

# AASHTO 설계법을 이용한 아스팔트 콘크리트 포장체의 피로파괴기준식 개발에 관한 연구

## Development of Failure Criterion for Asphalt Concrete Pavement Based on AASHTO Design Guide

김수일\* · 이광호\*\*

Kim, Soo Il · Lee, Kwang Ho

### Abstract

Failure criteria for asphalt concrete pavements are developed combining the AASHTO design equation and the multi-layered elastic theory. Thickness range including typical layer thicknesses of four-layer Korea highway structures are employed for pavement structure models. Total of 2430 pavement models with different layer thicknesses and moduli are analyzed. Models with crushed stone and asphalt stabilized base courses are equally included in the analysis. Number of load repetition and the maximum tensile strain at the bottom of asphalt layer are computed from the AASHTO design equation with terminal PSI=2.5 and multi-layered elastic computer program, SINELA, respectively. Failure criteria are developed through the regression analysis.

From the analysis, failure criteria for the asphalt concrete pavements with 50% and 95% reliability levels are developed. It is found that the failure criterion of 95% reliability level gives similar results with existing fatigue failure criteria whose terminal performance condition is crack development when compared in a graphical form an equation to estimate failure criterion for a specific reliability level is also proposed.

### 요 지

본 연구에서는 국내 고속도로의 표준단면들을 포함한 포장구조 해석모델을 사용하여 아스팔트 콘크리트 포장체의 피로파괴 기준식을 개발하였다. 해석 대상 모델은 쇄석 및 아스팔트 안정처리 기층을 갖는 2430개의 4층 포장구조로 하였으며, 각 모델의 물성을 공용성 한계를 PSI=2.5로 한 AASHTO 설계식과 다층 탄성해석 프로그램인 SINELA에 적용, 포장체의 통과예상 교통량과 아스팔트 콘크리트 층 하단에서의 최대 인장 변형률과의 관계를 회귀분석하였다.

분석 결과로부터, 신뢰도 50%와 95% 수준의 파괴기준식을 제안하였다. 타 연구결과와 비교한 결과 신뢰도 95% 수준의 파괴기준식은 균열의 발생을 공용성 한계로 보는 기존의 피로 파괴기준식과 같은 정도의 교통량을 추정하고 있음을 알 수 있었다. 또한 신뢰도 수준에 따른 파괴기준식을 신뢰도 50% 수준의 파괴기준식으로부터 간접 추정할 수 있는 관계식을 제안하였다.

\*정회원 · 연세대학교 공과대학 교수

\*\*정회원 · 연세대학교 대학원 박사과정

## 1. 서 론

아스팔트 콘크리트 포장체는 차량하중의 반복재하에 의하여 공용상태가 저하되고 중국에는 구조적, 기능적 능력을 상실하게 된다. 이와 같은 포장체의 상태 저하를 예측하고, 포장체의 제반 기능을 지속적으로 유지케 하기 위하여는 포장체의 상태 저하를 예측 또는 판정할 수 있는 수단이 필요하며, 이에 관한 일반적 방법으로 파괴기준식이 개발, 사용되고 있다.

아스팔트 콘크리트 포장체의 파괴 현상은 아스팔트 콘크리트 층에 균열을 유발하는 피로파괴와 바퀴자국을 남기는 소성변형으로 대별되며, 이는 각각 구조적 파괴, 기능적 파괴의 일종이다<sup>(1)</sup>. 이들 파괴의 정도를 평가하기 위한 기준으로 통과 예상교통량과 변형률의 관계를 사용하는데, 구조적 파괴의 경우 아스팔트 콘크리트 층 하단에서의 인장변형률이, 기능적 파괴의 경우 노상 상단에서의 인장변형률이 그 기준이 된다. 파괴기준식 개발은 실내시험 성과를 이용하는 방법과 현장 도로시험자료나 설계식을 분석하는 방법 등이 사용된다<sup>(2)</sup>.

