

# 초대형 부유식 해상구조물의 초기 설계를 위한 설계차트 개발

## Development of a Design Chart for the Initial Design Stage of Very Large Floating Structures

지광섭\* · 김진균\*\* · 이승오\*\*\* · 이필승\*\*\*\*

Zi, Goangseup · Kim, Jin Gyun · Lee, Seung Oh · Lee, Phill-Seung

### Abstract

We developed a design chart for very large floating structures through intensive hydroelastic analysis. Using this chart, one can predict the hydroelastic response of very large floating structures preliminarily at design stage without the cost-demanding hydroelastic analysis. This paper presents two new design charts based on the theory of VLFS. The purpose of the first design chart is to determine RAOs of the maximum longitudinal stress of VLFS considering properties of waves and structures. The design chart I can be applied to any sizes of VLFS in same aspect ratios and dimensionless stiffness parameters. The second design chart is developed to take into account the actual wave condition by using the Bretschneider spectrum with Beaufort sea state.

**Keywords :** VLFS, design chart, hydroelastic analysis, wave spectrum, spectrum analysis

### 요 지

본 논문에서는 대규모 유탄성 해석을 통해 초대형 부유식 해상구조물의 설계 차트를 개발했다. 초기 설계단계에 본 차트를 이용해서 고비용의 유탄성 해석을 사용하지 않고도 초대형 부유식 해상구조물의 유탄성 거동을 예측이 가능하다. 본 논문에서는 두 가지 종류의 설계차트 I, II을 개발하여 제시하였다. 설계차트 I은 특정 주파수의 파랑에 대한 구조물의 최대응력 응답진폭함수를 얻을 수 있도록 개발되었다. 설계차트 I의 경우 동일한 변장비와 무차원 구조강성계수를 갖는 모든 구조물에 적용이 가능하다. 설계차트 I과 파랑스펙트럼의 적분을 통해 설계차트 II를 개발하였으며, Beaufort 풍력급에 따른 Bretschneider 스펙트럼을 적용해 해상의 환경요인을 고려하도록 구성되었다.

**핵심용어 :** 초대형 부유식 해상구조물, 설계차트, 유탄성 해석, 파랑스펙트럼, 스펙트럼 해석

### 1. 서 론

초대형 부유식 해상구조물(Very Large Floating Structure; VLFS) 기술은 해상공간의 친환경 개발 및 이용성을 향상시킬 것으로 기대되는 차세대 해양항만기술로서, 해상공항, 마리나 리조트, 부유식 항만, LNG 플랜트, 방파제 및 선박접안시설 등에 광범위하게 적용될 수 있다. VLFS 개발에 관한 대표적인 연구로는 MOB 프로젝트(ONR, 1997~2000), MHP 프로젝트(NFESC, 1998~2004), 메가 프로젝트(TRAM, 1995~2001) 등이 있으며 주로 일본과 미국을 중심으로 연구가 진행되어 왔다. 국내에서는 해양수산부의 지원으로 한국해양연구원이 1999년 이후 연구를 진행하고 있으며, KAIST에서는 2009년 이후 모비일 하버 프로젝트를 진행하고 있다(해양수산부, 2008; KAIST, 2009).

VLFS에 작용하는 하중은 크게 파랑하중, 계류력, 상재하

중 등으로 분류할 수 있다. 이 중 파랑하중은 VLFS에 인접한 유체의 운동과 VLFS의 변형의 상호작용에 기인한다. 파랑하중은 시간에 따라 그 크기가 끊임없이 진동하는 파로서 이에 의한 구조물의 변위 또는 변형도 동적인 특성을 가진다.

VLFS의 해석 기법에 대한 연구는 1980년대에 시작되었다(Ando 등, 1983; Bishop 등, 1983). 이 시기의 연구는 부유구조물의 진동응답특성 해석을 위해 부가질량과 감쇠력의 개념을 도입하여 유체와 부유구조물 간의 상호작용을 간접적으로 고려하였다. 상기한 방법은 구조물이 강체운동을 하거나 구조물의 운동이 유체장에 미치는 교란이 2차원에 근사할 경우에 타당하지만, 부유구조물의 규모가 커질수록 이러한 효과를 적절하게 반영하는 것이 어렵다. 이후 포텐셜이론을 이용해 국부적 진동응답에 의한 교란을 직접 평가하는 방법이 제시되었다(Webster 등, 1994; 이동환 등, 2001).

\*정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 부교수 · 공학박사 (E-mail : g-zi@korea.ac.kr)

\*\*정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정 · (현)한국과학기술원 박사과정 (E-mail : simpleis@korea.ac.kr)

\*\*\*정회원 · 홍익대학교 건설도시공학부 조교수 · 공학박사 (E-mail : seungoh.lee@hongik.ac.kr)

\*\*\*\*정회원 · 한국과학기술원 해양시스템공학과 조교수 · 공학박사 (E-mail : phillseung@kaist.ac.kr)

이 외에도 다양한 형태의 VLFS의 해석에 관한 연구를 찾아볼 수 있다. VLFS의 유탄성 거동에 관한 준해석적인 해를 구하기 위한 연구(Andrianov, 2005)도 있으며, 국내에서는 김병완 등(2006, 2008)에 의해 부유식 구조물의 접합부 형태와 모듈 형상에 따른 기초적인 거동 해석 연구가 수행된 바도 있다.

부유 구조물의 크기가 작은 경우는 구조물의 변형이 작은 것으로 가정해서 강체의 진동으로 모사할 수 있지만, VLFS의 높이에 비해 길이가 증가함에 따라 VLFS의 동특성은 강체의 동특성에서 점점 멀어지게 된다. 부유식 구조물이 요동이 없는 정수에 의해 지지되는 상황을 가정할 때 해당 구조물의 변형은 탄성지지된 보로 근사할 수 있으며, 구조물의 휨 강성과 탄성지지력의 조합으로 표현되는, 탄성지지 보의 특성길이(characteristic length,  $\lambda_c$ )를 이용해서 구조물 상의 한 점에 지지된 단위하중에 의한 변형의 영향을 측정할 수 있다(Suzuki, Yoshida, 1996). 최근 연구결과에 의하면 100 m 길이의 사각 바지형 구조물의 해석 결과 파랑의 길이( $L_w$ )가 100 m인 파랑주기 8초 이상에서는 강체거동과 연성체거동의 차이가 분명하게 나타났다. 일반적으로 사용되는 VLFS의 길이 대 높이 비가 50:1 이상인 것을 감안할 때 VLFS의 설계 및 해석에서는 유탄성해석이 필수적이다(ISSC, 2006; 지광습 등, 2008).

VLFS의 유탄성 거동분석을 위해서는 구조물의 동특성과 유체의 동특성, 상호작용에 따른 동특성의 교란 등을 동시에 분석해야 하며, 상당한 해석 시간과 비용이 소요된다. 해석에 소요되는 계산 시간을 줄이기 위해 구조물의 고유치 벡터를 기저로 하여 변위계를 구성하는 것이 일반적으로 사용된다. 이와 같은 기법은 내진 관련 연구 등에서도 채택되고 있지만, 그럼에도 불구하고 주변 유체장까지 동시에 해석해야 하는 관계로 동일한 자유도를 가지는 일반적인 구조물의 해석 시간과 비교해서 약 2~3배 정도의 시간이 필요하다. 더욱이 다양한 방향에서 진입하는 입사파의 영향도 고려해야 하기 때문에, 해석 비용은 입사파 수에 비례해서 추가적으로 증가하게 된다.

