

인천항 제2연륙교 주경간의 적정 교각폭 결정에 관한 연구 (2) 제2연륙교 주경간의 통항방식에 따른 항만운영효율의 경제성 분석

구자윤* · 김석재** · 장은규***

*,**,***한국해양수산연수원 교수

A Study on the Optimal Span Width in the Bridge Main Span of Incheon 2nd Bridge

(2) Economic Analysis on Port Operational Efficiency according to Traffic Schemes in the Bridge Main Span of Incheon 2nd Bridge

Ja-Yun Koo* · Seok-Jae Kim** · Eun-Kyu Jang***

*,**,***Professor, Korea Institute of Marine and Fisheries Technology, Busan 608-080, Korea

요 약 : 인천항의 송도 신도시와 영종도 인천국제공항을 이어주는 제2연륙교 건설사업이 1999년 민간제안사업으로 정부에 제안되어 3차례에 걸친 통항 안전성 연구에도 불구하고 적정 교각폭이 결정되지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 인천항의 제2연륙교 설치시 왕복통항이 가능한 교각폭으로 설계한 경우를 대비하여 10,000G/T이상 선박이 일방통항으로 항로폭을 설계할 경우의 항만운영효율 변화 및 경제성을 분석하고자 한다.

연구결과, 제2연륙교 항로의 왕복통항대비 10,000G/T 이상 일방통항시 제2연륙교 주경간 항로에서의 총대기시간은 2011년도에 20,362시간, 2020년에는 24,544으로 평가되었다. 따라서 10,000G/T이상 선박의 일방통항에 따른 체선·체화비용으로 2011년에 약197억원, 2020년에는 233억이 될 것으로 추정되므로 제2연륙교가 완공될 2008년부터 2040년까지의 33년간의 총 체선·체화비용은 약7,689억원으로 평가 되었다.

핵심용어 : 적정 교각폭, 대기행렬이론, 체선비용, 체화비용, SLAM 시뮬레이션 언어, 통항 우선권, 평균 운영 수준

ABSTRACT : A construction project of Incheon 2nd bridge, which is connected between the Incheon Song-Do New Town and the Incheon International Airport in Young-Jong-Do, have been proposed by the private capital in 1999. But the optimal span width in the bridge main span have not been decided in spite of the three investigations into the feasibility of ship's safe transit in this planned bridge. In this paper, we study the economic analysis on port operational efficiency according to traffic schemes, one-way or two-way of vessels over 10,000G/T, in the bridge main span of this bridge.

In this comparative result, total queueing time due to the one-way in the bridge main span is evaluated 20,362 hours in 2011 and 24,544 hours in 2020. Therefore the demurrage cost and the accumulation cost of freight are evaluated 19.7 billion won in 2011, and 23.3 billion won in 2020, then total accumulated costs during 33 years from 2008 until 2040 are evaluated about 768.9 billion won.

KEY WORDS : Optimal Span Width, Queueing Theory, the Demurrage Cost, the Accumulation Cost of Freight, Simulation Language for Alternative Modelling, Transit Priority, Average Operational Utilization Level

1. 서 론

인천항의 송도신도시와 영종도 인천국제공항을 이어주는

제2연륙교 건설사업이 민간투자법에 따른 민간제안사업으로 1999년 정부에 제안되어 2008년도에 완공을 목표로 시행되고 있다.

이 교량은 사장교로서 현재 주경간폭 700m, 측경간폭 295m로 계획되어 있으나, 3차례의 통항 안전성 연구^{1),3),8)}에서도 주경간폭 670m 혹은 700m 조건 하에서의 통항안전대책이나 안전성 확보를 위한 비용추정을 목적으로 시행되어, 인천 항

* 대표저자: 구자윤(정회원), jykoo@scaman.or.kr 051)620-5765

** 정회원, kimsj@scaman.or.kr 051)620-5762

*** 정회원, ckjang@scaman.or.kr 051)620-5846

만효율성을 위한 적정 교각폭에 대한 연구가 시행되지 못한 관계로 인천지역사회에 상당한 논란이 이어지고 있다.

