

초음파 속도법을 활용한 강교 부식 손상탐지법 개발

김우석¹, 문성모², 김철민³, 이강문⁴, 임석빈^{5*}

Development of Corrosion Detection Method for Closed U-ribs in Steel Bridges Using Ultrasonic Velocity Method

Woo-Seok Kim¹, Seong-Mo Mun², Cheol-Min Kim³, Kang-Moon Lee⁴, Seok-Been Im^{5*}

Abstract: This study was intended to develop an inspection method to detect defects in closed-cell steel members in steel girder bridges. The ultrasonic pulse velocity method was selected as a rapid and effective method to identify thickness changes of steel specimens caused by corrosion. This study developed an algorithm to expedite the process and improve the accuracy in the prediction of steel plate thickness. Also, both static and continuous scanning methods were compared to each other to identify the difference in accuracy, but the results revealed that both methods produce almost the same results. This study also provided the idea to calculate the height of water contained in the closed-cell steel member and results of laboratory experimental results. The water heights which is thicker than the steel plate thickness were detectable and predicted using the idea suggested by this study, but the water heights lower than the steel plate thickness were not possible. However, the results showed whether the steel member contains water or not.

Keywords: Ultrasonic, Corrosion, Inspection, Continuous Scanning

1. 서 론

국내의 사회기반시설물은 1990년대 후반부터 2000년대 초까지 집중적으로 건설되었고, 이로 인해 최근 2020년대에 들어서 30년 이상의 공용에 따라 노후화가 빠르게 진행되고 있다. 특히, 국내의 교량은 2015년부터 노후화가 급격히 진행되어, 2025년 약 30%, 2035년 72%까지 급증하여 유지관리 비용이 증가하는 추세이다 (Ahn, et al., 2016, Jeong, et al., 2016a, Jeong, et al., 2016b, Jeong, et al., 2016c). 국내 교량 중 약 30%에 이르는 강교량은 콘크리트 교량에 비해 상대적으로 노후화 또는 열화에 대한 연구가 부족한 실정이다.

강거더로 이루어진 교량은 높은 재료 성능으로 인해 주로 지간이 상대적으로 긴 교량에 적용되고 있다. 하지만 강교량 또한 열화가 발생하는 것은 마찬가지이다. 외부 도장 부실 또

는 손상 등에 의해 내부 강재 부식이 발생하고, 이는 단면손실로 이어져 강교의 성능을 저하시킨다. 또한 강재의 부식은 녹물, 도장들뜸 등 미관을 저하시키는 문제를 발생시킨다. 강교량 또한 노후화가 진행되고 있으므로 이에 대한 대비가 절실하고, 강교량의 성능저하 없이 안전하게 유지할 수 있는 관리방안에 대한 연구도 필요할 것이다.

강교량의 손상은 주로 도장불량 및 열화, 부식, 누수, 용접 불량 등이 있다. 본 연구에서 이들 중 부식에 의한 단면손실을 주로 고려하였다. 강재의 부식은 대기부식환경 작용으로 인해 강재 주위의 여러 가지 물질과 염분, 온도, 습도 등에 따라 화학 반응을 일으키며 장기간에 걸쳐 발생하고, 부재 단면을 감소시켜 강도저하를 초래한다. 부식이 현저히 진행된 경우에는 안전성 확보가 곤란해지며 보수 및 보강범위가 광범위할 경우 경제적 손실 또한 증가하게 된다. 따라서, 국내외에서 부식손상으로 인한 구조물 파괴사례 등이 보고되고 있으며, 이에 대응하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. (Kim, et al., 2010; Kim, et al., 2011; Ahn, et al., 2016; Kim, et al., 2020; Kim, et al., 2021)

강교량의 부식은 주로 신축이음부 파손에 의한 누수나 연결부의 도장 손상 등 작지만, 지속적인 누수, 습도가 높은 대기환경 등에 의해 발생할 가능성이 높으므로 주로 국부적이거나 광범위한 부분에 동시다발적으로 발생할 가능성이 높다.

¹정희원, 충남대학교 교수

²정희원, 엔엔에프텍 대표

³정희원, 국토안전관리원 연구원

⁴정희원, (주)한국건설방재연구원

⁵정희원, 국토안전관리원 차장

*Corresponding author: sbeeni@kistec.or.kr

Korea Authority of Land & Infrastructure Safety (KALIS), Jinju, Kyungnam, 52856, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2022년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2022년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

특히 폐합부재의 경우 내부를 관측할 수 없어 외부에서 부식을 비파괴 검사법으로 탐지하는 것은 많은 어려움이 있다. 기존의 폐합부재 부식상태를 조사하는 방법으로는 음향 탐상법, 적외선 검사법, 방사선 투과법, 와전류 탐상법, 초음파 탐상법 등이 있다 (Andrade and Alonse, 1996; Yun, et al., 2006; Kwon and Park, 2012; Lee et al., 2015). 각 방법의 비교분석과 장단점은 Kim, et al.(2020)에 정리되어 있다.

