

수중강판의 결함 및 열화 검출을 위한 탄성과 유한요소 시뮬레이션

우진호* · 나원배*

*부경대학교 해양공학과

Finite Element Simulation of Elastic Waves for Detecting Defects and Deteriorations in Underwater Steel Plates

Jinho Woo* and Won-Bae Na*

*Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Elastic wave 탄성과, Simulation 시뮬레이션, Underwater steel plate 수중 강판, Inverse analysis 역해석

ABSTRACT: This paper presents the results of finite element simulations of elastic wave propagation in an underwater steel plate and the verification of a proposed method utilizing elastic wave-based damage detection. For the simulation and verification, we carried out the following procedures. First, three-dimensional finite element models were constructed using a general purpose finite element program. Second, two types of damages (mechanical defects and deteriorations) were applied to the underwater steel plate and three parameters (defect location, defect width, and depth) were considered to adjust the severity of the applied damages. Third, elastic waves were generated using the oblique incident method with a Gaussian tone burst, and the response signals were obtained at the receiving point for each defect or deterioration case. In addition, the received time domain signals were analyzed, particularly by measuring the magnitudes of the maximum amplitudes. Finally, the presence and severity of each type of damage were identified by the decreasing ratios of the maximum amplitudes. The results showed that the received signals for the models had the same global pattern with minor changes in the amplitudes and phases, and the decreasing ratio generally increased as the damage area increased. In addition, we found that the defect depth was more critical than the width in the decrease of the amplitude. This mainly occurred because the layout of the depth interfered with the elastic wave propagation in a more severe manner than the layout of the width. An inverse analysis showed that the proposed method is applicable for detecting mechanical defects and quantifying their severity.

1. 서 론

해양구조물의 제작에 사용되는 강판(Steel plate)은 해양환경의 특수성으로 인해 보다 높은 구조적 성능이 요구된다. 하지만 예측된 해양환경이 실제역에서 상이하거나 설계과정에서 예상치 못한 외력이 발생할 경우에는 허용기준을 초과한 기계적 결함(Defect)과 열화(Deterioration)가 강판에 발생할 수 있다(Choung et al., 2011; Dowling and Burgan, 1998; Melchers, 2005). 따라서 해양에 설치되거나 사용 중인 철강 구조물은 지속적인 유지 보수가 필요하며 효율적인 유지보수를 위해서는 정기적인 또는 비정기적인 검사가 필요하다. 이 때 비정기적인 검사는 정기적인 검사로 판단할 수 없는 보다 복잡하거나 심각한 결함 또는 열화를 조사할 때 사용된다. 또한 구조물의 결함 및 열화가 이차적인 피해를 동반하는 경우에는 보다 세밀한 조사가 수행되어야 한다(Descamps and Baker, 1999). 예를 들면, 저장설비나 해양파이프라인에서는 결함이나 열화로 인한 일차적 구조적 손상이 저장 물

질의 누출과 같은 이차적인 환경피해로 연결될 수 있다.

비파괴검사는 손상(Damage, 결함과 열화를 포함)의 존재, 위치 및 정도를 정확히 파악하는 것을 목표로 하고 있으나, 특정방법으로 다양한 손상의 전반적인 정보를 취득하기는 어렵다(Na and Kang, 2006). 따라서 손상의 종류와 대상 구조 또는 부재의 특성, 환경조건, 경비와 시간을 고려하여 적절한 비파괴 검사법을 선택해야 한다(Onoufriou, 1999).

일반적으로 강판의 비파괴 검사법으로는 초음파를 기반으로 하는 방법이 주로 사용되는데 이는 여타의 방법에 비해 비교적 간단하고 비용이 저렴하기 때문이다. 초음파 기반 검사법 중에 유도초음파(Ultrasonic guided wave)를 기반으로 하는 방법(이하 유도초음파법)은 유도초음파의 장거리 전파 능력, 구석진 곳까지의 접근성 등으로 인해 최근 그 효율성이 점차적으로 검증되고 있다(Lee and Na, 2009). 그러나 종래의 초음파 검사법과는 달리 유도초음파법을 이용해서 얻어진 신호는 식별이 상대적으로 어려운 단점을 가진다. 따라서 유도초음파 기반의 신호를 분석

Received 28 August 2012, revised 27 May 2013, accepted 10 June 2013

Corresponding author Won-Bae Na: +82-51-629-6588, wna@pknu.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

하기 위해서는 강력한 분석 도구와 능력이 필요하다. 이는 유도파가 가지는 무한한 수의 모드(Mode)와 분산적인 특성에 기인한다. 따라서 물리적인 현상의 이해와 제안된 유도초음파 기반의 손상 정도 식별을 위해 수치적인 해석이 사용되고 있다(Woo et al., 2007).

