



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

수류형 과력발전시스템의 수리학적
특성에 관한 연구



부 경 대 학 교 대 학 원

해 양 공 학 과

정 종 철

공 학 석 사 학 위 논 문

수류형 과력발전시스템의 수리학적
특성에 관한 연구

지도교수 김 현 태



이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2009년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

해 양 공 학 과

정 종 철

정종철의 공학석사 학위논문을 인준함



주 심 공학박사 이 인 철 ㉠

위 원 공학박사 윤 한 삼 ㉠

위 원 공학박사 김 현 태 ㉠

목 차

List of Figures.....	ii
List of Tables.....	iv
List of Symbols.....	iv
ABSTRACT.....	v
1. 서론	1
1.1 연구배경 및 목적.....	1
1.2 연구내용 및 방법.....	4
2. 제원 및 방법	6
2.1 상사법칙 및 차원해석.....	6
2.2 수리모형실험.....	9
2.2.1 실험장치.....	9
2.2.2 실험조건.....	14
2.3 수치해석.....	16
2.3.1 수치모델의 방법 및 제원.....	16
2.3.2 수치모델의 정식화.....	18
2.3.3 수치모델의 검증.....	31
3. 결과 및 분석	36
3.1 수리모형실험 결과 및 분석.....	36
3.1.1 수류터널 내부의 유속변화특성.....	36
3.1.2 수류터널 내부의 수위변화특성.....	39
3.2 수치해석 결과 및 분석.....	44
3.2.1 유입구의 크기에 따른 수리학적 특성.....	44
3.2.2 수류터널의 길이에 따른 수리학적 특성.....	46
3.2.3 수류터널 내부 형상에 따른 수리학적 특성.....	51
4. 요약 및 결론	57
참고문헌	59

A Study on Hydraulic Characteristics of Wave Power Generation System with Wave Duct Type

Jong-Cheol Jeong

*Department of Ocean Engineering, Graduate School,
Pukyong National University*

ABSTRACT

This study was investigated hydraulic characteristics of system in two dimensional hydraulic experiments and numerical modeling as Flow-3D, we designed wave power generation system with wave duct type which can use wave power in ocean energy sources.

The main results from study are summarized as following.

- 1) The results of numerical analysis were indicated similar pattern that the variation pattern of velocity and surface elevation under hydraulic experiments.
- 2) Under changing vertical heights of inlet conditions, the variation of internal velocity did not show on various wave conditions. It caused inlet position was located in the region, velocity of water particles are steady conditions.
- 3) To investigate the main factors that will affect the variation velocity and changing elevation include the length of wave duct, wave heights, wave length and shape of wave duct. The variation internal velocity and water level increased significantly under constant wave heights, as

length of wave duct decreasing. Smooth shape of internal wave duct has shown more increased on internal velocity, compared to existing shape that was a right angled form. The velocity increase of the smooth type due to reduce energy loss. However, it was indicated relative low efficiency for the variation of internal water level. When we used various wave conditions under constant length of duct, the increase of wave heights indicated higher internal velocity value than effect on deformed the shape of wave duct. According to results that study to variation of internal water level under the same conditions, effect of increasing wave period came out to be higher than the other factors.



1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

해양의 에너지를 이용한 발전기술은 세계적으로 쟁점화되고 있는 화석원료의 고갈과 환경오염의 문제를 해결할 수 있는 주요한 대체에너지 기술의 하나로 인식되고 있다. 해양의 파랑, 조류, 온도차등은 청정한 대체에너지로써 영구적인 사용이 가능하고, 따라서 이들을 이용한 에너지 추출기술에 대한 다분야의 연구가 활발히 진행되어왔다. 다양한 해양의 에너지원 중 파랑에너지를 이용한 발전방식을 파력발전이라 한다. 파랑은 모든 해역에 넓게 분포하고 있고, 다른 에너지원들에 비해 비교적 에너지 밀도가 높으며, 실용성이 비교적 높은 해양의 에너지자원으로써 반도라는 한국의 지리적 특성을 고려하였을 때 연안역에서 효율성이 높은 유력한 대체에너지 자원이라는 장점을 가지기 때문에 현재까지 많은 연구가 이루어지고 있다. 또한 대상으로 하는 파랑이라는 해양의 불규칙한 수면변동현상이라는 특징을 가지기 때문에 앞으로도 이를 효율적으로 이용하기 위해서는 많은 연구가 필요한 분야이다.

파력 에너지를 대상으로 하는 발전시스템의 개발 및 이용기술은 기본적으로 (1)조사기술, (2)회수기술, (3)변환기술, (4)저장·평활(平滑)기술의 4가지 요소로 구성되어있다.

조사기술은 파랑 자료조사, 수치 풍력·파랑 모형을 이용한 파랑추산, 파력에너지 자원평가 및 개발의 방법이 있다. 파랑 자료의 조사는 2가지의 기본적인 방법으로 나눌 수 있는데 관측과 추정을 통한 방법과 파랑 추산을 기본으로 하는 것이다. 파랑에너지의 자원 평가를 위한 먼저 실시해야 할 것은 발전시스템이 설치될 해역을 선정하는 것이다, 이는 기본적으로 파랑 에너지의 분포가 비교적 높은 곳을 선택하는 것이 일반적인데 이를 선정하기 위해 이와 같은 기술이 이용된다. 수치 풍력·파랑 모형을 통한 추산은 소정 구역(grid point를 통하여 표시) 및 시간에 따른 파랑 에너지

의 집중을 추정하는데 주로 이용된다. 대상 해역의 풍력장 및 기타 물리적 조건을 입력하여 대상해역의 파랑 에너지 스펙트럼 분석이 가능하며, 최근에는 3세대 파랑모형 WAM(WAMDI Group, 1988)과 연안역에 대한 적용성을 확장한 SWAN(Simulation WAVes Nearshore, Delft Univ, 2000)등을 이용하여 보다 정확도를 높인 파랑 추산이 가능해졌다. 본 연구에서 적용된 파랑조건은 해양수산부(2002)가 구축한 장기파랑정보 데이터베이스(1979-2002년) 자료중 남동해안(격자점 60)의 파랑자료를 분석한 결과이다.

파력 에너지의 회수기술 분야는 설치지역의 특성에 따른 회수장치의 선택이 발전시스템의 효율에 지배적인 영향을 미치기 때문에 현재까지 다양하게 개발되어지고 있으며 차후 지속적인 연구가 필요한 분야이다. 회수기술은 파랑에너지를 회수하는 장치의 이용형태에 따라 기본적으로 두 종류로 나눌 수 있다. 제 1은 '파랑운동의 직접이용'하는 기술로써 파랑에 의해 운동하는 가동물체, 공기실 내의 수주, 수압면등이 직접적으로 운동을 하여 유압장치, 공기터빈을 이용하여 에너지를 회수하는 방법이다. 제 2는 '파랑변형'을 이용한 것으로 해안 부근의 수심이 얇은 해역에서의 입사하는 파랑의 변형에 따른 해수의 수평 흐름, 월파등을 이용하여 수차 및 저낙차 터빈을 통한 회수방식이다.

회수기술에 관한 연구는 McCormick(1981)의 연구와 같은 많은 연구가 진행되어지고 있으며, 노르웨이 TAPCHAN(1985)은 좁은 수로를 갖는 연안의 지형을 이용하여 파랑에너지의 집중시켜 월파 후에 저장된 해수를 수로를 통해 방류시켜 이로 얻어지는 수두차로 발전을 하는 형식인 수렴수로형(Taperd Channel) 발전장치를 개발하였으며, 공기챔버를 일반적인 수직형이 아닌 경사형으로 제작하여 파랑에너지에 의한 압축공기를 효과적으로 집약시켜 에너지변환 효율을 높인 해안고정 진동수주형 파력발전 장치 LIMPET(2000)이 개발되었다. 국내에서는 박(1990)이 파력발전기의 흡수파력에 관한 연구를 수행하여 진동수주의 체적에 따른 유체력을 고찰하였으며, 조(2002)는 진동수주내의 공기흐름을 측정하여 공기실의 형상과 고유진동주기와의 관계를 연구하여 효율적인 파력발전장치의 형상비를 결정하였

다. 또한 김(2006)등은 부유식 구조에 진동수주형 장치를 결합한 BBDB형 파력발전장치를 모형실험과 수치계산을 통하여 개발하여 부유식 등부표에 적용하였다. 위와 같은 국내외 사례처럼 회수장치에 따른 시스템의 형식을 분류하면 공기의 흐름을 이용하는 진동수주형 파력발전과 수류의 흐름을 이용하는 월파형 파력발전이 대표적이다. 한국연안의 파랑조건은 북해나 오세아니아 지역에 비해서 상대적으로 에너지 밀도가 낮아 파력발전에 불리한 조건을 갖고 있다. 기존에 개발된 발전장치에서 나타나는 낮은 에너지 추출율과 함께 경제성의 확보는 파력발전시스템의 실용화 관점에서 가장 큰 문제점이라 할 수 있다. 따라서 한국연안에서 실효성이 있는 파력발전이 가능하기 위해서는 낮은 에너지의 파랑조건을 효과적으로 이용할 수 있는 기술이 해결방안이라 할 수 있다. 효과적인 파랑에너지의 회수기술은 기본적으로 발전형식에 따른 내부의 수리학적 특성에 관한 연구가 필요하다. 파랑에너지의 회수효율을 높이는 형상에 관한 연구는 현재 단계에서 비교적 진동수주형과 월파형에 대해 집중되어 있어 장치에 따른 기본적인 문제점들을 해결하기에는 다소 제약이 따르고 수류형 파력발전시스템의 적용성에는 형상과 기본적인 회수기술방식에서 차이점이 있으며, 내부의 수리학적 특성에 관한 연구는 지속적인 연구가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 고정식 형태로 구조적인 안정성을 지닌 케이슨 형의 회수장치와 함께 수류의 흐름을 이용하는 내부 수류터널을 적용한 방식을 복합적으로 이용한 형태의 수류형 파력발전시스템의 수리학적 특성을 연구하였다. 수류형 파력발전 장치는 케이슨 형태의 1차 변환장치와 내부의 수류터널로 구성되어 있으며, 터널내부의 수류터빈이 장착되어 입사한 파랑에너지와 터널의 형상으로 인해 발생하는 주기적인 왕복류를 이용하여 발전을 하는 방식의 장치이다. 케이슨 형태의 1차 변환장치는 구조적인 안정성이 탁월하다는 장점과 함께 입사파의 조건에 따른 내부의 수리학적 특성에 대한 검토가 이루어진다면 다양한 형태의 적용이 가능할 것으로 판단되었다.

수류형 파력발전장치에 있어 내부의 유속은 외력조건에 따라 변화하는 수리학적 파라미터로써, 형상과 파랑조건에 따라 내부의 유속이 변화된다

는 기본적인 특성을 가지고 있다. 따라서 유속과 함께 왕복류 발생으로 인해 나타나는 내부의 수위변화특성을 본 연구를 통해 분석하였다. 다양한 외력조건을 적용하여 이에 따른 유속 및 수리학적 특성을 규명하고 이에 영향을 미치는 외력조건의 영향도를 분석하여 차후 수류형 파력발전장치의 설계 및 적용을 위한 기초자료를 제공하는데 그 목적을 두었다.

1.2 연구내용 및 방법

본 연구는 외력조건에 따른 파력발전장치의 내부의 유속과 수위변화를 검토하고자하였다. 2차원 단면수리모형실험을 통해 장치 내부에서 작용하는 기본적인 수리학적 파라미터를 정의하고 외력조건에 따른 기본적인 변화패턴을 분석하였다. 수치모델링을 이용하여 수류터널의 길이를 변화시켜 결과를 정리하였으며, 각각의 파랑조건에 따른 데이터의 변화를 정리하였다. 또한 수류터널 내부의 형상으로 인한 에너지손실을 감소시키는 방안으로 내부의 형상을 변화시켜 유속 및 수위변화값에 대한 분석을 실시하였다. 최종적으로 파랑과 구조물의 길이, 내부의 형상에 대하여 각각의 외력인자가 수리학적 파라미터값의 변화에 끼치는 영향을 유속과 수위변화를 통해 분석하여 보았다. 연구의 흐름도는 다음의 Fig. 1-1-1에 나타난 것과 같다.

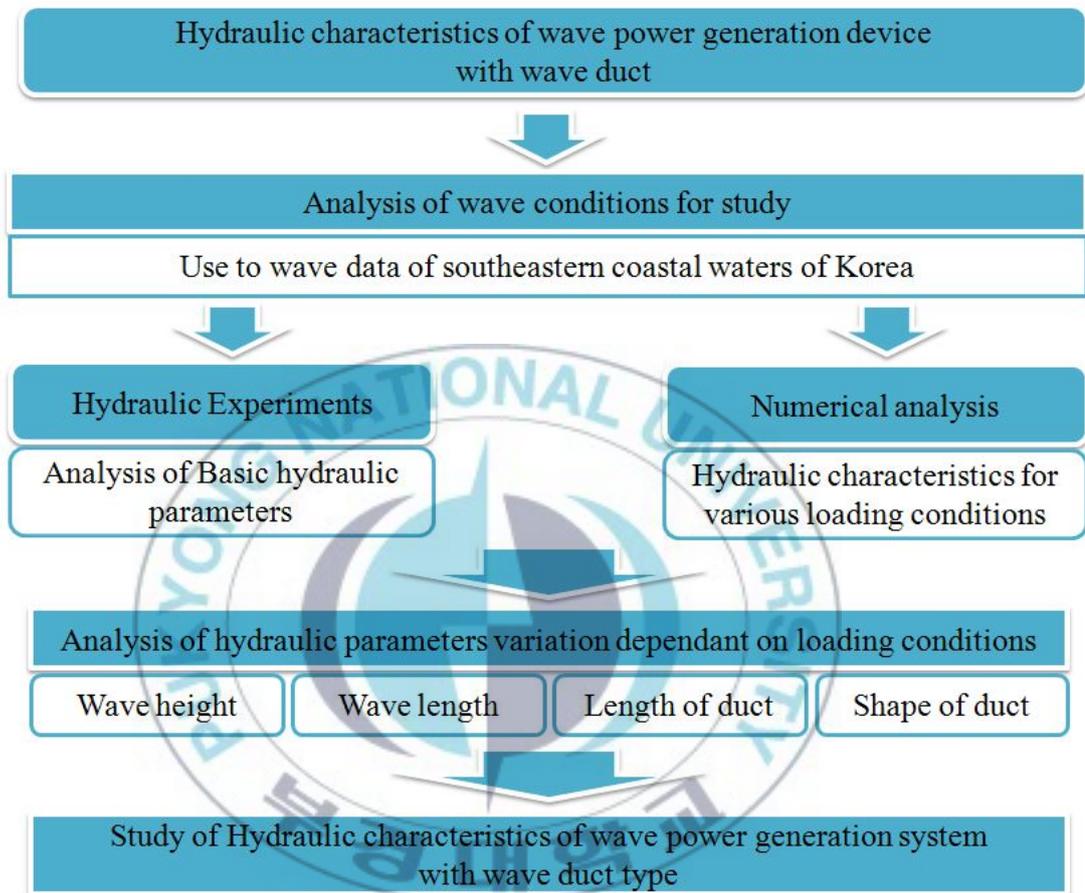


Fig. 1-1-1 Flow chart of the study.

2. 제원 및 방법

2.1 상사법칙 및 차원해석

모형실험에서의 축척모형기법은 실제 경계문제나 비선형효과등과 같이 공학적으로 복잡한 문제를 상사법칙을 차용해서 푸는 공학적 기술을 말한다. 본 연구와 같이 원형의 특성을 이해하고 효율적이며 경제적인 원형의 제원을 결정하고자 할 때에는 원형을 상사시켜 모형을 이용한 현상의 예측 방법이 주로 사용되어지고 있다. 원형과 모형간의 역학적인 관계는 수리학적 상사성이 성립되어야하며 이를 수리학적 상사법칙이라 한다. 이때의 상사법칙은 서로 다른 두 현상간의 상사성(similarity)을 이용한 것으로 이것은 차원해석을 통해 얻어진다. 수리실험에 있어서 차원해석은 실험에서 논의하고자 하는 물리량들의 상호관계를 무차원화하여 비교하고, 변수간의 상호관계를 예측하기 위해 사용된다. 따라서 수리모형실험은 위와 같은 상사법칙과 차원해석을 근거로 수행되고 분석되어야 상대적으로 정확도가 높은 결과를 얻을 수 있다. 모형과 원형간의 크기 차이와 축척의 영향으로 인한 완전한 상사를 하는 것은 다소 제약이 따르지만 실험의 효율성을 고려하여 모형을 원형에 최대한 가깝게 제작한다며 이러한 제약조건들은 극복이 가능하다. 수리학적 상사는 원형과 모형간의 기하학적 상사, 운동학적 상사 및 동역학적 상사가 모두 만족될 때 성립된다. 일반적인 유체의 흐름 문제에 포함되는 힘의 성분은 유체의 기본질량으로 인한 관성력, 압력, 중력, 점성력, 표면장력 및 탄성력 등이며 이들 힘의 크기비가 원형과 모형에서 동일하며 동역학적 상사가 성립된다. 하지만 실제의 수리현상에서는 하나 또는 몇 개의 성분력이 작용하지 않거나, 무시가 가능할 정도로 작은 경우가 대부분이며 흐름을 지배하는 주요인 힘 하나만을 고려해도 충분한 것이 일반적이다. 위와 같은 전제조건을 통해 실제의 수리현상에 대한 해석이 모형실험을 통하여 해석이 가능한 것이며, 현상을 지배하는 주 힘이 무엇인가를 정확하게 판단하는 것은 그 힘에 관한 상사법칙을 실험의 모형

제작 및 자료 분석의 기준으로 선정할 수 있게 한다. 모형법칙은 수리현상을 주로 지배하는 힘에 따라 점성력이 주 힘이면 Reynolds 모형법칙, 중력이 주 힘이면 Froude 모형법칙, 표면장력이면 Weber 모형법칙, 탄성력이면 Cauchy 모형법칙을 적용할 수 있으며, 수리현상에 따라서는 1개 이상의 지배력을 고려해야하는 경우도 있다.

