

고무 방현재의 사용 수명 예측

이 세 희* · 박 준 형** · 김 광 섭*

아주대학교* · 화학시험연구원**

Prediction of Service Life of The Rubber Fender

Se Hee Lee* · Jun Hyung Park** · Gwang Sub Kim*

Ajou University* · Korea Testing & Research Institute**

Abstract

The rubber fender is used to absorb the berthing energy that is produced when a ship is near a port, and it prevents collision between the ship and port. If the rubber fender becomes defective, the berthing energy cannot be absorbed when it is near the port, and damage can result from collisions due to the hardening process. In this research, when the rubber fender is heated, collisions can cause cracks and other damage. It is also confirmed from the research the lifetime distribution of the rubber fender. The researcher has predicted using different variables and elongation that a rubber fender has an 11year lifespan at 20°C

Key Words : Arrhenius Model(아레니우스 모델), Elongation(신장률), Lifetime Distribution(수명분포), Rubber Fender(고무 방현재), Service Life(사용 수명)

1. 서 론

고무 방현재는 고무의 탄성을 이용하여 선박 접안 시 발생하는 충돌에너지를 흡수하여 선체 및 부두 안벽을 보호하기 위한 주요 시설재이다. 이 시설재는 구조상 취부용 철판을 하부에 내장하고 있고 다른 부분은 외면 및 내면용 배합고무로 되어 있다. 고무 방현재는 선박이 부두의 안벽에 접안시 선박의 접안 에너지(Berthing energy)를 흡수하여 안전한 접안을 가능하도록 하게함과 동시에 선박과 부두 안벽을 충분히 보호하는 기능을 한다. 고무 방현재의 고장으로 인하여 선박이 접안 할 때 열화로 인한 접안에너지 흡수를 못한다거나 열화로 인한 경화현상으로 인하여 선박 및 부두의 손상이 일어날 수 있다.

* 본 연구는 '06년 부품·소재신뢰성향상사업(화학소재분야)의 일환으로 지식경제부의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.



<그림 1> 고무 방현재의 종류

고무 방현재는 선체의 유동에 따라 하중을 받아 그 충격을 흡수하여 선체와 부두 시설과의 충돌을 억제하는 목적을 가진 장치로서 선박의 안전성과 관련된 중요한 구조 부재로 내구성이 무엇보다 필요한 장치이다. 본 연구에서는 <그림 2>에서 보는 것과 같이 고무 방현재에 하중이 집중적으로 받게 될 때 다양한 모드의 압축 변위와 장기간 외부 환경 노출에 의한 노화에 따른 균열 및 변형에 대한 원인 분석을 위한 가속수명시험과 이에 의한 고무 방현재의 사용수명을 예측하는데 주요한 목적이 있다.



<그림 2> 고무 방현재의 고장 형태

<표 1> 스트레스 조건에 따른 고장 모드 및 고장 매커니즘

Requirements (Stresses and Performance)		Failure Modes/ Mechanisms		흡수에너지 저하	크리프 (creep)	열경화	팽윤
		파손	균열				
atmosphere	오존	○	◎	○	◇	○	◇
	수분	◇	◇	○	◇	◇	◇
	열(내열, 내한)	◎	◎	○	○	◎	◇
	기름	◇	◇	○	◇	○	○
	약품	◇	○	◇	◇	◇	○
압축변형		◎	◎	◎	◎	◇	◇
합계		24	32	22	16	18	10
* 신뢰성에 관련된 중요도에 따라 표시 : ◎가장 중요(9) ○중요(3) ◇보통(1)							