유도초음파는 일반적으로 매질의 탄성 영역에서 전파되면 탄성파(Elastic wave), 선형파(Linear wave), 또는 선형탄성파(Linear elastic wave)라 불린다. 탄성파는 체적파(Bulk wave)와 유도파로 대별되고, 체적파는 P파 또는 S파로, 유도파는 매질의 기하학적 형상에 따라 판파(Plate wave), 원통유도파(Cylindrical guided wave) 등으로 분류된다(Woo and Na, 2009). 하지만 상세한 파의 분류가 요구되지 않은 경우 통상적으로 탄성파라 지칭된다.

유도초음파의 수치 해석 또는 시뮬레이션은 일반적으로 제안된 방법의 손상 식별 또는 재료의 특성을 확인하기 위해 사용되어 왔다. 예를 들어 일련의 연구들은 압전 진동자(Piezoelectric actuator)를 이용한 결합의 탐지에 초점을 맞추고(Dinkler et al., 2008; Ostachowicz et al., 2009), 다른 연구들의 경우 유한 요소법을 이용한 파 전파 해석에 초점을 맞추고 있다(Woo et al. 2007; Kim et al. 2008). 사용된 수치 시뮬레이션 방법으로는 유한요소법, 경계요소법, 준해석적 유한요소법, 동탄성 유한적분법 또는 분산원법 등이 있다(Kim et al. 2008). 상기의 연구들은 수치해석적인 방법의 개발과 응용을 포함한다.

이론적인 범주에서 재료의 특성분석과 손상 탐지는 출력된 신호를 기반으로 시스템을 묘사하거나 식별하기 때문에 역해석(Inverse analysis)이라한다. 그러나 대부분의 손상탐지에서는 출력신호와 입력신호를 모두 사용하여 시스템을 분석하기 때문에 엄밀히 따지면 준역해석(Semi-inverse analysis)이라 할 수 있다. 또한 대부분의 경우는 대상 구조물 또는 부재의 물성치가 시스템 인식 전에 파악된다. 따라서 수치 시뮬레이션에서 손상의 존재 가능성을 식별하는 것은 완전한 역해석은 아니다. 즉, 수치 시뮬레이션의 경우 매개의 물성치를 정의하기 때문에 실험적인 방법에 비해 보다 준역해석에 가깝다.

상기의 연구들에도 불구하고 수중 강판의 손상검출과 같이 유체-고체 결합 시스템의 유한 요소 시뮬레이션의 경우에 관련한 연구를 찾아보기 힘들다. 물론 그에 관련한 실험적인 연구와 다른 방법의 이론적, 수치적 연구가 존재하나 이 또한 극히 제한적이다(Wang et al., 2010; Kažys et al., 2006).

본 연구에서는 해양구조물의 검사단계에 적용되는 수중강판의 손상 검출을 위해 초기 연구를 목적으로 수중강판의 결합탐지 유한 요소 시뮬레이션을 수행하였다. 강판의 손상으로는 기계적인 결합과 열화를 고려하였으며, 세 가지 인자를 사용하여 결합과 열화의 위치 및 정도를 달리하였다. 사용된 인자는 손상의 위치(판의 상부와 하부), 손상 깊이와 폭이다. 3차원 유한 요소모델을 구축하였으며 모델링 및 해석을 위해 유한 요소 프로그램 ANSYS가 사용되었다. 제안된 방법은 경사입사법(Oblique incidence method)을 적용한 탄성파의 가진 및 수신법이며 사용된 입사각 20° 는 스넬의 법칙을 사용하여 결정되었다. 수신된 신호로부터 준역해석을 수행하여 손상의 존재와 정도를 식별하였고, 식별의 정도로부터 제안된 방법이 검증되었다.

2. 유한 요소 해석

유한요소법은 공학적인 문제의 해결에 주로 사용되는 수치적인 해석방법이다. 유한요소법을 이용한 파 전파 시뮬레이션과 같은 동적해석의 경우에는 요소 크기(Element size)와 시간증분(Time increment)이 중요하다. 그러므로 정확한 동적 응답을 얻기 위해 적절한 요소 크기와 시간증분의 선정이 필요하다. 본 연구에서는 Woo et al.(2007)이 제시한 세 가지 조건식을 만족하도록 시간 증분과 요소의 크기를 선정하였다. 해석에서 적용된 시간증분은 $1.27E-7\text{sec}$ 이고 요소의 크기는 최대 1mm이하이다.