본 연구에서는 강재의 부식에 의해서 두께가 감소되는 부분에 초점을 두고, 초음파 속도법(Hong et al. 2018; Kim, et al. 2016)을 활용하여 부식손상으로 인한 단면 감소를 탐지하고자 하였다. 초음파 속도법은 KS F 2731 콘크리트 압축강도 측정을 위한 초음파 펄스 속도 시험방법에 규정된 것과 같이 구조물의 비파괴 검사의 방법으로 널리 사용되고 있다. 그리고 초음파 속도법의 경우 초음파의 속도를 이용하여 측정하므로 밀도가 높은 강재의 경우 빠른 속도로 측정할 수 있어, 빠른 시간 내에 측정 가능하다. 따라서, 본 연구에서는 넓은 면적에 대한 빠른 검토를 위하여 0.2 m/s의 스캐닝 속도로 80% 이상의 부식 탐지를 목표로 설정하였다. 부식으로 의심되는 구간에 대해서는 속도를 조절하여 부식 면적이나 두께에 대한 정보를 판별하는 것도 필요할 것이다. 이를 활용하면 강교와 같은 넓은 범위의 강재에 대해서 스캐닝(scanning)을 통해서 부재의 부식손상을 탐지할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 부식이 이미 진행된 부재에 대해서 두께 변화의 탐지와 향후 부식의 위험이 있는 수분에 노출된 또는 수분을 담고 있는 U-리브와 같은 부재에서 수분을 탐지하기 위한 목적으로 진행되었다.

2. 초음파 속도법

본 연구에서 사용된 초음파 속도법은 Fig. 1과 같이 초음파를 생성시키는 송신부(pulser)와 수신부(receiver)를 같은 면에 위치시켜 실제의 교량 점검에 사용되는 경우를 고려하였다. 송신부(pulser)를 매질의 한 쪽에 접촉시키고, 매질을 통한 후 반대쪽 면에서 반사되어 오는 신호를 받는 수신부(receiver)부를 위치시켜 신호가 매질을 통과하는 과정을 기록함으로써 초음파의 통과속도를 기록하게 된다. 탄성체 내부

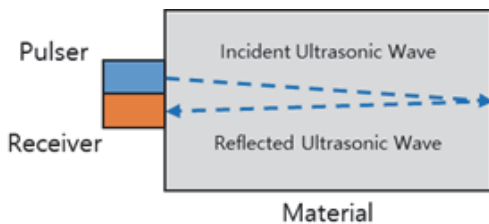


Fig. 1 Ultrasonic pulse wave system

를 통과하는 길이방향의 경계조건에 따라 두 가지의 형태로 나타낼 수 있다. 축방향의 변위가 비구속된 경우의 비구속 압축파는 식(1)로, 구속된 경우의 종파는 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2)$$

여기서, V_p = 종파의 속도 (m/s),

E = 매질의 동탄성계수 (MPa)

ν = 매질의 푸아송 비 (Poisson ratio)

ρ = 매질의 밀도 (kg/m³)

종파의 속도는 매질의 재료 특성 값으로부터 추정이 가능하다는 결론을 얻을 수 있다. 특히, 콘크리트와 달리 비교적 균질한 재료인 강재의 경우 종파의 속도 추정이 더욱 유리할 것으로 판단된다. 예를 들어, 강재의 탄성계수 = 205 GPa, 강재의 푸아송 비 = 0.3, 강재의 밀도 = 7,850 kg/m³를 적용했을 경우, 식(1)과(2)에 의한 종파 속도는 5,110 m/sec과 5,929 m/sec로 계산된다. 강거더의 하부 플랜지(flange)나 웨브(web)는 점검시 비구속 부재로 고려될 수 있고, 상부플랜지 등은 상단의 콘크리트로 구속되어 있다. 따라서, 스캐닝 시 두께 방향의 구속 여부를 고려하여 적용하여야 할 것이다. 앞선 이전 연구(Kim, et al., 2020)에서는 여러 판재에 이를 적용한 결과 평균 5,924 m/sec의 값을 얻어 식(2)의 이론값과 상당히 유사한 값을 나타내었고, 이 값은 일반적인 강재에서의 초음파 속도 값인 5,910 m/sec의 값과도 상당히 유사하였다.

국내외의 실험표준 ASTM C 597과 KS F 2731에 의한 초음파 속도법은 콘크리트의 압축강도를 예측하기 위한 시험으로 사용되고 있다. 펄스 신호를 만드는 발진자와 이를 수신하는 수신자 사이에 대상 매질이 있을 경우, 펄스의 통과 시간으로부터 초음파 속도를 측정함으로써 콘크리트 압축강도와 초음파 속도와 상관을 설정하여 콘크리트 압축강도를 추정할 수 있다. 하지만 콘크리트 재료의 밀도, 푸아송 비의 비균질성으로 인해 대략 29% 정도의 오차를 예상하고 있다(Hong et al., 2018).

3. 단면손실 탐지 시스템 설계

초음파 속도법을 활용하여 정밀한 강판의 두께 측정을 위하여 새롭게 하드웨어 및 소프트웨어가 구축되었다. 본 연구에 활용된 시스템 구조 설계 즉, 장비의 구성과 원리에 대해서

설명하고, 이를 오류없이 구현하기 위한 알고리즘 개선사항을 설명한다.

3.1 시스템 구조 설계

본 연구에서 Kim et al.(2020)에서 설명한 것과 같은 Fig. 2의 시스템을 구성하여 대상 강재에 대해서 초음파를 송신하고, 수신하는 시스템을 구성하였다. 기본적인 구성은 전원, 그리고 전압 변조를 위한 회로, 초음파를 발생시켜 보내고, 이를 수신하는 초음파 탐촉자(ultrasonic detector), 그리고 탐지된 반향파를 나타내는 오실로스코프로 구성되어 있다. Fig. 2(b)와 같이 실제 현장에서 이를 구현하기 위해서 추가적인 구성으로 탐촉자와 강판 사이에 매질(물)을 사용하였고, 스캐닝 결과를 확인하기 위한 터미널 장치가 있다. 이를 기초로 다양한 두께의 강판에 대해서 기초실험을 진행하였고, 최대값의 시간차이를 이용하여 두께를 측정하였다. 즉, 입사파가 반향되어 오는 에코(echo)의 첫 번째 최댓값과 두 번째 최댓값 사이의 시간 차이를 이용하여 강판의 두께를 측정하였다. 강판의 두께는 식(3)을 이용하여 계산하였다. 강재에서의 초음파 속도값(V_p)을 이미 알고 있는 상태에서, 왕복한 에코사이의 시간값(Δt)을 이용하여 계산할 수 있다. 상세한 검증은 Kim, et al.(2020)에서 설명하였다.