본 수리모형실험은 자유수면을 갖는 유체의 파랑운동실험이므로 중력이 유체의 운동을 지배한다. 따라서 모형과 원형 사이의 상사관계는 Froude 상사법칙에 의해 지배되며, 제반 인자는 Froude 상사율에 의거 축소하였다.

다음과 같이 시간축척을 $M_T = T_P / T_m$, 거리축척을 $M_L = L_P / L_m$, 수심축척을 $M_h = h_P / h_m$, 파고의 축척을 $M_H = H_P / H_m$ 이라 할 때, Froude 상사법칙에 의해

$$M_L = M_h = M_H = M_T^2$$

이며, 수리모형실험에서는 1/20 축척의 모형을 사용하였기 때문에

$$M_L = M_h = M_H = 20$$

이므로, $M_T = \sqrt{20}$ 이다. 따라서 원형과 모형간의 비를 나타내면

$$L_P = 20L_m, h_P = 20h_m, H_P = 20H_m, T_P = \sqrt{20} T_m$$

이다.

수리실험이나 수치모델에 있어서 차원해석과 상사법칙은 공학적으로 복잡한 문제를 풀어나가는데 아주 기본적인 과정이다. 이는 논의하고자 하는 물리량들의 상호관계를 무차원화 하여 비교하고 변수들 간의 상호관계를

예측하기 위해 사용된다. 본 연구에서는 대상구조물이 중력에 의한 고정식 구조물임을 고려하였을 때, 점성력의 영향보다는 관성항의 영향이 지배적이므로 Buckingham π 정리에 따라 차원해석을 실시하고자 한다. 일반적으로 파랑 장에서 수류형 파력발전 시스템 내부에서 발생하는 유속분포와 수면변동특성을 살펴보기 위한 주요 영향인자들은 다음과 같다.

$$F[x] = f_1[H_i, L_i, T_i] + f_2[B, h_2, h_d] + f_3[U_{\max}, \eta_{\max}] + f_4[\rho_w, g, \mu] \quad (4.1)$$

① 작용외력에 대한 변수

- H_i : 파고(wave height)
- L_i : 파장(wave length)
- T_i : 주기(wave period)

② 구조물의 기하학적 특성에 관한 변수

- B : 수류터널의 길이(length of wave duct)
- h_2 : 수류터널의 연직높이(vertical height of wave duct)
- h_d : 수심(water depth)

③ 수리현상에 대한 변수

- U_{\max} : 수평 최대유속(horizontal maximum velocity)
- η_{\max} : 최대 수면변동(maximum surface elevation)

④ 기타 물리적 성질 및 외력환경을 표현하는 변수

- ρ_w : 유체의 밀도(density of fluid)
- g : 중력가속도(gravitational acceleration)

μ : 점성계수(coefficient of viscosity)

여기서, B 는 수류터널의 길이, U_{\max} 는 수평 최대유속, n 는 내부에서의 수면변동값, h_d 는 설치 수심, h_2 는 수류터널의 연직길이, g 는 중력가속도, H_i 와 T_i 는 각각 파고와 주기를 나타낸다.

수류터널내부의 최대수위변화 n_{\max} 및 최대유속 U_{\max} 를 종속변수로 두고, 식(4.1)의 독립변수에서 H_i , ρ_w , T_i 를 반복변수로 하여 Buckingham의 π 정리를 이용하여 정리하였다. 각 차원량을 무차원량으로 정리하면, 무차원 최대 유속값과 수면 변동값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{n_{\max}}{H_i} = f\left(\frac{B}{H_i}, \frac{h_2}{H_i}, \frac{h_d}{H_i}, \frac{gT_i^2}{H_i}\right)$$

2.2 수리모형실험

2.2.1 실험장치

수리실험에 사용된 수류형 파력발전 장치의 모형은 발전부와 케이슨부로 2개의 부분으로 구성되어 있다.

케이슨부는 직육면체 형태의 케이슨형태로써 내부의 발전부 모형의 결합을 위한 공간을 포함하고 있다. 케이슨의 길이는 0.9 m, 폭은 0.48 m, 높이는 0.6 m로써 내부에 발전부가 결합되는 공간을 포함한 형태로 구성되어 있다. 케이슨부의 내부에는 속채움재를 투입하여 파압에 의한 활동이나 동요등의 구조물 안정성 부분에 관한 오차를 제어하였다.

발전부는 수류 터널을 가지는 L자형 수로의 형태로써 내부의 터널과 이와 연결된 배후면의 연직 수체 저장고를 포함하고 있다. 발전부 내로 입사한 파랑은 수평 연직터널을 거쳐 배후면의 저장고로 이동하여 에너지를

가지고 연직운동을 함으로써 왕복류를 만들어내며, 여기서 발생한 유속을 측정하여 변화를 검토하였다. 발전부의 크기는 길이 0.7 m, 폭은 0.34 m, 높이는 0.4 m이며, 각각 입구와 수류터널, 배후터널, 수체 저장고로 총 4개 부분으로 구성된 형태이며 아크릴재료를 이용하여 제작하였다. 입구부분에서 파랑의 입사관 부분은 내부로 유입되는 파랑에너지를 효과적인 집약을 위하여 입사관 좌·우측에 각각 30°의 각도를 주어 집약판을 설치하였으며 유입구 부분의 바닥면 경사는 약 10°의 경사를 주어 내부로 유입되는 수체의 유속을 효과적으로 증가시키고자 하였다. 수류터널의 크기는 폭 0.24 m, 높이 0.08 m의 직사각형 형태의 입구부를 시작으로, 전면으로부터 0.3 m지점에 유속계를 설치할 수 있도록 제작하였다. 배후터널은 수류터널과 연결되는 부분으로써 발전 부의 뒷부분으로 갈수록 면적이 넓어지는 방사형의 형태를 가지고 있으며 시작부분의 폭은 0.24 m이고 저장고와 연결되어 있는 부분의 폭은 0.29 m로 약 20% 정도 입구부보다 넓게 제작하였으며, 높이는 일정한 형태로 약 3°의 각도로 후면을 높게 제작하였다. 이는 단면 급확대로 인하여 급격한 유속의 변화를 방지하기 위한 목적이 있다. 수체 저장고는 상부가 개방되어있는 BOX형태로서 길이 0.15 m, 폭 0.29 m, 높이 0.34 m로 입사한 파랑에 의해 저장고내부에서 수괴는 연직으로 상하운동을 한다. 일반적으로 모형실험은 원형에 가까울수록 재현성이 우수하지만 실험진행의 효율성과 수조의 규모를 고려하여 모형과 원형의 축척비는 1:20을 적용하였다.(Fig. 2-2-1, 2-2-2, 2-2-3 참조)

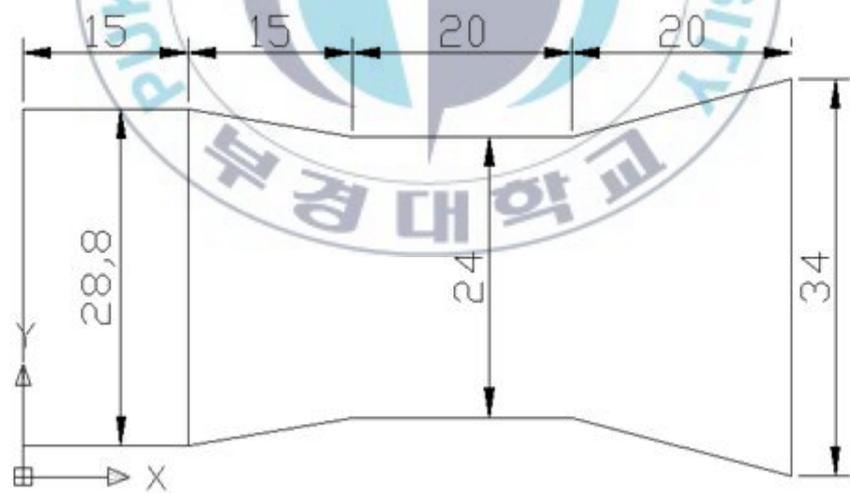


Fig. 2-2-1 A plane figure of experimental model(unit:cm).

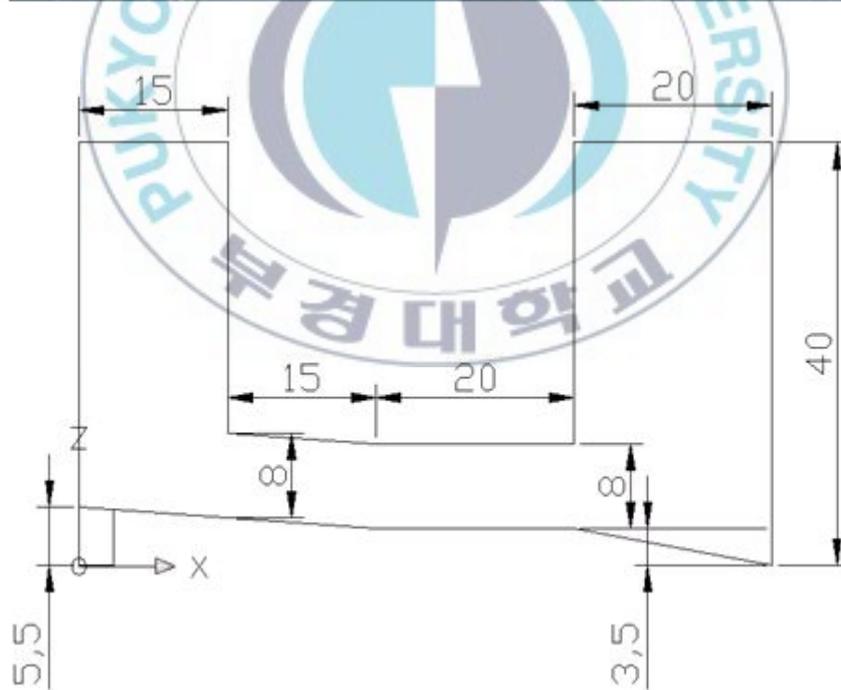


Fig. 2-2-2 A side view of experimental model(unit:cm).

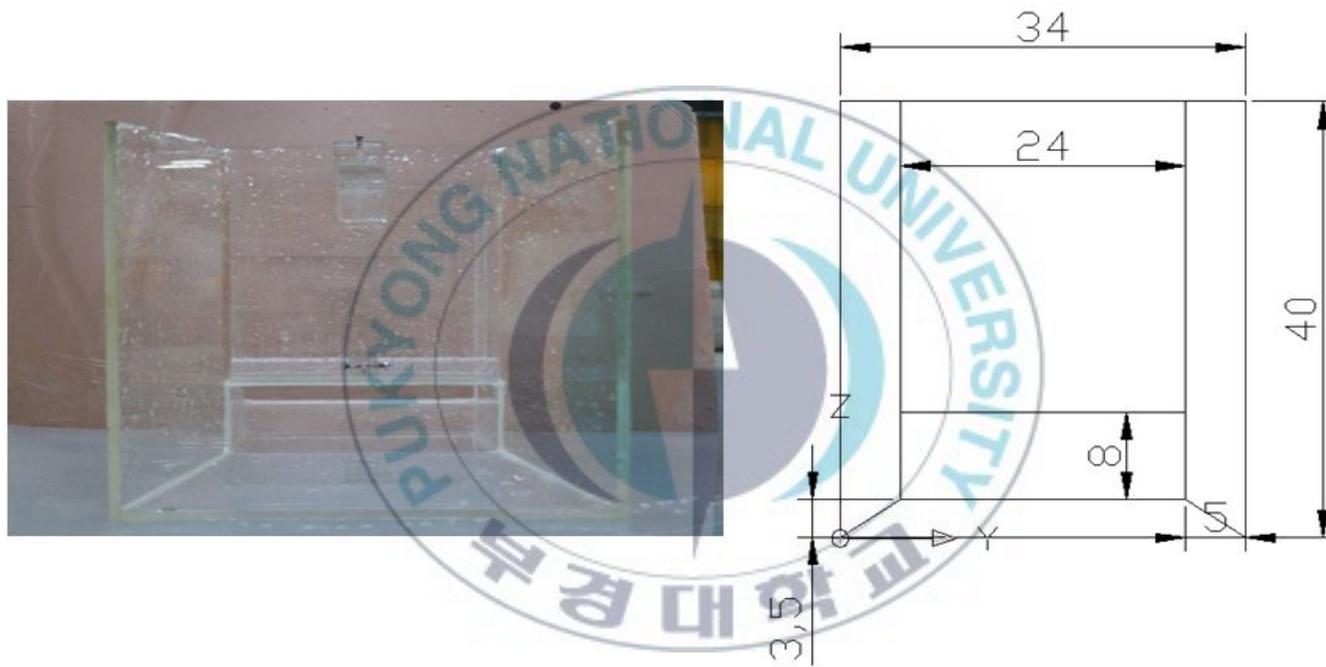


Fig. 2-2-3 A front view of experimental model(unit:cm).

본 수리모형실험은 부경대학교 내 해양수리실험소에 설치된 2차원 조파 수조에서 수행되었다. 수조의 크기는 35.0 m(길이)×1.0 m(폭)×1.0 m(높이)로 규칙 및 불규칙파랑의 조파가 가능하며 최대파고 0.3 m, 주기 2.5 sec, 최대 수심 0.8 m 적용이 가능하다. 수조 바닥에는 해저경사와 천수효과를 고려하여 스테인리스 재질의 일정경사(1:100)의 저면을 설치하였으며, 조파관 전면에서 경사가 시작되는 곳까지 수평으로 약 8 m의 일정수심구간을 두었다. 이는 조파기에 의해 생성된 파가 일정수심을 전파하며 발달할 수 있는 거리를 두기 위한 것이다.

유속을 측정하기 위해 사용된 계측기는 프로펠러 유속계(VP1000, VOT2-100-05N, KENEK Co.)로써 측정가능한 유속은 $\pm 3\text{--}\pm 190$ cm/s의 범위를 가지며, 왕복류 발생에 따른 양방향 유속측정이 가능하다. 유속계는 발전부의 수류터널 내부에 설치되어 공기혼입과 벽면 마찰의 영향을 고려하여 벽체와 일정간격을 두고 고정시켜 유속을 측정하였다.

Fig. 2-2-4에서 나타낸 것과 같이 모형의 내부와 전면에 설치된 전기용량식 파고계(CH-305, KENEK Co.)를 이용하여 배후 수체저장고의 수위변동을 측정하였다. 본 실험에서 사용된 2차원 수조 및 설치된 계측장비의 모식도는 Fig. 2-2-4와 같다.

2.2.2 실험조건

실험에 적용된 파랑조건은 다음 Table 2-2-1에 상세히 나타내었다. 본 연구는 실제 장치의 효율성을 평가하는 것보다 시스템 내부에 작용하는 수리특성에 관한 기초 파라미터의 분석에 보다 중점을 두어 규칙파를 적용하였다. 수리모형실험에서 적용된 파랑조건은 Table 2-2-1과 같으며 대상 해역의 평균 주기와 유의파고를 고려하여 산정하였다. 수류터널의 길이에 대한 수심의 비인 무차원수 B/h_d 의 값은 0.50이며, 수심에 대한 파장의 비인 h_d/L_i 는 0.1753-0.7011의 범위로 설정하였다. 실험수위는 쇄파가 발생하는 비선형적인 현상을 배제하기 위한 적용파고의 2배 이상의 수심으로 설정하였다. 파랑의 연직운동으로 인한 공기혼입은 내부의 유속측정에 영향을 가져오

기 때문에 수류터널의 입구, 전면부는 수면 아래에 위치하여 유속측정의 정확도를 높이고자 하였다.

