

아스팔트 鋪裝道路의 確率論的 表層設計

Probabilistic Design of Asphalt Pavement Surface Course

金 光 宇*·延 圭 錫*
Kim, Kwang Woo ·Yeon, Kyu Seok

Summary

A prototype probabilistic approach to thickness design for asphalt pavement surface course was developed using first-order second moment probability model. The tensile strain (load effect) developing at the bottom of surface layer due to the wheel load and the critical strain (resistance) of asphalt concrete were used as random variables for pavement reliability analysis. Based on the parameters for load effect and resistance data collected from references and field, simulated data were generated by Monte Carlo method for reliability evaluation of the pavement for a typical rural highway. Thickness of pavement surface course was defined in terms of target reliability of the pavement, growth factor of traffic, design life of pavement and resistance of the asphalt concrete to be placed on the pavement. According to these rationales, prototype thickness design charts were suggested through example studies. From these, similar design charts can be developed for many pavements if appropriate data and target reliability are determined.

I. 緒 論

아스팔트 콘크리트 鋪裝(Asphalt Concrete Pavement)의 最上層인 表層(Surface Course)은 차량의 輪荷重에 의하여 하부의 어느 층보다도 가장 심한 영향을 받게 된다. 즉, 鋪裝의 여러 층중 表層은 高壓의 輪荷重의 직접적인 接觸을

받아 가장 큰 응력을 견디어야 하는, 도로의 궁극적 기능 수행에 있어서 가장 중요한 역할을 하는 부분이라고 할 수 있다. 그러므로, 도로의 路床이나 地盤과 基層의 設計나 시공이 잘 되어 있어도 表層의 불량으로 그 도로가 제 기능을 다하지 못하는 경우를 종종 볼 수 있다. 이러한 아스팔트 鋪裝道路 表層의 두께는 도로위에 재

* 江原大學校 農科大學

키워드 : 아스팔트, 延性鋪裝, 確率, 輪荷重, 確率變數, 信賴性, 층두께, 表層設計

하되는 차량에 의한 하중과 鋪裝材料, 즉, 아스팔트 콘크리트의 強度特性和 設計壽命에 의하여 결정되는 函數이다. 차량에 의하여 가해지는 輪荷重은 交通量 分布特性에 따르는 確率變數(Random Variable)이고, 鋪裝材料의 強度特性 역시 어떠한 분포형태를 가지는 確率變數라 할 수 있다.

각 차량의 輪荷重은 한 장소에서 보면 반복으로 작용되는 하중으로써 아스팔트 콘크리트의 내부에 단기간 동안 應力과 변형을 발생시키며, 이때 야기되는 변형은 輪荷重의 세기와 層두께 그리고 재료의 성질(강도, 탄성계수, Poisson비 등)에 따르는 確率變數이다. 한번 발생된 변형은 粘彈性體로 간주되는 아스팔트 콘크리트 내부에서 일정 기간동안 존재하다가 시간이 감에 따라 사라진다. 포장의 재료인 아스팔트 콘크리트의 강도는 이에 대응되는 변수로서 하중효과에 대한 저항치라 할 수 있다. 그러므로, 表層의 두께결정에 이 하중에 의한 변형과 材料의 強度특성을 이용한 確率論적인 設計方法이 사용될 수 있다. 이때 어떤 道路表層의 信賴度란 그 위에 가해지는 交通荷重 하에서 그 表層이 기능을 잘 수행하는지 여부를 나타내는 尺度가 된다. 그러므로, 어떤 目標信賴도가 설정되면 포장의 두께는 交通量의 資料와, 鋪裝材料의 특성 그리고, 그 目標信賴도의 函數關係로부터 얻어질 수 있다.

하지만, 지금까지 알려진 아스팔트 포장도로의 表層 設計方法은 確率論적인 것에 근거하는 것이 아니라, 決定論(Deterministic)적인 것에 근거하여 劃一적으로 수행되어 왔다고 할 수 있다. 다시 말하여, 設計 하고자 하는 도로에 가해질 차량의 荷重과 表層材料의 성질을 각각의 變數로 보고 破壞確率적 측면에서 안전한 설계를 한 것이 아니라, 도로의 등급에 따라 일률적으로 表層의 두께를 결정하는 설계방법을 사용하여 왔다. 그러므로, 차량의 多樣한 分布와 變化에 따르는 不確實性 등을 설계에 反映 하지 못하는

문제점이 있어 왔다. 그러므로, 포장 설계에 있어서 보다 効率的이고 實際的인 設計方案의 提示가 필요하여 온 실정이다.

앞으로 이 방향의 계속적인 연구는 目標信賴도를 設定함에 있어서 地域的인 氣候의 特性에 따른 變數, 도로의 等級에 따른 變數, 그리고, 設計壽命에 따른 變數 등의 反映도 가능할 것이다. 따라서, 確率論적 設計方法은 荷重의 不確實性, 材料強度의 不確實性은 물론 環境 條件에 따른 變數 까지를 考慮하여 가장 적합한 표층설계를 할 수 있는 보다 進歩된 設計 방법 중의 하나라 할 수 있다. 그러므로, 본 研究의 目的은 아스팔트 鋪裝의 表層을 確率論的으로 설계하는 方案의 하나로서 포장재료의 抵抗과 輪하중에 의한 하중효과를 이용한 표층의 두께를 결정하는 방법을 提示하는 것이다.

II. 아스팔트 鋪裝構造와 力學的 背景

1. 아스팔트 콘크리트(延性) 鋪裝

延性 鋪裝 설계의 기본개념은 포장위에 가해진 荷重을 여러겹의 포장층을 통하여 하부의 路床(地盤)으로 전달하여 分散시키는 것이다.¹²⁾ 그러므로, 아스팔트포장의 強度라는 것은 콘크리트처럼 Slab의 휨강도로 荷重을 지지하는 것이 아니라, 地盤으로 하중을 널리 분포시켜 전달하는 두꺼운 층을 형성함으로써 얻어지는 결과라 할 수 있다. 따라서, 아스팔트 포장은 대부분 여러 개의 층(Layer or Course)으로 이루어져야 한다.

