

포화유무 및 온도조건에 따른 콘크리트 음향방출 신호 감쇠계수 결정

이항로¹ · 홍창호² · 김진섭^{3*} · 김지원⁴

¹비회원, 한국원자력연구원 처분성능실증연구부 박사후연구원

²정회원, 한국원자력연구원 처분성능실증연구부 선임연구원

³정회원, 한국원자력연구원 처분성능실증연구부 책임연구원

⁴학생회원, 한국원자력연구원 처분성능실증연구부 책임연구원

Determination of acoustic emission signal attenuation coefficient of concrete according to dry, saturation, and temperature condition

Hang-Lo Lee¹ · Chang-Ho Hong² · Jin-Seop Kim^{3*} · Ji-Won Kim⁴

¹Post-Doctoral Researcher, Disposal Performance Validation Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute

²Senior Researcher, Disposal Performance Validation Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute

³Principal Researcher, Disposal Performance Validation Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute

⁴Principal Researcher, Disposal Performance Validation Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute

*Corresponding Author : Jin-Seop Kim, kjs@kaeri.re.kr

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
24(1)39-55(2022)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2022.24.1.039>

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received September 17, 2021
Revised October 14, 2021
Accepted October 25, 2021



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2022, Korean Tunnelling and Underground Space Association

Abstract

This study carried out the laboratory tests for AE signal attenuation to determine the attenuation coefficient (α) of silo concrete in Gyeongju low and intermediate-level disposal environments. The concrete samples were prepared by satisfying the concrete mixing ratio used in the Gyeongju disposal silo, and these samples were additionally exposed depending on the temperature conditions and saturation and, dry condition. As a result of attenuation tests according to the transmission distance on three concrete specimens for each disposal condition, the AE amplitude and absolute energy measured on the saturated concrete were higher than that of the dry concrete in the initial range of the signal transmission distance, but the α of the saturated concrete was higher than that of the dry concrete. Regardless of the saturation and dry conditions, the α tended to decrease as the temperature increases. The α had a more major influence on the saturation and dry condition than the temperature condition, which means that the saturation and dry condition is the main consideration in measuring the signal attenuation of a concrete disposal structure. The α of concrete in the disposal environment

expect to be used to predict the integrity of silos concrete in Gyeongju low and intermediate-level disposal environments by estimating the actual AE parameter values at the location of cracks and to determine the optimum location of sensors.

Keywords: Disposal concrete, Thermal-hydraulic-mechanical condition, Acoustic emission, Attenuation coefficient

초 록

본 연구는 경주 중·저준위 지하 처분환경에서의 사일로 콘크리트의 음향방출(AE) 신호 감쇠계수(α)를 결정하기 위해 신호감쇠 실험을 수행하였다. 활용된 시료들은 경주 중·저준위 처분장 사일로에 사용된 콘크리트 배합비로 제작하였으며 28일간 수중 양생 후 처분환경에 맞도록 온도 및 포화유무에 따라 추가적으로 노출시켰다. 처분조건 별 각 3개씩의 공시체에 대하여 신호전달거리에 따른 AE 신호를 측정할 결과, 초기구간에서는 포화콘크리트의 AE 진폭과 절대에너지가 건조콘크리트의 경우보다 더 높게 나타났지만, α 는 포화콘크리트의 경우가 더 높게 산정되었다. 또한, 포화유무와 상관없이 온도가 증가함에 따라 α 는 감소하는 경향을 보였다. α 는 온도조건보다는 포화유무에 따른 영향이 큰 것으로 분석되었으며, 이는 콘크리트 처분구조물의 감쇠신호 측정 시 포화여부를 고려한 판단이 중요하다는 것을 의미한다. 처분환경에서의 콘크리트 α 는 균열이 발생한 위치에서의 실제 AE 특성 파라미터 값을 추정함으로써 경주 중·저준위 처분환경에서 사일로 콘크리트의 건전성을 예측하고 센서의 최적 배치를 결정하는 데 도움이 될 것으로 기대한다.

주요어: 처분 콘크리트, 열-수리-역학 처분환경, 음향방출, 감쇠계수

1. 서론

국내 원자력발전소에서 발생하는 중·저준위 폐기물의 누적량은 2021년 8월 기준 약 548만 리터에 달하고 있으며 안전한 처분을 위해서 중·저준위 폐기물 처분사일로에 저장하고 있다. 콘크리트 처분구조물은 지하처분 고유환경에 장기적으로 노출되었을 때 구조물 손상으로 인한 균열진전을 유발할 수 있다. 균열진전에 영향을 미치는 다양한 원인이 존재하나 그 중 응력부식(stress corrosion)은 지하수로 인한 포화와 핵폐기물의 붕괴열로 인한 고온이 유지되는 조건에서 발생하는 현상이며 이 조건에서 균열진전을 가속화할 수 있는 것으로 알려졌다(Wachtman et al., 2009).

처분구조물의 균열발달에 따른 손상도를 평가하는 방법으로 음향방출(acoustic emission, AE)을 활용한 기술이 사용되고 있다(Bäckblom, 2008; Kim, 2013). AE는 물체가 변형되면서 발생하는 에너지가 탄성파의 형태로 주변에 전달되는 것을 센서로 계측하는 기술로써 가속도계와 달리 고주파 영역에 속하기 때문에 균열진전으로 발생하는 고주파 신호 탐지에 적합하다. 이에 따라 암석과 콘크리트를 대상으로 AE 신호의 다양한 특성 파라미터 즉, AE 카운트, 진폭, 이벤트 수 등을 이용하여 균열손상을 설명하고자 하는 노력이 많이 이루어졌다(Zhao et al., 2013; Rodríguez and Celestino, 2019; Yang et al., 2020; Wu et al., 2021). 그 중 Kim et al. (2019)은 정규화된 AE 누적 에너지를 기반으로 화강암의 손상도를 평가하였으며, 실제 AE 에너지를 산정하기 위해 신호 감쇠 특성을 고려하여 역추정 하였다. 이렇듯 AE 에너지를 산정하기 위해서는 AE 센서로 계측된 감쇠된 신호가 아닌 균열이 발생한 위치에서의 실제 신호특성을 파악할 필요가 있다. 이를 위해서 Philippidis and Aggelis (2005)는

콘크리트 재료를 대상으로 물-시멘트비와 골재-시멘트비에 따른 콘크리트의 감쇠실험을 수행하였고 각 조건에 대한 감쇠계수를 도출하였다. Shah and Ribakov (2010)는 실험을 통하여 콘크리트 감쇠계수와 콘크리트 손상도와의 밀접한 관계가 있음을 밝혀냈다. Wang et al. (2019)과 Maillet et al. (2014)은 각각 암석과 세라믹 복합재료를 대상으로 실제 AE 에너지를 추정하기 위해 응력수준에 따른 초음파의 감쇠계수 변화를 분석하였다. 재료에 가해지는 응력이 증가할수록 균열이 발달하여 초음파의 감쇠가 가속화되는 것을 실험을 통하여 분석하였다.