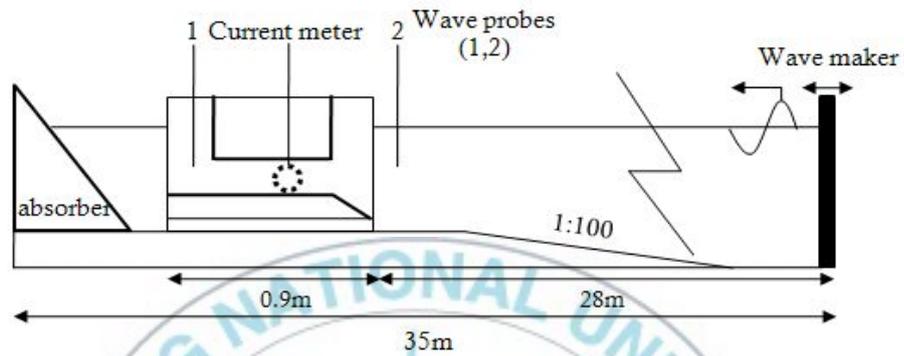


Fig. 2-2-4 Sketch of Experimental set up

Table 2-2-1 Experimental conditions

B/h_d	H_i (cm)	T_i (s)	h_d/L_i	Breaking	depth(h_d)
	2.5	0.8	0.7011		
0.50	5.0	1.2	0.3116	Non	70
	7.25	1.6	0.1753		

2.3 수치해석

본 연구에서는 수치해석프로그램 Flow-3D를 이용하여 입사하는 파랑으로 인한 수류형 파력발전시스템 내부의 2차원 유속분포와 수류터널 내부에서 수면변동을 해석하였다. 수치해석은 각각의 형상적 조건에 따라 수류터널 내부에서의 유속 변화 특성에 관한 분석을 실시하였고, 동일한 조건에서 수면 변동을 검토하였다. 최종적으로 형상적인 조건에 따른 전체적인 수리학적 파라미터들의 분포특성에 관한 검토를 수행하였다.

2.3.1 수치모델의 방법 및 제원

파력발전 장치 내부의 수리특성을 분석하기 위해 기본적으로 수치모형에 적용할 기본적인 구조물과 격자, 계산 방법을 본 절에서 설명하였다. 계산될 수치모델의 영역은 X축 방향의 총 길이 $l_x = 30.0$ m이고, X-min부분에 조파경계 조건을 주었으며, X-max 부분에서는 유출경계를 주어 조파경계에서 발생하는 파의 진행에 영향을 주지 않게 하였다. Y축방향의 총길이는 2차원 수치모형인 것을 고려하여 0.03 m이고, Z축 방향에 대해서는 일반적으로 수리실험에서 적용한 수심 0.7 m를 고려하여 총 높이를 1.0 m로 하였으며, Z-min과 Z-max에 대한 경계에는 각각 불투과성 바닥과 자유수면 경계조건으로 하였다.(Fig. 2-3-1 참조) 발전시스템 구조물 모형은 계산영역 중앙($x, y, z=1500, 1, 0$)에 위치시켰고, 계산영역의 총 격자수는 $x \times y \times z$ 는 $900 \times 1 \times 40$ 개이며, 수류터널내부의 유속에 대한 특성을 고려하기 위해 구조물을 대상으로 가변격자($\Delta x=0.01$ $\Delta y=0.03$ m, $\Delta z=0.007-0.01$ m)를 $x=15.0-16.0$ m, $z=0.40-0.60$ m의 범위에서 수류터널의 연직 길이를 고려하여 적용, 구조물 내부의 유속 및 수위변화값 측정에 대하여 정확도를 높였다.

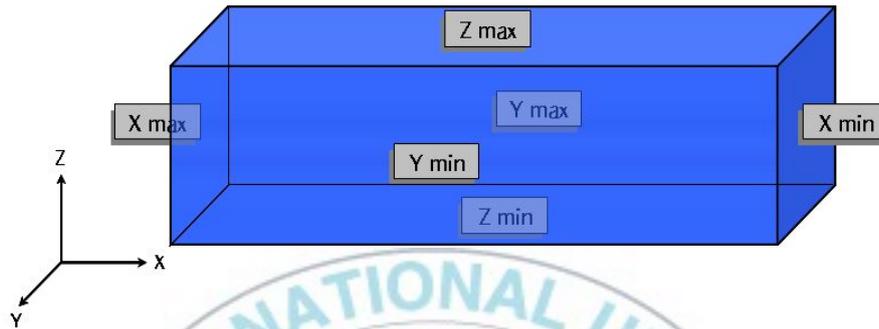


Fig. 2-3-1 Boundary of calculation area.

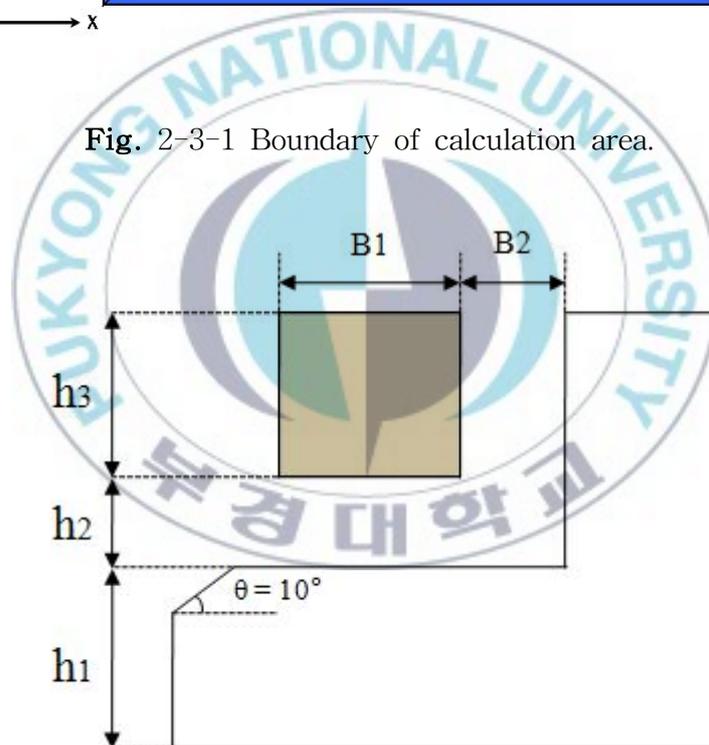


Fig. 2-3-2 Schematic of model structure for numerical analysis.

Table 2-3-1 Conditions of numerical test(unit:m)

H(m)	T(sec)	B1	B2	h1	h2	h _d
	0.9					
	1.0			0.560	0.040	
0.0250	5	0.150		0.540	0.060	
0.050	1.23	0.250	0.150	0.520	0.080	0.70
0.0725	1.34	0.350		0.50	0.10	
	1.45	0.450		0.480	0.120	
	1.57					

Fig. 2-3-2는 수치실험에서 적용된 파력발전시스템의 개념도를 나타내고 있다. 본 연구에서는 각각의 구역을 $h1 \sim h3$, $B1 \sim B2$ 로 구분하여 변화를 준 결과를 수치해석프로그램에 적용시켰다. 입구 전면에는 길이 20cm 경사판이 10° 의 각도로 설치되어 있으며, $B2$ 는 15cm로 전체 조건에서 동일하게 적용하였다. 수류터널 내부로 공기가 유입되는 것을 제어하기 위하여 $h3$ 은 정수면을 기준으로 ± 10 cm로 일정하게 설정하였다. 수치해석을 위해 내부에 적용되는 구조물은 FLOW-3D와 호환이 가능한 CAD프로그램을 이용하여 생성하였으며 각 부분의 상세치수와 적용 파랑조건은 Table 2-3-1에 기술되어있으며 각각의 조건들을 적용하여 수치해석을 실시하였다.

2.3.2 수치모델의 정식화

2.3.2-1 지배방정식

일반적인 질량에 대한 연속방정식은 다음과 같다.

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = RDIF + RSOR \quad (2.1)$$

여기서, V_F 는 흐름에 대해 열려있는 체적의 부분, A_x, A_y, A_z 는 각 방향에 대한 셀의 면적, ρ 는 유체의 밀도, u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의 유속 성분이다. 그리고 $RDIF$ 는 난류확산 항이고, $RSOR$ 은 질량소스에 대한 항이다. 식 (2.1)의 우변의 첫 번째 난류확산 항은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$RDIF = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_\rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_\rho A_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_\rho A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \quad (2.2)$$

여기서, 계수 ν_ρ 는 $c_\rho \mu / \rho$ 와 같다. μ 는 운동량확산 계수이고, c_ρ 는 상수로써 난류에 대한 Schmidt수이다. 난류확산의 형태는 불균질 밀도를 가지는 유체의 난류 혼합과정에 민감하다.

식 (2.1)을 비압축성 유체로 가정하면, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (w A_z) = \frac{RSOR}{\rho} \quad (2.3)$$

운동방정식은 Navier-Stokes 방정식에 다음과 같이 몇 개의 항이 추가되었다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F_x - \frac{RSOR}{\rho V_F} u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + F_y - \frac{RSOR}{\rho V_F} v \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + F_z - \frac{RSOR}{\rho V_F} w \end{aligned} \quad (2.4)$$

여기서 F_i 는 물체와 점성에 대한 가속도이고, $RSOR$ 항은 밀도소스 항이다. 본 모델에서 자유수면은 유체의 체적(VOF) 함수, $F(x,y,z,t)$ 의 항으로 정의되며 다음과 같다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial v}{\partial x}(FA_x u) + \frac{\partial v}{\partial y}(FA_y v) + \frac{\partial v}{\partial z}(FA_z w) \right\} = FDIF + FSOR \quad (2.5)$$

여기서,

$$RDIF = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_F A_x \frac{\partial F}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_F A_y \frac{\partial F}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_F A_z \frac{\partial F}{\partial z} \right) \right\} \quad (2.6)$$

FSOR항은 식 (2.4)에서의 밀도소스항인 RSOR과 같다. 이것은 유체에 대한 체적부분의 시간변화율을 의미한다. 단일 유체에 대해, F 는 유체에 의해 차지되는 부분의 체적을 나타내고, 두개의 유체에 대하여는 비압축성 유체 요소의 체적의 부분을 나타내며, 보완영역의 체적의 부분(1-F)은 서로 일정한 밀도로 가질 수 있는데, 그에 대한 밀도는 비압축성유체의 상태 방정식으로부터 계산되어진다.

2.3.2-2 자유수면 표현기법(VOF)

VOF방법에서 각 셀의 체적비율은 다음의 수송 방정식을 계산하여 시간에 대해 전개된다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (2.7)$$

고정 격자계상의 검사체적에 대해서 유체가 차지하고 있는 체적 비율을 정의할 때, 유체의 영역에 완전히 포함되어 있거나 그 외부 영역에 있는 경우와 달리 자유 표면이 걸쳐있다고 간주되는 검사 체적에서는 체적 비율

의 변화가 생긴다. 이러한 경계면에 걸쳐있는 검사 체적과 이웃하는 검사 체적간의 체적 비율의 변화는 자유 표면의 기울기에 대한 정보를 내포한다. 이와 같이 경계면에 걸쳐있는 각각의 검사체적에 대해 내포되어 있는 자유 표면의 기울기에 대한 정보를 무시하고 VOF 방법을 적용하는 경우 수치 확산에 의해 자유 표면의 위치가 흐려지는 현상이 생긴다. 이러한 현상을 방지하기 위한 대표적인 기법이 각 계산 방향에 대하여 셀 표면을 지나는 체적 유량을 계산하고 이를 이용하여 표면을 전진시키는 donor-acceptor 방법이다. 이 방법의 기본적인 개념은 경계면을 통과하는 체적 비율의 유량을 계산할 때 자유 표면의 형상에 따라 donor 셀의 체적 비율 값뿐만 아니라 acceptor 셀의 체적 비율도 사용해서 자유 표면의 확산을 막는 방법이다. x 방향의 계산에서 이동하는 체적 비율의 양은 각 제어체적의 오른쪽 경계면에 대해서 계산되며 donor와 acceptor의 설정은 Fig. 2-3-3과 같이 제어 체적의 오른쪽 경계면을 통과하는 속도가 양이면 donor, 음이면 acceptor가 된다.

통과하는 단위 면적당 체적 비율의 양은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta F = \text{MIN}\{F_{AD} |V| + CF, F_D \delta x_D\} \quad (2.8)$$

여기서 하첨자 D는 donor 셀을 뜻하고 AD는 자유 표면의 형상에 따라 donor 셀 또는 acceptor 셀을 가리킨다. 또한 V는 셀 경계면을 통과하는 기체와 액체의 단위 면적당 이동량($u \delta t$)으로 이 값이 양이면 donor cell, 음이면 acceptor cell이 된다. 식(2.8)에서 MIN함수는 donor 셀이 실제 가지고 있는 양보다 더 많은 양이 유출되는 것을 막아주는 역할을 하고 CF는 기체의 유량이 유출 가능한 양을 초과했을 때 발생하는 추가적인 유량을 나타내며 식(2.9)과 같이 표현된다.

$$CF = \text{MAX}\{(1.0 - F_{AD}) |V| - (1.0 - F_D) \delta x_D, 0.0\} \quad (2.9)$$

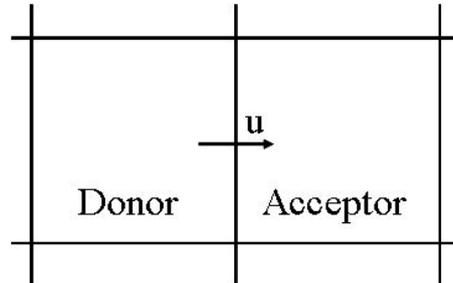


Fig. 2-3-3 Definition of donor and acceptor.

여기서는 수치확산을 방지하기 위한 F_{AD} 의 결정이 중요하다. 이것은 자유표면의 방향에 의해 좌우되는데 유체가 자유표면에 수직인 방향으로 움직일 때만 acceptor 셀의 값을 사용하고 그렇지 않을 때는 donor 셀의 값을 사용한다. 그러나 acceptor 셀이 비어있거나 donor 셀의 상류쪽 셀이 비어 있을 때는 자유표면의 방향에 상관없이 acceptor 셀의 값을 사용한다. 이는 donor 셀의 액체가 하류의 비어있는 셀에 유입되기 위해서는 반드시 donor cell이 가득차 있어야 한다는 것을 뜻하며 이로 인해 수치 확산이 방지된다. 이러한 방법으로 계산된 δF 에 셀 경계면의 면적을 곱하면 이동하는 체적 비율의 양을 구할 수 있고, 이 값을 acceptor 셀에 더하고, donor 셀에서 빼면 다음 시간단계에서의 자유표면의 형상이 나타내어진다. 이와 같은 방법으로 모든 셀에 대하여 계산하면 계산상의 오차로 인하여 체적비율이 1보다 크거나 0보다 작은 셀이 생기게 된다. 계산이 끝난 후 이와 같은 체적비율을 가진 셀은 물리적으로 타당한 값을 가지도록 조정해 주어야 하는데 일반적으로 체적비율이 10^{-6} 보다 작은 곳은 0으로 조정하고 $1-10^{-6}$ 보다 큰 곳은 1로 조정하는 것이 정확한 결과를 산출한다고 알려져 있다. 또한 한 시간 단계의 계산 후 체적비율이 0과 1사이의 값을 갖는 셀에 대하여 유체의 물성치를 변경해 주어야 하는데 식(2.10), (2.11)와 같이 액체와 기체의 물성치를 선형 보간하여 사용한다.

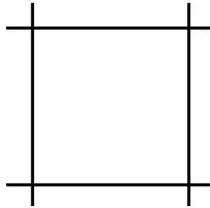
$$\rho = \rho_l F + \rho_g (1 - F) \quad (2.10)$$

$$\mu = \mu_l F + \mu_g (1 - F) \quad (2.11)$$

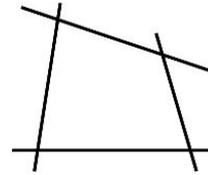
2.3.2-3 구조물 형상의 처리기법(FAVOR)

복잡한 형상의 모델링에 대해 FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation) 방법은 유한요소나 body-fitted 좌표 방법에 비해 아주 간단하다. FAVOR 개념은 격자가 구조물인지 아닌지, 직사각형 또는 왜곡된 요소를 포함하는 격자인지에 연관되어 사용된다. 직사각형 격자에 대한 한 가지 단점으로 구조물 격자가 국부 영역에서 정도를 높이기 위해 변형될 수 없다는 점을 들 수가 있는데, FAVOR 방법에서 경계면은 하나의 격자와 그 위치가 기록됨으로써 격자의 변형을 통해서가 아니라 격자의 체적비와 면적비의 향으로써 표현이 가능하며, 변형된 격자 기법처럼 수치적으로 근사한 결과를 산출할 수 있다. 일반적으로 격자의 형성은 모델링하고자 하는 영역을 일련의 작은 제어 체적으로 나누는 과정이라 할 수 있는데, 제어 체적에는 속도, 온도, 압력 등 한개 이상의 종속유동변수가 존재하며 이들은 일종의 국지적으로 평균화된 값이다. 그리고 이 값들은 질량, 운동량, energy 보존법칙을 나타내는 수치적 과정에 의해 각 제어 용적 안에서 계산된다. 계산 격자는 유체의 운동에 따라 변형하는 격자(Lagrangian 격자) 또는 고정된 격자(Euler 격자)가 있으며, 때로는 이 둘을 모두 사용하여 유동 격자의 변형을 최소화하기도 한다(Arbitrary-Lagrangian-Eulerian 격자).

