

## 가속 열 노화시험을 이용한 침매터널용 고무 씰 소재의 사용수명 예측

박준형\* · 박광화\* · 박형근\* · 권영일\*\* · 김종호\*\*\* · 성일경\*\*\*

한국화학시험연구원\* · 청주대학교\*\* · (주)화승엑스윌\*\*\*

## Service life prediction of rubber seal materials for immersion tunnel by accelerated thermal degradation tests

Joon Hyung Park\* · Kwang Hwa Park\* · Hyeong Geun Park\* ·  
Young Il Kwon\*\* · Jong Ho Kim\*\*\* · Il Kyung Sung\*\*\*

Korea Testing & Research Institute\* · Cheongju University\*\* · Hwaseung Exwill co.,ltd.\*\*\*

### Abstract

This paper considers accelerated thermal degradation tests which are performed for rubber seal materials used for undersea tunnels constructed by immersion method. Three types of rubber seals are tested; rubber expansion seal, omega seal, and shock absorber hose. Main ingredient of rubber expansion seal is EPDM(Ethylene Propylene Diene Monomer) and that of both omega seal and shock absorber hose is SBR(Styrene Butadiene Rubber). The accelerated stress is temperature and an Arrhenius model is introduced to describe the relationship between the lifetime and the stress. From the accelerated degradation tests, dominant failure mode of the rubber seals is found to be the loss of elongation. The lifetime distribution and the service life of the rubber seals at use condition are estimated from the test results. The acceleration factor for three types of rubber seals are also investigated.

Key words : Accelerated degradation test, Service life prediction, Rubber seals, Immersion tunnel

## 1. 서 론

해저터널에는 그 공법에 따라 굴착공법(掘鑿工法)에 의한 해저터널과 침매공법(沈埋工法)에 의한 침매터널이 있다. 침매터널은 해저의 부설 장소에 도랑을 굴삭하고 그 속에 철근 콘크리트제(유립식)의 침매함을 차례로 설치 및 결합하여 수저(水底)터널을 만들고 상부를 토사로 덮은 터널을 말한다. 침매터널의 규모는 길이, 단면, 침매함의 크기 등에서 점차 대형화되고 있다 [14]. 우리나라에서는 2010년 완공을 목표로 시공 중인 부산-거제 간 연결도로에 처음으로 적용해 큰 관심을 끌고 있다.

침매터널은 전 세계적으로 150여개 이상이 건설되어 운용되고 있으며, 내구성 설계는 콘크리트 구조물의 각종 열화현상에 대한 저항성을 증가시켜 목표수명 동안 구조물의 요구 성능을 충분히 발휘할 수 있도록 설계된다.

침매터널의 가장 두드러진 구조적 요소 중 하나는 미리 제작된 침매함을 연결하기 위해 필요한 연결 조인트이다. 철근 콘크리트제의 침매함으로 제작되는 침매터널 공법은 침매함을 육상에서 제작하여 해수 아래로 침설시킨다. 침설된 함체는 가이드 프레임과 중앙 와이어를 이용하여 고무 가스켓 부분을 기설된 침매함과 일차 접합하고 가격벽 사이에 물을 제거한 다음 연결부와 침매함 단부의 수압차를 이용하여 고무 가스켓을 수압 접합시킨다. 따라서 조인트에 문제가 발생하면 해수 유입이라는 심각한 결과를 초래하므로 조인트는 침매터널의 가장 중요한 부분 중 하나이다.

일본 운수성항만기술연구소에서 발행한 항만기연자료 No.871(1997년) 및 No.798(1995년)은 침매터널용 고무 가스켓의 제반 특성 및 접합부의 고무 가스켓의 기본적 역학시험과 유한요소 해석에 대해 기술하고 있다. 또한 이 보고서는 침매터널 요소들 사이에 존재하는 조인트부가 지진 또는 환경 등에 의해 큰 하중과 변형에 노출되기 쉽고, 그 중 고무 가스켓은 플렉시블 조인트 부위(flexible joint parts)의 방수기능을 제공함과 동시에 구조의 한 부분으로 사용되므로, 고무 가스켓은 오랜 시간동안 사용환경에서 견딜 수 있는 고 신뢰도가 요구된다고 기술하고 있다.

침매터널에 사용되는 고무 가스켓 및 씰은 사용용도에 따라서 여러 가지 종류로 나뉜다. 크게 Gina라고 불리우는 고무 가스켓과 Omega seal, Water stop seal 등의 고무 씰로 구분되고 있으며 본 연구에서는 Omega seal과 Water stop seal용 고무소재 제품을 다루고 있다. 현재 세계적으로 침매터널용 고무 가스켓 제품은 스웨덴의 한 기업에서 생산한 제품이 대부분 사용되고 있으며, 품질과 신뢰도도 우수하다고 인정되고 있다. 이 기업에서는 제품에 대해 가속 수명시험을 수행하여 신뢰성 평가 보고서를 발표하고 이를 근거로 100년의 사용수명을 보증하고 있다.

TB ED 2005-162의 보고서는 응력완화(Relaxation)라는 고장모드로 시간에 따른 일정 변형에서의 하중 감소의 영향을 관찰하였다. 이 연구에서는 Briggs의 대수가 시간에 따라 선형적으로 감소하며 응력완화가 10의 배수로 일정하다고 가정하였다. 배합된 고무의 응력 완화율이 10년동안 6%정도 감소한다고 보고 이로부터 100년 후의 응력 완화율이 46.3%, 즉 100년 후에 초기 반력하중의 53.7%가 남아 있을 것이라고 추정하고 응력완화시험(Relaxation test)을 수행하였다[22]. 또한 LO1039 (Lifetime estimation of compound for Gina-and Omega seals)

에서는 ISO 11346의 아레니우스 모델식에 의거하여 침매터널의 고무 씬의 사용온도를 5℃에서 10℃로 보고 고온(50℃, 70℃, 100℃)에서 가속 열 열화시험을 실시하여 사용온도에서의 수명을 예측하였다. 고무의 물성 중 30%신장 시 인장응력이 초기 값의 50%로 저하되는 시점을 고장 기준으로 적용하였으며, 시험 결과 사용조건에서 침매터널 고무 씬인 Gina와 Omega seal용 고무소재의 수명은 5℃의 경우 430년, 10℃의 경우 224년, 15℃의 경우 117년으로 각각 예측하였다[23].