이와 같이 과거에 수행된 신호 감쇠실험은 일반적인 환경에서 주로 수행된 반면, 지하 처분환경을 고려한 콘크리트 재료의 감쇠특성을 규명하는 것은 거의 수행된 적이 없는 실정이다. 이에 따라 본 연구는 경주 중·저준위 처분환경에 맞는 사일로 콘크리트의 신호감쇠 특성을 규명하고자 하였다. 이를 위해 경주 처분 사일로 콘크리트의 배합조건에 따라 공시체를 제작하였고, 지하 처분환경을 모사하기 위해 포화유무와 다양한 온도조건에 추가적으로 노출시켰다. 양생된 공시체를 이용하여 신호전달거리에 따른 신호감쇠를 측정하였고 최종적으로 처분환경에 따른 감쇠계수를 결정 및 그 변화를 분석하였다. 도출된 감쇠계수는 실제 AE 신호의 특성 파라미터 값 추정, 센서의 최적배치 결정 등 경주 중·저준위 처분 콘크리트 사일로의 장기 건전성 평가를 위한 모니터링 시스템에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

2. AE 신호 감쇠특성 실험

2.1 신호감쇠의 종류 및 감쇠계수

신호감쇠는 크게 기하학적 감쇠(geometric attenuation), 고유 감쇠(intrinsic attenuation) 및 외형적 감쇠(apparent attenuation)로 구분할 수 있다(Santamarina et al., 2001) (Fig. 1). 기하학적 감쇠는 파의 전달거리가 증가함에 따라 발생하는 파면(wave front)의 크기가 감소하여 신호의 세기가 감소하는 현상이다. 이러한 기하학적 감쇠는 일반적으로 평면파(plane wave), 구면파(spherical wave), 원통형파(cylindrical wave)에 따라서 감쇠정도가 다르게 나타난다. 고유 감쇠는 신호가 매질을 통과할 때 매질의 고유의 특성으로 인해 에너지가 소산되는 현상이다. 콘크리트의 경우, 시멘트 페이스트와 여러 골재의 복합물로 구성되어 있으며 골재 간 또는 페이스트와 골재 간의 마찰손실에 의해 발생한다. 특히 골재의 크기가 증가할수록 1 MHz의 범위 내에서 더 높은 감쇠를 보인다고 보고

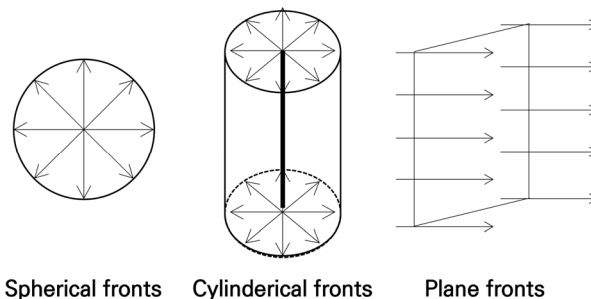


Fig. 1. Type of wave fronts for geometric attenuation

되었다(Landis and Shah, 1995). 그러나 이에 대한 해석은 시멘트 페이스트 내의 기포의 영향(Kim et al., 1991), 높은 주파수의 전파가 용이한 더 큰 균질적 구조체로 간주하는 골재의 영향(Gaydecki et al., 1992) 등 다양한 해석이 존재한다. 이 외에도 상대적으로 임피던스가 높은 골재량이 증가할수록 신호파 속도는 증가하고 고주파 신호는 감소한다는 연구도 보고되었다(Otsuki et al., 2000). 외형적 감쇠는 구조적 경계조건, 암석의 불연속과 같은 인터페이스로 인해 산란(scattering), 반사(reflection), 부분 전파(partial transmission)에 의해 발생하는 감쇠현상이다. 일반적으로 신호의 감쇠는 다음과 같은 식의 형태로 표현될 수 있다.

$$A_2 = A_1 e^{-\alpha_A(r_2 - r_1)} \tag{1}$$

여기서, A_1 과 A_2 는 각각 신호전달거리 r_1 과 r_2 에 따른 신호의 진폭, α_A (dB/m)는 신호 진폭에 대한 감쇠계수(attenuation coefficient)이며 값이 증가할수록 감쇠정도가 크음을 의미한다.

2.2 콘크리트 시편 준비

본 연구에서 사용한 콘크리트 시편은 직경 100 mm와 높이 200 mm에 해당하며 경주 중·저준위 처분 사일로 콘크리트 배합조건을 따라 제작하였다(Table 1). 본 시편은 21°C의 상온에서 28일 간 수중 양생 후, 처분환경에 노출된 콘크리트를 모사하기 위해 온도조건(15°C, 45°C, 75°C)과 포화 유무에 따라 추가로 32일 동안 양생하였다. 건조상태의 시료는 항온기를 이용하여 온도조건에 따라 양생하였고, 포화상태의 시료는 물을 채운 수조에 온수전열기를 투입하여 온도조건에 맞게 수온을 유지하였다. 조건에 따른 시편 구분은 Table 2에 정리하였다.