VLFS의 설계는 전술한 구조적 특성 때문에 유탄성 해석 절차가 필요하지만, 해석에 필요한 비용과 시간이 상대적으로 커서 유연하고 신속한 설계 진행에 크게 장애가 되고 있다. 본 연구에서는 초기 설계 단계에서 유탄성 해석을 하지 않고도 VLFS의 유탄성 거동의 정보를 얻을 수 있도록 설계차트를 개발하였다. 본 설계차트를 개발하기 위해 면밀한 이론적인 근거에 기반한 무차원 공간에서 VLFS를 정의하고, 이에 대한 대규모 유탄성 해석을 통해 설계차를 개발하였다.

## 2. VLFS의 유탄성 거동 및 설계

### 2.1 유탄성 거동의 해석방법

유탄성 거동의 해석의 핵심은 유체와 구조체의 상호작용을 해석하는 것이다. 구조체에 인접한 유체는 유체동역학에 의해 지배되며, 여기서는 비점성, 비압축성, 비회전성 유체를 가정한 선형 포텐셜 이론을 사용한다(Newman, 1994). 유체의 포텐셜은 입사파의 포텐셜  $\Phi_I$ , 산란파의 포텐셜  $\Phi_S$ , 방사파의 포텐셜  $\Phi_R$ 의 합으로 표현된다.

$$\Phi = \Phi_I + \Phi_S + \Phi_R \quad (1)$$

여기서, 방사포텐셜은 구조체의 움직임에 의해 생성되는 포텐셜을 의미하며, 변위계를 구성하는 각 기저벡터가 해당 포텐셜을 생성한다. 유체 포텐셜은 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

- (a) Laplace 방정식 :  $\nabla\Phi^2 = 0$
- (b) 자유수면 경계조건( $z=0$ ): 수면에서 압력이 없음
- (c) 구조물 경계조건: 구조물의 경계면에서는 구조물의 속도와 유체의 속도는 동일
- (d) 바닥면 경계조건: 바닥면에서 유체속도가 0
- (e) 방사조건: 유체 파는 외해로 방사되며 다시 되돌아오지 않음

위의 조건을 이용하면 구조체 표면에 작용하는 선형화된 압력  $p$ 를 다음과 같이 표현할 수 있다(Reza 등, 2006).

$$p = -\rho g z - \rho \partial\Phi/\partial t \quad (2)$$

$z$ 와  $t$ 는 각각 연직 방향 좌표와 시간,  $\rho$ 는 단위질량,  $g$ 는 중력가속도를 의미한다. 식 (2)의 압력을 이산화 시키면 다음과 같은 구조체 표면의 절점력  $F$ 와 모멘트  $M$ 을 얻을 수 있다.

$$F = \iint_s p n \, dS \quad (3)$$

$$M = \iint_s p (r \times n) \, dS \quad (4)$$

여기서,  $n$ 는 구조체 표면 법선벡터,  $r$ 은 모멘트 팔길이를 의미하는 위치벡터이다. 전술한 조건들과 식 (3)과 (4)의 절점력 및 모멘트를 구조체의 이산화된 진동 방정식과 조합하면 다음과 같은 이산화 방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{j=1}^N [-\omega^2 (m_{pq} + a_{pq}) + i\omega (b_{pq} + d_{pq}) + (c_{pq} + k_{pq})] \bar{q}_p = F_p^{\text{ext}} \quad (5)$$

$m_{ij}$ ,  $d_{ij}$ ,  $k_{ij}$ 는 이산화된 구조질량, 구조감쇠, 구조강성,  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$ ,  $c_{ij}$ 는 각각 부가질량(added mass), 감쇠(damping), 유체

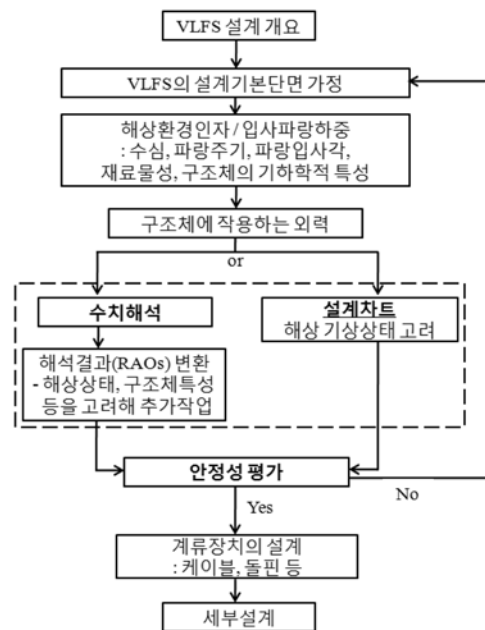


그림 1. VLFS의 설계절차

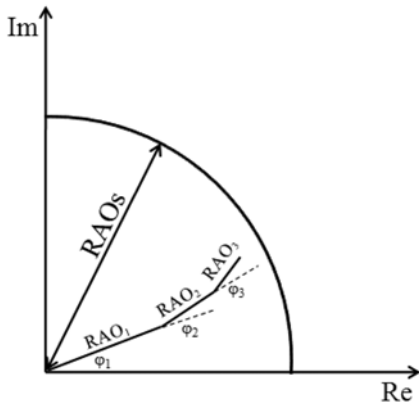


그림 2. 복소 공간에서 표현된 응답진폭값(RAO)

정역학(hydrostatic) 계수,  $\bar{q}_i$ 는 구조체 변위계의 기저 벡터의 크기를 의미한다. 즉, 구조체의 고유벡터를 기저벡터로 채택할 경우,  $\bar{q}_i$ 는 각 고유벡터의 크기가 되고, 이 경우 구조물의 변위는 다음과 같이 표현된다.

$$u_i = \sum_{p=1}^{\infty} \bar{u}_p(x,y,z) \bar{q}_p \quad (6)$$

여기서,  $\bar{u}_p(x,y,z)$ 는  $p$ 차 고유벡터를 의미한다.  $p=1$ 부터까지는 강제운동에 해당한다. 현실적으로 무한대치의 고유벡터를 사용하는 것은 불가능하기 때문에, 적절한 차수의 고유벡터를 사용한다.  $F_i^{ext}$ 는 식 (3)과 (4)에 주어진 파랑의 가진력을 의미하며, 편의상 힘과 모멘트를 구분하지 않았다.

## 2.2 VLFS의 일반적인 설계절차와 응답진폭함수 RAO

VLFS의 설계절차는 그림 1에 요약된 바와 같은 절차를 따르는 것이 일반적이다. 먼저 VLFS의 활용목적에 맞게 설계초기에 단면을 가정한 후 그림 1에 제시된 단계 별로 가정된 단면의 적정성을 평가한다. 그림 1의 점선으로 표시된 부분에서 VLFS의 유탄성 해석을 수행하는데 설계단계에서 가장 시간이 많이 소요되는 부분이다.

