으로 접착시킨 IG-3시료의 경우 CND 평균 속도는 2730.0 m/s인 반면 저주파 결합 탐지기의 평균속도는 약 1500.0 m/s로 두 결과가 약 1.8배의 차이를 보였다. 크기는 같지만 시료의 z축에 평행하게 시추공이 있는 IG-4와 없는 IG-5시료의 경우 CND 평균속도는 각각 2282.1 m/s와 2228.9 m/s인 반면, 저주파 결합 탐지기의 평균속도는 약 1000.0 m/s와 900.0 m/s로 두 결과가 약 2.3배와 약 2.5배의 차이를 보였다. 이상의 결과만을 고려해 볼 때, 전체적으로 평균속도는 CND보다는 저주파 결합 탐지기에 의한 것이 더 낮게 나타났다.

실버슈미트해머에 의해 추정된 IG-7시료에 대한 일축압축강도의 50%, 60%, 70%, 80% 수준의 하중단계 결과를 살펴보면, 하중단계가 50%~70% 구간에서 속도는 감소하는 경향을 보이다가, 70%~80% 구간에서는 속도가 증가하는 경향을 보였다. 이러한 사실은 대상 화강암 내 존재하고 있는 미세균열들이 낮은 하중단계에서는 열려 있던 미세균열들이 닫히게 되며, 하중단계가 증가하면서 새로운 균열들이 형성됨을 지시한다. 속도 크기는 z축>y축>x축 순으로 나타났으며, 이것은 새로 생겨난 균열들이 x축 속도 감소에 가장 많은 영향을 주고 있음을 의미한다. 결론적으로 저주파 결합 탐지기법은 암석 내 결합의 정량적 평가법으로 적용될 수

있으며, 또한 하중단계에 따른 각 방향의 속도 변화 양상을 분석하는데 이용될 수 있을 것으로 판단된다.



## 참 고 문 헌

- 강성승, 고진석, 김정빈, 장보안, 2013, 제주과 결합 탐지기를 활용한 화순 운주사 광배석불의 풍화상태 분석, 지질공학회지, 23, 3, 235-246.
- 구청모, 전석원, 이인우, 2008, 석회석광산의 갱내채광설계 및 안정성평가, 한국암반공학회지 터널과 지하공간, 18, 4, 243-251.
- 김일구, 2009, 퍼지-신경망에 의한 사면지반의 안정성 평가 방법에 관한 연구, 조선대학교 박사학위논문.
- 김종관, 양형식, 김원범, 장명환, 하태욱, 2010, 갱내 파쇄시설 구축을 위한 갱도 안정성평가, 한국암반공학회지 터널과 지하공간, 20, 3, 145-152.
- 김지명, 이찬희, 이명성, 2009, 경주석빙고의 정량적 훼손도 평가와 미기후환경분석, 보존과학회지, 25, 1, 25-38.
- 나태유, 2013, 반복하중 하에서 화강암 및 사암의 역학적 거동 특성, 조선대학교 석사학위논문.
- 민덕기, 문종규, 이상일, 2009, 암석을 대상으로 시행하는 Schmidt Hammer 타격법의 새로운 제안 (I), 한국암반공학회지 터널과 지하공간, 19, 4, 328-338
- 박성미, 이찬희, 이명성, 2009, 화순 운주사 석조불감의 보존환경 및 미기상 분석, 자원환경지질, 42, 1, 73-84.
- 백승철, 김용태, 김홍택, 윤준식, 이윤규, 2006, 초음파 속도를 이용한 암석의 일축 압축강도 평가, 한국지반환경공학회논문집, 7, 2, 33-42.
- 서만철, 송인선, 최희수, 2001, 암석의 파괴 확률 분석을 통한 불국사 삼층석탑 구조 안전 진단, 지구물리, 4, 1, 57-69.
- 유상량, 박종섭, 윤기용, 2011, 말뚝지지형 조립식 보도 잔교의 상부 및 교각 성능 기반설계에 대한 해석연구, 한국방재학회논문집, 11, 5, 63-73.
- 이선길, 2014, 운행 중인 도시철도 직상부의 초고층 빌딩 신축에 따른 지하구조물 안정성 확보방안 연구, 서울과학기술대학교 석사학위논문.
- 이선명, 이명성, 조영훈, 이찬희, 전성원, 김주옥, 김선덕, 2007, 안성 청룡사삼층석탑의 풍화훼손도 진단과 보존처리, 자원환경지질, 40, 5, 661-673.
- 이수곤, 이 송, 1995, 슈미트해머 수치를 이용한 한국 화강암의 일축압축강도 추정 방법, 대한토목학회논문집, 15, 1, 199-210.

- 이찬우, 2013, 석조문화재 풍화특성 평가를 위한 저주파 결합 탐지기의 적용성, 조선대학교 석사학위논문.
- 이철호, 황제돈, 김은혜, 장수호, 2014, 주방식 지하구조물의 설계 방법 고찰 Part I: 매개변수 연구, 한국터널지하공간학회지, 16, 5, 487-495.
- 임현수, 장보안, 김정환, 강성승, 2015, 실버슈미트 Q값으로부터 남극 바톤반도 세종과학기지 주변 암석의 R값 및 일축압축강도 추정, 한국암반공학회지 터널과 지하공간, 25, 2, 199-209.
- 장명환, 양형식, 정소걸, 2000, 폐광지역을 통과하는 고속철도터널의 안정성 평가, 한국암반공학회지 터널과 지하공간, 10, 395-402.
- Jean Hutchinson D., Phillips C., and Cascante G., 2002, Risk considerations for crown pillar stability assessment for mine closure planning, Geotechnical and Geological Engineering, 20, 41-63.
- Hedley, D.G.F., and Grant, F., 1972, Stope-and-pillar design for the Elliot Lake Uranium Mines, Bull. can. Inst. Min. Metallurg, 61, 37-44.
- Zhou J., Li X.B., Shi X.Z., Wei W., and Wu B.B., 2011, Predicting pillar stability for underground mine using Fisher discriminant analysis and SVM methods, Trans. Nonferrous Met. Soc, 21, 2734-2743.

