

Research Paper

관측자료에 기반한 미래 해수위 예측 및 연안지역 침수위험면적 분석 - 부산시 해운대구 일대를 대상으로 -

안새결 · 이동근
서울대학교

Estimation of Peak Water Level Based on Observed Records and Assessment of Inundation in Coastal Area - A Case Study in Haeundae, Busan City -

Saekyul Ahn · Dongkun Lee
Seoul National University

요약 : 해수면상승으로 인한 연안지역의 영향평가를 위해 부산시 해운대구 일대를 대상으로 해수위 예측 모형과 미래 침수위험지역 분석을 수행하였다. 과거 평균해수위자료(1960-2016)를 활용한 통계적 분석을 통해 해수면상승 예측 모형과 불규칙 성분을 산정하고 파고자료(2012-2017)와 계산 조위값의 확률밀도함수와 종합하여 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 해수면상승, 불규칙 성분, 파고, 조위를 종합한 미래 최고해수위를 모의하였다. 이에 미래 1% 발생가능성 최고해수위는 2050, 2080, 2100년 2.3, 2.6, 2.8m로 나타났으며, 침수위험지역은 우동, 용호동, 송정동, 재송동이 가장 클 것으로 나타났다.

주요어 : 기후변화, 해수면상승, 태풍파고, 연안지역, 침수위험지역, 재현기간

Abstract : For impact assessment of inundation in coastal area due to sea level rise (SLR), model for estimating future peak water level was constructed using observed mean sea level (MSL), storm surge level (SSL) data and calculated tide level (TL) data. Based on time series analysis and quadratic polynomial model for SLR and Monte-Carlo simulation for IC, SSL and TL, 100-year return peak water level is expected to be 2.3, 2.6, 2.8m, respectively (each corresponding to year 2050, 2080, 2100). Further analysis on future potential inundation area showed U-dong, Yongho-dong, Songjeong-dong, Jaesong-dong to be at high risk.

Keywords : Climate Change, Sea level rise, Storm surge Level, Coastal Area, Inundation area, Return period

I. 서론

기후변화로 인한 전세계적인 해수면상승은 바다와 인접한 연안지역, 섬 등에 영향을 미친다. 해수면상승으로 인해 이들 지역이 받게 될 영향은 이후 100년 간 더욱 심각해 질 것으로 예상된다(Church et al. 2013; National Research Council 2012). 더불어 미래 연안지역의 해수면상승(Sea Level Rise: SLR)과 만조위(High Tidal Level: HTL), 해양기상(태풍, 해일)으로 인한 파고(Storm Surge Level: SSL)가 결합된 복합적 요인에 의한 최고해수위(Peak Water Level: PWL) 상승으로 인해 연안지역이 받게 될 영향은 더욱 클 것으로 예상된다. 특히 대한민국은 3면이 바다로 둘러싸인 반도형 국가로 해안가를 따라 도시가 많이 발달해있으며(Park 2014) 밀집된 인구가 생활하는 연안지역 대도시의 경우 더욱 심각한 피해가 발생할 수 있다.

이에 해수면상승과 맞물려 발생할 수 있는 기상요소(태풍, 조위)로 인한 최고해수위(PWL) 상승에 대비한 안전도시 조성을 위해선 미래 해수위에 대한 정량적인 예측과 예측된 해수위에 기초한 침수위험지역에 대한 정량적인 분석은 효율적인 침수 위험관리를 위해 기초자료로 활용도가 높을 것이다.

기존 연안지역과 해수면상승 및 극한기상으로 인한 영향을 평가한 연구 중, Oh(2005), Kwon et al(2016), Kim(2017)은 장기 해수위를 통해 한반도 주요 연안도시의 해수면 상승치를 분석하였으며, Kim et al(2017)은 관측자료를 기반으로 미래 한국의 해수면 상승률에 대한 예측을 진행하였다. Lee et al(2011)은 1-10m의 해수면상승 시나리오를 설정하여 이에 따른 행정구역별로 해수위가 증가함에 따라 경제적 손실이 변화하는 침수프로필을 작성하였다.

Park et al(2014)은 베이지안 네트워크를 활용하여 500m 해상도의 서해 연안지역 미래 해수위 시나리오를 정량적으로 구축하고 이에 따른 침수 시 영향평가를 동시에 수행하였다.

다수의 선행연구들에서 해수위 예측과 침수면적분석이 독립적으로 진행되어 두 요소간의 유기적 연계가 진행되지 않았거나, 종합평가를 수행한 결과값의

공간적 해상도 국가차원의 규모에서는 의미가 있을 수 있으나 개별 지자체단위에서 활용하기 힘들다는 점을 찾을 수 있었다.

이에 본 연구에서는 1) 과거 관측자료를 기반으로 통계적인 방법을 이용하여 해수면상승 모형을 구축하고, 조위/태풍 발생 시 증가하는 수위에 대한 확률값을 도출하여 미래 해수위 예측모형을 구축하고, 2) 5m 해상도에서 연안지역 입지 행정구역의 해수위에 따른 침수프로필을 작성하였다. 최종적으로 3) 위 2가지를 활용하여 미래 재현기간에 따른 부산시 연안입지 행정구역의 침수위험면적을 정량화하고자 하였다.

II. 방법

1. 연구 범위

부산시는 한반도의 남동쪽 말단에 입지하고 있으며 767.4km²의 면적에 3,489,212명의 인구가 거주하고 있으며 인구밀도는 4,546명/km²에 달한다(KOSIS 2017). 태평양과 인접한 해안 입지로 인하여 여름철 발생하는 대부분의 태풍의 직접적인 영향권에 포함되어 과거 많은 수해를 경험하였으며, 최근 2016년 10월 태풍 차바의 영향으로 인해 한차례 큰

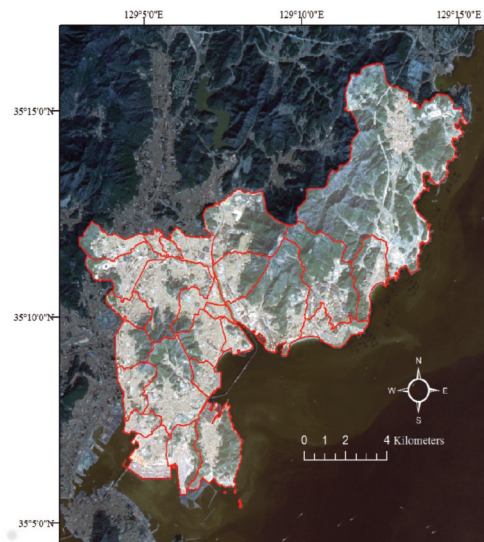


Figure 1. Study area

수해가 발생하여 실제 해양기상에 의한 피해를 입고 있으며 미래 해수면상승에 따른 피해가 증가할 것으로 예상된다.

