

# 항만건설을 위한 케이슨 들고리의 안전성에 관한 연구

## A Study on the Safety of Lifting Cable for Construction of Coastal Structures

곽 계 환<sup>1)</sup> · 장 기 응<sup>2)</sup> · 김 종 효<sup>3)</sup>  
*Kwak, Kae Hwan · Jang, Ki Woong · Kim, Jong Hyo*

요 약 : 본 논문은 케이슨의 인양작업중 Fitting Anchor의 취성파괴로 인한 들고리의 붕괴원인을 조사하기 위한 실험적 연구이다. 또한, 본 연구에서는 응력해석을 통하여 들고리의 붕괴메카니즘을 분석하고 이를 실제 붕괴과정과 비교한다. 본 연구에서는 파괴된 강재에 대한 파면해석 뿐만아니라 화학성분시험, 인장시험 및 샤르피 V-노치 충격시험을 실시한다. 그리고 이의 시험 결과를 정상적인 강재에 대한 시험결과와 비교한다. 본 연구의 거시적, 미시적인 방법으로 결함을 관찰한 결과, Fitting Anchor 내부에 원주 방향으로 나타난 표면결함은 케이슨의 진수시 발생하는 들고리의 인장응력이 작용하기 전에 발생한 것임을 확인할 수 있었다. 이는 균열선단의 응력집중이 발생하여 작용응력보다 큰 응력이 결함에 발생한 것임을 알 수 있다. 또한, 잠재한 결함의 크기가 임계값 이상으로 증가하여 본 연구대상 강재의 응력확대계수가 증가하였을 것으로 판단된다. 그래서 균열선단의 응력확대계수가 본 강재의 파괴인성보다 크게 되어 케이슨의 인양작업중에 취성 파괴를 일으킨 것으로 사료된다. 본 연구결과에 따르면 케이슨 들고리의 붕괴는 Fitting Anchor의 취성파괴로 발생한 것으로 사료된다.

ABSTRACT : This paper describes an experimental study to examine collapse causes of the lifting cable due to brittle failure of an fitting anchor under the lifting works. Also, in this study an collapse mechanism that was obtained from stress analysis was compared with an actual collapse procedure. Fractographical analysis as well as chemical component test, tension test and Charpy V-Notch impact test for the fractured steel members were carried out. And then, its results were compared with that of normal steel members.

1) 원광대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사  
2) 원광대학교 토목환경공학과 박사과정  
3) 원광대학교 토목환경공학과 석사과정

본 논문에 대한 토의를 1998년 9월 30일까지 학회로 보내  
주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

Circumferential surface flaws were developed at internal facets of the fitting anchor before tensile stress occurred. Hence, a higher stress than nominal stress was occurred at flaws by stress concentration at the crack tip. Also, stress intensity factor of members increased by crack size of the potential flaws. Because the stress intensity factor at the crack tip was greater than critical values(fracture toughness), brittle fracture occurred under the lifting works. It is judged that the main collapse of the lifting cable is due to brittle fracture of the fitting anchor.

핵심용어 : 들고리, 붕괴메카니즘, 파면해석, 표면결합, 응력확대계수

KEYWORDS : Lifting cable, Collapse mechanism, Fitting anchor, Fractographical analysis, Surface flaw, Stress intensity factor

## 1. 서론

최근들어 항만건설을 위해 RC 케이슨 구조물이 활용되고 있으며, 이를 육상에서 제작하여 수중으로 진수하기 위해 들고리를 사용한다. 본 연구의 목적은 항만건설의 안벽공사를 위한 케이슨(Cassion) 진수작업중 발생한 들고리(Lifting Cable)의 Fitting Anchor 붕괴사고 원인을 재질 분석, 인장시험, 파면해석, 파괴인성시험 등 여러 가지 과학적인 방법으로 조사, 분석하여 이의 원인을 규명하고 이에 대한 대책을 수립하고자 한다.

본 연구의 범위는 케이슨 진수 작업중 Fitting Anchor의 취성파괴로 인해 발생한 들고리의 붕괴원인을 규명하기 위해 들고리의 설계검토와 들고리의 붕괴메카니즘에 대해 조사하였다. 그리고 Fitting Anchor강재에 대한 주사전자현미경(SEM)에 의한 파면해석, 화학성분 분석, 강도특성시험 및 Charpy V-notch 충격시험을 실시하였다.

연구방법 및 내용은 다음과 같다.

### 1) 현장조사 및 자료수집

항만건설을 위한 케이슨 진수 공사현장에서 붕괴된 들고리의 상태를 파악하고 안전성 평가의 기초자료를 획득하기 위해 각종 자료조사를 실시하

였다.

### 2) 설계검토

먼저 들고리의 안전성을 평가하기 위해 케이슨, 들고리의 설계과정을 검토하였으며 들고리가 부착된 케이슨을 해석하여 들고리의 붕괴메카니즘을 분석하였고 이를 실제 붕괴과정과 비교하였다.

### 3) 파면해석

본 연구에서는 파괴된 Fitting Anchor를 입수하여 거시적인 파면관찰을 실시하였고, 붕괴되지 않은 Fitting Anchor 제품에 대해서도 표면관찰을 수행하였다. 또한 주사전자현미경에 의해 파괴가 발생한 Fitting Anchor 강재에 대한 파면해석을 실시하므로써 파괴의 양상을 규명하였다.

### 4) 각종시험 및 응력해석

본 연구에서는 Fitting Anchor에 사용된 강재의 화학적, 물리적, 기계적 성질을 파악하고 이의 적합성 여부를 판단하여 들고리의 안정성을 평가하기 위해 여러 가지 실험과 해석을 실시하였다.

#### ① 화학성분 분석 및 강도특성실험

화학성분 분석 및 강도특성 실험은 사용된 강재의 구조적 적합성, Fitting Anchor와 PC강선의 부착시 재질 및 기계적 성질의 변화 여부, 가

공성, 사용성 등을 파악하기 위해 실시하였다.

② 파괴인성실험

Charpy V-notch 충격시험은 파괴시 강재의 에너지 흡수능력의 정도를 나타내는 파괴인성을 평가하기 위해 실시하였다.

③ 응력해석 및 파괴인성해석

케이슨의 진수과정에서 발생하는 Fitting Anchor의 응력분포를 파악하기 위해 Fitting Anchor에 대한 유한요소해석을 실시하였고 파괴된 시편의 파괴인성치를 구하고 이를 실험값과 비교하였다.

2. 붕괴사고의 현황

2.1 케이슨의 일반사항

본 연구의 대상구조물인 항만 건설공사 현장의 케이슨은 육상에서 제작하여 들고리를 이용하여 진수하도록 되어 있다. 대상 케이슨의 규격과 제원을 표 2.1.1과 그림 2.1.1~그림 2.1.2에 나타내었다.

