

부식이 존재하는 기존 노후 관로에서 인장 시편 가공 시 그림 가공 타당성에 대한 연구

남영준* · 김정현** · 배철호*** · 임윤묵****

Nam, Young Jun*, Kim, Jeong Hyun**, Bae, Cheol Ho***, Lim, Yun Mook****

Validation Study on Processing Grip Part of Tensile Specimen Acquired from Corroded Pipeline

ABSTRACT

In this work, tensile tests, one of the most common test method to assess the condition of a corroded pipe, were conducted. According to ASTM E8 method, the use of flat or curved uni-axial tension test is allowed under the recommendation with the usage of grips corresponding to a curvature of the pipe. However, this method is not for corroded specimen. Furthermore, in the case of performing the multiple tensile tests with various curvatures, it is desirable not to produce zigs that fit each curvatures, if merely processing the specimen grip with curvature into the flat grip can show almost identical tensile behavior. Therefore, various tension simulations were conducted first to check if there exist any differences. Also, experiments on corroded tensile specimen were conducted and compared with the FEM simulation that reflects the actual geometry acquired from the 3D scanner.

Key words : Corrosion, Specimen processing, Tensile test, Load carrying capacity

초 록

부식된 관로의 상태를 평가하기 위해서 수행하는 직접평가 중 인장 실험을 수행하였다. 부식된 관로에서 절삭 가공하여 인장 시편을 취득하면, 관로의 관경에 따라 곡률이 변화하고 실제 평평한 시편의 거동과 달라질 수 있어 이를 확인하기 위한 연구를 수행하였다. 시편의 전 영역이 평평한 경우, 곡률이 있는 경우 그리고 시편에 곡률이 존재하면서 그림 부분만 평평하게 가공한 경우에 대해서 부식이 없는 경우와 부식이 존재하는 경우(두께 대비 25, 50 %의 단일 부식)로 나누어 해석을 진행하였다. 부식이 존재하게 되면 응력 집중이 단면 감소부에서 확실하게 나타나 그림의 가공 여부가 시편의 인장거동에 영향을 거의 주지 않는다는 것을 해석을 통해 확인하였다. 또한 실제 부식이 있는 시편에 대하여 3D 스캔을 진행하고 이를 반영한 해석 모델을 만들어 실험 결과와 비교 분석하였다.

검색어 : 부식, 시편 가공, 인장 실험, 잔존 성능

* 정회원 · 연세대학교 건설환경공학과, 박사과정 (Yonsei University · raden4@yonsei.ac.kr)

** 종신회원 · K-water 융합연구원, 수석연구원 (K-water · jhkim@kwater.or.kr)

*** K-water 융합연구원, 책임연구원 (K-water · baech@kwater.or.kr)

**** 종신회원 · 교신저자 · 연세대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사 (Corresponding Author · Yonsei University · yunmook@yonsei.ac.kr)

Received November 20, 2019/ revised December 1, 2019/ accepted January 9, 2020

1. 서론

최근 수도관 파열 사고에 대한 보도가 증가하고 있고, 특히 수도시설 중 관로에서 사고가 상당히 많이 발생되고 있다. 그 이유는 주로 관로의 노후화에 있는 것으로 파악이 된다. 이에 대하여 K-water(2017)에서는 현재 노후관 개량에 대해 굉장히 큰 비용이 소요될 것으로 예측하고 있으며(광역 상수관로는 2030년까지 3조9천억원, 지방 상수도는 52조원이 소요될 것으로 추정), 육안으로 두께 게이지를 통한 기존의 점적인 조사를 통한 진단은 오진 즉, 구조물의 상태를 과소 혹은 과대평가할 위험성이 높다. 따라서 부식으로 인한 관로의 상태를 정확하게 추정할 수 있는 기술이 관로의 운영과 유지관리 측면에서 필요하다.