본 연구에서는 포장체의 구조해석적 측면에서 인장변형률 조건의 피로 파괴기준을 대상으로 연구범위를 한정하고자 한다. 본 연구와 관련하여 피로 파괴기준의 설정에 관한 연구동향을 살펴보면 다음과 같다. 1955년 Hveem<sup>(3)</sup>에 의해 처음으로 반복횡장비를 사용하여 아스팔트 콘크리트의 피로거동을 분석한 이후, Epps<sup>(4)</sup> 등 많은 연구자들에 의해 응력 또는 하중제어의 실내 시험성과에 의한 파괴기준식들이 제안되었다. 그러나 이와 같이 제안된 파괴기준식은 현장조건과 다르기 때문에 현장조건으로 전환해야 하는 문제가 발생하며, 이를 해결하기 위하여 Santucci<sup>(5)</sup> 등은 전환계수를 사용하여 실내 시험성과에 의한 파괴기준식을 현장에 적용하고 있다. 한편, 도로시험성과를 이용한 경우로 1972년 Kingham<sup>(6)</sup> 등과, 1977년 Finn<sup>(7)</sup> 등은 AASHO 도로시험자료를 이용하여 표층의 탄성계수가  $7 \times 10^5$  psi인 아스팔트 콘크리트 포장체의 피로 파괴기준을 제안하였고, 1975년 ARE<sup>(8)</sup>에서는 AASHO Road Test Section 27의 시험자료를 분석하여 표층의 탄성계수가  $4.6 \times 10^5$  psi인 아스팔트 콘크리트 포장체에 대한 피로 파괴기준식을 제안하였다. 1981년 Mahoney와 Ter-

rel<sup>(9)</sup>은 워싱턴 주립대학 도로시험용 track의 아스팔트 콘크리트 층 저면에 설치된 strain coil로부터 얻어진 실측 변형률과 다층 탄성해석 전산 프로그램인 BISAR에 의한 해석적 변형률을 종합한 회귀 분석으로부터 피로 파괴기준식을 제안하였다.

그러나 이와 같은 파괴기준식들은 지역적 특성이 비슷하고 특정 재료의 아스팔트 콘크리트 표층을 갖고 있는 포장체의 경우에만 적용이 가능하며, 또한 파괴조건을 표층에서의 균열발생으로 본 것이기 때문에 PSI(present servicability index) 등 다른 공용성 인자의 저하를 파괴조건으로 한 경우에는 적용이 곤란하다. 본 연구에서는 AASHO 설계법을 포장설계에 주로 사용하고 있으며, PSI를 기준으로 한 포장체의 공용성 평가를 하고 있는 우리나라의 실정을 고려하여, PSI의 저하를 포장체의 공용성 모델로 한 AASHO 설계식을 이용하여 파괴기준식을 제안하고자 한다.

## 2. 피로 파괴 기준<sup>(2)</sup>

포장체의 구조적 능력의 평가는 표준축하중에 의해 유발되는 아스팔트 콘크리트 하단의 최대 인장 변형률과 포장체가 특정 파괴조건까지 수용할 수 있는 통과가능 교통량과의 관계인  $\log \epsilon - \log N$ 로부터 추정하고 있으며, 이들 관계설정을 위한 방법들을 살펴보면 다음과 같다.

### 2.1 기존 설계식을 이용하는 방법

기존 설계식에 적용되는 교통량이 등가축하중으로 대표되는 경우 설계식으로부터 파괴기준식을 설정할 수 있다. 이 때 인장변형률은 다층 탄성 이론에 의해 산정되며, 교통량은 설계식으로부터 역산 추정된다.

이와 같은 방법은 간단하며, 실제와 잘 부합되는 장점이 있으며, 특히 설계식이 개발된 지역이나 비슷한 기후특성을 보이는 경우에는 더욱 효과적이다. 단점으로는 연중 포장체의 대표적 상태만이 고려된다. 또한 설계식 개발이 단지 피로에 의한 파괴특성분석에 의해 개발되어야 효과적이지만 대부분의 설계식이 포장체의 모든 파괴거동을 동시에 고려하고 있다. 아스팔트 콘크리트의 혼합배합률이 새로운 종류나 다른 경우는 적용하기가 곤란하다.

## 2.2 현장 시험자료를 이용하는 방법

교통량 자료와 공용성 이력을 알고 있는 포장체로부터 직접 파괴기준설정에 필요한 자료를 얻을 수 있다. 실내시험이나 현장시험을 통해 재료의 물성을 추정하여 파괴기준설정에 정확성을 높일 수 있다. 분석은 피로에 의해 파괴가 확인된 구간에 한한다. 연중 포장체의 물성이 변하기 때문에 Miner's rule을 필요로 한다.

