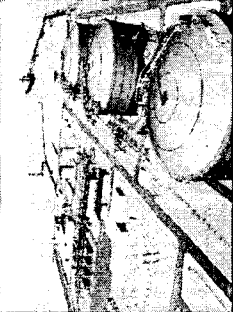


2005 유체기계(공)연구회 연구개발발표회  
 2005. 12. 1(화)~2(목)  
 창원대학교

## 20만 m³급 저장식 LNG 저장탱크 구조물의 기술자립

진세진, 진병무, 김영진, 김성운  
 한국해양대학교  
**해양대우건설 기술연구소**

## 발표순서



- 개요
- 외조 설계기술 개요
- 대용량 탱크 설계
- 특수 해석
- 맺음말

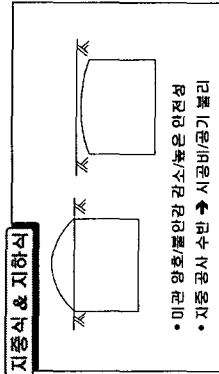
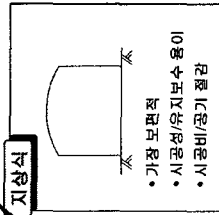
## ■ 개요

- LNG (액화천연가스)
  - 천연가스 : 도시가스, 복합화력발전소, 자동차 연료 등
  - LNG : 부피 1/600, 극저온 (-163°C)
- 연구 배경
  - 당사 인천, 동명 LNG 탱크 시공 경험 → 높은 시공 기술력 보유
  - LNG 탱크 설계기술은 소수의 해외 설계사만 보유
    - 해외 프로젝트 참여 기회 제한, 해외 설계기술 제휴 불가피
  - 대용량화 경향 → 현재 저장식은 16만 m³급 상용화, 20만 m³급 시도

## ■ 연구 목적

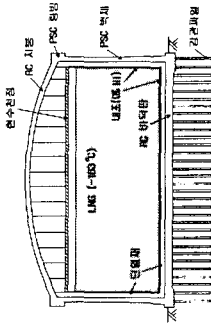
- 저장식 LNG 탱크의 설계기술 확보
  - 국내 기술로 해외입찰 참여
  - 설계비 절감, 설계-시공 일관성
- 대용량 저장식 탱크의 설계기술 선점
  - 최대 16~18만 m³ → 본 과제 20만 m³
- 탱크 구조물의 고급 해석기술 축적
  - 극저온/고온시 온도해석, 유체를 고려한 지진해석 등

■ LNG 탱크 형식 (위치별)



■ LNG 탱크 형식 (방호형태별)

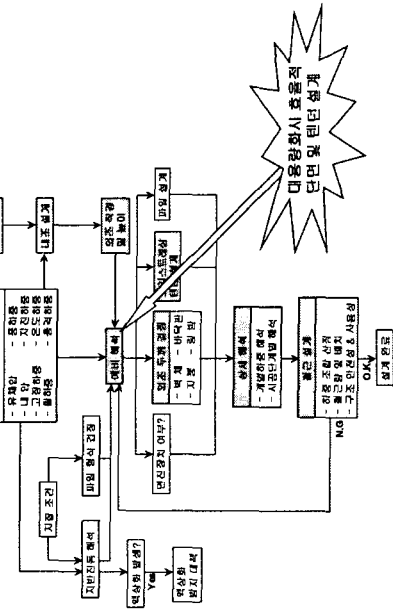
- 단일방호식
- 이중방호식
- ✓ 안전방호식 : 현재 가장 보편적



- 본 설계의 특징
- 대용량화의 영향 고찰
  - 한계상태설계법 채택 (BS 8110)
    - 설계 자동화 시스템 구축
  - 정밀 온도해석 및 지진해석