3차원 유한 요소 모델을 Fig. 1과 같이 구성하였다. 강판의 상부와 하부에 위치한 물의 깊이는 상부층의 경우 50mm, 하부의 경우 15mm이다. 강판의 배치는 Fig. 1과 같으며 판의 길이는 160mm, 폭은 15mm이다. 손상은 모델의 중앙에 위치하는데 z-축 방향으로 10mm의 길이를 가지며 폭과 깊이의 크기는 결합과 열화에 따라 변화를 주었다. 본 연구에서는 2탐촉자법(Pitch-catch mode)를 사용하였으며 가진점(Excitation point)은 모델의 중앙부에서 좌측으로 50mm, 수신점(Receiving point)은 우측으로 50mm 떨어진 거리에 위치한다. 수신부와 가진부의 경우 θ 의 각도로 기울어지게 모델링되었다. 여기서 강판에서 종파가 반사되고 전단파만 강판을 통해 전달되는 각도인 20° 를 사용하였다(Woo and Na, 2010).

경계면에서 반사되는 파의 영향을 피하기 위해 유한요소 모델의 후면, 양 측면과 바닥면에 비반사 경계조건(Non-reflective boundary condition)을 사용하여 반사파의 영향을 제거하였다. 비반사 경계조건은 선택된 요소의 외부면에 무한 영역을 모델링하여 반사파를 방지한다. 유한요소 시뮬레이션 상에서 비반사 경계조건은 무한 영역으로 정의된다. 이는 본 유한 요소 시뮬레이션 상에서 무한 영역을 따라서 주변 유체(물)가 양 측면과 바닥면에 무한하게 존재하는 것으로 모델링되었음을 의미한다. 그리고 강판의 양단을 고정하여 해석을 수행하였다. 이는 유체의 경우 가진신호가 직접적으로 영향을 미치는 부분이므로 경계조건에 의한 반사가 발생하기 때문에 유체의 주변부는 비반사 경계조건을 사용하였으며 가진신호의 영향이 상대적으로 적은 강판의 양단을 고정조건으로 해석을 수행하였다.

본 연구는 실제 초음파 탐촉자를 이용한 결합탐지를 기초로 유한요소 시뮬레이션을 수행하였다. 따라서 가진부와 수신부의 경

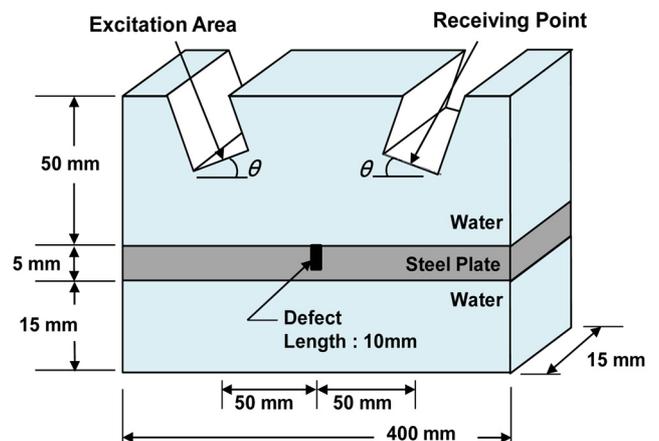


Fig. 1 Three-dimensional model

계조건으로 가진영역은 실제 원형의 탐촉자와 유사하게 반원형으로 262개의 노드를 선정하였다. 수신영역의 경우 경계조건을 부여하지 않고 수신영역의 중앙부에 수신점을 선정하여 응답을 수신하였다. 실제 탐촉자를 기반으로 가진점에서 강제 변위를 발생시키고 전파된 신호를 수신점에서 취득하여 손상의 유무와 경중을 판별하였다. 또한 해석시간을 줄이기 위해 전면부에 대칭 조건을 사용하여 해석을 수행하였다.

해석에서 사용된 강판과 물의 물성치는 Table 1과 2에 나타내었다. 8개의 노드를 가지는 솔리드 요소(Solid element)를 사용하여 강판과 상하부에 존재하는 물을 모델링하였다. 사용된 솔리드 요소는 탄성고체와 탄성유체의 묘사에 탁월한 요소이다. 본 연구에서는 강판의 경우 탄성재료로 상하부의 물은 탄성유체로 가정하였으며 유체의 흐름과 같은 외력은 고려하지 않았다.

