공학석사 학위논문

강교 용접이음부의 피로균열진전 수명에 미치는 대형차의 영향

2002년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

하 창 민

공학석사 학위논문

강교 용접이음부의 피로균열진전 수명에 미치는 대형차의 영향

지도교수 이 동 욱

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2002년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

하 창 민

하창민의 공학석사 학위논문을 인준함

2001년 12월 26일

주 심 공학박사 이 환 우 ㉠

위 원 공학박사 정 두 회 ㉠

위 원 공학박사 이 동 욱 ㉠

목 차

그림 목차

표 목차

Effects of Heavy Vehicles on the Fatigue Crack Propagation Life of Welded Joint in a Steel Bridge

Chang-Min HA

Department of Civil Engineering, Graduate School,
Pukyong National University

ABSTRACT

Recently, it has been reported that fatigue damages of steel bridge are occurred due to heavy vehicles and large traffic volumes. These may be attributed to the defects at the welded joints. In general, the fatigue crack in welded joints initiates from welded defects. In order to prevent fatigue damage, the estimation of fatigue life for the welded joints should be performed.

The objective of this study is to investigate the effect of proportion of heavy vehicles on the fatigue crack propagation life according to vehicle speed. The basic theory for fatigue crack propagation based on the fracture mechanics is described and the estimation of fatigue crack propagation life is performed on welded defects occurred at the fillet welded joints of diaphragm in a four span continuous steel box girder bridge. The stress variation analysis has been performed based on the Monte-Carlo simulation by using the simulation load. The proportion of heavy vehicles were applied for 20% 50% and the vehicle speed was applied for 40, 60, 80, 100, 120km/hr. Equivalence stress range were determined to calculate a stress intensity factor range ΔK, then the fatigue crack propagation analysis has been carried out by applying the strength level to fillet welded joint of bottom flange and diaphragm. The edge cracks, through thickness crack and semi-elliptical surface crack were used for fatigue crack types.

Based on the result, the fatigue crack propagation life depends on the proportion of heavy vehicles and the vehicle speed. It is shown that fatigue crack propagation life decreased as the proportion of heavy vehicles increase and the vehicle speed is reduced. In case of a semi-elliptical surface crack occurred on the base metal, the life of thickness penetration exceeds 96% of the entire life of fatigue crack propagation of the member.

Keywords : fatigue damage, Monte-Carlo simulation, equivalence stress range, stress variation analysis, fatigue crack propagation life

1. 서 론

최근 강교량은 차량의 통행교통량 증대로 인하여 극한하중에 의한 부재의 파괴보다는 허용응력 이하의 반복하중에 의한 피로손상이 많이 발생하고 있다[1), 2)]. 국내의 강교량에 있어서 대표적인 사고였던 성수대교 붕괴사고는 수직부재의 맞대기 용접이음부에 완전용입이 실시되지 않아 통행차량하중에 대한 수직부재의 용접단면부족으로 초기결함이 발생하였다. 이 수직부재의 용입부족으로 인한 초기결함으로 피로균열이 발생하여 교량의 붕괴로 이어졌다[3)].

도로교에서 피로손상을 일으키는 하중은 활하중으로 교량을 통과하는 대형차나 과적차량에 의한 교량부재의 피로손상이 큰 것으로 보고되고 있다[4)]. 그러므로 강교량의 용접이음부에 피로균열의 발생 및 진전에 미치는 교통하중에 대한 영향을 미리 파악한다면 강교의 수명평가, 유지 및 보수 계획을 수립하는데 상당한 도움이 될 것이다.

강교량 부재에서는 통행차량하중의 작용으로 구조적 특성에 의해 국부응력, 면외응력 및 2차응력 등이 발생하고, 이런 구조적 거동의 반복으로 강교량의 피로손상은 용접이음부에서 주로 발생한다. 더욱이, 강교량 부재의 용접이음부에 결함이 존재하면 결함부에는 응력이 집중되고 하중의 반복작용에 의해 이 응력집중부에는 피로균열이 발생하고 진전하여 부재는 파단하게 된다.

이러한 관점에서 외국에서는 구조용강재의 피로특성에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 미국에서는 NCHRP에 의한 피로시험이 수행되었고, 그 결과에 따라서 AASHTO 및 AISC에 피로설계기준을 마련하였다. 또한, 일본의 JSSC, 유럽의 ECCS에서도 강교량 부재의 이음구조상세에 대한 독자적인 피로설계기준을 설정하여 이를 강구조물의 설계에 최대한 반

영하고 있다.

한편, 국내에서는 아직까지 강교량 부재의 피로손상에 대한 연구가 미흡하여 외국의 설계규정을 거의 그대로 인용하여 사용하고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 대형차혼입률이 강교량 용접이음부의 피로균열진전수명에 미치는 영향을 파악하기 위해 시뮬레이션(Simulation) 하중을 사용하여 연구를 수행하였다. 우선, 우리나라를 비롯한 외국의 피로설계기준에 대한 소개와 시뮬레이션 하중에 의한 응력변동해석방법을 정리하였다. 또한, 용접이음부에 발생하는 각종 용접결함을 부재의 초기균열로 가정하고, 응력변동해석에서 얻어진 등가응력범위를 사용하여 피로균열진전수명을 해석하였다. 한편, 현행 도로교설계기준에서는 피로설계에 대한 상세가 부족하므로 외국시방규정을 이용하여 4경간 연속 강상형교의 다이어플램(Diaphragm) 용접이음부를 대상으로 대형차혼입률에 따른 응력변동해석과 피로균열진전수명평가를 실시하였다. 응력변동해석은 실제통행교통량조사에서 얻어진 교통량을 근거로 하여 시뮬레이션 하중으로 응력값들을 구하고, 레인플로우법(Rain-flow Method)을 적용하여 응력범위 빈도분포와 등가응력범위를 구하였다. 대형차혼입률에 따른 피로균열진전수명은 용접이음부에 발생가능한 측면관통균열, 내부관통균열, 표면관통균열 및 반타원형 표면균열에 대해서 각각 평가하였다.

2. 피로설계기준

강교량의 피로파괴를 방지하기 위해 각국에서는 설계기준에 피로설계조항을 두고 있다. 현재 피로설계조항을 제시하고 있는 기준으로는 도로교설계기준과 미국의 AASHTO LRFD시방서 이외에도 일본강구조협회의 피로설계지침, 유럽의 EUROCODE No. 3, 영국의 BS 5400의 Part 10, 그리고 독일의 DIN 18 809 등이 있다.

2.1 도로교설계기준의 피로설계기준

도로교설계기준의 허용응력설계법 피로설계기준은 미국 AASHTO 시방서의 피로설계기준을 그대로 채택한 것으로, 응력-수명 기법을 이용한 선형피로손상도에 근거하여 부재등급별로 사용기간중에 예상되는 응력범위의 반복회수에 따른 허용피로응력범위를 제시하고 있다. 여기서 응력범위 $\Delta\sigma$는 다음과 같다.

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \qquad \cdots\cdots (2.1)$$

σ_{max} : 최대응력

σ_{min} : 최소응력

허용응력범위는 반복회수 10만회, 50만회, 2백만회, 그리고 2백만회 이상에 대하여 각각 설정되어 있다. 부재의 사용중에 반복회수가 2백만회 이상인 경우에는 반복회수에 관계없이 동일한 허용피로응력범위를 제시하고 있으며, 이는 이 한계응력범위 이하의 응력범위에 대하여는 피로수명이 무한하다고 보는 것이다[5)]. 그러나 이러한 설계기준은 실제의 다양한 통행특성이나 교량의 구조형식을 합리적으로 반영하지 못하고 있기 때문에,

미국 AASHTO LRFD에서는 이를 보완한 방법을 제시하였고 우리나라 시방서의 하중-저항계수 설계편에서도 이를 반영하였다.

2.2 각국의 피로설계기준

일본강구조협회의 피로설계지침에서는 변동응력에 대해 일정진폭응력과 동일한 피로수명도를 적용하지만, 피로한계응력범위를 일정진폭응력보다 매우 낮게 제한하고 있다[6]. 이는 변동진폭응력의 경우, 일정진폭응력보다 높은 피로손상을 일으킨다는 점을 반영한 것이다.

미국 AASHTO에서는 1994년 LRFD 설계기준을 제정하면서 새로운 피로설계기준을 제시하였다. 과거의 AASHTO 피로설계기준에서 일일평균 트럭교통량(대/일)을 개략적 분석으로 실제 트럭교통량의 변화에 따른 피로손상의 정도를 정확하게 반영하지 못하였으나, 도로교의 사용기간을 75년으로 가정함으로써 이 동안의 예상트럭 교통량을 반영하는데 보다 합리적인 설계법을 채택하고 있다[7].

유럽의 EUROCODE에서는 피로설계를 위한 하중모델을 5종류로 제시하여 그 중 하나를 선택해 사용할 수 있도록 하였고, 강교량 부재의 구조상세에 대한 피로등급은 실물 대 모형 실험결과를 바탕으로 피로강도 곡선의 등급으로 정하였다[8].

영국의 BS 5400의 Part 10에서는 4축 단일차량으로 표준피로하중에 대해 스펙트럼을 규정하여, 이에 의한 누적피로손상을 피로설계에 이용하도록 하였으며, 설계자가 피로파손의 위험성을 고려하여 피로설계 수명을 변경할 수 있도록 규정하고 있다[9].

2.3 설계기준차량의 치수

도로상을 주행하는 차량에는 매우 다양한 형태가 있다. 이 중 중·대형차에 대해서는 수송효율을 향상시키기 위하여 법정제한 길이에 가까운 차량이 많이 생산되고 있고, 특히, 국내에는 전체길이가 13m에 가까운 대형차도 통행하고 있으며, 장래에는 대형차량의 점유율이 계속 증가할 것으

로 예상되고 있다.

현재, 국내 설계기준에서는 대형차의 길이를 법정제한길이인 13m로 정하고 있으며, 대형차에는 버스, 트럭 등이 포함되어 있다. 소형차의 길이는 자동차관리법에 의한 최대치 4.7m를 사용하고 있다. 연결차에는 세미트레일러, 풀트레일러 및 중트레일러 등이 있으며 세미트레일러에서는 15m, 풀트레일러에서는 18m로 규정하고 있으나, 일반적으로 회전시에 세미트레일러가 점유폭이 크므로 세미트레일러로 설계한다. 세미트레일러 길이는 12m형상의 컨테이너를 운송하기 위한 연결차의 길이로서 필요한 길이는 16.7m를 사용하고 있다[10].

한편, 강교량의 피로설계를 실시하기 위해서는 설계차량의 축간거리 및 축하중의 영향이 크므로 국내에서는 설계차량에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 일본의 경우에도 다양한 연구를 통하여 축간거리 및 축하중을 고려하여 교통특성과 실정에 맞는 설계차량을 개발하고 있다. 또한, 미국의 AASHTO에서 제시하는 설계기준차량의 제원은 표 2.1과 같다.

표 2.1 미국 AASHTO의 설계기준 차량

차량 \ 제원(단위:미터)		높이	폭	길이	앞내민 길이	뒷내민 길이	축거 1	축거 2	축거 3	축거 4
Passenger Car		1.3	2.1	5.8	0.9	1.5	3.4			
Single Unit Truck		4.1	2.6	9.1	1.2	1.8	6.1			
Single Unit Bus		4.1	2.6	12.1	2.1	2.4	7.6			
Articulated Bus		3.2	2.6	18.3	2.6	2.9	5.5			
Combination Truck	Intermediate semitrailer	4.1	2.6	15.2	1.2	1.8	4.0	8.2		
	Large semitrailer	4.1	2.6	16.7	0.9	0.6	6.1	9.1		
	Double Bottom Semitrailer-full trainler	4.1	2.6	19.9	0.6	0.9	3.0	6.1	6.4	
	Interstate Semitrailer	4.1	2.6	22.5	1.2	0.9	6.1	14.3		
	Triple Semitrailer	4.1	2.6	31.0	0.8	1.0	4.1	6.3	6.6	6.6
	Turnpike Double Semitrailer	4.1	2.6	35.9	0.6	0.6	6.7	12.2	13.4	
Recreation Vehicle	Motor Home		2.4	9.1	1.2	1.8	6.1			
	Car and Camper Trailer		2.4	14.9	0.9	3.0	3.4	6.1		
	Car and Boat Trailer		2.4	12.8	0.9	2.4	3.4	4.6		
	Motor Home and Boat Trailer		2.4	16.1	1.2	2.4	6.1	4.6		

3. 응력변동해석

3.1 시뮬레이션 하중

피로안전성 평가프로그램(FASS)을 활용한 연구에서 응력변동해석은 시뮬레이션하중에 의해 실시하였다. 시뮬레이션 하중은 실제의 교통흐름을 모형화한 활하중으로서, 교통흐름을 교통량과 그 차종구성으로 표현한다[11]. 시뮬레이션 차량의 하중의 배열, 중량 및 차량간격을 확률변량으로 하여 몬테카를로(Monte-Carlo) 시뮬레이션에 의해 실제하중의 크기 및 순서로 설정하여 하중열이 도로교상을 통과할 때 발생되는 응력변동을 해석한다.