표 2.1.1 대상 케이슨의 규격

구 분	폭(B)	길 이(L)	높 이(H)
20,000DW	10.0m	17.4m	15.0m

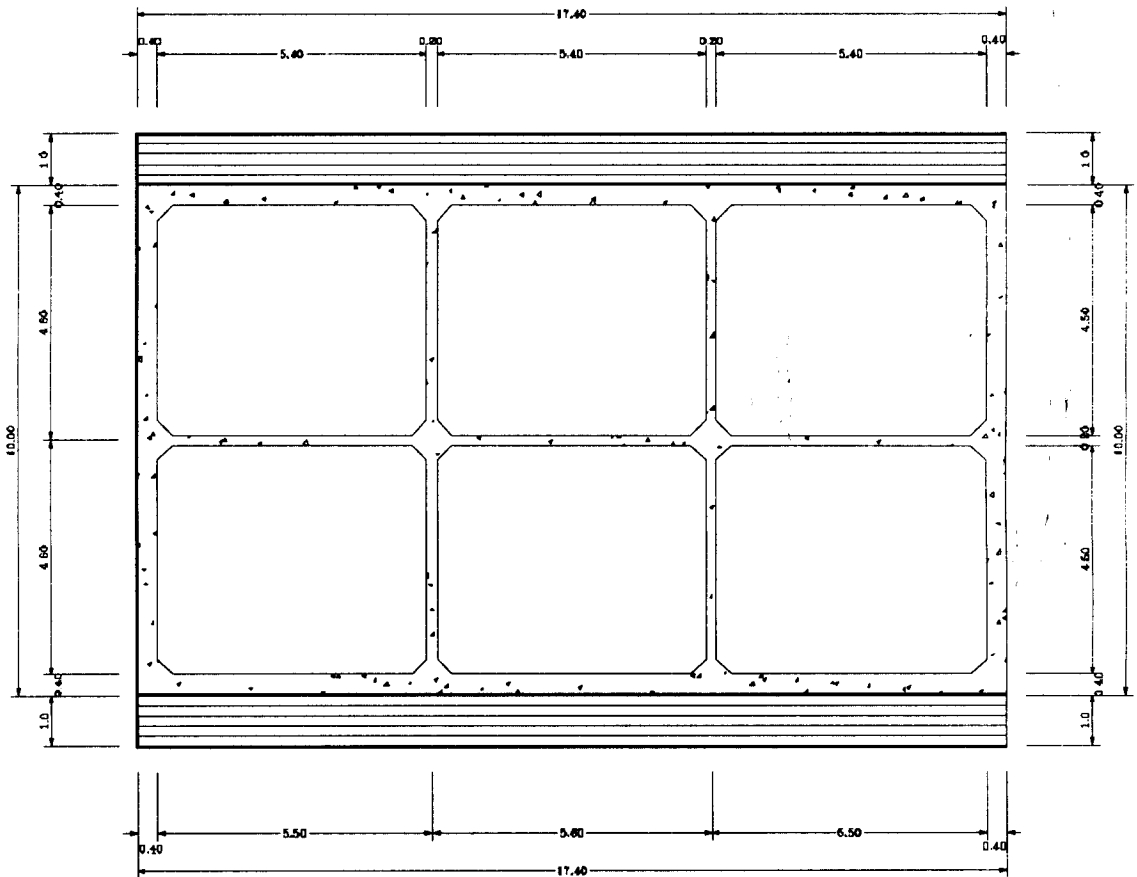


그림 2.1.1 대상 케이슨의 평면도 (단위 : m)

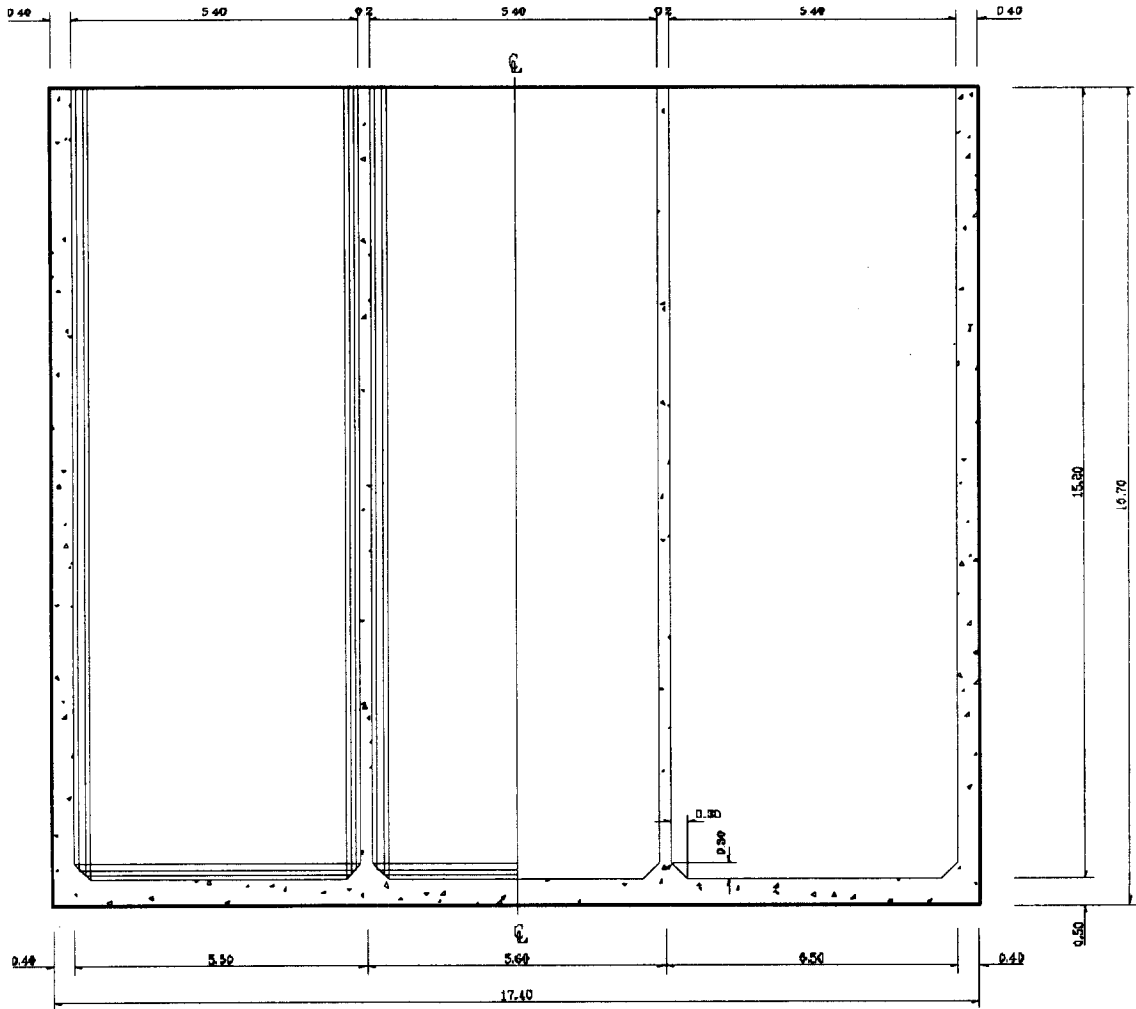


그림 2.1.2 대상 케이슨의 단면도 (단위 : m)

## 2.2 들고리의 일반사항

케이슨의 진수는 양쪽 40cm폭의 콘크리트면에 설치한 총 48개의 들고리에 의해 이루어지며 들고리는 그림 2.2.1과 같이 Fitting Anchor와 PC 강선으로 구성된다. 이는 콘크리트 속에 약 6.3m가량 매입되고 약 30cm정도의 Fitting Anchor가 돌출되어 인접한 두개의 Fitting Anchor를 들고리용 브래킷(bracket)으로 연

결하여 사용하게 된다. 그림 2.2.2에 Fitting Anchor의 단면상세도를 나타내었다.

