

## 노후 잔교식 부두의 동적구조 안전성 평가에 관한 연구 Evaluation of Dynamic Structural Safety of Aged Finger Pier

이 성우\*    이 상호\*\*    지 기환\*\*\*  
Lee, Sung Woo    Lee, Sang Ho    Jee, Kee Hwan

### ABSTRACT

Evaluation of structural stability of aged wharf structure of pier type is of great importance for both safety and rehabilitation. Series of field dynamic experiments were performed for berthing impact and the results were used to calibrate analysis model. Through dynamic analysis for design berthing impact, safety of old wharf structure were evaluated. In this paper the procedure and results of experiments and analysis are presented.

### 1. 서 론

오늘날 건설된지 20년 이상되는 노후 부두가 점차 늘어나고 수출입의 증가로 인한 항만의 물동량이 날로 증가하고 있음에 따라 노후 부두의 안전성 검토와 부두 수명연장을 위한 적절한 경제적인 보강대책 마련이 절실한 연구과제로 부각되고 있다. 그러나 국내에서는 지금까지 부두 구조물에 대한 현장 계측이나 비파괴 시험, 동적해석등을 통한 정량적인 분석이 거의 시행된 바가 없어 참고자료가 극히 빈약한 실정이다. 차제에 본 연구진은 건설된지 23년이 된 노후 잔교식 유류 부두(그림1 참조)의 안전성 평가와 그에 관한 연구를 수행하게 되었고<sup>(1)(2)</sup>, 본 논문에서는 이 과정에서 수행한 현장 접안 충격시험과 동적해석을 통한 안전성 평가 방법을 기술하고자 한다.

현장 시험시 동적계측은 하부 강관파일의 응력 응답, 부두 횡변위 응답, 방충재(Fender) 변위 응답, 부두의 가속도 응답등에 대하여 실시 하였다. 고무 방충재의 노후화로 인한 에너지 흡수율의 저하는 현장에서 채취된 방충재의 반력시험 결과를 이용하여 안전성 검토에 반영하였다. 현장조사 결과와 동적시험 결과를 이용하여 해석 모델을 설정하였고, 부두의 안전성 평가는 설계 접안 선박에 대해 동적해석을 통하여 수행하였는데 본 논문에서는 동적시험 및 해석모델 설정에 대해 중점적으로 기술하고자 한다.

### 2. 현장 접안 충격 시험

\* 정희원, 국민대학교 토목공학과 부교수, 공학박사

\*\* 해운항만청 개발국 건설과, 공학박사

\*\*\* 정희원, 국민대학교 토목공학과 연구원, 공학석사

검토 대상이 되고 있는 잔교식 부두 구조물은 현재 선박 접안시나 강풍시 부두가 크게 흔들리고 있으며, 부두하부의 콘크리트 파일캡에는 매우 큰 종방향 균열들이 발생해 있고 특히 사항 접합부에 균열이 매우 심한 실정이다. 이러한 문제들은 부두의 노후화로 강관의 부식이 발생하였고, 시공된 사항의 경사각이 설계와 큰 차이가 나서 부두 하부 구조물의 유연도를 크게 증가 시켰으며 그러한 상황에서 부두상부에 유류파이프 증설등 중량을 추가 하였기 때문에 접안 충격력으로 인한 부두의 흔들림을 크게 증가 시켜 유발된 것으로 판단 되었다. 이러한 상황을 고려해 볼 때 설계도면에 근거한 해석만으로는 노후 구조물의 동적 거동을 정확히 파악하기 힘든 것으로 판단되어 접안 충격 시험을 통한 동적 계측을 수행하게 되었고, 이 시험 결과를 해석 모델에 반영하여 노후 부두의 안전성을 평가하기로 하였다.

동적 계측은 하부 파일의 응력 응답, 부두의 횡변위 응답, 고무 방충재의 횡변위 응답, 부두의 가속도 응답 등에 대하여 실시하였다. 그림 2 와 그림 3 에서는 게이 지 및 계측 장치의 설치위치 평면도 및 단면도를 보여주고 있고, 그림 4 에서는 부두 횡변위 측정 모습을 보여 주고 있다. 사진 1 에서는 선박 접안시 모습을 보여주고 있고, 사진 2 에서는 계측 광경의 일부를 보여주고 있다. 그림 5 에서는 현장 계측 및 재생 흐름도를 보여주고 있다.

