

탄소섬유를 포함한 시멘트 그라우트의 압축파 및 전단파 특성

Compressional and Shear Wave Properties of Cement Grout Including Carbon Fiber

최 효 준¹⁾ · 조 완 제²⁾ · 윤 찬 영[†]

Hyojun Choi · Wanjei Cho · Chanyoung Yune

Received: September 28th, 2021; Revised: October 15th, 2021; Accepted: October 28th, 2021

ABSTRACT : In Korea, which is mostly mountainous, the proportion of tunnel and underground space development are increasing. Although the ground is reinforced by applying the ground improvement method during underground space development, accidents still occur frequently in Korea. In the grouting method, a representative ground reinforcement method, the effect was judged by comparing the total amount of injection material with the amount of injection material used during the actual grouting construction. However, it is difficult to determine whether the ground reinforcement is properly performed during construction or within the target ground. In order to solve this problem, it is necessary to study a new method for quality control during or after construction by measuring electrical resistivity after performing grouting by mixing carbon fiber, which is a conductive material, and microcement, which is a grout material. In this study, as a basic study, a cement specimen mixed with 0%, 3%, 5%, 7% of carbon fiber was prepared to evaluate the performance of the grout material mixed with carbon fiber, which is a conductive material. The prepared specimens were wet curing for 3 days, 7 days, and 28 days under 99% humidity, and then compression wave velocity and shear wave velocity were measured. As a result of the compression wave velocity and shear wave velocity measurement, it showed a tendency to increase with the increase in the compounding ratio of carbon fibers and the number of days of age, and it was confirmed that the elastic modulus and shear modulus, which are the stiffness of the material, also increased.

Keywords : Grouting, Micro-cement, Carbon fiber, Compressional wave, Shear wave, Young's modulus, Shear modulus

요 지 : 대부분이 산악지역인 국내에서는 터널 및 지하공간개발의 비중이 점점 높아지고 있다. 지하공간개발 시 지반 개량공법을 적용하여 지반을 보강하지만 국내에서는 여전히 사건 사고가 빈번하게 발생하고 있다. 대표적인 지반 보강공법인 그라우팅 공법은 주입재의 총량과 실제 그라우팅 시공 시 사용한 주입재의 양을 비교하여 효과를 판정하였으며, 혹은 그라우팅 공법을 적용한 지반에 보링 후 시료의 일축압축강도 평가 혹은 현장 투수시험을 통하여 지반 보강여부를 판단하였다. 하지만, 시공 중 혹은 대상 지반 내에 지반 보강이 제대로 이루어졌는지는 판단하기는 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 전도성 재료인 탄소섬유와 그라우트 재료인 마이크로시멘트를 혼합하여 그라우팅을 수행한 후 전기비저항 측정을 통해 시공 중이나 시공 후에 품질관리가 가능한 새로운 방법에 대해 연구가 필요한 실정이다. 본 연구는 이에 대한 기초연구로 전도성 재료인 탄소섬유가 혼합된 그라우트 재의 성능을 평가하기 위해 탄소섬유 0%, 3%, 5%, 7%로 혼합된 시멘트 공시체를 제작하였으며, 제작한 공시체에 대하여 3일, 7일, 28일 습도 99%의 조건으로 습윤양생 시킨 후 압축파 속도 및 전단파 속도 측정을 수행하였다. 압축파 속도 및 전단파 속도 측정 결과 탄소섬유의 배합비 및 재령일수 증가에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 재료의 강성인 탄성계수 및 전단탄성계수도 증가하는 것을 확인하였다.

주요어 : 그라우팅, 마이크로시멘트, 탄소섬유, 압축파, 전단파, 탄성계수, 전단탄성계수

1. 서 론

국토의 대부분이 산지로 이루어져 있는 우리나라는 터널 및 지하공간개발 비중이 높아지고 있다. 지하공간개발 건설 시 지반 개량공법을 적용하여 차수 및 지반 보강을 이루고 있지만 국내에서는 여전히 사건·사고가 발생하고 있다. 공사 시 위험징후를 조기에 감지하기 위한 계측 계획이 수립

되고 있지만 세부규정이 미흡하며 사후 지하안전영향조사를 시행하고 있으나 공사비 절감에만 중점을 두어 안전을 경시한 설계가 지속되고 있다. 또한, 지하안전관리특별법을 시행하여 제도적인 개선을 통해 지반함몰 발생 및 피해 저감을 위해 노력하고 있으나, 여러 사고가 발생하고 있다. 이러한 사건·사고를 미연에 방지하기 위해서는 새로운 관리 방법이 필요한 시점이다. 대표적인 지반 개량 공법은 그라우

1) Graduated Student, Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

2) Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

† Professor, Department of Civil Engineering, Gangneung Wonju National University (Corresponding Author : yune@gwnu.ac.kr)