식 (1)에서 (6)까지의 유탄성 해석은 개별 진동수  $\omega$ 의 단위 파에 대해 수행되는데, 해석결과로 얻어진 식 (6)의  $\bar{q}_p$ 는  $p$ 차 고유벡터  $\bar{u}_p$ 의 크기와 진동위상  $\theta_p$ 로 구성된 복소수이다.

$$\bar{q}_p = \bar{q}_p^0 [\cos(\omega t + \theta_p) + i \sin(\omega t + \theta_p)] \quad (7)$$

점  $(x, y, z)$ 의 변위는 식 (6)과 (7)로부터 구할 수 있다. 응답진폭함수(Response amplitude operators, RAO)로 통칭되는 단위 파에 발생하는 한 점의 최대 변위는 식 (6)의 최대 진폭에 해당하며 다음과 같이 구할 수 있다.

$$RAO(x,y,z) = \sqrt{\left[ \sum_{p=1}^{\infty} \bar{u}_p(x,y,z) \bar{q}_p^0 \cos(\theta_p) \right]^2 + \left[ \sum_{p=1}^{\infty} \bar{u}_p(x,y,z) \bar{q}_p^0 \sin(\theta_p) \right]^2} \quad (8)$$

여기서  $\bar{u}_p(x,y,z)$  대신 응력  $\sigma_p(x,y,z)$ 나 모멘트  $M_p(x,y,z)$ 를 사용하면 응력이나 모멘트의 RAO를 구할 수 있다. 그림 4는 개별 기저벡터에 해당하는 RAO<sub>p</sub>를 중첩하여 최종 RAO를 구하는 과정을 도식화한 것이다. 일단 변위, 응력 또는 모멘트 등에 대한 RAO가 결정된 후에는 해당 유의파

고를 RAO에 곱해서 실제 입사파에 의한 거동을 계산한다.

## 2.3 VLFS의 설계유의단면

설계시 제어해야 하는 구조물의 거동은 크게 변위와 단면력(또는 응력)으로 구분할 수 있다. 최대 응답을 발생하는 부위는 대부분의 VLFS 연구결과에서 공통적으로 연직변위가 가장 큰 부위는 구조물 중앙부와 선수부, 선미부이며, 모멘트가 가장 크게 발생하는 최대 곡률 부위는 구조물 중앙부로 보고되고 있다(Riggs 등, 2007; 삼성중공업, 2008; 지광습 등, 2008; Kim 등, 2009). 그러므로, 초기 설계 단면의 선정은 최대응력이 발생하는 구조물 중앙부를 기준으로 이루어지는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 구조물 중앙부위를 설계 대상 단면으로 가정했으며, 특히 중앙단면 상판의 중방향 굽힘응력을 대상으로 설계 차트를 개발하였다.

## 3. VLFS 설계차트 개발

### 3.1 설계차트 도출을 위한 설계변수

VLFS 설계시 고려해야 하는 전형적인 변수들을 정리하면 표 1과 같다. 표 1의 변수들을 직접적으로 이용해서 설계차

표 1. 설계시 고려해야 하는 변수

$L_w(T)$ 파랑길이 (wave length)	$S(f)$ 파랑 스펙트럼 (wave spectrum)
$L_s, W_s, D_s$ 구조물길이, 폭, 깊이	$a(f)$ 파랑 진폭 (wave amplitude)
$T, f$ 파랑주기, 파랑주파수	$\sigma_x$ 길이방향 응력 (longitudinal stress)
$\theta$ 파랑입사각 (wave induced angle)	$M_u$ 최대굽힘중강도 (ultimate bending capacity)
$S$ 단면계수 (section modulus)	

표 2. 설계 차트 개발용 무차원 매개변수

$\xi$ 변장비 (aspect ratio)	$S_s$ 구조강성계수 (stiffness parameter)
$L$ 무차원 파랑길이 (dimensionless wave length)	

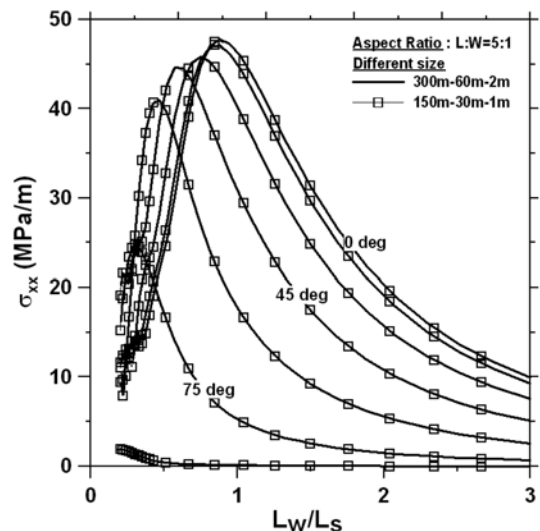


그림 3. 동일 변장비의 유탄성 거동의 등가성

트를 개발할 수도 있지만, 설계차트의 적용성을 높이고 일반화하기 위해서는 무차원 변수를 도입해서 사용하는 것이 바람직하다. 본 설계차트의 개발을 위해 표 2와 같은 세 가지 무차원 변수를 도입하였다.

유탄성 거동의 속성상 변장비(aspect ratio,  $\xi$ )가 같은 다른 크기의 유탄성 거동은 서로 동일하게 된다(그림 3). 변장비가 변동하는 경우 VLFS와 유체의 상호작용도 변동하기

때문에 설계차트 개발시 변장비를 필요한 무차원 변수로 고려해야 한다. 변장비는 식 (9)와 같이 구조물의 길이  $L_s$ 를 폭  $W_s$ 으로 나누어 정의했다.

$$\xi = \frac{L_s}{W_s} \tag{9}$$

실무에서 많이 사용되는  $\xi=5$ 와 10에 대해 설계차트를 개발했으며 그 외의 변장비에 대해서는 보간법을 사용한다.