포장구조의 형태나 층수는 도로의 종류나 그 지역의 氣候나 交通條件에 따라 결정된다. 性能面에서 가장 이상적인 포장구조는 Full Depth 아스팔트 포장일 것이다. 하지만, 이것은 건설 비용이 많이 들어 고급도로인 고속도로 등의 건설시에 이용되고 국내에서는 이보다 비용이 덜 드는 略式 鋪裝을 건설하여 왔다. 이 중 많은 도로는 地盤(路床) 위에 略式 基層(Untreated

Base Course)을 설치하고 약 10cm 전후의 아스팔트 포장층(표층)을 설치하는 방법이 많이 사용되어 왔다.

2. 아스팔트 포장내부의 응력 및 변형률

아스팔트 포장에 사용되는 아스팔트 콘크리트는 고형물질로써 약 90% 이상이 골재(굵은 골재, 잔 골재, 석분)로 되어 있어 彈性體로 보는 경우가 많다. 그러나, 그 골재들을 結束하고 있는 결합제가 粘性物質인 아스팔트 시멘트(Asphalt Cement)이므로 아스팔트 콘크리트를 粘彈性體(Viscoelastic Body)로 보는 경우도 많다. 어떠한 경우이든 이 아스팔트 포장재료는 그 해석을 위하여 많은 假定이 필요한데 본 연구에서도 다음과 같은 假定이 사용되었다.

1. 각 층에서의 재료의 성질은 동질이다.
2. 각 층은 모든 방향으로 같은 성질을 가진다.
3. 각 층 사이의 연결부에서는 완전한 마찰력이 작용하고 있다.
4. 포장의 상태는 모두 표준온도(25℃) 하에 있는것으로 본다.

어떤 輪荷重(Wheel Load)이 포장의 표면에 작용하면 일정 깊이의 포장내부에는 수평방향인 종방향과 횡방향 그리고 수직방향등 3방향에 應力이 발생하게 되며, 彈性體로 볼 경우 Hook법칙에 의하여 각 방향의 변형률이 계산되어 질 수 있다. 비록 아스팔트 콘크리트의 재료가 비선형적 성질을 가지지만 낮은 응력 상태에서는 선형적 해석으로 충분하다.

아스팔트 콘크리트를 粘彈性체재료로 해석할 경우 Maxwell 모델과 Kelvin 모델이 대표적으로 이용될 수 있다.⁵⁾ 본 연구에서는 비교적 간단히 Spring과 Dashpot로 이루어진 Maxwell 모델을 (그림 1) 考察하여 적용해 보기로 한다. 이 모델에 의하면 변형률은 시간과 응력, 탄성계수와 Dashpot의 점성계수의 函數로써 다음 식으로 표현된다.¹²⁾

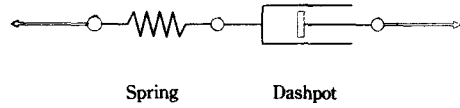


Fig. 1. Spring and dashpot in series : Maxwell Material⁵⁾

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma}{E} - \frac{\sigma \cdot t}{\eta} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, t = 시간

σ = 응력

E = 탄성계수

η = Dashpot의 점성계수이다.

따라서, 변형률의 최대치는 t=0일때 σ/E이며 이렇게 한번 발생한 변형률은 시간이 갈에 따라 점차 작아지게 된다. 윗 식에서 보듯이 시간 t가 응력을 가한 시간으로 부터 어느 정도 지나 t=η/E의 크기가 되면 ε=0로 변형은 完全回復됨을 알 수 있다. 하지만, 앞에서 言及하였듯이 아스팔트 콘크리트는 탄성체로도 많이 간주되고 있으며 특히, 아스팔트 콘크리트가 도로에 打設되어 다져진 후 차량등에 의하여 그 밀도가 최대 다짐밀도에 근접한다면 탄성체로의 해석에도 큰 문제는 없다. 따라서, 가장 많이 적용되고 있는 延性鋪裝解析理論은 층상탄성이론(Multilayer Elastic Theory)이다. 그러므로, 본 연구는 각종 차량들이 일정한 시간 간격을 두고 통과하여 포장내부에 변형이 累積되는 양이 무시되어도 좋을 정도로 적다고 보고 t=0일때의 최대치만을 사용하도록 한다. 여기서 輪荷重에 의한 주어진 포장층의 최대 변형률은 表層下端의 인장 변형률이며, σ는 층상탄성이론에 의한 표층하단의 주 응력인 종방향 수평 인장응력, 그리고 E는 동탄성계수 또는 Resilient Modulus (M_R)를 사용하도록 한다.

3. 輪荷重과 荷重效果

포장에 작용하는 하중은 차륜에 따르는 임의의 하중(Random Load)으로 간주한다. 설계차선위

의 하중은 지역의 특성에 따른 차량분포에 따라 다르며 그 분포특성으로부터 輪荷重의 분포를 얻을 수 있다. 설계에 사용되는 차량분포는 2축이상의 트럭만을 고려한다. 트럭하중에 있어 표준이 되는 하중은 등가축하중(EAL)으로 80 KN(8,150kg) 이다. 이는 하나의 차축에 80KN이 작용하는 하중이며, 이것을 트럭계수(Truck Factor)로 환산할 때 1로 한다. 따라서 어떤 차량(트럭)의 축하중이 80KN 보다 작으면 그것의 트럭계수는 1 보다 작은 수로, 그리고 80KN 보다 크면 1 보다 큰 수가 된다(한국설계기준 자동차 하중중 가장 큰 DB-24의 하중은 9,600kg임).

미국의 The Asphalt Institute(TAI)의 자료에 의하면¹⁾, 지역과 도로의 종류에 따라 각종 트럭의 분포 비율과 그 축 하중의 범위가 다르게 되어 있다. 하지만, 일반적으로 대부분 지역에서(특정 건설공사지역 등 제외) 축 하중에 대한 트럭계수는 1 보다 작은 것이 훨씬 많다. 따라서, 륜하중의 분포도 正規分布를 따르지 않는 것을 알 수 있다.