## 2.3 사고의 개요

들고리의 붕괴과정을 나타내면 그림 2.3.1과 같다. 들고리의 붕괴는 수중 기중기(설악호)를 이용하여 케이슨을 진수하기 위해 하중을 가하는 과정에서 발생하였으며, 케이슨을 완전히 들어올리

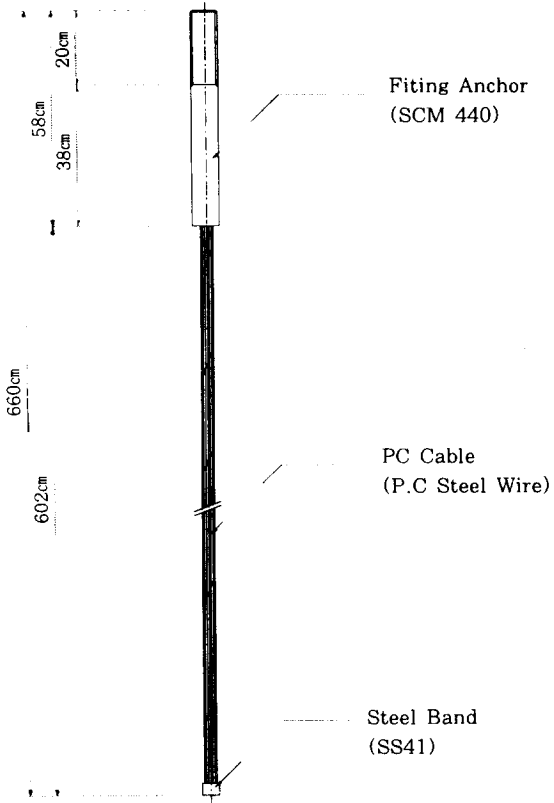


그림 2.2.1 돌고리의 상세도

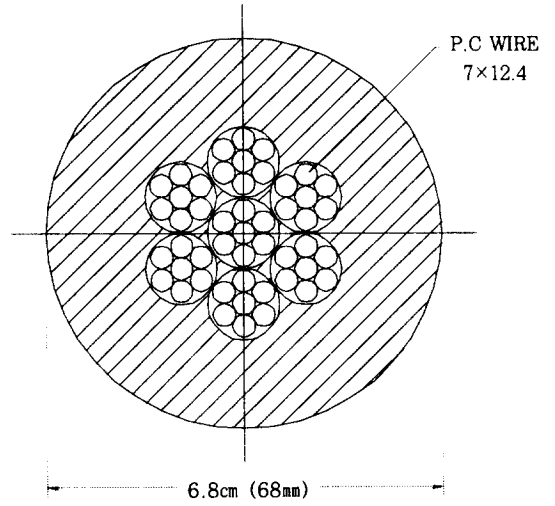


그림 2.2.2 계속

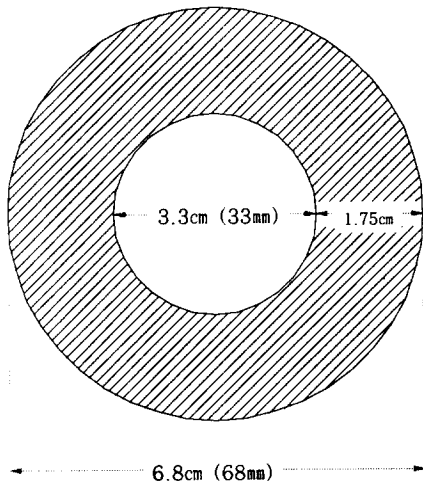


그림 2.2.2 Fiting Anchor의 단면도

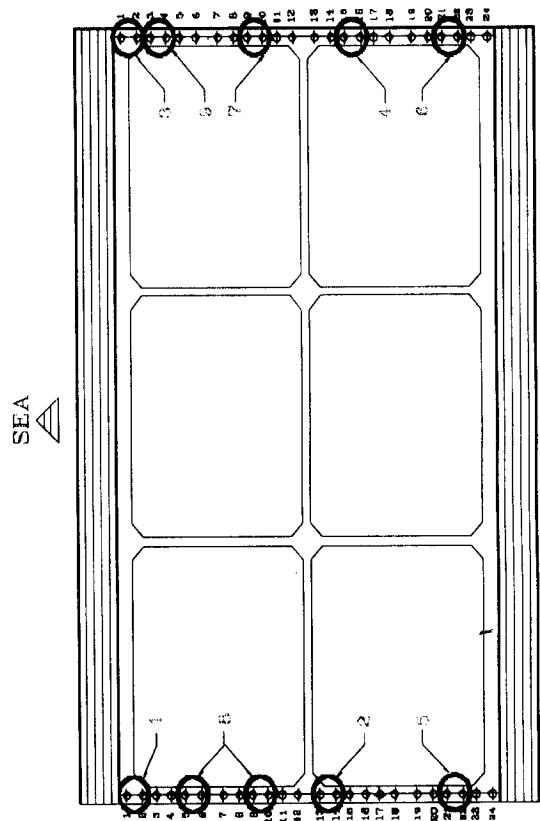


그림 2.3.1 돌고리의 붕괴과정의 모식도

기 전에 들고리의 파괴가 폭음과 함께 발생하였다. 그림 2.3.1과 같은 붕괴과정에서 Fitting Anchor 강재가 하중작용방향과 직각되게 파단되었으며 파단위치는 매입부와 돌출부의 경계나 그 약간 아래쪽에서 발생하였고 PC 강선의 뿔힘현상은 발생하지 않았다. 이러한 파괴과정은 짧은 시간에 이루어졌다.

### 3. 파괴이론

#### 3.1 노치(notch)와 취성

그림 3.1.1과 같이 무한 평판에 타원 구멍이 존재하고 무한거리에서 타원구멍의 장축에 수직으로 인장응력  $\sigma$ 를 받을 때 노치 저부 A점에서 응력집중현상이 발생하고 이를 응력집중계수(stress concentration factor)  $K_t$ 로 다음과 같이 표현하게 된다.