1) 차량간격

교통량이 많고 다른 차량의 구속을 받는 경우, 평균차두간격 $E(t)$가 작아지며, 이에 따라 차두시간의 편차도 작아진다. 이러한 교통흐름에 있어 차두시간은 Erlang분포에 따른다. 자유도 n의 Erlang분포의 밀도함수는 다음과 같이 표현된다[11].

$$f(t) = \frac{\lambda \mathrm{Exp}(-\lambda t)(\lambda t)^{n-1}}{(n-1)!} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.1)$$

여기서, $\lambda = n/E(t)$

$E(t) = 3600/Q$ (초)

Q : 단위시간당 교통량(대/시간)

식 (3.1)의 최대값은 $t = \lambda/(n+1)$일 때이며, 식 (3.2)와 같다.

$$f(t)_{max} = \frac{\lambda \mathrm{Exp}(-n+1)(n+1)^{n+1}}{(n-1)!} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.2)$$

이 Erlang분포에 근거한 차두시간간격 T는 다음과 같이 난수(Random number)에 의해 발생된다. 우선, 차두시간간격을 식 (3.3)과 같이 나타내고, T_1에 대응하는 f_2를 산출한다.

$$T_1 = E(t) \cdot 10 \cdot (X_1, X_2, X_3, \cdots\cdots, X_n) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.3)$$

여기서, X_1 X_n : [0, 1]의 범위에서 균일한 분포를 갖는 난수

$$f_2 = f(T_1) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.4)$$

여기에 밀도함수의 최대값을 이용하여 식 (3.5)와 같이 f_3을 계산한다.

$$f_3 = f(t)_{max}(Y_1, Y_2, Y_3, \cdots\cdots, Y_n) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.5)$$

여기서, Y_1 Y_n : [0, 1]의 범위에서 균일한 분포를 갖는 난수

$f_2 \le f_3$인 경우, 차두시간간격으로 T_1이 사용된다. 여기서는 자유도 n을 3으로 취하였다.

차간거리(K)는 주행속도(V), 차두시간간격(T), 차량길이(L)의 함수이며, 식 (3.6)과 같이 표현된다.

$$K = VT - L \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.6)$$

2) 차종구성

본 연구에 사용된 차종구성은 6가지이며, 차종의 결정방법은 다음과 같다.

① [0, 1]을 차종 $M_i(i=1,n)$의 구성비 N_i에 의해 분할한다.

② 균일한 분포를 갖는 난수를 발생시킨다.

③ X가 $[N_{i-1}, N_i]$의 구간에 존재하면 차량종류를 M_i로 한다.

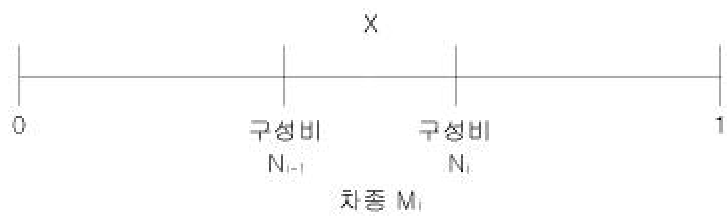


그림 3.1 차종의 결정방법

시뮬레이션 하중의 설정은 일반적으로 도로를 주행하는 차량들의 실제중량에 근거하여 설정하며, 그림 3.2은 도로를 주행하는 차량들의 하중밀도 분포를 나타낸다.

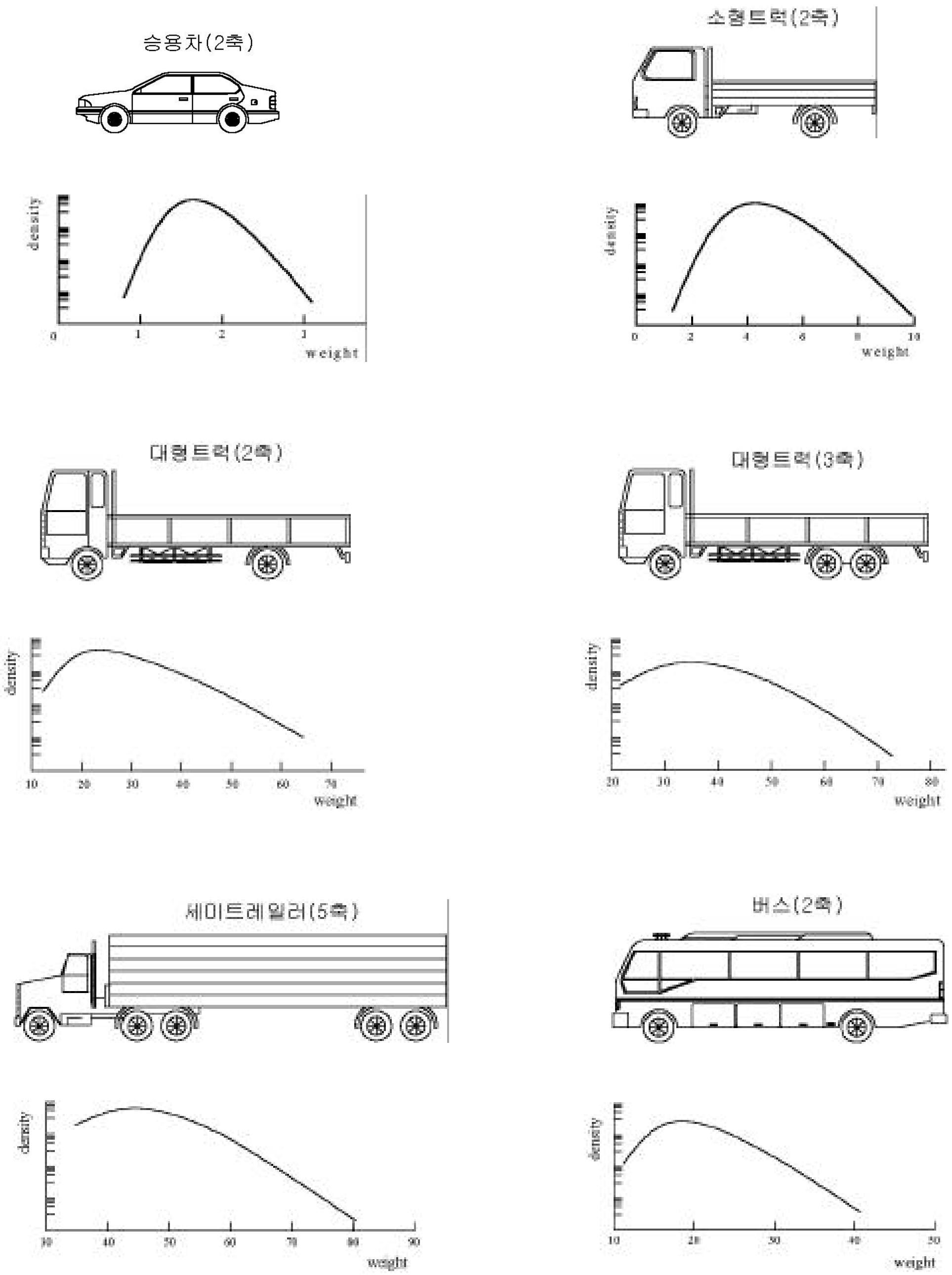


그림 3.2 **차량하중밀도분포**

3.2 응력범위의 해석

시뮬레이션 하중이 이동하면 해석대상부재에서는 그림 3.3과 같이 다양한 크기의 응력변동이 발생한다. 이와 같은 응력변동진폭에 대하여 레인플로우법을 적용하여 응력빈도분포를 구한다.

그림 3.3 (*a*)에서 알 수 있는바와 같이 변동파형에 대응하는 응력과 시간과의 관계에서 한파장의 극대, 극소차의 절대값은 r_1, r_2, r_3, ⋯, r_{i-1}, r_i, r_{i+1}, ⋯로 나타나며, 절대값에서 $r_{i-1} \geq r_i < r_{i+1}$의 조건을 만족하는 r_i를 추출하여 삭제하고 이를 제외한 시간에 따른 응력변동곡선을 작성하면 그림 3.3 (c)와 같이 점증·점감하는 응력변동파형이 얻어진다. 이때 최대극대값과 최소극소값의 차, 2번째 극대값과 극소값의 차, ⋯를 응력범위로 계산한다[12].

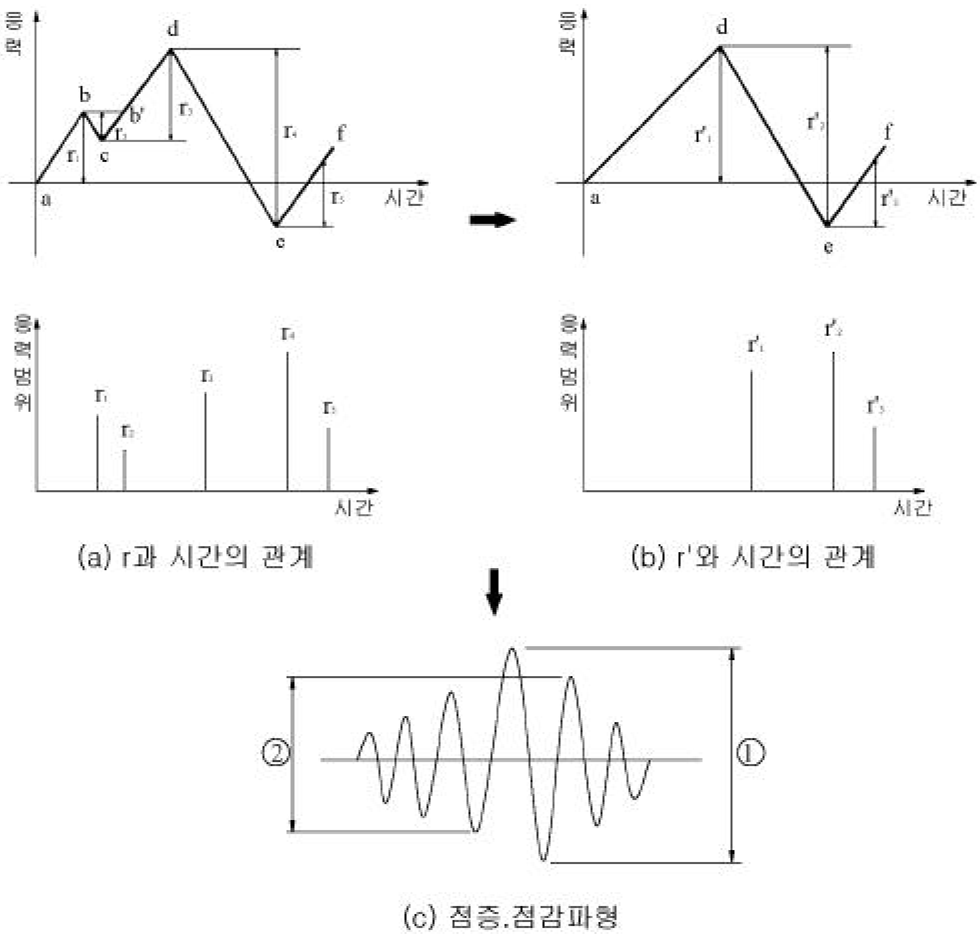


그림 3.3 응력과 시간과의 관계

3.3 피로손상의 누적

Miner가 제창한 선형피로손상법칙에 따르면 피로손상은 선형으로 누적된다는 가정하에서 어떤 하중반복회수 n_i에 의해 야기된 손상은 같은 응력범위에서 부재를 파괴시키는데 필요한 전체 하중반복회수 N_i에 대한 n_i의 비로 표현할 수 있다[13].

즉, 그림 3.4에서와 같이 응력수준 σ_1, σ_2, σ_3의 피로수명을 N_1, N_2, N_3라 하고, σ_1인 응력수준이 n_1, σ_2인 응력수준이 n_2 및 σ_3인 응력수준이 n_3회 반복되어 피로파괴가 일어났다면 이 경우의 조건은 식 (3.7)과 같다.

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} = 1.0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.7)$$

식 (3.7)을 일반화하면

$$\sum_1^n \left(\frac{n_i}{N_i} \right) = 1 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.8)$$

식 (3.8)는 반복회수비 n_i / N_i의 누적이 1로 될 때 파괴되는 것으로, 강재의 피로수명은 반복작용수에 대해 선형적으로 상실된다는 것이다.

한편, 피로손상도가 큰 응력수준에서 발생한 균열의 경우, 피로한계이하의 응력수준에서도 피로손상의 진행에 기여하게 된다. 이와 같이 피로한계이하에서의 응력수준을 고려하는 방법으로 수정 Miner 법칙과 Haibach 법칙 등도 있다[14].