관의 상태를 평가하는 방법에는 크게 간접평가와 직접평가로 나뉜다. 간접평가는 관로의 제원과 환경을 통해서 평가를 진행한다. 직접평가는 관체 내·외면 상태를 직접 조사하는데 그 종류로는 인장 실험, 원주방향 휨 파괴강도 실험, 파열 인장실험 등이 있다. 그 중 본 연구에서는 인장 실험을 진행하였다. 부식으로 인한 구조물의 인장 성능 저하와 관련해서는 실제 실험과 시뮬레이션을 통한 연구가 활발하며, 인위적으로 부식시키거나 시편에 단면 결손을 주는 경우와 실제로 자연 노출된 재료에 대한 실험 및 해석이 주를 이루었다. Fernandez et al.(2016a)은 인위적으로 부식시킨 철근에 대하여 단일 인장 및 주기 하중 실험을 진행하고, 3D 스캔을 통해 정밀하게 계측된 형상에 대해 유한요소해석을 진행하여 결과를 비교한 바 있다(Fernandez et al., 2016b). Sheng and Xia(2017)은 부식이 없는 인장시편의 표점 거리를 여러 레이어로 나누어 여러 가지 패턴의 국부 부식을 주어 실험을 진행하고 실험 결과를 분석하였다. Garbatov et al.(2014)은 해상에 노출되어 부식된 박스 거더에서 인장 시편을 취득하여 인장성능 저하를 분석하였다. Wang et al.(2017)은 자연 노출되어 8년 동안 부식된 H빔 트러스 강철판을 3D 프로파일러를 통해 계측하여 어떤 파라미터가 인장성능에 가장 연관성이 있는지를 연구하였다.

평평한 시편을 실험할 때에는 곡률이 없기 때문에 인장실험기의 지그(zig)에 변화를 줄 필요가 없다. 하지만, 본 연구가 대상으로 하는 관체의 경우 곡률이 있기 때문에, 관체의 두께가 20 mm 이하인 경우 인장 실험을 함에 있어 그 곡률에 맞는 지그를 제작하여 실험을 하거나 그립부분을 열을 가하지 않고 평평하게 가공을 하여 실험을 진행해야한다(ASTM E8, 2016). 본 연구에서 대상으로 하는 관체는 20 mm 이하의 벽 두께를 가진다. 따라서, 부식된 관체에서 취득된 인장 시편의 그립부분을 평평하게 가공을 해도 되는지에 대한 타당성을 알아보기 위해, 실제 실험 전 시편의 중앙에 단일 부식을 주어 해석하여 비교하였다. 또한 실제 부식이 있는 시편을 관로에서 가공하여 이에 대한 실험 및 해석을 진행하였다.

2. 해석 모델의 개요

2.1 모델 분류

부식이 있는 시편에 대한 실제 실험 전, 그립 가공 여부에 따른 인장 거동의 변화가 있는지를 살펴보기 위해 해석을 진행하였다. 실제 실험하고자 하는 관로의 관경 및 두께를 토대로 모델링 하였다. 부식이 있는 경우 그리고 시편의 중앙부에 시편의 절반만큼의 너비를 가지며 두께의 25 %, 50 %에 달하는 육면체형의 단일 부식이 있는 경우에 대해 각각 세 가지 케이스로 나누었다. 명확한 모델의 분류를 위해 그립 부분과 그립이 아닌 부분의 곡률 유무에 따른 명칭을 정의하였다. 곡률을 가지는 경우 Radius의 R, 평평한 경우 Flat의 F를 따서 모델을 분류하였다. 즉, 시편 전체가 관로의 곡률을 가지고 있는 경우(RR), 그립 부분만 평평하고 표점거리 이내는 관로의 곡률을 그대로 가지는 경우(FR), 그리고 시편 전체가 평평한 경우(FF)에 대해 분석하였다. 본 연구에서 사용한 시편의 규격은 Fig. 1과 같다. RR과 FF 모두 5.6 mm로 동일한 두께를 가지며 본 연구의 주안점인 FR의 가하학적 정보는 Fig. 1에 그립부분만을 확대하여 도시하였다. 그립 부분에서 10 mm는 관로가 가지고 있는 곡률을 그대로 가지며 5 mm의 단면 감소구간을 거쳐 평평한 그립이 될 수 있도록 모델링하였다.