본 연구에서는 침매터널에 사용되는 여러 가지의 고무 지수재 중 2차 지수재에 사용되는 고무 씬(Omega seal & Expansion seal)을 대상으로 사용환경에 의한 열화 모드를 분석하고 이를 토대로 가속수명시험을 설계하고 실시하였다. 또한 가속시험결과를 분석하여 필드사용수건에서의 신뢰성을 평가하고 사용수명을 예측하였다.

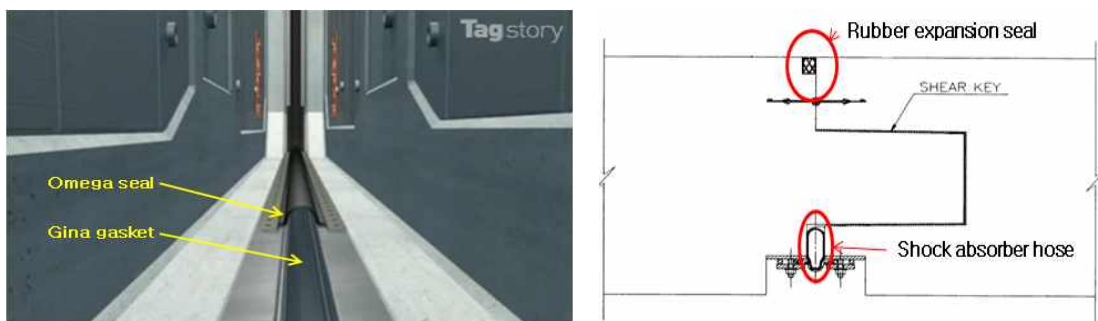
## 2. 시험 및 평가

### 2.1 시험 설계 및 방법

#### 2.1.1 제품의 형상 및 고장 원인

어떠한 원인에 의해 침매터널의 조인트가 벌어지는 현상을 조인트 오프닝(joint opening)이라 하며 이러한 현상을 야기하는 원인은 시공오차, 온도변화, 콘크리트의 크리프 및 수축, Gina의 이완, 지진에 의한 거동, 침몰선박 또는 침수에 의한 하중부과, 지반의 부등침하 등이다 한국건설기술인협회(2008).

Rubber expansion seal(sea water seal)은 <그림 1>에서 보는 바와 같이 침매함 외측 1차 해수 차수재로, Omega seal은 침매함 내측의 2차 차수재로 사용되며, Shock absorber hose는 Omega 차수재 내측에서 침매함 변형에 의한 충격을 흡수하는 역할을 한다. 하지만 앞서 언급한 바와 같이 조인트에 허용되는 거동이 매우 제한적이고 외부에는 부력에 대한 안정성을 확보하기 위하여 바라스트(ballast) 콘크리트를 타설하므로 고무 지수재에 직접적으로 수압이 적용되지 않는다.



<그림 1> 고무 제품이 설치되는 위치

Gina라고 명칭 되는 고무 가스켓은 침매함 양단에 설치되어 수압에 의해 접합이 되는데 본 연구에서 사용되어지는 Omega seal 이나 Shock absorber hose는 Gina 가스켓 내부에 설치되어 수압을 직접적으로 받지 않고, 가와사키항로 침매터널 사례(한국건설기술연구원)에서 고무 가스켓(GINA gasket)과 이음연결 케이블의 실물대 공시체를 제작하여 압축-인장시험과 휨 시험을 실시한 결과 주파수의 동적인 특성에 대한 영향은 무시할 수 있다고 보고되고 있으므로 동적거동에 대한 영향은 매우 작음을 알 수 있다[3].

즉, Rubber expansion seal과 Omega seal 및 Shock absorber hose는 직접적인 수압을 받지 않고, 동적 거동에 대한 영향도 미비하므로 단순히 이음부의 지수 안전성을 높이기 위한 지수 목적의 고무제라 할 수 있겠다. 따라서, Rubber expansion seal과 Omega seal 및 Shock absorber hose의 주된 요구성능은 이음부의 지수 안전성을 높이는 것이며 이러한 성능에 영향을 주는 물성은 인장강도, 신장률, 저신장에서의 인장응력, 경도 등이라 할 수 있다. 또한 사용 환경으로는 온도변화 및 지진에 의한 거동, 침수에 의한 하중 등이 있는데 가와사키항로 침매터널 사례를 보면 콘크리트 및 철근 등의 구조물이 지진에 의한 거동 및 침수에 의한 하중을 견디도록 설계되므로 고무제는 큰 영향을 받지 않음을 확인 할 수 있었다. 즉, 고무제의 사용환경 조건은 상당히 안정적인 사용환경이라 할 수 있으며 그 중 침매터널 안쪽과 주변 지반과의 온도차(10℃)가 고무 지수재에 영향을 주는 것으로 사료된다.

## 2.1.2 고장 모드 및 고장 메커니즘 선정

플라스틱 및 고분자 등은 대기 또는 접촉에서 어떠한 물질로부터 화학 작용에 의한 공격을 받을 수도 있고, 고온이나 저온에 의해 다양한 물리적 변화가 일어날 수 있으며 자외선 및 습도에 의한 화학적, 물리적 변화가 일어날 수 있다 O'Connor, Patrick D.T.(1995).