Table 1. Mixing ratio of concrete for Kyoungju low and intermediate-level disposal silo

Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Fly ash (kg/m ³)	20 mm coarse aggregate (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Plasticizer (kg/m ³)	Super-plasticizer (kg/m ³)	AE admixtures (kg/m ³)
185	375	94	961	692	0.7059	2.551	0.084

Table 2. Abbreviation of concrete specimens according to disposal environment

Specimen No.	Dry condition			Saturated condition		
	15°C	45°C	75°C	15°C	45°C	75°C
1	D15-1	D45-1	D75-1	S15-1	S45-1	S75-1
2	D15-2	D45-2	D75-2	S15-2	S45-2	S75-2
3	D15-3	D45-3	D75-3	S15-3	S45-3	S75-3
4	D15-4	D45-4	D75-4	S15-4	S45-4	S75-4
5	-	-	-	S15-5	S45-5	S75-5

2.3 실험 장비 및 방법

AE (acoustic emission)의 신호감쇠 측정을 위해 Fig. 2와 같이 실험장비를 준비하였다. AE 신호를 저장하고 분석이 가능한 PAC (Physical acoustics)사의 AE 측정장치인 Micro-II Digital AE System을 사용하였다(Fig. 2(a)). 최대 32개의 AE 채널 수용이 가능하며 무게가 약 9.07 kg으로 휴대가 편리하다는 특징이 있다. 채널에 연결할 AE 센서는 동일한 회사의 제품인 NANO-30 HD52을 사용하였다(Fig. 2(b)). 크기는 직경 7.9 mm, 높이 7.1 mm에 해당되며 공진 주파수는 300 kHz, 그리고 유효 감지범위는 125 kHz에서 750 kHz 사이에 속한다. 신호 증폭기는 동일 회사에서 제조한 저전력 IL-LP-WS를 사용하였으며 응답 주파수는 30 kHz에서 1,000 kHz의 범위에 속한다(Fig. 2(b)). 일정주기로 신호를 발생시키는 초음파 발생 장치는 MKC Korea사의 Ultracon-2020을 사용하였다(Fig. 2(c)). AE 센서의 효과적인 신호감지를 위해서 주파수 500 kHz에 해당하는 접촉식 트랜스듀서인 Olympus 사의 A189S-RB (직경 3.9 mm)를 사용하였다(Fig. 2(d)).



(a) AE system



(b) AE sensor



(c) Wave generator



(d) Transducer

Fig. 2. Equipment used for measurement of AE signal attenuation

신호 감쇠특성 실험을 위해 Fig. 3과 같이 4개의 AE 센서 그리고 1개의 트랜스듀서를 콘크리트 공시체에 부착하였다. AE 측정실험은 센서의 부착상태와 부착하중에 민감하므로 부착상태에 대한 영향을 줄이기 위해 Dow Corning 사의 High vacuum grease를 사용하여 센서(또는 트랜스듀서)와 공시체 간의 간극을 최소화하였다. 공시체에 부착된 각 AE 센서에 일정하고 동일한 하중을 주기위한 방안으로 3.5 cm 간격으로 고정한 양 옆 압정핀에 고무밴드(두께 1.4 mm)를 설치하여 장력을 가하였고, 트랜스듀서 또한 동일한 하중을 가하기 위해 중력과 수평한 방향으로 공시체 상단에 부착하였다. 신호전달거리에 따른 신호 감쇠특성을 효과적으로 알아보기 위하여 각 센서로 전달되는 신호전달거리는 5.5 cm, 8.6 cm, 13.9 cm, 18.2 cm로 설정하였다. 세팅이 완료된 실험 장치는 Fig. 4와 같다.

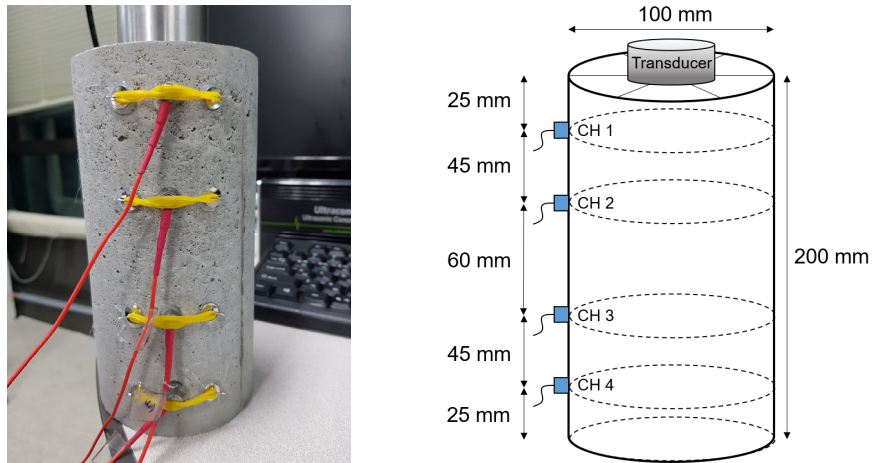


Fig. 3. Attachment position of AE sensors and the transducer

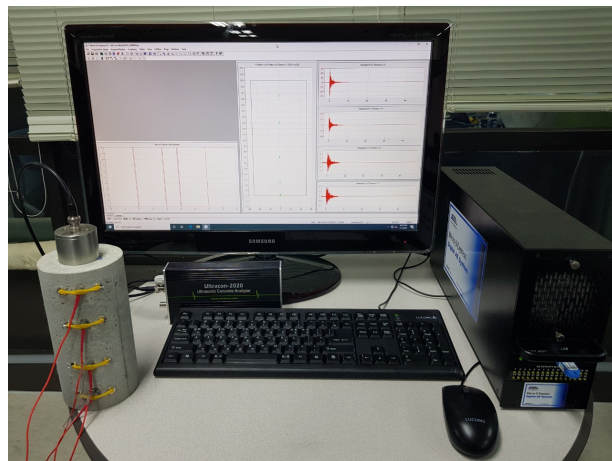


Fig. 4. Equipment setting for AE signal attenuation tests

신호의 진폭(또는 에너지)은 콘크리트의 골재 크기, 양, 그리고 입력신호의 주파수에 따라서 그 특성이 달라지지만(Philippidis and Aggelis, 2005), 신호전달거리에 따라서도 상당한 영향을 미친다. 본 실험에서는 신호전달 거리에 따른 신호의 감쇠 거동을 알아보기 위하여 이외의 다른 영향요소들은 제거하였다. 즉, 동일한 종류의 콘크리트 골재를 사용하였고 각 실험 조건에 동일한 전기적 입력신호를 가하였다.