## 2.3 실내 시험자료를 이용하는 방법

시험시편은 파괴시까지 반복하중을 받게 되며 반복처짐이 LVDT에 의해 측정되고 변형률이 산정된다. 따라서, 파괴시까지 작용한 반복하중과 변형률과의 관계를 직접 설정할 수 있다. 그러나 실내시험에 의한 파괴기준은 실제 현장적용을 위한 전환을 요한다. 표 1은 실내 시험성과를 현장에 적용하기 위한 전환계수의 예를 보여주고 있다.

## 3. AASHTO 설계식과 다층 탄성해석

본 연구에서는 우리나라 고속도로를 포함한 포장체의 표준단면과 포장체 각 층의 탄성계수 저하특성을 고려한 아스팔트 콘크리트 포장체의 파괴기준식을 제안하기 위하여 요인배치에 의한 대표적 포장모델을 선정하고, 이를 AASHTO 설계식과 다층 탄성해석에 적용, 교통량-변형을 관계를 회귀분석하고자 한다. 이와 같은 일련의 과정에 기본적으로 적용하게 되는 AASHTO 설계식과 다층 탄성해석에 관하여 살펴보면 다음과 같다.

아스팔트 콘크리트 포장도로의 설계법으로 가장 널리 사용되는 AASHTO 설계법<sup>(10)</sup>은 AASHTO Road Test의 성과를 근거로 제안된 것으로 '72년 잠정설계식을 보완하여 '86년에는 다음과 같은 개정 설계식이 제안되었다.

$$\log_{10}W_{18} = Z_R S_0 + 9.36 \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10}[\Delta PSI / (4.2 - 1.5)]}{0.40 + [1094 / (SN + 1)^{5.19}]} + 2.32 \log_{10}M_R - 8.07 \quad (1)$$

'86 설계식이 '72 설계식에 비하여 발전된 면을 살펴 보면 다음과 같다. 우선 포장체의 탄성해석적 측면을 고려하여 설계에 기본적으로 적용되는 노상의 물성을 노상지지계수에서 탄성계수( $M_R$ ) 개념으로 대체하고, 표 2에서 보는 바와 같이 재료의 상대강도계수를 탄성계수로 전환할 수 있는 식을 제안하였다. 또한 확률론적 접근을 도입하여 포장도로가 공용기간 동안의 설계차량통과대수에 대하여 계획된 최종 공용성 수준을 넘지 않을 확률인 신뢰도를 설계에 반영하고 있다. 식 (1)에서  $Z_R$ 은 신뢰도 수준에 대한 표준정규편차이며,  $S_0$ 는 전체표준편차이다.

아스팔트 콘크리트 포장체의 응력 및 변형을 산정을 위해서는 Burmister<sup>(11)</sup>의 층 탄성이론이 널리 이용되고 있으며, 이를 전산화한 프로그램으로는 BISAR, ELSYM5, CHEVRON 등이 개발되어 사용되고 있다. 이와 같은 전산 프로그램은 서로 비슷한 알고리즘으로 개발된 것이지만 수치적분 방식에 따라 결과치에 다소 차이를 보여준다. 본 연구에서는

표 1. 현장 전환계수<sup>(2)</sup>

Researcher	Relationship
Brown and Pell	$N_{field} = 20 N_{lab}$
Van dijk	$N_{field} = 3 N_{lab}$
Pickett, et al	$N_{field} = K N_{lab}$ , where $K = 0.516 \times 10^{0.0147T}$ , $T = \text{Temperature, } ^\circ\text{F}$
Finn, et al.	$N_{field} = 13.03 N_{lab}$
Santucci	$N_{field} = N_{lab} \times 10^m$ , where $m = 4.84 \times (V_b / (V_v + V_b)) - 0.69$ $V_b = \text{asphalt volume,}$ $V_v = \text{air voids volume}$

표 2. 상대강도계수-탄성계수 관계식<sup>(1)</sup>

(단위 : inch, pound)		
층구분	관 계 식	범 위
표층	$a_1 = 0.40 \times \log(E/435 \text{ ksi}) + 0.44$	$0.20 < a_1 < 0.44$
쇄석기층	$a_2 = 0.25 \times \log(E/23 \text{ ksi}) + 0.11$	$0.06 < a_1 < 0.20$
아스팔트	$a_2 = 0.30 \times \log(E/435 \text{ ksi}) + 0.33$	$0.10 < a_1 < 0.30$
안정처리기층	$a_3 = 0.23 \times \log(E/23 \text{ ksi}) + 0.15$	$0.06 < a_1 < 0.20$