고분자의 일부인 고무도 다양한 외부 환경이나 진동, 피로, 작업조건 등 많은 요인들에 매우 취약하다는 것은 논문이나 문헌에서 이미 기술하고 있는 부분이다. 하지만 수많은 요인들에서 열화(degradation)가 진행 될 때는 그에 의한 물성 변화나 화학적 반응 변화가 비선형 거동을 나타내므로 정확한 수명을 예측하기란 매우 어려운 일이다.

2.1.1절에서 제품의 고장원인을 조사한 결과 조인트에 허용되는 거동이 매우 제한적이기 때문에 큰 변형을 야기하지 않으며, 압축-인장시험과 휨 시험을 실시한 결과 주파수의 동적인 특성에 대한 영향은 무시할 수 있으며 동적거동에 대한 영향이 작음을 확인할 수 있었다. 따라서 제품에 요구되는 주요 성능은 지수 안전성을 높이는 것이 주요이며 이러한 성능에 영향을 주는 물성인 인장강도, 신장률, 저신장에서의 인장응력, 경도를 고장 모드라 할 수 있다. 또한 사용 환경에 대한 부분은 조인트 오프닝을 야기하는 원인 중 온도변화에 대한 원인이 고무 지수재에 영향을 미치는 주요 고장 메커니즘이라는 것을 알 수 있었다.

고장의 판단 기준은 KS M ISO 11346(2007)에 따라 초기 물성 값의 50 %로 저하되는 시점을 고장으로 정의한다.

### 2.1.3 가속수명시험 방법 및 가속 모델

기본 물성시험에서는 KS M 6782(2009) 가황고무의 인장시험 방법 및 KS M 6784(2009) 가황고무 및 열가소성 고무의 경도시험 방법에 근거하여 인장강도, 신장률, 30%신장시 인장응력, 국제고무경도(IRHD/N)를 측정하였다. 그리고 KS M ISO 11346(2007) (Rubber, vulcanized or thermoplastic - Estimation of life-time and maximum temperature of use)에 근거한 수명시험법으로 실제 사용온도보다 높은 온도로 KS M 6788(2004) 가황고무의 노화시험 방법에 근거하여 가속 열노화시험을 수행하였다.

가속모델은 화학소재에서 온도가속시험에서 일반적으로 많이 적용되고 있는 아레니우스 모델 (Arrhenius model)을 선정하였다.

## 2.2 시험 개요

### 2.2.1 시험 시료

시험시료는 칩매터널 조인트에 시공되는 고무 씰을 제조하는 기업체에서 사용하는 배합고무 원료를 사용하여 물성시험을 하기 위한 시트(sheet)를 제작하였다. 고무시편은 rubber expansion seal용 고무소재와 omega seal 및 shock absorber hose용 고무소재 등 2종류를 제작 하였으며 각 소재에 대한 기본 배합표는 <표 1>과 같다.

<표 1> 고무 시트 배합표

품목명	품번	주재질	폴리머	카본	필러	노방제	촉진제
Rubber expansion seal	S6106	EPDM <sup>1)</sup>	50	35	10	3	2
Omega seal 및 Shock absorber hose	V2720	SBR <sup>2)</sup>	50	30	13	5	2

### 2.2.2 시험 조건

고무 Sheet 시료로부터 KS M 6782의 아령 3호형 시험편을 채취하여 인장시험을 실시하였다. 또한, KS M 6784(2009)에 근거하여 국제고무경도(IRHD/N)를 측정하였으며, KS M 6788(2004)에 근거하여 열 노화시험을 진행 하면서 일정 시간대 별로 시험편을 꺼내어 목표 저하지점에 도달하는 추세를 관측하였다.

실제 제품이 사용되는 해저온도는 지상의 상온보다 낮은 온도이다. 가속시험을 설계하기 위하여 고무재질의 한계온도를 조사하여 본 결과 일반적으로 배합비와 첨가제에 따라서

1) EPDM : Ethylene Propylene Diene Monomer

2) SBR : Styrene Butadiene Rubber

EPDM과 SBR 은 100℃에서 150℃의 범위에서 유동적으로 나타났다. 따라서 가속시험온도 중 최고 상한 온도는 EPDM의 경우 120℃, SBR의 경우 100℃로 최고 사용온도를 넘지 않는 범위에서 설정하였다.

<표 2> 각 고무 재료의 한계온도 [9]

고무 종류	Temperature (℃)	
	하한(-)	상한(+)
SBR	50	100
EPDM (과산화물(Peroxide) 가황)	50	150

각 온도별로 약 2,000개의 시험편으로 동시에 열 노화시험을 진행하였으며 데이터 관측방식은 임의관측중단 방식으로 임의관측중단 시점에 5개의 sample을 관측하여 물성변화를 관측하였다.