3. 콘크리트 신호 감쇠계수 결정

3.1 콘크리트 감쇠계수 산정방법

신호감쇠는 2.1절에서의 식 (1)과 같이 표현할 수 있으나 감쇠계수 α 를 찾기 위해서는 선형형태로 변형하여 산정하는 것이 편리하다. r_1 을 기준값 1 m로 설정하였을 때 식 (1)은 다음과 같은 선형식으로 표현할 수 있다.

$$\ln(A_2) = \ln(C_A) - \alpha_A r_2, \quad (C_A = A_1 e^{\alpha_A}) \quad (2)$$

식 (2)에서 AE 진폭에 대한 감쇠계수 α_A 는 선형모형에 대한 기울기(slope)이며, $\ln(C)$ 는 절편(intercept)에 해당한다. 기울기와 절편은 최소자승(least square)을 통하여 근사할 수 있다.

일반적으로 신호의 감쇠는 식 (2)와 같이 AE 진폭으로 표현하지만 AE 절대에너지로도 표현이 가능하다. 소산된 AE 에너지는 AE 이벤트 수와 비례하며, AE 이벤트 수는 신호의 진폭에 비례한 것으로 알려졌다(Carpinteri et al., 2007). 따라서 식 (2)의 진폭은 절대에너지로 치환하여 다음과 같이 변형될 수 있다.

$$\ln(E_2) = \ln(C_E) - \alpha_E r_2, \quad (C_E = E_1 e^{\alpha_E}) \quad (3)$$

여기서, E_1 와 E_2 는 각각 신호전달거리 r_1 과 r_2 에 따른 신호의 AE 절대에너지이며, α_E 는 AE 절대에너지에 대한 신호 감쇠계수를 말한다.

3.2 콘크리트 감쇠계수 분석

AE 진폭감쇠에 대한 선형모형은 포화유무, 온도조건에 따라 Fig. 5에 나타내었으며 선형모형을 토대로 산정한 α 와 C 는 Table 3에 정리하였다. 여기서, 처분조건 별 사용된 시료의 개수는 4개 또는 5개이지만 감쇠계수의 오차가 큰 케이스는 제외한 후 최종적으로 각 3개의 시편에 대한 결과만을 고려하였다. 선형모형에 대한 적합도를 분석한 결과, 결정계수(R^2)는 모두 0.78 이상을 보였으며 이는 식 (2)에 대한 적합도가 허용 가능한 수준임을 말해준다고 판단된다. 산정된 C 의 변동계수(coefficient of variation)는 17~31%, α 의 변동계수는 10~16%의 분포를 보였다. Fig. 6은 AE 절대에너지에 대한 선형모형을 시각적으로 보여주는 그래프이며, Table 4는 이에 대한

선형모형을 토대로 구한 α 와 C 를 정리한 표이다. AE 진폭의 경우와 달리 부분적으로 R^2 이 0.8 이하에 해당하는 모형이 보이긴 했으나 대부분은 $R^2 > 0.8$ 을 만족하였다. 산정된 C 의 변동계수는 13~42%, α 의 변동계수는 2~25%의 범위를 보였다. 이러한 결과는 고주파 신호가 비균질성을 가지는 콘크리트 매질을 통과하면서 차이가 발생한 것으로 보인다.

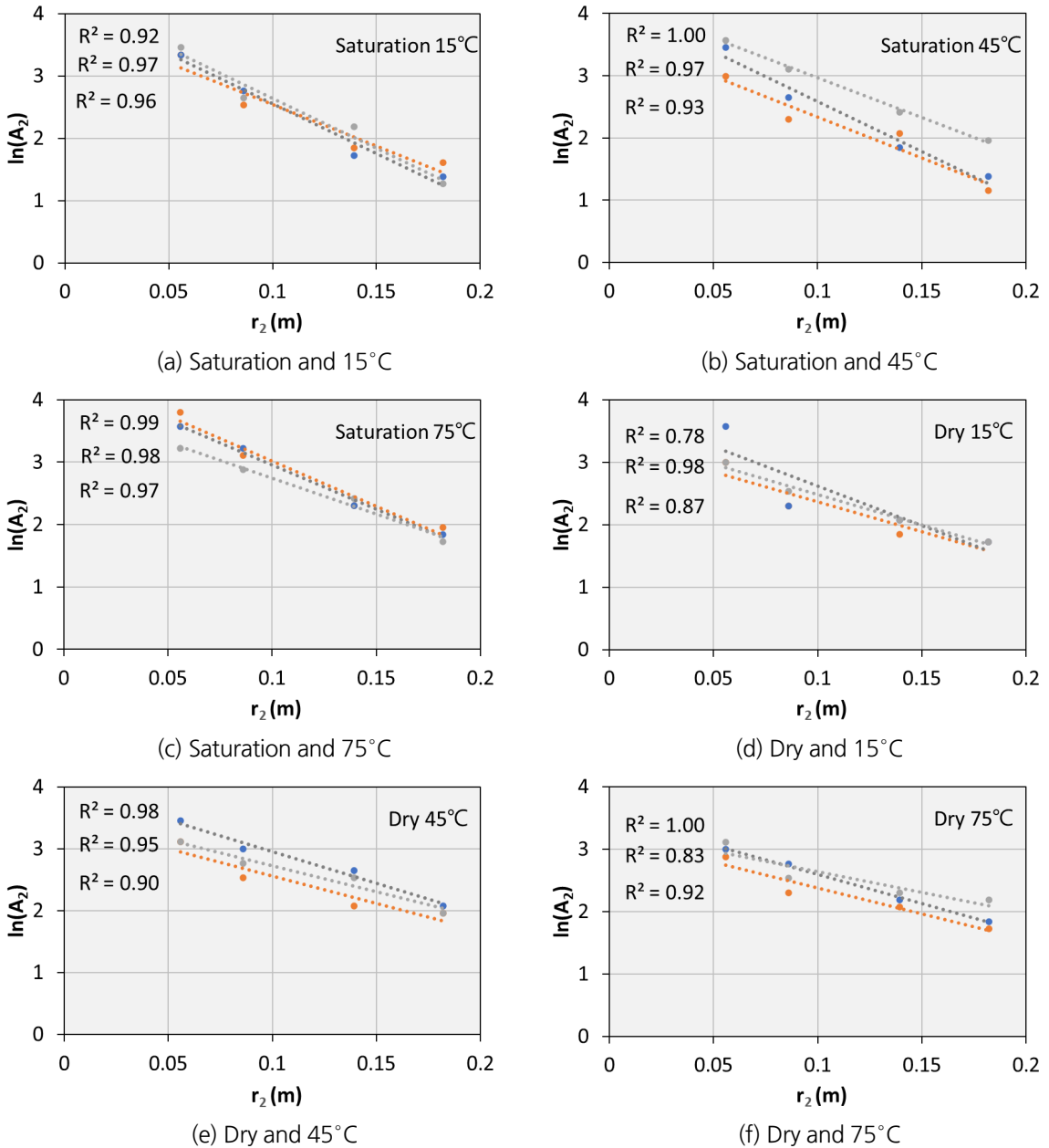
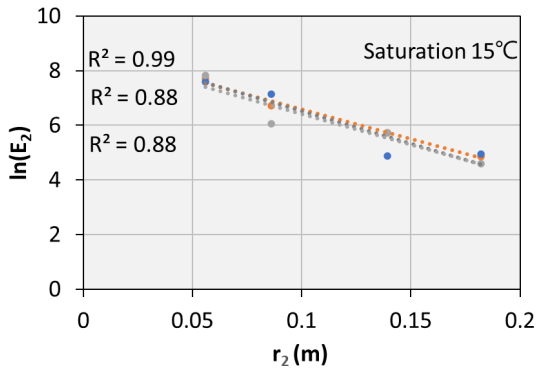


