

초음파 속도법을 활용한 강판의 두께 변화 탐지를 위한 기초연구

김우석¹, 문성모², 김철민³, 임석빈^{4*}

A Basic Study on the Varying Thickness Detection of Steel Plate Using Ultrasonic Velocity Method

WooSeok Kim¹, Seongmo Mun², Chulmin Kim³, Seokbeen Im^{4*}

Abstract: This study was initiated to develop an effective inspection method to detect defects such as corrosion in closed-cell steel members in steel-box girder bridges. The ultrasonic velocity method among various non-destructive method was selected as a rapid and effective method to derive the average propagation velocity in the medium by using the ultrasonic wave velocity method for specimens of different thickness. The regression analysis was performed based on the experimental results, and the results was interpolated to evaluate the prediction accuracy. If the material properties are identical, this ultrasonic velocity method can predict the thickness using the averaged transmitted velocity. In addition, a continuous scanning method moving at 200 mm/s was tested for scanning a wide area of a bridge. The results exhibited that the continuous scanning method was able to effectively scan the different thickness of a bridge.

Keywords: Ultrasonic, Corrosion, Inspection, Continuous Scanning

1. 서론

국내에서도 이미 미국, 일본 등의 선진국에서와 같이 기존에 건설된 사회 기반 시설의 노후화가 빠르게 진행되고 있다. 특히 노후교량에 대한 안전사고 발생으로 인한 안전문제가 사회적으로 이슈화되고 있으며, 유지관리 투자 비중을 꾸준히 늘려나가고 있다. Fig. 1과 같이 한국건설기술연구원에 따르면 미국은 1950년대부터, 일본은 1980년대부터 급속한 노후화가 진행되었다. 우리나라는 2015년부터 노후화가 급격히 진행되어, 유지관리 비용이 점점 증가하는 추세이다 (Ahn, et al., 2016, Jeong, et al., 2016c).

국내 교량 중 30년 이상의 노후교량은 현재 8%이며, 10년 후 32%, 20년 후 71%까지 급격히 늘어날 전망이다. 이에 노후교량에 대한 유지관리 비용의 상승은 필연적이나, 예방적 유지관리나 적절한 시기에 적용되는 사후 유지관리의 적용으로 유지관리 비용의 급격한 상승을 완화해야 할 것이다 (KOSIS,

2015; Jeong, et al., 2016a; Jeong, et al., 2016b).

강교량은 콘크리트 교량에 비해 재료적인 성질은 우수하지만, 외부 요인에 의한 부식에 단면손실 등 치명적 기능적 손상과 녹물발생, 도장들뜸 등의 미관상의 문제를 발생시킬 수 있다. 강교량은 Fig. 2과 같이 현재에 비해 추후 20년 이내에 대부분의 교량이 노후화 되므로 이에 대한 대비가 절실한 실정이다.

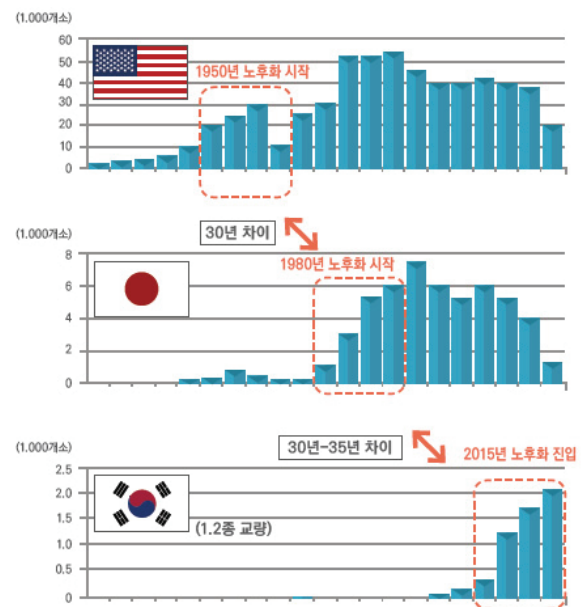


Fig. 1 Deterioration of Infrastructures in U.S., Japan and Korea

¹정회원, 충남대학교 교수

²정회원, 엔엔에프텍 대표

³정회원, 국토안전관리원 연구원

⁴정회원, 국토안전관리원 차장

*Corresponding author: sbeeni@kalis.or.kr

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

•본 논문에 대한 토의를 2021년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2021년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