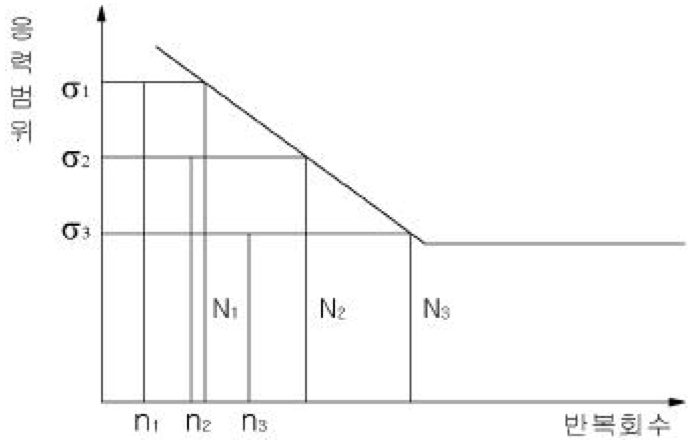


그림 3.4 Miner**의 선형피로손상 법칙**

3.4 등가응력범위

등가응력범위 $\varDelta\sigma_e$는 그림 3.5에서 보는 바와 같이 같은 반복수에 대해서 변동하중에 의한 누적피로손상과 같은 양의 누적피로손상을 일으키는 일정진폭하중에서의 응력범위로 정의되며, Barsom과 Yamada에 의해 이론적으로 정립되었다[15]. 이러한 등가응력범위의 개념은 변동하중을 받는 구조물의 피로파괴에 대한 확률을 계산하는데 유용하게 이용될 수 있다. 피로시험 데이터에 의한 S-N곡선을 직선으로 가정하고, Miner의 피로손상법칙을 이용하면 그림 3.5와 같은 응력범위분포를 등가응력범위로 환산할 수 있다.

실동하중을 받고 있는 강교량 부재의 피로특성인 응력범위 $\varDelta\sigma_i$와 피로수명 N_i의 관계는 다음과 같이 나타난다.

$$\log N_i = \log C - m \log \varDelta\sigma_i \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.9)$$

$$N_i (\varDelta_i)^m = C \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.10)$$

식 (3.10)을 이용하면 응력범위분포에 대한 손상비 D_f는

$$D_f = \sum \frac{n_i}{N_i} = \sum \frac{n_i \cdot \varDelta\sigma_i^m}{C} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.11)$$

이다. 식 (3.11)에 그림 3.5와 같은 등가응력범위 $\varDelta\sigma_e$를 적용하면

$$D_f = \sum_{i=1}^{n} \frac{n_i \cdot \varDelta\sigma_e^m}{C} = \frac{\varDelta\sigma_e^m}{C} \sum_{i=1}^{n} n_i = \frac{\varDelta\sigma_e^m}{C} N \quad \cdots\cdot \quad (3.12)$$

로 되며, 식 (3.11)과 식 (3.12)는 같은 손상정도를 나타내므로 이로부터 등가응력범위 $\Delta\sigma_e$를 구하면

$$\sum \frac{n_i \cdot \Delta\sigma_i^m}{C} = \frac{\Delta\sigma_e^m}{C} N \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (3.13)$$

$$\Delta\sigma_e = \left(\frac{\sum n_i \cdot \Delta\sigma_i^m}{N} \right)^{1/m} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (3.14)$$

이다. 여기서, m = 2일 때 Barsom에 의해 제안된 RMS(Root Mean Square)값이고, m = 3일 때 Yamada에 의해 제안된 RMC(Root Mean Cube)값이다. 계산된 등가응력범위 $\Delta\sigma_e$는 하한계응력확대계수 이상의 피로균열성장에서 등가응력확대계수범위 ΔK_e를 산정하는데 관계되며, 이로부터 응력변동진폭하에서의 피로균열성장속도를 정확하게 예측할 수 있는 사실이 많은 연구결과에서 입증되고 있다[14].

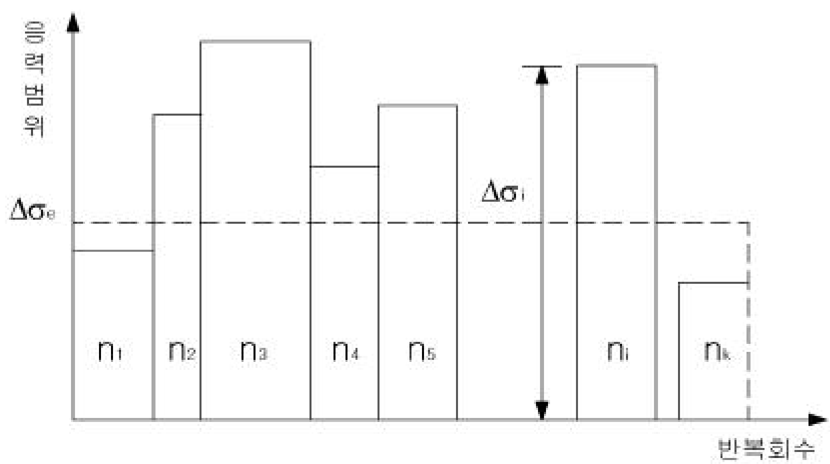


그림 3.5 등가응력범위의 분포

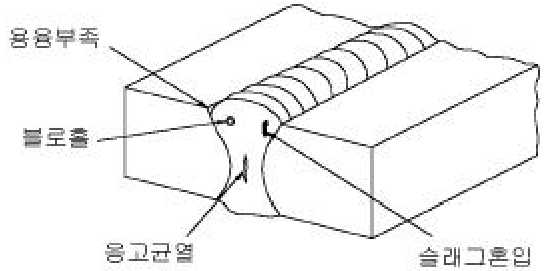
4. 피로균열진전해석

4.1 용접이음부의 피로균열의 발생 및 성장

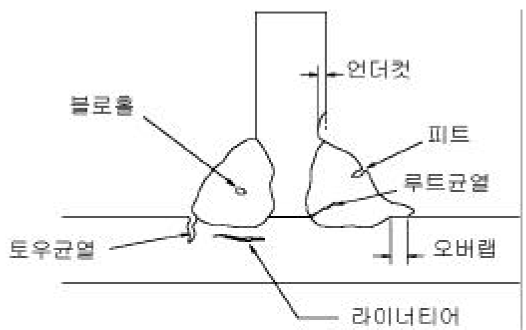
1) 용접이음부의 피로균열발생

강구조물에서 용접이음부의 성능을 지배하는 역학적인 요인은 복잡하게 중첩되고, 때로는 구조물에 있어서 파괴를 초래하기도 한다. 최근에는 제강기술 및 용접시공기술의 발전으로 강재의 파괴인성은 향상되고 있어서 예기치 않은 취성파괴의 위험성은 감소되고 있다. 그러나 강구조 부재의 용접이음부에 블로홀, 용입불량, 슬래그 혼입, 용접균열 등과 같은 결함을 완전히 없애는 것은 불가능한 일이다.

강구조물에서 용접이음부의 파괴강도는 몇몇의 원인으로 인해 반드시 모재와 동등한 성능을 나타내는 것은 아니다. 이것은 주로 용접이음부가 받는 열이력에 기인하며, 역학적 요인과 재질적 요인으로 대별된다. 용접이음의 성능을 지배하는 역학적 요인으로서는 용접결함, 이음의 형상적 불연속, 용접잔류응력 및 용접변형 등이 있다. 용접균열, 융합불량, 슬래그혼입, 블로홀(Blowhole)등의 용접결함, 특히 용접균열에 의한 평면상 결함은 종종 용접이음의 파괴기점이 되기도 한다. 한편, 재질적 요인으로서는 용접열영향에 의한 조직변화, 열·변형이력의 영향 및 변형을 일으키는 열가공의 포화 등이 있다[16]. 일반적으로 용접이음부에 자주 발생하는 결함은 언더컷(Undercut), 슬래그혼입, 블로홀 등과 같은 타원형 균열, 그리고 응고균열, 라미너티어(Laminar tear) 등과 같은 관통균열로 대별된다[11].



a) 맞대기용접이음부의 균열



b) 필렛용접이음부의 균열

그림 4.1 용접이음부에 발생하는 용접결함 및 균열

2) 피로균열의 성장

반복적으로 작용하는 일정하중하에서의 피로균열성장은 하중반복회수당 피로균열성장속도 da/dN와 응력확대계수범위 ΔK의 관계로 나타내며, 재료 및 하중조건에 따라 다른 피로균열성장곡선을 나타낸다. 보통, 재료의 피로균열성장거동은 그림 4.2에 나타낸바와 같이 크게 3영역으로 구분되어 나타난다[17), 18)]. 영역 I 은 피로균열성장의 이전단계로서 반복하중에 대한 피로균열성장속도는 매우 느리다. 이 영역에서는 구조물에 있어서 대부분의 수명을 차지한다.

영역Ⅱ는 ΔK_{th}이상의 응력확대계수범위를 받는 경우에 발생하는 피로균열거동을 나타내는 것으로 식 (4.1)에 따른 성장거동을 나타낸다. 이 식을 Paris-Erdogan식이라고 한다.

$$da/dN = C(\Delta K)^m \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (4.1)$$

식 (4.1)에서 m은 금속재료의 경우 보통 2 4의 값을 갖는다. 이 영역에서는 피로균열성장속도의 예측 및 계산이 용이하며, 피로균열성장에 대한 연구의 상당량이 이 구간에서 행해지고 있다.

한편, 영역Ⅲ은 최종적인 파괴에 도달할 때까지 급격히 피로균열성장속도가 증가하는 구간으로, 불안정 균열성장이 일어난다. 실제 구조물에서는 피로균열성장단계가 이 영역에 도달하게 되면 구조물의 파괴는 순식간에 일어나므로 이 단계전에 보수나 보강을 실시해야 한다.

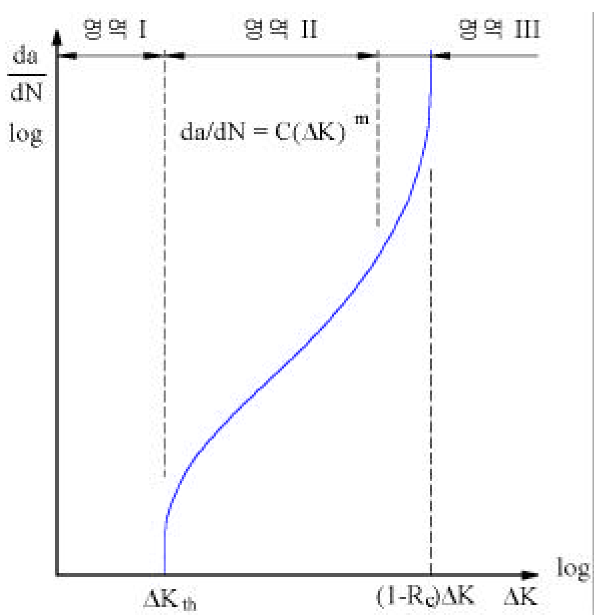


그림 4.2 피로균열의 성장곡선

4.2 초기균열길이와 한계균열길이

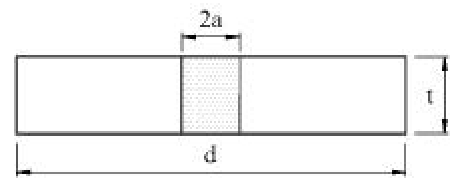
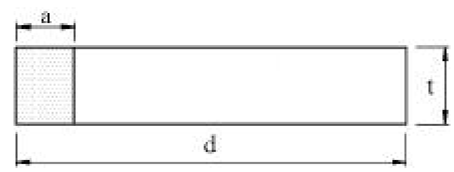
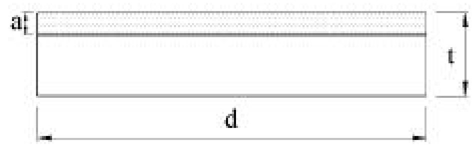
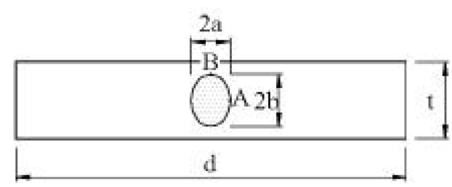
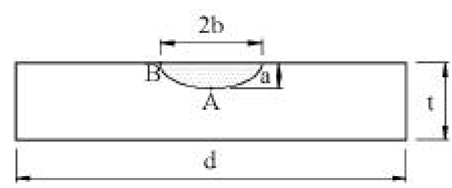
피로균열의 성장은 균열길이의 증가와 지수적인 관련이 있기 때문에 대부분의 피로수명은 균열이 작을 때 늘어난다. 따라서 초기결함의 특성, 특히 크기와 모양의 정확한 예측은 용접부재의 피로수명을 정확하게 평가하기 위해 필수적이다.

초기균열길이 a_i는 육안이나 비파괴검사에서 검출된 형상을 기초로 하여 원, 반원, 타원, 반타원 등의 계산 가능한 균열모델로 치환하여 결정한다. 표면결함에 대해서는 이 결함을 직사각형 주위에 내접하는 반타원형 표면균열로 보며, 내부결함에 대해서는 결함을 둘러싼 직사각형에 내접하는 타원형 균열로 본다[6].