## 부 록

Table 1.  $V_p$ -wave time, distance and velocity of the x-axis directions on IG-1 measured by LFUFD

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
1	0.000057	0.105	1842.1
2	0.000098	0.105	1071.4
3	0.000143	0.105	734.3
4	0.000060	0.105	1750.0
5	0.000058	0.105	1810.3
6	0.000050	0.105	2100.0
7	0.000120	0.105	875.0
8	0.000093	0.105	1129.0
9	0.000098	0.105	1071.4
10	0.000057	0.105	1842.1
11	0.000061	0.105	1721.3
12	0.000024	0.105	4375.0
13	0.000111	0.105	945.9
14	0.000134	0.105	783.6
15	0.000061	0.105	1721.3
16	0.000055	0.105	1909.1
17	0.000097	0.105	1082.5
18	0.000120	0.105	875.0
19	0.000083	0.105	1265.1
20	0.000030	0.105	3500.0
21	0.000024	0.105	4375.0
22	0.000055	0.105	1909.1
23	0.000092	0.105	1141.3
24	0.000031	0.105	3387.1
25	0.000025	0.105	4200.0

Table 2.  $V_p$ -wave time, distance and velocity of the y-axis directions on IG-1 measured by LFUD

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
1	0.000053	0.103	1943.4
2	0.000035	0.103	2942.9
3	0.000051	0.103	2019.6
4	0.000053	0.103	1943.4
5	0.000055	0.103	1872.7
6	0.000051	0.103	2019.6
7	0.000091	0.103	1131.9
8	0.000168	0.103	613.1
9	0.000112	0.103	919.6
10	0.000036	0.103	2861.1
11	0.000055	0.103	1872.7
12	0.000096	0.103	1072.9
13	0.000085	0.103	1211.8
14	0.000085	0.103	1211.8
15	0.000142	0.103	725.4
16	0.000063	0.103	1634.9
17	0.000121	0.103	851.2
18	0.000068	0.103	1514.7
19	0.000135	0.103	763.0
20	0.000054	0.103	1907.4
21	0.000028	0.103	3678.6
22	0.000134	0.103	768.7
23	0.000089	0.103	1157.3
24	0.000065	0.103	1584.6
25	0.000055	0.103	1872.7

Table 3.  $V_p$ -wave time, distance and velocity of the z-axis directions on IG-1 measured by LFUFD

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
1	0.000028	0.103	3678.6
2	0.000049	0.103	2102.0
3	0.000055	0.103	1872.7
4	0.000149	0.103	691.3
5	0.000057	0.103	1807.0
6	0.000076	0.103	1355.3
7	0.00014	0.103	735.7
8	0.000074	0.103	1391.9
9	0.000049	0.103	2102.0
10	0.000114	0.103	903.5
11	0.000105	0.103	981.0
12	0.000092	0.103	1119.6
13	0.000113	0.103	911.5
14	0.000103	0.103	1000.0
15	0.000063	0.103	1634.9
16	0.000059	0.103	1745.8
17	0.000163	0.103	631.9
18	0.000155	0.103	664.5
19	0.000053	0.103	1943.4
20	0.000058	0.103	1775.9
21	0.000055	0.103	1872.7
22	0.000055	0.103	1872.7
23	0.000142	0.103	725.4
24	0.000112	0.103	919.6
25	0.000054	0.103	1907.4

Table 4.  $V_p$ -wave time, distance and velocity of the semi-direct directions on IG-1 measured by LFUFD

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
1	0.000003	0.015	5000.0
2	0.000003	0.015	5000.0
3	0.000003	0.015	5000.0
4	0.000003	0.015	5000.0
5	0.000008	0.015	1875.0
6	0.000016	0.045	2812.5
7	0.000031	0.045	1451.6
8	0.000014	0.045	3214.3
9	0.000013	0.045	3461.5
10	0.000014	0.045	3214.3
11	0.000044	0.072	1636.4
12	0.000034	0.072	2117.6
13	0.000108	0.072	666.7
14	0.000027	0.072	2666.7
15	0.000043	0.072	1674.4
16	0.000068	0.100	1470.6
17	0.000081	0.100	1234.6
18	0.000086	0.100	1162.8
19	0.000041	0.100	2439.0
20	0.000039	0.100	2564.1
21	0.000073	0.128	1753.4
22	0.000091	0.128	1406.6
23	0.000071	0.128	1802.8
24	0.000072	0.128	1777.8
25	0.000078	0.128	1641.0
26	0.000065	0.133	2046.2
27	0.000065	0.133	2046.2
28	0.000064	0.133	2078.1
29	0.000064	0.133	2078.1
30	0.000086	0.133	1546.5
31	0.000086	0.105	1220.9
32	0.000068	0.105	1544.1
33	0.000076	0.105	1381.6
34	0.000101	0.105	1039.6
35	0.000046	0.105	2282.6