Table 3과 같이 손상을 선정하였다. 본 연구에서는 수신과 가진에 각각 다른 탐촉자를 사용하는 2탐촉자법으로 유한요소 모델링을 수행하였다. 2탐촉자법은 무결함 상태의 수신신호를 결함상태의 수신신호와 비교하여 결함을 판별하는 기준기반(Baseline-based) 방법으로 손상이 없는 기준 상태인 No-defect를 포함한다. Fig. 2와 같이 모든 손상은 중앙선을 중심으로 대칭으로 존재한다고 가정하였다. 손상의 위치에 따른 응답의 차이를 알아

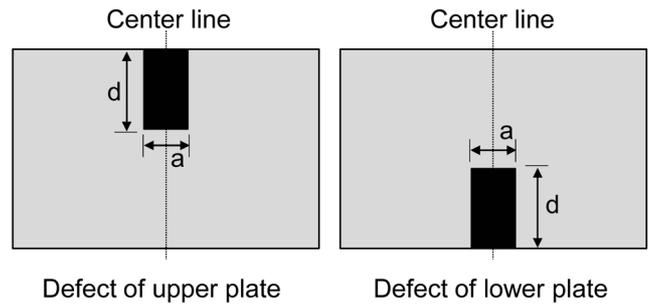


Fig. 2 Layout of damages

보기 위해 강판의 상하부에 동일한 손상을 나타내었다. U는 강판의 상부에 존재하는 손상을, L은 강판의 하부에 존재하는 손상을 나타내었다. 결함의 길이는 모두 10mm로 동일하며 결함면적에 따른 영향을 알아보기 위하여 Table 3에 각각의 결함의 단면적을 도식하였다. 이는 동일면적의 결함의 응답을 비교하여 결함의 폭과 깊이에 따른 영향을 알아보기 위함이다.

기계적인 결함을 나타내기 위해 모델링 상에서 결함부의 요소를 물의 물성치를 가지도록 치환하여 모델링하였다. 즉, 충격이나 피로 등의 하중 조건에 의해 강판에 마모나 기계적 균열 등이 발생하고 점차적으로 강판의 일정 부위에 물이 채워진 것으로 모델링하였다. 이때 기계적인 결함의 크기 변화에 따른 응답의 변화를 알아보기 위해, Fig. 2와 같이 결함의 폭(a)와 깊이(d)를 각각 1과 3mm로 달리하였다. Table 3에서 앞의 대문자 U와 L은 결함의 위치를 의미하며, 첫 번째 숫자인 1과 3은 결함의 폭, 두 번째 숫자인 1과 3은 결함의 깊이를 나타낸다. 예를 들어 U11은 강판의 상부에 폭이 1mm이고 깊이는 1mm인 손상을 나타내며 L31의 경우 강판의 하부에 폭이 3mm, 깊이는 1mm인 손상을 나타낸다.

아울러, 열화에 의한 손상을 나타내기 위해 모델링 상에서 열화가 발생한 부분의 탄성계수를 기존 탄성계수의 1/10인 20 GPa로 감소시켜 모델링을 수행하였다. 이때 열화 된 부분의 깊이는 1mm로 고정하였는데 이는 열화의 경우 표면 근처에 나타나는 것으로 간주하였기 때문이다. 열화에 의한 손상은 대문자 D로 나타내고, 폭은 3, 5mm의 두 가지 경우로 강판의 상부와 하부에 각각 적용하였다. 예를 들어 UD3의 경우 강판의 상부에 폭 3mm의 열화가 발생한 것을 나타낸다. Table 3는 판의 상하부에 3mm와 5mm의 폭을 가지는 열화에 의한 손상을 나타낸다.

가진 신호는 Fig. 3과 같이 유도초음파 검사에 빈번히 사용되는 6 사이클(Cycle)의 Tone-burst Gaussian 신호를 사용하였다. 신호의 지속시간은 구조 응답을 충분히 수신할 수 있는 0.12msec로, 주파수는 전파거리를 극대화하기 위해 저주파수인 50kHz로 고정하였다. 일반적으로 손상검사에 사용되는 주파수 대역은 대상이 되는 재료의 물성치와 주파수에 따른 분산을 고려한 값이 사용된다. 본 연구에서 Woo et al.(2007)이 제시한 세 가지 조건식을 만족하는 시간중분과 수치해석의 안정성과 강판의 물성치를 고려하여 50kHz의 주파수를 사용하였다. Fig. 4는 수신영역의 배치를 나타낸다. 수신점에서 응답을 얻기 위해 실제 초음파 실험의 2탐촉자법과 동일하게 수신면에 수직인 Y' 방향의 변위(UY')를 취득하였다.