따라서 본 연구에서는 인천항에 제2연륙교 설치시 최대선형의 왕복통항이 가능한 1,000m 교각폭으로 설계한 경우와 10,000G/T 이상 선박의 교항이 불가능한 일방통항으로 교각폭을 설계한 경우를 대비하여 항만운용효율 및 경제성 변화를 분석하고자 한다.

연구의 공정성을 위하여 현재까지 통보된 정부의 공식 통계를 사용하였고, 기본적으로 사용한 자료로서 인천항 기본계획(해양수산부 고시 제2003-29호, 2003.05.19), 전국무역항 항만기본계획 용역보고서(해양수산부, 2001.10)⁵⁾ 및 항만산업의 경제적 파급효과에 관한 연구보고서(해양수산부, 2002.10)⁶⁾ 등이 인용되었다.

본 연구에서는 제2연륙교 주경간 교각폭에 의한 통항방식에 따른 항만운영 효율을 평가하기 위해 대기이론 시뮬레이션 기법에 근거한 SLAM(Simulation Language for Alternative Modelling) SYSTEM ver. 4.6으로 시뮬레이션을 하여 제2연륙교 주경간을 통항하는 선박의 대기시간을 추정하고 이에 다른 항만의 체선·체화비용을 평가하여 제2연륙교 주경간폭이 항만운용효율에 미치는 파급효과를 판단하고자 한다.

2. 인천항 운영효율 평가모델의 구성

2.1 인천항 및 제2연륙교의 항로 통항 특성

인천항에서 제2연륙교의 영향을 포함한 항만운영 효율변화 및 경제성을 평가하기 위해 다음과 같은 항로의 통항 특성으로 모델을 설계하였다.

- (1) 선박의 통항은 교통안전특정해역내에서는 해상교통안전법, 항계내에서는 개항질서법이 적용되어, 교통안전특정해역내에서는 병행통행, 항계내에서는 단선항행이 가능하다. 다만 제2연륙교에서는 500G/T 이상은 주경간 항로를, 500G/T 미만은 측경간 항로를 이용한다.
- (2) 선박의 항로 진입부 도착은 포와송 형태(Poisson Manner)를 따른다. 즉, 각 항로별 입항선박의 도착시간은 지수분포(Exponential Distribution)에 따른다.
- (3) 항로에 도착한 선박은 선행선박과의 거리가 충분할 때 항로에 진입할 수 있다. 최소한 선박간의 이격거리는 선박길이와 선속에 따른 최소이격거리에 따른다.
- (4) 항로의 진입순서는 먼저 도착한 선박이 먼저 진입한다 (First Come First Served Queue Discipline).
- (5) 갑문 이북의 위험물 운반선박은 야간 입출항이 제한된다.
- (6) 현행 정부의 준설계획인 동, 서수도는 DL(-)15.7m, 남항 및 팔미도 북측항로는 DL(-)14.0m, 남항이북 제1항로는

DL(-)12.0m을 적용하는 것으로 시뮬레이션을 계획한다.