道路鋪裝은 路床이나 地盤에 缺陷이 없다면 결국 輪荷重에 의한 荷重效果가 포장자체의 임계치를 넘음으로써 파괴에 이르게 될 것이다. 앞서 언급하였듯이, 표면에 작용하는 륜하중은 표층의 下端에 종방향(또는 횡방향)의 인장 변형(Horizontal Tensile Strain)을 일으킨다. 이 때 륜하중 하의 응력과 변형률은 하중이 작용하는 축을 따라 최대이고 축으로 부터 벗어남에 따라 점차 작아진다(Fig. 2)²⁾. 또한, 하중 작용축에서 종방향과 횡방향 인장응력은 서로 같은 값을 가진다. 이 때의 인장 응력은 Boussinesque의 단층응력해석 공식으로부터 구해질 수 있다. 이 공식은 Ahlvin과 Utery의 수정을 거쳐 다음과 같이 발전하였다.

$$\sigma_r = p[2\mu A + C + (1 - 2\mu)F] \dots\dots\dots(2)$$

여기서 σ_r 는 종방향 수평응력(인장응력), p는 차량에 의해 표면에 가해진 압력이며, A, C,

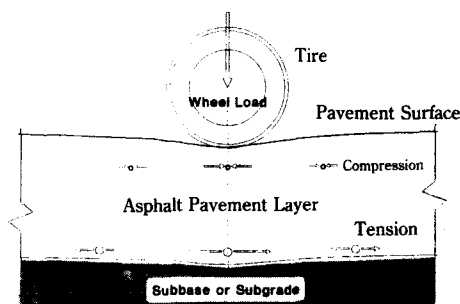


Fig. 2. Wheel load and load induced stresses in pavement

F는 층두께에 따르는 단층탄성합수 값이고, μ 는 아스팔트 콘크리트의 Poisson 比이다. 따라서, 표층의 한 지점에서 보았을때, 륜하중에 의한 인장변형은 표면에 가해지는 륜하중의 크기와 層 두께의 函數가 됨을 알 수 있다. 즉, 축 하중을 L, 층 두께를 T라 하면 $\sigma_r = f(L, T)$ 이며, 인장변형은 인장응력과 탄성계수의 함수인 $\epsilon = f(\sigma_r, E)$ 이다. 결국, 인장변형은 $\epsilon = f(L, T, E)$ 임을 알 수 있다. 그러므로, 륜하중의 분포와 표층 두께의 분포를 알면 인장응력의 분포를 시뮬레이션을 통하여 구할 수 있고 탄성계수의 분포를 알면 인장변형의 분포를 알 수 있다.

4. 鋪裝材料의 性質

아스팔트 포장은 여러가지 층상구조로 되어 있다. 특히, 아스팔트층인 표층의 성능은 그 하부의 지반과 기층에 瑕疵가 없다면 표층의 두께와 그 재료의 성질에 左右된다고 할 수 있다. 설계시 결정되는 포장의 층두께는 한가지 수치이지만 각각의 위치에 따라 차이가 있다. 원칙적으로는 모든 곳에서의 층 두께가 설계시 정해진 두께와 같아야 하겠지만 시공시 하부층의 平坦度 차이, 혼합물의 펼침두께 오차, 다짐오차 때문에 차이가 생기게 된다. 하지만, 층 두께가 所要의 크기를 가져야 鋪裝이 안정하게 된다. 이 층두께의 자료는 기존도로 포장의 코어를 채취하여 구해질 수 있다.

아스팔트 포장에 소요의 두께를 가진다 해도 그 자체의 강도등 재료의 성질이 不良하면 포장에는 損傷이 생기게 될 것이다. 포장 콘크리트의 성질중 가장 중요한 것은 강도이며, 이 강도 특성을 나타내는 것은 마찰 안정강도, 압축강도, 인장강도, 변형률, Poisson비, 탄성계수 등 여러가지가 있을 수 있다. 본 연구에서는 하중에 의한 변형에 대응하는 재료의 임계변형률을 강도 특성으로 사용키로 한다. 여러 가지 임계변형률중 임계인장변형률은 재료의 응력과 탄성계수에 따르는 종합적인 성질로 포장의 파괴에 있어서 가장 중요한 측정치라 하겠다. 특히, 略式으로 처리된 기층위에 비교적 얇은 表層으로 형성된 대부분의 국내 포장에 있어서 임계인장 변형률은 매우 중요한 재료의 성질이라 할 수 있다. 따라서, 이 값은 일정한 분포를 따른 확률변수라 할 수 있다. 이 임계인장변형률은 마찰 公試體를 간접인상 시험시 LVDT 등을 이용하여, 또는 Strain Gage 등으로 측정할 수 있고, 또는 탄성계수와 인장응력으로부터 구할 수 있다. 기존 포장 콘크리트의 臨界變形率을 추정하자면 포장으로부터 코어를 채취하여 해당 시험을 통하여 구할 수 있다.

III. 延性鋪裝數의 信賴性

1. 鋪裝의 破壞確率

포장의 信賴性 解析을 위하여는 포장구조나 破壞에 이르기 위한 荷重의 선정이 필요하다. 여기서의 하중은 기후조건에 의한 영향이나 도로상의 交通荷重같은 외부인자의 영향을 의미한다. 이 因子들은 포장에 荷重效果(Load Effect)를 일으키고, 여기서는 $S(s_1, s_2, \dots, s_n)$ 로써 표시하기로 한다. 하중에 대한 포장 자체의 반응은 구조체계특성에 의하여 결정되어진다. 포장구조의 體系特性은 체계에 가해진 하중에 대한 저항능력(Resistance)으로써 평가될 수 있다. 포장의 저항능력에는 재료의 특성 그리고

지반계수등이 포함될 것이다. 이 인자들을 $R(r_1, r_2, \dots, r_n)$ 로써 표시한다. 따라서, 파괴는 다음과 같을 때 일어나는 것으로 정의할 수 있다.

$$S(s_1, s_2, \dots, s_n) > R(r_1, r_2, \dots, r_n) \dots (3)$$

포장체계에 대한 이 식의 적용은 포장구조의 破壞確率(Probability of Failure)의 산정, 혹은 信賴性(Reliability)의 해석을 가능케 한다. 하지만, 식 3에서 양쪽 부등식을 적절히 공식화하기는 쉽지 않다. 게다가, 모든 인자를 고려하여 그들을 근거로 얻어진 합성함수로부터 체계의 완전한 信賴性 평가는 달성하기가 불가능할지도 모른다. 하나의 가능한 선택은 포장에서 대표적인 荷重效果와 그에 상응하는 저항에 근거한 형태의 確率모델을 공식화하는 것이다. 즉 하중영향을 S 그리고 그에 대응하는 저항력인 표층의 강도특성을 R로 하여 한계상태(Limit State)를 설정하면 다음과 같은 한계상태함수(Limit State Function)를 얻을 수 있다.

$$g(R, S) = 0 \dots \dots \dots (4)$$

여기서, R=抵抗

S=荷重影響 이다.