Table 1 Material properties of steel

	Steel
Young's modulus (GPa)	200
Poisson Ratio	43
Density (kg/m ³)	7850
Longitudinal velocity (m/sec)	5850
Shear velocity (m/sec)	3230

Table 2 Material properties of water

	Water
Bulk modulus (GPa)	2.2
Density (kg/m ³)	1000
Longitudinal velocity (m/sec)	1480

Table 3 Damage description

Defect location	Defect type	Defect case	Defect area
No-defect	N/A	No-defect	N/A
U (upper plate)	Mechanical defect widths (1, 3mm) depths (1, 3mm)	U11	1mm ²
		U13	3mm ²
		U31	3mm ²
		U33	9mm ²
	Deterioration widths (3, 5mm)	UD3 UD5	3mm ² 5mm ²
L (lower plate)	Mechanical defect widths (1, 3mm) depths (1, 3mm)	L11	1mm ²
		L13	3mm ²
		L31	3mm ²
		L33	9mm ²
	Deterioration widths (3, 5mm)	LD3 LD5	3mm ² 5mm ²

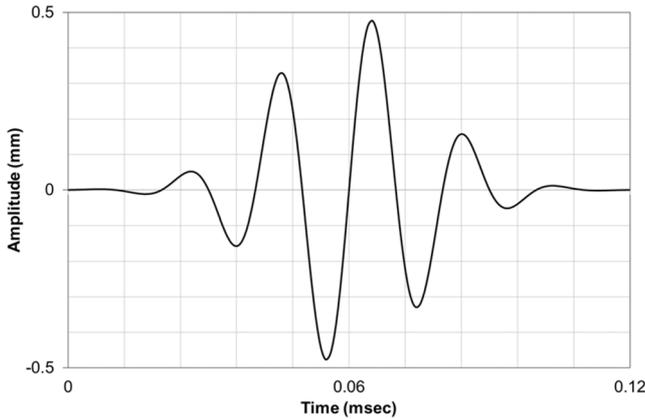


Fig. 3 Excitation signal

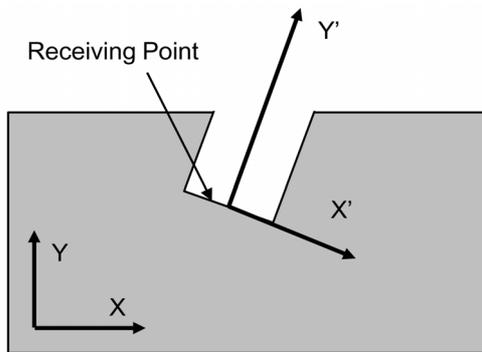


Fig. 4 Layout of receiving point

3. 결과 및 해석

Fig. 5, 6과 7은 3차원 모델의 손상에 따른 UY' 결과를 나타낸다. 모든 손상 결과에서 파의 도착시간은 5.69E-5sec로 동일하게 나타났다. 손상에 의해 발생하는 파의 전달 지연 현상은 없는 것으로 보인다.

Fig. 5는 상부손상의 결과를 나타낸다. 수신신호의 형상은 유사하며 손상의 폭과 깊이에 따라서 수신신호의 위상차는 나타나지 않지만 진폭이 다소 달라진다. Fig. 6는 하부손상의 결과를 나타낸다. Fig. 5와 같이 수신신호의 형상은 유사하며 손상의 폭과 깊이에 따라서 수신신호의 진폭이 달라짐을 알 수 있다. Fig. 7은 열화의 위치와 폭에 따른 수신신호를 나타낸다. 수신신호의 형상은 유사하나 열화의 폭에 따라 수신신호 진폭이 달라짐을 알 수 있다.

Fig. 8은 상부의 기계적인 손상에 따른 진폭의 변화를 면밀히 살펴보기 위해 응답으로 얻어진 신호의 최대치를 선택하여 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 5와 달리 진폭의 감소를 확인할 수 있다. 손상의 크기 변화에 따라 최대 진폭의 값은 점차 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한 손상이 심해질수록 최대 진폭 값이 급격히 줄어드는 것을 알 수 있다. 하부손상과 열화에 따른 진폭의 변화도 Fig. 8과 유사하게 나타났다.

이상의 해석결과를 면밀히 관찰하기 위해서, 기계적 결함의 최대 진폭 변화율을 Table 4와 Fig. 9에 백분율로 나타내었다.