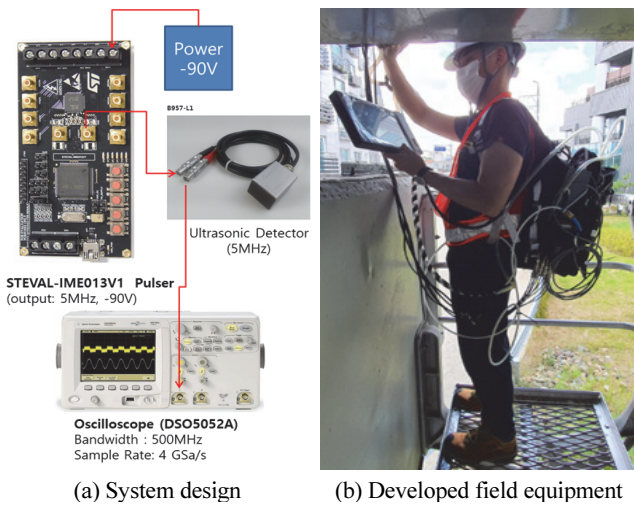


Fig. 2 Ultrasonic pulse detection system

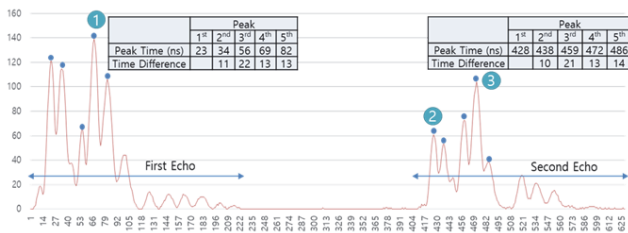


Fig. 3 Concept of thickness measurement

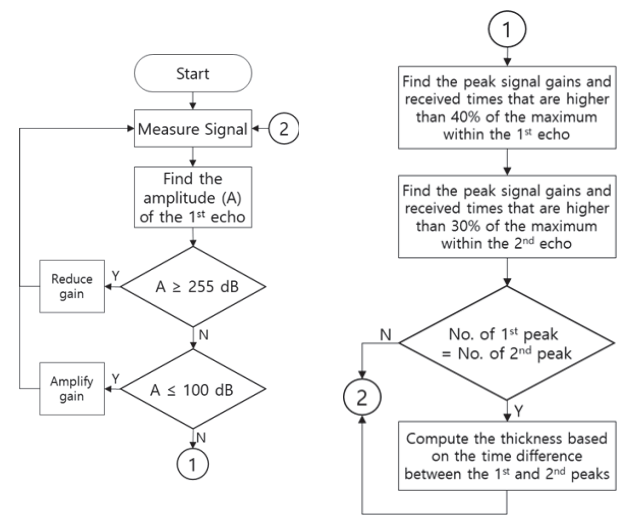
$$t = \frac{\Delta t}{2V_p} \quad (3)$$

여기서, t = 매질의 두께 (m),
 Δt = 에코의 시간차 (sec)

하지만 위와 같은 방법으로 모든 강판의 두께를 측정할 수 있는 것은 아니었다. 왜냐하면, Fig. 3과 같이 첫 번째와 두 번째 에코는 단일 파형으로 이루어진 것이 아니라, 몇 개의 피크(peak)값을 가지는 형태로 나타났다. Fig. 3에서 강판 두께 계산에 사용되는 시간차는 ①번과 ③번 사이의 값이 되어야 한다. 하지만 측정할 때마다 최댓값의 위치가 달라질 경우 즉, ②번으로 나타나는 경우도 있었다. 이럴 경우 ①번과 ②번 사이의 값으로 시간차이를 계산하여 올바른 값을 계산하지 못하는 경우가 다수 발생하였다.

3.2 알고리즘 개선

실제 강판에 스캐닝 시에는 에코의 피크값의 갯수와 최댓값이 발생하는 피크의 위치가 일정하지 않아, 이를 보완하기 위한 방법이 필요하였다. 본 연구에서는 Fig. 3에서와 같이 먼저 일정크기 이상의 피크값의 갯수 정보를 획득하였고, 첫 번째 에코에서의 최댓값이 발생하는 위치(①)와 두 번째 에코에서 대응되는 순서의 피크값(③)을 찾아서 이들 사이의 시간 차이를 계산하도록 계산 알고리즘을 수정하였다. 또한 본 연구에 사용된 장비의 특성상 신호값이 255 dB 이상 값이 측정되면 모두 255 dB로 인식되게 되어 정확한 신호 특성을 분석하기 어려워 신호값을 감소시켰다. 반대로 신호값이 너무 낮을 경우(100 dB 이하) 두 번째 에코의 신호가 너무 낮아져서 노이즈와 구분



(a) Regulating input signal gain

(b) Computing thickness

Fig. 4 Flow chart for thickness measurement algorithm

하기가 어렵게 되어 신호값을 증폭시켜야 한다. 즉, 측정 가능한 범위에서 피크값의 갯수와 위치를 파악할 수 있도록 Fig. 4와 같이 알고리즘을 개선하였다. 이후 첫 번째와 두 번째의 에코에서 피크의 갯수가 일치하는지를 확인하는 절차와 동일한 피크의 위치에서 시간차를 계산하도록 설정하였다.