또한 격자는 구조적 또는 비구조적 형태를 지닐 수 있다. 구조격자는 그 요소 형상에 따라 여러 형태를 취할 수 있다. 가장 간단한 격자는 격자의 각 면이 이 격자의 면에 평행한 직각요소로 나누어진 직각 격자로부터 생성될 수 있다. 대부분 이 요소들은 x,y,z 방향으로 순서대로 정돈되어 격자 요소(i, j, k)는 x 방향의 i-th 요소, y 방향의 j-th 요소, 그리고 z 방향의



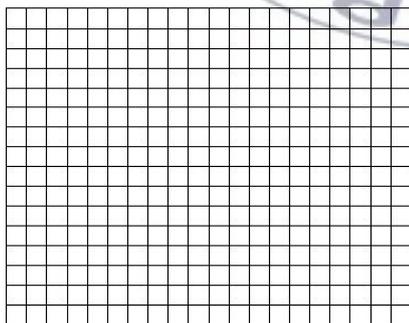
< fixed orthogonal of cell >



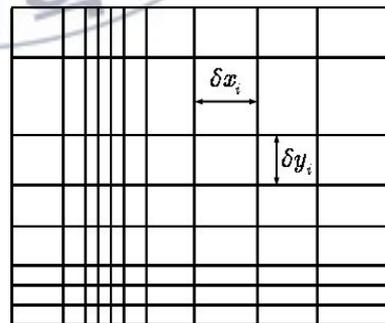
< fixed non-orthogonal cell >

Fig. 2-3-4 Control volume choices.

k-th 요소가 된다. 이러한 규칙적으로 구성된 격자는 가장 단순한 구조를 가지며 각 요소 면을 정의하는 요소의 x, y, z값을 저장하기 위해 3개의 1차원 행렬을 필요로 한다. 만일 I, J, K가 각 방향의 최대값이라면 격자를 정의하기 위한 전체의 수는 I+J+K이다. 요소가 계단형식으로 변하는 격자를 가지는 직각격자는 수치해석의 정확도를 유지해 주는 일반성을 보인다. 그러나 일반적으로 형상표면에 있는 직각 격자 요소가 고려가 되지 않아 경계가 계단과 같은 불연속성을 나타나게 된다. 이러한 불연속 경계는 유동의 손실과 바람직하지 않은 임의의 효과를 발생시킨다.



< uniform rectangular cell >



< variable rectangular cell >

Fig. 2-3-5 Shape of meshing in control volume.

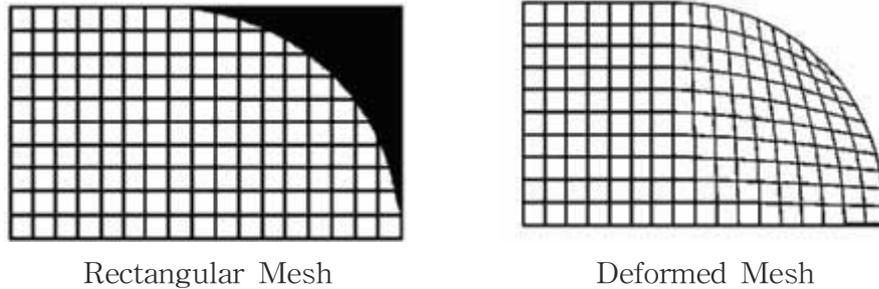


Fig. 2-3-6 Comparisons of rectangular and deformed mesh.

일반적으로 곡선형 경계표면의 표현 방법에는 두 가지 방법이 있다. 하나는 격자요소를 특정 형상에 일치시키는 것인데, 이때의 요소는 일반적으로 육면체의 형태를 취하며 이런 격자를 body-fitted 격자라고 불린다. 다른 하나는 직각요소를 유지하면서 내부의 경계면을 정의하는 방법을 이용하는 것인데 이 기법이 FLOW-3D에서 사용되는 FAVOR 기법이다.

보통 육면체 요소는 각 모서리를 정의하기 위해 전체 격자에 대해 $3*(I+1)*(J+1)*(K+1)$ 값이 필요하다. 이는 직각격자에 필요한 $I+J+K$ 값보다 훨씬 많다. 또한, 면적 또는 체적과 같은 3차원 행렬의 저장에 의해 계산의 실행을 하지 않는데, 이는 많은 저장 memory를 필요로 하고 재사용에 상당한 시간이 걸린다. 그리고 직각형상이 아닌 요소의 뒤뜰린 형상은 다른 여러 결과를 수반하게 되는데, 그 중 하나가 수치적 근사가 체적요소의 중심에 있지 않으므로 수치의 정확성을 저하시킨다는 것이다. 이러한 단점은 뒤뜰림에 의해 가능해진 국부 격자의 분배를 증가시킴으로써 보완될 수 있으나, 이는 또 다른 뒤뜰림에 의해 수치적 근사가 더욱 복잡해지게 된다. 힘과 유출량이 요소면에 수직이면서 평행하게 이루어져야 할 뿐만 아니라, 관심 요소의 모든 주변 요소로부터의 값들을 포함하는 것이 요구된다. 가장 좋은 격자체계의 조건으로는 생성 용이성, memory 필요, 수

치정확도, 복잡한 형상에 일치 할 수 있는 유연성, 그리고 국지적으로 mesh를 증감시킬 수 있는 신축성 등이 있다. FAVOR 방법은 형상을 격자 내부에서 물체에 의해 막혀진 각 요소의 부분 용적 및 부분체적을 계산함으로써 정의되는데, 이 방법은 세부부분의 면적 및 하나의 체적부분을 저장함에 있어서 body-fitted 격자와 비교할 때 아주 적은 용량을 필요로 한다. FAVOR의 기본 개념은 수치적인 구조가 각 격자 내에서의 압력, 속도, 온도 등에 대한 정보에 의해 이루어지지만, 형상을 정의하기 위해 과도한 양의 정보를 사용하지 않고, 직각요소의 단순함을 유지하면서 각 격자의 체적 안에서 평균 유동량과 일치하는 수준에서 자유표면의 복잡한 형상을 나타낼 수 있는데, 이는 격자와 형상은 FAVOR 기법에서 거의 상관없이 정의될 수 있다고 할 수 있다.

2.3.2-4 수치적 접근

(1) 유한차분법

본 모델은 고정된 직사각형 격자에 유한차분 근사를 사용하였다.

각 셀에서 모든 독립변수들의 국부적인 평균치와 결합된다. 속도는 셀 표면에 위치하고, 다른 변수들은 셀의 중앙에 위치된다. 곡선의 장애물, 벽체의 경계, 그리고 다른 형상들은 면적비와 흐름에 대한 격자의 체적비로 정의된다. 지배방정식을 수치적으로 푸는데 사용되는 유한차분 격자체계는 폭, 너비, 높이에 대한 직사각형 격자들로 구성된다. 그리고 모든 변수들은 Fig. 2-3-7와 같이 위치한다.

격자 (i, j, k) 와 $(i+1, j, k)$ 사이의 면에 위치한 $i+1/2$ 에서의 속도 u 는 $u_{i,j,k}^n$ 로 표시된다. 여기서 첨자 n 은 n 번째 시간 스텝을 말한다. 이와 유사하게, $F_{i,j,k}^n =$ 시간 스텝 n 에서 격자 (i, j, k) 의 중앙에서의 유체부분 (스칼라변수 $p, \rho, I, k, \epsilon, \mu$ 에 대해서도 동일)를 나타낸다. 그리고, $u_{i,j,k}^n =$ 시간 n 에서 격자면 $i+1/2$ 의 중앙에서의 x -방향 속도(v, w 에 대해서도 동일)를, $AFR_{i,j,k} = i+1/2$ 격자표면의 중앙에서의 면적 A_x 의 면적의 부분 (다른 격자

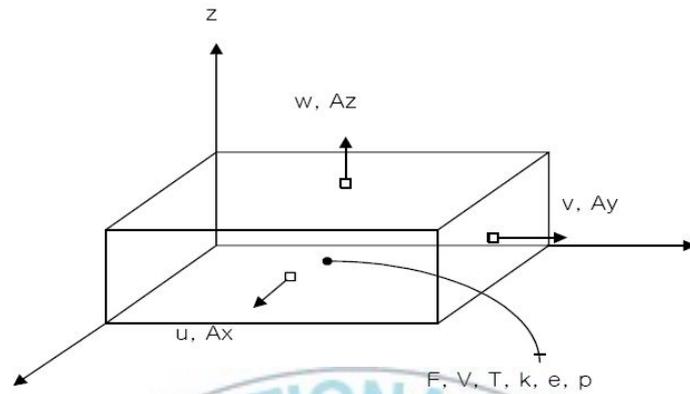


Fig. 2-3-7 Location of variables in a mesh cell (staggered grid arrangement).

에 대해서도 동일)를 나타낸다. 운동방정식의 시간에 따른 해를 구하는 기본적인 과정은 다음과 같다.

- 1) 운동방정식의 양함수의 근사는 새로운 시간 스텝의 속도에 대한 초기의 추정값을 계산하는데 사용된다.
- 2) 연속방정식을 만족하기 위해, 압력은 각 격자에서 반복적으로 계산되어 조정되고, 각 압력 변화에 의해 야기되는 속도 변화는 1)에서 계산된 속도에 추가된다.
- 3) 자유표면이나 유체경계가 있을 때는 새로운 유체형상에 대한 방정식을 적용하면서 추가 되어야 하고, 난류량 또한 이 단계에서 추가된다. 각 시간 단계에서 적절한 경계조건은 모든 격자, 구조물, 자유수면에서 부과되어야 한다.

운동방정식에 대한 일반적인 유한차분의 근사형태는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
u_{i,j,k}^{n+1} &= u_{i,j,k}^n + \delta t^{n+1} \left[\frac{p_{i+1,j,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1}}{(\rho \delta x)_{i,j+1/2,k}^n} + G_y - FUX - FUY - FUZ + VISX - WSX \right] \\
v_{i,j,k}^{n+1} &= v_{i,j,k}^n + \delta t^{n+1} \left[\frac{p_{i+1,j,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1}}{(\rho \delta y)_{i,j+1/2,k}^n} + G_y - FVX - FVY - FVZ + VISY - WSY \right] \\
w_{i,j,k}^{n+1} &= w_{i,j,k}^n + \delta t^{n+1} \left[\frac{p_{i+1,j,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1}}{(\rho \delta z)_{i,j+1/2,k}^n} + G_z - FWX - FWY - FWZ + VISZ - WSZ \right] \quad (2.12)
\end{aligned}$$

여기서, $(\rho \delta x)_{i+1/2,j,k} = (\rho_{i,j,k}^n \delta x_i + \rho_{i+1,j,k}^n \delta x_{i+1})/2$, FUX 는 x 방향에서 이류 유량 u , $VISX$ 는 x 성분 점성가속도, WSX 는 x 방향에서 점성벽면가속도, G_x 는 중력, 회전, 일반적인 비관성(non-inertial) 가속도를 의미한다.

(2) 연속방정식에 대한 압력해의 구성

비압축성 유체에 대해, 연속방정식은 격자의 압력과 속도상의 타원형조건으로 직접 해석될 수 있다. 운동방정식으로부터 계산된 속도는 제한된 압축성 연속방정식에 대한 다음의 이산화한 근사를 만족해야 한다.

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{1}{\rho c^2} \right)_{i,j,k} \cdot V_{F_{i,j,k}} (p_{i,j,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^n) / \delta t \\
& + (u_{i,j,k}^{n+1} AFR_{i,j,k} - u_{i-1,j,k}^{n+1} AFR_{i-1,j,k}) / \delta x_i \\
& + (v_{i,j,k}^{n+1} AFB_{i,j,k} - v_{i,j-1,k}^{n+1} AFB_{i,j-1,k}) / \delta y_i \\
& + (w_{i,j,k}^{n+1} AFT_{i,j,k} - w_{i,j,k-1}^{n+1} AFT_{i,j,k-1}) / \delta z_i \\
& + (u_{i,j,k}^{n+1} AFR_{i,j,k} - u_{i-1,j,k}^{n+1} AFR_{i-1,j,k}) / XC_i - (RSOR/\rho)_{i,j,k} = 0 \quad (2.13)
\end{aligned}$$

여기서, XC_i 는 격자 i 의 중앙의 x방향의 위치이고, $RSOR/\rho$ 항은 격자에서 유체의 체적을 나타낸다. 위의 방정식을 만족하는 속도에 대하여, 압력을 정하는 것이 필요하고, 따라서 각 계산격자에서의 속도는 유체에 의해 결정된다.

(3) 경계조건

모든 구조물과 자유 경계표면은 0의 접선응력을 가지는 표면으로써 Free-slip 경계를 사용한다. 이 조건은 흐름이 0인 면적을 가지는 격자의 표면에서부터 하나 또는 그 이상의 속도 성분을 사용하여 계산되는 모든 속도의 도함수를 0으로 부과된다. 또한 격자 체계의 경계에서 0이 아닌 접선의 벽면 속도를 가질 수 있다. 만약 $i=1$ 인 격자가 임의의 격자이고 고체 벽면이라면, 법선속도는 0이 되어야 한다. 구조물의 벽면에서의 경계조건은 모든 j, k 에 대해서 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 u_{1,j,k} &= 0.0 \\
 p_{1,j,k} &= p_{2,j,k} \\
 F_{1,j,k} &= F_{2,j,k} \\
 \rho_{1,j,k} &= \rho_{2,j,k} \\
 (\rho I)_{1,j,k} &= (\rho I)_{2,j,k}
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

임의 격자에서 접선속도는 사용하지 않고, Free slip 조건은 벽면을 가로지르는 모든 속도의 도함수가 자동적으로 0으로 한다.

고정된 속도 또는 고정된 압력경계에서 하나는 $F, \rho, \rho I$, 접선속도, 법선속도 또는 압력에 대한 유입값을 설정해야 한다. 특히, 압력과 온도는 유동의 상태방정식의 경계조건과 일관되게 실행하기 위해 ρ 와 ρI 를 변화시킨다. 고정압력경계는 고정된 속도의 경우와 약간 다르게 처리된다. 고정압력경계가 요구될 때, 압력이 정의에 의해 새로운 추가 경계 격자들을 만들어 낸다. 만약 압력이 국부정적압력이라면, 속도 도함수 조건이 0인 격자가 추가로 부과된다.

유체가 상류영향이 없이 격자의 바깥으로 부드럽게 흐르기 위한 연속적인 유출경계는 낮은 속도 또는 비압축성 흐름에 대한 문제가 자주 생긴다. 흐름이 계산영역 바깥으로 향할 때, 연속경계조건은 모든 법선 미분계수의 소멸이다.

$$\begin{aligned}
u_{i,j,k} &= u_{2,j,k} \\
v_{1,j,k} &= v_{2,j,k} \\
w_{1,j,k} &= v_{2,j,k} \\
p_{1,j,k} &= p_{2,j,k} \\
F_{1,j,k} &= F_{2,j,k} \\
\rho_{1,j,k} &= \rho_{2,j,k} \\
(\rho I)_{1,j,k} &= (\rho I)_{2,j,k}
\end{aligned} \tag{2.15}$$

x 방향의 주기경계조건에 대해, $i=1$ 과 $i=IMAX$ 모두 경계가 주기성에 반영되어야 한다. x 방향에서 주기적 흐름에 대한 조건은 $i=1$ 에서 모든 j, k 에 대해,

$$\begin{aligned}
u_{1,j,k} &= \frac{1}{2}(u_{IM2,j,k} + u_{1,j,k}) \\
v_{1,j,k} &= v_{IM2,j,k} \dots \\
u_{IM2,j,k} &= \frac{1}{2}(u_{IM2,j,k} + u_{1,j,k}) \\
u_{IM1,j,k} &= u_{2,j,k} \\
v_{IM1,j,k} &= v_{2,j,k} \dots
\end{aligned} \tag{2.16}$$

여기서, $IM1=IMAX-1$ 이고, $IM2=IMAX-2$ 이다. 이러한 조건은 운동방정식으로부터 계산된 속도에 부과된 후 각 압력을 반복계산하게 된다. 수치적 안정성을 피하기 위해서는 약간의 제한이 필요하다. 그래서 다음의 조건을 만족하는 시간 스텝을 선택해야 한다.

첫째, 유체는 한 시간스텝에서 하나의 계산격자 이상 교차하여 흐르지 못한다. 이 이류수송은 속도뿐만 아니라, 흐름에 대한 면적/체적의 부분도 포함한다. 기본적인 안정조건은 다음과 같다.

$$\delta t < CON \cdot \min\left(\frac{V_F \delta x_i}{A_x u}, \frac{V_F \delta y_j}{A_y v}, \frac{V_F \delta z_k}{A_z w}\right) \quad (2.17)$$

여기서, (u, v, w) 는 속도의 크기이고, $CON=0.45$ 는 아주 불안정한 경우에 대해 사용되어 진다.