한계균열길이 a_c는 반복하중에 의해 균열이 진전하여 파괴모드를 취성파괴나 연성파괴 또는 부재의 전면항복, 균열의 판두께 관통 등으로 규정할 때의 균열치수로 가정한다. 예를 들면, 용접이음부에 내부결함이나 표면결함으로부터 발생하는 피로균열은 판두께의 관통까지 소요되는 하중반복회수가 부재 전수명의 대부분을 차지한다. 관통 후에는 균열의 진전속도가 빨라지는 것으로부터 판두께 관통시의 균열길이를 한계균열길이로 이용하는 경우가 많다[6, 11].

따라서, 용접이음부에 있어서의 초기균열은 내부균열과 외부균열로 대별되고, 균열의 형상에 따라 표 4.1과 같이 균열깊이 a 및 폭 b로 나타낸다[6, 11]. 균열의 형상은 용접이음단부의 돌림용접 미실시를 가정한 측면관통균열, 용접누락을 가정한 내부관통균열, 용입불량이나 블로홀을 가정한 타원형 내부균열, 언더컷을 가정한 반타원형 표면균열, 맞대기용접이음부의 용융부족이나 필렛용접이음부의 토우를 따라 발생한 연속언더컷인 표면관통균열로 분류하여 모델화 한다.

표 4.1 균열의 모델화

균열의 분류	균열 모델
내부관통균열	
측면관통균열	
표면관통균열	
타원형 내부균열	
반타원형 표면균열	

4.3 응력확대계수범위

강교에 발생된 균열은 일반적으로 선형탄성파괴역학에 의해 해석을 실시한다. 선형탄성파괴역학에서는 균열진전을 지배하는 균열주위의 소규모 영역에서의 응력확대계수범위 ΔK 에 의해 균열진전의 여부가 결정된다. 여기서, 응력확대계수범위 ΔK 는 작용응력, 초기균열의 길이 그리고 균열의 기하학적인 형상에 따라 좌우된다.

응력확대계수범위는 실제 부재에서의 균열의 형상, 부재의 치수 및 형상 등을 고려하여 식 (4.2)와 같이 표현할 수 있다.

$$
\begin{aligned}
\Delta K &= F(a)\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \\
&= F_e F_s F_t F_g \Delta\sigma\sqrt{\pi a}
\end{aligned}
\qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.2)
$$

여기서, a : 균열길이

$\Delta\sigma$: 작용응력범위

F_e : 균열형상에 대한 보정계수

F_s : 표면균열에 대한 보정계수

F_t : 유한 폭 또는 두께에 대한 보정계수

F_g : 이음에 생기는 응력집중에 대한 보정계수

보정계수 $F(a)$는 유한요소해석 등의 수치해석에 의해 구하며, 타원형, 반타원형, 1/4타원형의 균열에 대해서는 통상 3차원해석을 실시하나, 3차원적 효과가 보정계수에 거의 영향을 미치지 않는 것이 명확할 경우에는 2차원해석을 실시하기도 한다[6), 19)].

1) **균열형상에 대한 보정계수** F_e

타원형, 반타원형, 1/4타원형의 균열이 단축방향으로 진전할 경우

$$F_e = 1/E(k) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.3)$$

$$E(k) = \sqrt{1 + 1.464(a/b)^{1.65}}$$

장축방향으로의 균열진전

$$F_e' = F_e\sqrt{a/b} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.4)$$

2) **표면균열에 대한 보정계수** F_s

반타원형의 표면균열, 1/4 타원균열이 단축방향으로 진전할 경우

$$F_s = 1.12 - 0.12a/b \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.5)$$

표면관통균열

$$F_s = 1.12$$

3) **유한 폭 또는 두께에 대한 보정계수** F_t

$$F_t = (1 - 0.025\lambda^2 + 0.06\lambda^4)\sqrt{\sec(\pi\lambda/2)} \quad \cdots\cdots \quad (4.7)$$

$\lambda = 2a/d$ (**내부관통균열**)

$\lambda = a/d$ (**표면관통균열**)

$\lambda = 2a/t$ (**타원형의 균열**)

$\lambda = a/t$ (**타원형 및 1/4 타원형의 균열**)

4) **이음부에 생기는 응력집중에 대한 보정계수** F_g

하중 비전달형 리브 십자이음(그림 4.3 참고)

$l/t < 2$ 일 때

$$F_g = 0.51(l/t)^{0.27}(a/t)^{-0.31} \qquad a/t \le 0.05(l/t)^{0.55}$$

$$F_g = 0.83(a/t)^{-0.15(l/t)^{0.46}} \qquad a/t > 0.05(l/t)^{0.55}$$

$l/t > 2$ 일 때 ‥ (4.8)

$$F_g = 0.615(a/t)^{-0.31} \qquad a/t \le 0.073$$

$$F_g = 0.83(a/t)^{-0.2} \qquad a/t > 0.073$$

단, $F_g \ge 1$ 로 한다.

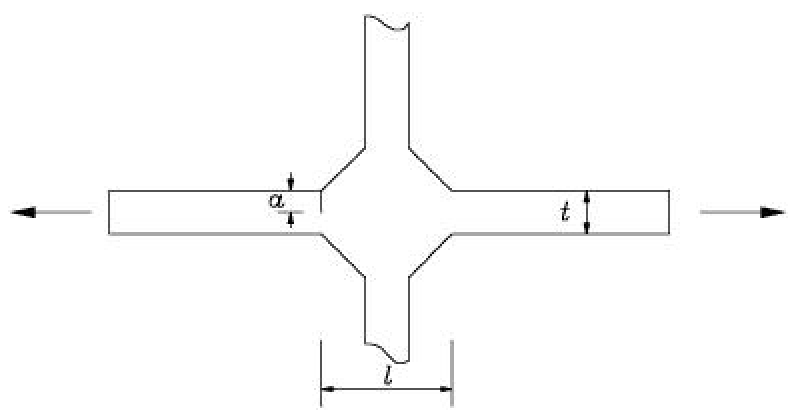


그림 4.3 하중 비전달형 십자이음

4.4 피로균열진전속도

피로균열의 성장특성을 나타내는 대표적인 식은 하중반복회수당의 하중이력에 따른 균열성장거동을 나타내는 피로균열진전속도 da/dN과 1차적인 인자인 응력확대계수범위 ΔK의 관계를 구체화한 Paris-Erdogan식이다.

$$da/dN = C(\Delta K)^m \qquad (\Delta K \geq \Delta K_{th}) \qquad \cdots\cdots \quad (4.9)$$

$$da/dN = 0 \qquad (\Delta K < \Delta K_{th})$$

여기서, 피로균열진전속도는 상수 C, m의 값에 따라 달라지며, 강재의 특성에 좌우된다. 식 (4.9)의 적용에 있어서 하한계는 하한계응력확대계수범위 ΔK_{th}로 주어지며 하한계응력확대계수범위 ΔK_{th}는 응력비 R의 영향을 받는다[17]. 피로균열진전거동에 하한계 응력확계수범위를 포함시킬 경우의 피로균열진전속도는 식 (4.10)과 같다.

$$da/dN = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^{\ m}) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.10)$$

식 (4.10)을 사용하는 경우에는 일본 JSSC 피로설계지침에서는 표 4.2와 같이 최안전설계곡선과 평균설계곡선을 고려하여 C, m 및 ΔK_{th}의 값을 제시하고 있다[6].

표 4.2 da/dN - ΔK 곡선에서의 상수값

	$C(\times 10^{-11})$	m	ΔK_{th}
최안전설계곡선	2.69	2.75	2.0
평균설계곡선	1.54	2.75	2.9

한편, 이 식은 하중반복하의 하중이력을 개구모드(Opening mode)파괴에

서 응력확대계수범위($\varDelta K = K_{max} - K_{min}$)으로 나타낼 수 있고, 따라서 응력확대계수범위 $\varDelta K$를 매 사이클당의 최대, 최소응력과 재료형상에 관계되는 함수로서 계산이 가능하다는 것이다. 또, 이 식은 최대응력이 항복응력보다 커지더라도 응력이 작으면 선형탄성파괴역학의 적용이 가능하고, $\log(da/dN) = \log(C(\varDelta K)^m)$의 관계로 해석하며 대수좌표계에서 직선관계를 유지하는 특성을 가지고 있다.

4.5 피로균열진전수명

피로균열진전수명은 일반적으로 식 (4.11)과 같고, 식 (4.1)의 Paris의 균열진전식을 반복회수 N에 대해 초기균열길이 a_i에서 한계균열길이 a_c까지 적분하는 것으로 구해진다.

$$N = \int_{a_i}^{a_c} \frac{1}{C(\varDelta K)^m}\, da \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4.11)$$

여기서, N : 균열진전수명

a_i : 초기균열길이

a_c : 한계균열길이

$\varDelta K$: 응력확대계수범위

식 (4.11)은 $\varDelta K$가 균열에 대한 함수로 주어지고 평면균열인 경우는 균열형상에 의해 달라지기 때문에 일반적으로 수치적분에 의해 구해진다. 예를 들어, 반타원형 또는 타원형의 표면균열의 경우는 균열깊이방향과 폭방향에 대한 응력확대계수범위 $\varDelta K_A$, $\varDelta K_B$를 계산하여 식 (4.11)에 대

입함으로서 양방향의 균열진전수명을 계산한다. 피로균열진전수명의 계산 방법에는 균열치수 증가법과 하중반복회수 증가법이 있는데, 비교적 계산이 용이한 하중반복회수 ΔN을 증가시키면서 균열증분량을 계산하는 하중반복회수 증가법을 많이 사용하고 있으며 계산절차를 나타내면 다음과 같다[6), 11)].

1단계 : 균열크기 $(a,\ b)$에 대한 응력확대계수범위 ΔK_{A1}, ΔK_{B1}를 구한다.

2단계 : 하중반복회수 ΔN을 이용하여 균열증분량 $\Delta a'$, $\Delta b'$을 다음식과 같이 구한다.

$$\Delta a' = \{C(\Delta K_{A1})^m\} \cdot \Delta N \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (4.12a)$$

$$\Delta b' = \{C(\Delta K_{B1})^m\} \cdot \Delta N \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (4.12b)$$

3단계 : 균열 $(a+\Delta a',\ b+\Delta b')$에 대한 응력확대계수범위 ΔK_{A2}, ΔK_{B2}를 구한다.

4단계 : 균열이 $(a,\ b)$에서부터 $(a+\Delta a',\ b+\Delta b')$까지 진전할 때의 응력확대계수범위는 1, 3단계에서 계산된 응력확대계수범위의 평균값을 사용하여 다음 식과 같이 표시되며 이를 도식적으로 나타내면 그림 4.5와 같다.

$$\Delta K_A = \{(\Delta K_{A1}^m + \Delta K_{A2}^m)/2\}^{1/m} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (4.13a)$$

$$\Delta K_B = \{(\Delta K_{B1}^m + \Delta K_{B2}^m)/2\}^{1/m} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (4.13b)$$

5단계 : 균열증분량 Δa, Δb는 위 식에서 얻어진 결과를 이용하여 계산 한다.