4. 단면손실 탐지 시스템 검증 실험

본 연구는 강교량의 넓은 면적이 초음파 속도법을 적용하여 단시간 내에 강재의 부식 등의 손상에 의한 단면손실이 있는지를 파악하기 위한 목적으로 시작되었다. 따라서, 앞서 설명된 장비와 알고리즘을 활용하여 넓은 강재판에 적용하였을 때, 정확도를 평가하기 위하여 정(static)적인 스캐닝 결과, 연속(continuous)적인 스캐닝 결과를 비교하였다.

강교량의 U-리브와 같은 폐합부재의 경우 외부에서 내부의 상황을 알기 어려운 것이 현실이다. 특히, 현장 부재에 물이 고여 있는 상황일 경우, 추가적인 부식을 막기 위해서 빠른 인지를 통한 대처가 필요하다. 따라서, 이러한 상황을 고려하여 U-리브 부재의 내부에 물이 고여 있는 상황에 대해서 실험을 진행하였다. 이를 통해 물의 존재 유무와 단면손실이 발생의 유무를 확인할 수 있도록 실험을 진행하였다.

4.1 두께 변화 탐지 실험

강교량에 적용되고 있는 대표적인 두께의 강판 샘플을 준비하여 실제의 교량과 같은 도장을 하여 초음파 속도법이 두께 변화를 탐지 가능한지를 검토하였다. 먼저 Fig. 5와 같은 형상의 각각 11.5, 19, 25 mm 두께를 가진 강판을 3개 준비하였다.

각각의 강판은 Table 1과 같이 구간 A~E에 걸쳐 0~20%로 일정한 비율로 두께를 감소시켰고, 각각의 영역은 본 연구에

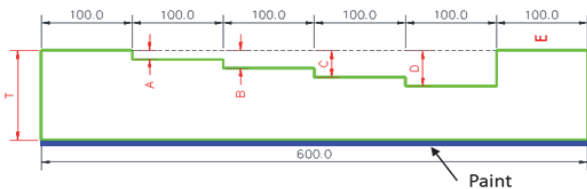


Fig. 5 Steel block thickness variation

Table 1 Test steel block thickness variation

Thickness (mm)	Region				
	A	B	C	D	E
Thickness Loss	1%	2%	10%	20%	0%
11.5	11.4	11.3	10.3	9.1	11.5
19	18.8	18.6	17.1	15.2	19.0
25	24.7	24.5	22.5	20.0	25.0

사용된 탐촉자의 길이(25 mm) 방향으로 4회 스캐닝이 가능하도록 100 mm로 설정하였다. 스캐닝은 도장된 부위에 대해서 실시하여 현장상황을 모사하였다. Fig. 6과 같이 각각의 A~E까지의 강판의 영역과 영역 내에서 4회 스캐닝 되는 구간을 표시하였다. 각 행(row)에는 Fig. 7과 같이 5개의 탐촉자가 스캐너로 구성되어 있다. 이로 인해, 각 행(row)은 25 mm의 폭

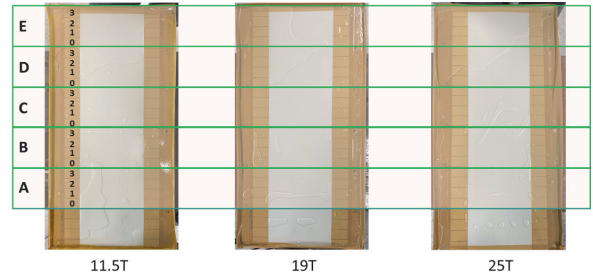


Fig. 6 Sample steel block and scanning area

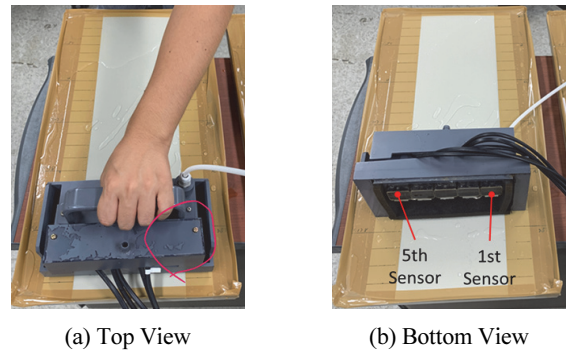


Fig. 7 Scanning test steel block

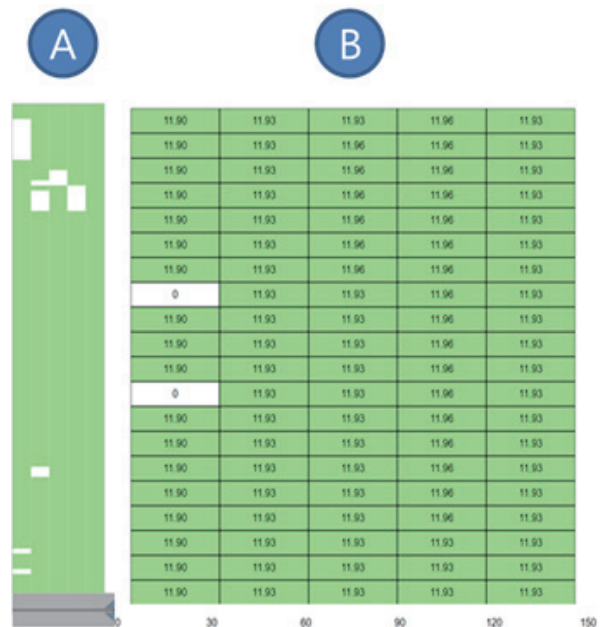


Fig. 8 Sample of scanning results

을 가진 구간으로 구분되어 5개의 영역에 대해서 결과값을 도출하게 된다. 즉, 스캐닝의 결과는 Fig. 8과 같고, 이는 실제 교량에 대한 스캐닝 결과의 예시이다.