Table 4. Continue

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
36	0.000030	0.075	2500.0
37	0.000044	0.075	1704.5
38	0.000052	0.075	1442.3
39	0.000043	0.075	1744.2
40	0.000046	0.075	1630.4
41	0.000017	0.047	2764.7
42	0.000016	0.047	2937.5
43	0.000015	0.047	3133.3
44	0.000015	0.047	3133.3
45	0.000016	0.047	2937.5
46	0.000005	0.017	3400.0
47	0.000004	0.017	4250.0
48	0.000005	0.017	3400.0
49	0.000004	0.017	4250.0
50	0.000003	0.017	5666.7

Table 5.  $V_p$ -wave time, distance and velocity of the x-axis directions on IG-2 measured by LFUFD

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
1	0.000079	0.129	1632.9
2	0.000306	0.129	421.6
3	0.000073	0.129	1767.1
4	0.000253	0.129	509.9
5	0.000319	0.129	404.4
6	0.000093	0.129	1387.1
7	0.000306	0.129	421.6
8	0.000298	0.129	432.9
9	0.000247	0.129	522.3
10	0.000233	0.129	553.6
11	0.000141	0.129	914.9
12	0.000192	0.129	671.9
13	0.000287	0.129	449.5
14	0.000158	0.129	816.5
15	0.000079	0.129	1632.9
16	0.000070	0.129	1842.9
17	0.000192	0.129	671.9
18	0.000190	0.129	678.9
19	0.000246	0.129	524.4
20	0.000191	0.129	675.4
21	0.000301	0.129	428.6
22	0.000121	0.129	1066.1
23	0.000070	0.129	1842.9
24	0.000213	0.129	605.6
25	0.000177	0.129	728.8



Table 6.  $V_p$ -wave time, distance and velocity of the y-axis directions on IG-2 measured by LFUFD

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
1	0.000072	0.123	1708.3
2	0.000320	0.123	384.4
3	0.000243	0.123	506.2
4	0.000215	0.123	572.1
5	0.000209	0.123	588.5
6	0.000099	0.123	1242.4
7	0.000095	0.123	1294.7
8	0.000134	0.123	917.9
9	0.000247	0.123	498.0
10	0.000224	0.123	549.1
11	0.000197	0.123	624.4
12	0.000289	0.123	425.6
13	0.000145	0.123	848.3
14	0.000075	0.123	1640.0
15	0.000116	0.123	1060.3
16	0.000070	0.123	1757.1
17	0.000177	0.123	694.9
18	0.000163	0.123	754.6
19	0.000135	0.123	911.1
20	0.000106	0.123	1160.4
21	0.000189	0.123	650.8
22	0.000197	0.123	624.4
23	0.000181	0.123	679.6
24	0.000155	0.123	793.5
25	0.000188	0.123	654.3

Table 7.  $V_p$ -wave time, distance and velocity of the z-axis directions on IG-2 measured by LFUFD

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
1	0.000069	0.124	1797.1
2	0.000116	0.124	1069.0
3	0.000145	0.124	855.2
4	0.000101	0.124	1227.7
5	0.000302	0.124	410.6
6	0.000072	0.124	1722.2
7	0.000184	0.124	673.9
8	0.000223	0.124	556.1
9	0.000188	0.124	659.6
10	0.000194	0.124	639.2
11	0.000171	0.124	725.1
12	0.000201	0.124	616.9
13	0.000182	0.124	681.3
14	0.000147	0.124	843.5
15	0.000066	0.124	1878.8
16	0.000123	0.124	1008.1
17	0.000244	0.124	508.2
18	0.000148	0.124	837.8
19	0.000235	0.124	527.7
20	0.000107	0.124	1158.9
21	0.000035	0.124	3542.9
22	0.000158	0.124	784.8
23	0.000166	0.124	747.0
24	0.000109	0.124	1137.6
25	0.000132	0.124	939.4

Table 8.  $V_p$ -wave time, distance and velocity of the semi-direct directions on IG-2 measured by LFUFD

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
1	0.000003	0.016	5333.3
2	0.000003	0.016	5333.3
3	0.000003	0.016	5333.3
4	0.000003	0.016	5333.3
5	0.000003	0.016	5333.3
6	0.000021	0.049	2333.3
7	0.000019	0.049	2578.9
8	0.000020	0.049	2450.0
9	0.000019	0.049	2578.9
10	0.000024	0.049	2041.7
11	0.000062	0.080	1290.3
12	0.000069	0.080	1159.4
13	0.000061	0.080	1311.5
14	0.000034	0.080	2352.9
15	0.000186	0.080	430.1
16	0.000081	0.113	1395.1
17	0.000207	0.113	545.9
18	0.000288	0.113	392.4
19	0.000096	0.113	1177.1
20	0.000074	0.113	1527.0
21	0.000105	0.145	1381.0
22	0.000083	0.145	1747.0
23	0.000126	0.145	1150.8
24	0.000175	0.145	828.6
25	0.000266	0.145	545.1
26	0.000125	0.165	1320.0
27	0.000170	0.165	970.6
28	0.000141	0.165	1170.2
29	0.000133	0.165	1240.6
30	0.000180	0.165	916.7
31	0.000261	0.132	505.7
32	0.000105	0.132	1257.1
33	0.000109	0.132	1211.0
34	0.000099	0.132	1333.3
35	0.000069	0.132	1913.0

Table 8. Continue

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
36	0.000074	0.100	1351.4
37	0.000073	0.100	1369.9
38	0.000146	0.100	684.9
39	0.000070	0.100	1428.6
40	0.000169	0.100	591.7
41	0.000044	0.067	1522.7
42	0.000043	0.067	1558.1
43	0.000040	0.067	1675.0
44	0.000041	0.067	1634.1
45	0.000048	0.067	1395.8
46	0.000007	0.036	5142.9
47	0.000007	0.036	5142.9
48	0.000006	0.036	6000.0
49	0.000004	0.036	9000.0
50	0.000005	0.036	7200.0