道路鋪裝에서 가장 지배적인 荷重效果는 輪荷重에 의한 것이다. 포장에 輪荷重이 荷重因子로서 선택된다면 이에 의해 惹起된 변형은 荷重效果이다. 따라서, 荷重效果으로써 인장변형을 취한다면 임계 변형치는 이에 상응하는 저항력이다. 그러면, 이 두 변수를 사용한 표층의 파괴확률은 식 5를 통하여 구할 수 있다.

$$P_f = P[(R-S) < 0] \dots \dots \dots (5)$$

“R-S”가 安全餘裕(Safety Margin)로 정의된다면, 그때 식 5의 $P[(R-S) > 0]$ 은 포장의 안전을 나타내는 確率이다. 이 경우, 표층아래의 포장상태는 非確率變數로 간주하고 본 信賴性 연구에서 변수로써 고려하지 않았다. 그러면 破壞確率, P_f 는 1계 2차 모멘트법(First-Order

Second Moment Method)에 의하여 정의된 평균 $\bar{Y} = \bar{R} - \bar{S}$ 와 표준편차 $\sigma_y = (\sigma_r^2 + \sigma_s^2)^{1/2}$ 을 이용 정리하여 식 6으로써 정의할 수 있다.

$$P_f = \phi \left[-(\bar{R} - \bar{S}) / (\sigma_r^2 + \sigma_s^2)^{1/2} \right] \dots\dots\dots(6)$$

여기서, $\phi []$ 는 정규화 변수에 대한 누적확률함수이고, 신뢰성 지수는 다음과 같이 정의된다.

$$\beta = (\bar{R} - \bar{S}) / (\sigma_r^2 + \sigma_s^2)^{1/2} \dots\dots\dots(7)$$

R과 S가 자연대수변수라면, 자연대수의 평균비 $\bar{Y} = \ln(\bar{R} / \bar{S})$ 와 표준편차 $\sigma_y = \sigma_{\ln(R/S)}$ 를 사용하여 β 를 정의할 수 있다.

$$\beta = \ln(\bar{R} / \bar{S}) / (V_r^2 + V_s^2)^{1/2} \dots\dots\dots(8)$$

여기서, V_s = 하중영향에 대한 變動係數
 V_r = 저항에 대한 變動係數
 $(V_r^2 + V_s^2)^{1/2}$ = R과 S에 관련된 不確實性 이다.

즉, 포장의 신뢰성은 표준화된 정규분포표로부터 구해진 β 에 대한 확률값(P)을 읽어 구하며, 이 때의 파괴확률은 "1-P"이 된다.

2. 信賴度 決定

윗 식에서 보듯이 표층에서 주어진 률하중분포에 대한 信賴度는 荷重影響인 인장변형률 S와 아스팔트 콘크리트의 저항치인 임계변형률 R을 비교하여 얻을 수 있다. 즉, 포장 내부에 발생하는 인장변형률이 포장의 臨界 인장변형률보다 크면 이 포장은 破壞가 일어난다. 따라서, 앞서 언급한 인장변형률과 임계변형률의 確率分布가 얻어졌다면, 信賴性指數 β 를 分布特性에 따라 식 7 또는 8로 구할 수 있거나, simulation을 통하여 또는 略算式으로 계산이 가능하다. 또한, 이 信賴性指數로부터 포장의 破壞確率(P_f)을 구할 수 있고 주어진 도로에 대한 期待信賴도와 비교하여 그 포장이 안전한지 여부를 결정할 수 있다. 기대신뢰도는 도로의 등급, 기후조건 또는

交通量에 따라 다르게 주어질 수 있는 값이다.

3. 確率論을 이용한 층두께 결정

앞에서 언급하였듯이 鋪裝의 信賴性은 주어진 차량하중과 층두께에 從屬하는 水平 인장변형과 포장콘크리트 자체의 강도특성과의 函數이다. 일정지역에 鋪裝建設을 할 경우, 사용될 재료는 어떤 규정에 의하여 사전에 선정되며, 그 재료를 사용한 현장 배합비(Job Mix Formula)가 정해진다. 따라서, 주어진 재료에 따른 아스팔트 콘크리트의 抵抗치의 통계적 자료를 얻을 수 있다. 또한, 주어진 지역에서의 현재 교통량이 얻어지면 적절한 증가계수를 사용하여 설계 輪荷重을 결정할 수 있다는 것을 안다. 따라서, 위 두 가지 변수의 분포를 알게 될 경우, 포장의 신뢰성은 결국 층 두께의 函數가 된다는 것을 알 수 있다. 다시 말하여 재료의 固有의 성질에 따른 포장 콘크리트의 변형 저항치와 그 도로 위에 작용할 교통량은 주어진 값이라하면, 결국 포장의 신뢰성은 층 두께에 의하여 조정 가능하다는 것을 알 수 있다. 따라서, 주어진 아스팔트 콘크리트의 強度 분포와 그 도로의 률하중의 분포가 주어지면 신뢰도와 층 두께의 관계에 따른 Chart를 만들 수 있을 것이다. 그러면, 이 Chart로부터 소요의 신뢰도에 따른 필요한 두께가 결정될 수 있다. 이 소요의 신뢰도의 선정문제는 매우 복잡한 과정을 거쳐 설계수명 또는 주위의 기후와 연관지을 수 있음을 추측할 수 있다. 하지만, 이 신뢰도의 선정문제는 본 연구의 범위밖에 있는 것이므로, 본 연구에서는 다루지 않기로 한다.