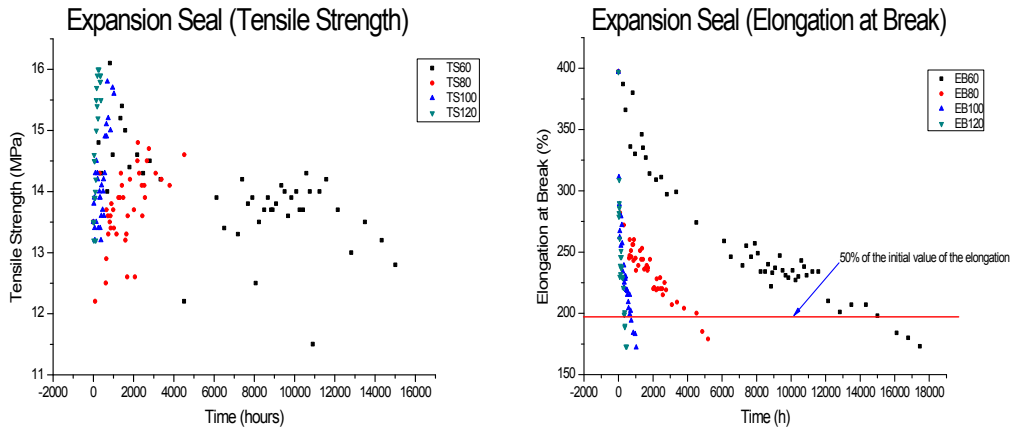
<표 3> 가속시험 조건 및 데이터 수집 방법

가속시험 조건 및 데이터 수집 방법	
가속 열 열화 시험 방법	KS M 6788의 공기 가열 노화시험(강제 공기 치환식)
가속시험 온도	EPDM (60±1)℃, (80±1)℃, (100±1)℃, (120±1)℃
	SBR (60±1)℃, (70±1)℃, (80±1)℃, (100±1)℃
데이터 관측 방식	임의관측중단 방식(Censoring data)
관측 수	5 개
관측중단시점(고장시점)	초기 물성의 50% 저하 지점
물성시험 항목	인장강도, 신장률, 30% 신장 시 인장응력, 국제고무경도
물성측정 온도	(23±2)℃, 조건시험 후 16~96시간 이내 측정
데이터 표시	n=5 측정 후 Censoring

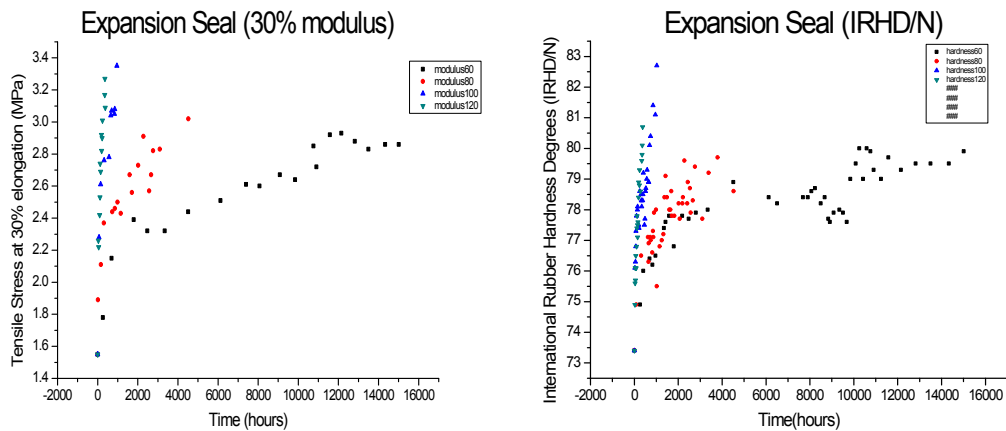
### 2.3 가속 열 열화시험에 따른 물성 변화

관측중단 시간이 되면 시험편을 노화시험기에서 꺼내어 상온에서 16시간 이상 방치하였다가 16시간에서 96시간 이내에 인장시험 및 경도시험을 측정하였다. 인장시험은 만능재료시험기 (INSTRON 5565, USA)를 이용하였으며, 경도시험은 국제고무경도 시험기(Hildebrand, Germany)를 이용하여 측정하였다.

가속 열 노화시험은 임의관측중단 방식으로 진행하였으며, 임의관측중단 시점에서 인장강도, 30% 신장 시 인장응력, 신장률, 국제고무경도(IRHD/N)를 관측하였다.

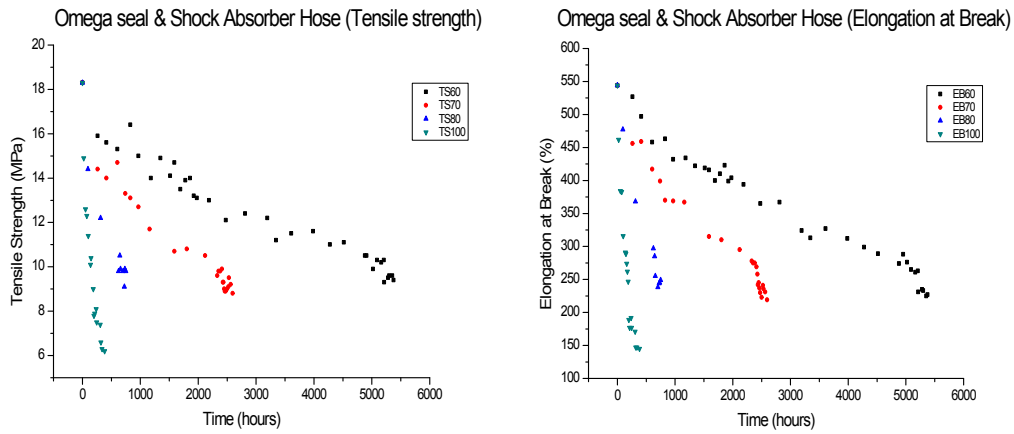


<그림 2> 인장강도(좌) 및 신장률(우) 시험 그래프(EPDM)