Table 9.  $V_p$ -wave time, distance and velocity of the x-axis directions on IG-3 measured by LFUFD

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
1	0.000165	0.294	1781.8
2	0.000214	0.294	1373.8
3	0.000254	0.294	1157.5
4	0.000174	0.294	1689.7
5	0.000221	0.294	1330.3
6	0.000243	0.294	1209.9
7	0.000166	0.294	1771.1
8	0.000291	0.294	1010.3
9	0.000304	0.294	967.1
10	0.000166	0.294	1771.1
11	0.000174	0.294	1689.7
12	0.000203	0.294	1448.3
13	0.000220	0.294	1336.4
14	0.000200	0.294	1470.0
15	0.000289	0.294	1017.3
16	0.000192	0.294	1531.3
17	0.000316	0.294	930.4
18	0.000303	0.294	970.3
19	0.000138	0.294	2130.4
20	0.000195	0.294	1507.7
21	0.000232	0.294	1267.2
22	0.000121	0.294	2429.8
23	0.000220	0.294	1336.4
24	0.000274	0.294	1073.0
25	0.000294	0.294	1000.0
26	0.000174	0.294	1689.7
27	0.000135	0.294	2177.8
28	0.000219	0.294	1342.5
29	0.000237	0.294	1240.5
30	0.000250	0.294	1176.0
31	0.000230	0.294	1278.3
32	0.000315	0.294	933.3
33	0.000145	0.294	2027.6
34	0.000271	0.294	1084.9
35	0.000143	0.294	2055.9
36	0.000148	0.294	1986.5
37	0.000214	0.294	1373.8

Table 9. Continue

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
38	0.000203	0.294	1448.3
39	0.000141	0.294	2085.1
40	0.000272	0.294	1080.9
41	0.000203	0.294	1448.3
42	0.000278	0.294	1057.6
43	0.000296	0.294	993.2
44	0.000188	0.294	1563.8
45	0.000146	0.294	2013.7
46	0.000182	0.294	1615.4
47	0.000182	0.294	1615.4
48	0.000258	0.294	1139.5
49	0.000309	0.294	951.5
50	0.000301	0.294	976.7
51	0.000137	0.294	2146.0
52	0.000217	0.294	1354.8
53	0.000134	0.294	2194.0
54	0.000188	0.294	1563.8
55	0.000168	0.294	1750.0
56	0.000237	0.294	1240.5
57	0.000191	0.294	1539.3
58	0.000287	0.294	1024.4
59	0.000320	0.294	918.8
60	0.000152	0.294	1934.2
61	0.000145	0.294	2027.6
62	0.000156	0.294	1884.6
63	0.000143	0.294	2055.9
64	0.000183	0.294	1606.6
65	0.000202	0.294	1455.4
66	0.000150	0.294	1960.0
67	0.000276	0.294	1065.2
68	0.000171	0.294	1719.3
69	0.000277	0.294	1061.4
70	0.000287	0.294	1024.4
71	0.000145	0.294	2027.6
72	0.000320	0.294	918.8

Table 10.  $V_p$ -wave time, distance and velocity of the y-axis directions on IG-3 measured by LFUFD

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
1	0.00014	0.298	2128.6
2	0.00022	0.298	1373.3
3	0.00020	0.298	1512.7
4	0.00016	0.298	1886.1
5	0.00030	0.298	1000.0
6	0.00021	0.298	1405.7
7	0.00023	0.298	1312.8
8	0.00022	0.298	1342.3
9	0.00016	0.298	1839.5
10	0.00017	0.298	1732.6
11	0.00020	0.298	1528.2
12	0.00026	0.298	1168.6
13	0.00015	0.298	1960.5
14	0.00031	0.298	958.2
15	0.00018	0.298	1702.9
16	0.00021	0.298	1419.0
17	0.00016	0.298	1922.6
18	0.00017	0.298	1742.7
19	0.00014	0.298	2128.6
20	0.00017	0.298	1784.4
21	0.00023	0.298	1273.5
22	0.00022	0.298	1373.3
23	0.00023	0.298	1318.6
24	0.00016	0.298	1862.5
25	0.00020	0.298	1512.7
26	0.00014	0.298	2159.4
27	0.00014	0.298	2083.9
28	0.00014	0.298	2098.6
29	0.00028	0.298	1071.9
30	0.00016	0.298	1828.2
31	0.00017	0.298	1752.9
32	0.00022	0.298	1348.4
33	0.00022	0.298	1354.5
34	0.00022	0.298	1342.3
35	0.00020	0.298	1482.6
36	0.00016	0.298	1828.2
37	0.00019	0.298	1585.1

Table 10. Continue

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
38	0.00020	0.298	1512.7
39	0.00020	0.298	1528.2
40	0.00021	0.298	1425.8
41	0.00029	0.298	1045.6
42	0.00020	0.298	1482.6
43	0.00022	0.298	1348.4
44	0.00020	0.298	1505.1
45	0.00018	0.298	1693.2
46	0.00016	0.298	1922.6
47	0.00015	0.298	2013.5
48	0.00020	0.298	1512.7
49	0.00017	0.298	1752.9
50	0.00028	0.298	1053.0
51	0.00027	0.298	1087.6
52	0.00018	0.298	1664.8
53	0.00020	0.298	1482.6
54	0.00016	0.298	1886.1
55	0.00014	0.298	2128.6
56	0.00024	0.298	1231.4
57	0.00019	0.298	1585.1
58	0.00026	0.298	1128.8
59	0.00025	0.298	1173.2
60	0.00027	0.298	1091.6
61	0.00019	0.298	1568.4
62	0.00013	0.298	2223.9
63	0.00014	0.298	2191.2
64	0.00015	0.298	1935.1
65	0.00020	0.298	1528.2
66	0.00014	0.298	2191.2
67	0.00020	0.298	1520.4
68	0.00015	0.298	1973.5
69	0.00014	0.298	2069.4
70	0.00025	0.298	1173.2
71	0.00020	0.298	1520.4
72	0.00017	0.298	1712.6