안정조건의 다른 형태로 자유표면 또한 표면파의 전달과 관련된다. 만약 가속도 $ACCN$ 이 자유표면에 접선방향으로 유체에 적용된다면, $\sqrt{ACCN \cdot h}$ 항의 속도로 표면파가 될 수 있다. 여기서 h 는 유체의 깊이 또는 파의 길이이다. 표면파가 하나의 시간스텝에서 하나의 격자 이상 진행하지 못한다고 하면, 다음식과 같다.

$$\delta t < 0.5 \frac{\min\{\delta x_i, \delta y_j\}}{\sqrt{\delta z_k \cdot ACCN}} \quad (2.18)$$

선형 해석은 시간스텝에서 동점성이 0이 아닌 값이 사용될 때 더욱 제한된다. 이에 대한 조건은 다음과 같다.

$$\delta t < 0.25 / \max\left\{RM \cdot \frac{\mu}{\rho} (1/\delta x_i^2 + 1/\delta y_j^2 + 1/\delta z_k^2)\right\} \quad (2.19)$$

여기서, RM 은 확산과정의 모든 형태에 대해 μ 에 사용된 최대 곱이다.

2.3.3 수치모델의 검증

수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여 기존의 연구결과와 비교 분석을 실시하였다. 비교대상으로 사용한 결과는 각각 불투과 잠체에 대한 수치실험결과와 함께 잠체전면에서 발생하는 반사파에 대한 연구결과를 이용하였다. 수치실험결과는 Losada(1997)와 Hur(2003)가 수행한 결과를 토대로 하였으며, 반사파에 대한 검증은 Cho(2006)가 실시한 실험을 검증대상으로 선정하였다. Fig. 2-3-8은 Hur(2003)의 자료를 바탕으로 잠체의 전

면과 천단, 배후에서의 파형변화를 비교하였다. 실험 조건은 2차원 조파수조를 이용하고, 파고 0.07 m, 주기 1.0sec의 규칙파를 적용하였으며 잠제의 천단으로 파랑이 진행할 때 각각의 위치에서 파형을 측정된 데이터를 비교 대상으로 하였다. 실험에 사용된 잠제의 제원은 길이 1.0 m 천단고 0.30 m의 직사각형 형상이며, 실험 수심은 0.40 m이다. 잠제의 전·후면과 천단의 3곳에서 측정된 결과이며 수치모델의 조건 역시 실험과 동일하게 조건으로 해석을 실시하였다. 검증은 비교대상 조건과 동일하게 적용하였으며, Fig. 2-3-8에서 나타난 것과 같이 잠제의 전·후면과 천단에서 측정된 파형은 본 수치모델의 파형데이터와 비교적 좋은 일치율을 보이는 것을 확인할 수 있다. Fig. 2-3-9는 수심 0.475 m에서 길이 0.80 m, 0.385 m의 천단고를 가지는 직사각형 잠제에 대해 파고 0.0429 m와 주기 1.8 sec조건을 적용한 데이터이다. 잠제의 전면의 우각부 끝단을 $x=0$ 으로 기준을 설정하여 CH1=-0.04 m, CH2=0.04 m, CH3=0.68 m, CH4=2.12 m에서 수위변화를 계측하였다. CH1에서는 실험데이터와 수치해석데이터의 파형은 거의 일치함을 확인할 수 있었으며, CH2에서 전체적으로 파고가 감소한 파형을 보였고, CH3에서는 파곡부분에서 모델의 파형이 변형되었다. CH4에서 파형은 실험치와 다소 상이한 결과가 나타났지만 Peak값의 발생은 모델치와 실험치가 일치하였다. 상이한 결과차이는 실험조건과 수치조건과의 차이와 기타 변수로 인한 것으로 사료된다. Fig. 2-3-10은 Cho(2006)에 의해 수행된 결과로서 수심 0.80m의 2차원 수조에서 천단폭 0.40 m, 마운드폭 1.60 m, 천단고 0.40 m의 사다리꼴 잠제의 반사율을 본 수치모델을 통해 비교한 그래프이다. kh 값이 따른 반사계수 값은 $kh=0.5-1.4$ 의 범위에서 비교적 실험치와 좋은 일치율을 보였으며 이후의 범위에서는 실험치와는 약간의 차이를 보였지만, Cho(2006)의 실험치와 비교대상으로 선정된 VOF모델의 반사율 결과와는 좋은 일치율을 보였다. 본 수치해석에서 사용된 FLOW-3D의 검증결과는 비교대상으로 선정된 데이터들과 전체적으로 양호한 것으로 판단되었으며 이는 본 연구에서 VOF법에 기초한 FLOW-3D의 수치해석 결과의 타당성을 높일 수 있을 것이라 예상된다.

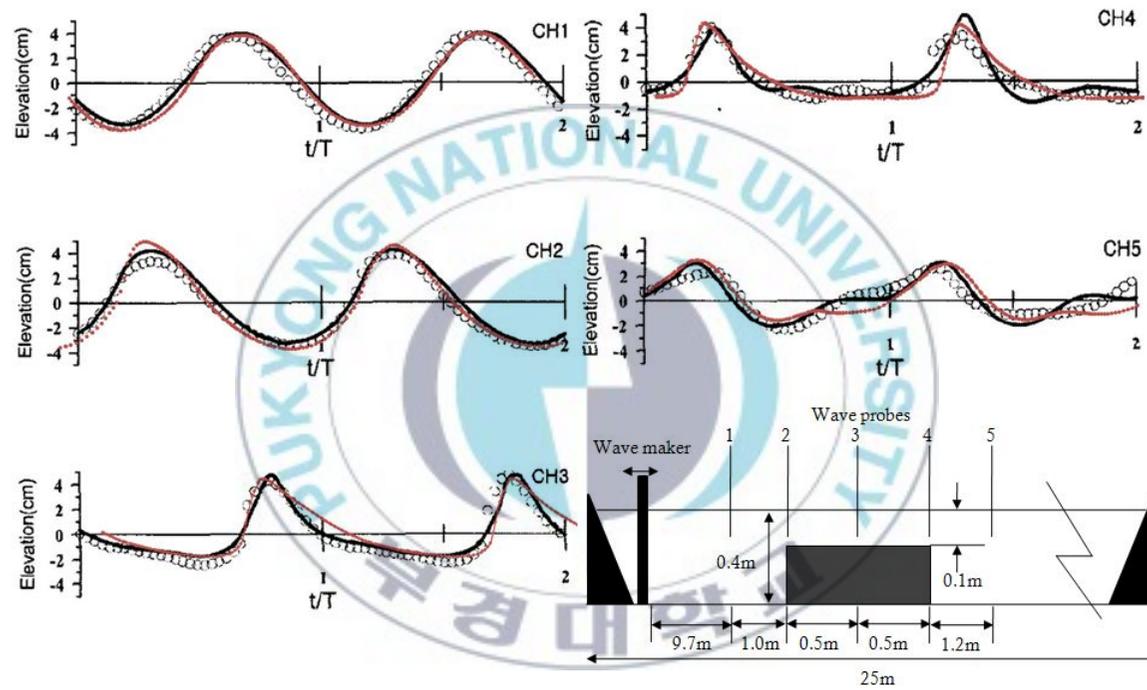


Fig. 2-3-8 Comparison between calculation results and hydraulic experimental data (Hur, 2003) ○:Experimental data ●:Flow-3D result.

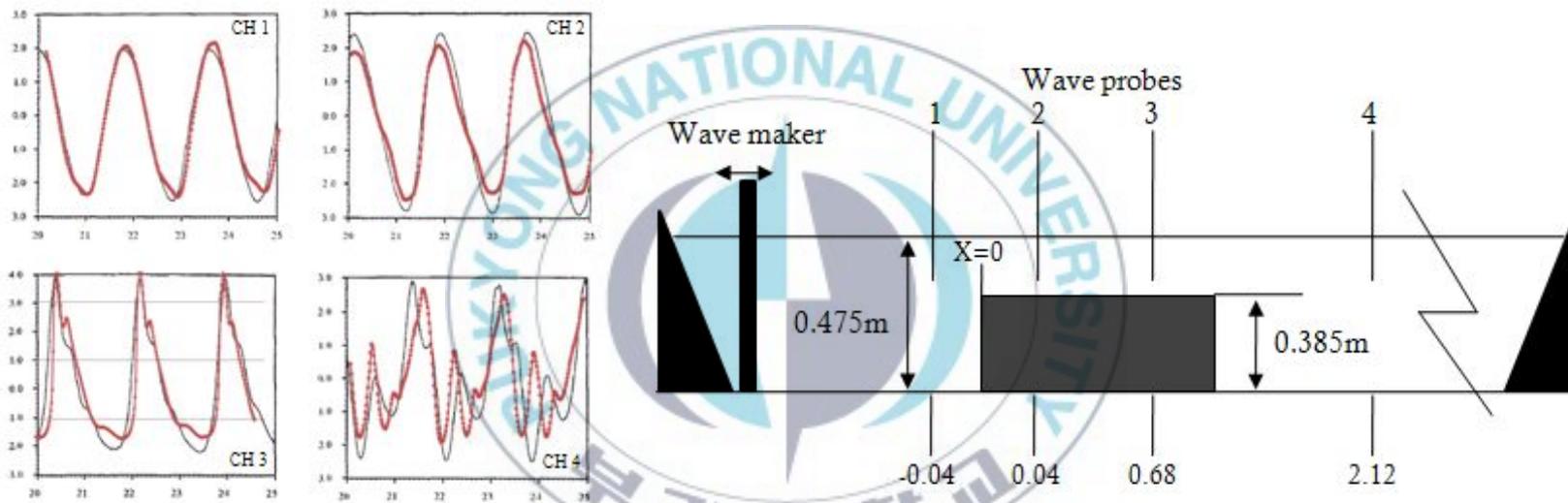


Fig. 2-3-9 Comparison between calculation results and hydraulic experimental data (Losada, 1997)

○: Experimental data ●: Flow-3D result.

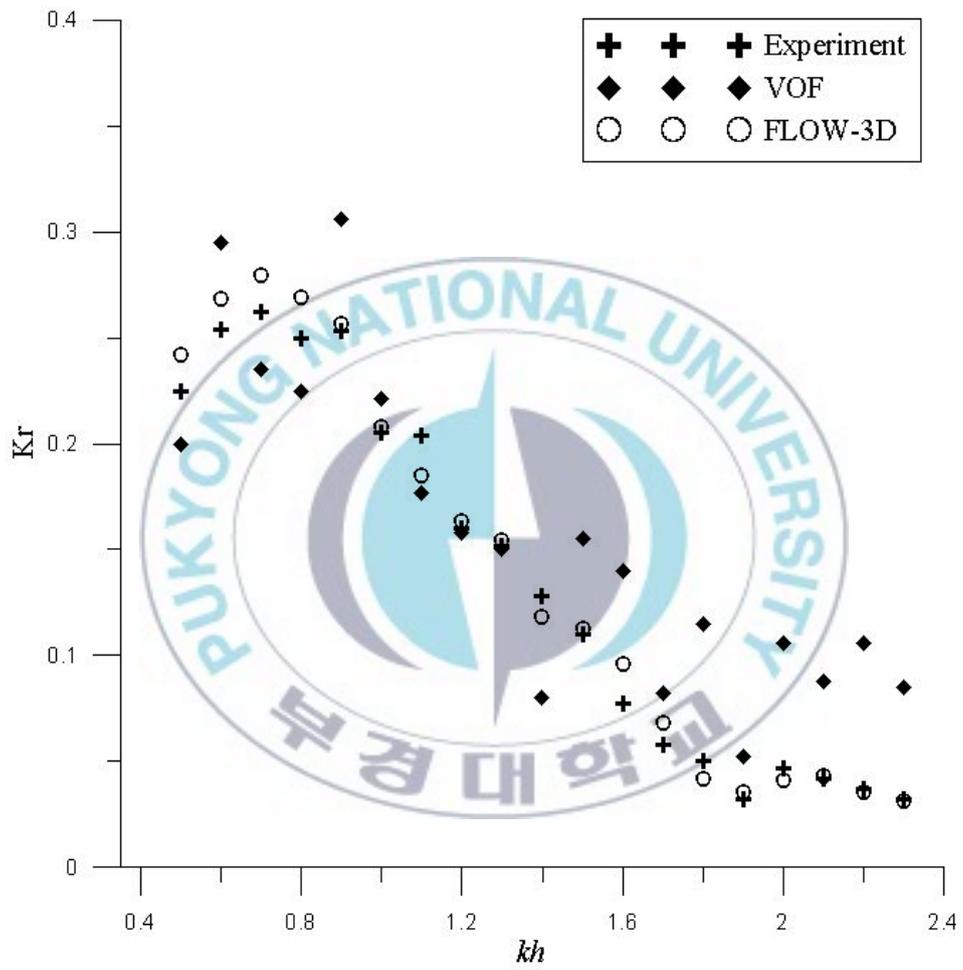


Fig. 2-3-10 Comparison reflection coefficients(Cho, 2006).

3. 결과 및 분석

3.1 수리모형실험 결과 및 분석

3.1.1 수류터널 내부의 유속변화특성

본 장에서는 수리모형실험을 통해 계측된 무차원 수류터널 내부의 길이에 따른 무차원화 된 최대 유속값을 파랑조건에 따라 분석해보았다. 수리모형 실험 결과는 동일 조건의 수치해석값을 비교대상으로 선정하여 결과값의 분포특성을 비교분석하였다.

(1) Fig. 3-1-1에 나타난 $H/h_d=0.036$ 인 조건에서 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 의 분포특성을 정리하면 다음과 같다.

① $h_d/L_i=0.175-0.701$ 에서 최대 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}=0.13$ 으로 나타났으며 이 구간 이후로 h_d/L_i 값이 증가함에 따라, 파장이 짧아짐에 따라 유속은 급격히 감소하였다. 이는 주기가 짧아짐으로 인해 파랑이 갖는 에너지의 감소로 인한 것으로 판단된다.

② $h_d/L_i=0.175-0.701$ 의 모든 범위에서 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 값은 수치해석의 결과보다 수리실험의 결과값이 보다 다소 정도의 차이는 있지만 전체적으로 감소한 값을 보였으며. 이는 수리모형실험과 수치모형실험간의 차이에 따른 것으로 판단된다. 실제 수리모형실험에서는 다양한 변수들이 작용할 가능성이 높고, 3차원적인 효과로 인한 손실이 발생한 것으로 사료하였다.

③ $h_d/L_i=0.701$ 의 조건에서 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 값은 평균 0.013 으로서 비교적 유사한 값이 나타났다.

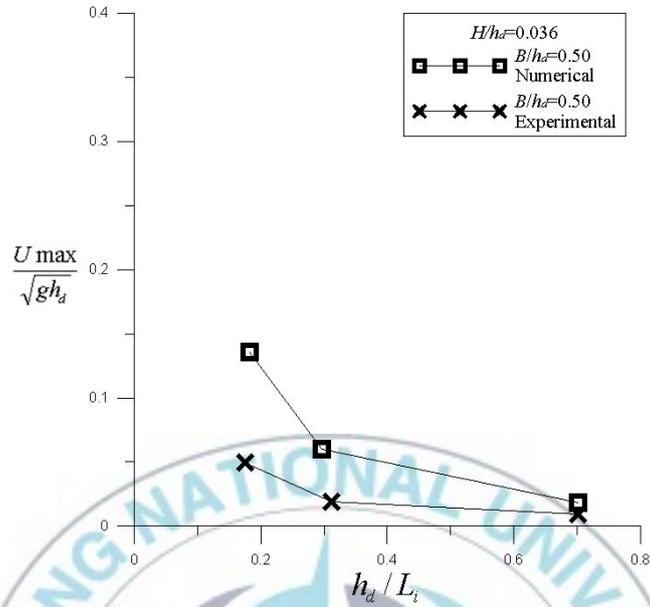


Fig. 3-1-1 Distribution of velocity in wave duct under $H/h_d=0.036$ conditions.

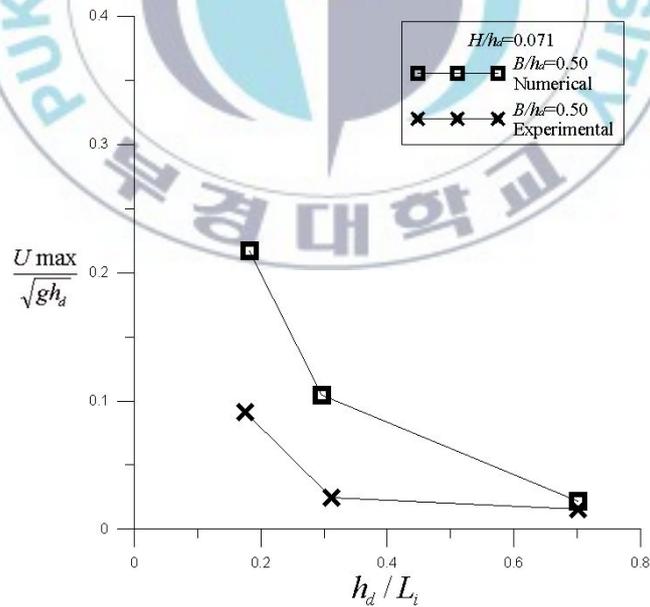


Fig. 3-1-2 Distribution of velocity in wave duct under $H/h_d=0.071$ conditions.