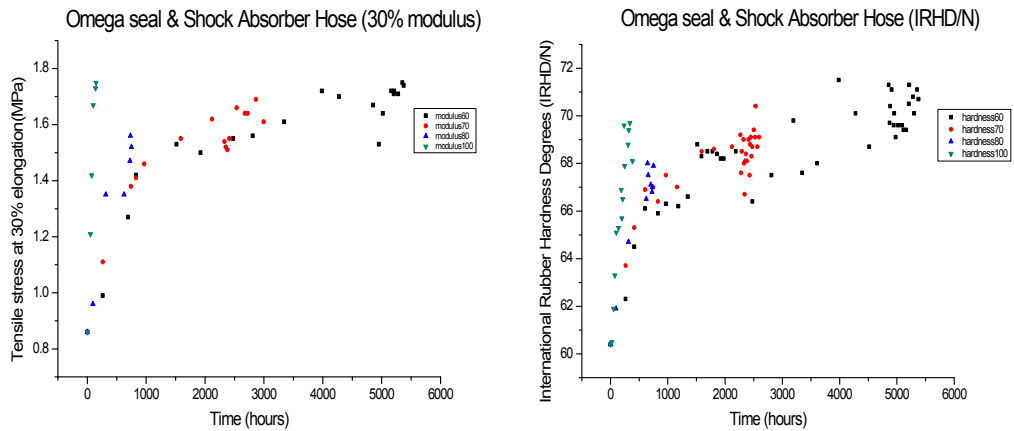


<그림 3> 30% 신장 시 인장응력(좌) 및 국제고무경도(우) 시험 그래프(EPDM)

EPDM 고무 시편의 경우 시간에 따른 인장강도의 변화를 보면 인장강도 변화가 크게 변화하지 않음을 볼 수 있다. 또한, 물성 변화가 온도별로 일정 경향성도 없는 것으로 보여진다. EPDM 고무 시편으로 온도에 의한 가속수명시험을 한 결과 인장강도를 제외한 신장률, 30%신장시 인장응력, 국제고무경도(IRHD/N)에 대한 시험 데이터는 온도와 시간에 따라 일정 경향성을 갖고 있는 것을 알 수 있다. 인장강도 시험 데이터의 경우는 약 2년을 넘게 시험을 하였음에도 불구하고 강도의 변화가 크게 없음을 알 수 있었다. 따라서 이후 수명평가에서 인장강도 시험 데이터는 제외시켰다.



<그림 4> 인장강도(좌) 및 신장률(우) 시험 그래프(SBR)



<그림 5> 30% 신장 시 인장응력(좌) 및 국제고무경도(우) 시험 그래프(SBR)

SBR 고무시편으로 온도에 의한 가속수명시험을 한 결과 인장강도, 신장률, 30% 신장 시 인장응력, 국제고무경도(IRHD/N)에 대한 모든 시험 데이터가 온도와 시간에 따라 일정 경향성을 갖고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 모든 물성변화 값이 온도에 의해 열화 됨을 알 수 있었다.

## 2.4 주 고장 모드 분석

주 고장모드(dominant failure mode)란 제품의 고장을 야기 할 수 있는 여러 고장모드를 grouping하여 그 중 전체를 지배하는 하나의 고장모드를 말한다.

침매터널용 2차 고무 지수재용 고무소재의 고장모드는 인장강도, 신장률, 30% 신장 시



인장응력, 국제고무경도(IRHD/N)로 보고 각각의 고장모드에서 특성값이 50% 변화하는 시점을 고장시점(threshold value)으로 판정하고 사용온도에서의 수명을 예측, 비교하였다.

### 2.4.1 EPDM 고무(Rubber expansion seal용 고무)의 주 고장 모드

EPDM 고무시편의 시간에 대한 인장강도 데이터는 시간이 지남에 따라 인장강도의 변화가 일정하지 않음을 볼 수 있다. 또한 시간에 자연로그를 취하여 데이터의 경향성을 확인 한 결과 상관계수가 낮아 시간에 따른 강도의 변화가 있다고 판단하기가 어려웠다. 더욱이 약 16,000시간 동안 열 열화시험을 진행하였음에도 불구하고 다른 물성들은 고장시점을 모두 지나버린 반면에 인장강도는 고장시점까지 도달하지 않았으므로 관측을 중단하고 수명 예측에서 제외하였다.

시험 결과로부터 얻어진 각각의 고장모드에 대한 사용온도에서의 수명은 <표 4>와 같다.

<표 4> 특정 온도에서의 사용 수명 예측 (EPDM)

고장모드	온도 (°C)	사용 수명 (year)	지배고장모드
신장률	5	264.8	지배고장모드 (Dominant failure mode)
	10	154.7	
	15	92.1	
30% 신장 시 인장응력	5	821.3	
	10	443.8	
	15	245.0	
국제고무경도 (IRHD/N)	5	986.2	
	10	559.9	
	15	324.2	

<표 4>에서 보는 바와 같이 여러 고장모드 중 신장률의 수명이 다른 고장모드의 수명보다 가장 낮으므로 다른 수명들을 모두 지배(domination)한다고 볼 수 있다. 즉, 신장률의 수명이 가장 낮으므로 신장률에 의해 고장이 제일 먼저 일어나며 다른 특성값은 그 이전에 고장이 발생하지 않으므로 신장률이 지배고장모드라고 할 수 있는 것이다.

### 2.4.2 SBR 고무(Omega seal 및 shock absorber hose용 고무)의 지배 고장 모드

SBR 고무소재로 가속수명시험을 실시하여 각 고장모드에 대한 사용온도에서의 수명을 구한 결과가 <표 5>와 같다.

<표 5> 특정 온도에서의 사용 수명 예측 (SBR)

고장모드	온도 (°C)	사용 수명 (year)	지배고장모드
인장강도	5	704.6	
	10	338.6	
	15	166.9	
신장률	5	374.2	지배고장모드 (Dominant failure mode)
	10	186.2	
	15	94.9	
30%신장시 인장응력	5	1017.9	
	10	468.2	
	15	221.2	
국제고무경도 (IRHD/N)	5	970.0	
	10	504.6	
	15	268.5	

<표 5>에서 보는 바와 같이 여러 고장모드 중 신장률의 수명이 다른 고장모드의 수명보다 가장 낮으므로 다른 수명들을 모두 지배(domination)한다고 볼 수 있다. 즉, 신장률의 수명이 가장 낮으므로 신장률에 의해 고장이 제일 먼저 일어나며 다른 특성값은 그 이전에 고장이 나질 않으므로 신장률이 지배고장모드라고 할 수 있는 것이다.