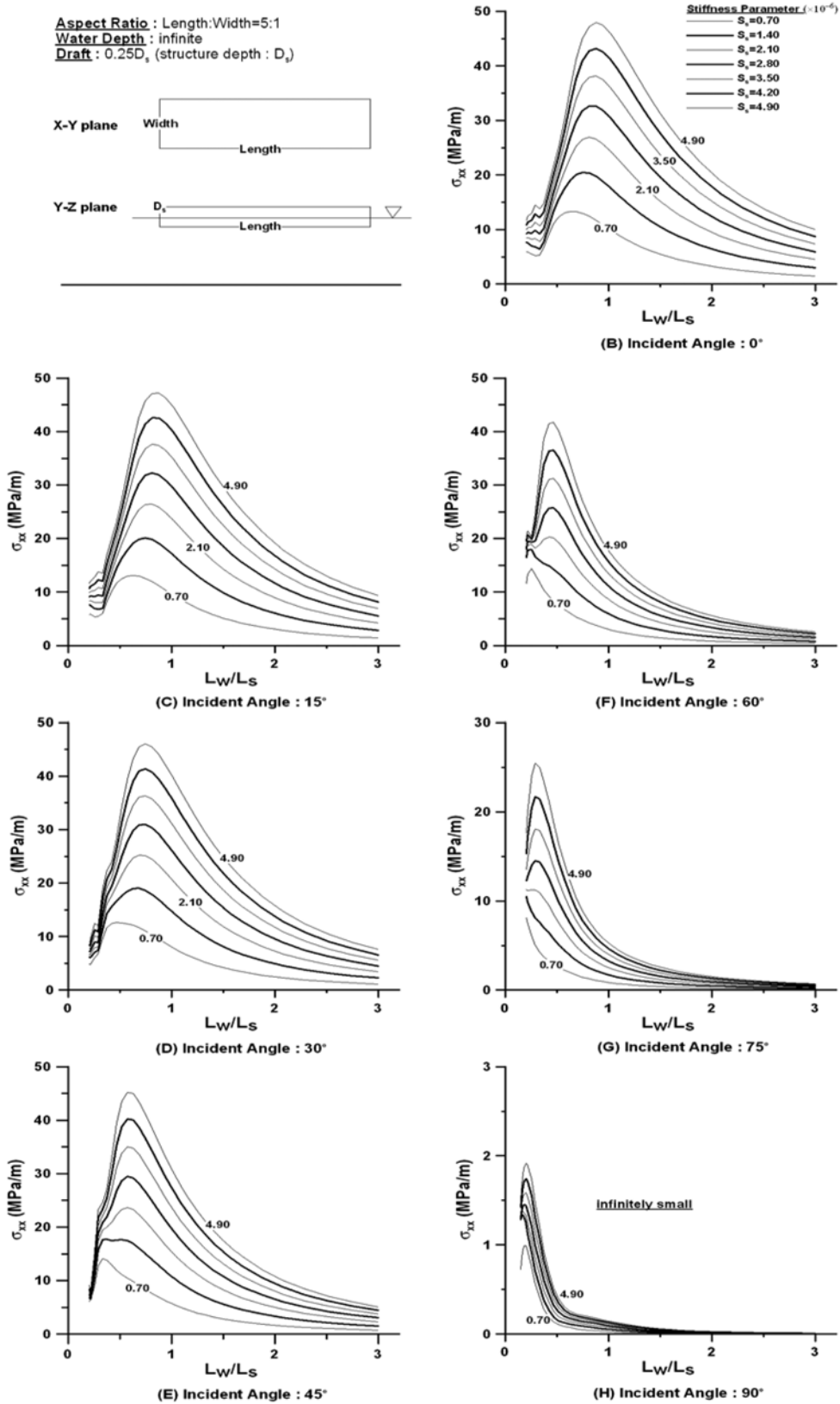


그림 4. 설계차트 I, 최대응력 응답진폭함수 (변장비  $\xi=5$ )

파랑길이와 VLFS의 길이의 비인 무차원 파랑길이  $L$ 를 사용하면 변장비와 구조강성계수가 동일한 다양한 크기의 VLFS에 대해 설계차트를 일반화하여 적용하는 것이 가능하다. 무차원 파랑길이  $L$ 는 식 (10)과 같다.

$$\underline{L} = \frac{L_w}{L_s} \quad (10)$$

여기서,  $L_w$ 는 파랑길이(m),  $L_s$ 는 VLFS의 길이(m)를 의미한다. 수심의 변화에 따라 유체의 포텐셜도 영향을 받는다. 문

제를 간단히 하기 위해 무한수심을 고려하면 파랑의 길이는 식 (11)와 같이 파랑주기와 일대일로 표현할 수 있다(Wang 등, 2008).

$$L_w = 1.56T^2 \quad (11)$$

여기서,  $T$ 는 파랑주기(sec)를 의미한다.

단면의 휨강성은 탄성계수와 단면 이차모멘트의 곱과 같다. Lee와 Newman(2000)이 도입한 무차원화 방식을 채택하면

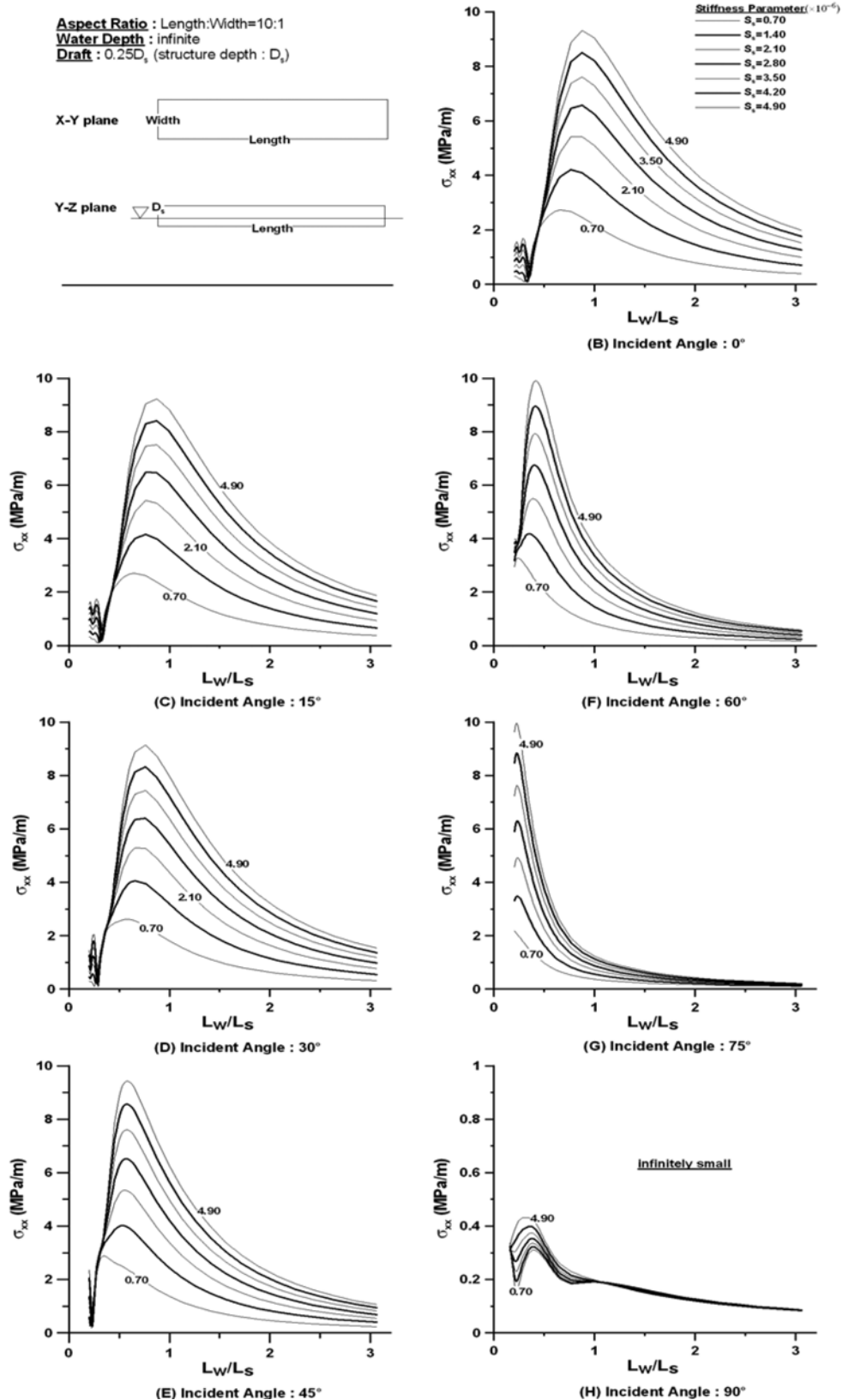


그림 5. 설계차트 1, 최대응력 응답진폭함수 (변장비  $\xi=10$ )

식 (12)와 같은 무차원 강성계수를 얻을 수 있다.

$$S_s = \frac{EI}{\rho_s g L^5} \quad (12)$$

여기서,  $S_s$ 는 무차원 구조강성계수,  $E$ 는 탄성계수,  $I$ 는 단면 이차모멘트,  $\rho_s$ 는 VLFS 구성재료의 단위중량,  $g$ 는 중력가속도,  $L$ 은 구조물의 길이를 의미한다.