<표 2> 고장 모드 및 고장 메커니즘에 따른 시험 방법

Test Methods Failure Modes /Mechanisms	인장 시험	축진노화 시험	오존 시험	침지 시험	기본성능 시험	수명 시험
파손	◎	○	○	○	○	◎
균열	◎	◎	◎	◇	○	◎
흡수에너지 저하	◇	◎	◇	○	○	◎
강도 저하	◎	◎	○	◇	○	◎
크리프(creep)	○	◇	◇	○	○	◎
열 경화	◇	◎	○	○	○	○
팽윤	◇	◇	◇	◎	○	◇
합계	33	41	21	23	21	49
* 신뢰성에 관련된 중요도에 따라 표시 : ◎가장 중요(9) ○중요(3) ◇보통(1) * Failure Mode/Mechanism은 해당 부품·소재에서 발생할 수 있는 모든 고장 형태를 나타냄 * Test Methods는 해당 발생고장을 일으킬 수 있는 시험방법을 나타냄						

2. 시험 및 평가

2.1 시험 설계 및 방법

2.1.1 고장판단기준

고무와 같은 고분자소재는 온도, 습도, 오일, 오존, 기계 및 전기적 응력 등 특성인자와 사용조건, 배합조건 등 매우 다양한 인자의 영향에 민감하다. 또한 고장이 어느 한순간에 일어나기 보다는 서서히 열화가 진행되면서 고장이 발생하므로 고장판단 기준을 명확히 하기가 곤란하다. <표 2>에서 보는바와 같이 해당 발생고장을 일으킬 수 있는 시험방법이 축진노화시험임을 확인 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 열에 의한 축진노화시험으로 고무 방현재의 수명을 예측하고자 한다. 화학소재는 기계나 전자부품과 같이 작동이 멈추는 고장이 아닌 열화에 의한 고장이므로 고장판단을 초기 물성값의 저하로 추정할 수 밖에 없다.

ISO 11346 : 2004(Rubber, Vulcanized or thermoplastic — Estimation of life-time and maximum temperature of use) [1]에서는 초기 물성값의 50 %저하점을 고장시점으로 보고 있으나 본 연구에서는 KS M 6709(고무 방현재), ISO 13757 (Ships and marine technology-High-pressure floating pneumatic rubber fenders)에서 고무소재의 물리적 특성이 초기 물성값의 20 %저하점이므로 이를 고장으로 판정하고자 한다.

2.1.2 가속수명시험 방법

인장시험은 KS M 6782 : 2004(가황고무의 인장시험 방법)에 근거하였으며 경도시험은 KS M 6784 : 2004(가황고무 및 열가소성 고무의 경도시험 방법)에 근거하여 측정하였다.

2.1.3 가속 모델

제품 고장에 영향을 주는 주요 인자를 알아보기 위하여 2수준 품질기능전개(QFD)를 한 결과 <표 1>과 <표 2>에서 보는바와 같이 열에 의한 파손과 균열이 고장메카니즘으로 확인되었다. 따라서 스트레스 수준을 온도로 사용하는 가속 열 노화시험을 실시하고 화학소재분야에서 가장 많이 사용하고 있는 아레니우스 모델을 적용하였다.

2.2 시험개요

2.2.1 시험 시료

고무 방현재를 제조하는 국내 제조업체에서 직접 제품을 만드는데 사용하는 배합 고무 원료를 채취하여 본 센터에서 직접 가류성형 작업을 거쳐 시험항목에 맞는 고무판을 제작하였다.