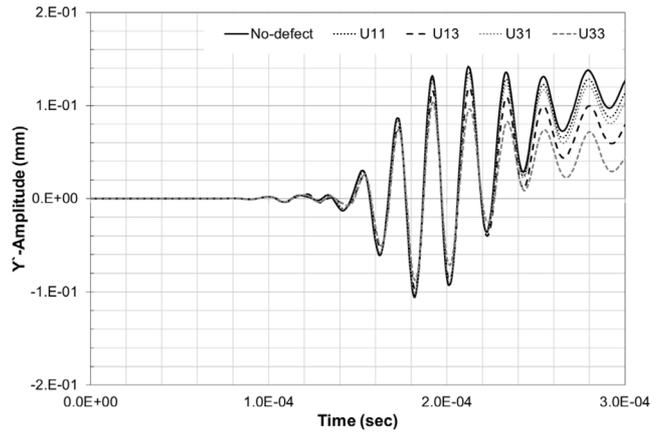


Fig. 5 UY': No-defect, U11, U13, U31, and U33

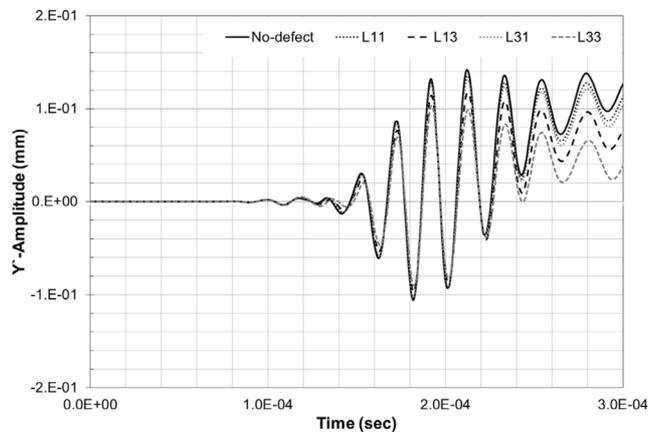


Fig. 6 UY': No-defect, L11, L13, L31, and L33

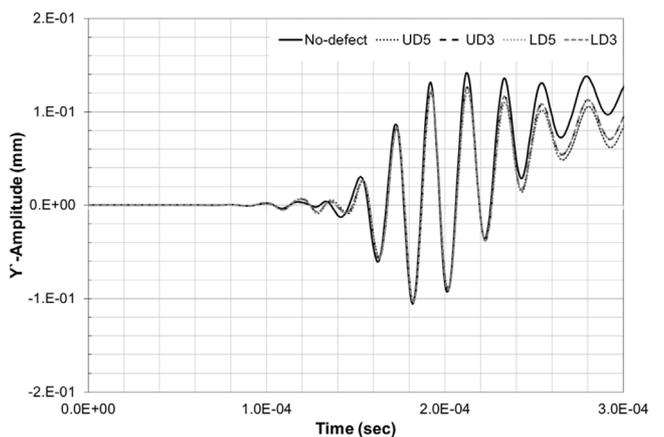


Fig. 7 UY': No-defect, UD3, UD5, LD3, and LD5

결함면적은 손상의 깊이와 폭을 곱하여 얻어짐으로, 먼저 결함면적에 따른 Fig. 9의 결과를 비교해 보자. 결함면적은 Table 4에 나타낸 바와 같이 U11과 L11의 경우 1mm²이고, U13, U31, L13과 L31은 3mm²이며 U33과 L33의 경우 9mm²이다. Fig. 9에서 결함면적이 가장 큰 U33과 L33이 최대 진폭감소율을 나타낸다. 그러나 U13, U31, L13과 L31을 비교하면 3mm²의 결함면적

을 가진다는 점에서 동일하나 최대진폭의 감소율은 다르게 나타난다. 즉, 3mm의 결함깊이가 1mm의 결함깊이보다 큰 진폭의 감소를 보인다. 따라서 결함의 폭보다는 결함 깊이의 증가가 수신신호 진폭변화에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있다. 상기의 결과는 탄성파의 전파로 설명이 가능하다. 즉, 파가 전파하

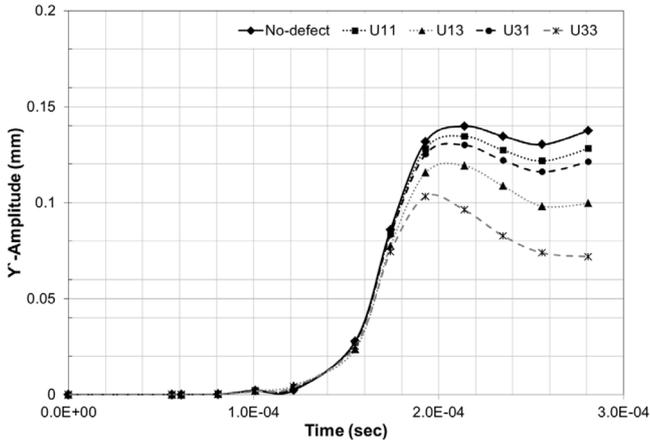


Fig. 8 Picking of maximum amplitude value for each defect UY': No-defect, U11, U13, U31, and U33