이 부두의 설계 접안 톤수는 5000 DWT이나 현장 충격 시험은 500 DWT급 소형 선박을 이용하여 수행하였다. 제 2 부두 접안시 대표적인 응답을 그림 6 에서부터 그림 9 까지 보여주고 있는데 이들과 현장조사 결과를 이용하여 해석 모델을 설정하였다.

### 3. 해석 모델 설정

동적 해석을 위한 유한요소모델은 Loading Platform 상판은 평면응력 요소로 하고 하부 강관 파일과 콘크리트 파일 캡은 보 요소로 구성하였고(그림10 참조) 해석은 SAP90<sup>(3)</sup>을 이용하여 수행하였다.

강관파일 중 사항(Batter Pile)은 그 경사각이 부두 하부 구조물의 횡방향 유연도에 크게 영향을 미쳐 모델 설정을 위한 해석시 횡방향 진동 주기와 응답형태에 매우 큰 변수로 작용하였다. 실제로 현장에서 실측한 사항의 경사각은 설계도면의 경사각과 크게 차이가 났고, 이 실측된 경사각을 이용하여 해석 모델을 수정하므로써 계측된 파일의 응력 응답에 근접하는 응답을 얻을 수 있었다. 강관 파일의 두께 역시 현장에서 실측한 데이터를 해석모델에 반영하였다. 한편 콘크리트 파일 캡의 균열등은 탄성 해석모델의 보 요소에 적절히 반영하기가 어려워 전단면에 대한 단면성질을 사용하였다. Loading Platform의 유류 파이프 및 지지구조물에 대한 상재하중과 질량 역시 현장조사 자료를 근거로 입력하였다. 특히 연직방향 하중은 접안 충격시에도 항상 일정한 정적 하중으로 작용하므로 동적해석시 접안 하중과 시간차를 주어 재하시켜 횡방향 진동시에도 항상 일정하게 작용하도록 하였다.

한편 접안 하중의 모델은 매우 어려운 부분 중의 하나인데, 선박이 접안할 경우 접안 속도로 인한 선박의 운동에너지가 고무 방충재에 일부 흡수되고 나머지 에너지가 부두에 횡력으로 작용하게 되는 방충재의 반력으로 전환된다. 이를 정량적으로 결정하기 위해서는 접안 순간의 선박 접안속도와 접안방향, 선박의 접안지점(Berthing Point)등이 정확히 측정되어야 한다. 또한 접안시 한개의 고무 방충재에 접촉되는 것이 아니므로 접안 에너지를 정확히 안다고 하더라도 이 에너지가 각각의

방충재에 얼마만큼 분포되는지를 알아야 한다. 이러한 측정이나 분석은 현실적으로 거의 불가능하므로 다음과 같은 방식을 채택하였다. 즉 우리가 측정한 방충재의 변위 응답을 참고로(그림 9 참조) 시간 함수를 그림 11 과 같은 사다리꼴 형태로 설정하였고 지속 시간은 여러번의 측정결과를 참고하여 1.7초 정도로 하였다. 충격력의 크기와 분포는 방충재의 변위응답의 크기를 참고로 설정하였다. 방충재의 흡수에너지가 결정되면 현장에서 채취하여 시험한 방충재의 특성시험 데이터(그림 12 참조)를 이용하여 방충재의 변위와 반력을 구하게 되며 이때 방충재의 반력이 충격력의 크기가 된다. 여기서 계산된 방충재의 변위(표 2 참조, 4.5cm)가 측정된 변위응답 진폭(그림9 참조, 4cm)과 비교하여 근접한 값이 되도록 접안 에너지의 크기와 각 방충재에 대한 에너지 분포를 결정하였다. 접안 에너지의 크기는 접안속도와 선박의 접안지점에 크게 영향을 받으므로 상기 접안에너지 크기를 발생시키는 접안속도 40cm/sec(항만설계 기준에는 최대 30cm/sec이나 충격시험시는 측정을 위해 정상시보다 빠른속도로 접안시켰다)와 2/5지점에 접안하는 경우를 선택하였다. 그림 13 에는 접안 선박 및 방충재 배치도를 보여주고 있다.