따라서 EPDM 및 SBR 고무로 가속 열 열화시험을 실시하여 고장모드의 특성값의 변화를 관측하고 이를 분석하여 본 결과 두 고무소재 전부 신장률이 지배고장모드(Dominant failure mode)임을 알 수 있다.

## 2.5 분포를 고려한 사용 수명 예측

### 2.5.1 분포의 적합성 검토

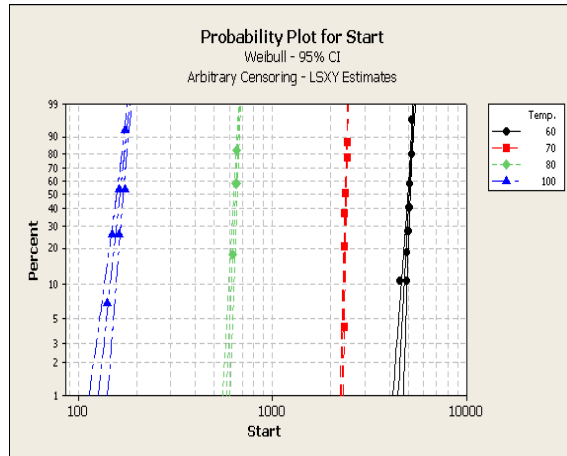
<표 4> 및 <표 5>에서 분석한 결과를 보면 EPDM 및 SBR 고무소재 모두 신장률이 지배고장모드임을 이미 알 수 있었다. 따라서 수명예측을 위한 분포의 검토나 모수의 추정 등은 신장률 시험 데이터로 분석을 하였다.

시험온도에 따른 신장률변화를 기준으로 분포의 적합성을 검토하였다. 두 소재 모두 상관계수 값이 와이불 분포가 가장 높음을 알 수 있다. 따라서 EPDM과 SBR 고무소재 모두 열 열화에 의한 수명분포는 와이불 분포임을 확인 하였다.

EPDM의 경우 온도별 가속시험 데이터들의 기울기를 보면 60, 80, 100°C의 경우는 기울기가 거의 비슷하게 보이나 120°C는 다른 데이터들의 기울기에 비해 조금 다른 것을 확인 할 수가 있다. 즉, 120°C의 경우는 고장 메커니즘이 다르게 나타난 것으로 판단을 할 수 있다.

120 °C의 데이터를 제외하고 60, 80, 100 °C의 데이터로만 특성 파라미터를 추정한 결과 거의

비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 특성 파라미터들이 동일한지를 검증하기 위하여 동일성 검정을 한 결과 유의수준 5%에서 p-value가 0.535이므로 동일한 고장 메커니즘이라는 것을 알 수 있었다.

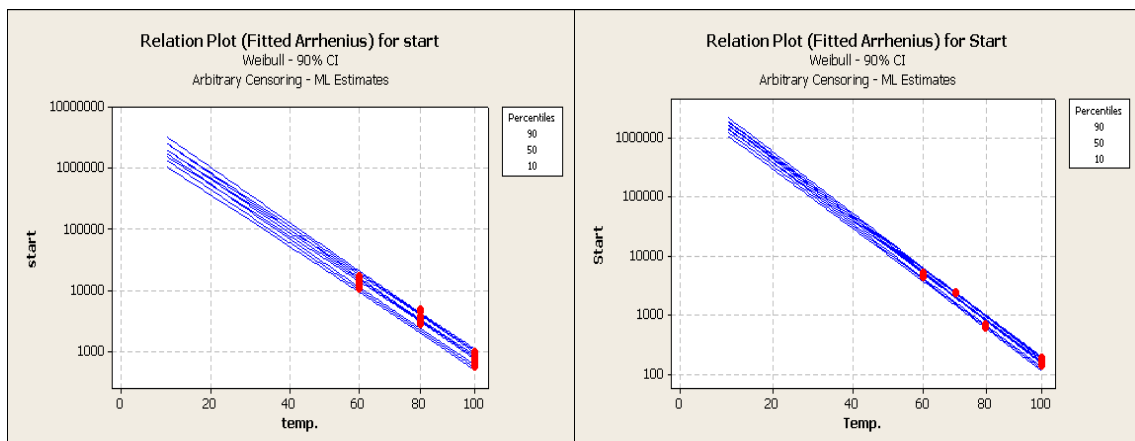


<그림 6> 분포의 특성 파라미터 추정 (SBR)

반면 SBR의 경우 분포의 특성 파라미터를 추정해 본 결과 스트레스 수준별로 약간의 기울기의 차이는 있으나 동일한 고장 메커니즘임을 확인하였다.