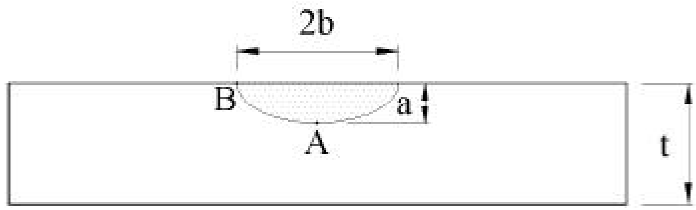


그림 4.4 반타원형 표면균열의 형상

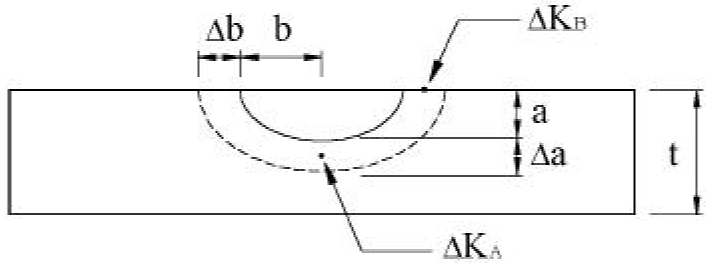


그림 4.5 응력확대계수범위의 계산

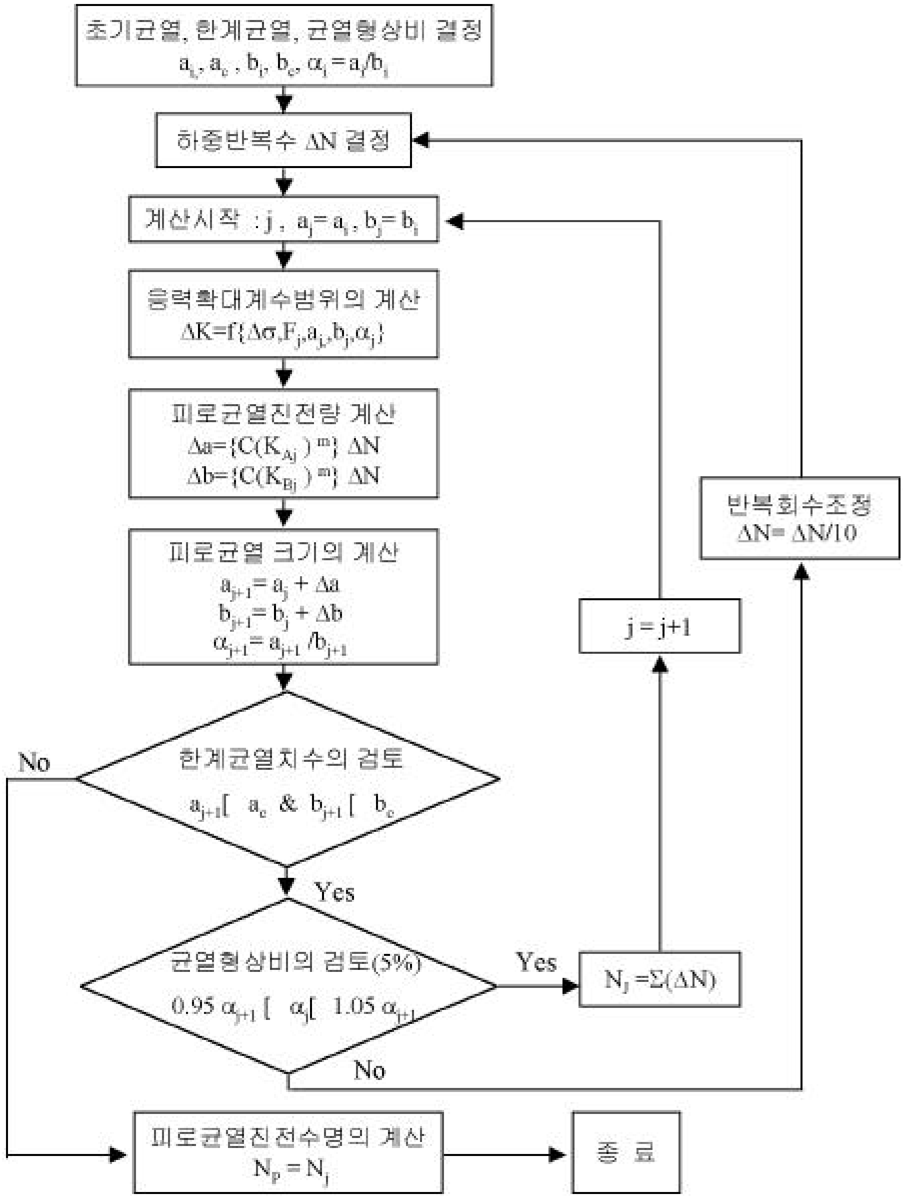


그림 4.6 **피로균열진전수명 계산의 흐름도**

5. 대형차혼입률에 따른 피로균열진전수명평가

5.1 교량의 제원

대형차의 혼입률에 따른 피로균열진전수명 평가를 실시하는 대상교량은 4경간 연속 도로교(4차선)이며, 해석부위는 활하중에 대해서 영향을 가장 많이 받아 처짐 및 처짐각이 크게 발생하는 2경간 중앙부의 다이어플램 필렛용접이음부에 대해서 피로균열진전수명을 해석하였다.

1) 교량의 제원

① 구조형식 : 합성형 스틸박스 거더교(3련)

② 지간구성 : 4경간 (L=55+2@80+55=270m)

③ 교　　폭 : 16.50m (4차선)

④ 사용강재 : 주부재 - SM 520

부부재 - SM 400

⑤ 교 통 량 : 1일 1차선당 18,660대

2) 대상교량의 일반도

대형차혼입률에 따른 피로균열진전수명평가를 실시하는 대상교량의 종단면도, 일반도 및 단면도를 그림 5.1, 그림 5.2, 그림 5.3에 각각 나타낸다.

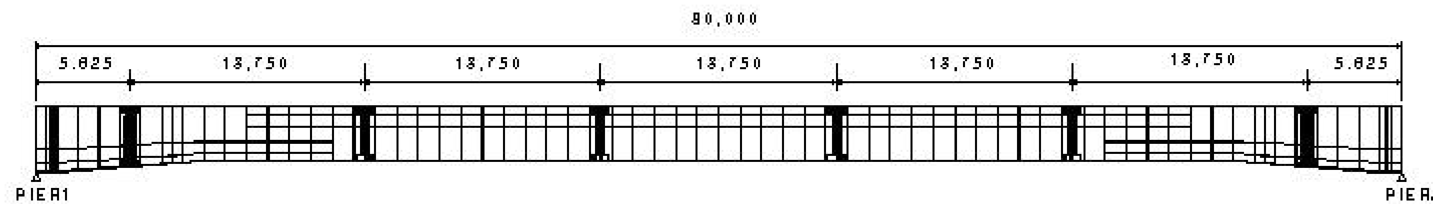


그림 5.1 대상교량의 종단면도(2경간)

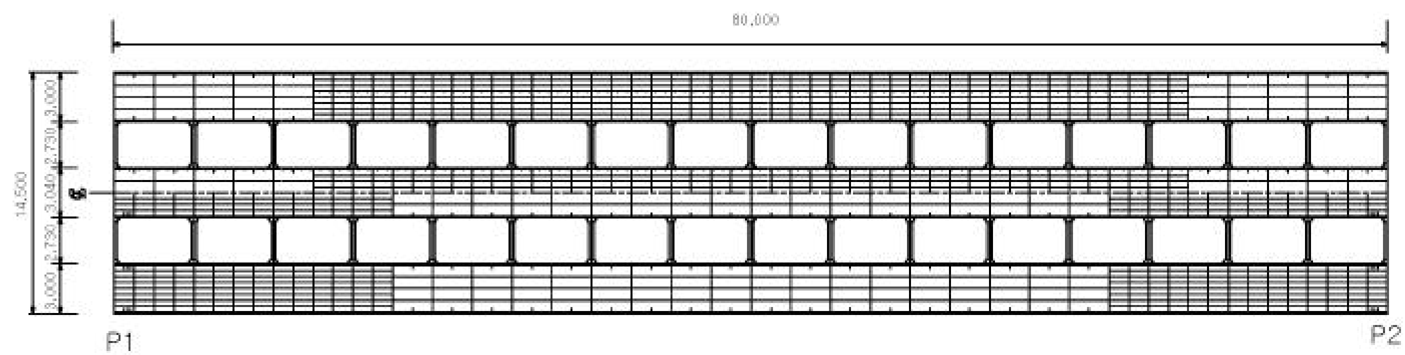


그림 5.2 대상교량의 일반도(2경간)

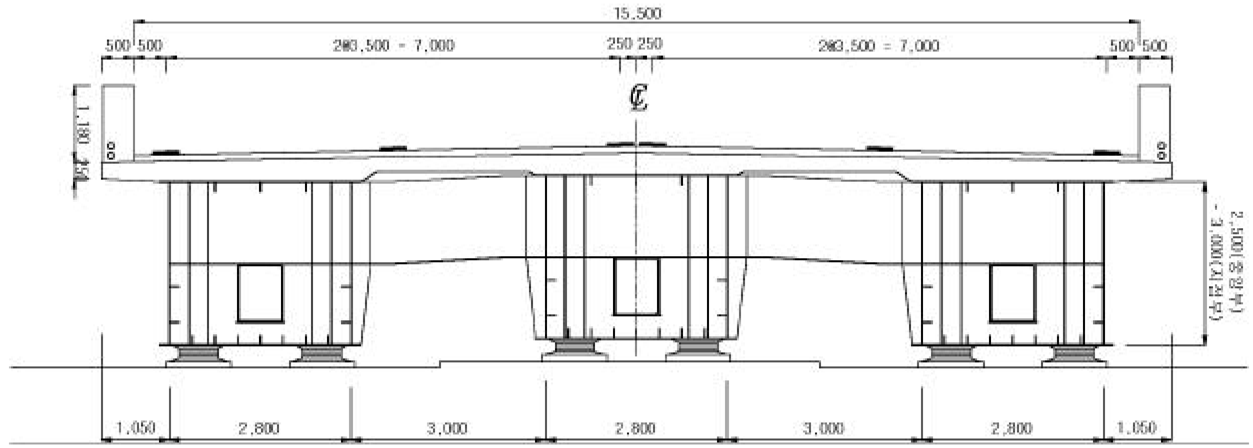


그림 5.3 대상교량의 단면도

5.2 **대형차의 혼입률**

도로교상에는 형식 및 중량이 다른 많은 차량들이 주행을 한다. 이렇게 다양한 차량들의 통행에 의해 피로균열진전수명에 영향을 미치는 응력변동을 구하기 위해서는 실제의 차량들의 형식 및 중량을 고려하여 일정하게 분류하여야 한다. 그러므로 본 연구에서는 해당지역의 교통량조사[20]를 근거로 하여 차량을 6개 형식으로 분류하였으며 크게 소형차와 대형차로 구분하였다. 소형차에는 승용차(2축)와 소형트럭(2축)이 있고, 대형차에는 대형트럭(2축), 대형트럭(3축), 버스(2축) 및 세미트레일러(5축)가 있다. 국내에서는 교통량조사에 활용하는 차량분류가 있으나 차량의 축간거리에 대한 규정은 없다[21) 23)]. 따라서, 대상교량을 통행하는 차량의 특성에 대해서는 한국도로공사의 교통량 분석자료[4), 21)]와 국내에 주행중인 각 차량의 제원[21) 25)] 및 국내 교통실정과 비슷한 일본의 자료[11), 26), 27)]를 참고하였다.

한편, 실제 교통량조사에서 얻어진 자료를 분석한 결과, 연구대상교량의 통행교통량은 대형차혼입률이 35%인 교량이며, 교통량조사에서 얻어진 차량대수와 차량별 혼입률은 표 5.1과 같다. 이 교통량자료에서 대상교량을 통행하는 대형차의 혼입률이 다소 높다는 특성과 대형차의 통행이 교량의 피로손상에 미치는 영향이 큰 점을 감안하여 대형차혼입률의 변화에 따른 피로균열진전수명을 평가하였다. 또한 교량을 주행하는 차량의 속도가 피로균열의 진전수명에 미치는 영향도 고려하기 위해 주행속도변화에 따른 피로균열진전수명도 함께 평가하였다. 이때, 교량을 주행하는 모든 차량들의 주행속도는 일정하고, 차량은 차선의 중앙을 따라 이동한다고 가정하였다. 대형차의 혼입률에 관계없이 단위기간동안 대상교량을 통행하는 차량의 대수는 항상 동일하며, 대형차의 혼입률은 최소 20%에서 최대 50%까지 변동할 수 있음을 가정하였다. 대형차혼입률은 20%에서 5%

씩 증가시켰고, 차량의 속도는 40km/hr, 60km/hr, 80km/hr, 100km/hr 및 120km/hr로 변화시켜가며 다이어플램 필렛용접이음부의 피로균열진전수명을 평가하였다. 표 5.2에서는 대형차혼입률에 따른 차량형식별 차종구성비를, 표 5.3에서는 6개의 차량모델과 차종별 중량특성을 각각 나타낸다. 이 차량들은 중량분포에서 정규분포를 따른다.

표 5.1 교통량조사에서 얻어진 차종구성

	승용차 (2축)	소형 트럭 (2축)	대형 트럭 (2축)	대형 트럭 (3축)	버스 (2축)	트레 일러 (5축)	합 계
통행대수 (대/차선/일)	9759	2370	3228	1026	1885	392	18660
혼입률 (%)	52.3	12.7	17.3	5.5	10.1	2.1	100

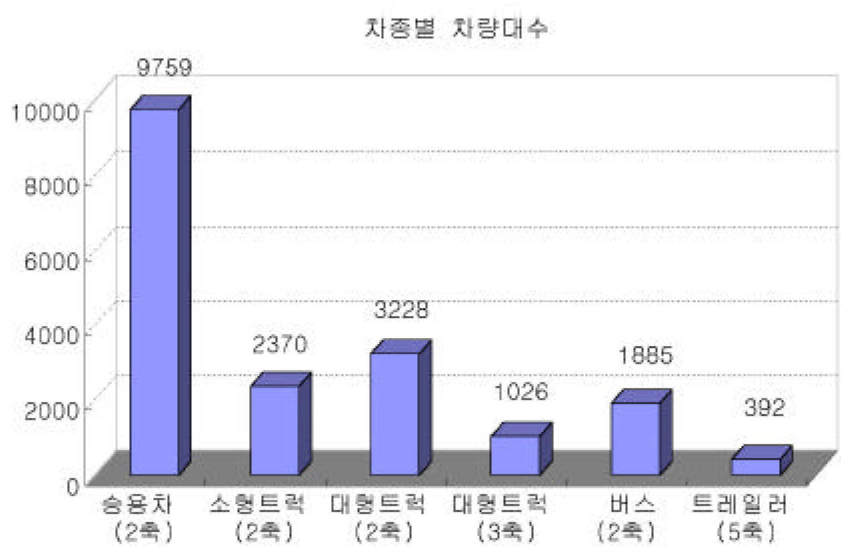


그림 5.4 교통량조사에서 얻어진 차종별 차량대수

표 5.2 대형차혼입률에 따른 차종구성비

구성비(%)		대형차의 혼입률						
		20%	25%	30%	**35%**	40%	45%	50%
소형차	승용차 (2축)	64.4	60.3	55.9	**52.3**	47.9	44.2	40.4
	소형트럭 (2축)	15.6	14.7	14.1	**12.7**	12.1	10.8	9.6
	합계	80	75	70	**65**	60	55	50
대형차	대형트럭 (2축)	9.8	12.3	14.4	**17.3**	19.3	22.1	24.5
	대형트럭 (3축)	3.1	3.9	5	**5.5**	6.6	7.3	8.1
	버스 (2축)	5.7	7.2	8.7	**10.1**	11.6	12.9	14.4
	트레일러 (5축)	1.4	1.6	1.9	**2.1**	2.5	2.7	3.0
	합계	20	25	30	**35**	40	45	50