㉠영역은 스캐닝한 전체 구간에 대한 정보를 시각적으로 합격 여부를 나타내고 있다. 곳곳에 발견되는 흰색 영역은 도장의 들뜸 또는 이물질 등으로 인해서 스캐닝 데이터가 획득되지 못한 곳이다. ㉡영역은 ㉠영역에 대한 획득된 상세 데이터 값을 나타내고 있다.

세 개의 강판에 대한 정적 및 연속 스캐닝 결과는 Table 2~4에 나타내었다. 세 강판의 스캐닝 결과의 오차는 0.0%부터 최대 1.3%로 나타났고, 정적인 스캐닝과 연속 스캐닝의 결과는 차이

Table 2 Measured thickness for 11.5 mm steel block

Fabricated Thickness (mm)		Measured Thickness				
		A (11.4)	B (11.3)	C (10.3)	D (9.1)	E (11.5)
Static	Avg.	11.47	11.36	10.32	9.09	11.49
	Std.	0.017	0.017	0.013	0.028	0.017
	Error	0.6%	0.5%	0.2%	-0.1%	-0.1%
Continuous	Avg.	11.46	11.34	10.30	9.08	11.47
	Std.	0.016	0.009	0.017	0.022	0.016
	Error	0.6%	0.7%	-0.4%	-1.3%	-0.3%

Table 3 Measured thickness for 19 mm steel block

Fabricated Thickness (mm)		Measured Thickness				
		A (18.8)	B (18.6)	C (17.1)	D (15.2)	E (19.0)
Static	Avg.	18.84	18.63	17.04	15.17	18.97
	Std.	0.014	0.014	0.020	0.024	0.015
	Error	0.2%	0.0%	-0.4%	-0.2%	-0.1%
Continuous	Avg.	18.84	18.62	17.05	15.16	18.96
	Std.	0.015	0.013	0.021	0.021	0.015
	Error	0.2%	0.0%	-0.3%	-0.2%	-0.2%

Table 4 Measured thickness for 25 mm steel block

Fabricated Thickness (mm)		Measured Thickness				
		A (24.75)	B (24.5)	C (22.5)	D (20.0)	E (25.0)
Static	Avg.	24.84	24.48	22.58	20.00	24.99
	Std.	0.037	0.018	0.444	0.015	0.014
	Error	0.3%	-0.1%	0.3%	0.0%	0.0%
Continuous	Avg.	24.81	24.48	22.47	19.98	24.97
	Std.	0.030	0.022	0.044	0.028	0.014
	Error	0.2%	-0.1%	-0.1%	-0.1%	-0.1%

가 없었다. 다만, 결과값은 두께에 영향을 받는 것으로 보여진다. 예를 들면, 두께 11.5 mm의 강판에 대한 스캐닝 결과는 오차가 0.1~1.3%로 나타나 상대적으로 다른 두꺼운 강판에 비해서 오차의 폭이 컸다. 두께 19 mm 강판의 경우 오차의 범위는 0.0~0.4%, 25 mm 강판의 경우 0.0~0.3%로 두께가 두꺼워질수록 오차가 줄어드는 경향을 보였다. 세 개의 강판 모두 오차의 절대값은 최대 0.03 mm 정도이나 두께에 따른 비중 차이로 상대적으로 박판일 경우 오차가 증가하는 경향이 있었다. 하지만 실용적인 관점에서는 아주 미미한 값의 차이이므로 강판의 두께를 측정하는데 초음파 속도법의 적용은 적절한 것으로 판단된다.

4.2 수분 탐지 실험

강재 U-리브 등의 폐합부재의 경우 누수가 있을 경우, 부재 내에 물고임이 발생할 수 있다. 하지만 이는 부재의 외부에서 탐지가 어려운 실정이다. 부재 내에 물고임을 탐지하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 9와 같이 강재 U-리브에 물을 담아 실험을 진행하였다.

4.2.1 신호 분석

초음파 속도는 매질의 밀도에 영향을 받으므로 매질의 종류에 따라 다른 종파 속도를 나타낸다. 물에서는 대략 1460 ~ 1500 m/s로 알려져 있다. 따라서, 물에 의해 발생하는 특정 주파수가 있을 것으로 추정하여 원신호에서 에코를 분석하였지만, 물에 의해서 발생하는 특정 에코 신호를 파악하기 힘들었다. 상세분석을 위해 FFT(Fast Fourier Transform)를 수행하여 물이 있을 때와 없을 때의 상황에 대해서 Fig. 10과 같이 비교