- (7) 대개 20,000 G/T (35,000DWT급) 이상의 선박은 만재 흘수가 11.0m 이상으로, 제1항로 준설계획 항로수심인 12.0m에서 조위를 맞추기 위한 조위대기가 필요하다.
- (8) 항로내에서 모든 선박이 일정한 속도로 항행한다. 단, 항로내의 각 구간에 대한 평균 속도는 해당 구간별로 따로 정한다.
- (9) 선박이 항로내의 교차점을 진행할 때 안전상 일정시간 동안 다른 선박이 진입할 수 없으며, 선박의 항로 교차점 통과시간은 5분으로 한다.
- (10) 내항을 입항하기 위한 갑문 입거는 매시간 1척 이용 가능하다. 따라서 내항 입출항시 1만톤 및 5만톤의 2개 갑문을 이용할 수 있으며, 각 갑문 점유시간은 35분으로 한다.²⁾
- (11) 항로의 교차점에서 선박이 조우하게 될 때 선박의 항행규칙에 따른 우선순위에 따라 교차점을 통과한다. 개항질서법에 의거하여 항로 진출입 선박과 항로를 통항하는 선박 사이에는 항로 진출입 선박이 피항할 의무를 가진다.
- (12) 항로의 교차점이나 항로의 기종점에는 선박의 대기에 필요한 충분한 수역을 가진다.
- (13) 선박이 항로내에서 정선할 때에는 그 정선 위치를 유지할 수 있고, 정선후 다시 그 영역내 항행속도로 항해하기까지의 지체시간은 무시한다.
- (14) 항만에서의 선박의 부족으로 인한 대기는 고려하지 않는다.
- (15) 예인선, 도선사의 숫자는 충분하여 이들을 기다리는 시간의 지체는 없다.
- (16) 항내 소형선박(길이 30m 미만인 선박)은 고려대상에서 제외하였으며, 전 선박의 항로내의 운항에 대해서는 완전한 통제가 이루어진다.
- (17) 연륙교 통과시 일방통항을 시행한다면 안전을 위한 선박간 이격거리는 해양수산부의 “인천항 항만기능 유지방안 연구용역”(2004. 9.)에서 4~6마일을 산정하였으며, 본 연구에서는 그 최소값인 4마일을 이용한다.
- (18) 항만운영 효율성 시뮬레이션에서 사용하는 제2연륙교 통과시 선박의 대기속력은 10Kts로 한다.

2.2 인천항 항로의 모형

인천항과 제2연륙교 주변 항로의 특성을 고려하면서 인천항을 경인운하, 북항, 내항, 연안항, 남항, 묘박지, 남외항 구역의 7개 지역으로 나누어 12개 교차부를 포함한 전체 항로에 대하여 항만운영효율을 평가하기 위해 SLAM SYSTEM을 이용하여 1년 동안 약525,600분간의 시뮬레이션을 시행한다. 인천항 항로상에서의 선박 운항은 Fig. 1과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

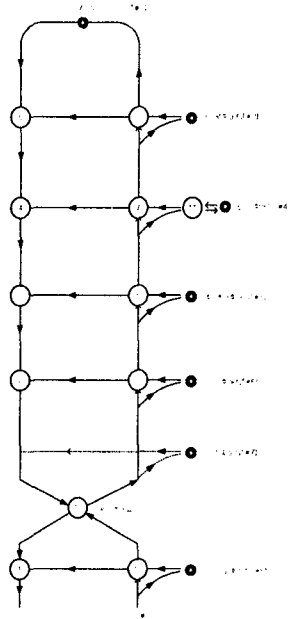


Fig. 1 Location of Piers and Number of Crossing Point

이 때 7개 지역으로 구분한 각 부두에 선박이 접이안하기 위해서는 12개의 교차점이 발생하는 것을 알 수 있다. 그리고, 12개 교차점에서의 선박 통행 우선순위는 개항질서법에 의거하여 Table 1과 같이 설계한다.

Table 1 Transit Priority at Each Crossing Point

교차부 번호	선박 진입방향	통행 우선권	점유시간 (분)
1	• 8진입부(남외항) → 출항항로	출항항로	5
	• 출항항로		5
2	• 6진입부(남항) → 출항항로	출항항로	5
	• 출항항로		5
3	• 5진입부(연안항) → 출항항로	출항항로	5
	• 출항항로		5
4	• 4진입부(내항) → 출항항로	출항항로	5
	• 출항항로		5
5	• 3진입부(북항) → 출항항로	출항항로	5
	• 출항항로		5
6	• 3진입부(북항) → 출항항로	입항항로	5
	• 입항항로		5
7	• 4진입부(내항) → 출항항로	입항항로	5
	• 입항항로		5
8	• 5진입부(연안항) → 출항항로	입항항로	5
	• 입항항로		5
9	• 6진입부(남항) → 출항항로	입항항로	5
	• 입항항로		5
10	• 8진입부(남외항) → 출항항로	입항항로	5
	• 입항항로		5
11	• 8교차부 → 4진입부(내항)	출항항로	35
	• 4진입부(내항) → 7교차부		35
12	• 입항항로	-	24
	• 출항항로		24

(주) 교차점 12에서의 점유시간은 일방향로의 조건에서 10,000G/T 이상 선박간의 교차에 한하여 적용된다.