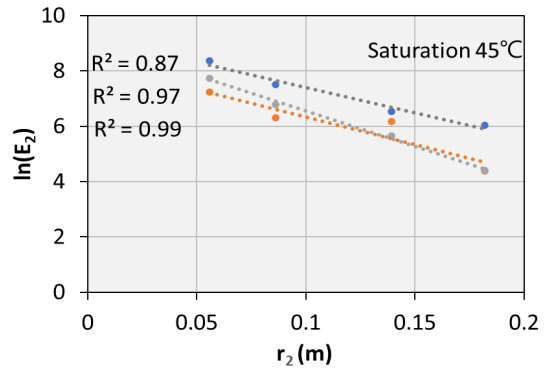
Fig. 5. Linear models for AE amplitude attenuation depending on several disposal environments

Table 3. Descriptive statistics for AE amplitude attenuation coefficients and constant values

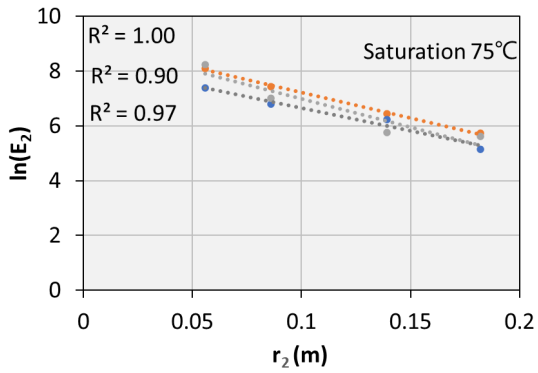
Condition	Specimen number	α_A (m ⁻¹)	C (-)
S15	1	13.34	48.21
	2	15.97	63.57
	3	16.00	69.54
	Average	15.10	60.44
	Standard deviation	1.53	11.00
	Coefficient of variation	10%	18%
S45	1	13.07	38.24
	2	16.05	66.04
	3	12.76	69.43
	Average	13.96	57.90
	Standard deviation	1.82	17.12
	Coefficient of variation	13%	30%
S75	1	14.51	87.54
	2	14.22	79.90
	3	11.45	48.78
	Average	13.39	72.08
	Standard deviation	1.69	20.53
	Coefficient of variation	13%	28%
D15	1	9.60	27.87
	2	9.75	31.84
	3	12.69	48.76
	Average	10.68	36.16
	Standard deviation	1.74	11.10
	Coefficient of variation	16%	31%
D45	1	8.86	31.32
	2	10.27	53.61
	3	8.44	35.45
	Average	9.19	40.13
	Standard deviation	0.96	11.86
	Coefficient of variation	10%	30%
D75	1	8.29	24.66
	2	9.38	34.23
	3	6.67	27.25
	Average	8.11	28.71
	Standard deviation	1.37	4.95
	Coefficient of variation	17%	17%



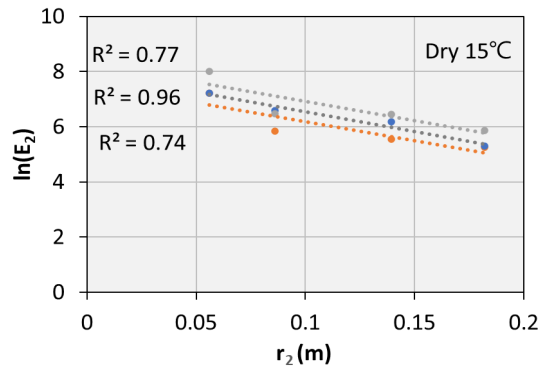
(a) Saturation and 15°C



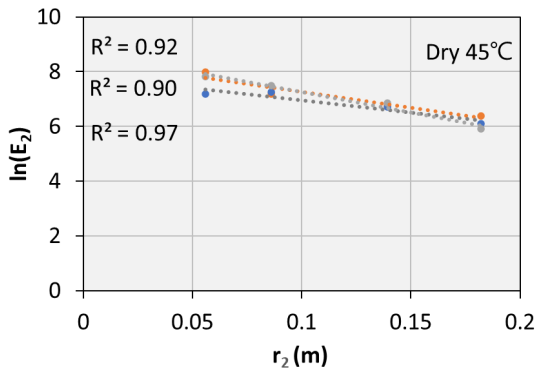
(b) Saturation and 45°C



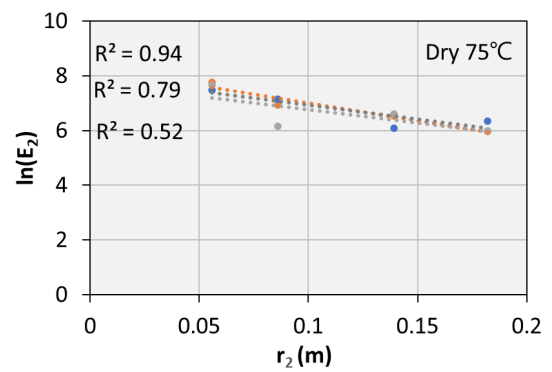
(c) Saturation and 75°C



(d) Dry and 15°C



(e) Dry and 45°C



(f) Dry and 75°C

Fig. 6. Linear models for AE absolute energy attenuation depending on several disposal environments