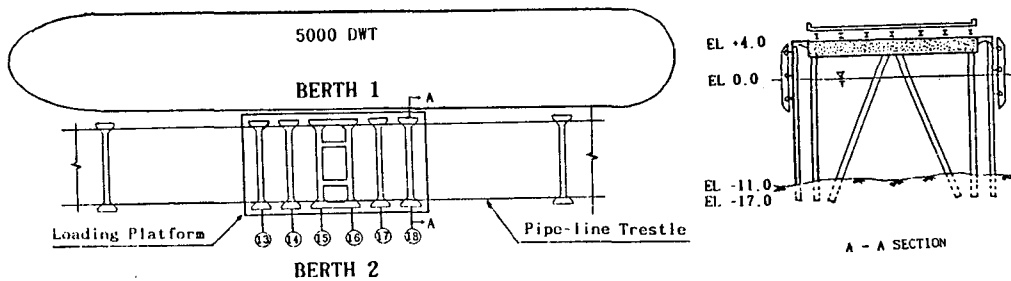


그림 1 검토대상 잔교식 유류부두의 평면도 및 단면도

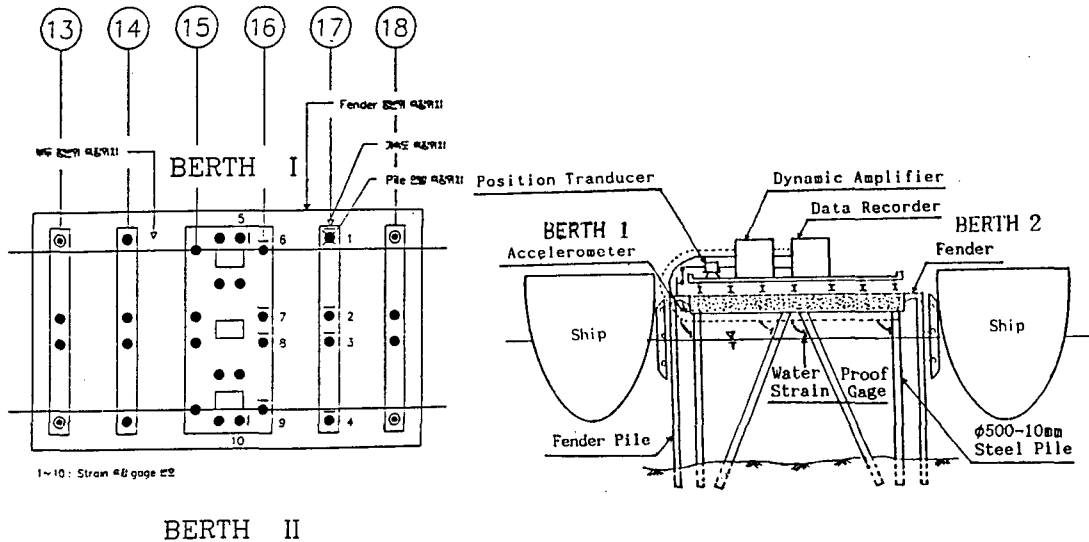


그림 2 동적 계측 장치의 설치위치 평면도

그림 3 동적 계측 장치 설치 단면도

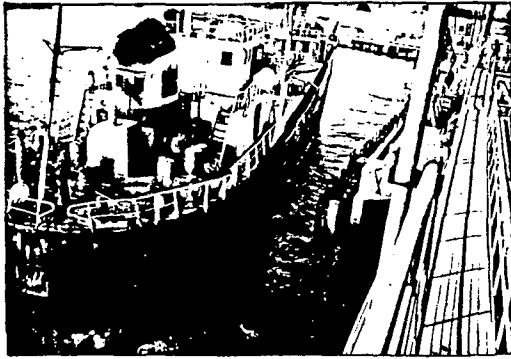


사진 1 선박 접안 모습

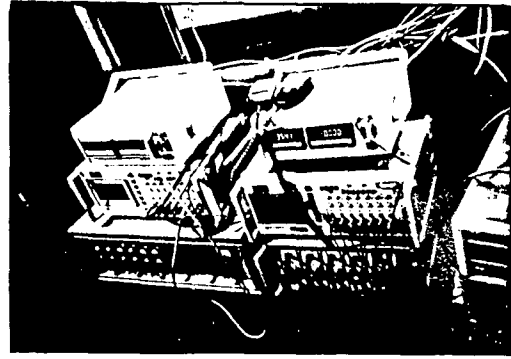


사진 2 접안 충격 시험시 동적 계측 모습

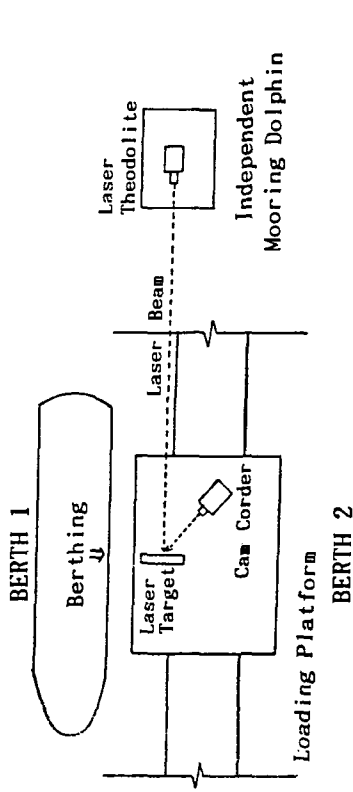


그림 4 부두 횡변위 측정 개요도