IV. 確率論的 表層두께 決定 例

1. Data

가. 수평인장 변형률(Load Effect)

본 예제에서는 률하중의 분포를 트럭계수를 기준으로 한 TAI¹⁾의 자료를 근거로하여 Monte

Carlo Simulation을 통하여 구하도록 하였다. 여기에 선정된 륜하중의 분포는 非都市地域 高速道路에 작용하는 트럭계수분포에 의한 것이다. 이 도로에도 등가축하중(EAL) 보다 가벼운 트럭이 훨씬 많기 때문에 트럭계수의 분포는 원편으로 치우친 對數正規分布(Lognormal Distribution)를 따르는 것으로 가정했다.

TAI의 자료에 의하면, 이런 類의 도로의 트럭계수 평균을 0.49, 그리고 범위는 0.01 부터 1.55로 제시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 이 범위를 6 등분한 값 0.2567을 트럭계수 분포의 표준편차로 하였다. 이 Parameter를 사용하여 일정 갯수의 정규분포변수를 생성하여 이것들을 자연대수로 취하고, 그로부터 얻어진 평균과 표준편차를 이용하여 자연대수 정규분포를 따르는 트럭계수를 생성하였다. 여기서 얻어진 값은 5,000회의 Monte Carlo Simulation으로 부터 얻은 값으로 이 도로에 가해지는 트럭계수의 값으로 假定하였다. Harr⁶⁾의 식에 의하면 본 연구에서 $P_f \leq 0.01$ 로 설정 할 경우 4,500회 이상의 반복이 필요하므로 Simulation 횟수를 5,000으로 결정하였다.

표준축(축하중 : 80KN) 양쪽에는 2중 타이어로 되어있어 총 4개의 타이어가 부착되어 있으며, 차륜과 포장표면의 접지형태는 원형, 이때의 반경(a)은 15cm로 가정하였다. 따라서, 표준축(트럭계수 1.0) 각 차륜에는 20KN의 하중이 均等히 작용하며, 그로 인한 포장표면에서의 接地壓力은 $P = 20 / (\pi \cdot a^2) = 282.94 \text{Kpa}$ 이다. 임의의 차량의 차륜에 의하여 가해지는 표면에서의 접지압력은 $282.94 \times (\text{Truck Factor})$ 로부터 계산되어진다. 그러면, 수평인장응력의 값은 식 2로 부터 구하여지며 이용력으로부터 변형률을 식 1의 前항만을 사용하여 계산할 수 있다. 이 때, Poisson 비는 일반적으로 많이 사용되는 $\mu = 0.35$ 로 일정한 값을 사용하였다. A, C, F는 총 두께에 따라 결정되는 탄성함수값으로 문헌¹²⁾로 부터 구할 수 있으며, 총 두께의 분

포로부터 얻어지는 임의의 수에 따라 결정되는 값이다. 총 두께의 분포는 文獻⁸⁾에 의하면 對數正規分布를 따르는 것으로 알려져 있으므로, 임의의 총 두께는 대수정규분포를 따르는 임의의 수를 사용하였다. 재료의 성질중 하나인 탄성계수는 현장의 코어로부터 얻어진 공시체로부터 측정된 Resilient Modulus(M_R)를 사용하였으며 이것도 대수정규분포를 따른다.⁴⁾ 따라서, 인장 변형률은 위의 여러가지 자료를 근거로 Monte Carlo Simulation을 통하여 구하였으며 그 분포도 대수 정규분포를 보인다. 본 연구에서 예시된 자료들을 정리하여 보면 Table-1과 같다.

나. 임계인장 변형률(Resistance)

아스팔트 콘크리트의 인장 변형률은 인장강도와 彈性계수로 부터 구하거나 실제 시험시 Strain Gage를 이용한 변형률의 측정이 가능하다. 본 연구에서는 인장강도와 동탄성계수 Data^{3,4)}를 구하여 그에 대한 適合度시험¹¹⁾을 통하여 그 분포들을 구하고 그로부터 임계인장강도치의 Parameter를 구하였다. 이에 대한 값도 Table-1에 제시되어 있다.

2. 設計方案의 類推를 위한 變數들의 相關關係와 信賴度 分析

가. R과 S의 不確實性

인장 변형률의 變異는 총 두께, 탄성계수 그리고 輪荷重의 변이에 따른다. 륜하중의 변이는 교통량의 다양성에 의해 생긴다. 총 두께의 변이는 건설공사시의 오차와 Rutting이나 Plastic Flow 등과 같은 표면의 다양한 損傷때문에 생긴다. 본 연구에 사용된 자료에 의하면, 차량에 의한 륜하중(트럭계수로 표현)의 변동계수는 52.4%이며, 문헌⁹⁾에 의하면 총 두께의 변동계수는 20% 내외이다. Table-1에서 볼 수 있듯이 륜하중의 변이가 훨씬 크다. 하지만, 대부분의 경우 그렇듯이 교통량에 대한 변이는 그 자체가 그 지역이 가지는 교통량의 特性으로써 인위적

Table-1. Statistical Distribution and Its Parameters

Variable	Probability Distribution	Mean	Standard Deviation	Coefficient of Variation
Truck Factor	Log-Normal	0.4900	0.2567	52.39%
Resilient Modulus (Gpa)	Log-Normal	1.8638	0.3867	20.75%
Thickness (cm)	Log-Normal	————	Variable	————
Horizontal Strain (μ)	Log-Normal	————	Variable	————
Critical Strain (μ)	Log-Normal	210.00	42.000	20.00%

조정이 불가능하다. 하지만 포장의 강도특성상의 變異는 재료자체의 변이와 건설시의 오차를 줄여서 어느정도 축소가 가능하다.

재료의 불균질(Variability)에 따르는 변이는 品質管理를 통하여 조정될 수 있다. 마찬가지로 건설시의 오차도 철저한 공사감독과 품질관리를 통하여 줄일 수 있다. 그래서, 건설오차의 통계는 결과적으로 층 두께와 彈性係數의 變異를 줄이는 역할을 하게 될 것이다. 따라서, 륜하중 變異의 통계가 불가능하므로 재료와 시공의 統制만이 인장 변형률의 變異를 통제할 수 있는 방법이 된다. 하지만 어떠한 경우이고 재료 자체의 품질차이와 施工상의 오차 때문에 이 變異는 줄일 수는 있으나 완전히 제거할 수는 없다.