팅 공법으로 지반 내에 약액 혹은 시멘트 주입재를 지반 내에 주입하여 지반의 차수 및 보강효과를 이루는 공법이다. 그라우팅 공법의 품질관리는 일반적으로 주입재의 총량과 실제 그라우팅 시공 시 사용한 주입재의 양을 비교하여 효과를 판정하였으며, 혹은 그라우팅 공법을 적용한 지반에 보링 후 시료의 일축압축강도 평가 혹은 현장 투수시험을 통하여 지반 보강여부를 판단하였다. 하지만 그라우팅 시공을 통해 대상 지반 모든 곳에 그라우팅 공법으로 인한 지반 개량이 되었다고 판단하기에는 어렵다. 그라우팅 공법의 품질관리는 여러 가지 방법이 있지만 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 그라우팅 시공 도중 또는 시공 후에 품질관리가 가능한 품질평가 방법이 개발되어야 한다. 따라서 그라우팅 공법의 새로운 품질관리 방법 개발을 위해서는 그라우트 재료와 전도성 재료를 혼합하여 전도성 그라우트 재료를 대상 지반 내에 주입한 후 전기비저항 탐사를 통하여 그라우팅 보강체를 확인할 수 있도록 전도성 그라우팅 재료 개발에 대한 연구를 수행하였다. Jeon(2021)은 전도성 재료인 흑연을 규사와 혼합하여 전기전도도 측정시험을 수행하였으며, 결과로 전도성 물질의 함유율이 증가할수록 전기전도도는 증가한다는 연구결과를 발표하였다. 이를 토대로 전도성물질 첨가를 통해 전기비저항 탐사를 통하여 그라우팅의 품질관리가 이루어질 수 있다고 판단된다. 앞서 선행연구(Choi et al., 2020)에서 일반 포틀랜드와 비교하였을 때, 분말도가 더 높고 장기 강도 및 초기 강도도 상대적으로 우수한 마이크로시멘트와 재료의 기계적 성능 및 내구성 측면에서 이점을 주는 탄소섬유(Cao & Chung, 2001; Chen & Liu, 2003; Peyvandi et al., 2013; Shu et al., 2015; Graham et al., 2013)를 사용하여 탄소섬유 배합비 및 공시체 재령일수에 따른 일축압축강도 평가를 수행하였다. 탄소섬유 배합비 및 재령일수 증가에 따라서 일축압축강도는 증가하였으며, 이는 그라우트 재료인 마이크로시멘트와 탄소섬유의 혼합으로 인해 일축압축강도에는 문제가 없는 것을 확인하였다.

따라서 본 연구에서는 선행 연구(Choi et al., 2020)에서 파악한 마이크로시멘트와 탄소섬유 혼합에 따른 일축압축강도 파악에 더 나아가 그라우트 재료인 마이크로시멘트와 전도성 재료인 탄소섬유를 혼합하여 압축파 속도 및 전단파 속도 측정을 통해 재료의 강성에 대한 평가를 수행하였다. 50mm×50mm×50mm 몰드에 공시체를 제작하였으며 제작 시 상대밀도 30%의 조건으로 규사 3호사, 5호사, 6호사를 혼합하여 공시체를 제작하였다. 공시체 제작에 사용한 전도성 그라우트 밀크는 탄소섬유 배합비 0%, 3%, 5%, 7%로 제작하였으며 공시체는 하루 후 탈형하여 습도 99%의 습윤 양생을 각 3일, 7일, 28일 수행하였다. 각 재령일수에 맞춰

압축파 및 전단파 초동시간을 구하여 압축파 속도 및 전단파 속도를 산출하였으며, 산출된 속도를 이용하여 탄성과 탐사로도 품질관리의 가능성을 평가하였다. 또한, 제작한 공시체의 밀도를 이용하여 탄성계수와 전단탄성계수를 구하여 탄소섬유 혼합에 따른 강성을 확인하였다.

2. 전도성 그라우트 공시체 제작

2.1 그라우트 재료

본 연구에서 사용한 그라우트 재료는 S사의 마이크로시멘트를 사용하였다. 일반 포틀랜드시멘트와 비교하였을 때 초기 및 장기 강도에 이점이 있으며 분말도가 높아 주입성이 우수한 특징이 있다. 실내시험에서 사용한 마이크로시멘트의 물리·화학적 특성은 Table 1, Table 2와 같다.

2.2 전도성 재료

본 연구에서 사용한 전도성 재료는 E사의 가공된 분말형 탄소섬유(Carbon fiber)를 사용하였다. 탄소섬유의 물리적 특성은 Table 3과 같다.

2.3 골재

본 연구에 사용된 골재는 K사의 Fig. 2와 같이 서로 입자크기가 다른 규사 3호사, 5호사, 6호사를 사용하였다. 규사 3호사가 가장 입자크기가 크며 규사 6호사가 입자크기가

Table 1. Physical characteristics of micro cement (Choi et al., 2020)

Specific gravity	Fineness (cm^2/g)	Flow (%)	Setting time		Compressive strength (MPa/days)		
			Initial (min)	Final (hr:min)	3	7	28
2.96	6,800	109.3	240	5:30	36	52	68

Table 2. Chemical characteristics of micro cement (Choi et al., 2020)

Composition	SiO_2	$Al_2O_3 + FeO_3$	$CaO + MgO$	$Na_2O + K_2O$	SO_3
(%)	28.34	11.9	57.9	0.64	3.07

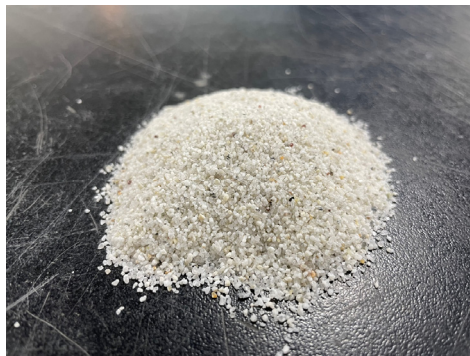
Table 3. Physical characteristics of carbon fiber (Choi et al., 2020)

Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Strain (%)	Density (g/cm^3)	Yield tex ($g/1,000m$)
4,900	240	2.0	1.79	800

가장 작다. 규사의 물리적 특성은 ASTM D422(토양의 입자 크기 분석을 위한 표준 시험방법)와 KS F 2308(흙 입자 밀도 시험방법) 규정에 따라 산정하였으며 Table 4와 같다.