Table 4. Descriptive statistics for AE absolute energy attenuation coefficients and constant values

Condition	Specimen number	α_E (m ⁻¹)	C (-)
S15	1	21.71	6,412
	2	23.87	7,379
	3	22.34	5,665
	Average	22.64	6,486
	Standard deviation	1.11	859
	Coefficient of variation	5%	13%
S45	1	19.86	4,110
	2	25.69	9,105
	3	18.26	10,160
	Average	21.27	7,792
	Standard deviation	3.91	3,232
	Coefficient of variation	18%	41%
S75	1	18.67	8,849
	2	20.80	8,637
	3	16.80	4,157
	Average	18.76	7,215
	Standard deviation	2.00	2,650
	Coefficient of variation	11%	37%
D15	1	13.76	1,919
	2	14.21	2,874
	3	14.05	4,132
	Average	14.01	2,975
	Standard deviation	0.23	1,110
	Coefficient of variation	2%	37%
D45	1	11.76	4,641
	2	14.98	6,357
	3	9.03	2,578
	Average	11.92	4,525
	Standard deviation	2.98	1,892
	Coefficient of variation	25%	42%
D75	1	12.97	4,044
	2	10.41	2,889
	3	9.73	2,266
	Average	11.03	3,066
	Standard deviation	1.71	902
	Coefficient of variation	15%	29%

Fig. 7은 Table 3의 결과를 이용하여 곡선으로 도시한 그래프이다. 신호전달이 초기인 경우에서 포화콘크리트에 대한 진폭크기는 건조콘크리트의 경우보다 상대적으로 높은 값을 나타내었다. 매질이 온전히 물로 구성된 경우 α 는 1 MHz 신호조건에서 0.22 dB/m를 가지지만(Culjat et al., 2010), 공기는 164 dB/m (20°C)로 물보다 약 745배 높은 것으로 알려졌다(Jakevičius and Demčenko, 2008). 이에 따르면 콘크리트는 공극에 공기가 아닌 물로 포화되어 있는 경우가 신호전달이 용이하기 때문인 것으로 파악된다. 그러나 포화콘크리트의 α 값은 건조콘크리트의 경우보다 더 큰 것으로 나타났으며 이로 인하여 신호전달거리가 0.1 m 부근에서 진폭 값의 역전현상이 발생하였다(Fig. 7). AE 절대에너지도 마찬가지로 신호전달이 초기인 구간에서는 포화 콘크리트에서의 AE 절대에너지 값이 상대적으로 높게 측정되었다. 신호전달거리가 점차 증가하다가 0.9~0.11 m 지점에서 역전현상이 발생하였으며 결국 AE 진폭과 유사한 패턴을 보이는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 8). 이러한 포화유무에 따른 결과의 차이는 Fig. 9와 같이 공극 포화로 인한 탄성파의 감쇠는 입자 간의 마찰, 유체 흐름, 점성 소산(viscous dissipation)으로 인한 분출 흐름(squirting flow) 등으로 설명될 수 있을 것이다. Johnston et al. (1979)은 균열 또는 공극 내에 존재하는 유체가 마찰계수를 저하시키며 입자 간의 미끄러짐을 유발하여 신호 감쇠가 발생한다고 보고하였다.