2.2.2 시험 조건

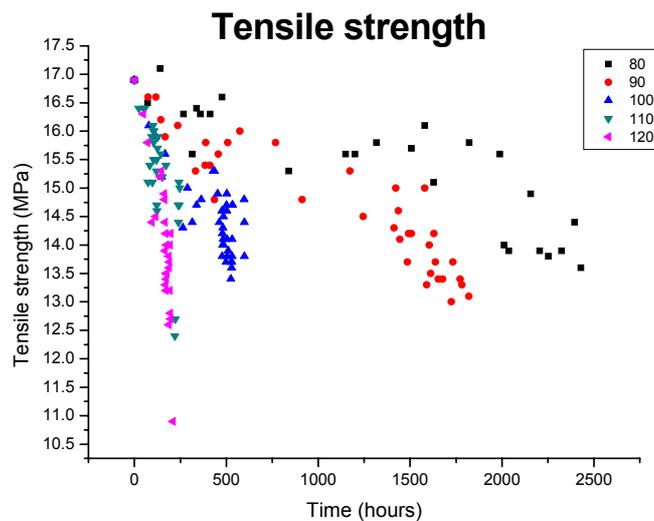
고무의 노화는 열, 태양광, 오존, 피로 및 미생물 등에 의해 그 특성이 저하되면서 열화 되는 것으로 널리 알려져 있으며 이 가운데 열에 의한 노화가 고무 특성에 가장 민감하고 또한, 재현성이 있게 작용하는 것으로 알려져 있다. 고무 방현재의 경우도 현장에서 사용되어지는 동안 배가 접안하여 충격을 주는 요인 보다는 열 열화가 진행된 상태에서 충격을 가하면 균열 및 파손이 급격하게 일어난다. 이는 고무 방현재가 설계단계에서 배의 접안 시 발생하는 충격 에너지를 충분히 흡수 할 수 있게끔 설계가 되어 지지만, 열 열화가 진행되어진 상태는 설계단계에서 반영을 못하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 조건으로 시험을 진행 하였다.

<표 3> 시험조건

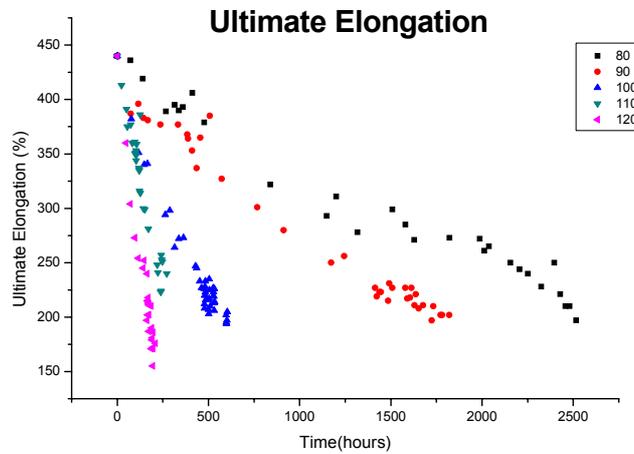
시험조건	
축진노화시험 방법	KS M 6788의 공기 가열 노화시험(기어식 노화 시험기)
가속온도	(80±1) °C, (90±1) °C, (100±1) °C, (110±1) °C, (120±1) °C
측정방식	임의관측중단 방식(Censoring data)
관측 수	5 개
관측중단시점	초기물성의 20 % 및 50 % 이하 지점
고무 물성측정 항목	인장강도, 신장률, 국제고무경도
인장 시험기	만능재료시험기 (INSTRON, USA)
Load range	5 kN
경도 시험기	국제고무경도시험기 (Hildebrand, Germany)
경도기 타입	Method N
물성 측정 온도	(23±1) °C
데이터 표시	n=5 측정 후 Censoring

2.3 열 노화조건에 따른 물성변화

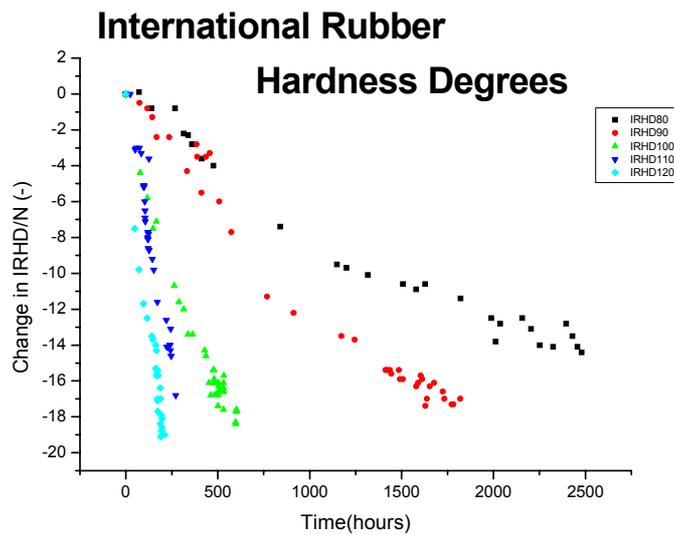
고무소재는 일반적인 기계류나 전자부품류와 같이 완전데이터에 의한 모수적 방법을 이용하여 데이터를 얻기가 어렵다. 따라서 가속 열 노화시험을 진행하면서 수명시험자료를 임의 관측중단에 의한 비모수적 방법을 이용하여 데이터를 수집 및 분석하였다. 물리특성의 변화를 측정한 결과는 다음과 같다.