### 3.2 설계차트 I: 단일 파랑에 대한 응답차트

전술한 바와 같이 본 논문에서는 두 가지의 설계차트 I, II를 개발하였다. 설계차트 I은 단위파랑의 특징과 VLFS의 구조적 특성을 고려하여 최대응력의 RAO를 얻을 수 있도록 구성하였다. 설계차트 I에서 고려한 단위파랑의 특징은 파랑 입사각(wave induced angle,  $\theta$ ), 무차원 파랑길이(dimensionless wave length,  $L$ )이며, 고려한 구조적 특징은 무차원 구조강성계수(dimensionless stiffness parameter,  $S_s$ )와 변장비(aspect ratio,  $\xi$ )이다(Lee, Newman, 2000).

변장비, 무차원 구조강성계수가 동일한 경우 일반화시켜 적용할 수 있다. 설계차트의 횡축은 무차원 파랑길이이며, 종축은 최대응력의 RAO이다.  $0.70 \times 10^{-6}$  부터  $4.90 \times 10^{-6}$  까지 강성비에 대해 응답곡선을 도출하였다.  $0^\circ$ 부터  $90^\circ$ 까지 일곱 구간에 걸쳐 개별적인 설계차트를 개발하였다. 설계차트 I을 이용해 유탄성 해석의 수행 없이 최대응력의 RAO를 손쉽게 도출할 수 있다.

그림 4와 5는 변장비 5와 10에서 개발된 설계차트로 개별 변장비 당 7개의 그래프로 구성되어 있다. 설계차트 I 내의 7개의 그래프는 상술한 바와 같이  $0^\circ$ 에서  $90^\circ$ 까지 일곱 구간으로 분할한 각각의 파랑입사각에 대한 해석 결과이다. 설계차트 I의 도출을 위해 수심을 무한으로, 흘수를 구조물 깊이의 1/4로 고정하여 해석조건을 간략화하였다.

제시한 설계차트 I은 무차원 구조강성계수의 증가에 따라 최대응력의 RAO가 증가하는 것을 보여준다. 무차원 파랑길이와 파랑입사각 역시 RAO에 영향을 미치며, 최대응력의 RAO는 파랑입사각이 증가할수록 상대적으로 단파장에서 발생한다. 변장비의 차이도 RAO에 주요한 영향인자이며 변장비 5의 경우가 변장비 10의 경우에 비해 최대응력의 RAO가 약 5배 정도 크게 발생할 수 있다.

### 3.3 설계차트 II: 불규칙 파랑에 대한 응답차트

불규칙 파랑은 다수의 스펙트럼을 가진 파가 혼재해 있는 것으로 생각할 수 있으며, 이는 파랑 스펙트럼을 통해 모사된다. 유탄성 해석 결과를 실제 설계에 적용하기 위해서는 대상 영역의 실제 파랑을 구성하는 각 파랑에 대한 RAO를 모두 고려한 최대 굽힘중강도(ultimate bending capacity,  $M_u$ )를 계산해야 한다. 본 논문에서는 국내에서 일반적으로 적용되는 Bretschneider 스펙트럼을 적용하여 최대굽힘중강도 설계차트를 개발하였다. Bretschneider 스펙트럼은 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$S(f) = 173 H_{1/3}^2 T_1^{-4} f^{-5} \exp(-692 T_1^{-4} f^{-4}) \quad (13)$$

여기서,  $H_{1/3}$ 은 유의파고(m),  $T_1$ 은 평균주기(average wave period, sec),  $f$ 는 파랑의 주파수(rad/sec)를 의미한다. 파랑 주파수에 따른 스펙트럼 에너지를 결정하는 것은 유의파고와 평균주기이며 이 값들은 VLFS가 위치할 실해상의 해상상태에 의해 결정된다.

식 (13)에서 유의파고  $H_{1/3}$ 과 평균주기  $T_1$ 은 해상의 기상상태를 그림 6a에 도시된 바와 같이 1단계에서 12단계까지

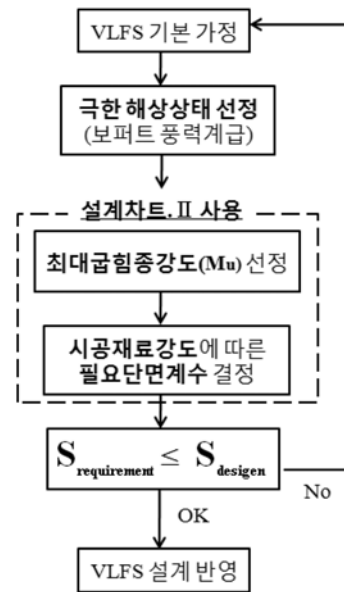


그림 7. 설계차트 적용 절차

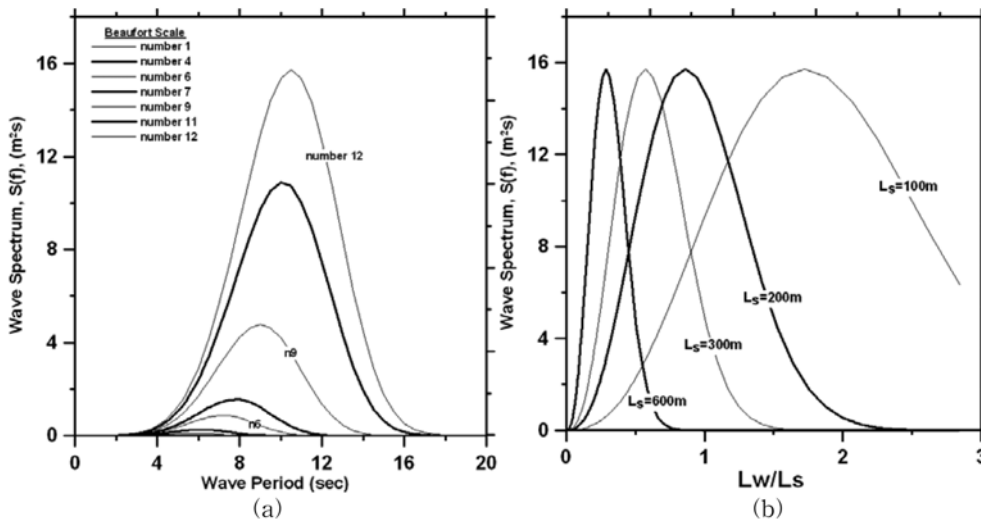


그림 6. Beaufort 풍력급에 따른 파랑스펙트럼

분류된 Beaufort 풍력급에 의해 결정된다(Journee와 Massie, 2001). 단위 주기당 스펙트럼 에너지의 관계로부터 임의의 주파수  $f_i$ 에 해당하는 파랑의 진폭  $a_i$ 은 다음 식 (14)로부터 구할 수 있다.