### 2.5.2 아레니우스 관계식에 의한 백분위 수 도식

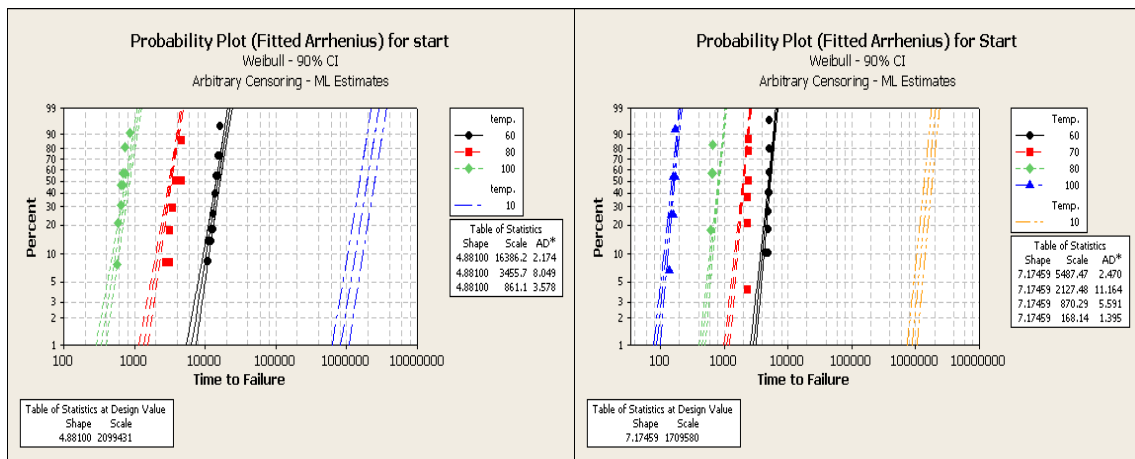
앞에서 확인 된 바와 같이 가속인자와 와이불 분포의 척도모수와의 관계로서 아레니우스 관계식을 적용하여 두 변수 간(수명시간과 열 열화온도)의 선형 관계를 나타내면 <그림 7>와 같다. 그림에서 두 변수간의 관계가 거의 직선을 만족함을 알 수 있으며 그 결과 아레니우스 모델이 적합한 것으로 판단 할 수 있다.



<그림 7> 아레니우스 모델 및 백분위 수 도식 (EPDM(좌), SBR(우))

### 2.5.3 수명분포의 모수 및 공통의 형상모수 추정

아레니우스 모델을 적용하여 공통의 형상모수와 사용조건에서의 수명분포를 추정할 수 있다. 본 연구에서 사용하는 제품은 해수 속 지하에서 사용되어지기 때문에 침매터널 안쪽과 주변 지반과의 온도차인 10℃를 고려하여 추정되는 사용온도를 10℃로 하여 수명을 추정하여 보았다. <그림 8>는 사용조건에서의 수명분포와 공통의 형상모수를 추정한 그래프이다.



<그림 8> 사용수준의 파라미터 추정과 신뢰구간 도식 (EPDM(좌), SBR(우))

아레니우스 모델을 적용하여 구한 분포의 특성 파라미터인 형상모수(shape parameter)는 Rubber expansion seal용 고무소재의 경우 4.88임을 알 수 있었고 Omega seal 및 Shock absorber hose용 고무소재의 경우는 7.17임을 알 수 있었다. <표 1>의 의뢰인이 제시한 배합표를 보면 Rubber expansion seal용 고무소재는 EPDM이고 Omega seal 및 Shock absorber hose용 고무소재는 SBR임을 감안하여 보면 고무의 재질별로 형상모수가 다른 것을 확인 할 수 있었다.

또한, 형상모수의 값이 1보다 큰 값을 가짐으로 고장이 시간의 경과함으로 인해 증가하는 증가고장률 함수의 형태이며 각 제품별 활성화 에너지(Activation Energy)를 구해 보면 <표 6> 및 <표 7>와 같다.

<표 6> 회귀분석 표 (EPDM)

Regression Table (EPDM)						
Predictor	Coefficient	Standard error	Z	P	90 % Normal CI	
					Lower	Upper
Intercept	-17.779	0.605	-29.39	0.000	-18.774	-16.784
Temp.	0.789	0.0183	43.05	0.000	0.759	0.819
Shape	4.88	0.423			4.23	5.63

<표 7> 회귀분석 표 (SBR)

Regression Table (SBR)						
Predictor	Coefficient	Standard error	Z	P	90 % Normal CI	
					Lower	Upper
Intercept	-23.905	0.387	-61.83	0.000	-24.541	-23.269
Temp.	0.933	0.0115	80.96	0.000	0.915	0.952
Shape	7.17	0.655			6.17	8.34

활성화 에너지(Activation Energy)는 EPDM 고무소재의 경우 0.789이며 SBR 고무소재는 0.933 으로 반응속도가 배합별로 다른 것을 알 수 있다.

<표 8> 사용수준의 백분위 수

고무 종류	Percent	Temp. (°C)	Percentile (years)	90% CL	
				Lower (years)	Upper (years)
EPDM	B <sub>5</sub> (5%)	10	130.4	101.1	168.2
	B <sub>10</sub> (10%)	10	151.1	117.8	193.9
SBR	B <sub>5</sub> (5%)	10	129.0	110.0	151.2
	B <sub>10</sub> (10%)	10	142.6	122.4	166.2

<표 8>는 사용온도 10°C에서 5% 및 10% 백분위수를 분석한 결과이다. 이와 같은 결과로부터 신뢰수준 90%에서 EPDM 고무소재의 경우 B5수명이 130.4년이고 B10수명이 151.1년임을 알 수 있고 SBR 고무소재의 경우 B5수명이 129.0년이고 B10수명이 142.6년임을 알 수 있다.

고 신뢰도를 보증하기 위해서는 특성수명에서 백분위 수를 줄이고 신뢰수준에서 백분위 수가 아닌 하한값(lower)으로 설계를 하면 고장이 일어날 확률도 최소화 시키면서 신뢰수준에서 리스크를 최소화 시킬 수 있다. EPDM 고무소재와 SBR 고무소재의 고 신뢰도를 요구하는 수명은 사용온도가 10 °C일 경우 Rubber expansion seal용 고무소재는 신뢰수준 90 %에서 B5수명이 101.1년임을 확인 할 수 있으며 Omega seal 및 Shock absorber hose용 고무소재는 신뢰수준 90 %에서 B5수명이 110년임을 알 수 있었다.

### 2.5.4 가속 계수 산출

사용수준에서 예측된 특성수명으로 가속계수(Acceleration factor)를 계산 할 수 있다.