여기서, 륜하중과 층 두께등의 變異에 從屬하는 인장 변형률의 변동계수와 아스팔트 콘크리트 자체가 가지는 임계 변형률의 변동계수를 통합하는 항, 즉 식 8의 분모 $\sqrt{V_r^2 + V_s^2}$ 가 信賴性 해석에서의 不確實性이다.⁷⁾ 같은 평균비 \bar{R}/\bar{S} 를 가진다고 해도 각 값의 變異가 크면 不確實性은 커지며 따라서 신뢰도도 低下된다. 반면에 불확실성의 감소는 일반적으로 신뢰성의 증가를 가져온다.

나. 鋪裝의 破壞確率

본 연구에서는 荷重效果인 인장변형률(S)과 抵抗인 임계변형률(R)이 對數正規分布를 따르므로 신뢰도는 식 8을 사용하여 계산할 수 있다. 인장 변형률은 직접적으로 층 두께와 관계가

있으므로, R과 S의 평균비인 \bar{R}/\bar{S} 도 층 두께의 변화를 따른다. 그러므로, 층 두께가 포장의 설계 신뢰도를 결정한다고 볼 수 있다.

Table-1에 트럭계수와 아스팔트포장재료의 성질이 주어져 있으므로 이를 이용하여 이 도로 포장의 파괴확률을 구해본다. 우선 층 두께의 평균을 4cm 그리고 그 변동계수를 20%로 가정하여 Simulation으로 부터 인장변형률을 구하면 그 평균은 $\bar{S}=39.66 \times 10^{-6}$, 변동계수 $V_s=0.583$ 이며 對數正規分布를 따름을 알 수 있다. 여기에 $\bar{R}=210 \times 10^{-6}$ 과 $V_r=0.20$ 을 식 8에 대입하면 분모인 不確實性은 $(0.583^2 + 0.2^2)^{1/2} = 0.616$ 이며 이때 信賴性指數 β 는 2.706이 얻어진다. 따라서 평균두께 4cm인 포장의 현 교통량 하에서의 破壞確率 P_f 는 0.0034임을 알 수 있다.

다. 층두께 변화에 따른 포장의 信賴度 변화

만일, 포장 콘크리트의 強度調節이 현실적으로 불가능하다면 층 두께를 증가시키는 것이 같은 교통량 조건하에서 인장응력과 변형률의 감소를 가져 오게 하여 平均比 \bar{R}/\bar{S} 를 증가시킬 것이다. 즉, 층 두께의 變動係數를 같은 수준이라 가정하였을때, 그리고 임계인장강도가 주어진 상태일때는 층두께의 평균값의 변화가 인장응력과 변형률의 增減을 가져와 신뢰도가 변화하게 된다. 층두께 값을 변화시키면서 기존 교통량과 자료를 이용하여 구해진 신뢰도를 Fig. 3에서 보여주고 있다. 여기서의 곡선은 Table-1

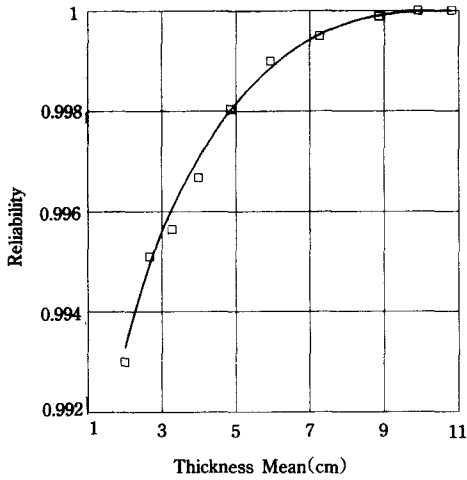


Fig. 3. Relation of surface thickness and reliability

에 주어진 임계인장변형률과 不確實性 0.616 그리고, 주어진 륜하중하에서 각기 다른 층 두께를 사용한 시뮬레이션에 의하여 결정된 인장변형률 평균에 근거하여 이루어진 것이다.

라. 交通量 增加와 층두께의 關係

포장의 설계는 항상 일정기간의 期待壽命(○년)을 설정하고 이루어지므로 그에따른 교통량의 증가치를 고려하여야 할 것이다. 교통량의 증가는 결국 트럭계수의 증가를 가져오므로 증가치를 Table-2로부터 구하여 그 增加係數 (Grwoth Factor)를 곱하여 주어야 할 것이다. 예를들어 위에 계산한 도로 교통량의 매년 증가율이 일정하게 10%라 하고, 이 포장을 10년의 期待壽命으로 설계 하고자 한다면 Table로부터

Table-2. Traffic Growth Fators * 1)

Design Period Years(n)	Annual Growth Rate (%)							
	0	2	4	5	6	7	8	10
1	1.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	2.0	2.02	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.10
3	3.0	3.06	3.12	3.15	3.18	3.21	3.25	3.31
4	4.0	4.12	4.25	4.31	4.37	4.44	4.51	4.61
5	5.0	5.20	5.42	5.53	5.64	5.75	5.87	6.11
6	6.0	6.31	6.63	6.80	6.98	7.15	7.34	7.72
7	7.0	7.43	7.90	8.14	8.39	8.65	8.92	9.49
8	8.0	8.58	9.21	9.55	9.90	10.26	10.64	11.44
9	9.0	9.75	10.58	11.03	11.49	11.98	12.49	13.58
10	10.0	10.95	12.01	12.58	13.18	13.82	14.49	15.94
11	11.0	12.17	13.49	14.21	14.97	15.78	16.65	18.53
12	12.0	13.41	15.03	15.92	16.87	17.89	18.98	21.38
13	13.0	14.68	16.63	17.71	18.88	20.14	21.50	24.52
14	14.0	15.97	18.29	19.16	21.01	22.55	24.21	27.97
15	15.0	17.29	20.02	21.58	23.28	25.13	27.15	31.77
16	16.0	18.64	21.82	23.66	25.67	27.89	30.32	35.95
17	17.0	20.01	23.70	25.84	28.21	30.84	33.75	40.55
18	18.0	21.41	25.65	28.13	30.91	34.00	37.45	45.60
19	19.0	22.84	27.67	30.54	33.76	37.38	41.45	51.16
20	20.0	24.30	29.78	33.06	36.79	41.00	45.76	57.28

* 계수 = $\frac{(1+r)^n - 1}{r}$, 여기서 $r = \frac{\text{비율}}{100}$ 이고, 만일 연증가율이 0이면, 계수 = 설계기간.