2.3 항만 운영효율 평가 모델의 흐름도

항만 운영효율 평가 시뮬레이션 모델의 흐름도는 전체적으로 Fig. 2에 나타내고 있다.

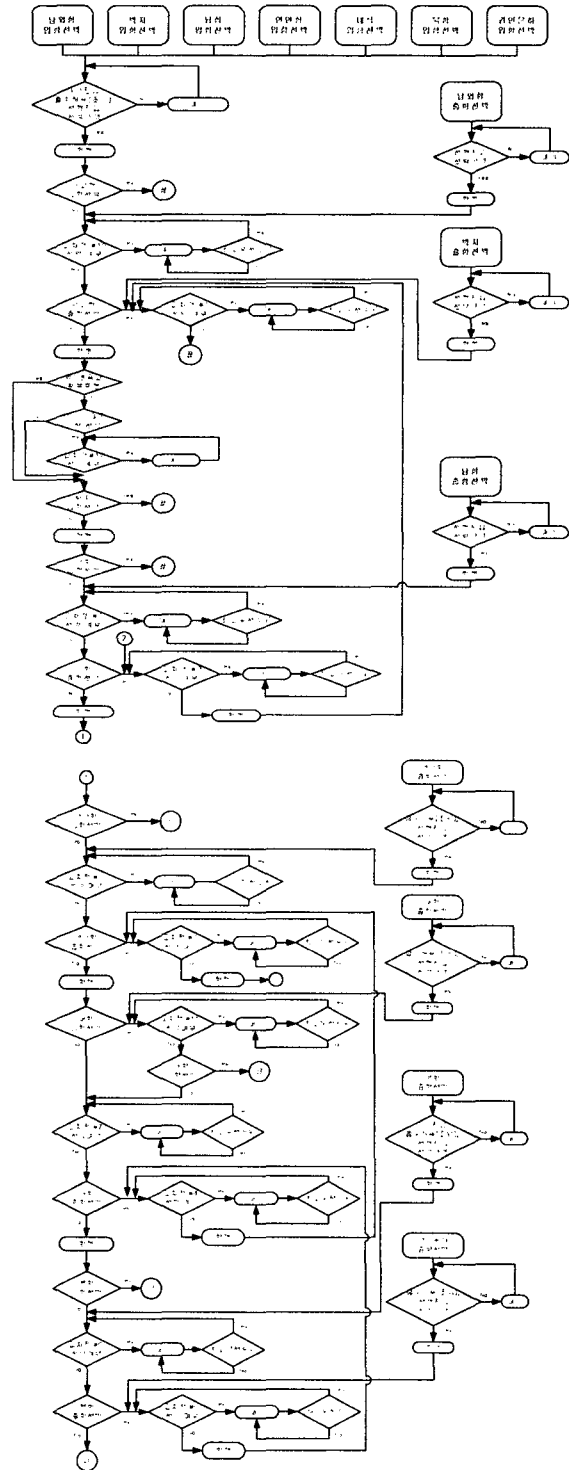


Fig. 2 Flow Chart to evaluate the Operational Utilization Levels of Lock Gates

2.4 평가 모델에 사용된 데이터

(1) 항로내 선박의 속력과 항행시간

항로내 각 교차점간의 항로길이를 선박종종 시뮬레이션 결과 획득한 평균선속으로 나누면 Table 2와 같이 각 교차점간의 항행시간이 계산된다.