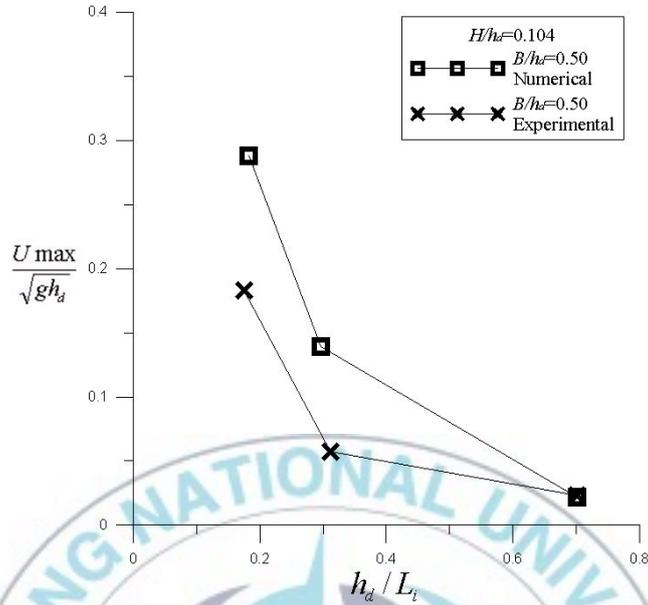


Fig. 3-1-3 Distribution of velocity in wave duct under $H/h_d=0.104$ conditions.

(2) $H/h_d=0.071$ 의 조건하에서 유속의 분포특성을 Fig. 3-1-2에서 살펴보면 다음과 같다. 상대적으로 $H/h_d=0.036$ 에 비해 파고가 증가한 조건이다.

① 최대 유속값은 상대적으로 파장이 가장 긴 조건인 $h_d/L_i=0.175$ 에서 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}=0.22$ 로 발생하였으며, 이상의 값을 가지는 h_d/L_i 조건에서는 감소하는 경향이 보인다.

② $h_d/L_i=0.701$ 의 조건을 제외한 다른 h_d/L_i 에서의 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 값은 수치해석과 수리실험 결과와 평균적으로 약 0.1의 차이를 보인다.

③ 최소 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 값은 $h_d/L_i=0.701$ 인 가장 주기가 짧은 조건에서 발생하였으며 수치해석 결과와 수리모형실험결과가 유사한 값이 나타났다. 이

는 주기가 짧은 파랑이 입사함에 따라 에너지가 다른 조건에 비해 감소한 것이므로 이로 인한 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 값의 차이가 작아진 것으로 사료된다.

(3) 상대적으로 실험조건 중 파고가 가장 높은 값을 가지는 파랑조건인 $H/h_d=0.104$ 에서 유속분포 특성을 분석하였다(Fig. 3-1-3).

① 최대 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 값은 약 0.30으로 실험 케이스 중 가장 높은 값으로 나타났으며, 최대 유속이 발생한 h_d/L_i 의 값은 0.175로써 실험조건에서 파장이 가장 긴 조건인, 주기가 최대인 조건이다.

② 이전의 케이스와 동일한 패턴의 유속증가현상이 나타나며, h_d/L_i 값이 증가할수록 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 값은 약 50-85%의 감소세를 보인다.

③ 최소 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 값은 상대적으로 최대 $B/L_i=0.701$ 에서 0.022로 나타났으며 최대 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}=0.28, 0.18$ 과 비교적 큰 차이를 보였다.

3.1.2 수류터널 내부의 수위변화특성

파랑의 운동을 통해 에너지를 가진 수체는 수류터널의 유입구를 통해 수류터널 내부를 이동한다. L자형 수류터널을 따라 이동한 수체는 상부가 개방되어있는 연직형태의 터널 후면에 집중되어 위치에너지를 최대로 갖게 된다. 이는 중력의 작용으로 인해 운동에너지로 전환되어 2차적인 흐름을 만들며 유입구를 통해 수류터널 외부로 나가게 된다. 결과적으로 파랑이 가지는 에너지로 인해 수류터널내부에 왕복류가 생성됨으로 인해 L자형 수류터널의 연직부분에서는 파랑의 수직운동과 같은 수위변화가 주기적으로 일어나게 된다. 3.1.2절에서는 3.1.1절의 유속변화와 함께 수류터널 내부에서 왕복류 발생으로 인한 수위변화특성을 수치해석 결과와 함께 비교분석해보았다.

(1) Fig. 3-1-4은 h_d/L_i 에 따른 입사파고에 대한 수위변화값의 비를 나타내고 있다. ($H/h_d=0.036$ 인 조건)

① 수치해석을 통한 최대 수위변화값은 $\eta_{\max}/H_i=4.73$ 으로 $h_d/L_i=0.175$ 에서 나타났다. 동일조건에서 수리모형실험의 $\eta_{\max}/H_i=2.50$ 으로 최대값이 나타났으며, 수위변화값의 증가패턴이 유속의 증가패턴과 동일한 것으로 사료된다.

② 전체적인 η_{\max}/H_i 값은 다른 파랑조건을 적용한 것보다 $h_d/L_i=0.701$ 조건을 제외하고는 비교적 높은 값을 보인다. 이는 상대적으로 파고값이 가장 작은 조건이라는 영향이 높은 값이 나타나는데 지배적인 영향을 준 것으로 판단된다.

③ 수리모형실험값과 수치해석값은 h_d/L_i 이 작아질수록, η_{\max}/H_i 값의 차이가 약 1에서 2.5로 증가한다. 이는 유속의 분포특성과 동일한 이유로 인한 현상이라 사료된다.

(2) Fig. 3-1-5는 $H/h_d=0.071$ 인 조건하에서의 수류터널 내부의 수위변화값을 분석하였다.

① 최대 η_{\max}/H_i 값은 3.77로써 $h_d/L_i=0.175$ 에서 발생하였으며, h_d/L_i 이 증가함에 따라 η_{\max}/H_i 값이 감소하는 패턴은 이전의 케이스와 동일하다.

② 수치해석과 수리모형실험의 각각 최대 $\eta_{\max}/H_i=3.77, 2.0$ 은 $H/h_d=0.036$ 인 조건에서의 $\eta_{\max}/H_i=0.473, 2.50$ 의 결과와 비교하였을 때 평균 20%감소하였다. 이는 본 케이스에서 입사파의 파고증가에 따른 수위변화값의 비에 영향을 준 것으로 사료된다.

③ $h_d/L_i=0.701$ 에서 평균 η_{\max}/H_i 값은 수치해석결과와 수리실험결과와는 비교적 동일하였다. 이는 수위변화값에 비해 상대적으로 증가한 입사파고 값으로 인해 상당히 작기 때문으로 위와 같은 결과를 보인 것으로 판단된다.

(3) $H/h_d=0.114$ 로 일정 h_d 값에서 H 값이 상대적으로 가장 큰 조건하에 수위변화값을 측정한 케이스의 특성을 관찰해보았다.(Fig. 3-1-6)

① 전체적으로 h_d/L_i 값이 감소함에 따라 η_{\max}/H_i 값은 증가하는 패턴은 이전의 케이스들과 동일하다.

② 전체적으로 $H/h_d=0.071$ 인 조건과 비교하였을 때 전체 h_d/L_i 값에서 η_{\max}/H_i 값은 큰 차이를 보이지 않고 유사하다고 판단된다. 이 현상은 파랑 조건의 영향으로 볼 수 있는데, 파고에 비해 비교적 주기가 짧음으로 입사하는 파랑이 가지는 에너지가 감소한 것으로 인한 영향이라 사료된다.

③ 최대 η_{\max}/H_i 값은 최소 $h_d/L_i=0.175$ 에 수리모형실험, 수치해석 각각 3.46, 1.75로 나타났으며 이전의 수위변화값($H/h_d=0.071$)들의 결과 $\eta_{\max}/H_i = 3.77, 2.0$ 과 비교하였을 때 파고증대에 따른 최대 η_{\max}/H_i 값의 감소는 비교적 적은 것으로 판단되었다.

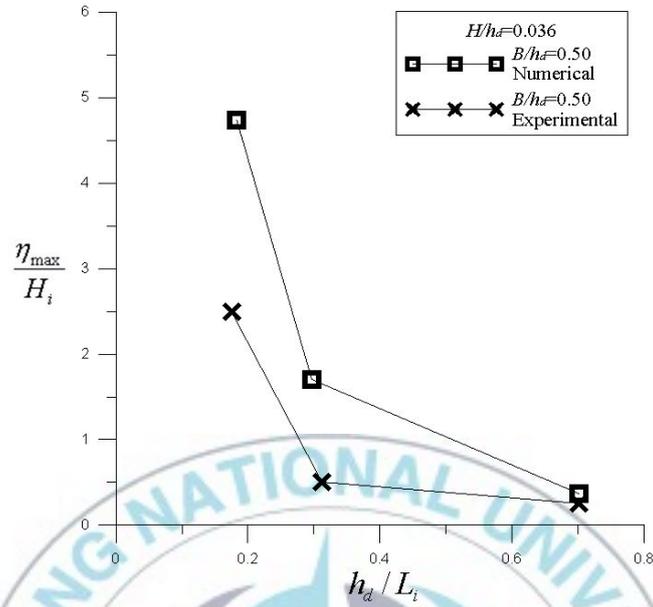


Fig. 3-1-4 Variation of water surface height in wave duct under $H/h_d=0.036$.

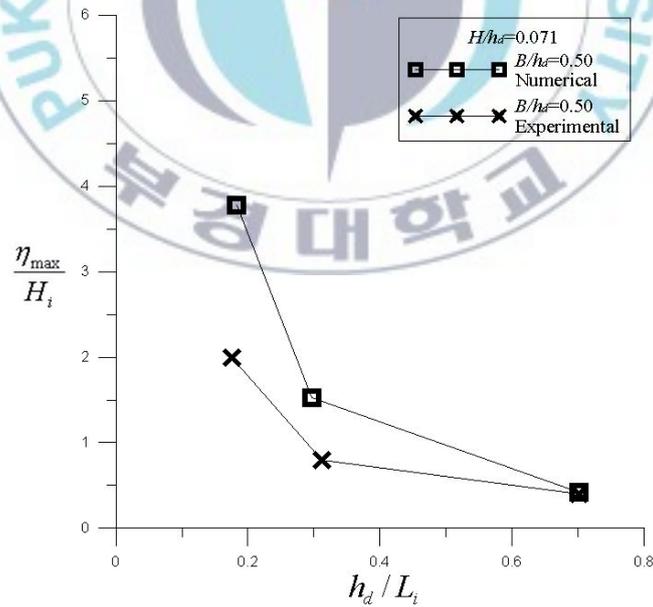


Fig. 3-1-5 Variation of water surface height in wave duct under $H/h_d=0.071$.

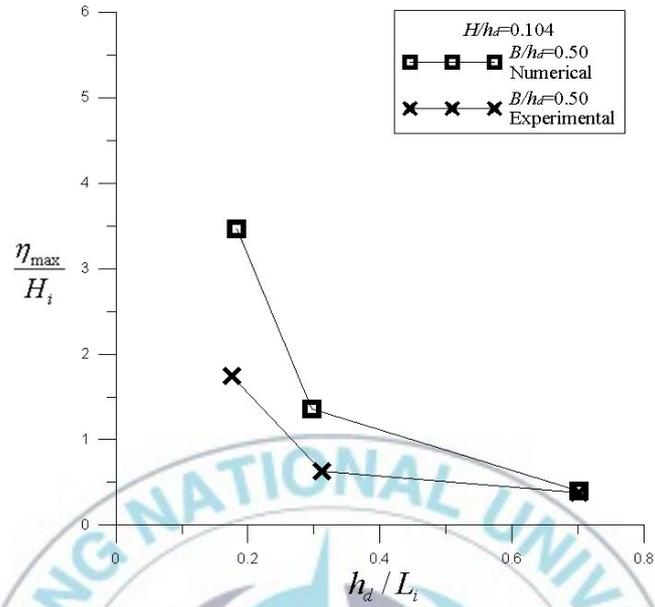


Fig. 3-1-6 Variation of water surface height in wave duct under $H/h_d=0.104$.

3.2 수치모델의 결과 및 분석

수치해석은 실험에서 측정된 파라미터를 중점으로 실시되었고, 대표적으로 내부의 유속과 수위변화값에 대한 데이터를 추출하였다. 추출된 유속데이터와 수위변화값은 각각의 무차원화를 통하여 비교분석하였다.

3.2.1 유입구의 크기에 따른 수리학적 특성

Fig. 3-2-1과 Fig. 3-2-2는 h_2 의 조건을 $h_2/h_d=0.057-0.171$ 의 범위를 적용시켜 내부의 유속변화와 수위변화값을 나타낸 것이다. 적용된 구조물의 $B_1/h_d=0.50$ 이며 유속은 $B_1/2$, $h_2/2$ 지점에서 측정하였다. h_3 의 조건은 수류터널 내부의 공기혼입을 제어하기 위해 일정하게 두었으며 일정한 파고조건을 주기를 달리하여 유속 및 수위변화값의 분포를 분석하였다. h_2 의 변화에 따른 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 의 값은 동일 H/L_i 조건에서 비교적 동일한 범위가 나타났으며 이는 h_2 가 위치한 영역의 수립자 속도가 연속적으로 일정한 분포인 것으로 사료된다. L_i 값이 커질수록 유속값은 높게 나타났으며 전체 h_2 에서 평균 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 최대값은 약 0.2를 보인다. Fig. 3-2-2의 수위변화값은 h_2 값이 작을수록 낮은 η_{\max}/H_i 값을 나타내는 패턴을 보이는데 이는 B_2 의 조건이 15cm로 동일하게 준 것이 영향을 끼친 것으로 사료된다. h_2 로 입사한 에너지를 가지는 수괴가 B_2 부분의 단면적이 확대됨으로 인해 에너지 손실이 나타난 것으로 분석하였다. h_2 의 변화에 따른 η_{\max}/H_i 값의 변화패턴은 h_2 가 커질수록 손실이 감소하여 상대적으로 증가한 값이 나타나는 경향을 보인다.

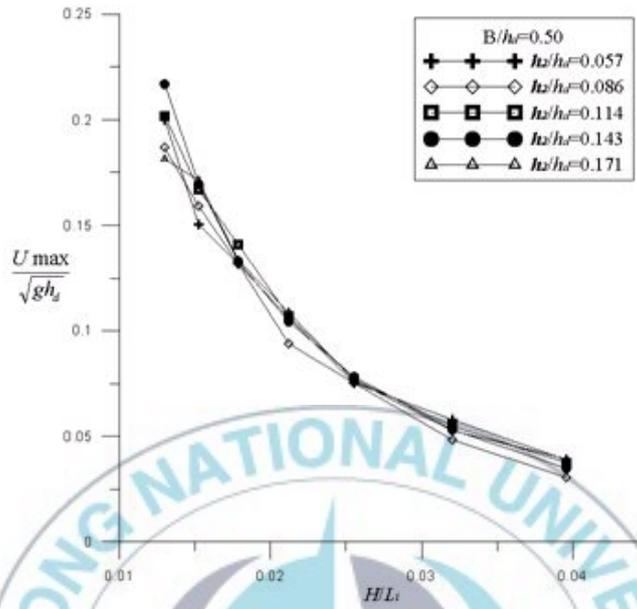


Fig. 3-2-1 Velocity distribution for $h_2/h_d=0.057-0.171$.

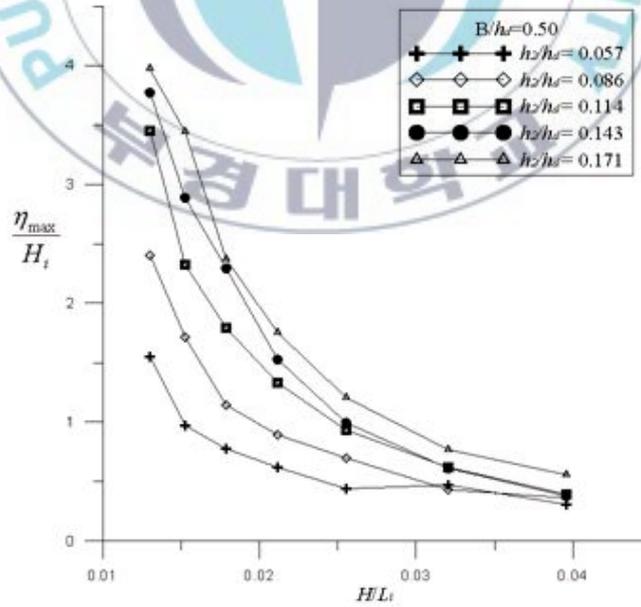


Fig. 3-2-2 Distribution of surface elevation for $h_2/h_d=0.057-0.171$.