강교량의 손상은 주로 도장불량 및 열화, 부식, 누수, 용접 불량 등이 있다. 이 중 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 부식 손상으로 인한 구조물 파괴사례 등이 보고 되고 있으며, 이에 대응하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. (Kim, et al., 2011; Ahn, et al., 2016)

강재의 부식은 주로 신축이음의 누수나 연결부의 작지만, 지속적인 누수, 습도가 높은 대기환경 등에 의해 발생할 가능성이 높으므로 주로 국부적이나 광범위한 부분에 동시다발적으로 발생할 가능성이 높다.

특히 폐합부재의 경우 내부를 관측할 수 없어 외부에서 부

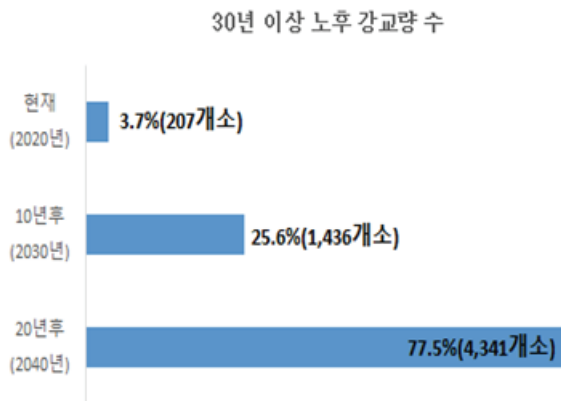


Fig. 2 Increase of Deteriorated Steel Girder Bridges

식을 비파괴 검사법으로 탐지하는 것은 많은 어려움이 있다. 기존의 폐합부재 부식상태를 조사하는 방법으로는 음향 탐상법, 적외선 검사법, 방사선 투과법, 와전류 탐상법, 초음파 탐상법 등이 있고, 각각의 장단점은 Table 1에 정리되어 있다 (Lee et al., 2015).

Andrade and Alonse (1996)은 전기화학적 방법을 이용하여 시간에 따른 부식으로 인한 단면손실을 측정하고자 하였다. Yun et al. (2006)은 노출된 철근에 직접 전류를 가하여 변화된 철근의 열특성을 이용하여 부식을 조사하는 방법을 이용하였다. 하지만, 이 방법들은 노출된 부위에 적용가능하며, 광범위한 부분을 조사하여 단면손실을 측정하기 위한 시간과 장비의 공간이 현실적인 교량에 적용하기에는 한계가 있다. 최근 연구 중 적외선 열화상 카메라를 이용한 방법 또한, 비파괴 방법으로 각광받고 있다. Kwon and Park (2012)는 가열된 매립 철근의 열특성 변화를 적외선 열화상 카메라를 이용한 방법을 활용하였으나, 강교량의 강재 거더를 가열하기에는 현실적인 제약이 따른다.

본 연구에서는 초음파 속도법(Hong et al. 2018; Kim et al. 2016)을 활용하여 부식손상을 탐지하고자 하였다. 초음파 속도법은 KS F 2731 콘크리트 압축강도 추정을 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 시간내에 측정이 가능하다. 따라서, 본 연구에서는 넓은 면적에 대한 빠른 검토를 위하여 0.2 m/s의 속도로 80% 이상의 부식 탐지를 목표로 설정하였다. 부식으로 의심되는 구간에 대해서는 속도를 조절하여 부식 면적이나 두께에 대한 정보를 판별하는 것도 필요할 것이다. 이를 활용하면 넓은 범위의 강재에 대해서 스캐닝