2.2 유한요소모델

인장 거동을 분석하기 위해서 상용프로그램인 Abaqus/CAE 6.14(ABAQUS, 2014)를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 요소는 3차원 8절점 감차적분요소(C3D8R)를 이용하여 모형화 하였다. 실제 인장실험과 같은 경계조건을 적용하여 평평하게 가공하고자 하는 42.5 mm의 한쪽 끝은 고정시켜 변위를 구속하였고 나머지 끝은 분당 1 mm의 변위 제어를 통해 움직이도록 하였다. 표점거리 내의 구간에 대해서는 요소의 크기를 1 mm로 설정하였고 포아송비는 0.3으로 입력하였다. 재료로는 실험 전 취득하였던 다른 수도용 강관 재료인 STWW400 정보를 입력하였으며, ABAQUS를 통해 응력-변형률 곡선의 초기 선형탄성 영역과 항복 이후의 소성 영역을 구분하여 입력하였다. 취득한 재료 정보는

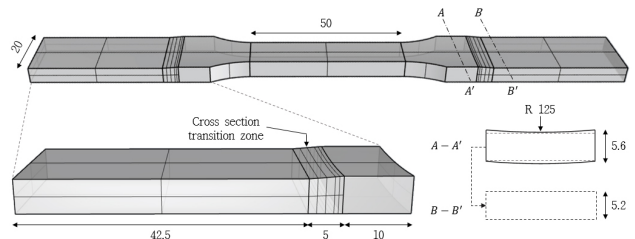


Fig. 1. Schematic Diagram of Tensile Specimen and the Grip Geometry of FR Grip Part Flattened with Reduced Cross Section (Unit: mm)

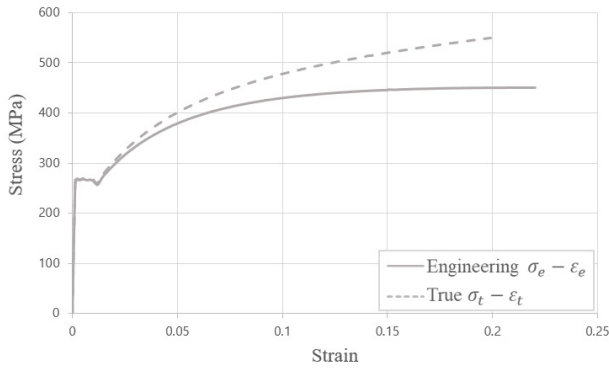


Fig. 2. Input Material Property

비선형 유한 요소해석을 수행하기 위해 진응력(σ_t)-진변형률(ϵ_t) 관계를 입력하여 해석을 진행하였고, 기존 실험을 통해 취득한 공칭응력(σ_e)-공칭변형률(ϵ_e) 곡선을 다음의 Eqs. (1) and (2)를 통해 Fig. 2와 같이 변환하여 입력하였다. 공칭응력은 응력을 계산할 때 실험의 하중 값을 초기 단면적으로만 나누어 주는데 반해, 진응력은 재료가 실험을 통해 변형되는 단면적을 고려하여 나타낸 응력이다. Eqs. (1) and (2)의 경우 인장 시편의 necking 일어난는 시점인 인장응력까지의 곡선만 유효하므로 그 지점까지만 변환하여 입력하였다.

$$\sigma_t = \sigma_e \times (1 + \epsilon_e) \tag{1}$$

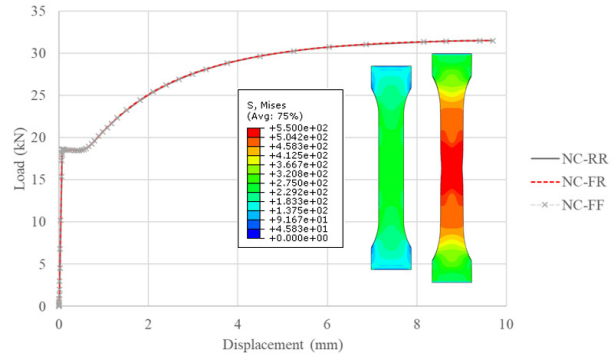
$$\epsilon_t = \ln(1 + \epsilon_e) \tag{2}$$