이에 본 연구는 부산시 중에서도 2016년 태풍으로 인해 실제 피해가 발생한 해운대구 마린시티 일대와 해운대와 연결된 수영강 유역을 연구의 대상지로 선정하였다(Figure 1).

2. 연구 방법

본 연구는 세 단계로 진행하였다.

첫 번째로 연구 대상지의 1:5000 수치지도의 표고 점과 등고선을 토대로 ArcGIS 10.1을 이용하여 대상지의 수치표고모형(Digital Elevation Model: DEM)을 구축하였다.

두 번째로 Permanent Service for Mean Sea Level(PSMSL, 2013)에서 제공하는 부산의 장기간의 해수위 자료를 활용하여 해수면 상승 예측 모형을 구축하였고 불규칙 성분에 대한 분포를 추정하였다. 구축된 모형을 통해 미래 해수면상승값에 대해 예측하며 이후 불규칙성분과 파고, 조위값과 함께 최고해수위를 도출하는데 활용하였다.

파고 및 만조값은 기상청의 해양기상 자료 중 파고 자료와 조위자료를 활용하여 발생 확률분포를 도출하였으며, 이후 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 불규칙성분, 조위, 파고가 복합적으로 고려된 가법모형을 구축하여 재현기간에 따른 해수위 증가치를 도출하였다. 이를 앞서 구축한 해수면상승모형과 더해 미래 재현기간에 따른 최고해수위를 도출하였다.

마지막으로 최고해수위별 해운대구 및 수영강 유역 일대를 대상으로 분석을 수행하여 행정구역별 침수프로필을 작성하였으며, 이를 활용하여 미래 침수 위험면적을 예측하였다.

1) 해수면상승 분석

본 연구에서는 PSMSL에서 제공하는 1960년에서 2016년까지의 월별 부산의 평균 해수위자료(Mean Sea Level: MSL, Figure 2)를 활용하여 해수면상승 예측 모형을 구축하였다.

평균해수위(MSL)의 시계열자료(Figure 2)를 통해

해당 자료는 주기적인 성분(Seasonal Component: SC)을 가지며 해수면상승(SLR)으로 인해 시간에 따라 증가하는 추세를 나타냄을 확인할 수 있었다. 더불어 앞선 해수면 상승과 주기적 성분으로 설명되지 않는 오차항인 불규칙 성분(Irregular Component: IC)이 존재함을 확인할 수 있으며, 이에 원자료는 해수면상승, 주기적 성분, 불규칙 성분으로 구성되며 이는 아래 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$MSL_t = SLR_t + SC_t + IC \quad (1)$$

선행연구에 따르면 추세에 해당하는 성분의 경우 (2)와 같이 계수가 β_m 인 M차 다항식의 형태로 추정한다(Campbell 2005).

$$SLR_t = \sum_1^M \beta_m t^m \quad (2)$$

그 중에서도 2차 다항식은 해수위의 증가를 반영할 수 있으며 동시에 해수면상승을 시기에 상관없이 단조증가로 단순화하지 않기 때문에 주요하게 활용된다(Foster 2015). 이에 본 연구에서도 2차 다항식을 해수면상승 추정에 활용하였다.

또한 정확한 해수면상승 추세를 추정하기 위해 본 연구에서는 시간에 따른 주기적인 요소(Seasonal Component: SC_t)를 반영하였으며 이는 원자료에서 해수면상승값을 제거한(MSL-SLR) 편차자료(anomaly data)를 활용하여 푸리에급수(Fourier Series)를 통해 추정하였다(3).

$$SC_t = \sum_{p=1}^p [\sigma_{c,p} \cos(2\pi p \frac{t}{12}) + \sigma_{s,p} \sin(2\pi p \frac{t}{12})] \quad (3)$$

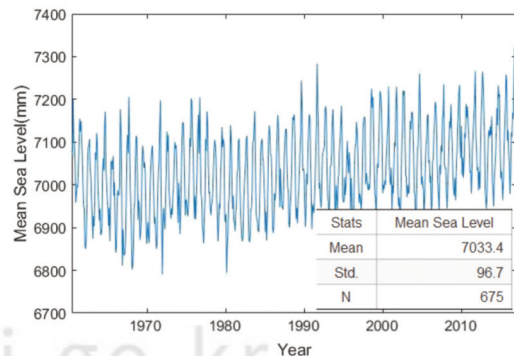


Figure 2. Busan Monthly Mean Sea Level

푸리에 급수 내 모수는 비선형최소자승법(Non linear least square method)을 통해 도출하였으며, 추정된 해수면상승모형과 주기적 요소를 활용하여 불규칙 성분을 도출하였으며 해당 성분은 분포추정을 통해 이후 최고해수위 결정을 위한 변수 중 하나로 활용하였다.

이에 해수면상승, 주기적변동, 불규칙성분으로 구성된 수식은 아래 수식(4)와 같이 재구성할 수 있다.

$$MSL_t = \sum_1^p \beta_m t^m + \left\{ \sum_{p=1}^p [\sigma_{c,p} \cos(2\pi p \frac{t}{12}) + \sigma_{s,p} \sin(2\pi p \frac{t}{12})] \right\} + IC \quad (4)$$

연구 결과값의 도식화 및 통계추정에는 MATLAB R2017a를 활용하였다(The Math-works Inc, 2017).