Table 1 Corrosion Detection Methods

Detection Methods	Explanation	Pros	Cons
Sound	Detecting stress waves emitted from a crack	Track the status of the defect and monitor the condition of the structure	Need to identify the resonant frequency of the sound parts and limited due to adjacent connected members
Infrared	Perceiving infrared energy with a noncontact sensor and transforming it to electric signal	Visualize the defective information using temperature distribution contours of the defective and healthy area	The radiation rate varies depending on the surface condition and the accuracy varies due to external heat
Radiation	Distinguishing a level of radiation penetrating an object using X-ray or Gamma ray	Display the size and shape of internal defects	Radiation is harmful to the human body, slow to execute and expensive
Eddy Current	Detecting surface defects using alternating current in conductor materials	Detect defects that exist deep in an object	Insensitive to various surface conditions, such as paint
Ultrasonic	Utilizing the reflection and refraction of ultrasonic sound impedance at different boundary surfaces	Portable and sensitive method capable of obtaining spatial information of cracks and defects	Inability to detect surface defects effectively

(scanning)을 통해서 전체 부재의 부식손상을 탐지할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 초음파 속도법

미국의 ASTM C 597과 국내의 KS F 2731에 정의된 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 속도와의 상관관계를 설정하여 콘크리트 압축강도를 추정할 수 있다. 하지만, 콘크리트의 재료와 밀도가 비균질하기 때문에 높은 정확도를 기대하기는 어려워, 대략 29% 정도의 오차를 예상하고 있다(Hong *et al.* 2018).

초음파 속도법은 Fig. 3과 같이 초음파를 생성시키는 송신부(pulser)를 매질의 한 쪽에 접촉시키고, 매질을 통과한 신호를 받는 수신부(receiver)부를 다른 한 쪽에 위치시켜 신호가 매질을 통과하는 과정을 기록하므로써 초음파의 통과속도를 기록하게 된다. 탄성체 내부를 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/m^3)

식 (1), (2)로부터 종파의 속도는 매질의 재료 특성값으로부터 추정가능하다는 결론을 얻을 수 있다. 특히, 콘크리트와

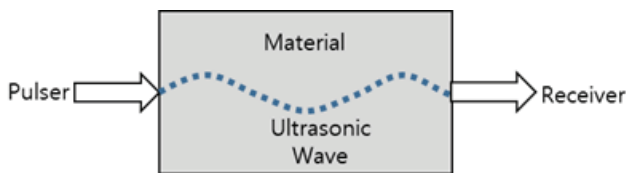


Fig. 3 Schematics of Ultrasonic Wave System

달리 비교적 균질한 재료인 강재의 경우 종파의 속도 추정이 더욱 유리할 것으로 판단된다.

3. 시스템 설계 및 스캐닝 실험

3.1 시스템 구조 설계

본 연구에서 강박스 거더의 내부 U-리브를 대상으로 내부의 부식손상을 짧은 시간 안에 탐지할 수 있도록 휴대성을 고려한 시스템을 설계하고자 하였고, 이를 위한 기초실험으로 간단한 실험환경을 구성하여 이에 대한 시스템의 검증을 수행하였다. 초음파 속도법의 활용 가능성을 검증하기 위한 시스템의 구성은 Fig. 4와 같다. 초음파 탐촉자는 펄스(Pulser)로부터 -90 V, 5 MHz의 임펄스를 발생시켜 오실로스코프 매질을 통해 반사된 파의 주파수를 읽는 실험을 하였다. Fig. 5와 같이 KDS3503 (SS400) 강재를 가공하여 두께가 2~10 mm로 각각 2 mm의 차이가 있는 두께를 가진 판재를 제작하여 각각의 두께별로 초음파의 속도를 측정하여 초음파 속도와 두께와의 상관관계를 조사하였다. Fig. 6은 오실로스코프를 활용하여 각각의 두께에 대하여 측정된 초음파의 입력값(pulse input)과 반향된 값을 나타내며, 처음 입력한 파가 일정 시간 동안 지속적으로 에코(echo)되어 돌아오는 시간들의 간격을 측정하므로써, 각 판재의 두께의 특성값을 얻을 수 있다.