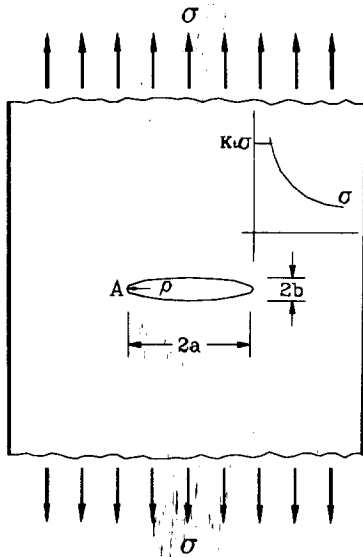


그림 3.1.1 응력집중현상(타원형 균열)

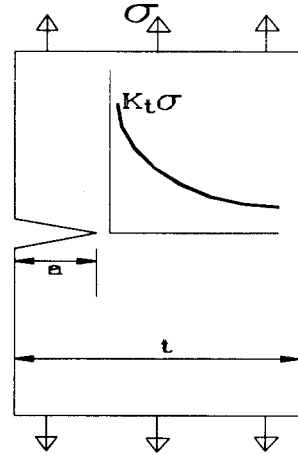


그림 3.1.2 두께방향 균열의 노치효과

$$K_t = 1 + 2\frac{a}{b} \quad (3.1)$$

A점에서 곡률반경  $\rho$ 는  $b^2/a$ 이므로

$$K_t = 1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (3.2)$$

일반적으로 인장시험에서 충분한 연성을 나타내는 재료에서도 균열 또는 노치(그림 3.1.2)가 존재하면 취성파괴를 일으키게 된다. 이 현상을 "노치취성"이라 부르고 있다. 노치는 그의 응력집중효과 때문에 구조부재가 低하중에서 파괴되는 원인이 되며, 실구조물에서는 노치 또는 그것과 유사한 구조적 불연속과 각종 결함이 존재하지 않도록 하는 것이 취성파괴를 방지하는 유효한 수단이다.

#### 3.2 취성파괴이론

재료역학에서는 응력집중의 크기와 안전율만에 의해 재료의 파괴한계를 취급하므로 정확한 파괴원인을 규명하기 위해서는 파괴역학의 이론을 적용해야 한다<sup>(1)</sup>.

### Axisymmetric Flow

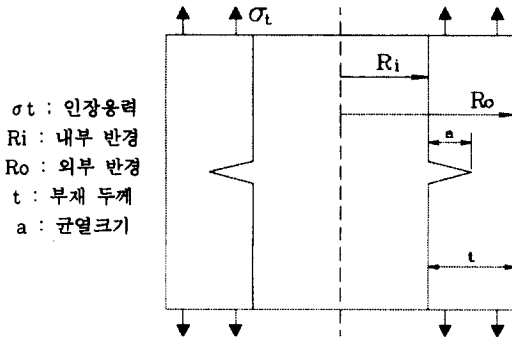


그림 3.2.1 원통형부재가 내부에 축대칭 결함을 가지는 경우

### Semielliptical Flow

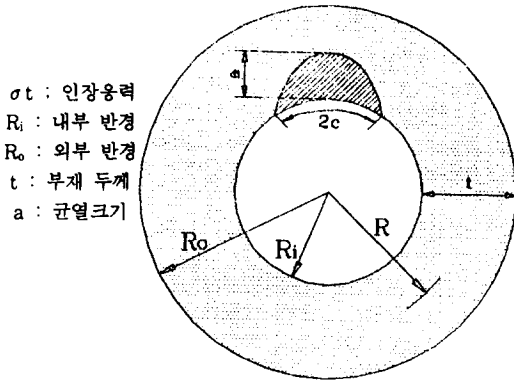


그림 3.2.2 원통형 부재가 내부에 반포물선 결함을 가지는 경우

Irwin<sup>(2)</sup>은 재료가 취성파괴를 일으키는 조건을 규명하기 위해 곡률이 예리한 균열선단의 탄성응력분포를 해석하여 공칭응력과 균열의 크기를 함께 묶어 응력확대계수(Stress intensity factor)라는 하나의 인자로 나타내고, 이것이 재료의 파괴인성보다 크게 되면 취성파괴를 일으킨다는 것을 규명하였다.

Irwin에 의하면 이론식에 의해 구해지는 응력확대계수가 실험에 의해 구해지는 파괴인성치보다 클때 취성파괴가 발생한다. 일반적으로 응력확대

계수는 부재의 치수, 균열의 크기, 응력의 종류 및 형태에 따라 다르다고 알려져 있다.

따라서 공칭응력에 균열의 크기 및 재료의 인성이 파괴에 중요한 영향을 미치는 요소가 된다. 즉, 응력확대계수가 크더라도 재료의 파괴인성이 낮으면 취성파괴의 위험이 크며, 균열의 크기가 커지면 응력확대계수가 커져서 파괴의 위험이 커진다. 따라서 구조 부재의 파괴원인을 정확히 규명하기 위해서는 파괴인성 또는 균열의 크기를 측정해야 한다.

한편 본 연구의 구조 부재인 Fitting Anchor의 경우, 균일한 인장을 받는 무한판과 하중작용상태와 균열의 형상이 다소 상이하므로 인장을 받는 원통형 구조부재에 원주방향의 부분적 내부결함을 가지는 경우에 대한 응력확대계수 식을 유도하면 식(3.5)~식(3.8)과 같다<sup>(4)</sup>. 식(3.5)와 식(3.6)은 원통형 부재가 그림 3.2.1과 같이 축대칭 결함을 가지는 경우에 대한 것이고, 식(3.7)과 식(3.8)은 그림 3.2.2와 같이 반포물선 결함을 가지는 경우에 대한 것이다.

$$K_I = \sigma_t \sqrt{\pi a} F_I \quad (3.5)$$

$$F_I = 1.1 + A[1.948(\frac{a}{t})^{1.5} + 0.3342(\frac{a}{t})^{4.2}]$$

$$A = (0.125\frac{R_i}{t} - 0.25)^{0.25} \quad \text{for } 5 \leq \frac{R_i}{t} \leq 10$$

$$A = (0.4\frac{R_i}{t} - 3.0)^{0.25} \quad \text{for } 10 \leq \frac{R_i}{t} \leq 20 \quad (3.6)$$

$$K_I = \sigma_t \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F_I \quad (3.7)$$

$$F_I = 1 + [0.02 + \xi(0.0103 + 0.00617\xi)]$$

$$+ 0.0035(1 + 0.7\xi)(\frac{R}{t} - 5)^{0.7}]Q^2$$

$$\xi = \frac{a}{t}(\frac{a}{2c}), \quad Q = 1 + 1.464(\frac{a}{c})^{1.65} \quad (3.8)$$

## 4. 실험 및 분석

### 4.1 파면관찰 및 파면해석결과

재료의 파단면에는 파괴의 진행상황을 나타내는 특징적인 모양이 존재하며, 이를 분석하면 파괴원인과 파괴기구에 관한 중요한 정보가 얻어진다<sup>9)</sup>. 파면관찰에 있어서 종래에는 육안과 저배율의 광학현미경에 의한 거시적 파면해석이 사용되었으나 최근에는 주사전자현미경 (Scanning Electronic Microscope: SEM) 및 투과전자현미경 레프리카(TEM-Replica)를 사용한 상세한 미시적 파면해석이 가능해졌다.

본 연구에서는 육안관찰을 통해 파괴된 Fitting Anchor의 표면과 정상적인 제품의 표면을 비교, 조사하였으며 주사전자현미경에 의한 Fitting Anchor의 파단부위를 촬영하여 파면의 양상 및 파괴원인을 조사하였다.