2) 파고 및 조위 분석

파고와 조위자료는 기상청의 해양기상관측 및 산정데이터를 활용하였다. 파고의 경우 해양기상일보(12년-17년2월)의 관측망 자료 중 광안(35°07', 129°08')의 일평균 유의파고 자료를 활용하였고, 조위의 경우 국립해양조사원이 제공하는 해운대(35°09'38", 129°11'30")의 예측조위를 활용하였다.

파고높이(SSL)와 조위(Tide Level: TL) 자료는 모수추정(parametric estimation)방법을 통해 각각의 분포를 추정하여 활용하였다. 폭풍해일로 인한 파고(SSL)에 대한 분포는 극단값(tail-value)의 추정에 특화된 일반화 극치분포(Generalized Extreme Value, GEV)를 활용하였다. GEV 분포의 경우, 분포 추정을 위한 표본수집에 있어 특정기간(Block) 중 상위값(nth Largest)을 활용하므로, 기상청에서 제공하는 유의파고(하루 중 상위 1/3에 해당하는 수치) 자료를 활용하기에 적합한 방법론이다.

조위의 경우, 정규분포형태를 띠고 있어, 정규분포를 활용하여 분석에 이용하였다.

3) 최고 해수위 분석

최고해수위에 대한 분석을 위해 우선 불규칙성분과 파고, 조위 세 가지 요소를 종합한 최고해수위(IC+SSL+TL)와 최고해수위별 발생확률을 도출하

였다. 종합하는데 있어 여러 확률 변수를 동시에 적용하기에 적합한 방법론인 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하였으며, 시뮬레이션은 각 30,000번, 30회 수행하여 활용하였다.

해당 결과는 다시 미래 해수면상승값에 더해 미래 부산지역의 해수면상승(SLR)과 불규칙성분(IC), 태풍해일로 인한 파고(SSL) 및 조위(TL)를 모두 고려한 최고해수위(PWL)를 도출하였다. 이에 미래 최고해수위 t시점에서의 최고해수위는 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$PWL_t = SLR_t + \{IC + SSL + TL\} \quad (5)$$

4) 침수위험면적 분석

미래 재현년도에 따른 침수위험면적 분석에 앞서, 부산시 해운대구와 수영강 유역 일대의 행정구역 중 “동” 단위에 해당하는 행정구역들의 최고해수위 높이에 따라 변화하는 침수위험면적을 나타내는 침수 프로파일(Inundation Profile)을 도출하였다. 본 과정에 필요한 수치표고모형(DEM)은 국토지리정보원에서 제공하는 수치지도를 통해 구축하였다. 침수위험면적분석은 공간정보 소프트웨어인 ArcGIS 10.1을 활용하였다.

분석에 있어 수역과 직접적으로 연결되어 실제 침수가 발생할 수 있는 지역만을 선정하기 위해 ArcGIS내의 Region Group 기능을 활용하였으며, 이를 통해 표고가 낮더라도 수역과 직접 연결되지 않은 지역을 침수지역으로 판정하는 오차를 제거하여 침수위험면적을 산정하였다(Figure 3).

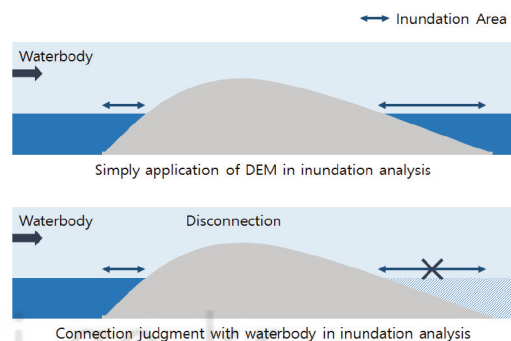


Figure 3. Method for estimating inundation area

분석을 통해 대상지 행정구역 중 동별 침수프로필을 도출하였으며, 앞선 최고해수위 분석 결과를 기준으로 미래 재현년도에 따른 침수위험면적을 도출하였다.

III. 결 과

1. 종합 해수위 분석 결과

1) 해수면상승 분석 결과

PSMSL에서 제공하는 부산 바다의 수위 관측값을 기반으로 분석을 진행하였다. 우선 1960-2010년 사이의 해수위 관측자료를 활용하여 2차 다항식을 통해 해수면 상승치를 도출하였고(Figure 4(b)), 수식은 (6)와 같다.

$$SLR_t = 0.000325t^2 - 0.03564t \quad (6)$$

$t = \text{cumulated month } (t_0 = 1 : 1960 - \text{Jan})$

이후 주기적 성분을 추정하기 위해 원자료에서 추정된 추세성분인 해수면 상승값을 제거한 편차데이

터를 활용하였다. 선행연구에 따라 푸리에 급수를 활용하여 주기적 성분을 추정하였으며(Foster, 2015; Campbell, 2005) 3차 푸리에급수를 활용하여 해수면의 주기적 변동량을 추정하였다. 추정한 주기적 성분을 제거한 뒤 잔차를 확인한 결과, 여전히 주기적 성분이 남아있음을 확인할 수 있었으며, 이에 2차로 주기적 성분을 추정하였다(Figure 5).

최종적으로 원자료에서 해수면상승, 2개의 주기적성분이 제거된 데이터를 불규칙성분으로 활용하였으며, 그 분포는 정규분포의 형태로(Figure 5), 그 식은 아래와 같다(7).

$$IC \sim N(\mu, \sigma | 0, 0.47) \quad (7)$$

이후 관측값과 앞서 구축한 모형들의 2011-2016년에 대한 30회 모의를 수행하였다. 예측 결과는 (SV_t+SLR_t+IC)는 Figure 6과 같이 나타났으며, 추정된 모형의 불규칙성분을 고려하여 여러 차례 모의할 시, 예측에 활용될 수 있는 수준으로 나타났다.