각 모델의 케이스별 하중-변위 그래프 및 항복, 최대 하중에서의 응력 분포는 다음의 Fig. 3과 같다. 또한, 각 케이스별 항복 및 최대 하중을 Table 1에 수치로 나타내었다. 케이스별 해석 결과 부식이 없는 시편의 경우 그림을 가공했을 때(RF) 항복 및 최대 하중에서 차이를 거의 보이지 않았다. 부식의 정도가 심할수록 최대 하중에 이르는 변위가 감소하는 것을 볼 수 있었다. 동일한 두께를 가지기 때문에 시편의 곡률에 관계없이 RR과 FF 간의 결과는 차이를 보이지 않았다. 따라서 전체 시편이 평평한 경우(FF)는 실제 실험과의 비교 대상에서 제외하였다. 즉, 3장에서는 실제 부식된 관로에서 가공된 인장 시편에 대해서 그림 가공 여부가 해석 결과에 차이를 보여주는 지에 대하여 다루었다.

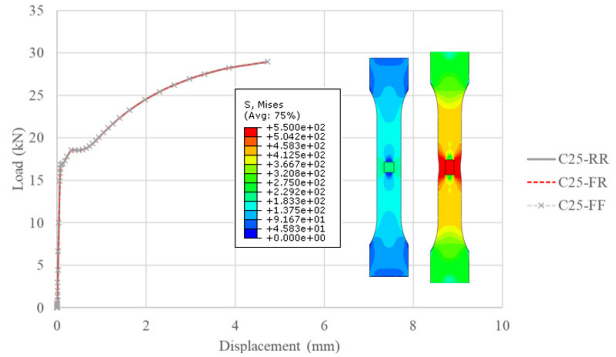
3. 인장 실험

3.1 실험장비 및 방법

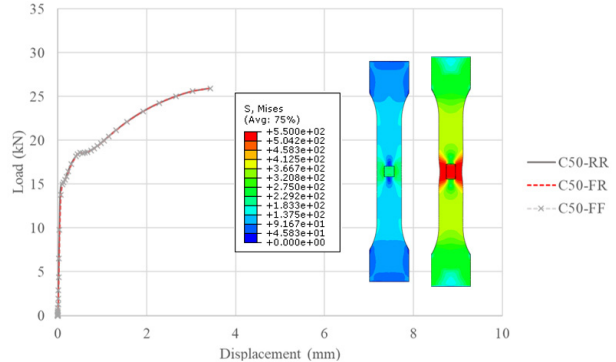
실제 관로에서 부식이 없는 시편을 3개, 부식이 존재하는 시편 2개를 절삭 가공하여 실험을 진행하였다. 실험을 통한 정확한 변위



(a) Non-corroded Specimen



(b) Specimen with 0.25 t Corrosion



(c) Specimen with 0.5 t Corrosion

Fig. 3. Load-deflection Curve Results and Von-mises Stress Contour Plots

Table 1. Comparison of Yield and Ultimate Load by Model

Models		P_y (kN)	P_u (kN)
Non-corroded	NC-RR	18.54	31.50
	NC-FR	18.54	31.50
	NC-FF	18.54	31.49
Corroded	C25-RR	17.31	28.95
	C25-FR	17.31	28.95
	C25-FF	17.31	28.95
	C50-RR	15.21	25.93
	C50-FR	15.21	25.93
C50-FF	15.21	25.93	

의 계측을 위해서 50 mm의 표점거리를 가지는 extensometer를 이용하였다(Fig. 4). 부식없는 시편을 통해 취득된 물성치를 Table 2에 나타내었으며, 이를 진응력-진변형률로 변환하여 해석에 이용하였다. 부식 시편의 실험 수행 전, 유한요소모델로의 변환 및 부식율을 측정하기 위해 3D 스캔을 진행하였는데, Fig. 5는 관로에서 절삭 가공하고자 하는 위치를 결정하고 3D 스캔하여 표점