#### 1) 거시적인 파면관찰

사고현장에서 채취한 Fitting Anchor는 부재 축과 평행하게 절단하여 관찰하였으며 파괴된 시편의 내부표면은 다음 사진 4.1.1과 같다. 사진 4.1.1에서 보는 바와 같이 Fitting Anchor 내부에 하중작용방향과 직각되게 다수의 결함(균열)이 발생되어 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 균열은 Fitting Anchor 내부 전면에 걸쳐 골고루 분포하여 있었다. 또한 채취한 시편을 두께방향으로 절단하여 균열의 깊이를 확인한 결과, 약 7mm정도 균열이 진전되어 있었으며, 이는 Fitting Anchor 두께( $t=17.5\text{mm}$ )의 40%에 해당하는 것이다.

이러한 균열을 거시적인 관점에서 조사한 결과, 케이슨의 진수시 작용하는 하중에 의해 발생한 것으로 보이지 않으며 하중이 작용하기 전에 Fitting Anchor 표면에 잠재해 있던 것으로 판단된다. 이를 확인하기 위해 정상적인 Fitting Anchor 제품을 절단하여 표면을 확인한 결과 다

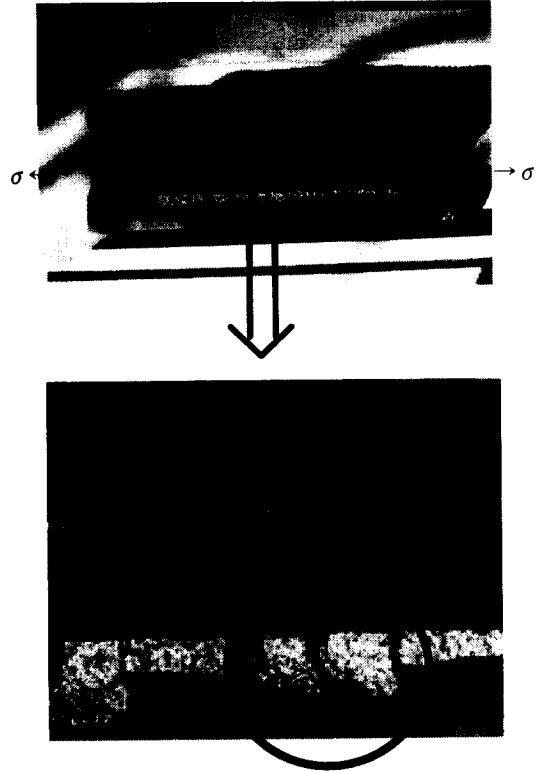


사진 4.1.1 파괴된 Fitting Anchor의 단면도(거시적 관찰)

음 사진 4.1.2와 같다. 사진 4.1.2에서 보는 바와 같이 케이슨의 진수시 사용되지 않은 정상적인 제품에서도 파단된 제품(사진 4.1.1)과 유사한 결함(균열)이 발생되어 있었으며 이로 부터 파단된 Fitting Anchor에서 관찰된 균열은 하중이 가해지기 전에 이미 존재하였던 것으로 사료된다.

결국, Fitting Anchor에서 발견된 균열은 노치(notch)의 역할을 하게 될 뿐만 아니라 Fitting Anchor에 인장하중이 작용할 때 균열선단에서 응력집중이 발생하게 되어 작용하중에 의한 응력보다 상당히 큰 응력을 균열선단에 발생하게끔 한다. 따라서 이와 같이 균열을 가진 재료의 파괴현상을 규명하기 위해서는 파괴역학적인 접근이 이루어져야 한다.





사진 4.1.2 정상적인 Fitting Anchor의 단면도(거시적 관찰)

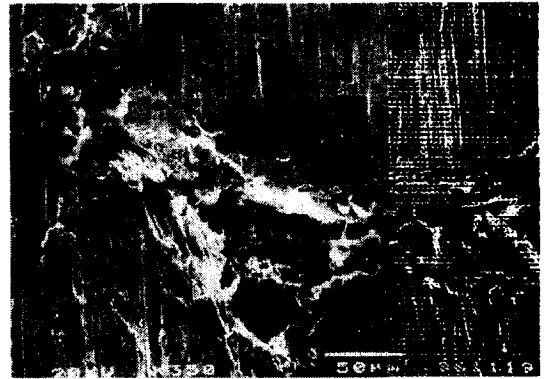


사진 4.1.3 Fitting Anchor 파단면(미시적 관찰)

## 2) 미시적 파면관찰

Fitting Anchor 내부에 발생한 균열의 단면을 SEM에 의해 관찰한 결과 다음 사진 4.1.3과 같다.

## 4.2 화학성분 분석

본 연구에서는 파손이 발생한 또한 파손되지 않은 Fitting Anchor 강재의 화학성분을 조사하기 위해 화학성분 분석을 실시하였다. 실험으로부터 얻어진 자료를 이용하여 강재의 적합성 여부를 검토하기 위해 일반적인 Cr-Mo강에 대한 화학조성을 알아보고 합금원소에 따른 강재의 성질을 조사하였다<sup>(11)</sup>.

## 1) Cr-Mo강의 성질

이 강종은 Cr(0.9~1.20%)외에 Mo을 소량(0.15~0.30%) 함유하고 있으므로 경화능이 크고, 템퍼링 연화저항성도 크며, 템퍼링 취성의 경향도 비교적 적은 편이다. Cr-Mo강은 화학조성에 따라 표 4.2.1과 같이 여러 종류로 분류할 수 있다.

### ① 탄소(C)

탄소는 강의 강도를 향상시키는데에 가장 효과적이고 중요한 원소로서, 오스테나이트에 고용하여 퀴칭시 마르텐사이트 조직을 형성시키게 한다. 탄소량의 증가와 함께 퀴칭경도를 향상시키지만 퀴칭시 변형유발가능성을 크게 한다.

### ② 망간(Mn)

탄소강에는 보통 0.35~1.0% 정도의 Mn이 함유되어 있다. Mn에 의해서 펄라이트가 미세해지고, 페라이트를 고용강화시키므로써 탄소강의 항복강도를 향상시킨다. 또 퀸칭시 경화깊이를 증가시키지만, 많은 양이 함유되어 있을 때는 퀸칭 균열이나 변형을 유발시킨다.

### ③ 크롬(Cr)

Cr은 또한 저온취성과 수소취성을 방지하는 효과가 있지만 템퍼링 취성을 조장한다.

### ④ 몰리브덴(Mo)

Mo은 0.1~0.3% 정도의 첨가로서 Ni의 10배까지 경화를 향상시키는 효과가 있으므로 템퍼링 취성을 방지하여 템퍼링 취성저항성을 부여한다. 또한 탄화물을 형성하므로 고급절삭공구의 합금원소로도 우수한 효과를 나타내며 결정립 조대화 온도를 상승시킨다. 경화능에 관해서는 Mo 단독보다는 Cr과 병용하면 더욱 효과적이다.