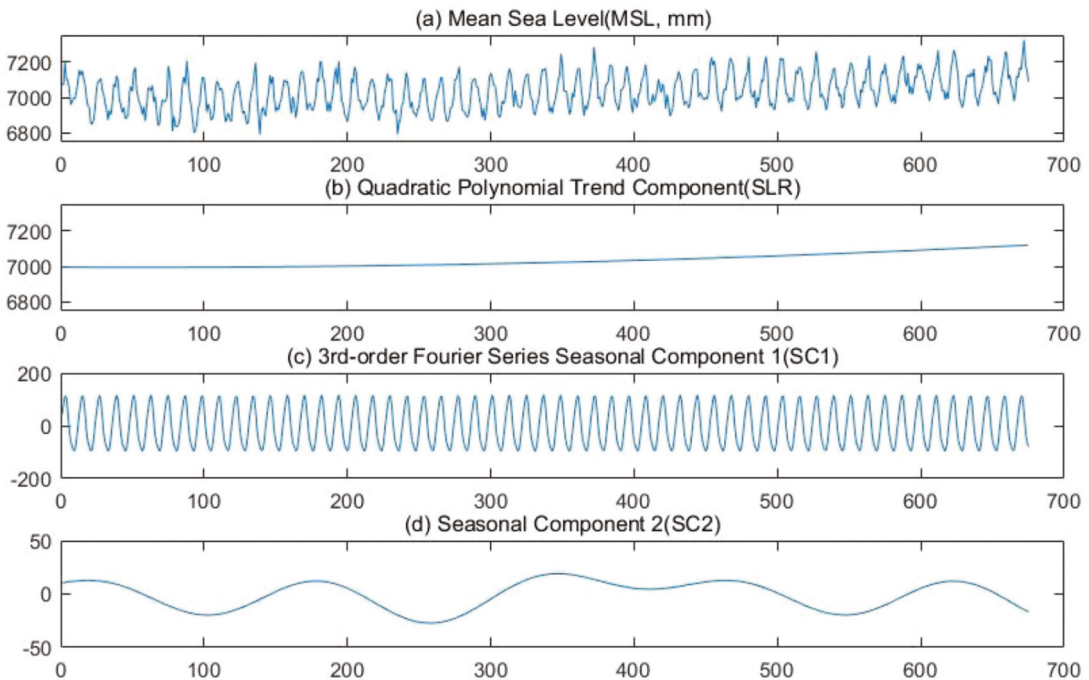


Figure 4. All Records span: 1960-2010, x-axis: months, y-axis: sea level (mm)

(a) Observed records (b) Estimated quadratic polynomial trend(SLR) (c) Estimated 1st 3rd-order fourier series seasonal component (d) 2nd seasonal component

2) 파고 및 조위분석 결과

기상청 해양기상관측자료를 기반으로 파고와 조위에 대한 분석을 진행하였다.

폭풍해일로 인한 파고와 조위에 대해 각각 GEV분포와 정규분포를 통해 추정한 분포는 Figure 7과 같이 나타났으며 추정 결과 아래와 같이 추정되었다(8, 9)

$$SSL \sim GEV(\mu, \zeta, \sigma | 0.23, 0.25, 0.15) \quad (8)$$

$$TL \sim N(\mu, \sigma | 0.52, 0.28) \quad (9)$$

3) 종합 해수위 분석 결과

구축된 해수면 상승모형에 따르면 미래 2050, 2080, 2100년대 부산 바다의 해수위는 Table 1과 같

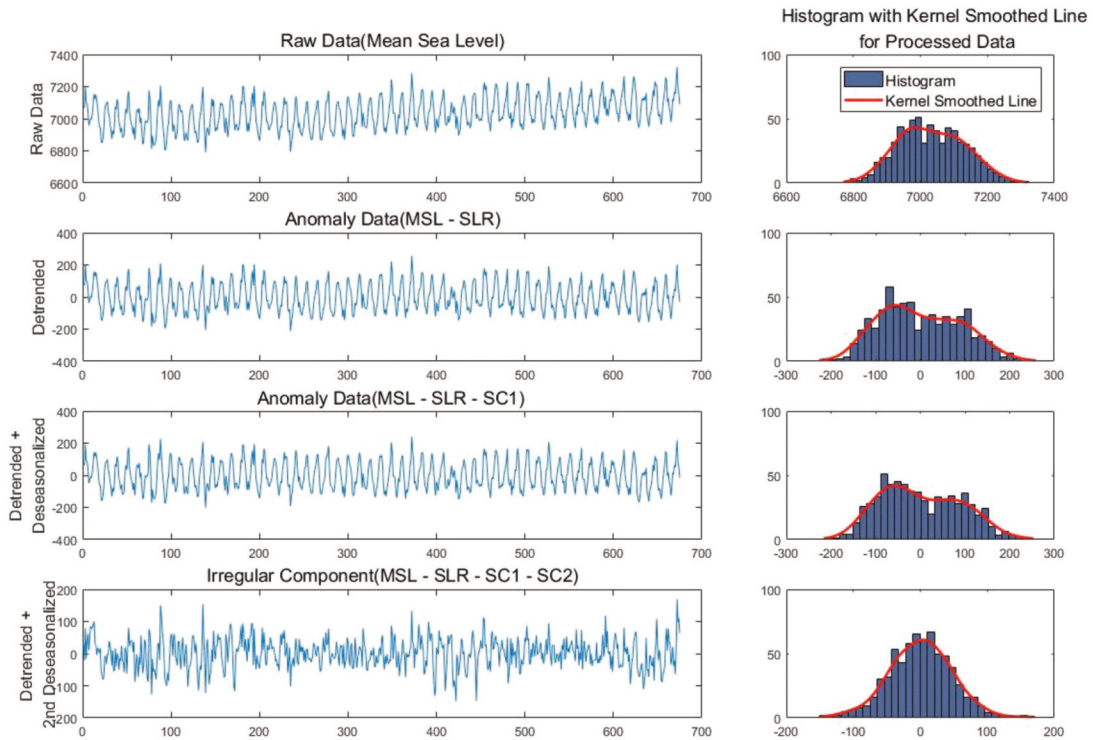


Figure 5. Anomaly data for each processing steps (left) with histograms for each processed data with kernel smoothed line (right)