Table 2 Channel Length and Average Pilot Time

영역별	선박 항행경로	항로 길이 (mile)	평균 선속 (kts)	항행 시간 (분)
남외항	•입항: 1진입부 → 10교차부	2.0	12	10
	•출항: 8진입부 → 10교차부	6.0	8	45
	10교차부 → 1교차부	-	-	-
남항	•입항: 10교차부 → 12교차부	8.0	10	48
	•출항: 12교차부 → 9교차부	1.5	10	9
	6진입부 → 9교차부	1.5	4	23
	9교차부 → 2교차부	-	-	-
	2교차부 → 12교차부	1.5	10	9
연안항	•입항: 9교차부 → 8교차부	1.5	6	15
	•출항: 5진입부 → 8교차부	0.5	4	8
	8교차부 → 3교차부	-	-	-
	3교차부 → 2교차부	1.5	6	15
내항	•입항: 8교차부 → 7교차부	0.5	6	5
	•출항: 4진입부 → 11교차부	-	-	-
	11교차부 → 7교차부	0.5	4	8
	7교차부 → 4교차부	-	-	-
	4교차부 → 3교차부	0.5	6	5
북항	•입항: 7교차부 → 6교차부	1.3	6	13
	•출항: 3진입부 → 6교차부	0.5	4	8
	6교차부 → 5교차부	-	-	-
	5교차부 → 4교차부	1.3	6	13
경인운하	•출항: 2진입부 → 5교차부	3.5	6	35
기타	•10교차부 → 묘박지 •묘박지 → 1교차부	-	-	부시

(2) 선박의 도착시간 분포

모든 선박은 스수분포에 따라 항로의 진입부에 도착하며, Table 3의 평균도착시간간격에 의하여 발생한다.

(3) 교차점 통과시간

일반 교차점에서의 점유시간은 여유치를 고려하여 5분으로 한다. 갑문에서의 점유시간은 각 갑문당 35분으로 한다.

(4) 모델의 수행시간

모델은 분단위로 수행되며, 1년(525,600분)의 기간동안 수행한다.

(5) 선박간 최소 진입간격

항로내에서 안전을 위하여 최소 이격거리를 유지하며, 항로내에서 10노트로 항행할 경우 선박의 최소 진입간격은 Table 3과 같다.

(6) 제2연륙교 통과시 선박간 이격거리

제2연륙교 통과시 일방통행을 시행한다면 안전을 위한 선박간 이격거리는 해양수산부의“인천항 항만기능 유지방안 연구용역”(2004. 9.)에서 4~6마일을 산정하였으며, 본 연구에서는 그 최소값인 4마일을 이용한다.

(7) 제2연륙교 통과시 대지속력

항만운영 효율성 시뮬레이션에서 사용하는 제2연륙교 통과시 선박의 대지속력은 10Kts로 한다.

Table 3 Average Arrival Time Interval and Min. Time Interval required to enter Each Pier of Incheon Port in 2020

2020년	본수구분 (G/T)	입항 척수 (척)	평균도착 간격 (분)	선박 길이 (m)	선박간 최소진입간격	
					최소이격거리 (m)	최소시간간격 (분)
남외항	일반화물, 유류	0.5K 미만	17	30,917.6	35	496
		0.5K-10K	2,819	186.4	139	1,970
		10K-20K	713	737.2	144	2,041
	20K 이상	913	575.7	260	3,685	
	컨테이너	10K-20K	432	1,216.7	159	2,253
남항	일반화물, 유류	0.5K 미만	4,051	129.7	35	496
		0.5K-10K	4,249	123.7	139	1,970
		10K-20K	177	2,969.5	144	2,041
	20K 이상	92	5,713.0	200	2,834	
	컨테이너	10K-20K	169	3,110.1	159	2,253
연안항	일반화물	0.5K 미만	386	1,361.7	35	496
		0.5K-10K	681	771.8	139	1,970
		10K-20K	29	18,124.1	144	2,041
	20K 이상	16	32,850.0	200	2,834	
	컨테이너	10K 미만	34	15,458.8	122	1,729
내항	일반화물	0.5K 미만	10	52,500.0	35	496
		0.5K-10K	1,737	302.6	139	1,970
		10K-20K	415	1,266.5	144	2,041
	20K 이상	462	1,137.7	200	2,834	
	컨테이너	10K 미만	446	1,178.5	122	1,729
북항	일반화물	0.5K 미만	4	131,400.0	35	496
		0.5K-10K	721	729.0	139	1,970
		10K-20K	172	3,055.8	144	2,041
	20K 이상	192	2,737.5	200	2,834	
	유류	0.5K 미만	14	37,542.9	35	496
경인운하	일반화물	0.5K-10K	714	736.1	139	1,970
		10K-20K	38	13,831.6	144	2,041
		20K 이상	333	1,578.4	200	2,834
	컨테이너	10K 미만	629	835.6	122	1,729
	10K-20K	606	867.3	159	2,253	
박지, 기타	일반화물 (거점도, 공항물량)	0.5K 미만	1,117	470.5	35	496
		0.5K-10K	944	556.8	139	1,970
		10K-20K	328	1,602.4	144	2,041
	20K 이상	115	4,570.4	200	2,834	
	합계		38,464			

(주) 2011년도의 평균도착시간간격은 계제 생략.