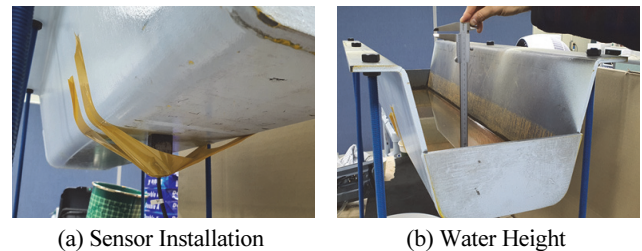


Fig. 9 U-rib steel test

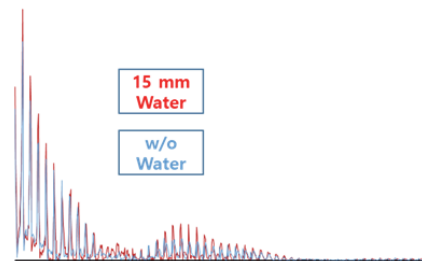


Fig. 10 FFT results of steel block with and without water

하였다. 하지만 이 경우에도 물의 존재 유무에 따른 신호의 특징을 분리하기 힘들었다. 이에 원신호를 A-scan 신호로 변환하여 분석을 실시하였다. A-scan 신호는 원신호의 위상을 (-)90도 평행 이동시킨 후 그 신호의 극값(envelope)을 취한 신호로 힐버트 변환(Hilbert transform)을 활용하였다. 신호분석의 결과는 Fig. 11에 나타내었다.

강재와 물에서의 초음파의 속도의 차이로 인해서 물과의 접촉면에서 일부는 물쪽으로 입사되며, 일부는 반사파가 형성된다. 물이 있는 경우(A)와 없는 경우(B)를 비교해보면, A는 강재의 영역 이내에서 입사파가 강재의 상단에서 반사되어 에코가 감소하는 형태가 주기적으로 나타나고 있다(①과 ③ 참고).

하지만 B는 A에서 발생했던 에코에 추가적으로 물에 의한 에코가 탐지된다. 최초에 강재로 입사한 펄스(①)는 강재와 물이 접하는 부분(②)에서 일부는 물 쪽으로 입사되고(④), 일부는 반대 방향으로 반사(③)된다. 반사된 에코(③)는 물이

없는 경우와 동일한 파형으로 나타난다.

U-리브 내의 물의 높이는 물 쪽으로 입사한 파(④)의 시간차를 이용하여 알 수 있다. 물 쪽으로 입사한 파(④)는 물의 밀도가 감소하여 진행속도가 상대적으로 느려지며, 물의 상단에서 반사파(⑤)는 느린 속도로 돌아오다 강재에서는 다시 진행속도가 증가하게 되어 표면으로 돌아온다(⑥). 이 때, A와 B 에코를 비교 분석 시 ⑦번 반사파의 경우를 사용해서는 안 된다. ⑦번 반사파는 강재의 표면에서 반사된 파가 물 쪽을 진행하여 다시 반사되어 나온 파이므로 물의 높이 계산에 사용할 수 없다. 따라서, ⑥번과 ⑧번의 반사파에 대한 상대적인 시간차를 계산하고, 물 속에서의 초음파 속도를 이용하면 물의 높이 계산이 가능하다. 이러한 방법으로 다양한 물의 높이에 대해서 실험을 진행하였고, Fig. 12과 13에 나타내었다.

물의 높이가 10 mm 이상인 경우(Fig. 12)는 상대적으로 물에서 발생한 반사파의 인지가 쉬웠다. Fig. 12에서와 같이 기존의 물의 없는 파형과 비교를 통해서 일정한 간격(e)으로 발

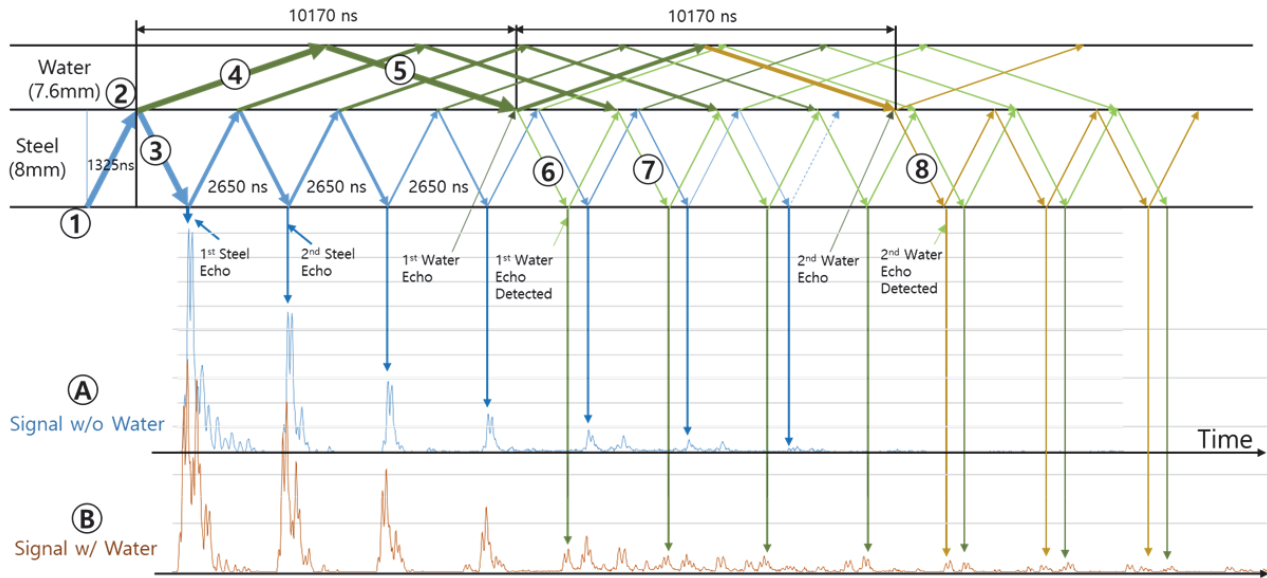


Fig. 11 Ultrasonic pulse incident and reflected propagation in steel block containing water