■ 외조 설계기술 개요

■ 외조 설계 절차



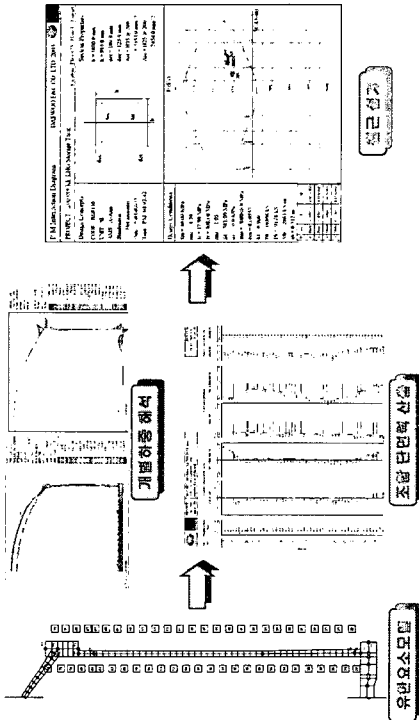
■ 유한요소해석

- 해석프로그램 : ANSYS
  - 사용된 요소
    - 일반 하중 해석 : 축대칭 요소
    - 풍하중 해석 : 3차원 요소
    - 온도 해석 : 축대칭 슬리드 요소
    - 지진 해석 : 진동결함+패대요소 (진동결함모델)
- 특수 축대칭 요소 (축대칭모델)

■ 지반진동해석

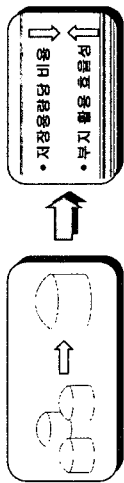
- 해석프로그램 : ProShake

■ 주요 설계 프로세스 자동화



■ 대용량 랙크 설계

■ 대용량화의 영향

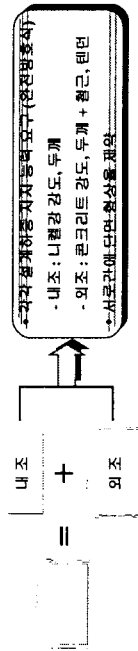


■ 세계 최대 대용량 랙크

형식	용량 (t)	위치
W/ 콘크리트 지붕	16만	Dahje (India)
지상식 W/O 콘크리트 지붕	18만	Senboku (Japan), Himeji (Japan)
지중식	20만	Negishi (Japan), 인천 (Korea)
지하식	20만	Ogajima (Japan)

\* 국내 최대 지상식 랙크 : 용량 (14만 t)

■ 대용량 랙크의 형상



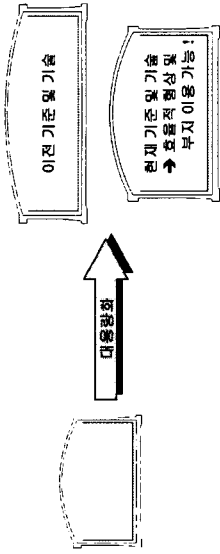
- 내조 : 대용량화시 전체 형상(직경 및 높이)을 결정짓는 주요 요인
- 외조 : 대용량화시 경제성과 관련된 주요 요인

■ 대용량 내조 설계

• 내조 설계기준의 개점 (예)

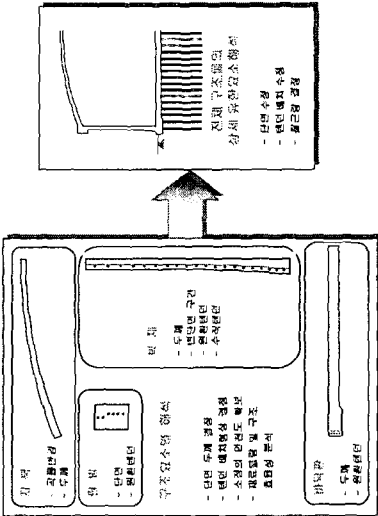
설계기준	내조 최대두께	충수 시험 (최고연계수위 대비)
BS 7777	30 mm	연계충수 (100%)
EN 265002	50 mm	부분충수 (60%)