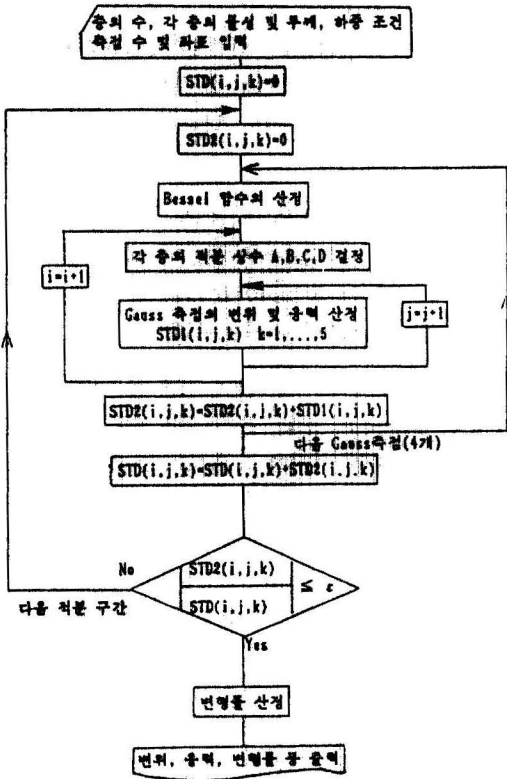


그림 1. SINELA의 전산흐름도<sup>(12)</sup>

수치적분 구간을 보다 세분화하여 해석결과가 보다 실제적이며 신뢰성을 주는 다층 탄성 전산 프로그램인 SINELA<sup>(12)</sup>를 사용하고자 한다. 이와 같은 SINELA의 전산 흐름도는 그림 1과 같다.

#### 4. 해석 모델의 설정

국내에서 사용중인 아스팔트 콘크리트 포장체는 주로 쇄석 또는 아스팔트 안정처리 기층을 갖는 4층 포장구조체이며, 설계 및 해석에 적용되는 대표적 차량하중은 AASHTO 기준의 8.2 ton 등가단축하중 (18 kips ESAL)을 표준축하중으로 하고 있다. 그림 2는 포장구조체에 작용하는 표준축하중의 한쪽 차륜부를 보여주는 것으로 4.1 ton dual wheel 조건의 해석단면의 구성도를 나타낸 것이다.

그림 2에서 보는 바와 같이 하중재하모델<sup>(13)</sup>로는 두 바퀴의 중심간 거리 35.56 cm(14 inch), 접지압 5.8 kgf/cm<sup>2</sup>, 바퀴 하나의 접지반경 10.6 cm로 포장

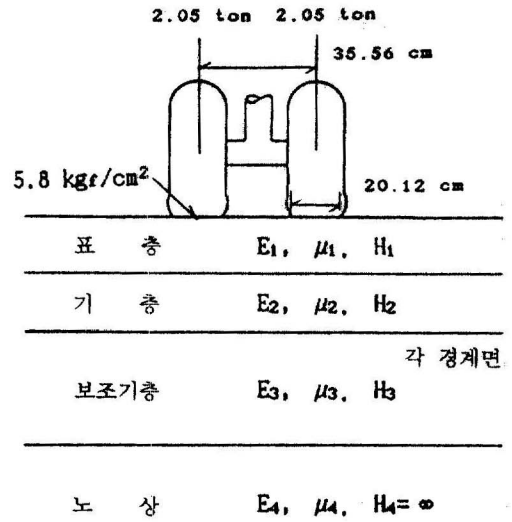


그림 2. 해석 포장 모델의 구성도

표 3. 쇄석기층을 갖는 경우 요인배치

요 인	수 준	AC표층	기 층	보조기층	노 상
두 겹 (cm)	하	5	10	20	$\infty$
	중	15	20	40	$\infty$
	상	25	30	60	$\infty$
탄성계수 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	하	8000	1200	600	200
	중	20000	2500	1000	500
	상	32000	3800	1500	1000
포아송비		0.3	0.35	0.35	0.40

체에 가해지는 총하중은 표준축하중의 절반인 4.1 ton으로 하고, 포장체모델로는 각 층의 물성인 탄성계수(E)와 포아송비( $\mu$ )를 변화시키면서 다층 탄성모델을 구성하였다. 대표적 해석모델의 선정을 위하여 국내 고속도로의 단면을 근거로한 각 층 두께의 요인배치를 하였으며, 각 층의 탄성계수는 AASHTO 제안의 신설 포장체가 갖는 대표적인 값을 상수준으로 하고 이들 값이 다시 중, 하 수준으로 저하하는 경우를 고려하여 3수준 요인배치를 실시 하였다. 표 3은 쇄석기층을 갖는 경우, 표 4는 아스팔트 안정처리 기층을 갖는 경우의 포장 물성에 대한 요인배치 결과를 보여주고 있다.