$$S(f_i)df = \frac{1}{2}a_i^2 \quad (14)$$

그림 6의 스펙트럼으로 구성된 불규칙 파에 대한 VLFS의 응답은 설계차트 I에서 얻은 RAO에 파랑스펙트럼의 진폭을

곱하여 적분해서 도출할 수 있으며, 이에 해당하는 최대굽힘 종강도  $M_u$ 를 식 (15)와 같이 이산화하여 계산할 수 있다.

$$M_u = A_s L_{arm} \sum \sigma(f_i) a(f_i) \quad (15)$$

여기서,  $A_s$ 는 유의단면의 단면적,  $L_{arm}$ 은 단면의 모멘트 팔 길이, 즉, 단면의 높이,  $\sigma(f_i)$ 는 파랑에 대한 응력의 RAO를 의미한다. 이 최대굽힘종강도를 단면의 단면계수와 같이 도시하면 그림 8부터 9까지의 설계차트 II가 얻어진다.

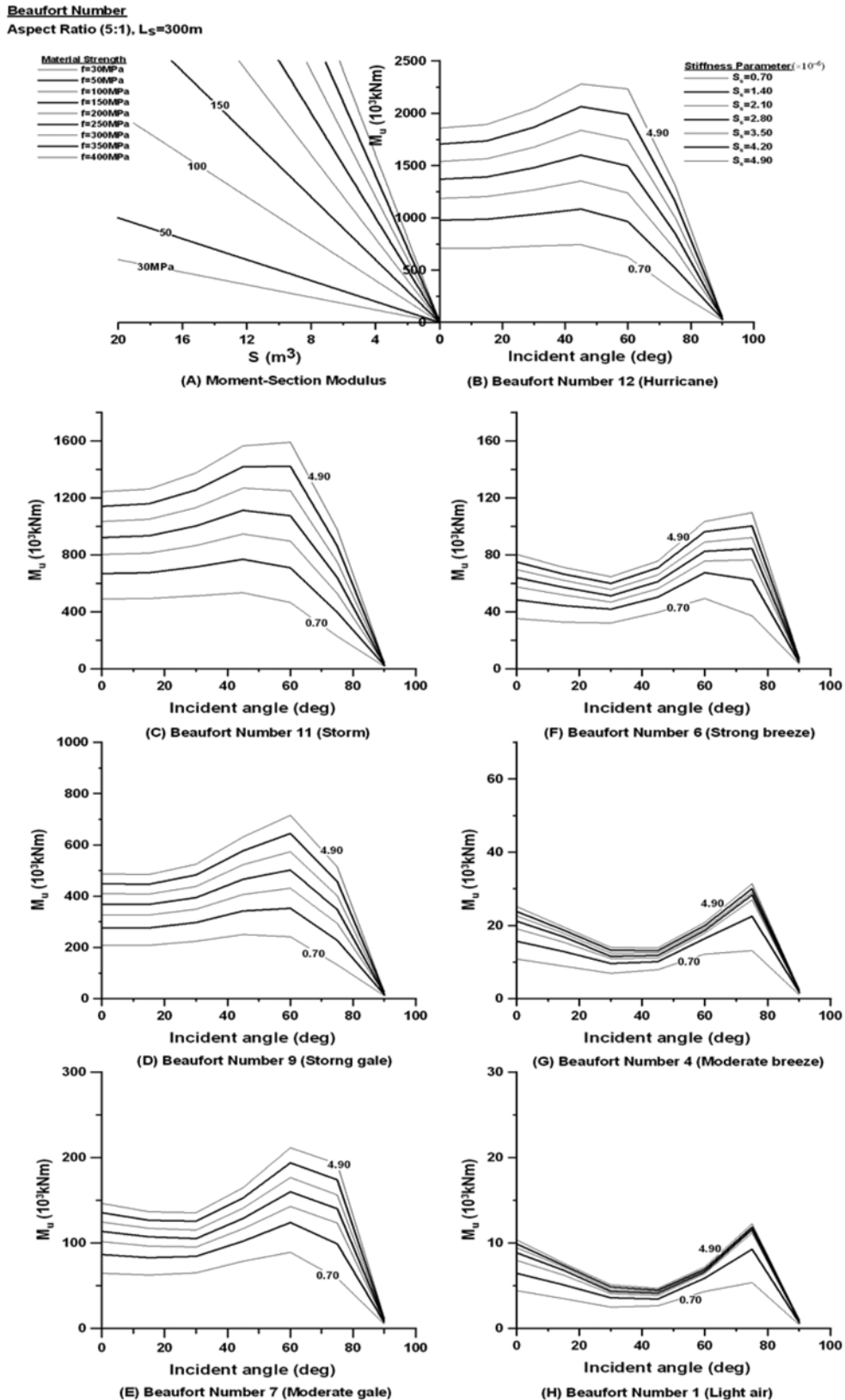


그림 8. 설계차트 II : 최대굽힘종강도  $M_u$  (변장비  $\xi=5$ ,  $L_s=300$  m)