3. 제2연륙교 주경간 통항방식에 따른 항만 운용효율 변화 및 경제성 분석결과

3.1 제2연륙교의 주경간 통항방식에 따른 항만운용효율 변화의 분석결과

제2연륙교의 주경간을 1,000m 교각폭으로 왕복통항이 가능한 경우와 10,000G/T 이상의 선박이 일방통항만이 가능한 경우에 대하여 SLAM SYSTEM을 이용하여 인천항 전항로의 항만운영효율을 평가하는 시뮬레이션을 시행한 결과 발생된 대기시간은 Table 4와 같다.

제2연륙교 주경간 항로의 왕복통항 대비 10,000G/T 이상 선박의 일방통항시 주경간 항로 총 대기시간은 2011년도에 20,362시간, 2020년에는 24,554시간으로 추정된다.

Table 4 Queuing Time according to Traffic Scheme.

연도	위 치	통항량 (척)	평균 대기시간			총대기시간 (시간)
			왕복통항 (분)	10K이상 일방통항 (분)	평균 대기시간 (분)	
2011년	제2연륙교 주경간항로 입항	20,412 (5,924)	0.00	25.80	25.80	8,777
	제2연륙교 주경간항로 출항	20,324 (5,980)	0.00	34.20	34.20	11,585
	제2연륙교 주경간 항로 총 대기시간 (입출항)					20,362
2020년	제2연륙교 주경간항로 입항	21,992 (6,343)	0.00	29.70	29.70	10,887
	제2연륙교 주경간항로 출항	21,244 (6,246)	0.00	38.60	38.60	13,667
	제2연륙교 주경간 항로 총 대기시간 (입출항)					24,554

(주) 괄호안은 일방통항에 해당하는 10,000G/T 이상 선박 척수임.

3.2 항만운영효율 변화에 따른 경제성 분석결과

2003년도 인천항 제2연륙교 이북으로 입항한 10,000G/T 이상의 선박 3,325척의 평균톤수는 22,070G/T로 산정되었고, 컨테이너선은 19,704G/T 수준이었다.

일방통항시 대기비용을 산정하기 위한 향후 인천항의 10,000G/T 이상 화물선의 평균톤수는 약 22,000G/T(약 40,000DWT)을 유지하는 것으로 잡고, 컨테이너선의 평균톤수는 특히 남창측의 향후 컨테이너 전용터미널 개장으로 2,700TEU급 (약 40,000DWT)를 평균으로 보아 산정한다.

항만의 체선·체화에 따른 경제적 비용분석은 “항만산업의 경제적 파급효과에 관한 연구(해양수산부, 2002.10)”의 Table 5를 근거로 계산하면 Table 7과 같다.

Table 5 Demurrage Charge of 40,000DWT Vessel per Day.

구 분	체선비용(천원)	체화비용(천원)	합 계(천원)
컨테이너	22,111	19,331	41,492
일반화물	7,541	7,365	14,906
산 화 물	9,092	402	9,493
액체화물	21,184	1,294	22,478

(주) 자료: 항만산업의 경제적 파급효과에 관한 연구(해양수산부, 2002.10), P.129

Table 6 Demurrage Cost and Accumulation Cost of Freight for One-Way Traffic Scheme in vessels over 10,000G/T.