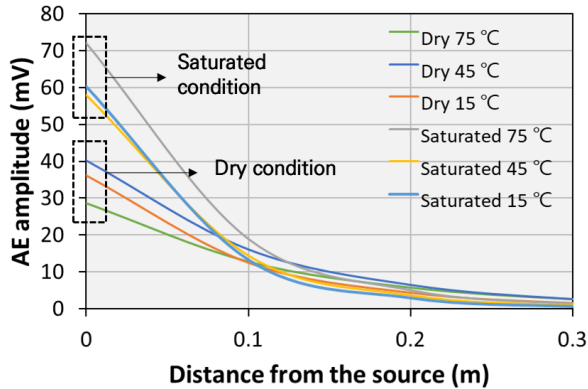


Fig. 7. AE amplitude attenuation curves according to disposal environments

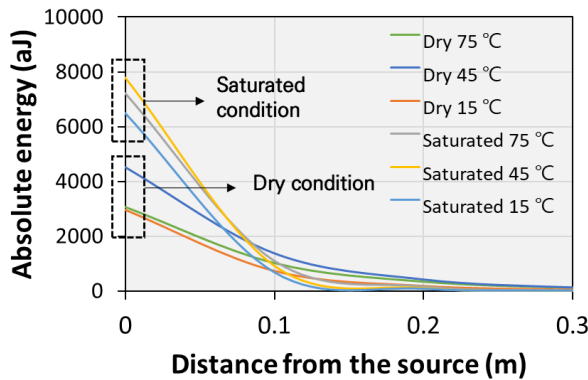


Fig. 8. AE absolute energy attenuation curves according to disposal environments

Müller et al. (2010)은 탄성파로 생성된 압력 차에 의한 유체 흐름(fluid flow)이 탄성파 에너지 감쇠와 산란의 주요 원인으로 보고하였으며 이러한 유체흐름을 압력 차의 규모에 따라 거시적 흐름과 국부적 흐름으로 구분하였다. 거시적 흐름은 탄성파가 공간적으로 균질하고 유체로 포화된 매질을 통해 전파되면 파의 최대 및 최저점 간의 압력 차가 발생하며, 이러한 파장 규모의 흐름이 점성-관성 감쇠(viscous-inertial attenuation)를 유발하는 것으로 알려졌다(Biot, 1956). 반면 O'Connell and Budiansky (1977)는 서로 인접한 공극의 모양과 방향 차이로 인하여 공극 사이에 국부적인 압력구배를 유발하는 흐름을 국부적 흐름 또는 분출 흐름으로 정의하였다. 이러한 국부적 흐름은 비구형 모양의 유연한 공극 내에서 유체가 탄성파에 의해 압축되었을 때 점성 소산으로 인해 상대적으로 견고한 공극으로 분출되는 현상으로 이는 탄성파 에너지의 감쇠를 동반한다고 보고하였다(Mavko and Nur, 1979). 공극에 존재하는 물 자체의 감쇠는 공기보다 더 작지만 본 연구의 결과는 공극 포화로 인한 탄성파 감쇠 메커니즘에 의해 발생한 것으로 보인다. 또한 이러한 감쇠 현상은 탄성파의 주파수에 따라 의존적이며 특히 500 kHz와 같은 고주파수에 해당할수록 더욱 지배적으로 작용하는 것으로 알려졌다(Johnston et al., 1979).

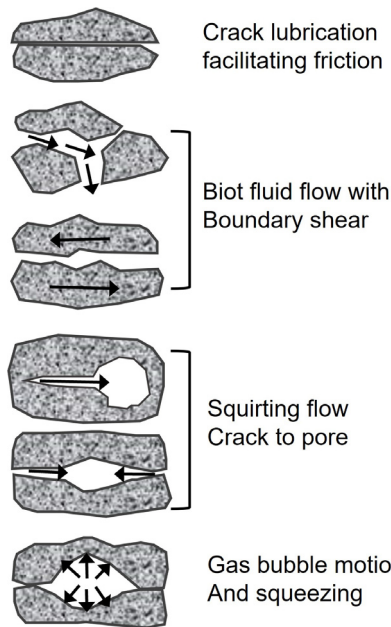


Fig. 9. Attenuation mechanisms of signal in saturated rocks (Johnston et al., 1979)

Figs. 10, 11은 각각 AE 진폭과 절대에너지에 대한 α 값을 그래프로 도시한 결과이다. 온도가 증가할수록 포화 유무와 관계없이 α 가 감소하는 경향을 보였다. 이는 온도가 증가할수록 콘크리트 공극 내의 수분이 증발하여 함수비 감소로 인한 영향인 것으로 파악된다. 그럼에도 불구하고 α 는 AE 진폭, 절대에너지 모두에서 온도조건보다는 포화유무에 따른 영향이 큰 것으로 관찰되었으며, 이는 콘크리트 구조물의 감쇠신호 측정 시 포화여부를 고려한 판단이 중요하다는 것을 의미한다고 볼 수 있다.

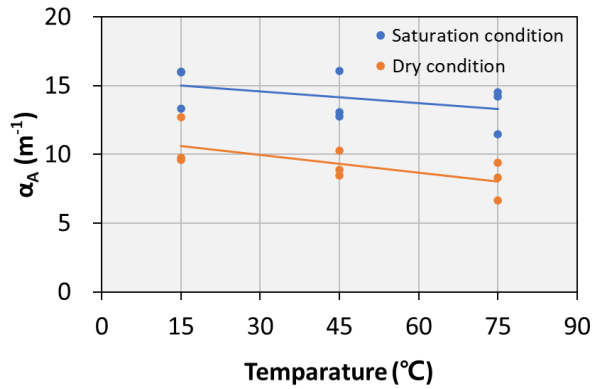


Fig. 10. Changes in AE amplitude attenuation coefficient according to disposal environments

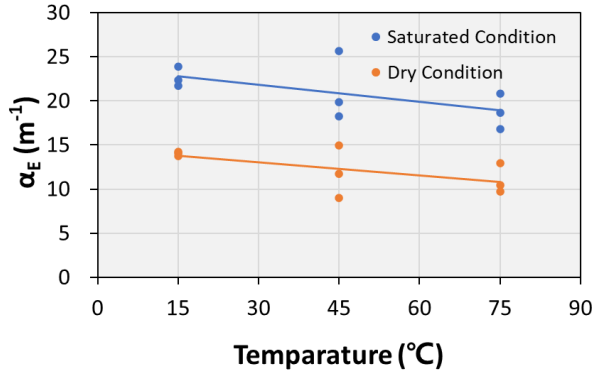


Fig. 11. Changes in AE absolute energy coefficient according to disposal environments

4. 결론

원자력발전소에서 발생하는 핵폐기물의 안전한 처분을 위하여 사용되는 콘크리트 처분구조물의 AE 신호감쇠 실험을 위하여 중·저준위 처분환경을 모사하였고, 처분환경에 따른 감쇠계수를 결정하였다. 실내실험의 결과에 의해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 신호전달 초기구간에서는 포화 콘크리트의 AE 파라미터 값(AE 진폭, 절대에너지)이 건조 콘크리트의 경우 보다 높았으며, 이는 신호전달 매질이 오로지 물로 구성된 경우가 공기의 경우보다 신호전달이 더 용이하기 때문인 것으로 파악된다.
2. 그러나 α 값은 포화 콘크리트가 건조 콘크리트보다 더 높게 산정되었으며, 이는 초음파 신호가 포화된 콘크리트 매질을 신호가 통과하면서 입자 간의 마찰과 다양한 유체흐름 메커니즘에 의한 것으로 판단된다.

3. 아울러 온도가 증가할수록 포화유무와 관계없이 α 가 감소하는 경향을 보였으며 이는 온도가 증가할수록 콘크리트 공극 내의 수분이 증발하여 함수비 감소로 인한 영향인 것으로 파악된다.
4. 그러나 α 는 온도조건보다는 포화유무에 따른 영향이 큰 것으로 관찰되었으며, 이는 콘크리트 처분구조물의 감쇠신호 측정 시 포화여부를 고려한 판단이 중요하다는 것을 의미한다고 볼 수 있다.