Table 11.  $V_p$ -wave time, distance and velocity of the x-axis directions on IG-4 measured by LFUFD

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
1	0.000091	0.153	1681.3
2	0.000287	0.153	533.1
3	0.000208	0.153	735.6
4	0.000189	0.153	809.5
5	0.000123	0.153	1243.9
6	0.000099	0.153	1545.5
7	0.000193	0.153	792.7
8	0.000205	0.153	746.3
9	0.000273	0.153	560.4
10	0.000201	0.153	761.2
11	0.000171	0.153	894.7
12	0.000194	0.153	788.7
13	0.000233	0.153	656.7
14	0.000122	0.153	1254.1
15	0.000083	0.153	1843.4
16	0.000257	0.153	595.3
17	0.000152	0.153	1006.6
18	0.000141	0.153	1085.1
19	0.000159	0.153	962.3
20	0.000216	0.153	708.3
21	0.000256	0.153	597.7
22	0.000068	0.153	2250.0
23	0.000177	0.153	864.4
24	0.000143	0.153	1069.9
25	0.000207	0.153	739.1
26	0.000220	0.153	695.5
27	0.000106	0.153	1443.4
28	0.000137	0.153	1116.8
29	0.000206	0.153	742.7
30	0.000117	0.153	1307.7
31	0.000155	0.153	987.1
32	0.000163	0.153	938.7
33	0.000166	0.153	921.7
34	0.000112	0.153	1366.1
35	0.000117	0.153	1307.7

Table 11. Continue

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
36	0.000132	0.153	1159.1
37	0.000267	0.153	573.0
38	0.000106	0.153	1443.4
39	0.000142	0.153	1077.5
40	0.000234	0.153	653.8
41	0.000205	0.153	746.3
42	0.000082	0.153	1865.9
43	0.000151	0.153	1013.2
44	0.000072	0.153	2125.0
45	0.000207	0.153	739.1
46	0.000172	0.153	889.5
47	0.000292	0.153	524.0
48	0.000291	0.153	525.8
49	0.000258	0.153	593.0

Table 12.  $V_p$ -wave time, distance and velocity of the y-axis directions on IG-4 measured by LFUFD

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
1	0.000092	0.151	1641.3
2	0.000101	0.151	1495.0
3	0.000249	0.151	606.4
4	0.000195	0.151	774.4
5	0.000204	0.151	740.2
6	0.000249	0.151	606.4
7	0.000157	0.151	961.8
8	0.000216	0.151	699.1
9	0.000201	0.151	751.2
10	0.000303	0.151	498.3
11	0.000171	0.151	883.0
12	0.000180	0.151	838.9
13	0.000260	0.151	580.8
14	0.000087	0.151	1735.6
15	0.000287	0.151	526.1
16	0.000287	0.151	526.1
17	0.000160	0.151	943.8
18	0.000254	0.151	594.5
19	0.000160	0.151	943.8
20	0.000220	0.151	686.4
21	0.000290	0.151	520.7
22	0.000235	0.151	642.6
23	0.000296	0.151	510.1
24	0.000141	0.151	1070.9
25	0.000156	0.151	967.9
26	0.000161	0.151	937.9
27	0.000295	0.151	511.9
28	0.000295	0.151	511.9
29	0.000251	0.151	601.6
30	0.000287	0.151	526.1
31	0.000153	0.151	986.9
32	0.000134	0.151	1126.9
33	0.000272	0.151	555.1
34	0.000240	0.151	629.2
35	0.000227	0.151	665.2

Table 12. Continue

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
36	0.000265	0.151	569.8
37	0.000261	0.151	578.5
38	0.000295	0.151	511.9
39	0.000281	0.151	537.4
40	0.000224	0.151	674.1
41	0.000208	0.151	726.0
42	0.000191	0.151	790.6
43	0.000246	0.151	613.8
44	0.000315	0.151	479.4
45	0.000076	0.151	1986.8
46	0.000250	0.151	604.0
47	0.000129	0.151	1170.5
48	0.000086	0.151	1755.8
49	0.000082	0.151	1841.5

Table 13.  $V_p$ -wave time, distance and velocity of the z-axis directions on IG-4 measured by LFUFD

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
1	0.000086	0.157	1825.6
2	0.000094	0.157	1670.2
3	0.000129	0.157	1217.1
4	0.000105	0.157	1495.2
5	0.000240	0.157	654.2
6	0.000205	0.157	765.9
7	0.000083	0.157	1891.6
8	0.000254	0.157	618.1
9	0.000135	0.157	1163.0
10	0.000161	0.157	975.2
11	0.000080	0.157	1962.5
12	0.000081	0.157	1938.3
13	0.000152	0.157	1032.9
14	0.000252	0.157	623.0
15	0.000240	0.157	654.2
16	0.000126	0.157	1246.0
17	0.000121	0.157	1297.5
18	-	-	-
19	0.000069	0.157	2275.4
20	0.000076	0.157	2065.8
21	0.000110	0.157	1427.3
22	0.000111	0.157	1414.4
23	0.000088	0.157	1784.1
24	-	-	-
25	-	-	-
26	-	-	-
27	0.000246	0.157	638.2
28	0.000233	0.157	673.8
29	0.000260	0.157	603.8
30	0.000259	0.157	606.2
31	0.000082	0.157	1914.6
32	-	-	-
33	-	-	-
34	0.000146	0.157	1075.3
35	0.000206	0.157	762.1