<그림 3> 가속온도별 인장강도의 물성변화



<그림 4> 가속온도별 신장률의 물성변화



<그림 5> 가속온도별 국제고무경도(IRHD/N)의 물성변화

인장강도, 신장률, 국제고무경도(IRHD/N)를 임의관측중단 방식으로 데이터를 수집한 그래프를 위의 <그림 3>, <그림 4>, <그림 5>에서 볼 수 있다. 그래프에서 보는 바와 같이 인장강도는 일정한 경향을 보이지 않고 있지만, 신장률 및 국제고무경도의 경우는 일정한 경향을 볼 수 있다. 이는 고무가 열 노화시험으로 인해 경화가 되면서 강도가 높아지는 것이 일반적인 경향이나, 그 이전에 이미 파단(Breaking)이 일어나게 되고 일정 시간이 지나면 과경화가 되어 강도의 값이 높아지므로 노화시험이 진행 될수록 일정한 경향을 나타내기가 어려운 것으로 판단된다. 인장강도 데이터의 경우는 Origin이라는 프로그램을 이용하여 적절한 수명분포를 추정하기 위하여 Fitting시켜본 결과 각 온도별로 수명분포가 다른 것을 알 수 있다. 따라서 열 열화에 의한 수명평가는 신장률과 국제고무경도로만 아레니우스 플롯하면 된다.

2.4 열 열화와 수명의 관계

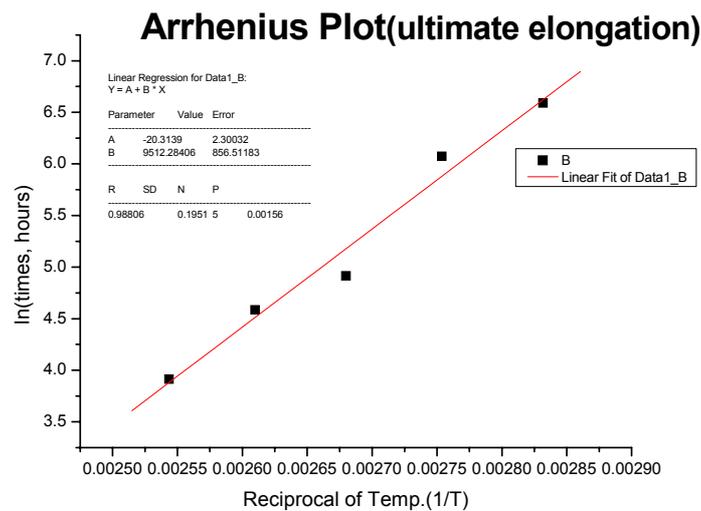
고분자 재료의 장기 내구 수명을 추정하는 수단으로 아레니우스 플롯트가 있다. 본 연구에서는 열에 의한 노화현상을 이용하여 수명을 예측하였다. 80 °C, 90 °C, 100 °C, 110 °C, 120 °C의 5가지 조건에서 시험한 신장률 및 국제고무경도의 데이터를 활용하여 활성화에너지(E)를 구하여 수명을 추정하였다. 수명결정 라인 지표는 RS M 0000의 고무층의 물리적 성능인 초기신장률 저하 값의 20 % 물성 저하점 및 초기 경도 값의 8도 변화 하는 지점으로 가정 하였다.