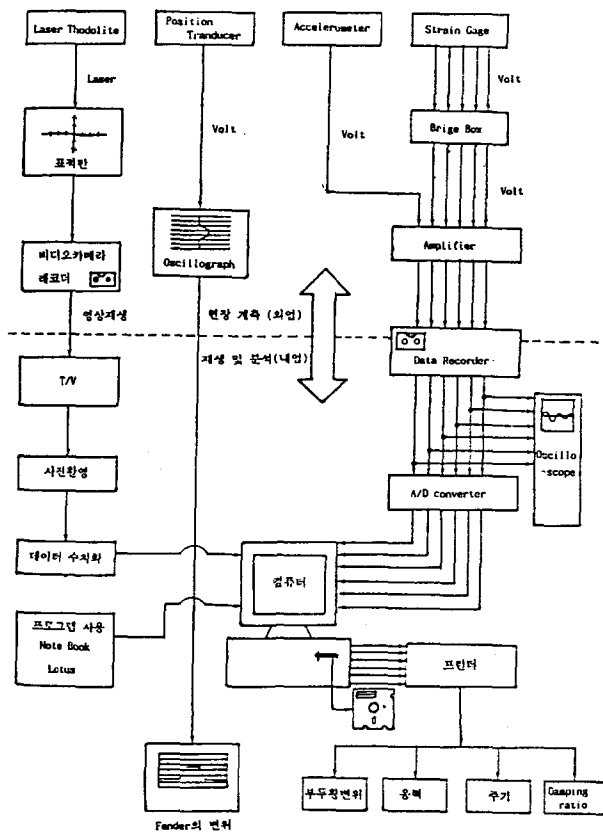


그림 5 현장 계측 및 재생 흐름도

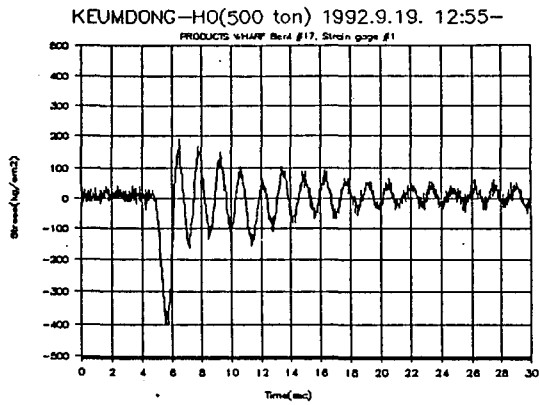


그림 6 직향(Gage #1)의 응력 응답

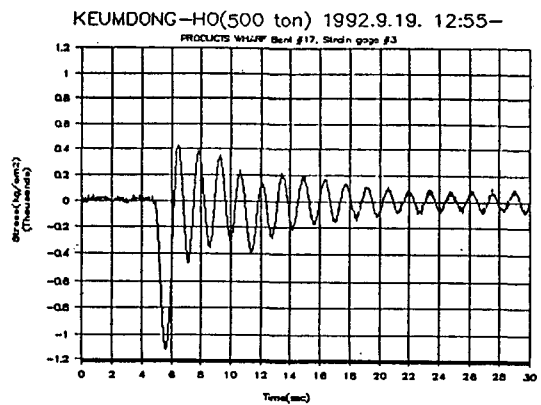


그림 7 사향(Gage #3)의 응력 응답

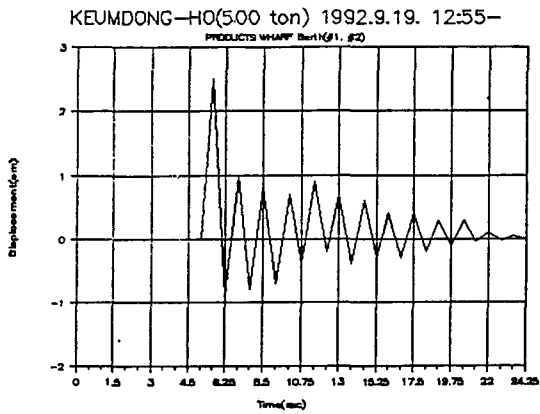


그림 8 부두 횡변위 응답

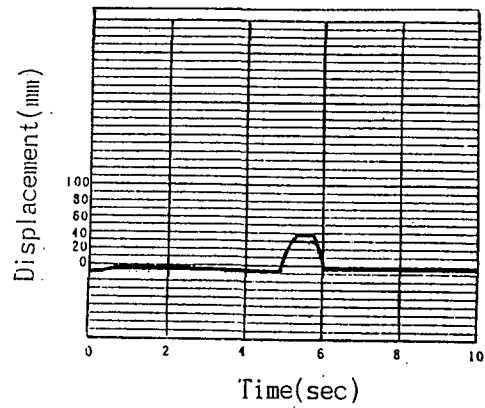


그림 9 방층재 변위 응답

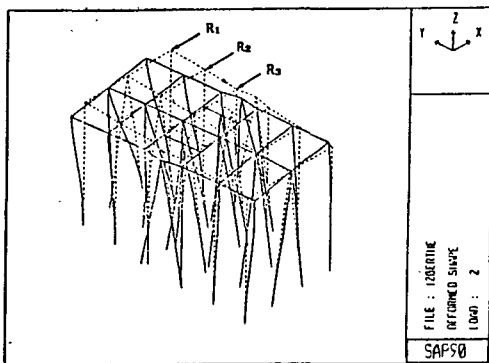