요인배치 자료로부터 분석에 사용된 포장모델로는 보편적 포장두께의 구성 요건인 표층두께 < 기층두

표 4. 안정처리 기층을 갖는 경우 요인배치

요 인	수 준	AC표층	기 층	보조기층	노 상
두 계 (cm)	하	5	10	20	∞
	중	15	20	40	∞
	상	25	30	60	∞
탄성계수 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	하	8000	4000	600	200
	중	20000	14000	1000	500
	상	32000	24000	1500	1000
포아송비		0.3	0.3	0.35	0.40

계<보조기층두께를 만족하는 15개의 단면모델과 탄성계수 변화모델로 3(표층)×3(기층)×3(보조기층)×3(노상)=81개, 섹션 및 안정처리 기층의 두 경우로 총 2430개의 해석단면모델을 구성하였다.

### 5. 파괴기준식 제안

본 연구에서 아스팔트 콘크리트 포장체의 파괴기준식은 포장 구조체를 다층 탄성모델화하여 표준축하중의 한쪽 차륜부 하중(4.1 ton dual wheel 조건)에 의해 유발되는 아스팔트 콘크리트 층 하단에서의 최대 인장변형률과 AASHTO 설계식에 해석대상 포장모델의 제반 물성치를 적용하여 산정된 통과예상 교통량과의 관계를 회귀분석하는 해석적 역산기법으로부터 제안되었다.

#### 5.1 파괴기준식 개발

변형률과 교통량의 파괴기준식 개발과 관련하여 변형률 산정을 위한 다층 탄성해석에는 Huang에 의해 개발된 전산 프로그램인 SINELA를 사용하였고, 교통량 산정은 AASHTO 설계식에 포장모델의 제반 물성을 적용하여 역산하는 방법을 사용하였다. 설계식에 적용한 물성으로  $SN(=\sum a_i H_i)$  값의 산정에는 표 2의 상대강도계수-탄성계수 관계식을 이용하여 다층탄성모델화한 포장층의 탄성계수를 상대강도계수로 전환하고, 배수계수는 평균적 수준을 고려하여 1을 적용하였다. 또한 공용성저하 특성치는 최종 공용성을  $PSI=2.5$ 로 한  $\Delta PSI=1.7$ 을 적용하고 전체표준정규편차( $S_0$ )는 장래 차량의 분산을 고려치 않은 경우인 0.49로 하여 신뢰도 50%와 95%인 경우의 교통량을 각각 역산하였다<sup>(10)</sup>. 그림 3은

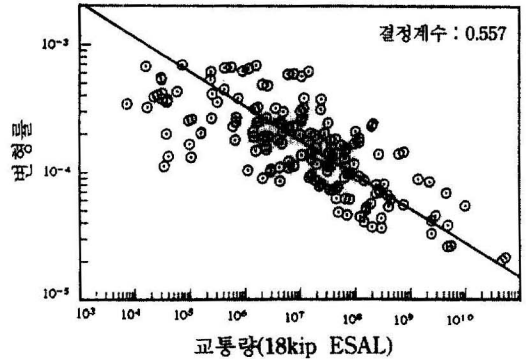


그림 3. 50% 신뢰도 조건의 변형률-교통량 관계

신뢰도 50% 수준에서의 교통량과 변형률 관계의 분포특성을 보여주고 있다.