표 4.2.1 Cr-Mo강의 종류

기호	화 학 조 성 (%)			
	C	Mn	Cr	Mo
SCM 415	0.13~0.18	0.60~0.85	0.90~1.20	0.15~0.30
SCM 420	0.18~0.23	0.60~0.85	0.90~1.20	0.15~0.30
SCM 421	0.17~0.23	0.70~1.00	0.90~1.20	0.15~0.30
SCM 430	0.28~0.33	0.60~0.85	0.90~1.20	0.15~0.30
SCM 432	0.27~0.37	0.60~0.85	1.00~1.50	0.15~0.30
SCM 435	0.33~0.38	0.60~0.85	0.90~1.20	0.15~0.30
SCM 440	0.38~0.43	0.60~0.85	0.90~1.20	0.15~0.30
SCM 445	0.43~0.48	0.60~0.85	0.90~1.20	0.15~0.30
SCM 822	0.20~0.25	0.60~0.85	0.90~1.20	0.35~0.45

### 2) 탄소강의 일반

Cr-Mo강과 탄소강의 성질을 비교하고자 각종 탄소강의 기계적 성질은 표 4.2.2, 화학성분은 표 4.2.3에 나타내었다<sup>(12)</sup>.

### 3) 화학성분시험 결과

본 연구에서 Fitting Anchor의 화학성분 시험은 파괴된 강재에서 채취한 것과 파괴되지 않은

표 4.2.2 각종 탄소강의 기계적 성질과 용도

종 별	기계적성질			
	인장강도 (kg/mm <sup>2</sup> )	항복점 (kg/mm <sup>2</sup> )	연신율 (%)	경도 (HB)
특별극연강	32~36	18~28	80~40	95~100
극 연 강	36~42	20~29	30~40	80~120
연 강	38~48	22~30	24~36	100~130
반 연 강	44~55	24~36	22~32	120~145
반 경 강	50~60	30~40	17~30	140~170
경 강	58~70	34~46	14~26	160~200
최 경 강	65~100	35~37	11~20	186~235

표 4.2.3 각종 탄소강의 화학성분

종 류	성 분 (%)				
	C	Si	Mn	P	S
특별극연강	<0.08	<0.05	0.24~0.40	<0.05	<0.05
극 연 강	0.08~0.12	<0.05	0.30~0.50	<0.05	<0.05
연 강	0.12~0.20	<0.02	0.23~0.50	<0.05	<0.05
반 연 강	0.20~0.30	<0.02	0.40~0.60	<0.05	<0.05
반 경 강	0.30~0.40	0.15~0.25	0.40~0.60	<0.05	<0.05
경 강	0.40~0.50	0.15~0.25	0.50~0.70	<0.05	<0.05
최 경 강	0.50~0.90	0.15~0.25	0.60~0.80	<0.05	<0.05

제품에서 채취한 것으로 구분하여 Emission Spectrometer법에 의해 실시하였다. 그 결과는 각각 표 4.2.4와 표 4.2.5와 같다. 한편, 본 연구의 대상부재와 동일한 Fitting Anchor를 생산하는 타회사 제품의 화학성분을 열처리 유무에 따

표 4.2.4 파단된 시편의 화학성분

종 류	성 분 (%)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SCM440F	0.50	0.011	0.78	0.012	0.011	0.06	0.03

표 4.2.5 파단되지 않은 시편의 화학성분

종 류	성 분 (%)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SCM440F	0.49	0.011	0.77	0.012	0.011	0.05	0.03

라 분석한 결과를 각각 표 4.2.6과 표 4.2.7에 나타내었다.

표 4.2.6 다른회사의 제품(열처리)의 화학성분

종 류	성 분 (%)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SCM440-1	0.49	0.21	0.78	0.016	0.021	1.00	0.16

표 4.2.7 다른회사의 제품의 화학성분

종 류	성 분 (%)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SCM440-2	0.49	0.21	0.77	0.016	0.021	0.98	0.15

표 4.2.4, 표 4.2.5와 같이 본 연구의 Fitting Anchor에서 채취한 시편의 분석결과 Cr과 Mo이 기준치에 훨씬 못미치고 있다. 이의 결과를 보다 정확하게 파악하기 위하여 E.S법이 아닌 A.A (Atomic Absorption)법으로 Cr과 Mo의 성분을 조사하였다. 그림 4.2.1과 같이 파단된 강재의 A, B, C 세 곳에서 시편을 채취하고 다른 회사의 정상적인 제품에서 시편(D)을 채취하여 5% 황산으로 산세 후 30%-HCl로 가열 용해시켜서

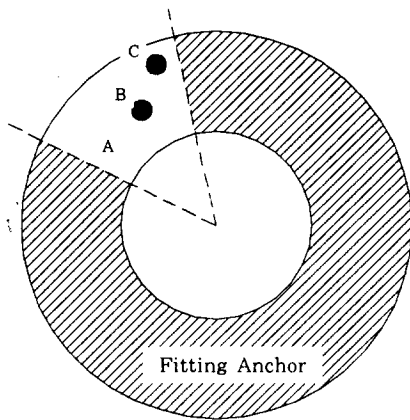


그림 4.2.1 AA분석을 위한 파단된 강재의 시편 채취위치

표 4.2.8 Cr-Mo에 대한 Atomic Absorption분석 결과

부위 성분(%)	본 연구의 파단된 시편			다른 회사의 정상적인 제품
	A	B	C	D
Cr	0.04	0.06	0.06	0.90
Mo	0.02	0.015	0.015	0.14

얻은 용액을 분석한 결과는 표 4.2.8과 같다.

표 4.2.8에서 문제된 시편(A, B, C)의 Cr과 Mo는 SCM440의 기준치와 큰 차이를 보이고 있으며 A, B, C 세 위치에 따라서는 거의 유사한 값을 나타내었다. 또한 다른 회사의 정상적인 제품(D)은 기준치를 만족하는 것으로 나타났으며 이로 부터 습식분석방법인 Atomic Absorption 로 부터 얻은 결과치는 건식분석방법인 Emission Spectrometer분석으로 얻은 결과치와 일치함을 알 수 있었다.

표 4.2.4과 표 4.2.5에서 보는 바와 같이 Fitting Anchor에 사용된 강재의 탄소량은 0.49~0.50%로서 탄소함유량에 의한 강의 분류 결과 탄소함유량이 0.4~0.5%인 경강으로 분류할 수 있다. 또한 KS나 JIS의 강재분류(표 4.2.1)와 비교하면 SCM440강과는 상이하하며 탄소량이 기준치보다 다소 많고 Cr과 Mo는 상당히 적게 함유되어 있는 것으로 나타났다. 표 4.2.4~표 4.2.6에서 비교한 바와 같이 본 연구의 Fitting Anchor에 사용한 강재는 다른 회사의 동일한 강종과 서로 다른 화학성분을 나타내고 있고 특히 Si, Cr, Mo에 큰 차이를 나타내고 있다. 또한 표 4.2.4과 표 4.2.5에서 본 연구의 Fitting Anchor는 Cr과 Mo이 극히 미량 함유되어 있어 이는 거의 함유되어 있지 않은 것으로 보아야도 무관하며, 본 Fitting Anchor에 사용된 강재는 SCM440이 아닌 다른 탄소강의 일종으로 적합치 않은 강재를 사용하였음을 알 수 있다.

이와같이 탄소함유량이 비교적 많아 강도와 경도의 상승효과를 기대할 수 있으나 인장부재의 필수조건인 연신율과 인성을 떨어뜨리는 결과를 초

래할 수 있고, 재료가 취약해질 우려가 크다. 특히 Cr과 Mo의 상당량의 부족은 강재의 경화능력을 저하시키고 템퍼링 취성이 조장될 우려가 큰 것으로 보인다.