**Beaufort Number**  
Aspect Ratio (10:1),  $L_s=100\text{m}$

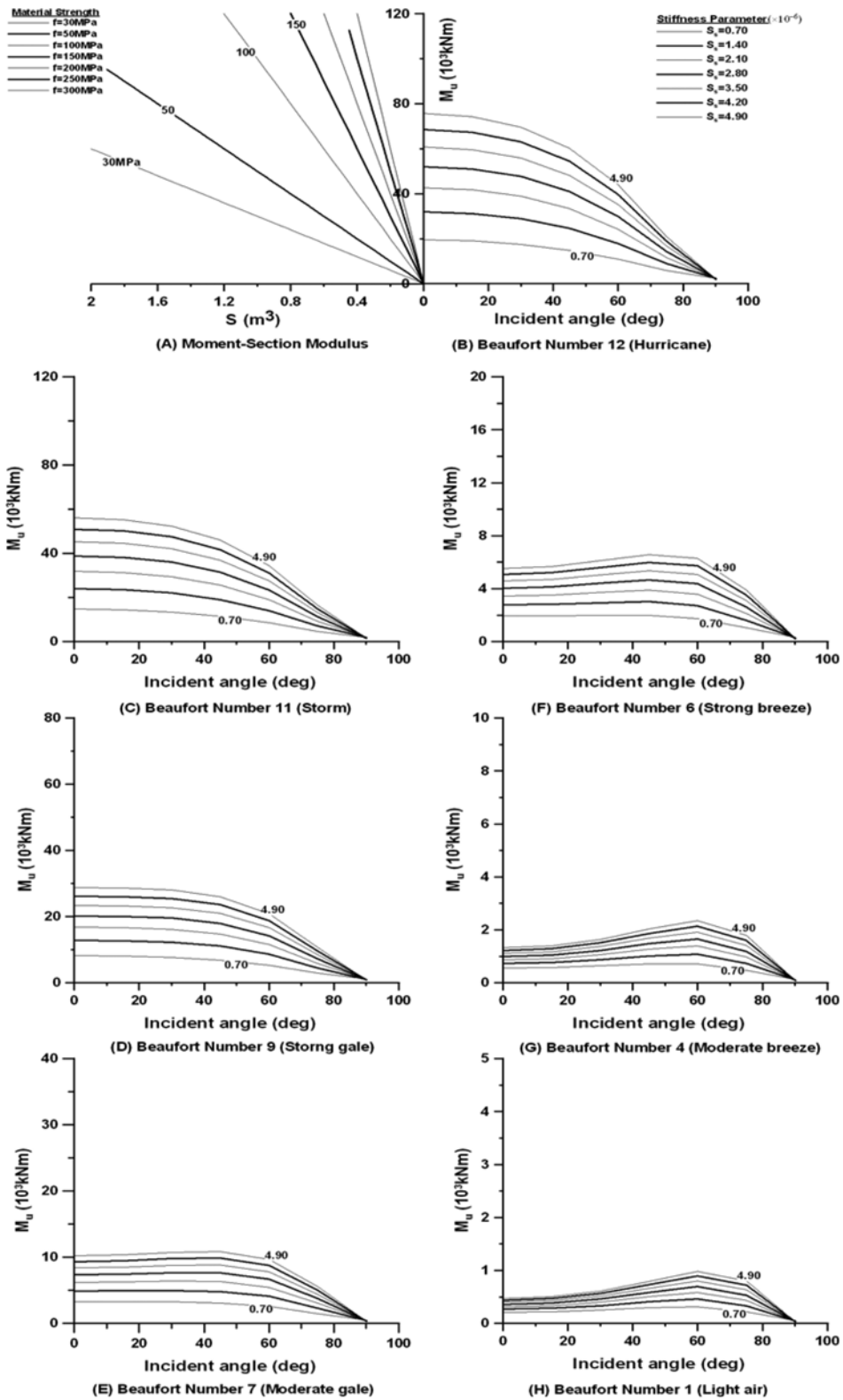


그림 9. 설계차트 II: 최대굽힘종강도  $M_u$  (변장비  $\xi=10$ ,  $L_s=100\text{ m}$ )

그림 7은 설계차트 II의 적용 절차이다. 먼저 설계하고자 하는 VLFS의 변장비, 구조물 길이, 무차원 구조강성계수 등을 가정하고, VLFS를 설치하고자 하는 해상의 극한 해상상태를 Beaufort 풍력계급을 이용해 결정한다. VLFS의 가정과 해상상태를 설계차트 II에 적용해 최대굽힘종강도, 시공재료 강도, 및 필요단면계수( $S_{req}$ )를 선정할 수 있다. 결정된 필요

단면계수가 초기 가정에 의해 결정된 설계단면계수( $S_{des}$ )보다 작다는 조건을 만족할 경우 결정된 설계조건을 이용해 VLFS의 설계에 적용할 수 있다. 필요단면계수가 설계단면계수보다 큰 값일 경우 구조강성계수의 가정을 수정하여 위의 절차를 재수행한다. 설계차트의 활용방법과 타당성 검토는 설계예제를 통해 확인할 수 있다.



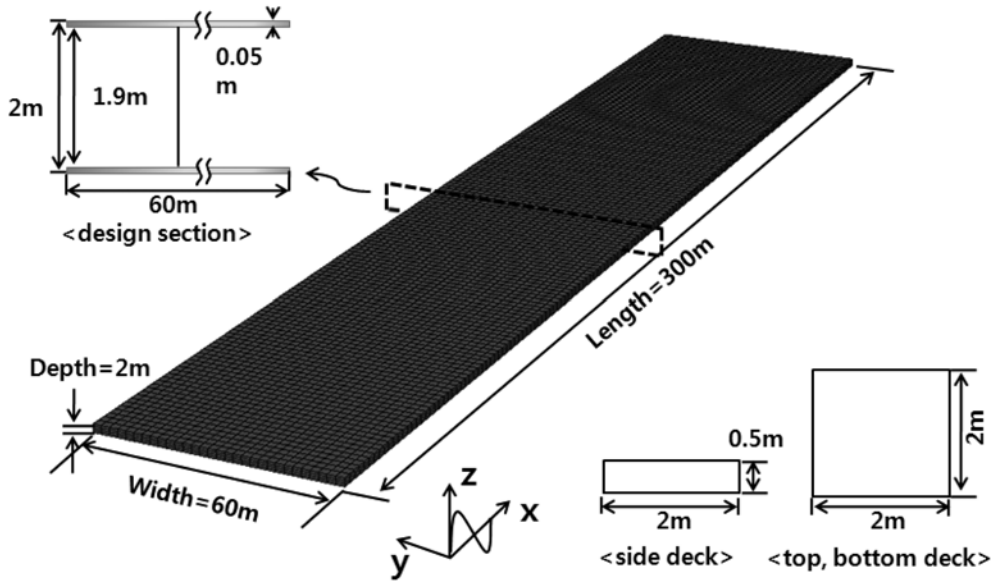


그림 10. 설계차트 적용 예, 3D 사각형 부유체

**Beaufort Number**

Aspect Ratio (5:1),  $L_s=300m$

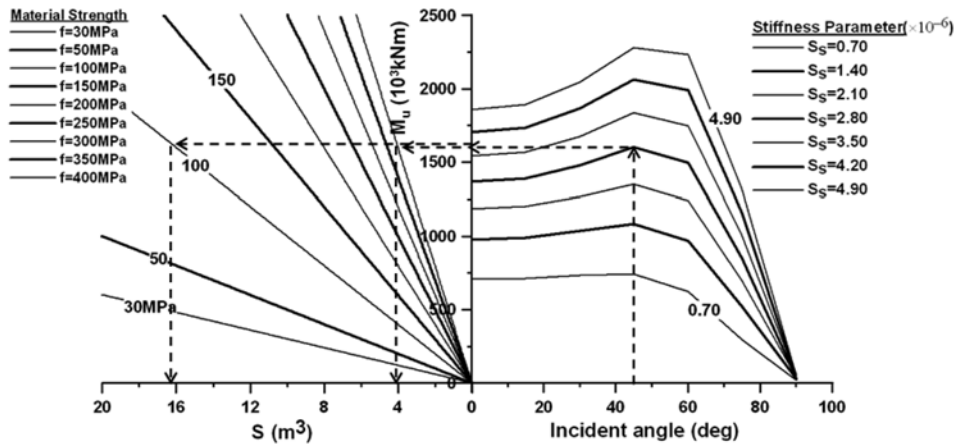


그림 11. 설계차트 II의 적용

**4. 설계차트 적용예제**

실제 설계 시 제시한 설계차트의 적용가능성을 설계예시를 통해 제시하였다. 설계예시를 위한 VLFS의 기본 가정으로 변장비 5, 구조물 길이 300 m, 무차원 구조강성계수  $S_s = 2.80 \times 10^{-6}$ 로 각각 선정하였으며, VLFS 예와 기본단면은 그림 10과 같이 가정하였다. 기본 가정을 이용해 계산된 설계단면계수  $S_{des}$ 는 약 5.7  $m^3$ 이다. 해상상태는 최악의 기상 조건을 고려하여 버포트 풍력급 12단계인 허리케인을 선정하였다.