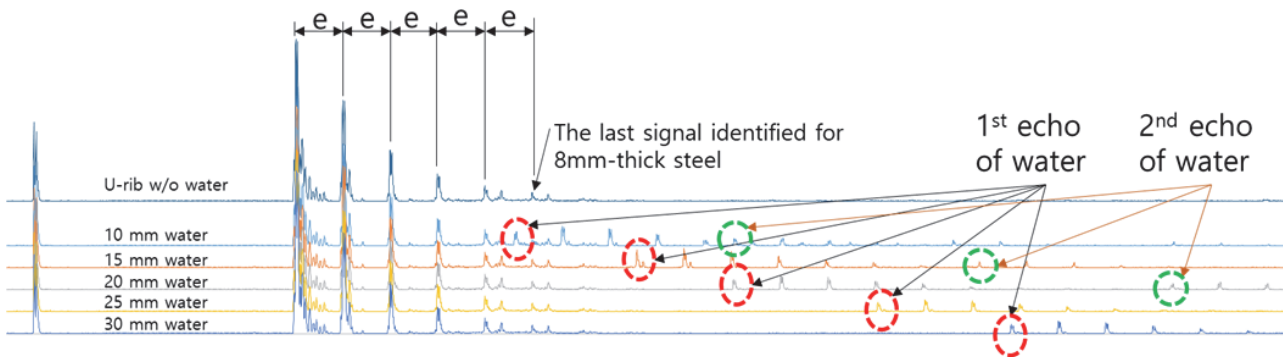


Fig. 12 Identification of water presence in steel U-rib (water height ≥ 10 mm)

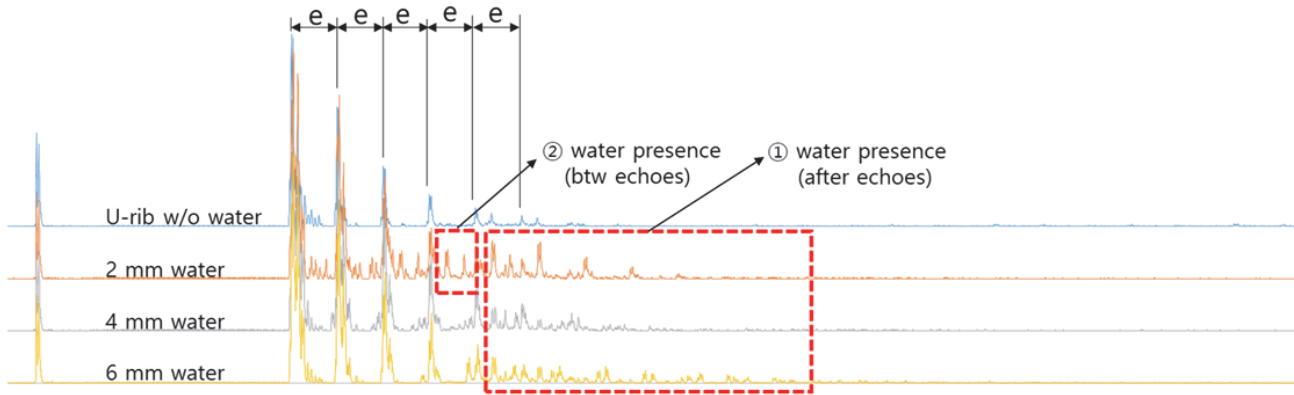


Fig. 13 Identification of water presence in steel U-rib (water height < 10 mm)

생하는 에코에 추가적으로 발생하는 반사파의 시간 간격을 측정함으로써 물의 높이를 추정할 수 있었다. 하지만 Fig. 13에서와 같이 물의 높이가 10 mm 미만인 경우에는 절대적인 물의 높이가 낮아서 물에서 반사되어 오는 파와 기존의 강재 내에서 발생하는 파의 구분이 쉽지 않아 신호 내에서 물의 높이를 구분해내는 것은 힘들었다. 따라서, 기존의 물이 없는 경우와 비교하여 일정한 간격(e) 이내에 추가적인 파형이 발생(②)하거나 또는 강재 내에서 발생하는 에코에 의한 파형이 감소된 뒤에 발생하는 추가적인 파형(①)의 존재를 통해서 물의 존재 유무는 판단할 수 있었다. 즉, 강재 내에서의 초음파의 속도와 물 속에서의 초음파의 속도는 약 4배 정도가 되므로 물의 높이가 강재의 두께를 초과한 경우는 기존의 강재에 의한 파형에서 떨어진 형태의 새로운 반사파로부터 물의 높이 추정이 가능하나, 물의 높이가 강재 두께와 유사할 경우 강재에서 발생한 반사파의 감쇄 이전에 물에서 발생한 반사파가 탐지되어 정확한 물의 반사파를 측정하기 어려웠다.

5. 결론

본 연구는 강교량에서 발생 가능한 단면 손실을 탐지하기 위한 목적으로 시작되었다. 특히, U-리브와 같은 폐합부재는 시각적으로 점검이 어려워 심한 손상이 발생되지 전까지는 탐지가 어려웠다. 이러한 부분을 해결하기 위해서 효율적으로 빠른 시간 내에 광범위한 범위의 단면 손실을 탐지하는 방법을 개발하였고, 아래와 같은 결론을 도출하였다.