또한 파괴가 발생한 부분과 발생하지 않은 부분의 화학성분에는 큰 차이가 없는 점을 감안하면 본 Fitting Anchor 자체의 재질이 본래 용도에 맞는 SCM440이 아니라 일반 탄소강과 유사한 재질로써 구조용 P.C Cable를 압착시킴 때 균열이 발생해서 이 균열에 수직방향으로 응력을 가할 경우 균열선단에 응력집중현상이 발생하여 순간적으로 파괴에 이르게 된 것으로 판단된다.

### 4.3 인장강도시험

인장실험을 위하여 Fitting Anchor의 재료인 SCM440 강재로 부터 한국공업규격 KS B 0801에 따라 시험편을 제작하였다. 시험편의 형상 및 치수는 그림 4.3.1과 같다. 인장실험은 200t 용량의 만능시험기를 사용하여 실시하였으며, 강재의 인장강도, 항복강도, 연신율 등을 측정하였다.

본 연구에서는 붕괴사고가 발생한 Fitting Anchor에서 채취하지 못하였고 동일한 제품을 제작하는 다른 회사에서 수거한 시험편을 사용하여 인장시험을 실시하였다. 인장시험결과 인장강도와 항복강도는SCM440강의 열처리 후 기계적성질과 비교할 때 작은 값을 나타내고 있으며, 일반적인 탄소강과 비교할 때 인장강도, 항복강도, 연신율

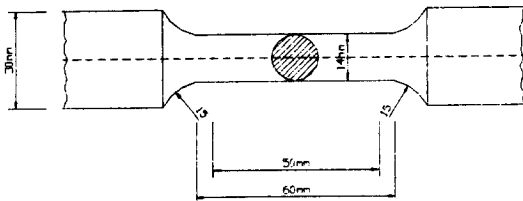


그림 4.3.1 인장시험편의 형상 및 치수

표 4.3.1 인장시험 결과

	인장강도 (kg/mm <sup>2</sup> )	항복강도 (kg/mm <sup>2</sup> )	연신율 (%)	비 고
SCM440	67	36	27	4호 시험편

등이 경강과 일치함을 확인할 수 있었다.

### 4.4 파괴인성치의 산정

앞절의 식 (3.5)과 식 (3.6)은 원통형관의 두께에 비해 내경이 큰 압력용기에 해당하는 식으로 본 연구의 Fitting Anchor에 적용하여 식(3.6)의 균열형상에 따른 A는 최소값인 0.78로 보고 계산하면 Ft값은 대략 1.496정도를 나타낸다. 이를 근거로 KI를 계산하면 다음과 같다.

$$F_t = 1.1 + 0.78 \left[ 1.948 \left( \frac{0.7}{1.75} \right)^{1.5} + 0.3342 \left( \frac{0.7}{1.75} \right)^{4.2} \right] \approx 1.496 \quad (4.1)$$

$$\sigma_t = \frac{P}{A} = \frac{554200 \text{ kg}}{\frac{\pi}{4} (6.8^2 - 3.3^2)} = 1996.11 \text{ kg/cm}^2 \quad (4.2)$$

여기서, P는 본 들고리의 작용하중(55.42ton)

$$K_I = 199.61 \times \sqrt{\pi \times (0.007)} \times 1.496 \approx 44.28 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}} \quad (4.3)$$

위의 값과 비교하기 위하여 여러가지 재료의 파괴인성치(KIC)를 검토한 결과 AISI M Tool Steel  $22 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}}$ 의 파괴인성값을 가진다<sup>(5)</sup>. 또한 본 연구의 화학성분 분석결과 Fitting Anchor에 사용된 강재가 0.5%정도의 탄소를 함유한 기계구조용 탄소강으로 볼 때 Charpy의 충격치(CVN)는 4~8(ft·lb)정도의 범위에 있으므로 이를 이용하여 Robert-Newton의 KIC- CVN의

관계식(식 4.4)으로 부터 파괴인성치를 구하면 다음과 같다<sup>(3)</sup>.

$$K_{IC} = 9.35(CVN)^{0.63} \quad (ksi\sqrt{in}, ft \cdot lb) \quad (4.4)$$

$$K_{IC} = 9.35(4)^{0.63} = 22.39ksi\sqrt{in} = 24.41Mpa\sqrt{m} \quad (4.5)$$

$$K_{IC} = 9.35(8)^{0.63} = 34.65ksi\sqrt{in} = 37.77Mpa\sqrt{m} \quad (4.6)$$

또한 ASTM STP 514에서 Sailor, R.H. Corten, H.T.이 제안한 KIC-CVN의 관계식(식 4.7)으로 구하면 다음과 같다<sup>(3)</sup>.

$$K_{IC} = 14.5(C_V)^{1/2} \quad (MNm^{-3/2}, Joules) \quad (4.7)$$

$$K_{IC} = 14.5(5.42)^{1/2} = 33.76 MNm^{-3/2} \quad (4.8)$$

$$K_{IC} = 14.5(10.85)^{1/2} = 47.76 MNm^{-3/2} \quad (4.9)$$

위에서 제시한  $22Mpa\sqrt{m}$ 는 본 연구의 강종과 유사하다고 판단되는 강재와 비교한 것으로 이 KIC값은 하중속도(loading rate)가 증가함에 따라 감소할 것이고, 구조용 강인 경우에 대해서는 특히 그러하고 위의 KIC값들은 느린 하중속도(대략 10-5 sec<sup>-1</sup>)에서 수행된 실험에 해당하는 것을 감안하여야 한다. 또한 KIC-CVN의 관계식으로부터 구한 파괴인성치 24.41~37.77  $Mpa\sqrt{m}$  및 33.76~47.76  $MNm^{-3/2}$ 은 탄소량과 CVN 만을 가지고 평가한 것이다.

여기서 본 연구의 Fitting Anchor에 작용하는 공칭응력은 강재의 항복응력 보다는 작지만, 파괴역학적 개념에서 볼 때 균열형상과 하중작용상태에 따라 계산된 노치의 응력확대계수(KI)가 재료의 파괴인성치(KIC)보다 커져 취성파괴를 유발하게 된 것으로 판단된다.

특히 균열의 발생이 단일균열(single crack)이 아닌 다중균열(multiple cracks)이므로 단일균열로 가정하였을 때 가장 대표적인 균열길이(a)를 구할 수 있다<sup>(13)</sup>. 즉 단일균열로 가정하여 주어진 균열길이와 하중에 대해 파괴가 발생하면 다중균열에서는 그 이전에 파괴가 발생하게 된다. 기존에 발표된 SCM440에 대한 파괴인성치의不在로 인해 비슷한 KIC를 나타낼 것이라는 가정하에 AISI M Tool Steel과 기계구조용 탄소강의 CVN로 부터 KIC를 비교하였다.

## 5. 응력해석

Fitting Anchor의 응력해석은 그림 5.1.1과 같이 8절점 1요소 즉 3차원 Solid요소를 사용하여 수행하였으며 총 978절점과 650요소를 사용하였다. 해석의 간편을 위해서 대칭되는 한면을 기준으로 해석을 수행하였으며 콘크리트에 매립된 부분과 돌출된 부분을 구분하였고 축방향 하중과 내압을 받는 두께가 두꺼운 판으로 해석하였다.