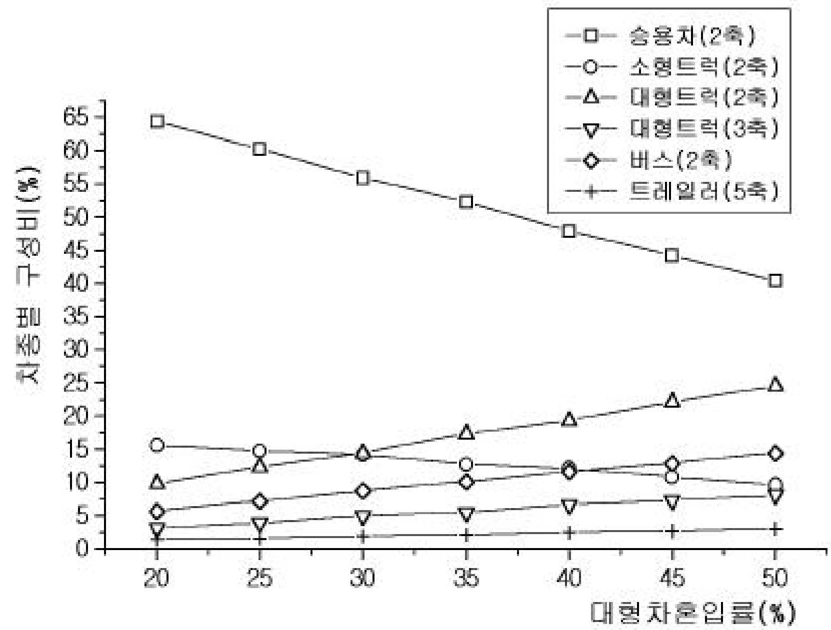
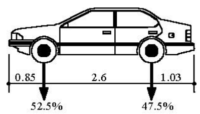
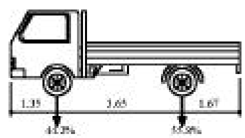
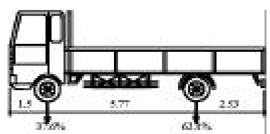
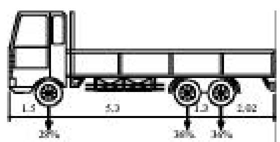
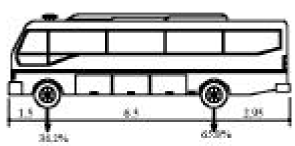
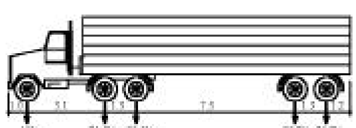


그림 5.5 대형차혼입률에 따른 차종구성비의 변화

표 5.3 차량의 축간거리 및 축하중

차종		축간거리 및 축하중	중량			표준편차
			평균	최소	최대	
소형차	승용차		1.66	0.80	3.10	0.53
소형차	소형트럭 (2축)		7.05	1.32	9.99	3.44
대형차	대형트럭 (2축)		15.20	12.00	64.00	3.01
대형차	대형트럭 (3축)		27.58	22.00	72.90	4.32
대형차	버스 (2축)		14.10	12.00	40.90	1.96
대형차	트레일러 (5축)		41.50	34.00	80.50	5.09

5.3 피로균열진전수명평가위치 및 이음상세

대상교량인 4경간 연속 강상형교에서 피로손상이 예상되는 용접이음부의 위치는 최외측 거더의 둘째 경간 중앙으로서 활하중의 영향으로 처짐 및 처짐각이 크게 발생하는 지점이다. 이 위치의 다이어플램 필렛용접이음부에서 각종 용접결함에 의해 초기균열이 발생하고, 통행차량의 반복하중으로 피로균열이 진전한다고 가정하였다. 다이어플램 필렛용접이음부의 해석부위는 주형하부플랜지와 다이어플램의 필렛용접이음부를 대상으로 하고, 피로균열이 초기균열에서 한계균열(부재파단)까지 진전할 때, 대형차혼입률에 따른 피로균열의 진전수명을 평가한다.

그림 5.6 피로균열진전수명의 평가위치

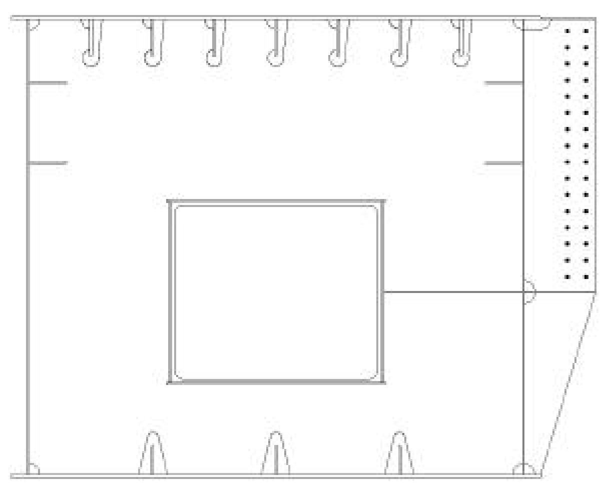


그림 5.7 피로균열진전수명의 평가위치의 다이어플램

그림 5.8과 같은 다이어플램에서 초기결함에 의해 피로균열이 발생한 부위는 주형하부플랜지와 다이어플램 필렛용접이음부이다. 그림 5.8은 다이어플램의 이음상세 및 용접결함이 존재하는 위치를 나타내고, 표 5.4은 다이어플램 필렛용접이음부의 강도등급 및 이음형상을 나타낸다.

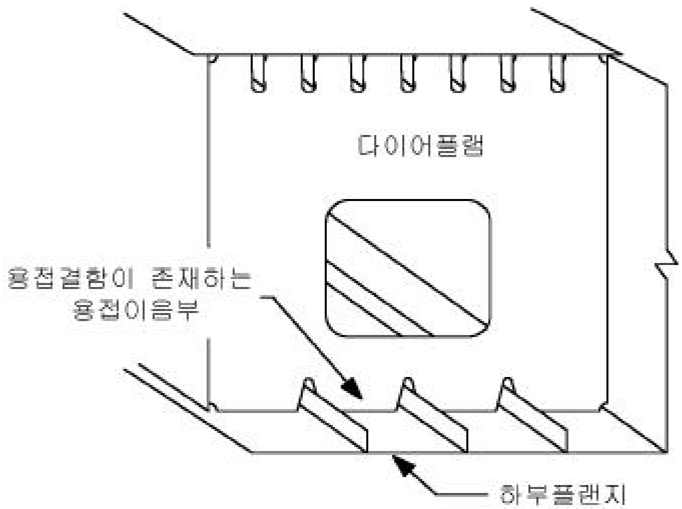
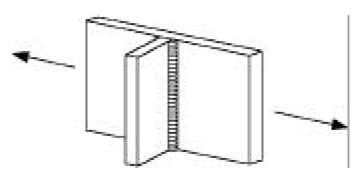


그림 5.8 다이어플램 이음상세와 용접결함의 위치

표 5.4 강도등급 및 이음형상

대상 용접이음부	강도등급 (kg/cm^2)	이음형상
하부플랜지＋다이어플램 필렛용접이음부	E(816)	

5.4 응력변동해석 및 등가응력범위

피로균열진전수명평가부위에 대한 응력값을 산정하기 위해서는 응력변동해석을 실시한다. 우선, 대상교량의 구조해석을 통하여 각 피로균열진전수명 평가부위에 대한 단위하중의 휨모멘트 영향선을 작성한다. 이 영향선에 기초한 응력값들을 구하여 대상교량의 해석부위를 모델링한 영향면의 각 절점의 종거값으로 해당되는 값들을 입력한다. 그림 5.9와 같이 작성된 영향면에 표 5.3에서 제시한 시뮬레이션 차량하중을 랜덤(Random)하게 통과시켜 피로균열진전수명평가 부위에 다양하게 발생되는 응력들에 대해서 응력변동해석을 실시한다.

응력변동해석은 대형차혼입률과 차량의 주행속도별에 따라 실시하며, 응력변동해석으로 얻어진 응력범위빈도분포에서 등가응력범위를 산정한다[11), 22), 23)]. 이 등가응력범위는 균열진전여부를 결정하는 응력확대계수범위를 산정하는데 사용된다. 그림 5.10은 대형차혼입률과 차량의 주행속도에 따른 각각의 등가응력범위를 나타낸다. 등가응력범위의 변동에서 알 수 있듯이 대형차의 혼입률이 높아질수록 등가응력범위는 커지게 된다. 또한, 동일한 혼입률하에서는 주행속도가 빨라질수록 등가응력범위는 작아지고, 주행속도증가에 대한 등가응력범위의 증가율이 감소된다. 이것은 차량의 주행속도가 빨라질수록 차간거리가 길어져, 교량에 재하되는 차량의 대수가 적어지고 이로 인해 등가응력범위는 작아진다고 여겨진다.

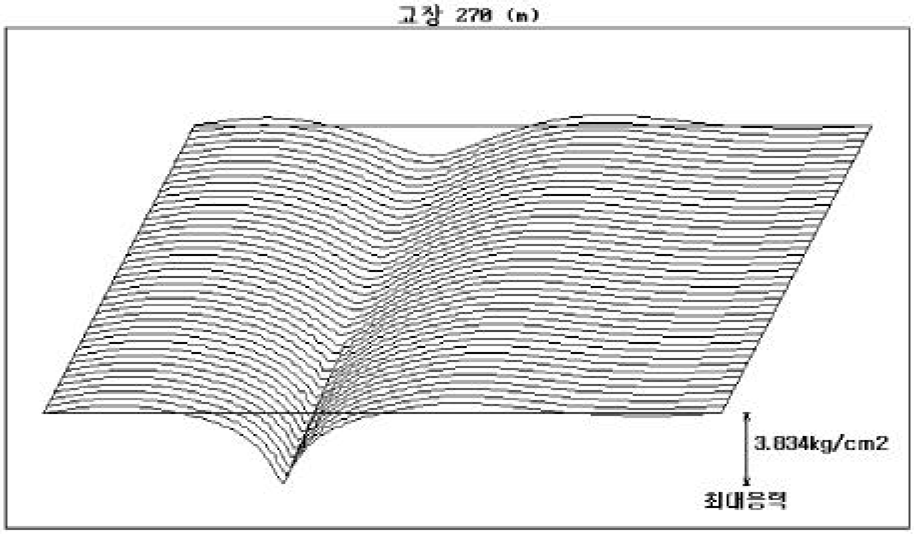


그림 5.9 **피로균열진전수명 평가부위의 영향면**

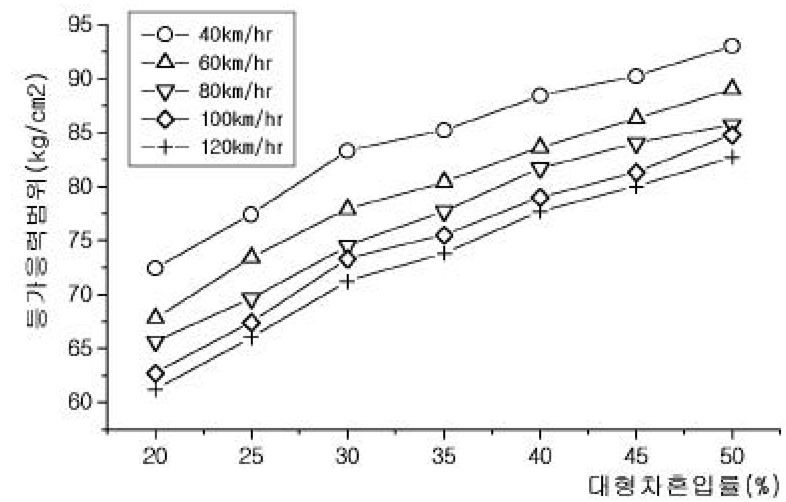


그림 5.10 **대형차혼입률과 속도에 따른 등가응력범위**($\Delta\sigma_e$)

5.5 초기결함의 종류와 해석조건

1) 초기결함의 종류

그림 5.11의 스틸박스거더에서 하부플랜지와 다이어플램의 필렛용접이음부에 용접결함이 존재한다고 가정하였으며, 용접결함의 종류로서는 용접이음부 끝단의 돌림용접미실시, 용접누락, 필렛용접이음부 토우(toe)에 언더컷이 연속하여 생긴 용접결함(이하 연속언더컷), 그리고 하부플랜지 중앙부의 필렛용접이음부에 언더컷이다. 그리고 피로균열진전수명평가에 사용된 용접결함(초기균열)은 돌림용접미실시를 가정한 측면관통균열, 용접누락을 가정한 내부관통균열, 연속언더컷을 가정한 표면관통균열, 1개소의 언더컷을 가정한 반타원형 표면균열 등 모두 4가지 타입이다. 다이어플램의 필렛용접이음부에 존재하는 용접결함은 그림 5.12 a), b), c), d)와 같으며, 이들 용접결함에 대한 초기균열모델을 표 5.5에 나타낸다.