2.5 지배 고장 모드(Domination failure mode)

고무의 물성변화를 이용하여 고장 모드(failure mode)를 지배(Domination)하는 물성을 찾아보았다.

<표 4> 온도별 신장률이 20% 저하 점에 도달하는 시간

가속시험온도 °C	20 %저하점 시간 h	ln(time) h	1/T 절대온도, K
80	727.5	0.002832	6.58
90	433.8	0.002754	6.07
100	136.1	0.00268	4.91
110	97.9	0.00261	4.58
120	50.0	0.002544	3.91



<그림 6> 신장률에 의한 아레니우스 선도(Arrhenius Plot)

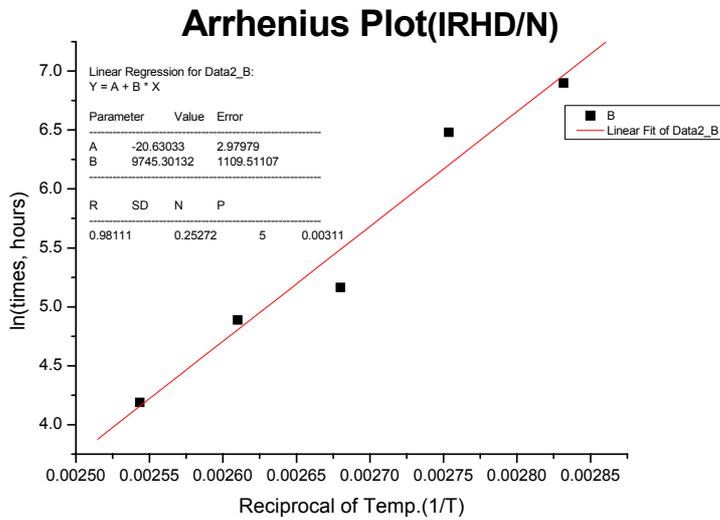
$$\ln(t) = \frac{9512.3}{T} - 20.314 \dots\dots\dots (1)$$

t : 가속열노화시간(hrs.)

T : 열노화온도(절대온도, K)

<표 5> 온도별 국제고무경도(IRHD/N)가 8도 변화하는 시간

가속시험온도 ℃	8도 증가 시간 h	ln(time) h	1/T 절대온도, K
80	990.9	0.002832	6.89
90	651.4	0.002754	6.47
100	174.7	0.00268	5.16
110	132.6	0.00261	4.88
120	65.9	0.002544	4.18



<그림 7> 국제고무경도에 의한 아레니우스 선도(Arrhenius Plot)

$$\ln(t) = \frac{9745.3}{T} - 20.63 \dots\dots\dots (2)$$

t : 가속열노화시간(hrs.)

T : 열노화온도(절대온도, K)

이 시간과 온도의 방정식인 아레니우스 결과 식을 이용하여 임의의 온도에서 사용할 수 있는 수명을 추정할 수 있다. <Table 6> 및 <Table 7>에서 보는 바와 같이 임의의 온도에서 수명을 추정하였을 때 신장률에 의한 추정시간이 국제고무경도에 의한 추정시간을 지배함을 볼 수 있다. 따라서 Domination failure mode는 신장률임을 알 수 있다.

<표 6> 신장률에 의한 온도별 추정 시간

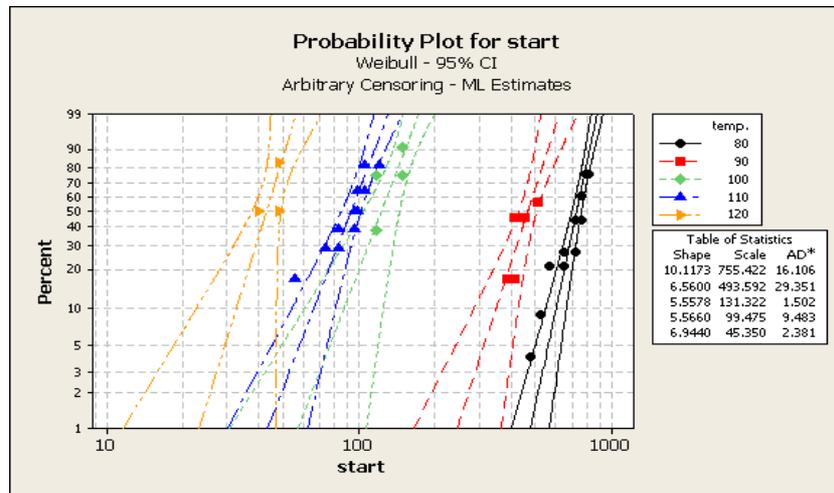
사용온도 ℃	ln (t)	time h
20	12.134	186 237
23	11.805	134 028
25	11.590	107 098