가속계수(Acceleration factor)는 사용수준과 가속수준에서의 특성수명으로 계산할 수 있으며 계산식은 식(1)과 같다.

$$AF = \frac{L_{use}}{L_{accelerated}} = \frac{A \exp\left(\frac{E_a}{kT_u}\right)}{A \exp\left(\frac{E_a}{kT_a}\right)} = \exp\left[\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_a}\right)\right] \quad (1)$$

여기에서,  $AF$  : 가속계수

$L_{use}$  : 사용수준에서의 특성수명

$L_{accelerated}$  : 가속수준에서의 특성수명

$E_a$  : 활성화 에너지 ( $eV$ )

$k$  : 볼츠만 상수 ( $eV/k$ )

$T_u$  : 사용 온도 (절대 온도: $K$ )

$T_a$  : 가속시험 온도 (절대 온도: $K$ )

식(1)을 이용하여 Rubber expansion seal 과 Omega seal 및 Shock absorber hose용 고무 소재의 가속계수를 계산하면 <표 9>과 같다.

<표 9> 가속계수(Acceleration factor) 산출

고무 종류	사용온도 (°C)	가속온도 (°C)	가속계수 (AF)
EPDM	10	60	128.1
		80	607.5
		100	2438.2
SBR	10	60	311.5
		70	803.6
		80	1964.4

### 3. 결 론

본 연구에서는 침매터널 연결부재로 사용되는 고무 씰 제품 중 rubber expansion seal, omega seal 및 shock absorber hose의 사용수명을 예측하였다. 고무 씰 제품의 고무소재는 EPDM과 SBR이며 제품의 주요 요구성능은 이음부의 지수 안전성 높이는 것이며, 이러한 성능에 영향을 주는 물성은 인장강도, 신장률, 저신장에서 인장응력, 경도임을 알 수 있었다. 또한, 조인트부의 오프닝을 야기하는 시공오차, 온도변화, 지진에 의한 거동, 침몰선박 또는 침수에 의한 하중 등을 고려하여 본 결과 고무 씰에 직접적으로 영향을 주는 요인은 온도 변화에 의한 것임을 확인하였다. 따라서 고무 씰에 사용되는 고무는 열 열화 요인이 가장 크므로 고무 씰의 소재인 EPDM과 SBR의 두 소재에 대하여 가속 열 열화시험을 진행 하여

소재의 물성이 변화하는 경향을 관찰하였으며 각 소재별로 요구 성능인 인장강도, 신장률, 저신장에서의 인장응력, 경도를 고장모드로 보고 고장 모드를 지배하는 주 고장 모드를 확인한 결과 두 소재 모두 신장률이 주 고장 모드임을 알 수 있었다.

신장률 시험결과로부터 적합한 수명분포를 찾고 관련된 모수를 추정한 결과 두 소재 모두 와이불 분포를 따르는 것을 알 수 있었다. rubber expansion seal에 사용되는 고무 소재인 EPDM의 경우는 형상모수가 4.88, omega seal 및 shock absorber hose에 사용되는 고무 소재인 SBR의 경우는 형상모수가 7.17로써 고무의 재질별로 형상모수가 다른 것을 확인할 수 있었다. 또한, 아레니우스 모델의 관계식에 의해 사용온도를 10℃로 하여 백분위 수를 도성한 결과 90% 신뢰구간에서 EPDM 고무소재는 B5 수명 101년(신뢰구간에서의 하한값), SBR 고무소재는 B5 수명 110년(신뢰구간에서의 하한값)의 수명을 예측할 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] 서순근 (2009), Minitab 신뢰성 분석, 이레테크
- [2] 정해성, 권영일, 박동호 (2007), 신뢰성 시험 분석 평가, 영지문화사
- [3] 가와사키향로 칩매터널 설계 사례 보고서, 한국건설기술연구원
- [4] 권영일 외(2007), 가속열화시험에 의한 건축용 실란트의 사용수명 평가, 신뢰성응용연구, 7권, 4호, 149-162
- [5] 권동렬 (2004), 칩매터널 소개, 유신기술회보 제11호
- [6] 한국건설기술인협회 (2008), “건설기술인”, 통권 85호, 2008년 3-4월호, pp. 14-17.
- [7] D.H. Stamatis, (1995), *Failure Mode and Effect Analysis : FMEA from theory to execution*, ASQC Quality Press
- [8] Jay L. Devore, *Probability and Statistic for Engineering and the Sciences, Fourth Edition*, Duxbury Press
- [9] Khairi Nagdi, *Rubber as an Engineering Material : Guideline for Users*
- [10] L.M. Klyatis et al., *Accelerated Quality and Reliability Solutions*, ELSEVIER
- [11] O'Connor, Patrick D.T.(1995), *Practical Reliability Engineering, Fourth Edition*, John Wiley & Sons Inc.
- [12] WAYNE B. NELSON, *Accelerated Testing : Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis*, Wiley Interscience.
- [13] William Q. Meeker & Luis A. Escobar, *Statistical Methods for Reliability Data*, Wiley Interscience.
- [14] 부산사이버해양박물관 자료 (seaworld.busan.kr)
- [15] Accelerated Life Testing Analysis (www.weibull.com)
- [16] Handy Tools & Information : Weibull Failure Database, Barringer & Associates. Inc.
- [17] KS A 5607 (2006), 성능 열화 특성에 의한 신뢰성 보증
- [18] KS M ISO 11346 (2007), 가황 또는 열가소성 고무 - 수명 및 최대 사용 온도 추정

- [19] KS M 6782 (2009), 가황 고무의 인장 시험방법
- [20] KS M 6784 (2009), 가황 고무 및 열가소성 고무의 경도 시험방법
- [21] KS M 6788 (2004), 가황 고무의 노화 시험 방법
- [22] Technical Report, TB ED 2005-162(06-10-2005) : *Relaxation*
- [23] Technical Report, LO1039(08-06-2005) : *Lifetime estimation of compound for Gina-and Omega seals.*