• 내조 제작기술 발전 : 두꺼운 판 제조 가능, 용접 기술 발전



■ 대용량 외조 설계

- 기존 설계에 전무 → 소경의 단면 안전성 및 효율성 확보의 어려움
- 외조 구조요소별 예비 해석 (Shell) → 시행착오 최소화



■ 대용량 링빔 설계

- 지붕-링빔 점하중의 수평력에 저항
- 돌 라이즈(↑)(동 극률반경↓) 수평력↓
- 링빔 원환텐던 게수 결정절차 중요
- 텐던 배치에 적합한 링빔 크기 확보
- 지붕 및 링빔의 상호 시공순서 매우 중요 → 링빔 인장 및 압축응력 관리

20만 톤급 링빔 설계예

Types of LNG tank	Dimensions of ring beam			Dome loadings		Total stress	Remark
	Width	Height	Prestressing	Externally distributed load	Self-weight		
Conventional design	A: 1.3m B: 1.1m	3.2m 2.6m	-40.3 -67.8	106.7 18.5	53.6 44.7	30.0 -4.6	
Proposed design	H: 1.3m I: 2.0m	3.2m 4.3m	-60.6 -33.8	13.8 7.7	46.4 23.9	-0.4 -0.2	Inefficient space for tensions Acceptable

Units : kgf/cm<sup>2</sup>

■ 대용량 지붕 설계

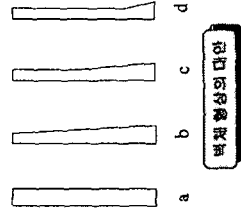
- 대용량에 따른 지붕 경간 증가
- 지붕 단면력 증가
- 지붕 내력 증가 필요 : 두께 증가 vs 극률 반경 감소 (올량 및 시공비 면에서 판단 필요)

20만 톤급 링빔 지붕 설계예 (외조 내경 : 92m)

Types of LNG tank	Dimensions of dome		Internal pressure (3.7 MPa)	Self-weight (0.5 MPa)	Externally distributed load (0.5 MPa)	Total stress (total stress)	Safety factor (allowable stress / total stress)	Remark
	Radius of curvature	Thickness						
Conventional design	A: 1.0d B: 1.0d C: 1.0d D: 0.98d	0.6m 0.45m 0.3m 0.6m	26.5 28.8 34.0 16.5	-7.1 -5.8 -7.6 2.2	-1.8 -1.9 -2.3 1.1	19.4 23.0 26.4 19.8	1.23 1.05 0.92 1.22	
Proposed design	E: 0.8d F: 1.0d G: 1.0d	0.6m 0.6m 0.65m	22.7 28.4 26.2	-4.0 -7.6 -7.6	-0.7 -1.9 -1.8	18.7 20.8 18.6	1.29 1.16 1.30	Acceptable

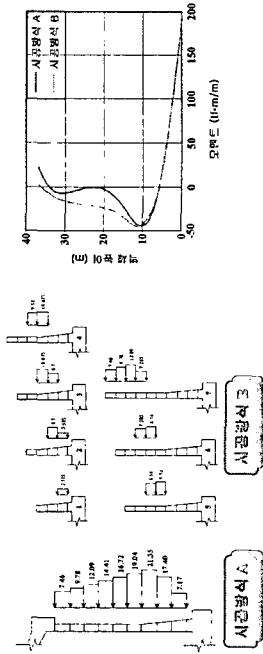
■ 대용량 벽체 설계

- 단계별 검토 필요
- 설계하중이 텐던에 의해 일부 또는 전부 상쇄되는 경상가동시, 누출 사고시보다는 시공시기가 더 critical한 경우도 많음
- 예비 해석
- 원환텐던 설계 : 가장 기본이 되며 중요
- 수직텐던 설계
- 최대두께 결정
- 고강도 콘크리트 적용유력 (예) 400 kgf/cm<sup>2</sup> 강도 일반적 → 600 kgf/cm<sup>2</sup> 강도
- 벽체 변단면 구간 결정 중요