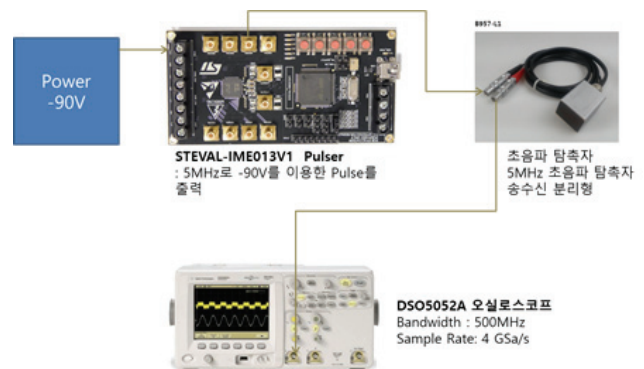


Fig. 4 Schematics of Experimental Set-up

3.2 초음파 속도법의 검증

강재에 초음파 속도법을 사용하기 위해서 먼저 샘플 강재에 대한 초음파의 속도를 결정할 필요가 있다. Fig. 5의 시편의 5가지의 두께에 대하여 각각의 입력값(pulse input)에 대한 반향시간(echo time)을 조사하였다. Fig. 6에 나타나 있듯이 일정한 간격의 입력파를 보내고, 일정 시간 후에 순차적으로 돌아오는 반향파의 간격을 충분한 시간동안(50 μs) 지속적으로 조사하였다. 판재의 두께가 얇을수록 돌아오는 반향파의 간

격은 좁았고, 판재의 두께가 증가할수록 시간은 증가하는 경향을 나타내었다. 각 두께별로 10회 측정을 실시하였고, 결과는 Table 2에 정리하였다. 각 두께별 초음파 반향속도는 평균 5,924 m/s로 나타났고, 각각의 두께에서 도출한 반향속도의 표준편차는 77.4 m/s로 나타났다. 본 실험에서는 두께가 증가할수록 표준편차가 줄어드는 경향을 나타냈다. 이는 두께가 얇을수록 초음파반향의 측정오차의 영향이 커지기 때문으로 추정된다. 추후 이 부분에 대한 추가적인 실험이 필요할 것으로 사료된다.

시편의 두께를 반향시간을 나누어 각각의 두께에 대한 초음파 속도를 구하였고, 이들의 평균값은 약 5,924 m/s로 나타

났다. 이는 식 (1), (2)를 이용한 이론값을 구하기 위하여 탄성계수 210 GPa, 프아송 비 0.3, 밀도 7,850 kg/m³ 인 구조용 강재에 대하여 계산하며 각각 5,172 m/s와 6,001 m/s로 나타났고, 본 실험에 의해 계산된 평균 매질전파속도 5,924 m/s는 적절한 것으로 판단된다.

판재의 5가지 두께에 대한 반향시간 값과 판재 두께 사이의 관계를 Fig. 7과 같이 나타내었고, 이를 선형회귀분석한 식 (3)과 같다.

$$y = 2.9641x + 0.0072 \quad (3)$$

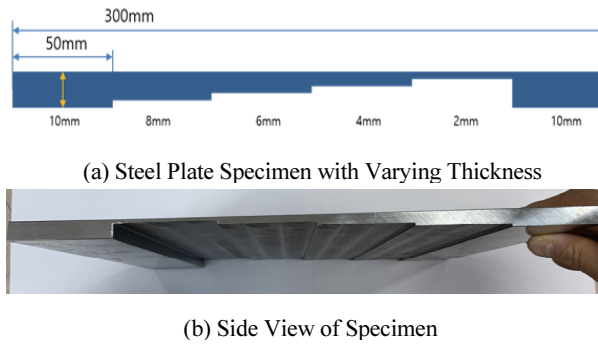


Fig. 5 Steel Specimen Details

Table 2 Experimental Data of Static Scanning

Thickness [mm]	2	4	6	8	10	Avg.	
Echo Time [μs]	Avg.	0.688	1.346	1.990	2.701	3.384	
	Std. (× 10 ⁻³)	4.84	10.77	6.76	5.17	4.22	
Ultrasonic Velocity [m/s]	Avg.	5813	5942	6029	5925	5911	5924
	Std.	40.6	47.2	20.4	11.3	7.4	77.4
Predicted Thickness [mm]	Avg.	2.05	4.00	5.91	8.01	10.04	
	Error (%)	2.3	-0.1	-1.6	0.1	0.4	