<표 7> 국제고무경도에 의한 온도별 추정 시간

사용온도	ln (t)	time h
20	12.613	300 555
23	12.276	214 620
25	12.055	172 046

2.6 분포의 적합성 검토

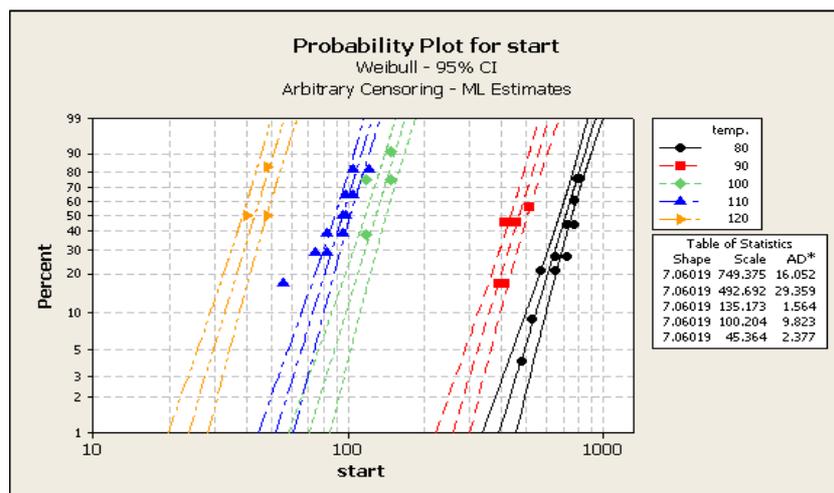
신장률의 물성변화가 초기 신장률 값의 20 %저하되는 시점을 고장으로 보고 고장시간에서의 임의로 관측된 데이터로 수명분포의 적합성을 검토하였다. MINITAB의 기법 중 분포를 추정 하는데 대표적인 방법 중에 하나인 최우추정법 (Maximum Likelihood Estimation : MLE)을 이용하였으며 분포의 적합성은 <그림 8> 에서 보는 바와 같이 와이블 분포가 수명 데이터에 가장 적합한 분포임을 알 수 있다.



<그림 8> 수명분포의 적합성 검토

2.7 수명분포의 모수 및 공통의 형상모수 추정

가속수명시험 데이터로 척도모수와 형상모수를 추정하여 본 결과 척도모수는 온도가 증가함에 따라 감소하여 가속성이 성립함을 보여주었고, <Fig. 9>에서 보는바와 같이 형상모수는 약간의 차이를 나타내었다. 이에 <표 8>에서 보는 바와 같이 형상모수의 동일성 검정을 하여 온도와 관계없이 일정함을 알 수 있다.