Table 13. Continue

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
36	0.000085	0.157	1847.1
37	0.000144	0.157	1090.3
38	0.000161	0.157	975.2
39	0.000074	0.157	2121.6
40	0.000161	0.157	975.2
41	0.000320	0.157	490.6
42	0.000088	0.157	1784.1
43	0.000077	0.157	2039.0
44	0.000131	0.157	1198.5
45	0.000254	0.157	618.1
46	0.000240	0.157	654.2
47	0.000176	0.157	892.0
48	0.000297	0.157	528.6
49	0.000078	0.157	2012.8

Table 14.  $V_p$ -wave time, distance and velocity of the semi-direct directions on IG-4 measured by LFUD

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
1	0.000007	0.028	4000.0
2	0.000007	0.028	4000.0
3	0.000008	0.028	3500.0
4	0.000008	0.028	3500.0
5	0.000010	0.028	2800.0
6	0.000008	0.028	3500.0
7	0.000007	0.028	4000.0
8	0.000016	0.054	3375.0
9	0.000017	0.054	3176.5
10	0.000018	0.054	3000.0
11	0.000018	0.054	3000.0
12	0.000018	0.054	3000.0
13	0.000018	0.054	3000.0
14	0.000037	0.054	1459.5
15	0.000055	0.080	1454.5
16	0.000053	0.080	1509.4
17	0.000046	0.080	1739.1
18	0.000069	0.080	1159.4
19	0.000047	0.080	1702.1
20	0.000061	0.080	1311.5
21	0.000029	0.080	2758.6
22	0.000296	0.108	364.9
23	0.000312	0.108	346.2
24	0.000169	0.108	639.1
25	0.000090	0.108	1200.0
26	0.000179	0.108	603.4
27	0.000072	0.108	1500.0
28	0.000077	0.108	1402.6
29	0.000141	0.134	950.4
30	0.000202	0.134	663.4
31	0.000299	0.134	448.2
32	0.000211	0.134	635.1
33	0.000192	0.134	697.9
34	0.000095	0.134	1410.5
35	0.000193	0.134	694.3
36	0.000131	0.162	1236.6
37	0.000304	0.162	532.9

Table 14. Continue

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
38	0.000266	0.162	609.0
39	0.000152	0.162	1065.8
40	0.000116	0.162	1396.6
41	0.000101	0.162	1604.0
42	0.000236	0.162	686.4
43	0.000132	0.186	1409.1
44	0.000175	0.186	1062.9
45	0.000131	0.186	1419.8
46	0.000159	0.186	1169.8
47	0.000132	0.186	1409.1
48	0.000124	0.186	1500.0
49	0.000085	0.186	2188.2
50	0.000120	0.187	1558.3
51	0.000191	0.187	979.1
52	0.000131	0.187	1427.5
53	0.000189	0.187	989.4
54	0.000196	0.187	954.1
55	0.000171	0.187	1093.6
56	0.000207	0.187	903.4
57	0.000108	0.160	1481.5
58	0.000252	0.160	634.9
59	0.000120	0.160	1333.3
60	0.000120	0.160	1333.3
61	0.000106	0.160	1509.4
62	0.000208	0.160	769.2
63	0.000167	0.160	958.1
64	0.000085	0.133	1564.7
65	0.000087	0.133	1528.7
66	0.000191	0.133	696.3
67	0.000116	0.133	1146.6
68	0.000196	0.133	678.6
69	0.000248	0.133	536.3
70	0.000174	0.133	764.4
71	0.000320	0.107	334.4
72	0.000261	0.107	410.0
73	0.000174	0.107	614.9
74	0.000090	0.107	1188.9



Table 14. Continue

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
75	0.000064	0.107	1671.9
76	0.000063	0.107	1698.4
77	0.000071	0.107	1507.0
78	0.000228	0.080	350.9
79	0.000045	0.080	1777.8
80	0.000066	0.080	1212.1
81	0.000030	0.080	2666.7
82	0.000046	0.080	1739.1
83	0.000028	0.080	2857.1
84	0.000049	0.080	1632.7
85	0.000016	0.052	3250.0
86	0.000017	0.052	3058.8
87	0.000017	0.052	3058.8
88	0.000017	0.052	3058.8
89	0.000024	0.052	2166.7
90	0.000017	0.052	3058.8
91	0.000019	0.052	2736.8
92	0.000007	0.028	4000.0
93	0.000007	0.028	4000.0
94	0.000007	0.028	4000.0
95	0.000007	0.028	4000.0
96	0.000006	0.028	4666.7
97	0.000006	0.028	4666.7
98	0.000017	0.028	1647.1

Table 15.  $V_p$ -wave time, distance and velocity of the x-axis directions on IG-5 measured by LFUFD