3.2.2 수류터널의 길이에 따른 수리학적 특성

$H/h_d=0.036$ 인 조건에서 유속과 수위변화값을 도시한 그래프는 Fig. 3-2-3과 Fig. 3-2-4이다. 이 케이스의 특징은 동일한 조건의 다른 케이스들과 비교하였을 때 상대적으로 파고가 작은 조건으로써 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 의 값들은 타 케이스에 비하여 작게 나타났다. $B/h_d=0.214-0.643$ 의 범위를 적용한 결과는 $B1$ 값이 작은 $B/h_d=0.214$ 에서 평균적으로 높은 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 값이 나타났으며 $h_d/L_i=0.213$ 에서 peak값이 나타났다. $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 값의 증감패턴은 $B1$ 값이 작을수록 선형적인 증감추세를 보이며 $B1$ 이 커질수록 지수적인 추세가 나타났다. 수위변화값 η_{\max}/H_i 의 변화추세는 동일한 조건의 유속 분포 추세와 유사한 패턴을 보인다. 이는 h_2 내부로 들어온 수체의 영향이 유속과 수면변동 모두 영향을 준다는 근거로 적용될 수 있다. 동일 $B/h_d=0.214$ 에서 $h_d/L_i=0.213$ 에서 peak값을 보이고 이하의 값에서 증가하는 η_{\max}/H_i 값을 보이는 동일 조건의 다른 B/h_d 값의 패턴과 달리 감소하는 η_{\max}/H_i 을 보이는 것으로 $B/h_d=0.214$ 인 조건에서 동일 파랑조건하에 최대 η_{\max}/H_i 와 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 값이 나타나는 범위로 추측된다.

Fig. 3-2-5와 Fig. 3-2-6은 이전 케이스에 비해 파고조건이 증가한 것이다. 최소 h_d/L_i 에서 최대 평균 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 값은 $H/h_d=0.036$ 의 조건보다 $H/h_d=0.071$ 일 때가 평균적으로 약 100% 증가한 값을 나타내었다. 이는 파고의 증가로 인하여 영향이 가장 큰 것으로 판단된다. $h_d/L_i=0.213$ 에 peak값을 보이는 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 의 패턴과 유사하게 $B1$ 이 가장 짧은 조건인 $B/h_d=0.214$ 에서 peak값을 보이고 이후 h_d/L_i 이 감소할 때 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 이 감소하는 경향을 보인다. $B1$ 값이 증가함에 따라 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 값은 평균적으로 25% 감소하는 추세이며 h_d/L_i 이 증가함에 따라 감소율은 작아진다. 이는 주기가 짧아짐으로 입사하는 파랑에너지가 감소함으로 인해 손실이 비교적 적게 발생함으로 인해 나타나는 현상이다. Fig. 3-2-6은 $H/h_d=0.071$ 인 조

건에서의 수위변화값을 분석한 그래프이다. 평균 η_{\max}/H_i 는 이전 $H/h_d=0.036$ 조건에 비해 감소하였으며 이는 적용된 파고의 증가로 인한 결과라 할 수 있다. $B/h_d=0.214$ 의 조건을 제외하고 h_d/L_i 이 감소함에 따라 η_{\max}/H_i 값은 증가하는 경향을 보인다. 최대 η_{\max}/H_i 값은 최소 $h_d/L_i=0.18$ 에서 평균 3.8로 나타났다. 이는 수류터널 내부로 입사하는 파고에 대한 내부의 수위 변화가 약 3.5배 증가한다고 판단할 수 있다.

상대적으로 가장 높은 값의 파고조건을 적용한 것의 유속과 수면변동의 결과는 다음의 Fig. 3-2-7과 Fig. 3-2-8에 나타나 있다. $H/h_d=0.071$ 일 때와 비교하였을 때 최소 h_d/L_i 에서 최대 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 값은 약 0.3의 값으로 약 50% 증가 값을 보인다. 이는 파고의 증가로 인한 선형적인 유속치의 증가로 사료된다. $B/h_d=0.643$ 에서 0.214로 길이가 감소함에 따라 평균적인 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 의 증가는 각각 20%, 30%, 35%로 증가함을 보인다. Fig. 3-2-8은 동일조건하에서의 수위변화를 분석한 그래프이다. 본 조건에서 평균 수위변화값 η_{\max}/H_i 는 가장 낮은 값을 보였다. 이는 입사파고의 증가로 인한 것으로서 $B/h_d=0.214$ 에서 $B/h_d=0.643$ 으로 $B1$ 이 증가함에 따라 약 20%씩 감소함으로 나타난다. 본 결과를 통해 $B1$ 값의 증감은 유속과 수위 변화값에 모두 영향을 주는 것으로 나타났으며, 주기의 증감에 따라 η_{\max}/H_i 값은 민감하게 변화하는 것으로 나타나 L_i 값의 증감은 두 파라미터의 값에 변화를 주는 주요한 외력인자로 판단하였다.

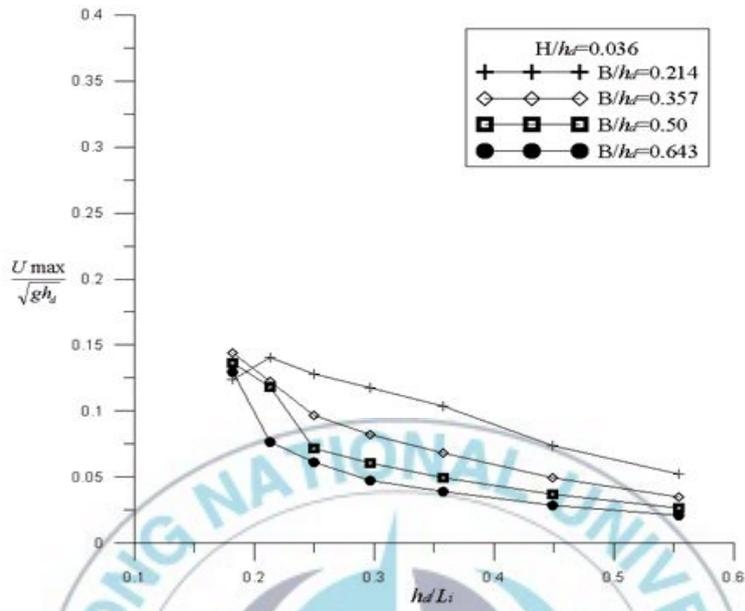


Fig. 3-2-3 Velocity distribution for $H/h_d=0.036$.

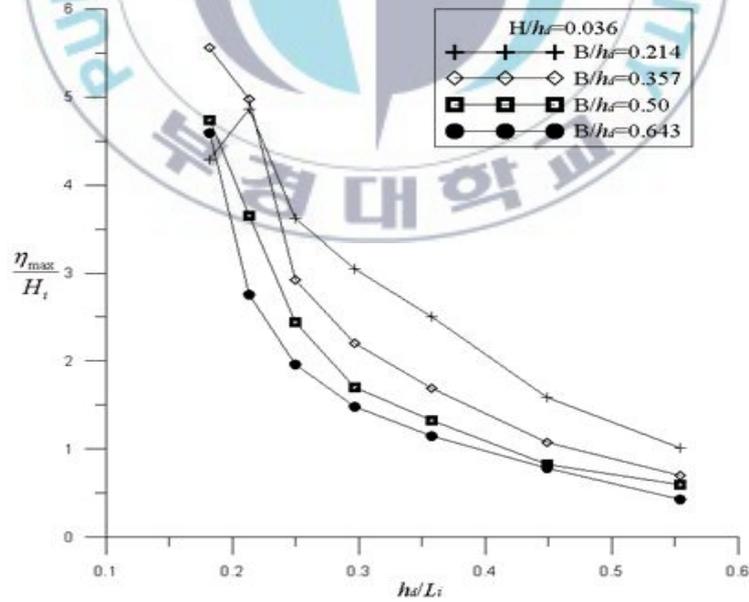


Fig. 3-2-4 Distribution of surface elevation under $H/h_d=0.036$.

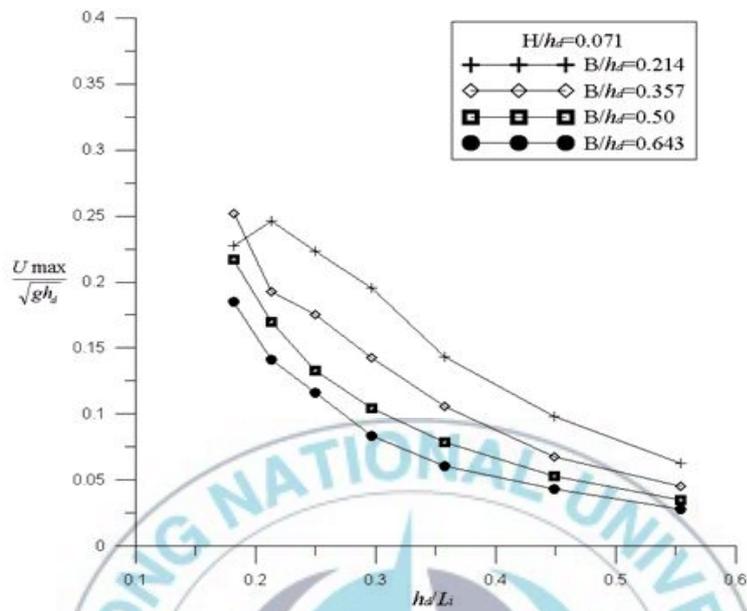


Fig. 3-2-5 Velocity distribution for $H/h_d=0.071$.

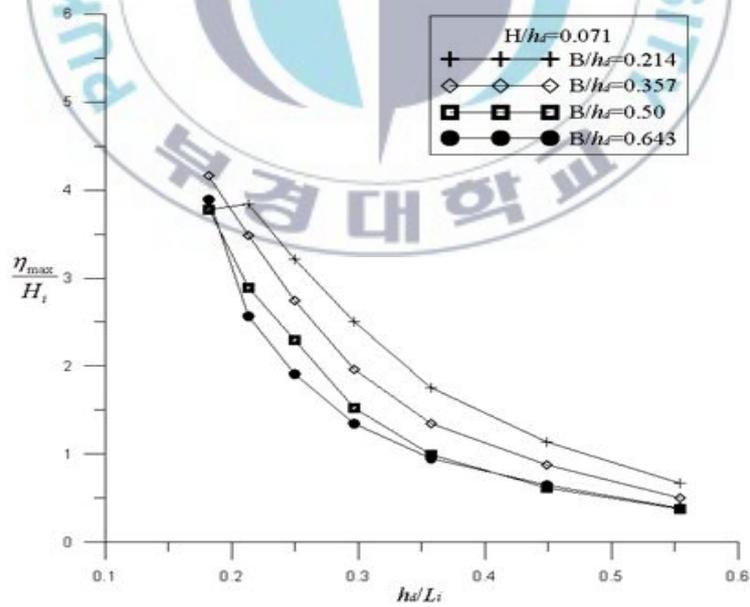


Fig. 3-2-6 Distribution of surface elevation under $H/h_d=0.071$.

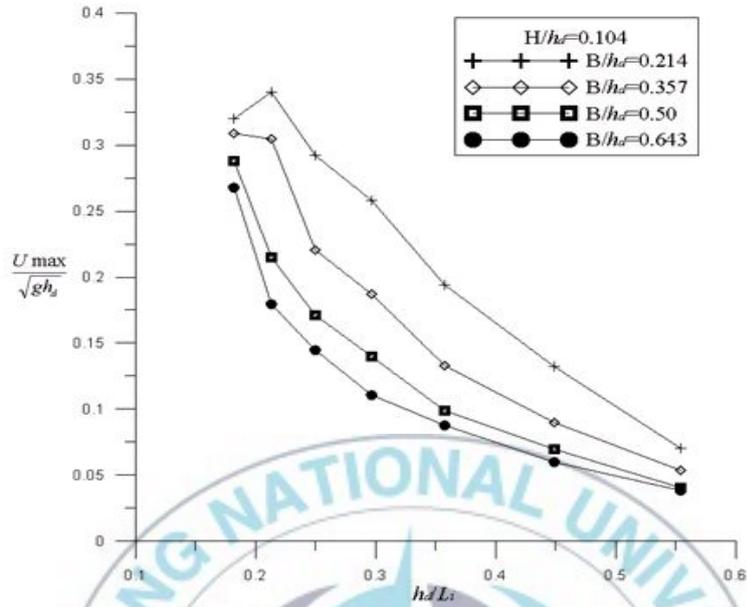


Fig. 3-2-7 Velocity distribution for $H/h_d=0.104$.

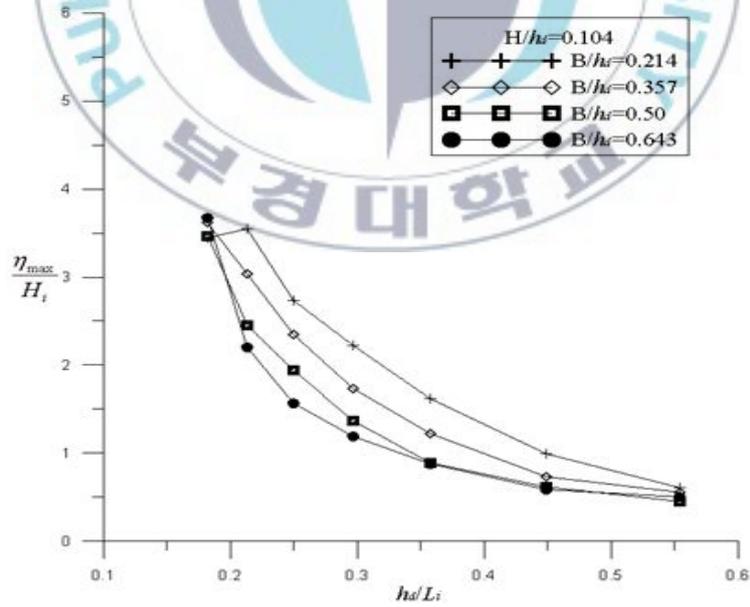


Fig. 3-2-8 Distribution of surface elevation under $H/h_d=0.104$.

3.2.3 수류터널의 내부 형상에 따른 수리학적 특성

본 절에서는 수류형 파력발전 장치의 내부유속 및 수위변화에 영향을 주는 외력인자에 관한 연구를 수행하였다. 다음의 Fig. 3-2-9와 같은 직각의 L자형 수류터널의 내부를 곡면으로 형상변화를 주어 내부의 유속 및 수위변화를 분석하고자 하였다. 적용과랑 조건은 3.2.1절과 3.2.2절의 과랑조건 중 유속 및 수위변화가 뚜렷한 증감을 보이는 비교적 긴 주기를 가지는 조건인 $T=1.23-1.45$ sec를 선택하였으며, 내부형상에 적용한 곡면의 지름은 $R=0.45$ 이다. 기타 모형의 제원은 Table 3-2-1에 기술되어있다.

유속변화와 수위변화를 내부형상의 smoothing 유무에 따라 분석한 자료를 Fig. 3-2-10과 Fig. 3-2-11에 도시하였다. Fig. 3-2-10은 과랑조건은 동일하게 적용한 상태에서 수류터널의 길이를 증가시켜 이에 따른 파라미터들의 변화를 나타내었다. 과고는 $H/h_d=0.071$ 로 동일하게 두었으며, $h_d/L_i=0.21-0.30$ 을 적용하였다. A-C의 그래프는 유속의 변화를 나타낸 것이며, D-F는 수위변화를 나타낸 것이다. A의 조건은 수류터널의 길이가 3가지 조건 중 가장 짧은 조건으로 비교적 높은 값의 유속이 나타났으며 평균적으로 B의 조건 $B/h_d=0.50$ 에 비해 수류터널의 길이가 짧아짐으로 인해 $U_{max}/\sqrt{gh_d}$ 값은 약 21%로 증가하는 것으로 나타났다. A의 그래프에서 나타난 내부의 형상을 smoothing한 효과는 주기가 길어짐에 따라 18%로 유속이 증가하는 것으로 보인다. 이는 내부의 형상을 직각형태에 비해 곡면을 주어 에너지 손실을 줄인 것으로 인한 유속의 증가인 것으로 사료된다.

Table 3-2-1 Conditions of smoothing type(unit:m)

$H(m)$	$T(sec)$	$B1$	$B2$	$h1$	$h2$	h_d	R
0.0250	1.23	0.250					
0.050	1.34	0.350	0.150	0.50	0.10	0.70	0.45
0.0725	1.45	0.450					

B는 $B1=0.350$ m인 조건으로써 C의 조건에 비해 $B1$ 의 길이, 수류터널의 길이로 인한 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 의 증감효과는 약 16%로 증가하였다. 형상의 변화를 준 smoothing의 효과는 직각의 형상에 비해 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 값이 15% 증가하였으며 주기가 길어짐에 따라 유속은 평균적으로 약 20%의 유속 증가를 보인다. C의 그래프는 모형조건 중 수류터널의 길이가 가장 긴 조건으로써 평균적인 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 의 값은 낮은 값을 나타내었다. 수류터널의 길이가 길어짐으로 인한 에너지 손실이 발생하여 이에 따른 smoothing의 효과 역시 12%로 조건 중 낮은 값으로 나타났다. 주기의 증가로 인한 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 의 증가는 B의 조건에서 나타난 것과 같이 평균 20%로 나타났다. 전체적으로 유속의 증가에 있어 구조물, 수류터널의 길이의 영향은 길이가 짧아짐에 따라 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 의 값을 약 18%증가 시켰으며, 내부의 형상을 smoothing 함으로 에너지 손실을 줄인 결과는 평균 15%의 유속값을 증가시키는 것으로 나타났다. 주기의 증가로 인한 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 의 값의 증가는 약 20%로 나

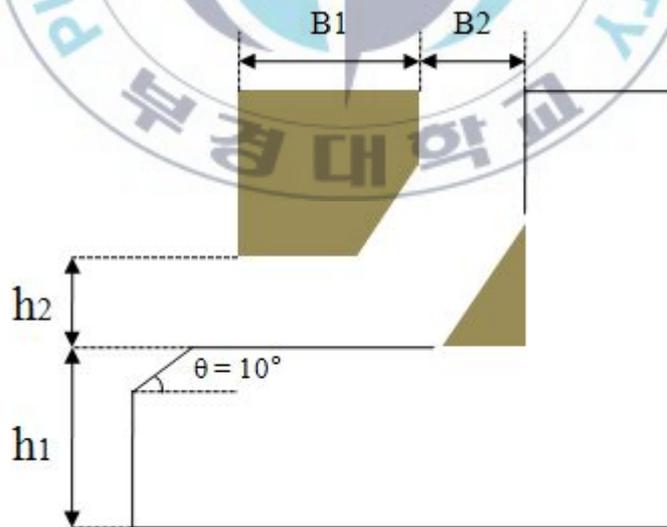


Fig. 3-2-9 General sketch of model with smooth shape.