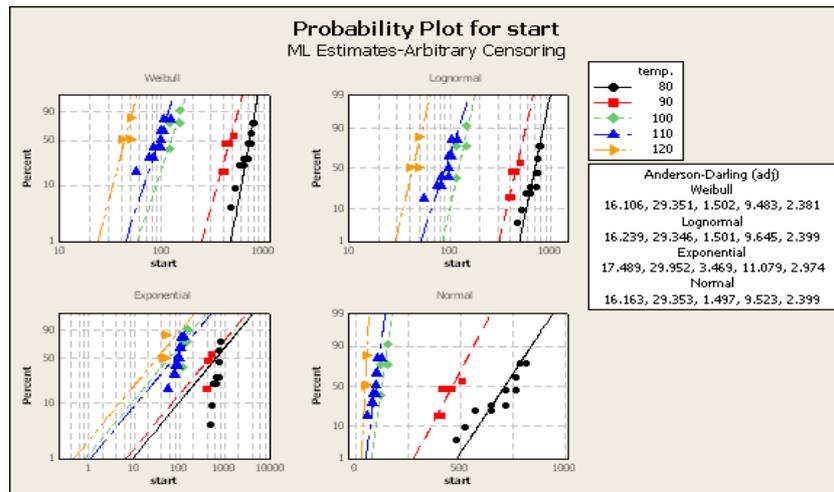


<그림 9> 수명분포의 모수 추정

<표 8> 형상모수의 동일성 검정

Chi-Square	DF	P-Value
5.8773	4	0.208

분포의 Parameter분석을 통하여 공통의 형상모수를 < 그림 10>에서 보여주고 있다



<그림 10> 수명분포의 공통의 형상모수 가정

2.8 가속시험 모델(아레니우스 관계)

가속인자와 와이블 분포의 척도모수와의 관계로서 아레니우스 관계식을 적용하여 두 변수 간 (수명시간과 노화온도)의 선형관계를 나타내면 <그림 11>과 같다.

아레니우스 산출식은 다음과 같다.

$$K = Ae^{-E/RT} \dots\dots\dots (3)$$

여기에서 K : 반응속도상수

A : 빈도인자

R : 기체상수(1 987 kcal/mol)

T : 절대온도

E : 활성화 에너지 (kcal/mol)

식(3)의 자연대수를 취하면

$$\ln K = -E/RT + \ln A \dots\dots\dots (4)$$

식(4)으로 부터 1/T와 lnK의 관계를 그래프에 플롯 하면 그 기울기가 -E/R이 된다.
즉,

$$\alpha = -E/R \quad E = -\alpha R \dots\dots\dots (5)$$

여기에서 α : 기울기

따라서 여러 온도에서의 속도정수K를 알면 활성화 에너지(E)를 구할 수 있다.

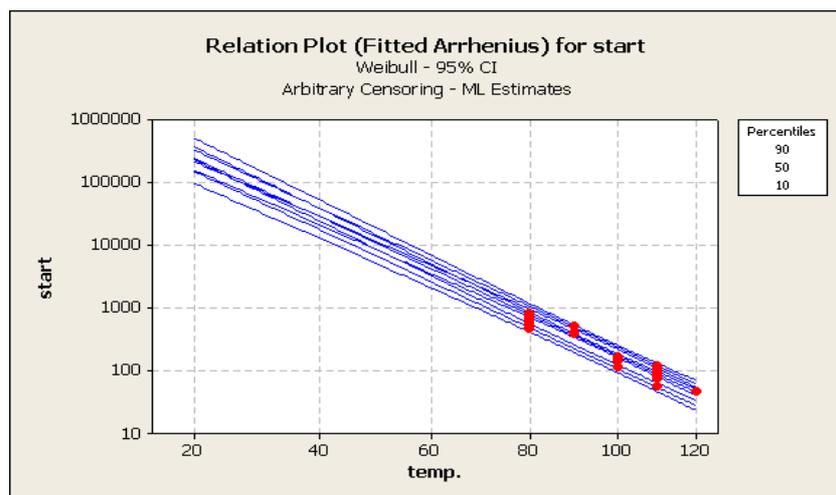
여기서는 신장률(Eb)값이 상태 값의 20 %저하되는 시간($t_{\Delta 20}$)과 K 와의 사이에는 다음 관계식이 성립한다고 본다.

$$1/t_{\Delta 20} \propto K \dots\dots\dots (6)$$

식(6)을 식(4)에 대입하면,

$$\ln(1/t_{\Delta 20}) = -E/RT + \ln A \dots\dots\dots (7)$$

이 결과로부터 그림에서 보는 바와 같이 두 변수(수명시간과 노화온도)간의 관계가 직선을 만족함을 알 수 있었으며, 그 결과 아레니우스 모델이 적합한 것으로 판단 할 수 있다.