(a) Silica sand No. 3



(b) Silica sand No. 5



(c) Silica sand No. 6

Fig. 1. Silica sand

Table 4. Classification characteristics of test sand

Sand particle No.	K-3	K-5	K-6
G_s	2.66	2.65	2.66
e_{max}	0.95	1.0	1.0
e_{min}	0.73	0.69	0.68
D_{50} (mm)	1.5	0.75	0.35
D_{10} (mm)	0.92	0.53	0.28
C_u	1.96	1.7	1.46

2.4 공시체 제작

본 연구에서 압축파 속도 및 전단파 속도 측정을 수행하기 위해 제작한 공시체는 Table 5의 배합비로 제작하였다. 그라우트 시료는 시멘트혼합액(Milk-A)과 급결약재(Milk-B)로 구분하여 준비하였으며, 느슨한 지반 상태를 모사하기 위해 상대밀도 30% 조건의 규사 3호사, 5호사, 6호사를 전도성 그라우트 밀크와 혼합하여 공시체를 제작하였다. 탄소 섬유는 그라우트 밀크를 제조할 때 사용한 물 무게의 0%, 3%, 5%, 7%의 배합비로 배합하였다. 공시체를 제작 하루 후에 탈형하여 Fig. 2와 같이 습도 99% 조건으로 습윤양생을 각 3일, 7일 28일 양생하였다.



Fig. 2. Wet curing of specimens

Table 5. Mix design

	Sand particle No.	K-3	K-5	K-6
Milk - A (g)	WATER	51.83	52.49	52.4
	CEMENT	21.16	21.42	21.39
	ECG2000	3.03	3.07	3.07
Milk - B (g)	WATER	6.87	6.96	6.95
	ECG1000	0.76	0.77	0.77
Contents of carbon fiber (g)	0%	0	0	0
	3%	17.61	17.835	17.805
	5%	29.35	29.725	29.675
	7%	41.09	41.615	41.545
Silica sand (g)	$D_r=30%$	176.49	173.70	174.63

3. 실험조건 및 방법

3.1 실내실험 계획

본 연구에서는 선행 연구(Choi et al., 2020)인 탄소섬유 함유량에 따른 일축압축강도에 이어 재료의 강성을 확인하기 위해 Fig. 3의 파형분석 장비를 이용하여 마이크로시멘트와 탄소섬유의 혼합에 따른 압축파 및 전단파 초동시간을 측정하였다.

파형 측정에 사용한 장비는 Fig. 3과 같으며, 공시체에 직접 부착되어 파형을 공시체에 흘려주는 트랜스듀서, 트랜스듀서에 파형을 주는 신호발생기(signal generator, Agilent 3320A)와 신호발생기에서 흘려준 파형의 주파수의 컷오프(cut-off) 및 증폭을 해주는 필터(Filter) 장비가 있으며, 마지막으로 신호 데이터의 저장 및 도시에 사용하는 오실로스코프(oscilloscope)를 사용하였다.

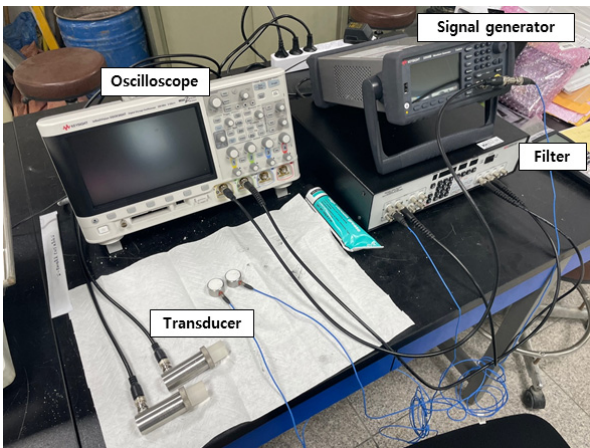


Fig. 3. View of waveform analysis equipment

3.2 압축파 및 전단파 속도 측정 방법

3.2.1 압축파 및 전단파 속도

본 연구에서 압축파 및 전단파 속도를 측정하기 위한 방법은 다음 설명과 같다. 파형 측정 모습은 Fig. 4와 같으며, 먼저 압축파 파형 측정 시 압축파 파형 전용 트랜스듀서를 사용하여 신호발생기에서는 10V의 전압, 20Hz 주파수의 square 파형으로 파형을 발생하고 측정하고자 하는 공시체의 축방향으로 전달하여 수신 트랜스듀서에 도달한 파형을 오실로스코프에 도시하여 확인하였다. 또한, 필터(Filter) 장비를 이용하여 로우패스 필터링 효과를 이끌어내어 파형의 잡음을 제거하였다. 500Hz의 로우패스, 20kHz의 하이패스 필터링을 적용하여 파형의 잡음을 제거하였다. 측정된 파형은 오실로스코프에 도시되어 파형의 데이터를 파일로 받아서 분

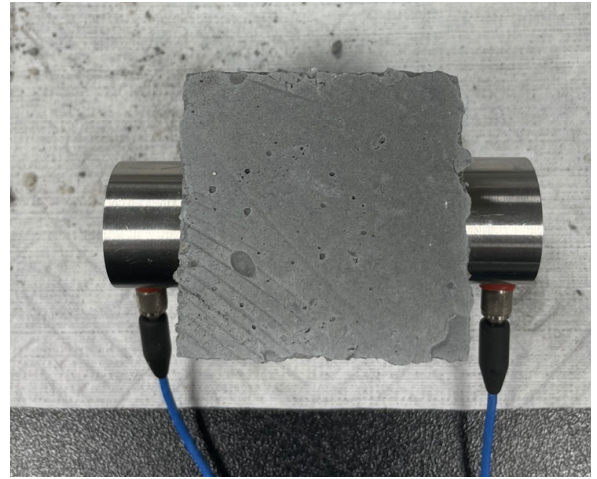


Fig. 4. Test specimen

석할 수 있으며 파형의 분석을 통해 압축파 속도를 산출하였다. 압축파 속도인 V_p 를 산출하기 위해서는 다음 Eq. (1)과 같이 파형이 도달한 거리, L 과 도달하기 까지 걸리는 시간, T 가 필요하게 되는데 파형이 도달하는 거리는 트랜스듀서가 부착되는 공시체의 거리이며 즉, 공시체의 축방향 길이를 사용하였다.