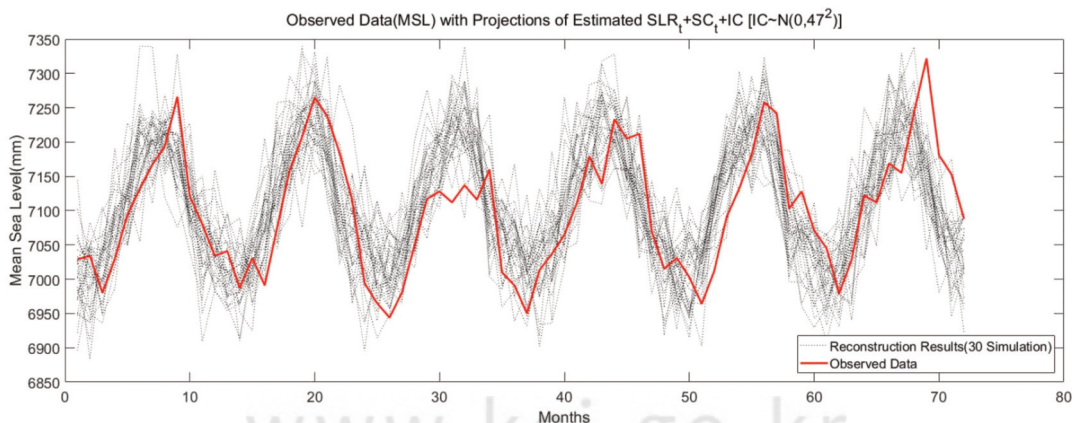


Figure 6. Comparison of observed mean sea level data with projections of estimated component models (30 Simulations)

Table 1. Projected sea level rise (mm)

Year	Mean Sea Level (MSL) (mm)	Sea Level Rise with current MSL (mm)
2017	7119.9	+ 0
2050	7331.0	+ 211.11
2080	7611.0	+ 491.07
2100	7844.4	+ 724.49

이 각각 0.211m, 0.491m, 0.724m 상승하는 것으로 모의되었다.

해수면상승과 함께 고려할 불규칙 성분과 태풍으로 인한 파고, 조위에 의한 영향은 각각의 확률분포

Table 2. Projected Peak Water Level (m)

Probability	Current	2050	2080	2100
1%	2.1m	2.3m	2.6m	2.8m
0.5%	2.4m	2.6m	3.0m	3.2m
0.1%	3.5m	3.7m	4.0m	4.2m

를 복합적으로 고려하였다. 세 확률분포의 합성을 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하였으며, 시뮬레이션 1회당 30,000개의 난수를 통해 결과를 도출하였으며, 30회 반복 수행하여 분석에 활용하였다.

최종적으로 해수면상승과 시뮬레이션 결과값을 고려한 현재와 미래 100년주기, 200년주기, 1000년주

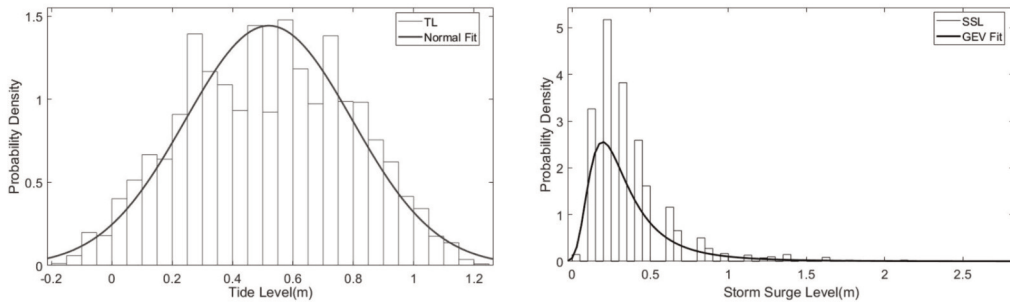


Figure 7. Histogram and fitted results of Tide Level (TL) and Storm Surge Level (SSL)

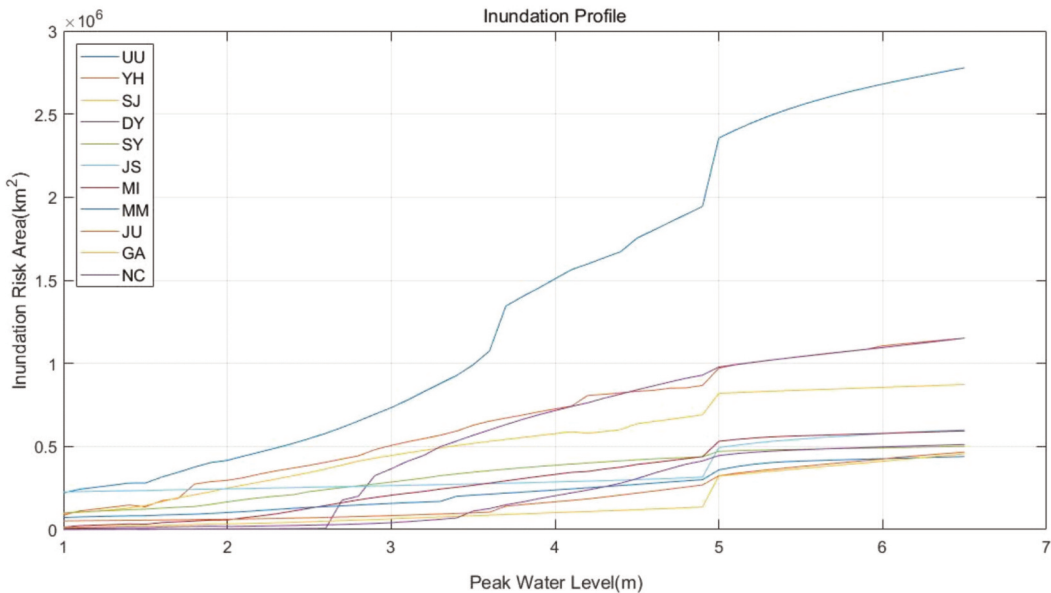


Figure 8. Inundation profile of coastal districts in study area

Acronyms: UU-U dong, YH-Yongho dong, SJ-Songjeong dong, DY-Daeyeon dong, SY-Suyeong dong, JS-Jaesong dong, MI-Milak dong, MM-Mangmi dong, JU-Jung dong, GA-Gwangan dong, NC- Namcheon-dong