그림 10 점안하중 작용시 변형 전후 유한요소모델

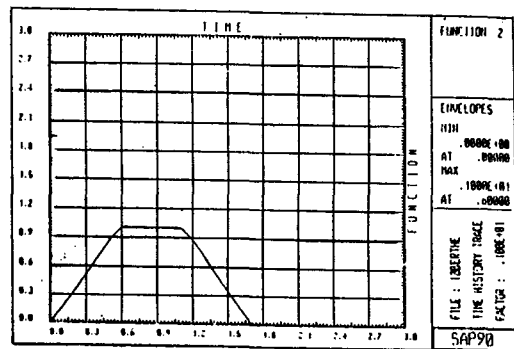


그림 11 점안 충격 하중 함수

접안 에너지는 다음과 같이 구해진다<sup>(4)</sup>

$$ER = K \cdot (W_1 + W_2) \cdot V^2 / 2g \quad \dots \dots \dots (1)$$

여기서 ER은 접안에너지, K는 접안지점에 따른 계수, W<sub>1</sub>(ton)은 배수톤수, W<sub>2</sub>(ton)는 해수에 의한 부가중량이고, V는 접안속도(m/sec)를 나타낸다. 이들로 구해진 접안에너지 및 횡하중 분포가 표 1 과 표 2 에 수록되어 있다.