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

또한, 파형이 도달하는데 걸리는 시간을 측정하는 방법은 일정하게 들어오는 파형이 첫 도달시점까지의 시간인 초동시간을 사용하였다.

다음으로 전단파 초동시간 산정방법은 전단파 파형 측정 전용 트랜스듀서를 부착하여 압축파 속도 측정과 동일한 조건에서 공시체의 공진주파수를 먼저 측정하였다. 그 후 10V의 전압, 측정된 공진주파수의 sine 파형을 발생시켜 파형을 분석하였다. 다음 Eq. (2)와 같이 전단파 속도 V_s 도 압축파 속도와 마찬가지로 파형이 전달된 거리인 L 과 도달한 시간, T 를 이용하여 측정을 하였으며, 전단파 파형 분석에서 대표적으로 사용하는 peak to peak 방법을 사용하여 전파시간을 측정하였다(Kim, 2011). 전달된 거리는 공시체 축방향의 길이이며 측정된 전파시간을 이용하여 전단파 속도를 산출하였다.

$$V_s = \frac{L}{T} \quad (2)$$

3.2.2 탄성계수 및 전단탄성계수

압축파 및 전단파 파형 분석을 통해 산출한 초동시간을

이용하여 압축파 속도 및 전단파 속도를 확인하였으며, Eq. (3)과 Eq. (4)를 이용하여 탄성계수 및 전단탄성계수를 산정하여 탄소섬유 혼합에 따른 강성을 확인하였다.

$$E = \rho V_p^2 \quad (3)$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (4)$$

여기서, ρ 는 밀도, V_c , V_s 각각 압축파 속도 및 전단파 속도이다. 밀도는 Table 6과 같으며 각 공시체의 무게를 측정 후 부피로 나눠 산정하였다.

Table 6. Density of specimen

Sand particle No.	Contents of carbon fiber (%)	1 (g/cm^3)	2 (g/cm^3)	3 (g/cm^3)
K-3	0	1.91	1.89	1.89
	3	1.96	1.96	1.96
	5	1.97	1.99	2.00
	7	2.01	1.99	2.00
K-5	0	1.81	1.87	1.79
	3	1.91	1.91	1.87
	5	1.85	1.94	1.94
	7	1.93	1.92	1.93
K-6	0	1.84	1.88	1.85
	3	1.89	1.88	1.96
	5	1.93	1.88	1.89
	7	1.93	1.93	1.90

4. 실험결과 및 분석

마이크로시멘트와 탄소섬유 혼합에 따른 강성의 변화를 파악하기 위해 각각 조건별로 3개의 공시체를 제작하였으며, 3개의 결과값의 평균값을 대표값으로 사용하였다. 초동 시간을 측정하여 압축파 속도 및 전단파 속도를 산출하였으며, 밀도와 산출된 속도를 이용하여 탄성계수 및 전단탄성계수를 산출하였고 탄소섬유 및 재령일수에 대한 변화를 확인하였다.

4.1 실험결과 및 분석

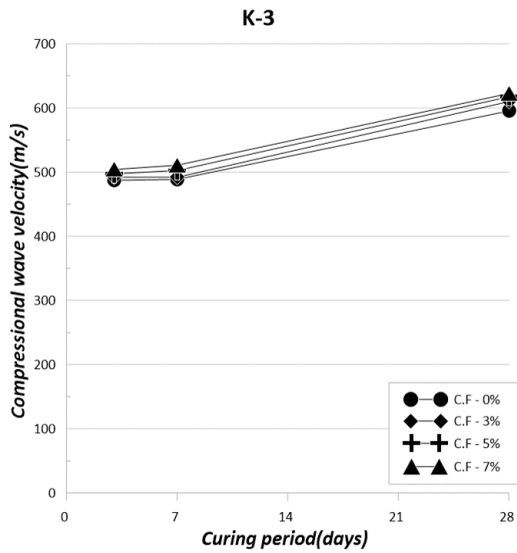
본 연구에서는 골재를 달리하여 재령일수 및 탄소섬유 배합비에 따른 압축파 속도 및 전단파 속도 측정을 수행하였다. 모든 조건에 대해서 공시체 3개의 평균값을 데이터로 활용하였으며 전체 압축파 및 전단파 속도 측정 결과는 Table 7

과 같다.

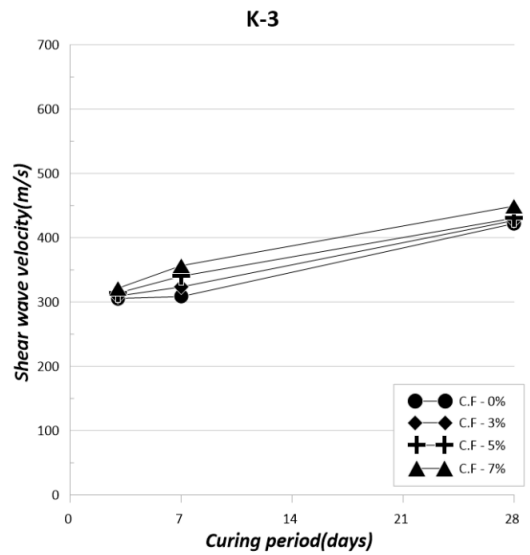
Fig. 5 및 Fig. 6은 재령일수에 따른 압축파 속도 및 전단파 속도를 나타낸다. 압축파 속도의 경우 재령초기 약 460m/s에서 재령후기 최대 700m/s의 속도로 측정되었으며 전단파의 속도는 재령 초기 약 300m/s에서 재령후기 최대 480m/s의 속도로 측정되었다. Cho & Lee(2002)의 연구 사례에서 불포화 모래의 경우 압축파 속도는 200m/s~1,000m/s의 범위이며 전단파 속도는 150m/s~400m/s의 범위로 제시하였고,