(a) Non-corroded Specimen (b) Test Set-up

Fig. 4. Experimental Set-up for Tensile Test

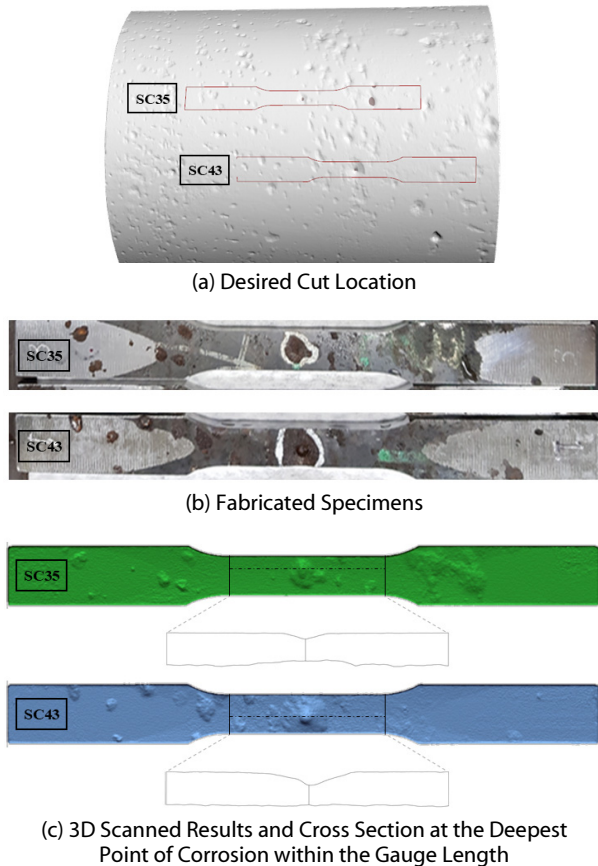


Fig. 5. Determination of the Position to be Cut and 3D Scan Models of the Specimens

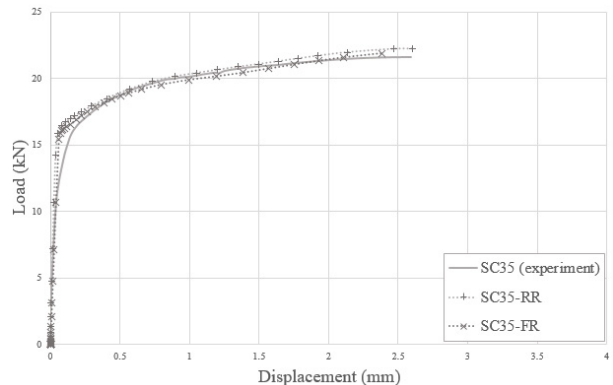
Table 2. Acquired Material Properties from Non-corroded Specimen

Specimen	Elastic Modulus (GPa)	Yield Stress (MPa)	Tensile Strength (MPa)
Non-corroded Specimen	213.7	269.6	369.8

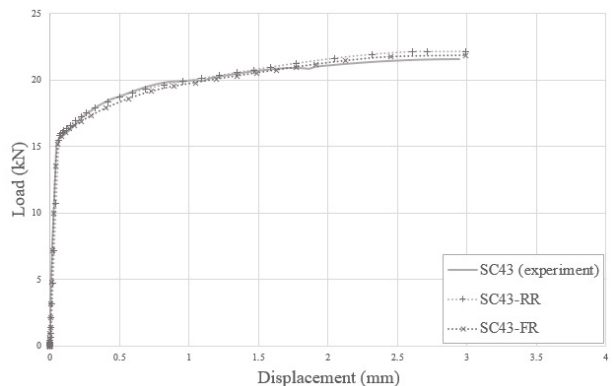
거리 내 최대 감속 지점에서의 길이 방향 단면을 나타낸 것이다. 스캔 모델을 분석한 결과, 두 부식 시편의 최대 두께 감속 정도가 각각 35 %, 43 %에 달했다. 따라서 2절과 동일한 방식으로 시편 이름을 SC35, SC43로 정의하고, Fig. 1과 같이 그립부분을 평평하게 가공하여 실험을 진행하였다.

3.2 실험 및 해석 결과

SC35, SC43의 실험 결과는 Fig. 6과 같다. 실험 결과에 따르면 SC35의 경우 항복 하중은 16.14 kN, 최대 하중은 21.64 kN이었고, SC43의 경우 항복 하중은 16.33 kN, 최대 하중은 21.52 kN 이었다. 3D 스캔을 통해 생성된 유한요소모델로 그립부분을 가공하지 않은 경우(RR)와 평평하게 가공한 경우(FR)에 대하여 두 가지 시편에 대해 해석한 결과, 항복 및 최대 하중에는