처분구조물의 정량적인 손상도를 평가하기 위해서는 센서로 측정된 감쇠된 신호가 아닌, 균열이 발생한 위치에서의 실제 신호특성을 파악할 필요가 있다. 일반적인 환경에서의 콘크리트 감쇠특성 연구는 과거에 수행되어져 왔으나, 중·저준위 폐기물 처분환경에서의 콘크리트 감쇠계수를 결정하는 것은 수행된 적이 없는 실정이다. 본 연구에서 도출된 처분조건 별 감쇠특성 곡선은 실제 신호의 특성 파라미터 값(AE 진폭, 절대에너지) 추정, 센서의 최적배치 결정 등 경주 중·저준위 처분장 콘크리트 사일로의 장기 건전성 평가를 위한 모니터링 시스템에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국연구재단의 원자력 연구개발사업(NRF-2021M2C9A1018633)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

저자 기여도

이항로는 실험 설계 및 수행, 데이터 수집 및 분석, 원고 작성을 하였고, 홍창호는 실험 설계 및 수행을 하였고, 김진섭은 실험 계획, 원고 검토를 하였고, 김지원은 실험 수행을 하였다.

References

1. Bäckblom, G. (2008), Excavation damage and disturbance in crystalline rock - results from experiments and analyses, TR-08-08, SKB, pp. 1-86.
2. Biot, M.A. (1956), "Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range", The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 28, No. 2, pp. 179-191.
3. Carpinteri, A., Lacidogna, G., Pugno, N. (2007), "Structural damage diagnosis and life-time assessment by acoustic emission monitoring", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 74, No. 1-2, pp. 273-289.
4. Culjat, M.O., Goldenberg, D., Tewari, P., Singh, R.S. (2010), "A review of tissue substitutes for ultrasound imaging", Ultrasound in Medicine and Biology, Vol. 36, No. 6, pp. 861-873.
5. Gaydecki, P., Burdekin, F., Damaj, W., John, D.G. (1992), "The propagation and attenuation of medium-frequency ultrasonic waves in concrete: a signal analytical approach", Measurement Science and Technology, Vol. 3, No. 1, pp. 126-134.

6. Jakevičius, L., Demčenko, A. (2008), “Ultrasound attenuation dependence on air temperature in closed chambers”, *Ultrasonic and Acoustic Measurements*, Vol. 63, No. 1, pp. 18-22.
7. Johnston, D.H., Toksöz, M.N., Timur, A. (1979), “Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: II. Mechanisms”, *Geophysics*, Vol. 44, No. 4, pp. 691-711.
8. Kim, J. (2013), Quantitative damage assessment of in-situ rock mass using acoustic emission technique, Ph.D. Thesis, KAIST, pp. 1-244.
9. Kim, J.S., Kim, G.Y., Baik, M.H., Finsterle, S., Cho, G.C. (2019), “A new approach for quantitative damage assessment of in-situ rock mass by acoustic emission”, *Geomechanics and Engineering*, Vol. 18, No. 1, pp. 11-20.
10. Kim, Y.H., Lee, S., Kim, H.C. (1991), “Attenuation and dispersion of elastic waves in multi-phase materials”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 24, No. 10, pp. 1722-1728.
11. Landis, E.N., Shah, S.P. (1995), “Frequency-dependent stress wave attenuation in cement-based materials”, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 121, No. 6, pp. 737-743.
12. Maillat, E., Godin, N., R’Mili, M., Reynaud, P., Fantozzi, G., Lamon, J. (2014), Real-time evaluation of energy attenuation: A novel approach to acoustic emission analysis for damage monitoring of ceramic matrix composites. *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 34, No. 7, pp. 1673-1679.
13. Mavko, G.M., Nur, A. (1979), “Wave attenuation in partially saturated rocks”, *Geophysics*, Vol. 44, No. 2, pp. 161-178.
14. Müller, T.M., Gurevich, B., Lebedev, M. (2010), “Seismic wave attenuation and dispersion resulting from wave-induced flow in porous rocks—A review”, *Geophysics*, Vol. 75, No. 5, pp. 75A147-75A164.
15. O’Connell, R.J., Budiansky, B. (1977), “Viscoelastic properties of fluid-saturated cracked solids”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 82, No. 36, pp. 5719-5735.
16. Otsuki, N., Iwanami, M., Miyazato, S., Hara, N. (2000), “Influence of aggregates on ultrasonic elastic wave propagation in concrete”, *Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, Elsevier, Amsterdam, pp. 313-322.
17. Philippidis, T.P., Aggelis, D.G. (2005), “Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete”, *Ultrasonics*, Vol. 43, No. 7, pp. 584-595.
18. Rodríguez, P., Celestino, T.B. (2019), “Application of acoustic emission monitoring and signal analysis to the qualitative and quantitative characterization of the fracturing process in rocks”, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 210, pp. 54-69.
19. Santamarina, J.C., Klein, K.A., Fam, M.A. (2001), *Soils and waves*, John Wiley & Sons, New York, pp. 1-512.
20. Shah, A.A., Ribakov, Y. (2010), “Effectiveness of nonlinear ultrasonic and acoustic emission evaluation of concrete with distributed damages”, *Materials & Design*, Vol. 31, No. 8, pp. 3777-3784.
21. Wachtman, J.B., Cannon, W.R., Matthewson, M.J. (2009), *Mechanical properties of ceramics*, John Wiley & Sons, New York, pp. 1-496.
22. Wang, X., Wang, E., Liu, X. (2019), “Damage characterization of concrete under multi-step loading by integrated ultrasonic and acoustic emission techniques”, *Construction and Building Materials*, Vol. 221,

No. 10, pp. 678-690.

23. Wu, C., Gong, F., Luo, Y. (2021), "A new quantitative method to identify the crack damage stress of rock using AE detection parameters", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 80, No. 1, pp. 519-531.
24. Yang, J., Mu, Z.L., Yang, S.Q. (2020), "Experimental study of acoustic emission multi-parameter information characterizing rock crack development", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 232, No. 1, 107045.
25. Zhao, X.G., Cai, M., Wang, J., Ma, L.K. (2013), "Damage stress and acoustic emission characteristics of the Beishan granite", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 64, pp. 258-269.