증가계수(15.94%)를 구하여 그만큼 현재의 트럭계수 분포를 증가시켜 주어야 한다. 다른 모든 것이 같은 조건이라면 이 증가계수의 첨가로 인해 인장변형을 평균은 $S=46.57$ (변동계수는 일정)이 되며 이때 信賴性指數 $\beta=2.36$ 이 얻어진다. 이로부터 같은 4cm 두께 포장의 破壞確率은 $P_f=0.0091$ 로 증가함을 알 수 있다.

교통량 증가를 고려하면서 층두께에 따른 信賴度의 변화를 고려한다면 Fig. 4와 같은 곡선들이 얻어질 것이다. 이 Fig의 각 점들은 앞에서 주어진 현재의 트럭계수 분포와 증가율 15.94%(년 10%로 10년 동안 증가)와 31.77%(년 10%로 15년 동안 증가)를 고려할 경우 층 두께에 따른 포장의 信賴性을 구한 것이다. 그리고 각 점들에 대하여 回歸分析으로 부터 最適 곡선을 2차 식으로 구하였다. 이 Fig로 부터 볼 수 있듯이 같은 포장이라도 그 신뢰도는 륨하중의 증가에 따라 상당한 차이를 보이며 특히 층 두께가 얇을수록 그 차이는 더 큰것으로 나타났다.

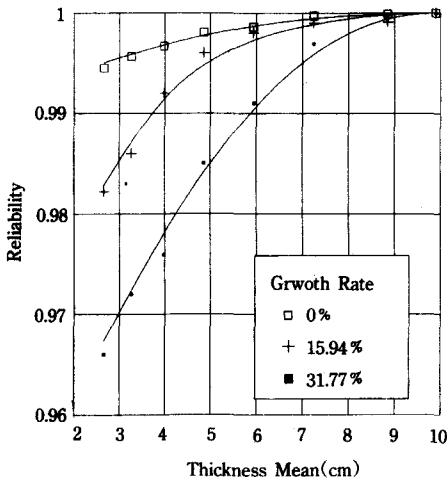


Fig. 4. Reliability change due to growth rate and thickness

2. 設計차트

이상과 같은 포장의 信賴度의 분석과 변수들의 상관관계로 부터 다음과 같은점을 착안 할 수

있다. 1) 륨하중 분포와 포장에 사용할 재료의 성질이 결정되면 표층두께와 信賴度의 函數關係를 얻을 수 있다. 2) 같은 재료가 사용될 경우 륨하중의 변화와 층두께에 따른 函數關係를 얻을 수 있다.

앞에 언급한 1) 항의 개념으로 부터 륨하중이 既知일 경우 사용될 재료(아스팔트 콘크리트)의 역학적 성질에 따른 포장설계곡선을 Fig. 5와 같은 형태로 만들 수 있다. 여기에 사용된 륨하중은 Table-1에서의 값이며 사용된 불확실성 값은 0.616이다. 이 도표로 부터 선정된 층두께 (Thickness)가 주어진 곡선 사이의 어떤 값이라면 적절한 線形 Interpolation을 통하여 그 값을 구할 수 있다. 또한 주어진 교통량과 각 도로에 사용될 재료의 상태를 알 경우 각 도로에 적합한 가상의 포장설계곡선을 Fig. 6과 같은 형태로 만들 수 있다. 이상의 두 설계차트의 사용을 위해서는 目標信賴度(Target Reliability) 또는 기대 신뢰도가 선정되어야 한다. 만일 일정 도로에 대한 기대 신뢰도($1-P_f$)가 選定될 경우 재료의 상태에 따른 설계 곡선은 Fig. 7과 같이 만들 수 있다. 이때 이 기대 신뢰도의 크기는