Table 7. Result of compressional wave and shear wave velocity

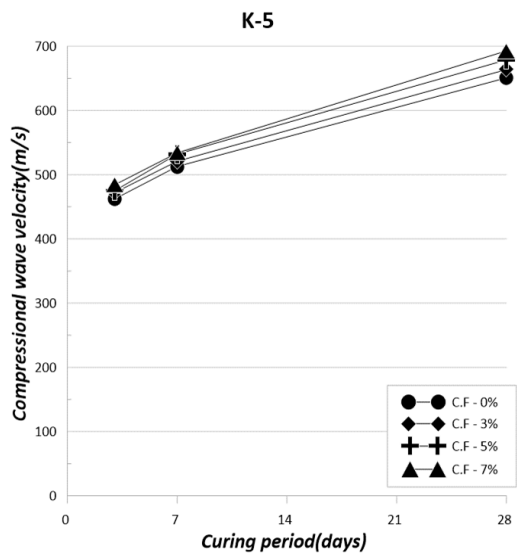
Sand particle No.	Curing period (days)	Contents of carbon fiber (%)	Compressional wave velocity, V_c (m/s)	Shear wave velocity, V_s (m/s)
K-3	3	0	487.1	305.5
		3	491.8	309.3
		5	497.4	313.8
		7	504.0	321.2
	7	0	488.7	308.4
		3	491.9	323.4
		5	502.4	340.1
		7	510.7	356.5
	28	0	595.2	421.9
		3	609.8	426.7
		5	617.3	430.4
		7	622.4	449.1
K-5	3	0	461.9	287.4
		3	471.7	296.2
		5	474.7	308.0
		7	484.0	311.9
	7	0	512.7	318.0
		3	521.0	330.4
		5	532.0	338.6
		7	533.9	348.1
	28	0	650.9	394.2
		3	663.8	407.1
		5	678.9	418.4
		7	692.8	449.1
K-6	3	0	497.9	316.1
		3	498.4	334.9
		5	490.2	345.6
		7	500.4	355.6
	7	0	543.5	364.1
		3	555.9	376.0
		5	555.7	383.7
		7	558.0	405.5
	28	0	668.3	429.2
		3	681.9	449.1
		5	692.8	458.7
		7	699.4	478.5



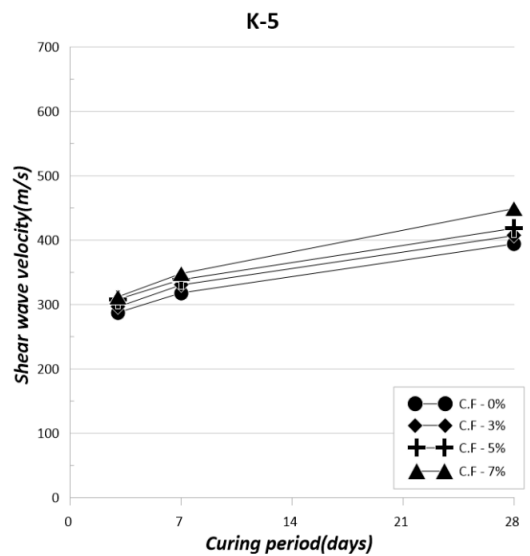
(a) Compressional wave velocity of silica sand No. 3



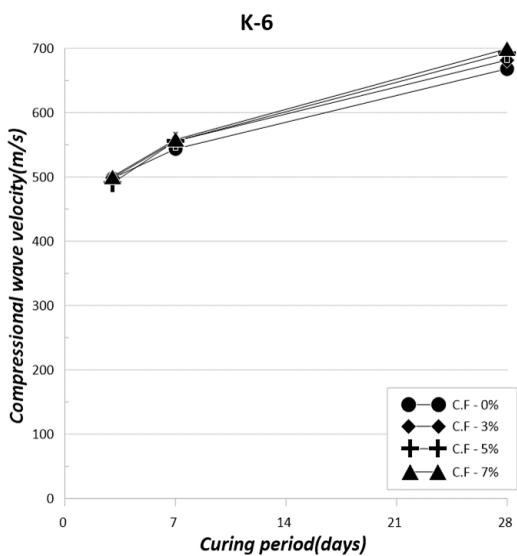
(a) Shear wave velocity of silica sand No. 3



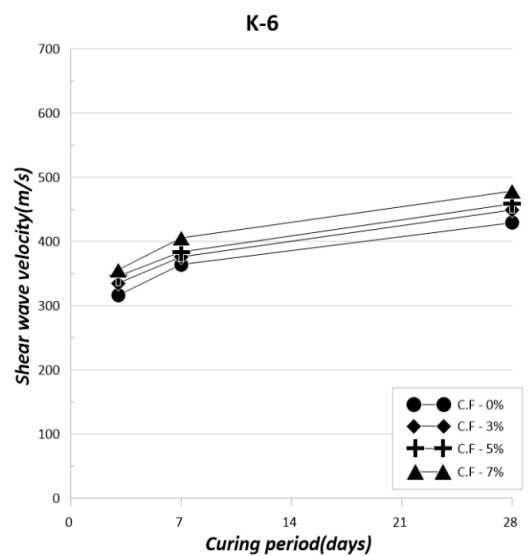
(b) Compressional wave velocity of silica sand No. 5



(b) Shear wave velocity of silica sand No. 5



(c) Compressional wave velocity of silica sand No. 6



(c) Shear wave velocity of silica sand No. 6

Fig. 5. Compressional wave velocity by mixing ratio with regard to the curing days

Fig. 6. Shear wave velocity by mixing ratio with regard to the curing days

본 연구에서 압축과 속도 및 전단과 속도와 유사한 범위를 나타내었다. 탄소섬유 배합에 따라서 압축과 속도 및 전단과 속도는 크게 변화하지 않은 것으로 보아 탄성과 탐사를 통한 그라우팅 공법의 품질관리는 어려울 것으로 판단된다.