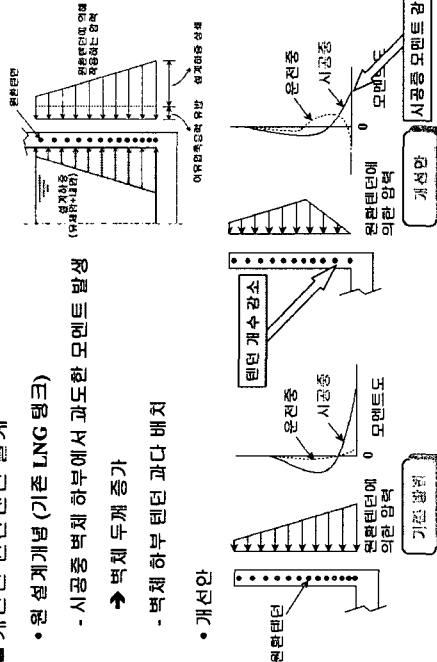
■ 대용량 벽체 설계

- 시공법 개선에 따라 효율적 단면 및 공기 단축 가능
- 엄밀한 시공단계별 해석 중요
- 예) 바닥판 원환부와 벽체 하부의 동시 긴장 여부  
벽체시공과 프리스트레싱의 순서 (아래 예)

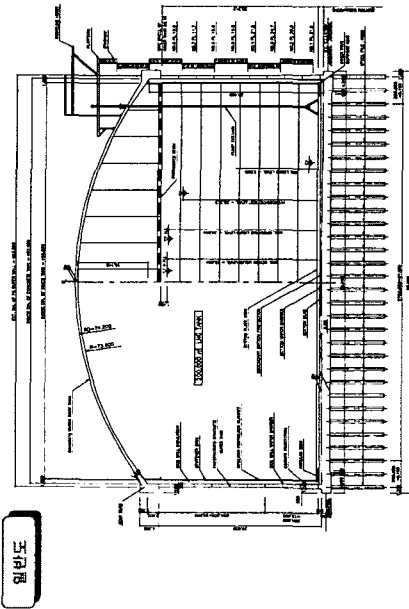


■ 개선된 원환텐던 설계

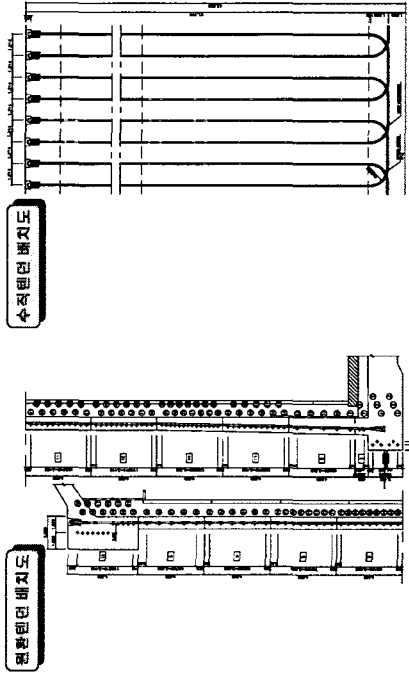
- 원 설계 개념 (기존 LNG 탱크)
- 시공중 벽체 하부에서 과도한 모멘트 발생  
→ 벽체 두께 증가
- 벽체 하부 텐던 გადა 배치
- 개선안



■ 20만 리급 지상식 LNG 탱크 설계 예



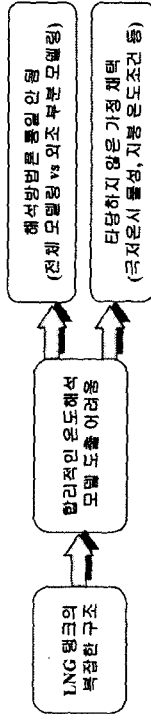
■ 20만 리급 지상식 LNG 탱크 설계 예



### ■ 특수 해석 (온도 해석)

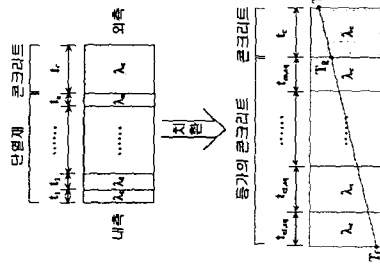
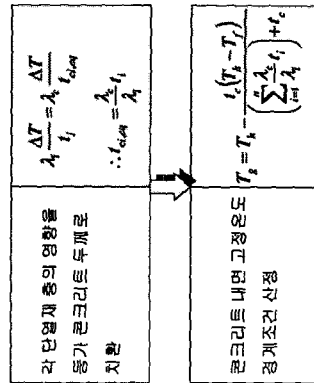
- 해석 종류
  - 정상가동시
  - 누출사고시
  - 내부화재시
  - 외부화재시