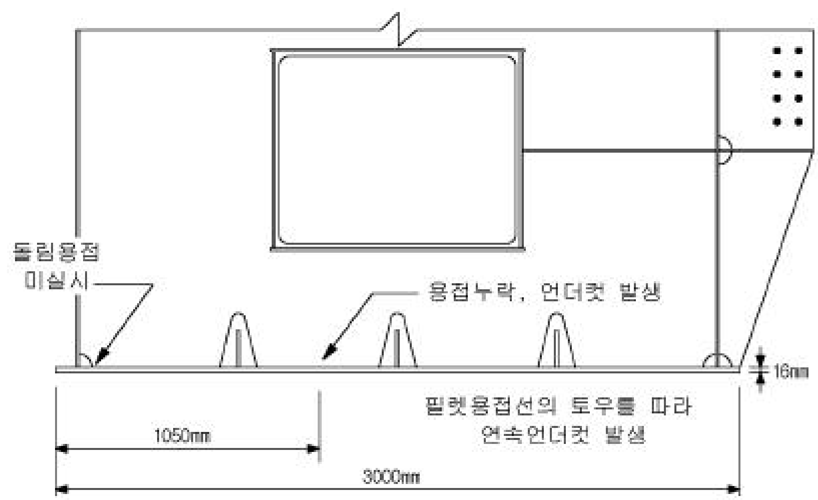
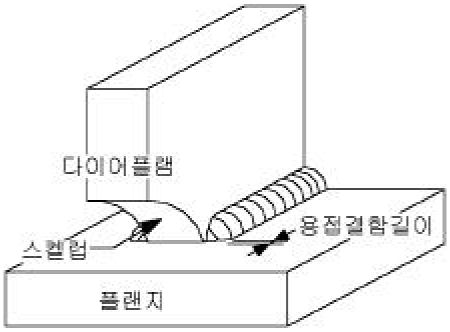
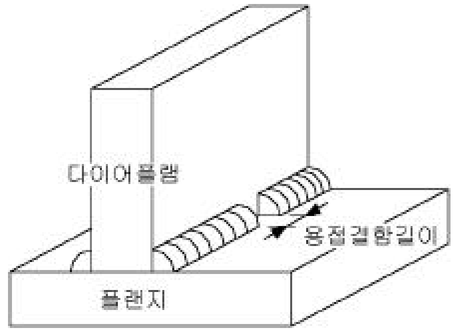


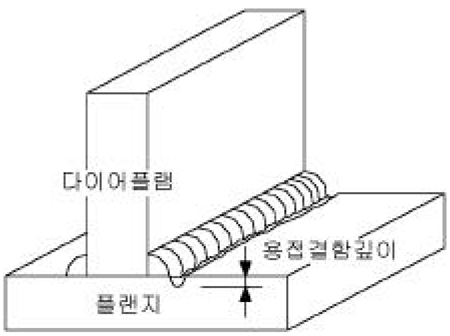
그림 5.11 다이어플램 필렛용접부에서 용접결함발생위치



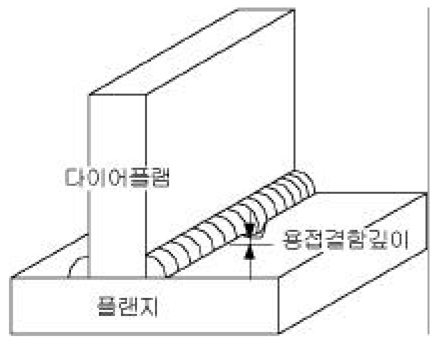
(a) **돌림용접미실시**



(b) **용접누락**



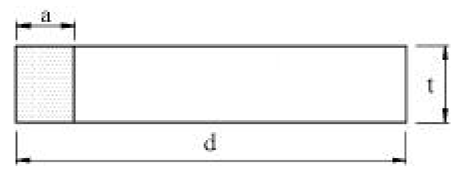
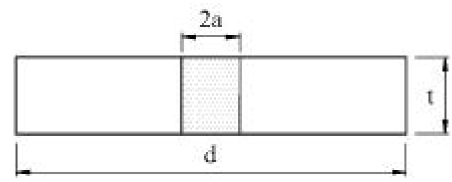
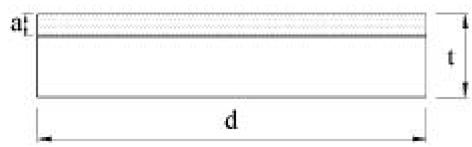
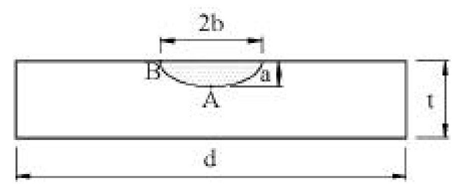
(c) **연속언더컷**



(d) **언더컷**

그림 5.12 **다이어플램 필렛용접부의 용접결함**

표 5.5 용접결함에 대한 균열모델

균열의 분류	균열 모델
측면관통균열	
내부관통균열	
표면관통균열	
반타원형 표면균열	

2) 해석조건

본 연구에서 가정한 용접결함의 길이는 측면관통균열, 내부관통균열에서 1mm, 표면관통균열, 반타원 표면균열에서 결합깊이는 1mm이다. 따라서 측면관통균열 및 표면관통균열에서는 한방향으로 균열이 진전하므로 초기균열의 길이는 1mm, 내부관통균열은 한축에 대해 양방향으로 균열이 동시에 진전하므로 초기균열의 길이는 0.5mm이다. 또한, 반타원 표면균열은 두께방향과 폭방향으로 동시에 균열이 진전하여 두께방향으로 관통하므로 초기균열의 길이는 결합깊이 1mm로 가정하였다. 그리고 반타원형 표면균열의 초기균열 형상비(a/b)는 균열깊이 a에 대한 균열폭 b의 형상으로서 0.5로 가정하였다. 한편, 측면관통균열와 내부관통균열의 한계균열길이는 하부플랜지의 폭, 표면관통균열의 한계균열길이는 판두께, 반타원형 표면균열의 한계균열길이는 판두께와 하부플랜지 폭으로 가정하였다.

작용하중에 대한 균열진전은 개구모드(Opening Mode)상태로 가정하였으며, 해석방법은 하중반복회수 증가법을 사용하였다. 하중반복회수의 증가에 따라 단위하중반복회수에 대한 균열진전량이 나타나고, 균열진전길이가 한계균열길이에 도달하면 해석은 종료된다. 한편, 피로균열진전거동은 식 (4.10)의 균열진전속도식에 의해 해석을 실시하였다. 해석에서 상수 C, m 및 하한계응력확대계수 ΔK_{th}는 표 4.2에서 나타낸 일본 JSSC 피로설계지침의 최안전설계곡선 값을 사용하였다[6].

5.6 피로균열진전수명 해석결과

그림 5.13 a), b), c) 및 d)는 각각의 용접결함(초기균열)형상에 따른 피로균열진전수명을 나타낸다. 그림 5.13 (a)에는 측면관통균열에 대한 대형차혼입률과 피로균열진전수명과의 관계를, (b)에 내부관통균열에 대한 대형차혼입률과 피로균열진전수명과의 관계를, (c)에 표면관통균열에 대한 대형차혼입률과 피로균열진전수명과의 관계를, (d)에 반타원형 표면균열에 대한 피로균열진전수명과의 관계를 각각 나타내며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

① 4가지 타입의 용접결함(초기균열)형태에서 돌림용접미실시를 가정한 측면관통균열이 가장 짧은 피로균열진전수명을 보였으며, 용접누락을 가정한 내부관통균열, 토우에 생긴 연속언더컷을 가정한 표면관통균열 그리고 언더컷을 가정한 반타원형 표면균열순으로 피로균열진전수명이 길어짐을 알 수 있었다.

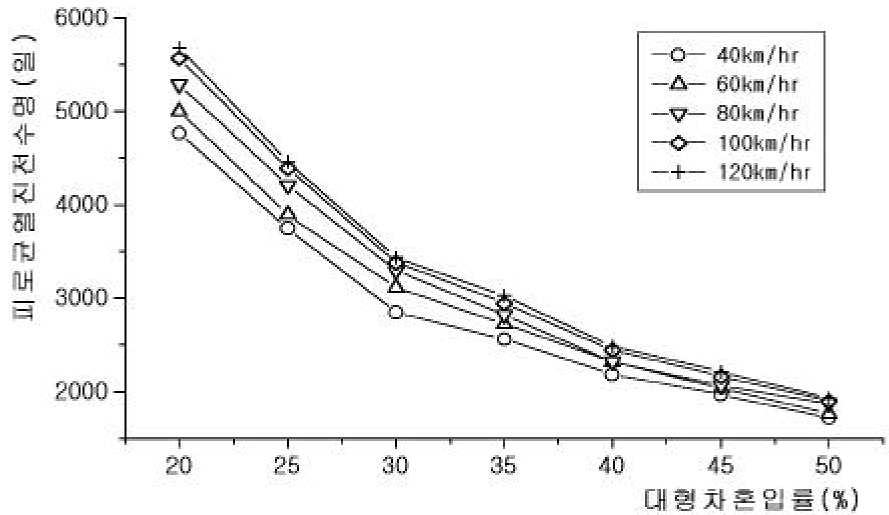
② 측면관통균열, 내부관통균열, 표면관통균열 및 반타원형 표면균열의 4가지 타입 모두 대형차혼입률이 높고 주행속도가 느릴수록 피로균열진전수명이 단축되었다. 한편, 측면관통균열의 피로균열진전수명에서는 주행속도보다 대형차혼입률의 영향을 다소 많이 받는 것을 알 수 있었다. 또한, 측면관통균열은 대형차혼입률과 주행속도에 관계없이 초기균열에서 균열성장이 빨라 다른 균열형상보다 짧은 피로균열진전수명을 가지는 것을 알 수 있었다.

③ 내부관통균열 및 표면관통균열은 대형차혼입률과 주행속도에 대해서 거의 유사한 피로균열진전수명을 나타내었다.

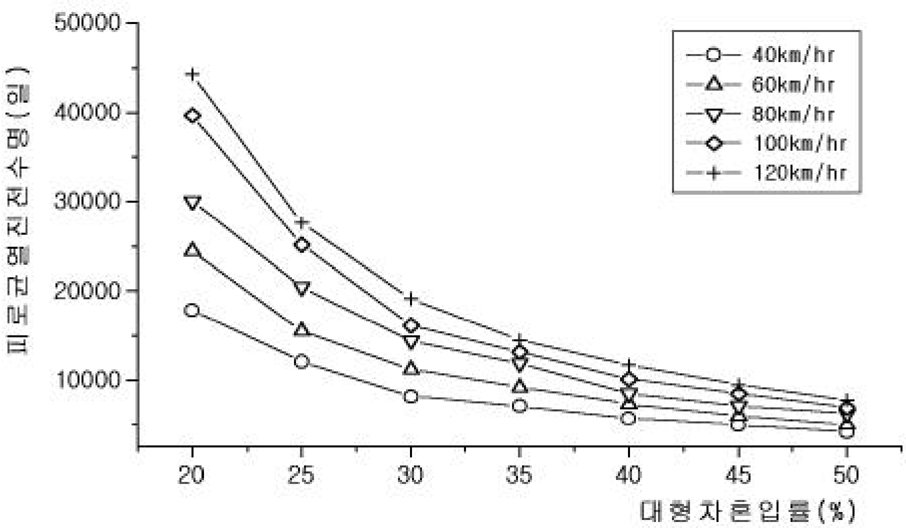
④ 반타원형 표면균열은 대형차혼입률이 낮을 경우에는 다른 균열형상보다 피로균열진전수명이 상당히 증가하였고, 이런 경향은 주행속도가 빠를수록 현저하였다.

이상으로부터, 초기균열형상과 피로균열진전수명과의 관계에서 대형차혼입률이 높고 주행속도가 느릴수록 피로균열진전은 빠르고 용접이음부의 수명은 짧게 나타났다.