연도	총대기 시간(일)	선종비용 (%)	체선비용 (백만원/일)	체화비용 (백만원/일)	소계	총대기 비용 (억·원)
2011년	848.4	화물선 (60.7)	3,883	3,793	7,676	196.72
		유조선 (11.4)	2,049	125	2,174	
		컨테이너선 (27.9)	5,234	4,588	9,822	
2020년	1,023.1	화물선 (62.7)	4,837	4,725	9,562	233.14
		유조선 (10.7)	2,319	142	2,461	
		컨테이너선 (26.6)	6,017	5,274	11,291	

따라서 제2연륙교의 10,000G/T 이상 선박의 일방통항에 따른 체선·체화비용은 2011년에 약 197억원, 2020년에 233억원이 발생될 것으로 추정되고, 제2연륙교가 완공될 2008년부터 2040년까지의 33년간 제2연륙교의 10,000G/T 이상 선박의 일방통항에 따른 총 체선·체화비용은 약 7,689억원으로 평가된다.

4. 결 론

인천항 송도 신도시와 영종도 인천국제공항을 연결하는 제2연륙교는 물류비용 절감하는 중요한 기능을 하는 다리인 반면에 인천항의 주항로를 횡단함으로써 주경간폭에 따라서는 인천항만 효율에 막대한 영향을 미칠 것으로 예상된다.

제2연륙교는 현재 주경간폭 700m, 측경간폭 295m의 사장교로서 계획되고 있고, 주경간으로 통항하는 주항로폭은 10,000G/T이상 선박의 경우 일방통항만 가능하므로 왕복통항이 가능한 경우와 대비하여 파급되는 항만운영 효율 및 이에 따른 경제성의 변화를 분석하였다.

제2연륙교 주경간을 왕복통항하는 경우와 일방통항만 가능한 경우를 대비하여 인천항 전항로의 항만운영효율을 평가하는 시뮬레이션을 SLAM SYSTEM으로 시행하고 그 결과를 분석하여 제2연륙교에 의해 발생하는 선박 대기시간을 추정하였다.

그 결과, 주경간 왕복통항시에는 별도의 대기시간이 발생하지 않았으나 10,000G/T 이상 선박이 일방통항할 경우 제2연륙교 주경간 항로에서만 발생하는 총대기시간은 2011년도에 20,362시간, 2020년에 24,554시간으로 추정되었다. 발생된 선박 대기시간에 의한 체선·체화비용을 산출한 결과 2011년에는 약197억원, 2020년에는 233억원으로 매년 이와 유사한 체선·체화비용이 발생할 것으로 평가되었다. 따라

서 제2연륙교가 완공될 2008년부터 2040년까지의 33년 동안 주경간 일방통행으로 발생하는 총체선·체화비용은 약 7,689억원으로 추정된다.

그러므로 제2연륙교 주경간의 교각폭이 700m인 경우 인천항 최대선형의 일방통행은 가능하나 최대선형과 일반 중·소형선박과의 왕복통행이 불가능하므로 일방통행에 의한 체선·체화비용의 과대한 지출 측면이나 항만운용효율 및 선박안전통행 측면에서도 제2연륙교 주경간은 왕복통행이 가능한 1,000m의 폭으로 설계되어야 할 것이다.

또한, 제2연륙교의 2008년까지의 교량공사 중에도 선박운항이 불가피하므로 선박의 안전운항을 확보하기 위한 철저한 사전대비 및 확실한 계획이 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] 한국해양수산개발원의 (2004), 제2연육교의 선박통행 안전성 확보 및 인천항 항만기능 유지방안 연구 최종보고서
- [2] 한국해양수산연수원 (2000), 인천항 갑문문짝(10KT) 증설공사 관련 선박조종 시뮬레이션 용역보고서
- [3] 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 (2001), 인천국제공항 제2연육교 선박운항 안전성 평가 최종보고서
- [4] 해양수산부 (2000), 항행위험해역에 대한 해상교통환경평가 용역보고서
- [5] 해양수산부 (2001), 전국무역항 항만기본계획 용역보고서 (제2권 기본계획)
- [6] 해양수산부 (2001), 전국항만 기본계획
- [7] 해양수산부 (2002), 항만산업의 경제적 파급효과에 관한 연구
- [8] Japan Maritime Science Inc. (2004), Ship Navigation Safety Assessment (Incheon 2nd Bridge, South Korea), Feb., 2004