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
1	0.000209	0.153	732.1
2	0.000230	0.153	665.2
3	0.000154	0.153	993.5
4	0.000105	0.153	1457.1
5	0.000199	0.153	768.8
6	0.000108	0.153	1416.7
7	0.000080	0.153	1912.5
8	0.000226	0.153	677.0
9	0.000275	0.153	556.4
10	0.000258	0.153	593.0
11	0.000157	0.153	974.5
12	0.000193	0.153	792.7
13	0.000192	0.153	796.9
14	0.000214	0.153	715.0
15	0.000225	0.153	680.0
16	0.000224	0.153	683.0
17	0.000140	0.153	1092.9
18	0.000164	0.153	932.9
19	0.000185	0.153	827.0
20	0.000248	0.153	616.9
21	0.000109	0.153	1403.7
22	0.000245	0.153	624.5
23	0.000281	0.153	544.5
24	0.000146	0.153	1047.9
25	0.000244	0.153	627.0
26	0.000204	0.153	750.0
27	0.000133	0.153	1150.4
28	0.000227	0.153	674.0
29	0.000194	0.153	788.7
30	0.000163	0.153	938.7
31	0.000137	0.153	1116.8
32	0.000182	0.153	840.7
33	0.000156	0.153	980.8
34	0.000215	0.153	711.6
35	0.000292	0.153	524.0

Table 15. Continue

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
36	0.000237	0.153	645.6
37	0.000215	0.153	711.6
38	0.000240	0.153	637.5
39	0.000222	0.153	689.2
40	0.000133	0.153	1150.4
41	0.000219	0.153	698.6
42	0.000318	0.153	481.1
43	0.000242	0.153	632.2
44	0.000274	0.153	558.4
45	0.000198	0.153	772.7
46	0.000245	0.153	624.5
47	0.000198	0.153	772.7
48	0.000292	0.153	524.0
49	0.000095	0.153	1610.5

Table 16.  $V_p$ -wave time, distance and velocity of the y-axis directions on IG-5 measured by LFUFD

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
1	0.000101	0.154	1524.8
2	0.000228	0.154	675.4
3	0.000186	0.154	828.0
4	0.000114	0.154	1350.9
5	0.000092	0.154	1673.9
6	0.000286	0.154	538.5
7	0.000096	0.154	1604.2
8	0.000188	0.154	819.1
9	0.000194	0.154	793.8
10	0.000188	0.154	819.1
11	0.000151	0.154	1019.9
12	0.000141	0.154	1092.2
13	0.000149	0.154	1033.6
14	0.000240	0.154	641.7
15	0.000275	0.154	560.0
16	0.000178	0.154	865.2
17	0.000138	0.154	1115.9
18	0.000154	0.154	1000.0
19	0.000182	0.154	846.2
20	0.000191	0.154	806.3
21	0.000254	0.154	606.3
22	0.000277	0.154	556.0
23	0.000297	0.154	518.5
24	0.000267	0.154	576.8
25	0.000153	0.154	1006.5
26	0.000267	0.154	576.8
27	0.000200	0.154	770.0
28	0.000268	0.154	574.6
29	0.000261	0.154	590.0
30	0.000285	0.154	540.4
31	0.000254	0.154	606.3
32	0.000154	0.154	1000.0
33	0.000278	0.154	554.0
34	0.000191	0.154	806.3
35	0.000191	0.154	806.3

Table 16. Continue

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
36	0.000277	0.154	556.0
37	0.000266	0.154	578.9
38	0.000292	0.154	527.4
39	0.000276	0.154	558.0
40	0.000192	0.154	802.1
41	0.000139	0.154	1107.9
42	0.000147	0.154	1047.6
43	0.000102	0.154	1509.8
44	0.000286	0.154	538.5
45	0.000261	0.154	590.0
46	0.000276	0.154	558.0
47	0.000293	0.154	525.6
48	0.000140	0.154	1100.0
49	0.000083	0.154	1855.4

Table 17.  $V_p$ -wave time, distance and velocity of the  $z$ -axis directions on IG-5 measured by LFUFD

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
1	0.000158	0.153	968.4
2	0.000207	0.153	739.1
3	0.000314	0.153	487.3
4	0.000149	0.153	1026.8
5	0.000244	0.153	627.0
6	0.000314	0.153	487.3
7	0.000088	0.153	1738.6
8	0.000219	0.153	698.6
9	0.000268	0.153	570.9
10	0.000216	0.153	708.3
11	0.000153	0.153	1000.0
12	0.000169	0.153	905.3
13	0.000244	0.153	627.0
14	0.000092	0.153	1663.0
15	0.000232	0.153	659.5
16	0.000126	0.153	1214.3
17	0.000196	0.153	780.6
18	0.000160	0.153	956.3
19	0.000160	0.153	956.3
20	0.000213	0.153	718.3
21	0.000087	0.153	1758.6
22	0.000207	0.153	739.1
23	0.000188	0.153	813.8
24	0.000137	0.153	1116.8
25	0.000157	0.153	974.5
26	0.000139	0.153	1100.7
27	0.000209	0.153	732.1
28	0.000085	0.153	1800.0
29	0.000082	0.153	1865.9
30	0.000120	0.153	1275.0
31	0.000215	0.153	711.6
32	0.000154	0.153	993.5
33	0.000161	0.153	950.3
34	0.000213	0.153	718.3
35	0.000124	0.153	1233.9

Table 17. Continue

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
36	0.000293	0.153	522.2
37	0.000260	0.153	588.5
38	0.000188	0.153	813.8
39	0.000102	0.153	1500.0
40	0.000188	0.153	813.8
41	0.000238	0.153	642.9
42	0.000097	0.153	1577.3
43	0.000251	0.153	609.6
44	0.000201	0.153	761.2
45	0.000141	0.153	1085.1
46	0.000227	0.153	674.0
47	0.000179	0.153	854.7
48	0.000085	0.153	1800.0
49	0.000087	0.153	1758.6

Table 18.  $V_p$ -wave time, distance and velocity of the semi-direct directions on IG-5 measured by LFUD