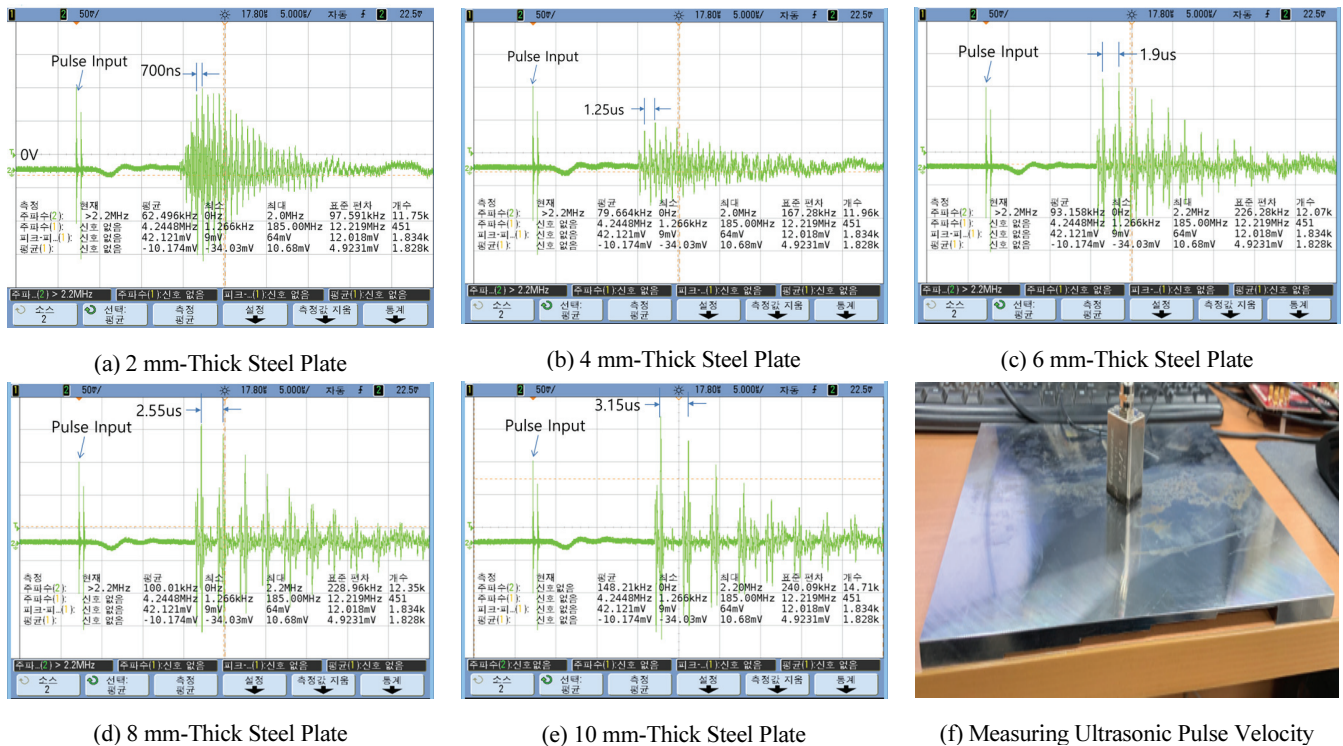


Fig. 6 Oscilloscope Signal for Varying Thickness

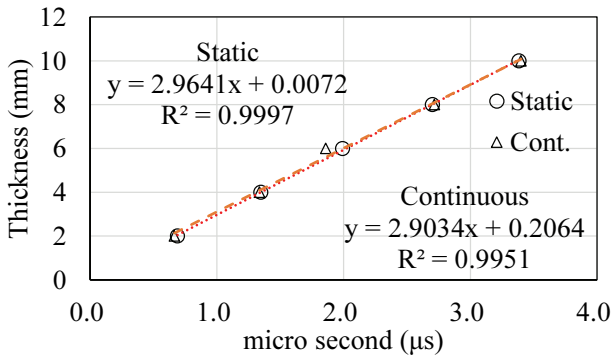


Fig. 7 Relations of Echo Time vs. Steel Plate Thickness

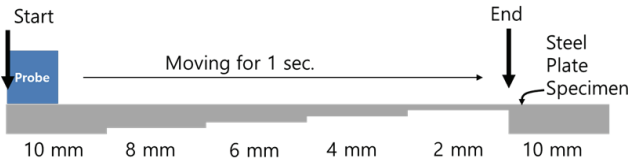


Fig. 8 Test for Continuous Scanning Method

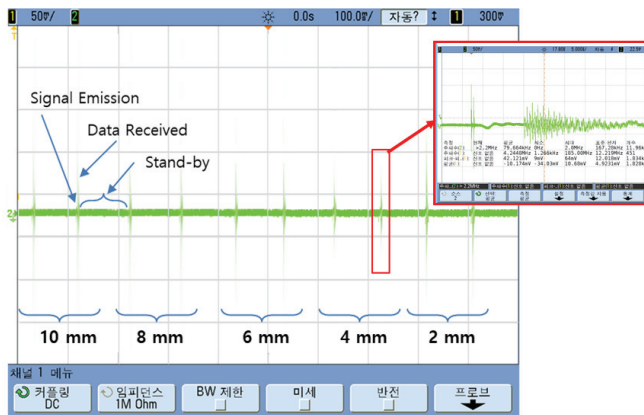


Fig. 9 Continuous Scanning Results

Fig. 7에 나타난 것과 같이 기초실험에서 나온 실험값(검은 색 동그라미)을 선형회귀분석한 식(빨간색 점선)은 결정계수 R^2 값은 99.97%으로 상당히 높은 모사율을 나타내었으며, 이 회귀분석식을 활용한 두께 추정 값은 높은 정확도를 나타내었다. 이러한 부분은, 데이터를 많이 축적할수록, 그리고 회귀 분석 모델을 개선함으로써 좀 더 높은 정확도를 나타낼 수 있을 것으로 예상된다.

3.3 연속 스캐닝 기법

강교량의 폐합부재를 빠른 시간 내에 검토하기 위해서는 넓은 면적을 한 번에 이동하며 검토하는 연속 스캐닝(Continuous Scanning) 기법이 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 8

Table 3 Experimental Data of Continuous Scanning

Thickness [mm]		2	4	6	8	10	Avg.