Table 3. Land at risk (Inundation Area: km²)

Year	2050				2080				2100			
	2.3m (1%)		2.6m (0.5%)		2.6m (1%)		3.0m (0.5%)		2.8m (1%)		3.2m (0.5)	
	Dist.	Risk Area	Dist.	Risk Area	Dist.	Risk Area	Dist.	Risk Area	Dist.	Risk Area	Dist.	Risk Area
1	UU	0.492	UU	0.579	UU	0.579	UU	0.733	UU	0.653	UU	0.830
2	YH	0.354	YH	0.505	YH	0.505	YH	0.506	YH	0.443	YH	0.548
3	SJ	0.304	SJ	0.412	SJ	0.412	SJ	0.445	SJ	0.412	SJ	0.477
4	JS	0.250	JS	0.260	JS	0.260	DY	0.365	SY	0.263	DY	0.446
5	SY	0.201	SY	0.263	SY	0.263	SY	0.286	JS	0.256	SY	0.310
6	MM	0.121	MI	0.178	MI	0.178	JS	0.264	DY	0.201	JS	0.268
7	MI	0.095	DY	0.201	DY	0.201	MI	0.206	MI	0.178	MI	0.230
8	JU	0.067	MM	0.148	MM	0.148	MM	0.157	MM	0.148	MM	0.166
9	GA	0.041	JU	0.078	JU	0.078	JU	0.084	JU	0.078	JU	0.090
10	NC	0.023	GA	0.057	GA	0.057	GA	0.065	GA	0.057	GA	0.072
11	DY	0.005	NC	0.033	NC	0.033	NC	0.041	NC	0.033	NC	0.054

기(1%, 0.5%, 0.1%) 최고해수위 모의 결과는 Table 2와 같다.

2. 침수위험면적 분석 결과

침수위험면적 분석에 앞서 부산시 행정구역별 침수 프로파일(최고해수위: 1.0~6.5m)을 작성하였으며 결과는 Figure 8과 같다.

침수 프로파일 작성 결과, 우동과 재송동이 낮은 해수위에도 침수위험면적이 클 것으로 나타났으며, 이후 침수위험면적이 증가함에 따라 침수위험면적이 증가하는 행정구역은 우동, 용호동, 대연동, 송정동 등으로 나타났다.

작성한 침수프로파일을 활용하여 도출한 미래 부산시의 1%(100년 대비), 0.5%(200년 대비) 최고해수위에 따른 침수위험면적은 Table 3에 정리하였으며 모든 시기와 최고해수위에 있어 우동의 침수위험면적은 시기별 1%, 0.5% 발생확률의 해수위에 따라 2050년 1% 발생확률의 해수위인 2.3m에서 최소 0.492km²에서 최대 2100년 0.5% 발생확률의 해수위인 3.2m에서 0.830km²으로 가장 큰 것으로 나타났다. 용호동의 경우, 우동의 뒤를 이어 두 번째로 큰 침수위험면적을 나타내었으며, 우동, 용호동에 이어 송정동, 재송동의 침수위험면적이 크게 나타났다.

IV. 고찰

본 연구는 부산시 연안지역의 관측자료에 기반하여 통계적 방법론을 통해 해수면상승을 추정하고, 불규칙 성분, 파고, 조위 3가지 해수위 관련 요소를 복합적으로 고려한 예측 모형을 구축하였다. 이를 활용하여 현재와 미래(2050, 2080, 2100년)에 대한 재현기간별 최고해수위를 모의하였다.

더불어 침수위험면적 분석을 통해 동별 침수프로파일을 작성하였으며 이를 기반으로 재현기간별 최고해수위에 대한 침수위험면적을 도출하였다.

1. 최고 해수위 분석 결과

본 연구에서 1960년 1월부터 2016년 12월까지 50년의 평균 해수위 자료를 활용하여 해수면 상승모형을 구축하였다. 모형구축에 있어 원자료를 추세(해수면상승), 주기적변동, 불규칙변동으로 구분하여 분석에 활용하였으며 적절한 반영을 통해 최종 불규칙성분은 정규분포 형태를 나타냈으며, 이후 확률변수로 활용하였다.

그러나 해수면상승은 지각의 변동, 기온상승에 따른 해수 부피증가 및 빙하의 용해에 따른 유입 등의 물리적 현상에 기반한 분석을 통해 구축하는 방법이 더욱 정확하다. 해당 방법론의 경우 전지구 규모의

Table 4. Estimated sea level rise rate from other research

Research	Period of Estimation	SLR Rate (mm/year)
Kim (2017)	1965-2010	2.24-2.34
	2010-2060	2.35-4.63
Cho (2002)	1960-1999	2.31±2.22
Youn (2004)	1981-2000	2.80

수치 모델링 등의 천문학적 계산부하가 필요한 과정을 동반하여 진입장벽이 높고 개별 연구자가 활용하기 힘들다.

반면 통계적 분석의 경우, 실제 다양한 분야에서 활용되며 해수면상승 관련 연구에도 주로 활용되고 있는데(Oh et al. 2005; Foster 2015; Campbell 2005), 이는 물리적 모델링에 비해 과정이 간편하며, 충분한 기간의 관측자료를 활용할 경우 앞서 물리적 모델링에 언급한 변수들이 반영된 추세를 추정할 수 있어 충분한 설명력을 가질 수 있기 때문이다.

본 연구에서 추정된 연간 해수면상승률은 현재 또는 유사시점에 대한 추정 연구 결과와 비교하였을 때(Kim et al. 2017; Cho 2002; Youn et al. 2004), 1.90mm/yr로 더 낮게 추정되었으나, 미래시점에 대한 값의 경우 2017년을 기준하여 2050, 2080, 2100년 각각 6.40, 9.33, 11.67mm/year으로 모의되었으며, 이는 기존 Kim et al.(2017)의 2.346-4.627mm/yr (2010-2060)보다 높게 추정되었다. 이는 2차곡선의 특징 상 미래 시점에 대해서는 가속이 반영되어 높게 모의된 것으로 판단된다.