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
1	0.000004	0.029	7250.0
2	0.000004	0.029	7250.0
3	0.000003	0.029	9666.7
4	0.000003	0.029	9666.7
5	0.000003	0.029	9666.7
6	0.000004	0.029	7250.0
7	0.000009	0.029	3222.2
8	0.000035	0.056	1600.0
9	0.000028	0.056	2000.0
10	0.000027	0.056	2074.1
11	0.000028	0.056	2000.0
12	0.000020	0.056	2800.0
13	0.000029	0.056	1931.0
14	0.000019	0.056	2947.4
15	0.000042	0.083	1976.2
16	0.000033	0.083	2515.2
17	0.000033	0.083	2515.2
18	0.000033	0.083	2515.2
19	0.000073	0.083	1137.0
20	0.000039	0.083	2128.2
21	0.000057	0.083	1456.1
22	0.000085	0.110	1294.1
23	0.000074	0.110	1486.5
24	0.000080	0.110	1375.0
25	0.000107	0.110	1028.0
26	0.000080	0.110	1375.0
27	0.000079	0.110	1392.4
28	0.000075	0.110	1466.7
29	0.000074	0.135	1824.3
30	0.000221	0.135	610.9
31	0.000092	0.135	1467.4
32	0.000122	0.135	1106.6
33	0.000112	0.135	1205.4
34	0.000103	0.135	1310.7
35	0.000078	0.135	1730.8
36	0.000291	0.162	556.7
37	0.000167	0.162	970.1



Table 18. Continue

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
38	0.000127	0.162	1275.6
39	0.000164	0.162	987.8
40	0.000135	0.162	1200.0
41	0.000181	0.162	895.0
42	0.000093	0.162	1741.9
43	0.000110	0.188	1709.1
44	0.000116	0.188	1620.7
45	0.000217	0.188	866.4
46	0.000156	0.188	1205.1
47	0.000164	0.188	1146.3
48	0.000112	0.188	1678.6
49	0.000141	0.188	1333.3
50	0.000137	0.187	1365.0
51	0.000225	0.187	831.1
52	0.000152	0.187	1230.3
53	0.000139	0.187	1345.3
54	0.000202	0.187	925.7
55	0.000173	0.187	1080.9
56	0.000110	0.187	1700.0
57	0.000113	0.160	1415.9
58	0.000111	0.160	1441.4
59	0.000128	0.160	1250.0
60	0.000163	0.160	981.6
61	0.000115	0.160	1391.3
62	0.000204	0.160	784.3
63	0.000132	0.160	1212.1
64	0.000099	0.135	1363.6
65	0.000097	0.135	1391.8
66	0.000108	0.135	1250.0
67	0.000273	0.135	494.5
68	0.000090	0.135	1500.0
69	0.000194	0.135	695.9
70	0.000089	0.135	1516.9
71	0.000082	0.108	1317.1
72	0.000079	0.108	1367.1
73	0.000071	0.108	1521.1
74	0.000245	0.108	440.8

Table 18. Continue

Number	Time (s)	Distance (m)	Velocity (m/s)
75	0.000070	0.108	1542.9
76	0.000070	0.108	1542.9
77	0.000053	0.108	2037.7
78	0.000033	0.080	2424.2
79	0.000053	0.080	1509.4
80	0.000073	0.080	1095.9
81	0.000216	0.080	370.4
82	0.000052	0.080	1538.5
83	0.000058	0.080	1379.3
84	0.000057	0.080	1403.5
85	0.000030	0.053	1766.7
86	0.000028	0.053	1892.9
87	0.000019	0.053	2789.5
88	0.000020	0.053	2650.0
89	0.000020	0.053	2650.0
90	0.000019	0.053	2789.5
91	0.000024	0.053	2208.3
92	0.000007	0.025	3571.4
93	0.000009	0.025	2777.8
94	0.000009	0.025	2777.8
95	0.000008	0.025	3125.0
96	0.000008	0.025	3125.0
97	0.000008	0.025	3125.0
98	0.000007	0.025	3571.4

## 감사의 글

이 논문을 마치기 전 대학원 2년 동안 저에게 많은 도움을 주신 분들께 글로나  
 마 감사의 말씀을 드립니다. 지금까지 부족한 저를 이끌어주신 고진석 교수님께 감  
 사드립니다. 그리고 부족한 저의 논문을 심사해주신 강성승 교수님과 장일식 교수  
 님께도 진심으로 감사드립니다. 대학원 생활에 큰 아쉬움이 남지만 앞으로 나아갈  
 수 있게 학부생 때부터 도움을 주신 한오형 교수님, 박천영 교수님, 강추원 교수님,  
 장일식 교수님, 최태진 교수님, 박철현 교수님께도 감사의 말씀을 전해드리고 싶습  
 니다. 그리고 에너지자원공학과를 다니며 만났던 우리 물리탐사 실험실 후배 민규,  
 민석이, 택수, 준태, 승택이와 저의 실험에 도움을 주신 자원개발·암석역학 실험실  
 태유형, 정두형, 주호형, 건주, 정원이에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 뿐만  
 아니라 실험에 도움을 준 후배 근호, 윤중, 영섭이에게도 고맙다고 전하고 싶습니  
 다. 또한 응용광물실험실 최낙철 박사님, 강희형, 봉주형, 대학이, 현수, 은지, 희정  
 이 광물처리실험실 진영이형, 양수형, 대환이, 석유실험실 주환이, 유미, 현정이, 현  
 택이, 연일이, 영두, 남희, 퇴적분지 실험실 권민규, 김민규, 조계만, 영섭이, 지혜에  
 게 정말 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 마지막으로 항상 믿어주신 우리 아빠, 엄  
 마, 동생에게 고맙고 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다.