그림 3에서 결정계수는 0.557로, 같은 변형률 조건에서도 교통량에 대한 분산 정도가 큰 것을 알 수 있다. 이와 같은 분산을 주는 요인 중의 하나는 AASHTO 설계식이 다층 탄성해석적인 면에서 일관성을 주지 못하는 것으로, 특히 노상의 탄성계수-교통량의 관계와 노상의 탄성계수-변형률의 관계에서 노상의 탄성계수에 따라 교통량-변형률의 관계가 상이하며, 노상 탄성계수에 의존적 분포 특성을 보인다. 이와 같은 결과는 Ullidtz에 의해서도 확인된 바 있으며, Ullidtz는 다층 탄성해석 이론을 도입하여 노상 탄성계수에 의존한 분산특성을 억제할 수 있도록 AASHTO 설계식의 계수를 조정하여 수정 AASHTO 설계식을 제안한 바 있다<sup>(1)</sup>. 이와 같은 수정 AASHTO 설계식은, 노상 상부의 압축응력과 교통량의 관계식 제안에는 분산 정도가 적은 결과를 주지만 아스팔트 콘크리트층 하단의 인장변형률과 교통량과의 관계식 제안에는 그 분산 정도가 크게 나타나고 있다<sup>(15)</sup>.

따라서, 본 연구에서는 노상의 탄성계수를 추가 변수조건으로 한 파괴기준식을 AASHTO 설계식을 이용하여 회귀분석 하였으며, 회귀분석 결과는 식 (2), 식 (3)과 같다.

$$\text{신뢰도 50\% : } N = 6.92 \times 10^{-7} (1/\epsilon)^{3.49} (E_4/500)^{2.03} \quad (2)$$

$$\text{신뢰도 95\% : } N = 1.07 \times 10^{-7} (1/\epsilon)^{3.49} (E_4/500)^{2.03} \quad (3)$$

여기서,  $E_4$  (kgf/cm<sup>2</sup>)는 노상의 탄성계수, 500 (kgf/cm<sup>2</sup>)는 reference 탄성계수이며 각 식의 결정계수는

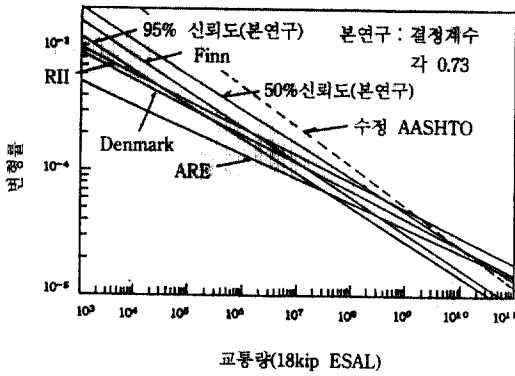


그림 4. 파괴기준식의 비교

0.73으로 그림 3의 결과에 비해 개선된 관계식임을 알 수 있다.

### 5.2 비교 고찰

그림 4는 본 연구에서 개발한 파괴기준식과 다른 관련기관에서 제안한 파괴기준식을 비교 도시한 것이다. 그림 4에서 50%와 95% 신뢰도 조건의 파괴기준식은 본 연구의 분석결과로, 95% 신뢰도 조건의 파괴기준식은 log N-log ε 좌표계에서 50% 신뢰도 조건의 파괴기준식이 교통량 추정에 안전한 결과를 줄 수 있게 평행 이동한 형태이다. 또한 식 (1)에서 제 조건이 같고 신뢰도 조건만 다르다면 교통량추정이 신뢰도 조건에 따라 변하고 log N-log ε 좌표계에서는 log N값만 변하여 결국 파괴기준식은 log N=log ε 좌표계에서 신뢰도 조건에 따라 평행이동하는 것을 알 수 있다. 따라서 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 신뢰도 수준에 따른 파괴기준을 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$N = 10^{(0.49 \times Z_R)} \times 6.92 \times 10^{-7} (1/\epsilon)^{3.49} (E_s/500)^{2.03} \quad (4)$$

여기서,  $Z_R$ 은 AASHTO 식의 신뢰도 조건에 따른 표준정규편차이며, 음수의 값을 갖는다.