Table 4 Mechanical Defect description

Defect Case	Defect area	Maximum Amplitude (mm)	Decreasing Ratio of Amplitude (%)
No-defect	N/A	0.1416	0
U11	1mm ²	0.1353	4.45
U13	3mm ²	0.1192	15.82
U31	3mm ²	0.1299	8.26
U33	9mm ²	0.1033	27.05
L11	1mm ²	0.1350	4.66
L13	3mm ²	0.1169	17.44
L31	3mm ²	0.1308	7.63
L33	9mm ²	0.1030	27.26

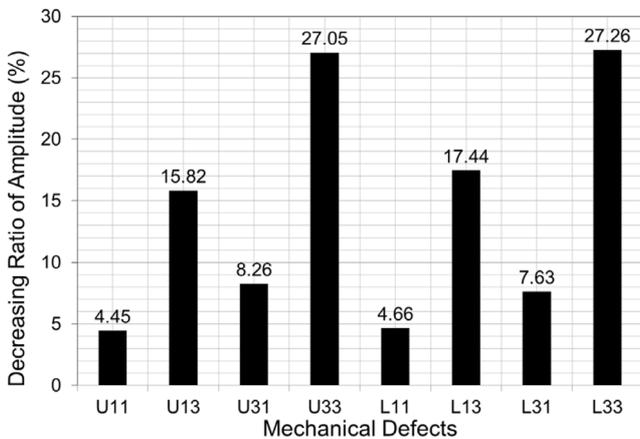


Fig. 9 Decreasing ratios of the maximum amplitude of the mechanical defects

Table 5 Deterioration description

Defect Case	Defect area	Maximum Amplitude (mm)	Decreasing Ratio of Amplitude (%)
No-defect	N/A	0.1416	0
UD3	3mm ²	0.1260	11.02
UD5	5mm ²	0.1215	14.19
LD3	3mm ²	0.1262	10.88
LD5	5mm ²	0.1215	14.19

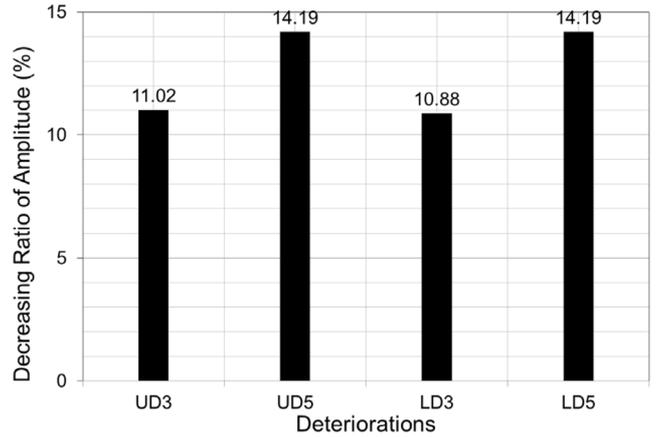


Fig. 10 Decreasing ratios of the maximum amplitude of the deteriorations

는 경우 결함의 폭에 비해 결함의 깊이가 탄성파에 영향을 미치는 영향이 크다. 그리고 강판의 상하부 결함에 따른 진폭의 감소율을 비교해서는 큰 차이점은 나타나지 않았다. 기계적 결함에 따른 최대 진폭 감소는 L33에서 발생하였으며 감소율은 27.26%이다. 결함의 상하 위치에 따른 진폭 변화의 최대는 U13과 L13의 경우에 1.6%이며 최소는 0.21%이다.

Table 5와 Fig. 10는 3차원 모델의 상하부 강판의 열화에 따른 UY'의 결과를 나타낸다. 앞서 언급한 것과 같이 UD3은 3mm의 폭과 1mm깊이를 가지는 강판의 상부 열화를 UD5는 5mm의 폭과 1mm의 깊이를 가지는 강판의 상부 열화를 나타낸다. 또한 LD3과 LD5는 위와 대응하는 하부 열화를 나타낸다. Fig. 10에서 수신신호는 기계적 손상의 결과와 유사한 경향을 나타낸다. 즉, 열화의 위치에 진폭의 변화는 미비한 반면 열화의 폭에 진폭의 변화는 민감하게 변화한다. 여기서 주목할 것은 열화의 경우 깊이의 변화는 없다. 즉, 1mm로 깊이를 고정하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 수중 강판의 결함 및 열화 검출을 위한 초기 연구를 목적으로 수중강판의 결함탐지 탄성과 전파 유한요소 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위해, 첫째로 수중강판을 상용 유한 요소 프로그램인 ANSYS를 사용하여 3차원으로 모델링하였다. 이때 비반사 경계조건과 2탐촉자법이 사용되었다. 둘째로 강판의 상하부에 기계적인 결함과 열화를 도입하였으며 위치,