(a) Specimen with 0.35 t Corrosion



(b) Specimen with 0.43 t Corrosion

Fig. 6. Experimental and Numerical Results of Two Specimens

Table 3. The Percentage Errors in Yield and Ultimate Load by Analytical Models of Two Specimens

Specimens	Error in P_y	Error in P_u
S1-RR	3.6 %	2.6 %
S1-FR	1.9 %	1.1 %
S2-RR	1.4 %	1.1 %
S2-FR	0.2 %	0.7 %

Table 3과 같이 각각 0.2~3.6 %의 오차를 보이며 합리적인 시뮬레이션 결과를 보여주었다. 실제 실험 결과와 비교했을 때, 해석을 통해 나온 항복 하중의 경우 각 케이스 별로 거의 비슷하나 최대 하중이 조금 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있었는데 이는 3D 스캔을 통해 계측한 시편의 형상에 관로의 부식 방지를 목적으로 이용된 얇은 도장재가 일부 포함되어 실제 두께보다 조금 두껍게 계측된 것에서 기인한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 부식 관로에서 절삭 가공된 인장시편에 대하여 실험 및 해석을 진행하였다. 부식 시편에 대한 실험 이전 관로에서 부식 없는 시편의 가공을 통해 인장실험을 수행하여 기계적 물성치를 획득하고 실험 및 해석 결과를 통해 부식 인장 시편의 그림 가공 여부에 따른 인장 거동의 변화가 발생하는지를 확인하였다. 본 연구의 결과를 아래와 같이 요약한다.

- (1) ASTM E8 기준에 따르면 시편의 두께가 20 mm가 넘는 경우 즉, 큰 관경에 대해서는 그 곡률을 무시할 정도라고 판단하여 그 곡률에 맞는 지그를 제작하여 실험을 진행할 필요가 없다. 본 연구에서는 그 기준에 미치지 못하는 두께 5.6 mm의 작은 관경을 가지는 부식된 관로를 한 가지 선정하여 이에 대한 인장 실험 및 해석을 진행하였고 그림을 평평하게 가공하여 실험을 통해 인장 성능을 평가할 수 있음을 제시하였다.
- (2) 부식이 존재하는 시편의 경우 시편의 정밀 3D 스캔을 통해 생성된 유한요소해석 모델을 통해 부식된 시편의 거동을 항복 및 최대 하중 그리고 그에 해당하는 변위를 합리적인 오차범위로 잘 추정할 수 있음을 확인하였다.

- (3) 시편 표점 거리 내 부식이 존재하는 경우 응력 집중이 단면 감소부에서 확실하게 나타나 그림 가공 여부에 관계없이 거의 같은 거동을 보여주었다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물관리 연구사업의 지원(과제번호 127585)을 받아 연구되었습니다. 또한, 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2019R1A2C1090426).

본 논문은 2019 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

References

ABAQUS (2014). *User's manual: Version 6.14*, Simulia, United States.

ASTME8 (2016). *Standard test methods for tension testing of metallic materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

Fernandez, I., Bairán, J. M. and Marí, A. R. (2016a). "Mechanical model to evaluate steel reinforcement corrosion effects on σ - ϵ and fatigue curves. Experimental calibration and validation." *Engineering Structures*, Vol. 118, pp. 320-333.

Fernandez, I., Bairán, J. M. and Marí, A. R. (2016b). "3D FEM model development from 3D optical measurement technique applied to corroded steel bars." *Construction and Building Materials*, Vol. 124, pp. 519-532.

Garbatov, Y., Guedes S. C., Parunov, J. and Kodvanj, J. (2014). "Tensile strength assessment of corroded small scale specimens." *Corrosion Science*, Vol. 85, pp. 296-303.

K-water (2017). *Buried water main condition assessment-monitoring technology guide - Focus on non-destructive detection and structural condition monitoring*, No. 2017-WS-SR-625-1000 (in Korean).

Sheng, J. and Xia, J. (2017). "Effect of simulated pitting corrosion on the tensile properties of steel." *Construction and Building Materials*, Vol. 131, pp. 90-100.

Wang, Y., Xu, S., Wang, H. and Li, A. (2017). "Predicting the residual strength and deformability of corroded steel plate based on the corrosion morphology." *Construction and Building Materials*, Vol. 152, pp. 777-793.