1. 초음파 속도법을 활용한 강재의 단면 두께 추정은 가능한 것으로 판단된다. 특히, 정적인 스캐닝과 연속 스캐닝의 정확도에서는 눈에 띄는 차이가 없는 것으로 나타났으며, 최대 1.3% 정도의 오차를 나타내었다.
2. 초음파 속도법을 활용한 두께 추정법은 강재의 단면이 박판일수록 정확도가 감소하는 경향을 나타내었다. 두께가 다른 강판에 대해서 절대값으로 약 0.03 mm의 오차

를 나타내었으며, 이는 실제 적용 시에는 감내할 수 있는 오차의 범위 내로 판단된다.

3. 초음파 속도법을 이용하여 강판 내에 존재하는 물의 탐지도 가능하였다. 특히, 강판 두께 8 mm 부재에서는 물의 높이가 10 mm 이상일 경우에는 높이 추정도 가능하였다. 하지만 물의 높이가 10 mm 미만인 경우에는 강판 내의 반사파와 중복이 되어 물의 존재 유무만을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 진행된 실험은 모두 상온에서 진행된 부분으로 매질의 온도에 따른 초음파의 진행속도 변화의 영향은 고려되지 못했으나 추후 연구에서 규명해야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 국토안전관리원의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Ahn, J. H., Nam, D. K., Lee, W. H., Huh, J., and Kim, I. T. (2016), Evaluation of Compressive Strengths of Tubular Steel Members According to Corrosion Damage and Shape, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 28(4), 213-222.
2. Andrade, C., and Alonso, C. (1996), Corrosion Rate Monitoring in the Laboratory and On Site”, *Construction Building Materials*, 10(5), 315-328.
3. Hong, S., Lee, Y., Kim, S., and Kim, J. (2018), Estimation of Compressive Strength of Reinforced Concrete Vertical and Horizontal Members Using Ultrasonic Pulse Velocity Method, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 22(6), 197-205.
4. Jeong, Y., Kim, W., Lee, I., Lee, J., and Kim, J. (2016a), Definition, End-of-life Criterion and Prediction of Service Life for Bridge Maintenance, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(4), 68-76.

5. Jeong, Y., Kim, W., Lee, I., and Lee, J. (2016b), Development of Bridge Inspection Reliability and Improvement Strategy, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(5), 50-57.
6. Jeong, Y., Kim, W., Lee, I., and Lee, J. (2016c), Bridge Life Cycle Cost Analysis of Preventive Maintenance, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(6), 1-9.
7. Lee, H., Lee, B., Oh, K., and Kim, Y. (2015), Reliability Evaluation for Prediction of Concrete Compressive Strength through Impact Resonance Method and Ultra Pulse Velocity Method, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 19(4), 18-24.
8. Lee, M. J., Ahn, J. H., and Kim, I. T. (2014), Shear Buckling Strength and Behaviors of Steel Plate Girder with Asymmetrical Shear Resistant Web Panel by Local Corrosion, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 26(2), 105-118.
9. Kim, G., Jeong, Y., Ahn, J., and Kim, I. (2021), Evaluation of deterioration propagation life of steel bridge paints according to surface treatment methods and heavy-duty painting types, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 25(1), 75-84.
10. Kim, I., Chang, H. J., and Cheung, J. Y. (2010) An Experimental Study on the Evaluation of Residual Tensile Load-carrying Capacity of Corroded Steel Plates of Temporary Structure, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 22(5), 399-409.
11. Kim, I., Lee, M., and Shin, C. (2011), An Experimental Study on Evaluation of Axially Compressive Buckling Strength of Corroded Temporary Steel, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 19(4), 18-24.
12. Kim, M. W., Oh, H., and Oh, K. C. (2016), Estimating the Compressive Strength of High-Strength Concrete Using Surface Rebound Value and Ultrasonic Velocity, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(2), 1-9.
13. Kim, W., Mun, S., Kim, C., and Im, S. (2020), A basic study on the varying thickness detection of steel plate using ultrasonic velocity method, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 24(6), 146-152.
14. Korean Agency for Technology and Standards (KATS) (2018), Testing method for velocity of ultrasonic pulses to conclude compressive strength of concrete, KS F 2731.
15. KOSIS (2015), Status of the National Bridges and Tunnels in Republic of Korea, Korea Statistical Information Service, Korea.
16. Kwon, S. J., and Park, S. S. (2012), Non Destructive Technique for Steel Corrosion Detection Using Heat Induction and IR Thermography, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 16(2), 40-48.
17. Yun, J., Paik, I., Cho, S., and Chung, L. (2006), Non-Destructive Corrosion Measurement Technique of Reinforcing Bars Using Infrared Thermography according to Atmosphere Temperature, *Proceedings of 2006 Fall Conference of Korea Concrete Institute*, 18(2), 233-236.

Received : 11/15/2021
 Revised : 11/22/2021
 Accepted : 11/23/2021

요 지 : 본 연구는 강교량의 폐합부재 등 시각적으로 탐지하기 어려운 부위의 강재에 대한 손상을 탐지하기 위한 방법을 개발하기 위한 목적으로 시작되었다. 본 연구에서는 초음파 속도법을 활용하여 강재의 두께를 추정하는 방법에 대한 정확도를 향상시키기 위한 알고리즘을 개발 및 적용하였다. 또한 정적인 스캐닝과 연속 스캐닝의 비교를 실시하였고, 실용적인 범위의 정확도에서는 차이가 없는 것으로 나타났다. 강재 부재 내에 물이 고여 있는 상황을 고려하여 물이 있을 경우에 대한 물 높이 추정 알고리즘을 제안하였고, 이를 통해 측정된 결과 물의 높이가 강재 부재보다 두꺼울 경우에는 적절한 추정이 가능했으나, 작을 경우에는 물의 존재 유무만을 판단할 수 있었다.

핵심용어 : 초음파, 부식, 점검, 연속 스캐닝