### ■ 기존 설계 및 해석의 문제점



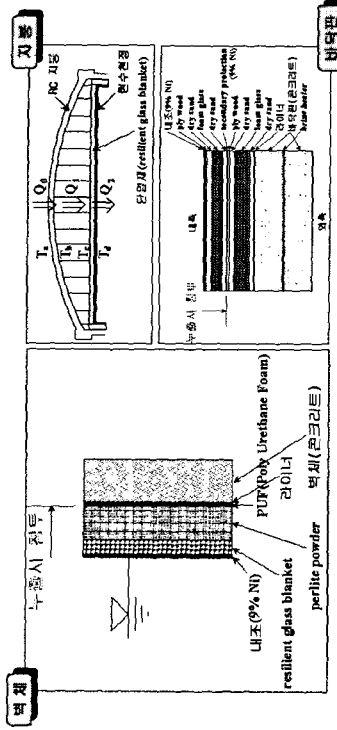
### ■ 정상가동시 및 누출시 해석

- 벽체 및 바닥판: 단열재의 영향 무시하고



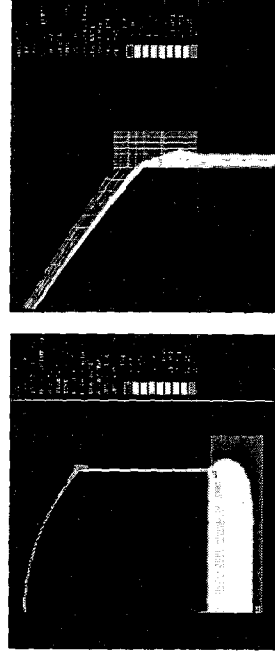
### ■ 정상가동시 및 누출시 해석

- 누출시: 극저온시 콘크리트 물성 변화 고려
- 지붕: 현수천정의 열차단 효과 고려



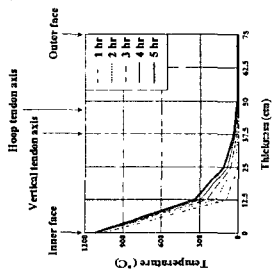
### ■ 정상가동시 및 누출시 해석

- 누출시 온도 해석 예



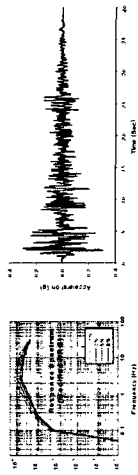
■ 내부화재 해석

- 화재 온도 : 1127°C
- 수위 지하 현상 고려 (Burn out)
- 고온시 콘크리트 물성 변화 및 텐던 강도 저하를 고려한 안전성 검토



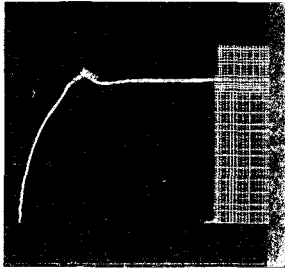
■ 특수 해석 (지진 해석)

- 개요
  - LNG(유체) 저장탱크의 동적 특성 파악
    - Phase 1 : 외조-유체 상호작용 고려 (BS 7777)
    - Phase 2 : 외조-내조-단열재-유체 상호작용 고려
  - 동적 지반 특성 : 기존 자료 이용
  - 지진 특성 : 설계 응답 스펙트럼, 실제 지진자료 이용