Echo Time [μs]	Avg.	0.665	1.335	1.859	2.718	3.401	
	Std. ($\times 10^{-3}$)	17.29	4.84	78.67	8.23	5.28	
Ultrasonic Velocity [m/s]	Avg.	6018	5991	6454	5888	5881	6046
	Std.	152.6	21.6	262.0	17.8	9.1	236.0
Predicted Thickness [mm]	Avg.	1.98	3.97	5.52	8.06	10.09	
	Error (%)	-1.1	-0.9	-8.0	0.8	0.9	

Table 4 Results Comparisons

Thickness [mm]		2	4	6	8	10	Avg.
Echo Time [μs]	Static	0.688	1.346	1.990	2.701	3.384	
	Cont.	0.665	1.335	1.859	2.718	3.401	
Ultrasonic Velocity [m/s]	Static	5813	5942	6029	5925	5911	5924
	Cont.	6018	5991	6454	5888	5881	6046

에 나타난 것과 같이 두께가 다른 판재의 위를 연속적으로 움직이며, 즉, 1초 동안 200 mm를 이동하며 각각 다른 두께의 판재를 스캐닝하여 두께의 변화를 추정하였다. 이를 위해 초음파 탐촉자의 동작을 100 ms당 1회 동작하도록 설정하여 1초 동안 총 10회의 스캔을 하도록 설정하였다. 그리고, 각 1회 동작 시에는 충분한 에코 수신 시간을 가지기 위하여 50 μs 동안 신호를 수신하도록 설정하였다. 시편의 두께가 얇은 경우에는 수신시간이 줄어들지만, 각 두께마다 충분한 시간의 여유를 두었다.