그림 4에서 본 연구에서 제안된 파괴기준은 공용성한계 PSI=2.5로 하여 제안된 것이며, 타 기관에서 제안된 파괴기준들 중 수정 AASHTO 식에 의한 파괴기준을 제외한 나머지 관계식들은 균열발생을 공용성한계로 하여 제안된 것이다. 그림 4에서 살펴보면 95% 신뢰도 조건의 파괴기준은 RII<sup>(14)</sup>, Denmark<sup>(1)</sup>, Finn<sup>(7)</sup>에 의해 제안된 파괴기준과 비슷한 정도의 교통량을 추정하는 것을 알 수 있으며,

50% 신뢰도 조건의 파괴기준은 다른 파괴기준보다 교통량을 많게 추정하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 분석 결과로부터 95% 신뢰도 수준의 파괴기준은 균열발생을 파괴한계로 통과이상교통량을 추정하는데 적용 가능하리라 판단된다. 수정 AASHTO 식을 이용한 파괴기준은 본 연구의 방법과 비슷한 과정을 거쳐 개발되었으나 차량하중을 단륜으로 보았고, 결정계수도 0.68로 다소 낮은 값으로 나타나고 있어 본 연구 결과가 보다 개선된 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 공용성 평가에 적용가능하며, 포장체의 덧씌우기설계와 damage effect 분석에 의한 설계은도추정에 효율적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 국내 고속도로의 단면 특성을 고려한 포장체의 파괴기준을 제안하기 위하여, 요인배치로 해석 단면모델을 설정하고 이를 AASHTO 설계식과 다층 탄성해석에 적용 통과이상 교통량과 아스팔트 콘크리트 층 하단에서의 최대 인장변형률과의 관계를 분석하였다. 교통량 추정은 최종공용성을 PSI=2.5로 하고 신뢰도를 50%와 95%로 하여 AASHTO 설계식으로부터 역산 추정하였으며, 변형률 산정은 다층 탄성해석 전산 프로그램인 SINELA를 이용하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 최종공용성을 PSI=2.5로 한 신뢰도 50%와 95% 조건의 파괴기준식을 제안하였다.
2. 신뢰도 95% 수준의 파괴기준식은 균열발생의 예측에 적용가능함을 알 수 있었다.
3. 신뢰도 수준에 따른 파괴기준을 신뢰도 50% 조건의 파괴기준식으로 추정할 수 있는 관계식을 제안하였다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 89-90년도 특정연구 지원사업으로 이루어진 것으로 본 연구를 가능케한 관계당국에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Ullidtz, P., *Pavement Analysis*, Elsevier, 1987.
2. Newcomb, D.F., Bubushait, A.A., Mahoney, J.P., and Sharma, J., "State-of-The-Art on Pavement Overlay Design Procedures Vol. 1", *WA-RD 65.1*, WSDOT, 1983.
3. Hveem, F.M., "Pavement Deflections and Fatigue Failures", *HRR 114*, HRB, 1955.
4. Epps, J.A. and Monismith, C.L., "Influence of Mixture Variables on the Flexural Fatigue Properties of Asphalt Concrete", *Proceedings*, AAPT, 1969.
5. Santucci, L.E., "Thickness Design Procedure for Asphalt and Emulsified Asphalt Mixes", *Proceedings*, 4th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement, 1977.
6. Kingham, R.I. and Kallas, B.F., "Laboratory Fatigue and Its Relationship to Pavement Performance", *RR-72-3*, Asphalt Institute, 1972.
7. Finn, F.N., Saraf, C., Kulkarni, R., Nair, K., Smith, W., and Abdullah, A., "The Use of Distress Prediction Subsystems for the Design of Pavement Structures", *Proceedings*, 4th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement, 1977.
8. ARE, "Asphalt Concrete Overlay of Flexible Pavements- Vol. 1 Development of New Design Criteria", *FHWA-RD-75-75*, FHWA, 1975.
9. Mahoney, J.P. and Terrel, R.L., "Sulfur Extended Asphalt Binder Evaluation", *Quarterly Project Report to Washington State DOT*, 1981.
10. AASHTO, *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, AASHTO, 1986.
11. Burmister, D.M., "The Theory of Stress and Displacement in Layered Systems and Applications to the Design of Airport", *Proceedings*, 3rd Annual Meeting, HRB, 1943.
12. Huang, Y.H., *Flexible Pavement Analysis Computer Program Manual*, Univ. of Kentucky, 1972.
13. Shargious, M., *Pavement and Surfacing for Highways and Airports*, Applied Science, London, 1975.
14. Majidzadeh, K. and Ilves, G., "Flexible Pavement Overlay Design Procedures", *FHWA-RD-81-032*, FHWA, 1981.
15. 김수일, 아스팔트 및 콘크리트 포장 구조체의 유지관리를 위한 시스템 개발(II), 한국과학재단, 1990.  
(接受: 1991. 7. 1)