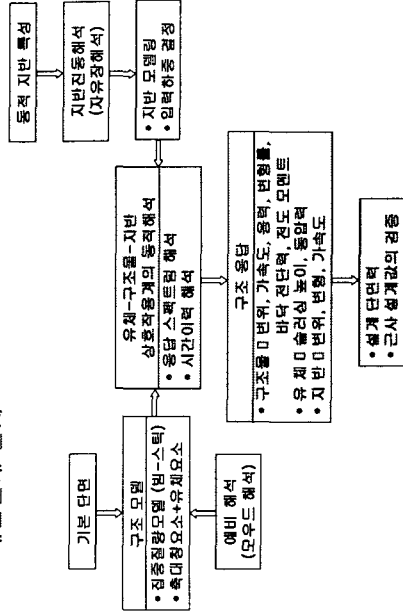


■ 외부화재 해석

- 사고 시나리오 : 지붕 압력 밸브 화재 / 인접 탱크 화재
- 32 kW/m<sup>2</sup>의 열플럭스가 2시간 지속
- 고온시 콘크리트 물성 변화 고려
- 지붕 화재시 변형형상



■ 내진설계 절차



■ 모우드 해석

• 슬러싱(sloshing) 모우드



고유주기 (Hz)		이론값	해석값
모우드			
1	0.0947	0.0945	
2	0.1715	0.1732	
3	0.2171	0.2234	

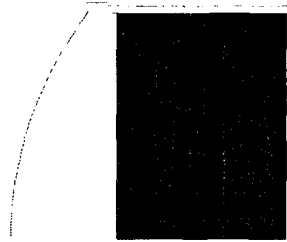
• 유체-구조를 상호작용 모우드



고유주기 (Hz)		해석값
모우드		
1	1.930	
2	2.960	
3	3.376	

■ 해석결과 (축대칭요소+유체요소)

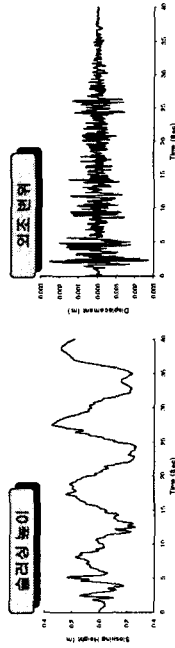
RESULTS  
 SHELL STRESS (MPa)



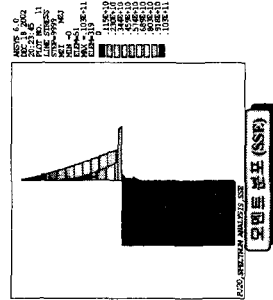
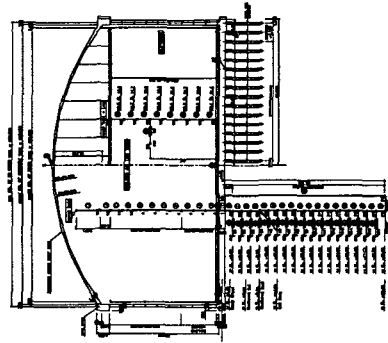
STRESS  
 100.00  
 200.00  
 300.00

■ 해석결과 (축대칭요소+유체요소)

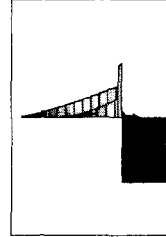
	시간이력 해석	
	EI Centro 지진	Taft 지진
PGA	0.2g	0.2g
슬러싱 높이	0.48 m	0.45 m
외조 변위	0.0075 m	0.003 m
내조 변위	0.06 m	0.025 m



■ 해석결과 (진중궤랑모델)



RESULTS  
 SHELL STRESS (MPa)



STRESS  
 100.00  
 200.00  
 300.00



## 맺음말

- LNG 링크의 대량화는 필연적 추세  
(현재 저장식 16만 시큐 적용화, 20만 시큐 시도)
- LNG 링크 설계기술 자립화  
→ 기존 해외설계사의 기술 +  $\alpha$  (미바점 개선, 대용량 링크, 해상기술)
- 모의 영문 구조계산서 작성 + LNG 링크 주요 설계 프로세스 자동화  
→ 해외 프랜차이즈 대비