연속 스캐닝 테스트의 오실로스코프 결과를 Fig. 9에 나타내었고, 10회 측정된 결과를 Table 3에 나타내었다. Table 2에 나타난 정적 스캐닝의 결과와 유사한 결과를 나타내었고, 연속스캐닝에서도 두께가 증가할수록 표준편차가 낮아지는 결과를 얻었다. 연속 스캐닝의 데이터와 앞서 수행된 정적인 측정데이터와의 비교는 Table 4에 나타내었다. 수신 데이터 확인결과 1초 동안 총 10회 동작한 것으로 확인할 수 있었고, 각 동작에서는 앞서 설정한 것과 같이, 초음파 탐촉자에서 일정한 시간 간격을 가지고 작동하므로, 이동속도를 일정(200 mm/s)하게 움직일 수 있도록 하였다. 각각의 신호를 확인결과 앞서 측정되었던 정적 스캐닝의 초음파 반향 수신 시간과 동일한 수준의 시간을 획득할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 강교량의 폐합부재 등 시각적으로 점검이 어려운 강재 부재에 대해서 효율적으로 빠른 시간내에 광범위범위의 부식을 탐지하기 위한 목적으로 연구가 시작되었다. 효율적인 비파괴 점검법으로 초음파 속도법 활용 가능성을 검토하기 위한 실험을 진행하였다. 실험결과 아래와 같은 결론은 얻었다.

- 1) 초음파 속도법은 입사된 초음파가 반향되어오는 시간차를 이용해 매질의 두께를 측정할 수 있는 효과적인 방법으로, 특히 강재와 같은 균질한 재료에서 정확도가 높은 값을 도출하였다.
- 2) 두께가 2~10 mm로 다른 강재에 대해서 초음파 속도법을 활용한 결과 평균 6,211 m/s의 매질전파속도를 나타내었고, 이 값은 측정값의 회귀분석의 결정계수(R^2) 99.9%로 매우 높은 정확도를 나타내었다.
- 3) 약 200 mm/s의 속도로 이동하는 연속스캐닝 기법의 검증에서도 각각의 두께에 대한 정적 스캐닝의 결과와 동일한 결과를 얻을 수 있어, 대상 구조물에 대해 이동식으로 제작한다면 광범위한 부위를 효과적으로 점검할 수 있는 방법이 될 것이다.
- 4) 도출된 회귀분석 식을 이용하여 추후 부식팽창 또는 부식으로 인한 단면손실 등을 효과적으로 탐지할 수 있을 것으로 기대된다.

추후 연구에서는 온도변화에 따른 초음파 속도의 변화, 부식에 따른 두께변화 등을 고려한 보정법 또한 연구가 필요할 것으로 예상된다.

감사의 글

이 연구는 충남대학교에 의해 지원되었음.

References

1. Ahn, J. H., Nam, D. K., Lee, W. H., Huh, J., 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., 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., 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., 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., 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., 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.
6. Lee, H., Lee, B., Oh, K., 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.
7. Lee, M. J., Ahn, J. H., 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.
8. Kim, I., Chang, H. J., 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.
9. Kim, I., Lee, M., 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.
9. Kim, M. W., Oh, H., 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.
10. Korean Agency for Technology and Standards (KATS) (2018), Testing method for velocity of ultrasonic pulses to conclude compressive strength of concrete, KS F 2731.
11. KOSIS (2015), Status of the National Bridges and Tunnels in Republic of Korea, Korea Statistical Information Service, Korea.
12. Kwon, S. J., 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.
13. Yun, J., Paik, I., Cho, S., 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 : 11/09/2020

Revised : 11/23/2020

Accepted : 12/02/2020

요 지 : 본 연구는 강교량의 폐합부재 등 시각적으로 탐지하기 어려운 부위의 강재에 대한 손상을 탐지하기 위한 방법을 개발하기 위한 목적의 기초연구이다. 여러 비파괴 방법들 중에서 초음파 속도법을 활용하여 두께가 다른 시편에 대해서 초음파 속도법을 실시하여, 평균 매질내 전파속도를 도출하였고, 이를 활용하여 강제 부재에 대한 회귀분석을 실시하였다. 동일한 재료일 경우 회귀분석의 결과를 활용하면 다른 부재의 두께를 도출할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 광범위한 범위를 스캐닝하기 위해 200 mm/s로 이동하는 연속스캐닝 기법을 검토하였고, 두께가 변화는 부재의 두께를 효과적으로 예측할 수 있었다.

핵심용어 : 초음파, 부식, 점검, 연속 스캐닝