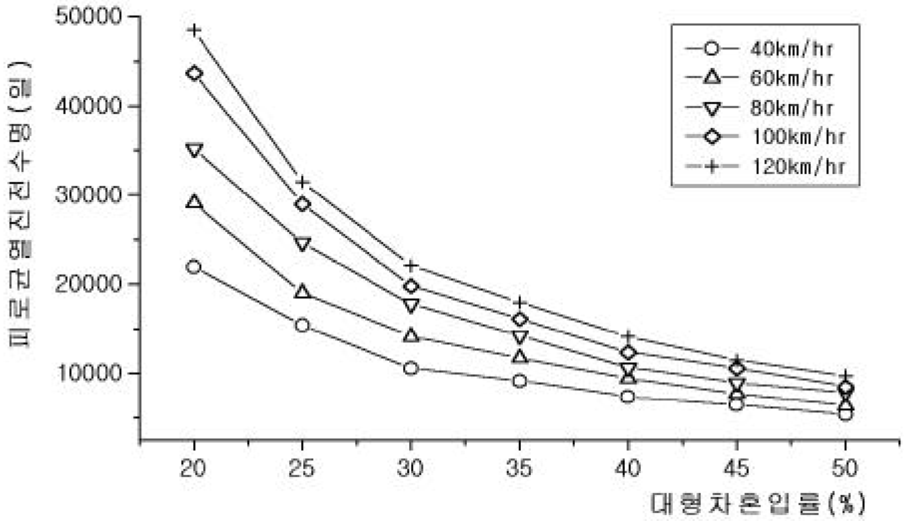
한편, 측면관통균열은 내부관통균열보다 짧은 피로균열진전수명을 나타내었다. 이것은 반무한판에서의 측면관통균열은 내부관통균열의 0.63**배의 파괴강도를 가지는 파괴역학적인 내용과 일치함을 알 수 있었다**[14].



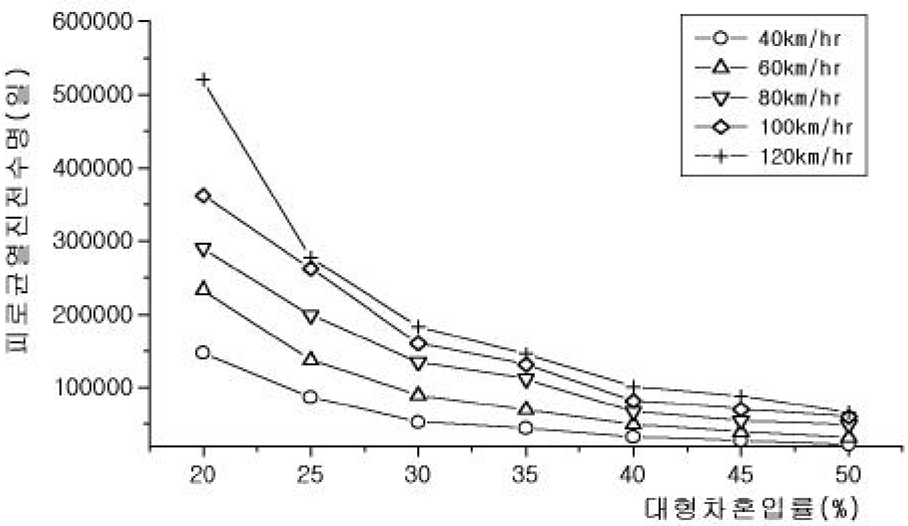
(a) **측면관통균열의 피로균열진전수명**



(b) **내부관통균열의 피로균열진전수명**



(c) **표면관통균열의 피로균열진전수명**



(d) **반타원형 표면균열의 피로균열진전수명**

그림 5.13 **균열형상에 따른 피로균열진전수명**

한편, 그림 5.14는 반타원형 표면균열에서 대형차혼입률에 대한 판두께관통수명비의 관계를 나타낸다. 피로균열의 관통은 판폭보다 판두께방향에서 빨리 발생하였으며, 그림에서 알 수 있듯이 한계균열길이에 대한 판두께 관통수명비가 96%이상으로 거의 전체수명에 근접하였다. 따라서 피로균열이 판두께를 관통하는데 모든 수명을 소모하므로, 반타원균열에서는 한계균열길이를 판두께로 간주하여도 무방함을 알 수 있었다.

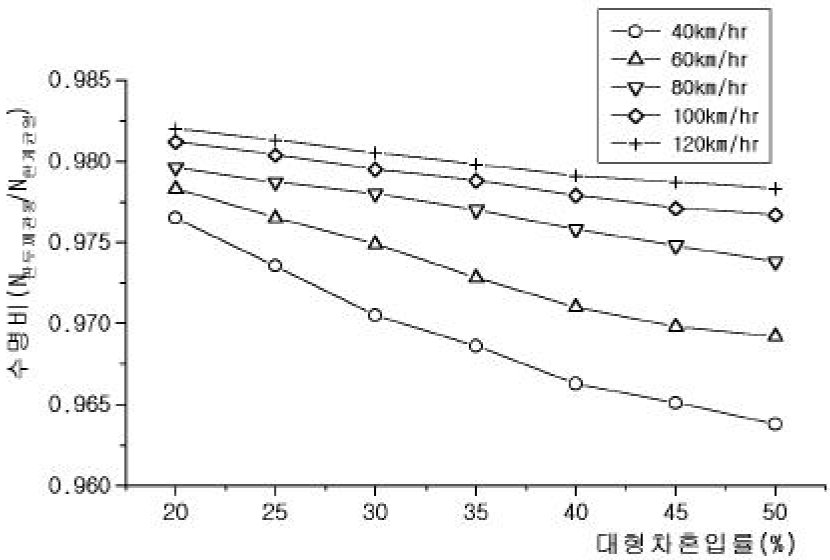


그림 5.14 반타원형 표면균열의 한계균열길이에 대한
판두께관통시의 수명비

6. 결 론

본 연구에서는 강상형교의 다이어플램 필렛용접이음부에 측면관통균열, 내부관통균열 표면관통균열 및 반타원형 표면균열을 가정하여 대형차혼입률에 따른 피로균열진전수명을 평가하였으며, 본 연구를 통하여 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 교량을 통행하는 대형차혼입률이 높아질수록 피로균열진전수명은 2차 곡선의 형태로 감소되었으며, 차량의 주행속도가 빠를수록 피로균열진전수명은 다소 증가하였다.

2) 반타원형 표면균열에서의 판두께 관통수명은 대형차혼입률이 낮고 주행속도가 빠를수록 부재의 전수명에 근접하며, 판두께 관통수명가 전체수명에 거의 근접하므로 반타원형 표면균열에서는 판두께를 한계균열길이로 사용할 수 있다.

3) 측면관통균열은 대형차혼입률과 주행속도의 큰 영향없이 피로균열진전수명이 상당히 짧으므로 응력이 크게 작용하는 용접이음부에서 돌림용접미실시가 생기지 않도록 각별히 주의하여야 한다.

4) 기존교량에 작용하는 실제교통하중 및 초기균열을 측정하여 피로균열진전수명을 평가하면 대형차혼입률에 따른 보다 정확한 수명평가를 할 수 있다.

참 고 문 헌

1) 장동일, 박용진, ″2차 인자에 의한 구조용강의 피로균열성장거동″, 韓國鋼構造學會論文集, 第 3卷 第 3號, pp. 197 204, 1991. 9.

2) 李東郁, ″橋梁鋼床版におけるトラプリブ溶接繼手の疲勞强度向上法に關する基礎的硏究″, 日本大板大學 博士學位論文, 1986. 12.

3) 서울특별시, ″성수대교 정밀안전진단 최종보고서″, 1995. 5.

4) 한국강구조학회, ″강형교의 교통량 분석을 통한 설계피로하중산정과 발생응력의 모형화 연구 최종보고서″, 1997. 12.

5) 건설교통부, 도로교설계기준, 2000.

6) 日本鋼構造協會, 鋼構造物の疲勞設計指針・同解說, 技報堂出版, 1994.

7) American Association of Standard Highway and Transportation Officials, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, 1998.

8) Commission of the European Communities, EUROCODE No. 3 Part 1, Chapter 9, *Design of Steel Structure*, 1990.

9) British Standard Institution, BS 5400 Part 10, *Code of Practice for Fatigue*, 1980.

10) 건설교통부, 도로의 구조・시설기준에 관한 규칙 해설 및 지침. 2000. 3.

11) 梶原 仁, ″鋼構造物の疲勞安全性評價システムの開發とその利用″, 法政大學大學院工學硏究科, 修士學位論文, 1996.

12) 大倉一郎, 鋼橋の疲勞, 東洋書店, 1994. 6.

13) M. A. Miner, ″Cumulative Damage in Fatigue″, Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME, Vol. 59, A160, 1937.

14) 장동일, 구조공학에서의 파괴와 피로, 동명사, pp. 231 251, 1999.

15) 이상우, "강철도교의 잔존피로수명 평가에 관한 연구", 연세대학교 대학원, 석사학위논문, 1996.

16) 佐藤邦彦, 向井喜彦, 豊田政男, 溶接工學, 理工學社, pp. 1 58, 1979.

17) John M. Barsom, Stanley T. Rolfe, *Fracture and Fatigue Control in Structures*, Butterworth Heinemann, ASTM, pp. 194 280. 1999.

18) Julie A. Bannantine, Jess J. Comer, James L. Handrock, *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, Prentice Hall, pp. 88 123, 1990.

19) 최준혁, 경갑수, 최동호, 장동일, "휨응력을 받는 바닥강판의 피로균열진전해석", 韓國鋼構造學會論文集, 第 11卷 4號, pp. 409 416, 1998. 8.

20) 건설교통부 부산지방국토관리청, "내서 중리간 도로4차선 축조공사 설계변경 종합보고서", 2001. 1.

21) 건설교통부, 道路交通量統計年報, 2000.

22) 崔宰源, "道路橋 疲勞設計의 同時載荷係數算定에 關한 研究", 釜慶大學校 碩士學位論文, 1999. 2.

23) 염창회, "강상형교 용접이음부의 피로균열진전해석에 관한 연구", 釜慶大學校 碩士學位論文, 2001. 2.

24) 김윤기, 조재병, "강교의 변형률 측정값을 이용한 통과차량의 축중량 산출방법에 관한 연구", 韓國鋼構造學會學術發表論文集, pp. 278 281, 1998.

25) 심낙훈, 양준열, 박영석, "우리나라 도로교의 피로하중 모형에 관한 연구", 韓國鋼構造學會學術發表論文集, pp. 327 332, 1998.

26) 三木千壽, 坂野昌弘, 館石和雄, 福岡良典 : 鋼橋の疲勞損傷事例のデ-タベ-スの構築とその分析, 日本土木學會 論文集, No.392, I-9,

pp. 403　410, 1988.

27) **寺島秀樹**, **道路橋疲勞設計荷重・同時載荷係數の檢討**, **法政大學大學院**, **工學硏究科**, **修士學位論文**, 1996.

감사의 글

강구조연구실과 인연을 맺은지 2년이란 시간속에 땀과 눈물과 웃음속에서 본 논문의 결실을 이루게 되어 한없는 기쁨을 느끼며, 지금까지 저에게 아낌없는 사랑과 도움을 주신 분들게 미약하나마 감사의 마음을 전하고자 합니다.

먼저, 논문이 완성에 이르기까지 부족한 제자를 하늘만큼이나 넉넉한 마음으로 이해와 관용을 베풀어주시고 지도편달과 격려를 아끼지 않으신 이동욱 교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 그리고 바쁜 일정속에서도 부족한 제자의 논문을 세심하게 조언해 주시고 심사해 주신 이환우 교수님, 정두회 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 아울러 재학기간동안 무언의 꾸지람과 너그러운 마음으로 토목인의 긍지를 가르쳐 주신 김상용 교수님, 김종수 교수님, 손인식 교수님, 장희석 교수님, 이종섭 교수님, 이종출 교수님, 이영대 교수님, 김명식 교수님, 정진호 교수님, 국승규 교수님, 이상호 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 그리고 항상 저희 연구실에 아낌없는 관심과 사랑을 베풀어주신 생산가공공학과 서원찬 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

논문이 완성되기까지 강구조연구실에서 가족처럼 걱정해 주고 격려와 도움을 아끼지 않으신 민수형, 재원이형, 영표형, 창회형, 동욱씨 그리고 궂은 일도 마다하지 않고 동고동락한 대성이, 부족한 나를 친형처럼 잘 따라준 성민이, 동현이, 휘종이에게도 감사의 마음을 전합니다. 또한, 어렵고 힘든 때에 항상 곁에서 힘이 되어준 동주형, 인주형, 호식이형, 병길이형, 태호형, 동환이형, 주동, 준봉, 상욱 및 2년동안 같이 논문을 쓰며 힘든 일도 함께 겪어온 나의 동기들에게도 고마움을 전하며, 동아리 동기 준규, 창우, 용찬, 정현, 현주, 경희, 혜정, 기수 및 후배 혜정, 언철, 명화, 현미에게도 고맙다라는 말을 전합니다.

힘이 들어도 동생을 위해 내색하지 않으며 항상 힘을 주신 형님들 내외분과 물심양면으로 못난 동생을 위해 아낌없는 사랑을 베푼 누나에게 깊은 감사를 드리며, 지금까지 바쁘다라는 핑계로 삼촌역할도 못한 조카들에게도 사랑한다라는 말을 전합니다.

마지막으로 고향에서 홀로 당신의 건강보다는 부족한 자식을 위해 믿음과 사랑으로 보살펴주신 어머니와 힘든 투병 끝에 막내의 졸업식도 보지 못한 채 하늘로 떠나신 아버지의 은혜에 보답하고자 이 논문을 바칩니다.