Fig. 5 및 Fig. 6은 속도 측정에서 공시체 제작 시 사용한 골재의 종류에 따라 정리하였으며 탄소섬유 배합비가 증가함에 압축과 속도 및 전단과 속도는 매우 작은 증가율을 보였으며 최대 약 5%의 증가율을 보였다. 선행연구(Choi et al., 2020)에서 수행한 일축압축강도 시험 결과와 유사하게 탄소섬유의 미세한 입자들이 세립분 역할을 하여 밀도 증가를 야기하였고 그에 따라 압축과 속도 및 전단과 속도가 증가한 것으로 판단된다.

재령일수를 기준으로 확인하였을 때 규사 3호사의 경우 재령 3일에서 7일 사이의 구간에서는 유사였으며, 규사 5호사 및 6호사에서는 최대 약 15%의 증가율을 보였다. 재령 7일과 재령 28일 구간에서는 골재 종류와 상관없이 압축과 및 전단과 속도가 증가하였으며, 최대 36%의 증가율을 보여 재령일수가 증가함에 따라서 시멘트의 수화반응으로 인하여 압축과 및 전단과 속도는 증가하는 것으로 판단된다.

다음으로는 Table 6과 같이 각 공시체의 무게를 측정하여 산정한 밀도와 앞서 산출한 압축과 속도와 전단과 속도를 이용하여 Eq. (3)과 Eq. (4)에 대입하였고 탄성계수와 전단탄성계수를 산출하였으며 그 결과는 Table 8과 같다.

탄성계수의 경우 Fig. 7과 같이 재령초기 약 400MPa에서 재령후기 최대 940MPa로 측정되었다. 규사 3호사를 사용한 공시체의 경우 재령초기인 3일에서 7일에서는 탄성계수의 변화가 없거나 아주 약간 감소하였으며(약 2% 감소) 재령후기에는 시멘트의 수화반응으로 인하여 약 19%의 증가율을 보였다. 규사 5호사 및 6호사에서는 재령초기 3일에서 7일에서는 약 19%의 증가율을 보였으며 재령후기에서는 최대 63%의 증가율을 보였다. 규사 3호사와 다르게 재령초기부터 탄성계수가 증가하는 것을 확인하였다. 다음 Fig. 7은 각 재령일수에 따른 탄소섬유 배합비별 탄성계수로서, 앞서 입자크기가 작을수록 압축과 속도가 빠른 것으로 측정되었기 때문에 탄성계수도 마찬가지로 입자크기가 작을수록 탄성계수가 큰 것으로 확인하였다.

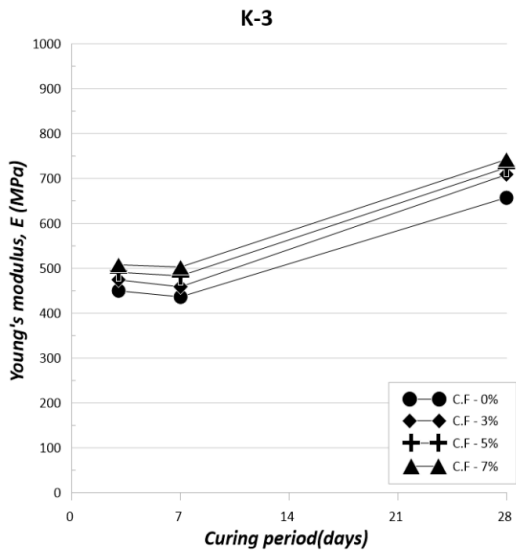
다음으로는 각 공시체의 무게를 측정하여 산정한 밀도와 계산된 전단과 속도를 이용하여 전단탄성계수를 산출하였다. 산출된 전단탄성계수의 결과는 Fig. 8과 같다. 재령초기 3일에서 7일 구간에서는 탄소섬유를 혼합하지 않은 규사 3호사의 0% 조건에서는 전단탄성계수의 변화는 없으며, 약 5%의 증가율을 보였다. 이 조건을 제외한 다른 조건인 규사 5호사 및 6호사의 경우 약 16%의 전단탄성계수 증가율을 보였다. 재령 7일부터 재령 28일의 구간에서는 재령일수

가 증가함에 따라서 최대 62%의 전단탄성계수의 증가율을 보였으며, 탄소섬유 배합비 증가에 따라서도 최대 약 75%의 높은 증가율을 보였다.

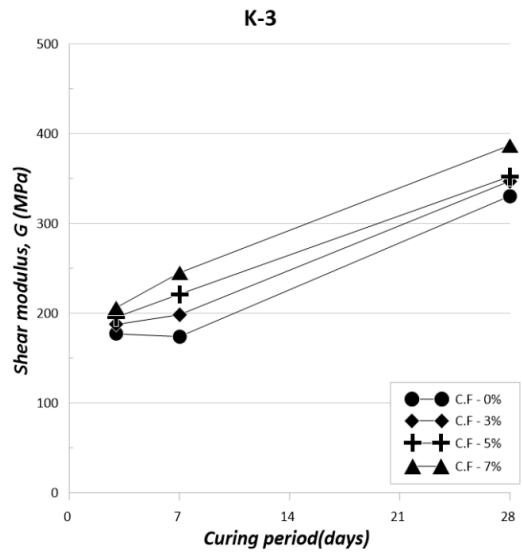
Fig. 8은 각 재령일수에 따른 탄소섬유 배합비별 전단탄성계수로서, 탄소섬유의 배합비가 증가할수록 밀도의 증가로 인해 사용한 골재와 무관하게 모든 조건에서 배합비가 증가할수록 전단탄성계수가 높게 산출되었다. 또한, 재령일수가 증가할수록 시멘트의 수화반응으로 인해 전단탄성계