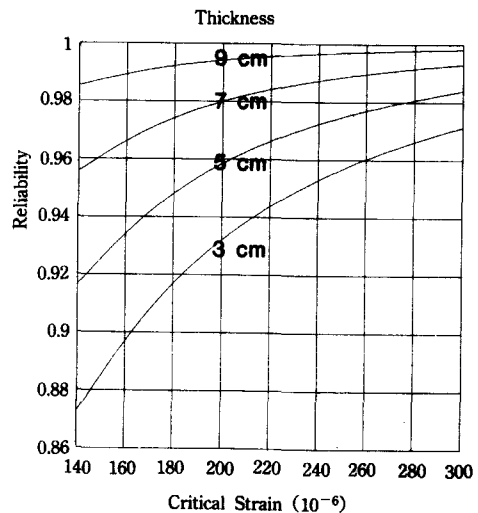


Fig. 5. Design chart for thickness based on critical strain

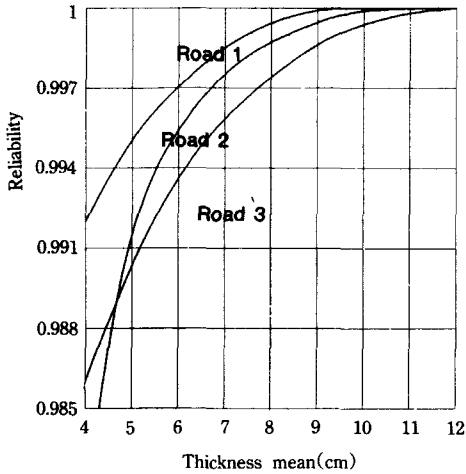


Fig. 6. Thickness design chart for three different roads

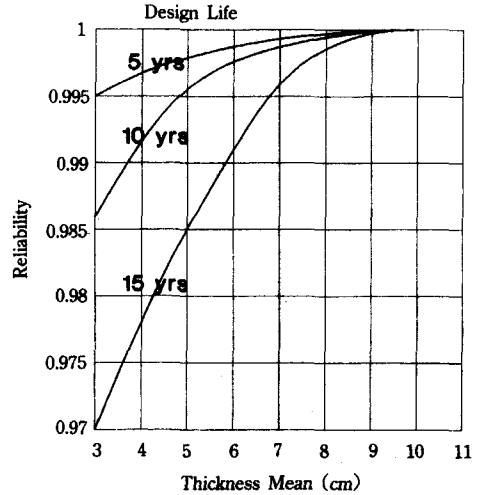


Fig. 8. Thickness design chart based on design life

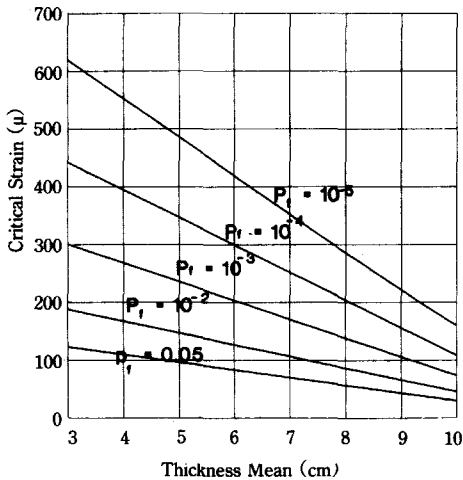


Fig. 7. Thickness design chart for probability of failure

도로의 등급에 따라, 교통량의 크기에 따라, 설계수명에 따라 또는 기후조건에 따라 변화될 수 있는 것이다. 그러므로 이들의 적절한 상관관계를 얻어낼 수 있다면 기대 신뢰도는 주어진 지역내에서 차량의 통행량 등 도로의 종류에 따른 어떤 지수라 보고 직접 도로등급이나 설계수명을 표시하는 선으로 사용이 가능하게 되어 매우 유용한 것이 될 수 있다.

2) 항의 개념을 이용한다면 Fig. 8과 같은 곡선을 얻을 수 있을 것이다. 이 곡선은 년 증가비율이 일정하다고 할 경우 주어진 도로에 대한 설계수명과 직접 관련이 있으므로 설계차트로 사용할 수가 있다.

V. 結 論

본 연구에서는 確率論的인 鋪裝設計方案의 한가지로 아스팔트 콘크리트 포장의 表層에 대한 信賴性 分析과 각종 자료를 이용한 두께결정 차트의 개발을 시도하였다. 본 연구에서 제시된 설계차트는 Fig. 5부터 8까지이다. 이 차트들은 본 연구에서 제시한 자료들이 얻어진다면 어떤 道路의 鋪裝에서이고 應用이 될 수 있는 것들이다. 같은 道路이라도 구간이 긴 경우 지역 조건에 따라 차량의 分布가 다르거나 사용되는 재료가 工區에 따라 다를 수 있다. 따라서 적절히 구간별로 제시된 형태의 차트를 작성하여 이용하면 지역적인 조건의 차이들을 설계에 모두 고려하여 넣을 수 있을 것으로 사료된다.

또한 본 연구에서는 아스팔트 콘크리트가 일정온도에 있는것으로 가정 하였으나 실제 도로

상에서는 계절, 기후에 따라 재료자체의 온도에 많은 차이가 있으며 그에 따른 하중하의 변형상태도 차이가 있다. 또한 재료의 함수상태, 표면의 마찰상태 등도 추가하여 연구하여야 할 부분이라 할 수 있다. 앞으로 이와같은 점을 고려하여 계속 연구를 통한 실용화를 이룬다면 결국 材料의 特性, 交通량의 分布와 增加 그리고 設計壽命에 대한 사항들을 보다 구체적으로 鋪裝設計에 導入하는 계기가 될것이다. 目標信賴度의 設定에 관한 문제도 계속적으로 연구하여야 할 과제라 하겠다. 즉 도로의 등급에 따라 또는 設計壽命에 따라 信賴도를 어느선에서 設定하여야 적합할지는 미지수이기 때문이다. 또한 目標信賴度 설정에 대한 연구와, 본 개념을 表層뿐만이 아니라 포장 全層에 도입하기 위한 계속적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

이 論文은 1990年度 教育部支援 韓國學術 振興財團의 自由公募課題 學術研究 助成費에 의하여 研究되었음

參 考 文 獻

1. Asphalt in Pavement Maintenance Manual Series : No. 16 (MS-16), the Asphalt Institute, March 1983.
2. Asphalt Technology and Construction Practices ; Educator's Guide, Educational Series No. 1 (ES-1), the Asphalt Institute, January 1983.
3. Burati, J. L. and Kim, K. W., "Coring of I-85", Final Report, Submitted to South Carolina Department of Highway and Public Transportation, Dept. of Civil Engineering, Clemson University, Clemson, SC, October 1986.
4. Burati, J. L. and Amirkhani, S. N., "A Study of Re-Use of Moisture-Damaged Asphalt Mixtures", Interim Report, Submitted to South Carolina Department of Highways and Public Transportation, Dept. of Civil Engineering, Clemson University, Clemson, SC, July 1990.
5. Flugge, W., *Viscoelasticity*, 2nd Edition, Springer-Verlag, Berlin, 1975.
6. Harr, M. E., *Probability Design in Civil Engineering*, McGraw-Hill Book Co., New York, N. Y., 1987.
7. Hart, G. C., *Uncertainly Analysis, Loads, and Safety in Structural Engineering*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1982.
8. Kim, K. W. and Burati J. L., "Probabilistic Approach to Evaluating Critical Tensile Strength for Bituminous Surface Course", Transportation Research Record No. 1171, TRB, Washington, D. C., 1988.
9. Kim K. W., Burati, J. L. and Amirkhani, S. N., "Required Number of Specimen for Moisture Susceptibility Testing", Transportation Research Record No. 1228, TRB, Washington D. C., 1989.
10. SAS User's Guide : Statistics, 1987 Edition, Sas Institute, Inc., Cary, NC, 1987.
11. Schultz, D. J., "A Method for Choosing a Statistical Model", A Partial Fulfillment of the Requirements for M. A., Department of Statistics, the Pennsylvania State University, PA, 1980.
12. Yoder, E. J. and Witzak, M. W., *Principle of Pavement Design*, 2nd. Ed., John Wiley and Sons, Inc., 1975.