전술한 설계조건을 설계차트 II에 적용하면 최대 굽힘종강도는 약  $1600 \times 10^3$  kNm로 예상된다. 시공재료강성을 100 MPa로 가정하였을 경우 필요단면계수  $S_{req}$ 는 약 16  $m^3$ 으로 설계단면계수에 비해 큰 값을 가지므로 조건을 만족시키지 못한다. 시공재료강성을 400 MPa로 선정하였을 경우 필요단면계수는 4  $m^3$ 의 값을 가지며 이 값은 설계단면보다 작으므로 설계조건을 만족하지만, 재계산된 무차원 구조강성계수는 약  $3.30 \times 10^{-6}$ 으로 가정한 값보다 크다(그림 8). 재계산된 무차원 구조강성계수를 적용할 경우 최대굽힘종강도는 약

$1750 \times 10^3$  kNm로 예상된다. 시공재료강성을 앞서와 같이 400 MPa로 선정하였을 경우 필요단면계수는 약 4.2  $m^3$ 으로 앞선 가정의 결과와 큰 차이가 발생하지 않았으며 이는 설계조건과 기본가정을 만족한다. 재계산된 구조강성계수를 적용해 유탄성 해석을 수행한 결과는 설계차트II에 의해 도출된 최대굽힘종강도와 약 5%내의 오차로 근사하였다. 본 예제와 같은 방식으로 설계차트를 실제 VLFS의 설계과정에 적용할 수 있다.

**5. 결 론**

본 논문에서는 해석비용이 높은 초대형 부유식 해상구조물의 해석단계를 간단화함으로써, 초대형 부유식 해상구조물의 설계비용을 절감할 수 있는 두 가지 종류의 설계차트를 개발하였다. 본 설계차트는 변장비, 무차원 구조강성계수, 무차원 파랑길이의 무차원 설계변수를 대상으로 개발되었으며, 다양한 크기의 초대형 부유식 해상구조물의 해석에 사용될 수 있다.

첫 번째 설계차트는 다양한 입사각을 가지는 개별 파랑에

의한 초대형 부유식 해상구조물 중앙의 종방향 응력이며, 파랑의 진폭을 곱할 경우 발생응력을 손쉽게 얻을 수 있도록 구성하였다. 유의파랑이 주어질 경우 첫 번째 설계차트를 이용해서 발생응력을 직접적으로 얻을 수 있다. 불규칙 파랑을 설계시 고려해야 하는 경우에 대해 두 번째 설계차트를 개발하였다. Beaufort 풍력급에 따른 Bretschneider 스펙트럼과 첫 번째 설계차트의 곱을 적분하는 과정을 통해 개발되었다. 이를 활용해서 재료의 필요 강성 및 단면계수를 신속하게 선정 가능하다.

## 감사의 글

본 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2010-0015690)과 건설교통부 건설기술혁신사업 “레이터와 열화상 카메라를 이용한 콘크리트 비파괴시스템 개발”(과제번호: 05첨단융합B01)의 지원으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

김병완, 홍사영, 경조현(2008) 모듈형 부유구조물의 유닛 크기 및 커넥터 강도에 따른 고유모드 고찰, **한국소음진동공학회논문집**, 한국소음진동공학회, 제18권 제3호, pp. 356-360.

김병완, 홍사영, 경조현, 조석규(2006) 부유식 구조물의 접합부 형태에 따른 동적응답 특성 연구, **한국소음진동공학회논문집**, 한국소음진동공학회, 제16권 제2호, pp. 132-140.

삼성중공업(2008) **초대형 부유구조체의 유탄성 해석기술 개발**.

이동환 등(2001) 모드중첩법을 이용한 정수중의 매트형 거대부유구조물의 동하중에 대한 시간영역 유탄성 해석, **대한조선학회논문집**, 대한조선학회, 제38권 제4호, pp. 39-47.

지광습, 이승오, 김진균, 이필승, 이승정(2008, 초대형 부유식 해상구조물의 유탄성 거동 분석, 2008년도 정기 학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 1123-1127.

해양수산부(2008) **초대형 부유식 해상구조물 기술 개발**

Andrianov, A.I. (2005) *Hydroelastic Analysis of Very Large Floating Structures*, Doctorate Thesis, Delft University of Technol-

ogy, ISBN 90-8559-081-7, p. 188.

Ando, S., Ohakawa, Y., and Ueno, I. (1983) Feasibility study of a floating airport, *Report of Ship Research Institute*, Japan, Supplement No. 4.

Bishop, R.E.D. and Price, W.G. (1983) An introduction to ship hydroelasticity, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 87, No. 3, pp. 391-407.

ISSC (2006) Report of Special Committee VI.2 “Very Large Floating Structures”, *Proceeding 16th International Ship and Offshore Structure Congress*, Vol. 2, pp. 391-442.

Journee, J.M.J. and Massie, W.W. (2001) *Offshore Hydromechanics*, Delft University of Technology.

KAIST (2009) *Mobile Floating Harbor for Jump Increased Container Handling Capacity*.

Kim, Y.I., Kim, K.H., and Kim, Y.H. (2009) Springing analysis of a seagoing vessel using fully coupled BEM-FEM in the time domain, *Ocean Engineering*, Vol. 36, pp. 785-796.

Lee, C.-H. and Newman, J.N. (2000) An assessment of hydroelasticity for very large hinged vessels, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 14, pp. 957-970.

Newman, J.N. (1994) Wave effects on deformable bodies, *Ocean Research*, Vol. 16, No 1, pp. 47-59.

Riggs, H.R., Hideyuki Suzuki, Ertekin, R.C., Kim, J.W., and Iijima, K. (2008) Comparison of hydroelastic computer codes based on the ISSC VLFS benchmark, *Ocean Engineering*, Vol. 35, Issue 7, pp. 589-597.

Riggs, H.R., Niimi, K.M., and Huang, L.L. (2007) Two benchmark problems for three-dimensional, linear hydroelasticity, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 129, pp. 149-157.

Reza, T., Shixiao, F., and Torgeir, M. (2006) Validated two and three dimensional linear hydroelastic analysis using standard software, *Proceeding of the Sixteenth (2006) International Offshore and Polar Engineering Conference*, San Francisco, USA, pp. 101-107.

Suzuki, H. and Yoshida, K. (1996) Design flow and strategy for safety of very large floating structure, *VLFS'96*, pp. 21-27.

Wang, C.M., Watanabe, E., and Utsunomiya, T. (2008) *Very Large Floating Structures*, Taylor & Francis.

(접수일: 2009.11.30/심사일: 2010.2.3/심사완료일: 2010.3.11)