한편 감쇠율은 실측된 응답의 감쇠효과와 비교하여 3%로 설정하였다. 그림 14 에는 제 2 부두쪽 직항에 대한 비교를 보여주고 있는데 비교결과 주기, 진폭, 반응모양등이 모두 잘 근접하였다. 본 논문에는 수록하지 않았으나 다른 파일에 대한 응답에 대한 비교도 매우 근접하는 결과를 얻었다. 따라서 이 부두에 대한 해석모델이 올바르게 설정되었음을 입증하였다.

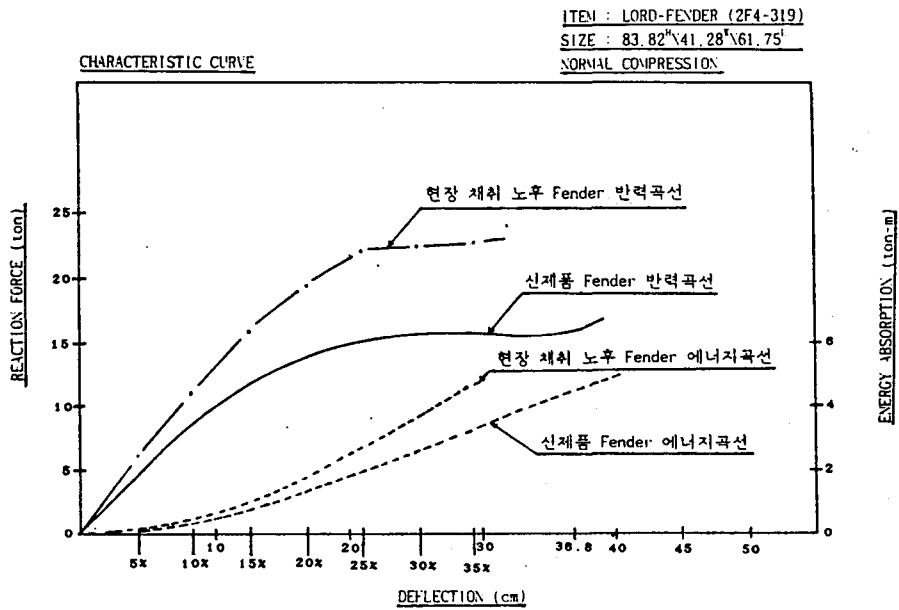


그림 12 방충재 특성 시험 곡선

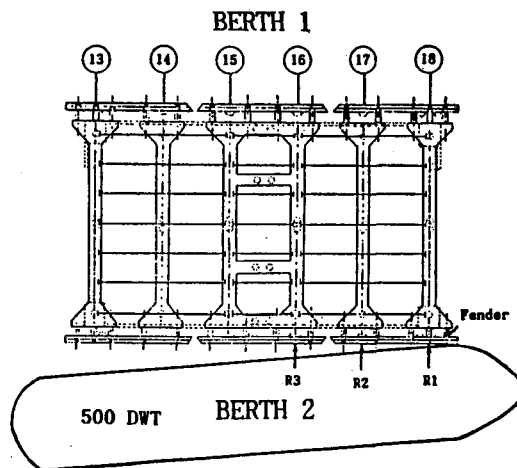


그림 13 접안선박 및 방충재 배치도

표 1 500DWT 선박의 운동 에너지

DWT (ton)	배수론수 $W_1$ (ton)	L (m)	H (m)	부가중량 $W_2$ (ton)	$W$ ( $W_1+W_2$ ) (ton)	접안에너지 E (ton-m)
500	667	43	3.5	424	1091	7.45

표 2 500DWT 선박의 충격 횡하중 분포

BENT No.	반력점	접안 에너지 분배 ton-m(%)	FENDER 갯수	FENDER 한개당 에너지 ton-m	FENDER 한개당 DEFLECTION cm(%)	FENDER 한개당 REACTION (ton)	BENT 별 접안 충격력 (ton)	
18	R <sub>1</sub>	42	6.33 (85)	3	2.11	18.5 (21.36)	20.7	62.1
17	R <sub>2</sub>	35	0.75 (10)	2	0.38	7.0 (8.08)	9.5	19.0
16	R <sub>3</sub>	28	0.37 (5)	2	0.19	4.5 (5.20)	6.0	12.0