파고 및 조석의 경우 관측자료 및 예측자료를 기반한 모수추정방법으로 확률분포를 도출하여 활용하였다. 파고 발생확률 도출을 위해 활용한 자료는 2012년 1월부터 2017년 2월까지 5년간의 자료로 상대적으로 짧은 관측 기간의 자료를 활용하였다. 이에 추정치는 2012년 1월 이전 발생한 극값은 분석에 포함되지 않아 추정된 분포의 불확실성이 존재할 것으로 판단된다.

이에 미래 관측자료의 누적을 통해 분포추정에 활용될 수 있는 자료가 누적될 경우, 보다 많은 관측자료를 기반으로 확률분포를 추정할 수 있을 것으로 생각되며 이를 통해 미래 해수위 예측과 해당 해수위의

발생확률에 대한 예측에 있어 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있을 것이다.

또한 본 연구에서는 태풍 등으로 인한 강수에 따른 수위증가에 대한 고려를 하고 있지 않다. 이에 태풍과 동반한 강수까지 고려할 경우, 같은 재현기간에 더 높은 해수위값이 산정 될 것으로 생각되며 이에 침수위험면적 또한 증가할 것으로 사려된다.

2. 침수위험면적 분석 결과

침수위험면적 분석을 위해 구축한 수치표고모형(DEM)은 수치지형도의 표고점, 주곡선, 계곡선을 활용하여 구축하였다. 이에 1:5000 수치지형도의 해상도(5m)로 인한 지형의 오차가 발생할 수 있을 것으로 생각되며, 해당 부분은 본 연구의 한계점으로 생각된다.

해당 한계점의 극복방안으로 LiDAR(Laser Detection and Ranging)를 활용할 수 있다(Liu et al. 2007). LiDAR는 미터단위 이하의 고해상도 3D 데이터를 구축할 수 있으며, LiDAR를 활용할 경우 정교한 지형자료를 구축할 수 있을 것으로 생각되며 이를 통해 해수위에 따른 정확한 침수면적 및 침수위치를 도출할 수 있다.

본 연구에서 작성한 침수프로필은 해수위에 따라 동별 침수위험면적을 나타낸다. 이는 연안입지 행정구역의 침수대비를 위한 정책 및 기술 적용 시 우선 순위와 정책적용의 수준을 결정하는데 있어 기초자료로 활용될 수 있다.

그러나 본 연구에서 제시된 동별 침수프로필은 특정 최고해수위 발생 시 발생하는 침수위험면적에 대한 값으로 침수 면적의 용도(농업, 공업, 주거, 공공 등)와 포함되어 있는 구성요소(주거시설, 공공시설, 도로, 자연시설 등)에 따른 피해규모와는 다른 값을 나타낼 수 있으며, 이를 개별적으로 산정해 실제 피해의 경제적 규모를 추정할 수 있다(Prahl et al. 2016; Abadie et al. 2017). 이에 본 연구 이후 연구에서는 침수지역 용도별, 구성요소별 손실함수를 활용하여 침수발생 시 실제 피해규모 산정을 할 시 최종적으로 해수위에 따른 동별 피해규모 프로필을 작성할 수 있을 것이다.

Table 5. Expected inundation value of over 100-year return peak water level (Average of values under 1% probability)

	2050		2080		2100	
	Dist.	EIV	Dist.	EIV	Dist.	EIV
1	UU	0.566	UU	0.670	UU	0.766
2	YH	0.398	YH	0.458	YH	0.521
3	SJ	0.355	SJ	0.419	SJ	0.456
4	JS	0.255	SY	0.268	DY	0.398
5	SY	0.235	JS	0.261	SY	0.294
6	MI	0.138	DY	0.250	JS	0.266
7	MM	0.136	MI	0.184	MI	0.215
8	JU	0.072	MM	0.150	MM	0.160
9	GA	0.049	JU	0.080	JU	0.086
10	NC	0.028	GA	0.059	GA	0.067
11	DY	0.006	NC	0.035	NC	0.046

또한 본 연구에서는 앞서 해수위 분석을 통해 산정한 미래 100년 대비, 200년 대비 재현기간별 발생 해수위에 따른 동별 침수위험면적을 제시하였다. 다만 해당 결과는 100년, 200년 대비 해수위의 침수위험면적을 의미하며 그 이상의 규모(500년 대비, 1000년 대비 해수위)에 대한 피해량이 반영되지 않는다. 그러나 침수프로필에서 보는 바와 같이 해수위가 증가함에 따라 침수위험면적은 기하급수적으로 증가할 수 있다.

이에 100년 대비 발생 해수위를 기준으로, 그 이상 규모의 발생가능한 모든 해수위로 인한 침수위험면적을 모두 고려한 동별 침수위험면적의 기댓값(Expected Inundation Value: EIV)을 활용할 수 있는데, 이는 특정 발생확률() 이상에 대한 값들의 확률가중평균으로 그 식은 아래 식(10)과 같이 표현할 수 있으며 결과는 Table 5와 같다.

$$EIV = \frac{1}{1-\alpha} \int_{\alpha}^1 p_i F_{pi} \quad (10)$$

p_i = probability of PWL

F_{pi} = PWL at probability p_i

Table 5에서 볼 수 있듯, 전체적으로 단순 침수위험면적 보다 높은 결과값을 나타냈으며 이는 1% 발생확률의 해수위 이상 규모를 모두 반영한 결과물로

단순 100년 대비 해수위보다 동별 침수위험성을 잘 반영할 수 있다. 실제 결과값에서 볼 수 있듯 수영동, 민락동, 대연동에서 침수위험면적이 1%값과 비교하여 변동이 있음을 확인할 수 있었다.

실제 대부분의 연구에서 재현기간에 따른 확률, 재현기간에 해당하는 점의 침수예상면적을 활용하고 있으나, 특정 확률, 재현기간의 특정 지점의 값보다 특정 지점 이상과 같은 범위에 대한 기댓값의 경우 그 결과가 매우 상이하게 나타날 수 있다.