그림 5.1.2는 인장응력만 작용할 경우에 Fitting Anchor의 응력분포를 나타내며 매립부와 돌출부의 경계에서 최대 응력(화살표 방향)이 발생함을 알 수 있었다. 또한 그림 5.1.3은 인장응력과 내압이 작용할 경우를 나타낸 것으로 최대 응력의 분포는 Fitting Anchor 내부에서 부재축에 나란함(화살표 방향)을 확인할 수 있었다. 그림 5.1.4는 매립부와 돌출부의 경계를 확대한 것이다.



(a) 인장응력만 받는 경우 (b) 인장응력과 내압을 받는 경우

그림 5.1.1 Fitting Anchor 모델링

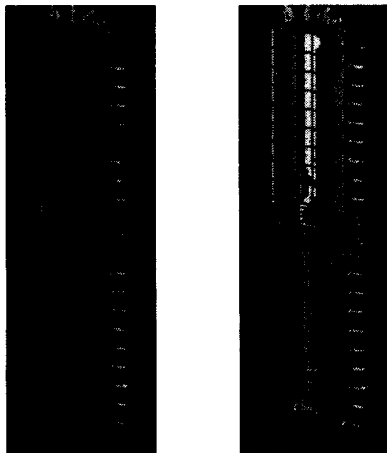


그림 5.1.2 인장응력만 받는 경우의 해석결과      그림 5.1.3 인장응력과 내압 받는 경우의 해석결과

따라서 Fitting Anchor의 파괴는 인장응력이 작용하는 방향과 수직되고 부재축에 평행하게 발생할 가능성이 가장 큼을 확인할 수 있었고 이는 파단된 시편의 실제상황을 잘 대변하는 결과라고 할 수 있다.

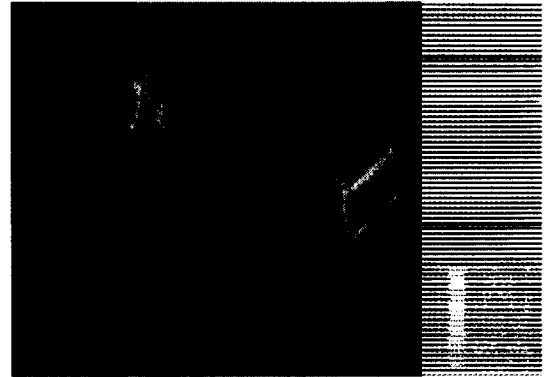


그림 5.1.4 Fitting Anchor 경계부의 응력분포

## 6. 결 론

본 연구는 항만건설을 위한 케이슨 들고리에 대한 안정성 연구로서 여러 가지 실험과 해석을 통하여 케이슨 진수과정에서 발생한 들고리의 붕괴 원인과 안정성에 대한 결론은 다음과 같다.

1) 본 들고리의 Fitting Anchor는 SCM440으로 제작되게 되어 있으나 파단된 시편의 화학성분 분석결과를 KS규준과 비교해 볼 때 탄소량은 기준치를 약간 초과하고 크롬(Cr)과 몰리브덴(Mo)은 기준치에 크게 못미침을 알 수 있었다. 따라서 본 Fitting Anchor에 사용된 강재는 SCM440 규격에 맞지 않는 강재임을 확인할 수 있었으며 0.5%정도의 탄소를 함유한 경강으로써 들고리에 적합하지 않은 제품을 사용한 것으로 사료된다.

2) 파면해석결과, Fitting Anchor는 사용이전에 원주방향의 일정간격으로 균열이 발생하였고 또한 Anchor의 축방향으로 일정간격의 균열이 발생하였음을 확인할 수 있었다. 이와 같은 균열 발생의 원인으로 판단되는 것중에 하나는 Shrink Fitting시 내부반경 33mm을 가지는 Fitting Anchor에 직경 37.2mm의 PC Cable를 삽입하기 위해서 즉, Fitting Anchor에 과도한 열팽창이 발생하였다가 냉간되는 과정에서 균열이 발생한 것으로 사료된다.

3) 화학성분 분석결과, 탄소(C)의 과다와 크롬(Cr), 몰리브덴(Mo)의 부족으로 인해 인장부재의 필수요건인 인성의 확보가 미흡했던 것으로 사료된다.

4) 사용이전에 발생된 균열을 주사전자현미경으로 관찰한 결과, 균열 선단부가 매우 날카로워 곡률반경이 매우 작은( $\rho \rightarrow 0$ ) 노치(notch)의 역할을 하므로서 응력집중현상이 발생하게 되었으므로 인해 실제 작용응력보다 큰 응력이 균열선단부에 발생한 것으로 사료된다.

5) 사용이전에 발생한 Fitting Anchor의 다중균열(전체두께의 40%까지 진전)에 의해 응력 확대계수(KI)가 증가하였고 이 값이 그 재료의 파괴인성치(KIC)보다 커져서 취성파괴를 유발한 것으로 사료된다.

본 연구의 결과를 바탕으로 미진한 자료와 시험을 더욱 보완하여 앞으로 이에 대한 보수/보강에 대한 연구를 추진해야 할 것으로 사료된다.

#### 감사의 말

이 논문은 1997년도 원광대학교의 교비지원에 의해서 연구됨.

#### 참 고 문 헌

(1) 장동일, 정영화, 용환선 : 구조강의 취성파괴거동에 대한 실험 연구, 대한토목학회 논문집 제 27권, 제2호, 1979.4.  
 (2) J.M. Barsom and S.T. Roife : Fracture and Fatigue Control in Structures, Pretice-Hall.

(3) J.M. Barsom and S.T. Roife : Correlations Between KIC and Charpy V-notch Test Results in the Transition-Temperature Range, ASTM STP 466, pp.281~302, 1970.  
 (4) T.L. Anderson : Fracture Mechanics-Fundamentals and Application, CRC Press, pp.635, 1995.  
 (5) A.G.Alkins : Elastic and Plastic Fracture pp.798  
 (6) J.H Gross : Effect of Strength and Thickness onNotch Ductility, ASTM STP 466, 1970.  
 (7) Ansel C. Ugural, Saul K. Fenster : Advanced Strength and Applied Elasticity, PTR Prentice-Hall, 1995.  
 (8) H. Neuber : Theory of Notch Stresses, J.W. Edwards, Publisher Inc., Ann-Arobr, Mich., 1946.  
 (9) Metals Handbook - Vol.12 Fractography, ASM International, 1987.  
 (10) 한국공업표준협회 : 한국공업규격 금속재료 인장시험편 KS B 0801, 1989.  
 (11) 구분권, 홍영환 : 열처리기술시리즈4 - 특수강의 열처리, 원창출판사, 1991.  
 (12) 남기우, 이인우 : 열처리기술시리즈10 - 금속조직과 결합, 원창출판사, 1991.  
 (13) David Broek : Elementary Engineering Fracture Mechanics, Martinus Nijhoff Publishers, 1986.

(접수일자 : 1997. 11. 7)