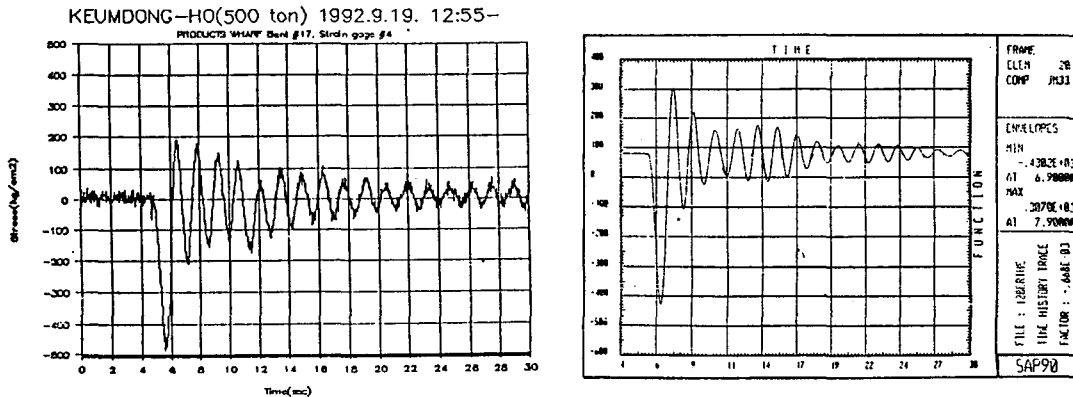


그림 14 제 2 부두쪽 직항 비교

#### 4. 안전성 평가

안전성 평가는 전항에서 설정된 모델을 이용하여 설계선박 5000 DWT에 대하여 동적해석을 한 후 강관 파일과 콘크리트 파일 캡등에 대해 허용응력을 초과하는지 여부를 검토하였다. 또한 부두의 횡변위가 허용범위 내에 들어오는 지도 검토하였다. 강관의 허용 응력계산에 이용된 항복응력은 현장에서 채취된 강관 시편의 인장시험 결과를 이용하여 결정하였다. 이밖에도 현장에서 채취한 콘크리트 코아 시료를 시험하여 재료의 강도가 저하되었는지 여부를 검토하였다. 안전성 검토로 문제점이 발견됨에 따라 적절하고 경제적인 보강 방안이 제시되었으나 본 논문에서는 생략하기로 한다.

## 5. 결론

노후 잔교식 부두의 안전성 평가를 위하여 현장에서 소형선박에 대한 접안 충격시험을 수행하였고, 이 시험을 통하여 부두 횡변위 응답, 강관 파일의 응력 응답, 방층재 변위 응답등에 대한 동적계측을 수행하였으며 본 논문에서는 계측 절차 및 수행 방법과 그 결과를 기술하였다. 해석모델은 계측 결과와 현장조사 결과를 반영하여 설정하였으며 동적해석 결과와 계측 결과를 비교 분석하여 모델의 타당성을 입증하였다. 부두의 안전성 평가는 설정된 모델에 대해 설계 선박에 대한 동적해석을 통하여 수행하였다. 본 연구를 통한 안전성 평가 과정에서 밝혀진 여러가지 노후화 현상과 동적 구조거동의 분석은 향후 잔교식 부두 뿐만아니라 다른 유형의 노후 항만 구조물의 안전성 평가에도 원용될 수 있을 것으로 기대되며, 신설 항만 구조물 설계시 내구 연한을 향상시킬 수 있는 기법을 개발하는데도 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고 문헌

1. 이성우외 , 호남정유 제부부두 안정성 검토보고서 , 국민대학교/대림엔지니어링 (주) 연구보고서, 1993. 2.
2. 지기환, 노후 잔교식 부두의 구조 안전성 평가에 관한 연구, 국민대학교 석사학위 논문, 1993. 2.
3. Wilson E. L. and Habibullah, A., SAP90- Structural Analysis Program, Computer and Structures, California, 1992.
4. 해운항만청, 항만설계기준, 1990.