Table 8. Result of Young's modulus and shear modulus

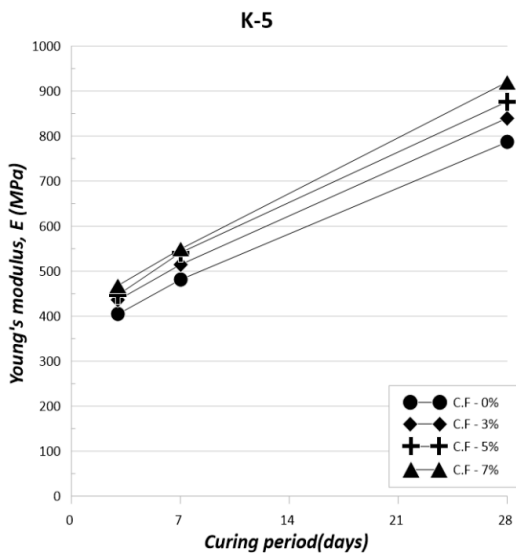
Sand particle No.	Curing period (days)	Contents of carbon fiber (%)	Young's modulus, E (MPa)	Shear modulus, G (MPa)
K-3	3	0	449.7	176.9
		3	474.0	187.4
		5	491.1	195.5
		7	507.8	206.2
	7	0	436.2	173.8
		3	458.6	198.2
		5	482.9	221.1
		7	502.7	244.9
	28	0	657.7	330.5
		3	708.8	347.1
		5	724.5	352.3
		7	742.6	386.9
K-5	3	0	404.6	156.5
		3	436.0	172.0
		5	447.4	188.4
		7	468.2	194.3
	7	0	481.0	184.6
		3	514.4	206.9
		5	540.9	219.1
		7	549.0	233.3
	28	0	786.8	288.6
		3	839.9	315.9
		5	876.7	333.0
		7	920.2	387.9
K-6	3	0	470.6	189.6
		3	486.8	219.8
		5	477.1	237.2
		7	500.9	252.9
	7	0	539.3	242.2
		3	586.0	267.9
		5	589.9	281.4
		7	600.1	316.8
	28	0	829.1	342.0
		3	886.4	384.5
		5	912.7	400.2
		7	937.8	439.2



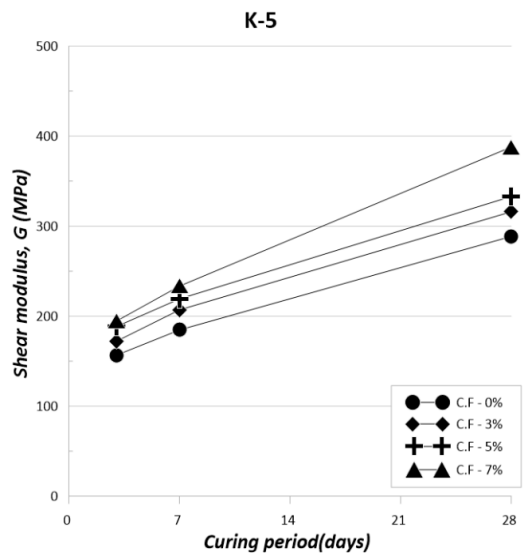
(a) Young's modulus of silica sand No. 3



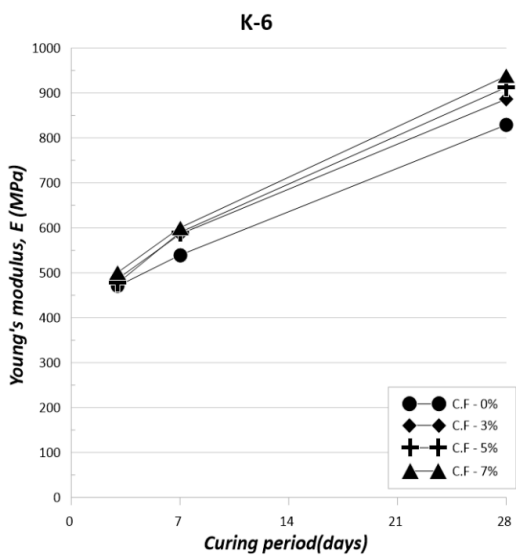
(a) Shear modulus of silica sand No. 3



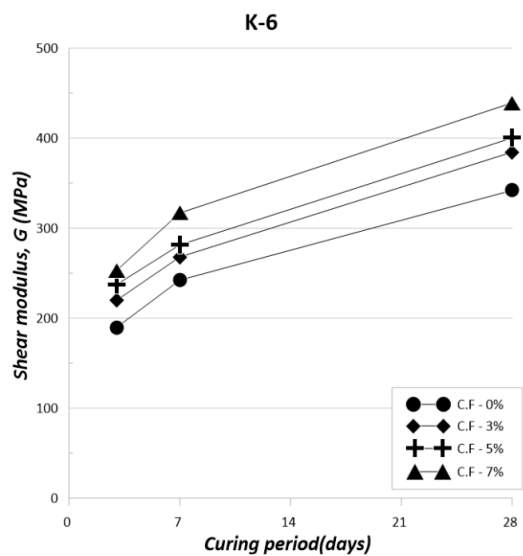
(b) Young's modulus of silica sand No. 5



(b) Shear modulus of silica sand No. 5



(c) Young's modulus of silica sand No. 6



(c) Shear modulus of silica sand No. 6

Fig. 7. Young's modulus by mixing ratio with regard to the curing days

Fig. 8. Shear modulus by mixing ratio with regard to the curing days

수가 증가하는 것을 확인하였다.

탄소섬유와 마이크로시멘트의 혼합으로 제작한 공시체의 탄성계수 및 전단탄성계수는 배합비 및 재령일수가 증가할수록 높게 산출되었으며, 재료의 강성이 감소하지 않는 결과를 확인하였다.

5. 결 론

본 연구는 그라우트 재료인 마이크로시멘트와 전도성 재료인 탄소섬유를 혼합에 따른 압축파 속도 및 전단파 속도 측정과 탄성계수 및 전단탄성계수에 대한 분석을 수행하였다. 전도성 그라우트 재료와 상대밀도 30% 조건의 규사 3호사, 5호사, 6호사를 혼합하여 공시체를 제작하였으며, 탄소섬유 배합비 및 재령일수 조건에 따라서 압축파 속도 및 전단파 속도 측정을 수행하였으며, 재료의 강성인 탄성계수와 전단탄성계수에 대한 분석을 수행하였다. 시험결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 획득하였다.