이에 기후변화로 인해 미래 극한현상이 더욱 자주 발생할 경우, 점에 해당하는 리스크 보다 특정 확률을 초과하여 발생할 수 있는 위험성을 고려한 값을 활용하는 것이 더 적합할 수 있을 것이다.

V. 결론

본 연구의 결과는 다음과 같다.

첫째로, 미래 해수면상승, 해수위 예측 모형을 구축함에 있어 과거 관측자료를 기반으로 통계적 방법을 활용한 모형을 구축하였다. 그 결과 미래 부산시 인근 바다의 해수면상승률과 재현빈도에 따른 최고 해수위를 도출할 수 있었으며, 해수면상승률의 경우 그 결과값이 타 연구와 비교했을 때 현 시점에 대해서는 낮게 추정하였으나, 2차곡선의 특징 상 미래 시점에 대해서는 가속이 반영되어 높게 모의되었다. 이후 결과와 몬테카를로시뮬레이션을 활용한 결과값을 통해 최고해수위에 대한 정량적 평가를 수행하였으며 침수위험면적 분석을 위한 기준값으로 연구에 활용하였다.

두 번째로 지리정보 소프트웨어를 활용하여 공간 분석을 수행하였으며, 그 결과 부산시 연안입지 행정구역들의 해수위에 따른 침수위험면적 변화와 관련한 침수프로필을 작성할 수 있었다. 이후 미래 재현기간별 최고해수위 값을 기준한 동별 침수위험면적을 정량적으로 도출하였으며 그 결과 우동, 용호동, 재송동, 송정동, 대연동의 행정구역이 침수위험면적이 클 것으로 나타났으며, 이 외 동의 결과 또한 확인할 수 있었다.

추가로 기준 재현기간 대비 최고해수위 이상의 해

수위로 인해 발생할 수 있는 침수위험면적의 기댓값을 산출하였으며, 단순 재현기간별 침수위험면적 산출 결과와 비교하여 다른 결과를 나타낼 수 있음을 확인하였다. 이는 미래 기후변화로 인해 발생할 수 있는 기준 재현기간 이상 규모의 해수위에 대한 결과값을 반영한 결과로, 실제 적응대책 적용을 위한 우선순위 도출 및 정책결정을 위한 기초자료로 특정 재현기간에 따른 침수위험면적보다 위험성을 반영하기에 적합할 것이라 생각된다.

본 연구는 침수에 대한 영향을 평가함에 있어 면적을 기준으로 결과분석을 수행하였으나 실제 공간은 면적 이상의 구조물, 인명, 부지의 용도 등에 따라 그 피해규모의 변동성이 클 수 있다. 이에 이후 연구에서는 공간의 특징 및 공간 내 구성요소에 따른 피해함수 작성 및 적용을 통한 실제 피해규모의 정량화 연구가 가능할 것이다.

사 사

이 연구는 환경부 기후변화대응환경기술개발사업(과제번호: 2014-001-310010)의 지원을 받아 수행된 연구임

References

- Abadie LM, Galarraga I, Murieta ES. 2017. Understanding risks in the light of uncertainty: low-probability, high-impact coastal events in cities. *Environmental Research Letters*. 120-014017.
- Campbell SD, Diebold FX. 2005. Weather Forecasting for Weather Derivatives. *Journal of the American Statistical Association*. 100(469): 6-16.
- Cho KW. 2002. Sea-level trend at the Korean coast. *Journal of Environment Science*. 11(11): 1141-1147. [Korean Literature]
- Church JA et al. 2013. Sea level change. In: *Climate change 2013: the physical science basis*. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge. United Kingdom and New York. NY. USA: Cambridge University Press.
- Foster G, Brown PT. 2015. Time and tide: analysis of sea level time series. *Climate Dynamics*. 45: 291-308.
- Kim DY, Park SH, Woo SB, Jeong KY, Lee EI. 2017. Sea Level Rise and Storm Surge around the Southeastern Coast of Korea. *Journal of Coastal Research*. SI(79): 239-243.
- Kim KY, Kim YJ. 2017. A comparison of sea level projections based on the observed and reconstructed sea level data around the Korean Peninsula. *Climatic Change*. 142(1-2): 23-36. [Korean Literature]
- KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2017. Domestic Statistics. [Korean Literature]
- Kwon HH, Uranchimeg S, Kim YT. 2016. Estimating the Accelerated Sea Level Rise along the Korean Peninsula Using Multiscale Analysis. *Journal of Coastal Research*. SI(75): 770-774.
- Lee SY, Choi JM. 2011. Analysis for Economic Cost of Sea Level Rise Case Study: Haeundae Gu, Busan. *Korean Geographical Society*. 46(5): 597-607. [Korean Literature]
- Liu X, Zhang Z, Peterson J, Chandra S. 2007. LiDAR-Derived High Quality Ground Control Information and DEM for Image Orthorectification. *GeoInformatica*. 11(1): 37-53.
- MATLAB 2017a. The MathWorks Inc, Natick. 2017.
- National Research Council. 2012. *Sea-Level Rise for the Coasts of California, Oregon and Washington: Past, Present and Future*.

- National Academy Press: Washington, D.C. http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=13389.
- Oh NS. 2005. Sea Level Rise at the South Western Coast of Korean Peninsula. *International Journal of Navigation and Port Research*. 29(4): 327-333. [Korean Literature]
- Park SJ, Lee DK, Sung SY, Jung TY. 2014. Risk Assessment of Potential Inundation Due to Sea Level Rise Using Bayesian Network. *Korea Planning Association*. 49(2): 347-358. [Korean Literature]
- Prahl BF, Rybski D, Boettle M, Kropp JP. 2016. Damage functions for climate-related hazards: Unification and uncertainty analysis. *Natural Hazards Earth System Science*. 16(5): 1189-1203.
- PSMSL. 2013. Permanent service for mean sea level data. <http://www.psmsl.org/data/obtaining>.
- Youn YH, Oh IS, Park YH, Kim KH. 2004. Climate variabilities of sea level around the Korean Peninsula. *Advanced Atmosphere Science*. 21(4): 617-626. [Korean Literature]