폭과 깊이를 인자로 선정하여 다양한 결함 및 열화를 생성하였다. 셋째로 탄성파는 경사입사법을 이용하여 20°의 경사를 가지도록 가진되었으며 수신점에서 각각의 결함에 따른 변위를 수신하였다. 또한 수신된 시간영역의 신호로부터 최대진폭을 측정하고 이를 분석하였다. 마지막으로 결함의 존재와 크기에 따라 최대 진폭의 감소율을 비교하였다. 수치 시뮬레이션 결과로부터 기계적인 결함과 열화가 존재하는 경우 수신신호의 진폭의 감소가 일관적인 경향을 가지고 발생하는 것을 알 수 있었다. 이들 경향을 살펴보면, 먼저 결함의 위치에 따른 최대진폭의 변화는 1.6% 이내의 차이를 나타내어 수신신호에 따른 결함 및 열화의 위치를 식별하기는 어려운 것으로 판단된다. 반면에 결함 및 열화 면적의 증가에 따라 진폭감소율이 증가함으로 수신신호에 따른 결함 및 열화의 정도를 검출할 수 있다. 참고로 최대 감소율은 L33의 경우 27.26%이다. 여기서 주목할 것은 동일한 결함면적을 가진 결함의 경우 결함의 깊이가 폭보다 진폭감소에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다. 이는 2탐촉자법의 특성상 파의 전파 방향에 직각인 결함의 깊이가 파의 전파에 미치는 영향이 크기 때문이다. 이상의 결과로부터 제안된 방법은 손상의 위치 식별은 용이치 못하나 결함의 정도를 검출하기에는 적절한 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2012학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(PK-2012-0540).

REFERENCES

- Choung, J., Sim, C.S., Kim, K.S., 2011. Plasticity and Fracture Behaviors of Marine Structural Steel, Part II: Theoretical Backgrounds of Fracture. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 25(2), 92-100.
- Descamps, B., Baker, M.J., 1999. Reliability-based Methods in the Inspection Planning of Fixed Offshore Steel Structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 52(1), 117-131.
- Dinkler, D., Kowalsky, U., Schuster, K., 2008. Damage detection with piezoceramic actuators in thin steel structures. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 15(3-4), 269-275.
- Dowling, P.J., Burgan, B.A., 1998. Steel Structures in the New Millennium. *Journal of Constructional Steel Research*, 46(1-3), 34.
- Kažys, R., Mažeika, L., Barauskas, R., Raišutis, R., Cicėnas, V., Demčenko, A., 2006. 3D Analysis of Interaction of Lamb Waves with Defects in Loaded Steel Plates. *Ultrasonics*, 44, e1127-e1130.
- Kim, J.T., Woo, J., Na, W.B., 2008. Finite element simulation of two-point elastic wave excitation method for damage detection in concrete structures. *Russian Journal of Non-destructive Testing*, 44(10), 719-726.
- Lee, J., Na, W.B., 2009. Numerical Simulation of Guided Ultrasonic Waves for Inspecting Epoxy Thickness in Aluminum-Epoxy-Aluminum Adhesive Plates. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 23(6), 117-123.
- Melchers, R.E., 2005. The Effect of Corrosion on the Structural Reliability of Steel Offshore Structures. *Corrosion Science*, 47(10), 2391-2410.
- Na, W.B., Kang, D.B., 2006. Effect of Surface Condition and Corrosion-Induced Defect on Guided Wave Propagation in Reinforced Concrete. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 20(1), 1-6.
- Onoufriou, T., 1999. Reliability Based Inspection Planning of Offshore Structures. *Marine Structures*, 12(7-8), 521-539.
- Ostachowicz, W., Kudela, P., Malinowski, P., Wandowski, T., 2009. Damage localisation in plate-like structures based on PZT sensors. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(6), 1805-1829.
- Wang, X., Tse, P.W., Mechefske, C.K., Hua, M., 2010. Experimental Investigation of Reflection in Guided Wave-based Inspection for the Characterization of Pipeline Defects. *NDT&E International*, 43(4), 365-374.
- Woo, J., Na, W.B., 2009. Finite Element Simulation of Elastic Waves for Detecting Anti-symmetric Damages in Adhesively-Bonded Single Lap Joint. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 23(3), 124-130.
- Woo, D., Na, W.B., 2010. Mechanically Fabricated Defects Detection on Underwater Steel Pipes using Ultrasonic Guided Waves. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 24(1), 140-145.
- Woo, J., Na, W.B., Kim, J.T., Cho, H.M., 2007. Finite Element Simulation of Elastic Wave Propagation in a Concrete Plate-Modeling and Damage Detection *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 21(6), 26-33.