- (1) 본 연구에서는 측정된 초동시간을 이용하여 압축파 및 전단파 속도를 산출하였다. 결과로 재령초기의 압축파 속도는 약 460m/s, 전단파 속도는 약 300m/s로 측정되었으며, 재령일수가 증가함에 따라 재령후기의 압축파 속도는 약 700m/s, 전단파 속도는 약 480m/s로 증가하였다. 탄소섬유 배합비 증가에 따라서는 압축파 속도 및 전단파 속도는 매우 작은 증가율을 보였으며, 재령일수 기준으로 규사 3호사의 경우 재령 초기에는 압축파 속도 및 전단파 속도는 유사하였고, 규사 5호사와 6호사의 경우 최대 약 15%의 증가율을 보였다. 재령 7일과 28일 사이의 구간에서는 모든 조건에서 압축파 속도 및 전단파 속도가 증가하였으며 시멘트의 수화반응으로 인하여 압축파 및 전단파 속도가 증가한 것으로 판단된다.
- (2) Cho & Lee(2002)의 연구 사례에서 불포화 모래의 경우 압축파 속도는 200m/s~1,000m/s의 범위이며 전단파 속도는 150m/s~400m/s의 범위로 제시하였으며, 본 연구에서 압축파 속도 및 전단파 속도와 유사한 범위를 나타내었다. 따라서, 탄성과 탐사를 통한 그라우팅 공법의 품질관리는 어려울 것으로 판단된다.
- (3) 앞서 산출한 압축파 속도와 전단파 속도와 공시체의 무게를 측정하여 산출한 밀도를 이용하여 구한 탄성계수의 값은 재령초기 400MPa, 재령후기 최대 940MPa로 측정되었으며, 전단탄성계수의 값은 재령초기 150MPa, 재령후기 최대 440MPa로 산출되었다.
- (4) 탄성계수의 결과로 규사 3호사의 경우 재령초기 탄성계

수 변화는 없거나 약 2%의 감소율을 보였으며, 규사 5호사 및 6호사 탄성계수의 경우 약 19%의 증가율을 보였다. 전단탄성계수의 분석 결과로 재령초기 규사 3호사의 0% 조건에서 전단탄성계수의 큰 변화는 없었으며 약 5%의 증가율을 보였다. 또한, 규사 5호사 및 6호사의 경우에는 약 16%의 증가율을 보였다. 재령후기에는 재령일수가 증가함에 따라서 최대 62%의 증가율과 탄소섬유 배합비 증가에 따라서도 최대 약 75%의 높은 증가율을 보였다.

- (5) 결과를 종합하였을 때, 재령일수 증가에 따라서 시멘트의 수화반응과 탄소섬유 배합비 증가에 따라 밀도증가에 의하여 재료의 강성은 증가하는 경향을 나타내는 결과를 확인하였다.

본 연구는 전도성 그라우트 재료를 사용하여 새로운 품질관리 방법에 대한 기초 연구로 전도성 재료인 탄소섬유와 그라우트 재료인 마이크로시멘트의 혼합으로 인한 전도성 그라우트 재료의 강도 및 강성에서 문제가 없는 것을 확인하였다. 향후 연구로는 서로 다른 공극크기를 가진 모형토조 혹은 실제 현장에서 전도성 그라우트 재료를 주입하여 재료의 주입특성에 관한 연구를 통해 현장 적용성 평가가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구개발사업의 연구비 지원(21SCIP-C151438-03) “지반함몰 및 액상화에 관한 지하안전 위험도 평가 고도화 기술 개발”에 의해 수행되었습니다.

References

1. Cao, J. and Chung, D.D.L. (2001), Carbon fiber reinforced cement mortar improved by using acrylic dispersion as an admixture, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, issue 11, pp. 1633~1637.
2. Chen, B. and Liu, J. (2003), Effect of fibers on expansion of concrete with a large amount of high f-CaO fly ash, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, issue 10, pp. 1549~1552.
3. Cho, G. C. and Lee, I. M. (2002), Soil properties in relation to elastic wave, *Korean Geotechnical Society*, Vol. 18, No 6, pp. 83~101 (In Korean).
4. Choi, H. J., Cho, W. J., Hwang, B. S. and Yune, C. Y. (2020), Mechanical properties of cement grout including conductive materials, *Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 21, No.

- 12, pp. 35~41 (In Korean).
5. Graham, R. K., Huang, B., Shu, X. and Burdette, E. G. (2013), Laboratory evaluation of tensile strength and energy absorbing properties of cement mortar reinforced with micro- and meso-sized carbon fibers, *Construction and Building Materials*, Vol. 44, pp. 751~756.
 6. Jeon, W. W. (2021), Effects of applied stress, pore fluid types and concentrations on the electrical conductivity of silica sand with varying amounts of graphite, Master's Thesis, Kyung Hee University (In Korean).
 7. Kim, H. S. (2011), Development and Applications of Piezo-electric Penetration Probe for In-Situ Measurement of Shear Wave Velocity Soft Clay, Ph.D. Thesis, Kyung Hee University (In Korean).
 8. Peyvandi, A., Soroushian, P., Balachandra, A. M. and Sobolev, K. (2013), Enhancement of the durability characteristics of concrete nanocomposite pipes with modified graphite nanoplatelets, *Construction and Building Materials*, Vol. 47, pp. 111~117.
 9. Shu, X., Graham, R. K., Huang, B. and Burdette, E. G. (2015), Hybrid effects of carbon fibers on mechanical properties of Portland cement mortar, *Materials & Design*, Vol. 65, pp. 1222~1228.