타나 유속 파라미터에서 구조물의 길이와 파랑조건의 주기는 상대적으로 유속을 증감시키는 주요인으로 판단된다.

Fig. 3-2-10의 D-F는 수류터널 내부의 수위변화를 수류터널의 길이에 따라 나타낸 그래프이다. 전체적인 η_{\max}/H_i 의 증감패턴은 유속에서 나타난 것과 유사하게 수류터널의 길이 B/h_d 값이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 전체적으로 smoothing한 내부형상을 변화시킨 효과는 최대 5% 미만으로 나타났다. 따라 유속파라미터에 비해 내부수위의 증감에 미치는 smoothing 효과는 적은 것으로 판단되었다. B/h_d 값의 변화에 따른 수위변화는 평균적으로 $B1$ 값이 감소함에 따라 평균 20%로 증가하였다. 또한 전체적으로 주기가 길어짐에 따른 수위변화는 전체적인 B/h_d 값에서 약 26% 정도 증가한 것으로 나타났다. 따라 수류터널 내부의 수위변화에 가장 큰 영향을 미치는 외력인자는 입사하는 파랑조건의 주기와 구조물의 길이인 것으로 사료된다.

Fig. 3-2-11의 A-F에 나타낸 것은 일정한 $B/h_d=0.50$ 에서 파고 조건을 $H/h_d=0.036-0.104$ 로 변화시켜 적용한 결과이다. 여기에서는 일정한 수류터널길이에서 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 와 η_{\max}/H_i 값의 변화에 미치는 외력인자 중 파랑조건에 대하여 분석해보았다. Fig. 3-2-11의 A-C는 H/h_d 의 증가, 즉 파고를 증가시킨 조건에서 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 값의 변화를 나타낸 것이다. 파고가 증가함에 따라 케이스 A조건에 비해 B조건에서 약 43% 유속이 증가하였다. C조건은 B조건에 비해 약 25%의 유속증가를 보였다. 전체적인 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 값은 H/h_d 의 증가에 따라 평균적으로 34%의 증가로 파고는 유속변화에 영향을 주는 지배적인 외력인자로 판단된다. A-C그래프에서 주기가 증가함에 따라 $U_{\max}/\sqrt{gh_d}$ 값은 평균적으로 15-20% 증가하였으며, 내부의 형상을 smoothing한 효과는 동일조건의 직각형상보다 평균적으로 약 19%의 유속값의 증가를 가져왔다. 결과적으로 수류터널의 길이를 동일하게 적용하였을 때 유속의 증감에 파고가 다른 외력인자에 비해 가장 큰 영향을 미치는

것으로 나타났다.

D-F는 동일조건하의 내부수위변화를 나타낸 것으로 전체적인 증감경향은 유속파라미터와 상이한 패턴을 보였다. η_{\max}/H_i 값은 파고가 증가함에 따라 감소하였으며, $H/h_d=0.071$ 과 0.104 의 조건에서는 상대적으로 큰 차이를 보이지 않았다. D-F에서 η_{\max}/H_i 값에 가장 큰 영향을 미치는 외력인자는 주기로써 주기가 증가함에 따라 평균적으로 약 26%의 수위변화값의 증가를 가져왔다. 이는 파고가 가장 작은 조건인 D에서 평균 30%로 가장 컸으며, 이러한 결과는 입사파고가 본 조건 중 가장 작음으로 인한것이라 사료된다. smoothing의 효과는 최대 20%로 $H/h_d=0.104$ 의 $h_d/L_i=0.21$ 조건에서 나타났지만, 이를 제외한 평균적인 효과는 약 5%로 다른 외력인자에 비해 낮은 효과를 보였다. 파고의 변화에 인한 수위변화량은 파고가 커짐에 따라 평균 10%로 수위변화량은 감소함을 보였다. 따라서 수위변화는 파고에 의한 변화보다 상대적으로 주기가 가장 큰 영향을 미치는 것임을 알 수 있다.

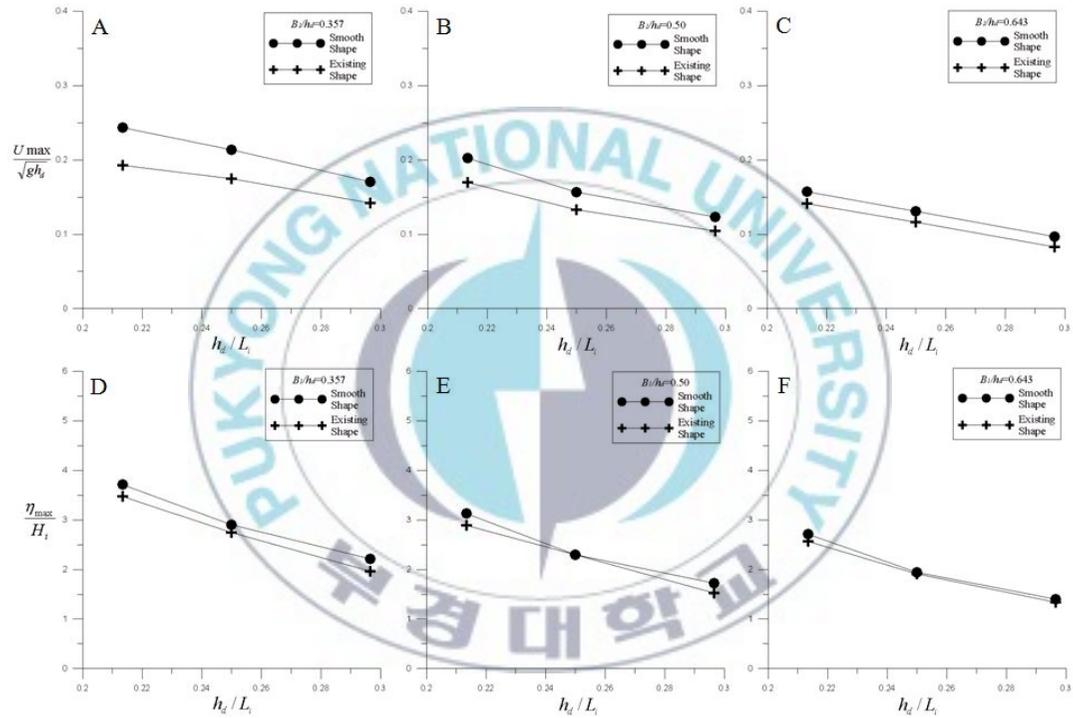


Fig. 3-2-10 Characteristic of velocity and surface elevation distribution for smoothing shape under various length of wave duct.

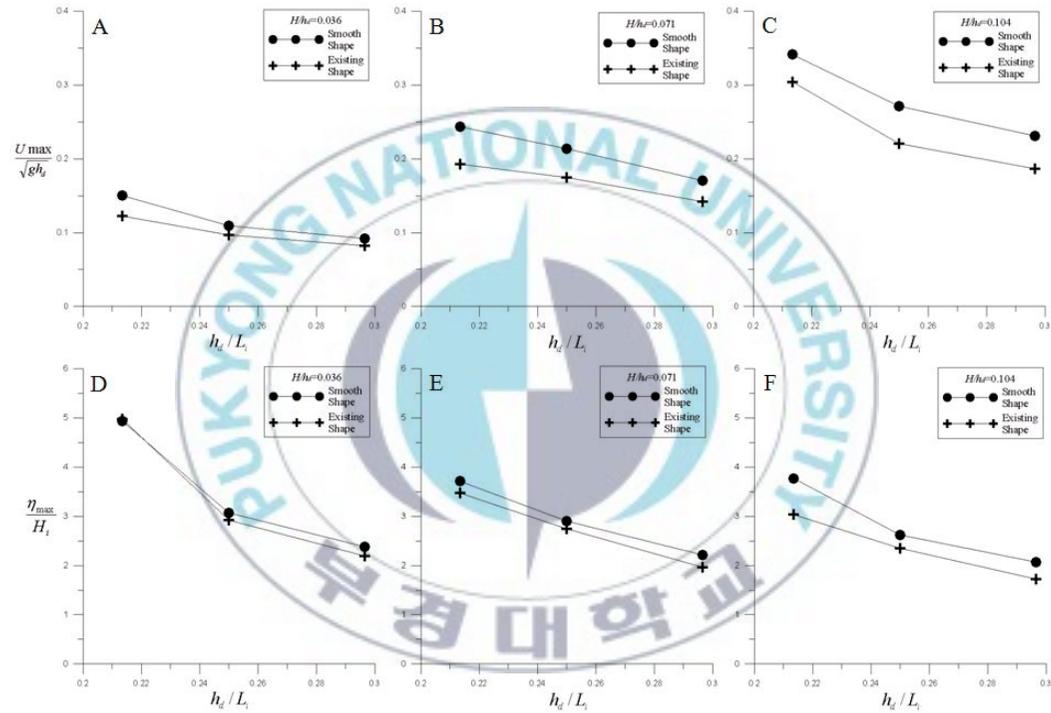


Fig. 3-2-11 Characteristic of velocity and surface elevation distribution for smoothing shape under various wave conditions.

4. 요약 및 결론

본 연구는 수류형 파력발전시스템 내부에서 일어나는 기초적인 수리학적 파라미터들에 대한 연구가 필요하다고 판단되어 파랑장하의 수류터널 내부에서 발생하는 수리학적 현상에 관한 외력인자의 영향에 대한 분석을 실시하고자 하였다. 수리모형실험을 통하여 수류형 파력발전 장치의 내부에서 발생하는 대표적인 수리학적 현상인 유속 및 수위변화에 대해 이들에 영향을 주는 외력인자들을 파고, 주기, 수류터널의 길이, 내부형상으로 판단하여 각각의 영향도를 분석하는 연구를 수행하였다. 2차원 단면 수리모형실험을 실시하여 유속 및 수위변화에 대한 기본적인 파라미터들의 변화패턴을 분석하였으며, 수치해석을 통한 외력인자들의 영향을 알아보았다. 수치모델은 기존의 연구결과와 비교하여 검증을 실시하여 결과의 타당성을 확보하였다. 수치해석을 통해 수류형 발전장치의 형상적인 조건과 파랑조건에 따른 유속과 수위변화에 분석하였으며, 수리모형실험과 수치해석을 통한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 규칙파를 적용한 2차원 단면수리모형실험을 통하여 나타난 모형 발전 장치의 수류터널 내부에서의 유속과 수위변화의 증감패턴은 수치해석을 통해 나타난 것과 유사한 패턴을 보인다.
2. 파력발전장치의 유입구의 연직높이(h_2)를 변화시킨 것에 따른 $U_{max}/\sqrt{gh_d}$ 값은 파랑조건에 따라 큰 차이를 보이지 않으며, 전체 h_d/L_i 값에서 유사한 값이 나타났다. 이같은 패턴은 적용된 유입구의 위치가 수립자의 속도변화가 일정한 영역에 위치한 것으로 인해 나타난 것으로 사료된다. 따라서 차후에 유입구의 위치 설정에서 위의 사항을 참고한 설계가 이루어져야할 것으로 판단된다.

3. 수리학적 파라미터인 유속과 수위변화에 영향을 주는 외력인자인 파고, 주기, 수류터널 길이 및 내부의 형상에 대하여 검토한 결과, 동일한 파랑조건하에서 수류터널의 길이 $B1$ 을 조정한 결과는 $B1$ 값이 감소할수록 상대적으로 유속 및 수위변화가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 직각형태의 내부형상을 가진 조건보다 smoothing을 한 내부의 형상은 결과적으로 에너지 손실을 줄여 유속을 증가를 나타냈었다. 수류터널 내부의 수위변화에서 터널의 길이를 변화시킨 효과는 유속과 같은 증감패턴을 보이지만, 내부의 형상을 변화시킨 효과는 비교적 크지 않음을 알 수 있었다.

동일한 수류터널길이에서 다양한 파랑조건을 적용하였을 때 파고의 증가가 유속 파라미터에 상대적으로 주기와 내부의 형상을 변화시킨 것보다 높은 유속의 증가를 나타내었다. 동일한 조건에서의 수위변화를 분석한 결과에서는 파고와 내부형상에 의한 것보다 주기의 변화에 수위가 민감하게 변화하였다. 따라서 주기는 다른 요인들에 비하여 내부의 수위를 변화시키는 지배적인 요인인 것으로 판단된다.

수류형 파력발전시스템은 기존 형식의 파력발전방식과는 다른 수류형 터널을 회수기술에 적용한 유형이다. 차후 수류형 파력발전시스템의 실용화에 앞서 조사기술, 변환기술 및 운영·유지기술등의 다양한 분야의 기술이 접목되어야 할 것으로 판단된다. 또한 파력발전장치의 출력향상 방안 등의 보완기술이 필요할 것으로 예상된다. 따라서 본 연구는 내부의 유속을 직접적으로 이용한 방식과 배후면의 수면변동을 적용한 방식 등의 다양한 형식의 적용에 앞서 내부에서 발생하는 수리학적 파라미터에 관한 기초적인 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단되며, 앞으로 실용적인 파력발전시스템 개발에 있어 많은 보완연구가 필요할 것이라 예상된다.

참 고 문 헌

- Cho, Y.S and Jeon, C.H (2006) : Bragg reflection of sinusoidal waves due to trapezoidal submerged breakwaters, *Ocean Engineering* 33, pp. 2070-2073.
- Harlow, F.H. and J.E. Welch (1965) : Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow, *The Physics of Fluids*, Vol. 8, pp. 2182-2189.
- Hirt, C.W. B.D. Nichols, and N.C. Romero (1971) : Calculating Three-Dimensional Free Surface Flows in the Vicinity of Submerged and Exposed Structures, *Journal of Computational Physics*, Vol. 12, pp. 234-246.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D (1981) : Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. *J. Comp. Phys.* 39, pp. 201.
- Hirt, C.W., Amsden, A.A., and Cook, J.L (1974) : An Arbitrary Lagrangian- Eulerian Computing Method for all Flow Speeds. *J. Comp. Phys.*, 14, pp. 227.
- Hirt, C.W., Cook, J.L. and Butler, T.D (1970) : A Lagrangian Method for Calculating the Dynamics of an Incompressible Fluid with Free Surface. *J. Comp. Phys.* 5, pp. 103.
- Hur, D.S and Kawashima, N (2003) : Experimental study of the breaking limit of multi-directional random waves passing over an impermeable submerged breakwater, *Ocean Engineering* 30, pp. 1924.
- Japan Ocean Development Construction Association Inc(2008) : *Ocean Energy Engineering*, pp. 33-51.

- Losada, I.J and Patterson, M.D (1997) : Harmonic generation past a submerged porous step, *Coastal Engineering* 31, pp. 288-289.
- Nichols, B.D. and Hirt, C.W (1971) : Calculating Three-Dimensional FreeSurface Flows in the Vicinity of Submerged and Exposed Structures, *J. Comp. Phys.* 12.
- Thiruvankatasamy, K., Nellamani, S. and Sato, M (2005) : Nonbreaking Wave Force on Multiresonant Oscillating Water Column Wave Power Caisson Breakwater, *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering* 131 (2), pp. 77-84.
- Tseng, R.S and Wu, R.H (2000) : Model study of a shoreline wave-power system, *Ocean Engineering* 27, pp. 801-821.
- Williams, A.N and Mcdougal, W.G (1996) : A Dynamic Submerged breakwater, *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering* 112 (6), pp. 288.
- 류청로, 이경선 (2007) : 케이슨형 파력발전 시스템 대상해역의 파랑조건 검토, 한국해양환경공학회 학술발표논문집, pp. 379.
- 류청로, 홍석원, 김현주, 강윤구(1999) : 해양에너지공학, pp. 75-122.
- 홍기용, 신승호, 홍석원 (2004) : 한국연안의 해역특성을 고려한 파력발전 방식의 적용성 분석, 한국해양환경공학회 학술대회논문집, pp. 243-248.
- 해양수산부 (2002) : 해상파랑관측 및 조사 보고서