<그림 11> 아레니우스 모델 및 백분위수 도식

<표 9> 여러 온도에서의 고무 방현재의 추정 열화 시간

온도 ℃	추정 열화 시간 (신뢰수준 95 %, B10 수명) h
20	95 165
25	55 876
30	33 378
40	12 496
70	907
80	412
90	193
100	93
110	46
120	23

위의 표에서 제시한 추정열화시간은 평균치가 아닌 하한 값을 제시하였다. 이는 실제 수명은 이보다 더 높을 수 있지만 이론적으로 소비자의 위험을 10 % 이내로 줄이는 의미로 평균치가 아닌 하한 값을 수명으로 정의하였다.

2.8 가속계수 산출

분석결과로부터 특성수명(B10수명)은 $n_{80}=412$ 시간, $n_{90}=193$ 시간, $n_{100}=93$ 시간, $n_{110}=46$ 시간, $n_{120}=23$ 시간임을 알 수 있었으며 사용조건(20 ℃로 가정)하에서의 수명은 약 11년이다. 이를 토대로 각 온도별 가속계수를 <표 10>과 같다.

<표 10> 각 온도별 가속계수

온도 ℃	가속계수
80	231.1
90	493.2
100	1 025.3
110	2 076.7
120	4 092.6

3. 결 론

고무 방현재는 현장에서 사용하는 동안 배가 접안하여 충격을 주는 요인 보다는 열 열화가 진행된 상태에서 충격을 가하면 균열 및 파손이 급격하게 일어난다. 이는 고무 방현재가 설계단계에서 배의 접안 시 발생하는 충격 에너지를 충분히 흡수 할 수 있게끔 설계가 되어 지지만, 열 열화가 진행되어진 상태는 설계에서 반영을 못하기 때문이다. 따라서 고무 방현재에 사용되는 고무는 열 열화요인이 가장 크므로 고무 방현재용 고무재료에 대하여 80 °C, 90 °C, 100 °C, 110 °C, 120 °C에서 장시간 방치하여 고무재료의 물성변화를 시험하였으며, 여기에서 얻은 인장 및 국제고무경도 물성 측정치로 수명을 지배하는 물성이 신장률임을 알 수 있었으며 따라서 신장률 시험결과로부터 수명분포와 관련 모수를 추정하고 아레니우스 모델의 관계식을 구하여 이로부터 사용조건(20 °C가정)에서의 B10수명과 신뢰구간을 추정한 결과 약, 11년 (B10수명 : 95 %신뢰구간)의 수명을 예측할 수가 있다.

참고문헌

- [1] ISO 11346, Rubber, Vulcanized or Thermoplastic - Estimation of Life-Time and Maximum Temperature of Use from an Arrhenius Plot First Edition
- [2] Jay L. Devore, Probability and Statistic for Engineering and the Sciences, Fourth Edition, Duxbury Press
- [3] NFPA/T2.6.1 R2-2000, Fluid power components-Method for verifying the fatigue and establishing the burst pressure ratings of the pressure containing envelope of a metal fluid power component
- [4] O'Connor, Patrick D.T.(1995) Practical Reliability Engineering, Fourth Edition, John Wiley & Sons Inc.
- [5] Stamatis, D.T. (1995) Failure Mode and Effect Analysis L FMEA from theory to execution, ASQC Quality Press.
- [6] KS A 5607 (2006) 성능 열화 특성에 의한 신뢰성 보증
- [7] 서순근 (2006) Minitab 신뢰성 분석 : 개정판, 이레테크
- [8] 김철승 외 3인 (2005) 대형 컨테이너선의 천수역 영향을 고려한 접안에너지 산출에 관한 연구, 한국항해항만학회지 제29권 제8호, pp. 673~678