연약지반 장기 침하량 예측기법의 신뢰성 평가

Reliability of Ultimate Settlement Prediction Methods

우 철 웅* · 장 병 욱** · 송 창 섭***
Woo, Chull Woong · Chang, Pyoung Wuck · Song, Chang Sub

Summary

The theory of consolidation has been achieved remarkable development in terms of theory such as finite consolidation theory, two dimensional Rendulic consolidation theory. Though those theories are well defined, the analysis is by no means straightforward, because associated properties are very difficult to determine in the laboratory. Therefore Terzaghi's one dimensional consolidation theory and Barron's cylindrical consolidation theory are still widely used in engineering practice.

The theoretical shortcomings of those consolidation theories and uncertainties of associated properties make inevitably some discrepancy between theoretical and field settlements. Field settlement measurement by settlement plate is, therefore, widely used to overcome the discrepancy.

Ultimate settlement is one of the most important factor of embankment construction on soft soils. Nowadays the ultimate settlement prediction methods using field settlement data are widely accepted as a helpful tool for field settlement analysis of embankment construction on soft soils.

Among the various methods of ultimate settlement prediction, hyperbolic method and Asaoka's method are most commonly used because of their simplicity and ability to give a reasonable estimate of consolidation settlement.

In this paper, the reliability of hyperbolic method and Asaoka's method has been examined using analytical methods. It is shown that both hyperbolic method and Asaoka's method are significantly affected by the direction of drainage.

* 서울대학교 대학원
** 서울대학교 농업생명과학대학
*** 충북대학교 농과대학

키워드 : 연약지반, 장기침하량 추정, 쌍곡선법, Asaoka법

I. 서 론

Terzaghi의 일차원 압밀이론이 발표된 이후, 연약지반의 침하문제를 해석하는 방법으로 Barron의 압밀이론, 이차원 Rendulic 이론, Skempton-Bjerrum 3차원 해석, Mikasa (1965)와 Gibson 등(1967)의 유한변형률 압밀이론, 응력경로법, 탄성이론, 유한요소법 등 여러 방법들이 제시되었다. 그러나, 침하해석법의 이론적 발달에도 불구하고 해석법의 매개변수는 현장에서는 물론이고 실험실 수준에서조차 결정하기 매우 어렵기 때문에 아직까지도 연약지반의 침하해석에는 비교적 간략한 방법인 Terzaghi의 일차원 압밀이론과 Barron의 압밀이론이 적용되고 있다. 따라서, 압밀침하해석 결과는 방법상의 제한, 매개변수의 불확실성 등에 의해서 실제와 차이가 발생되는 것은 불가피하다.

이러한 문제들 때문에 현장 침하량 실측치를 이용한 침하량 예측기법이 사용되고 있으며 실측자료를 이용한 압밀침하량 추정방법을 이용하면 토질특성의 다양성, 하중의 크기와 분포의 불확실성 등이 최소화되어 실제 침하량을 보다 잘 예측할 수 있다.

실측치에 의한 침하량의 예측기법은 크게 1) 통계적 방법 2) 도형적 방법 3) 시뮬레이션 방법으로 나눌 수 있으며 일반적으로 雙曲線法(Hyperbolic method), 星埜法($\sqrt{t}$법, Hoshino법), 淺岡法(Asaoka법), 門田法, log$t$법 등이 사용되고 있다. 장기침하량 예측법을 사용하여 신뢰성이 높은 침하예측을 위해서는 그 예측법의 신뢰성을 파악하는 것이 필요하나 이에 대하여 검토한 사례는 적다.

Baker(1994)는 무처리 연약지반위에 3m와 6m의 성토를 한 후 Asaoka법을 적용한 결과, 30일 간격으로 1년간 계측한 압밀침하량 계측치는 좋은 예측결과를 주나 성토가 높은 경우에는 측방변위의 영향으로 침하량을 30%가량 과대하게 추정되었다고 발표하였다. 世良 등(1993)은 여러 연약지반에서의 침하량을 쌍곡선법, Asaoka법 및 Hoshino법으로 예측한 결과, 쌍곡선법이 보다 정확한 결과를 나타낸다고 하였으며 이러한 결과는 오 등(1996)도 Pack-Drain 개량지반에서도 유사한 경향이 있음을 발표하였다.

이러한 장기침하량 예측기법에 대한 분석은 주로 실측자료를 중심으로 한 분석이며 분석기법 자체의 특성에 대한 심도있는 검토 사례는 발견하기 어려웠다. 따라서, 본 논문에서는 장기침하량 예측기법으로 가장 신뢰성을 인정받고 있는 쌍곡선법과 Asaoka법을 대상으로 이들 기법의 특성을 해석적 방법으로 검토하여 장기침하량 추정 결과의 신뢰성을 분석하였다.

II. 침하량 예측기법 및 신뢰성 평가 방법

1. 쌍곡선법

쌍곡선법 자체는 유사한 목적으로 여러 역학분야에서 사용되고 있는데 토질공학 분야에서는 Duncan & Chang(1970)의 hyperbolic stress-strain 관계식이 그 대표적인 예이다.

쌍곡선법에서, 압밀침하량(S)과 시간(t)의 관계는 다음과 같은 쌍곡선으로 가정된다.

$$S=\frac{t}{\alpha+\beta t} \qquad (1)$$

따라서,

$$\lim_{t\to\infty} S=\lim_{t\to\infty} S\frac{1}{\frac{\alpha}{t}+\beta} \qquad (2)$$

식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{t}{S}=\alpha+\beta t \qquad (3)$$

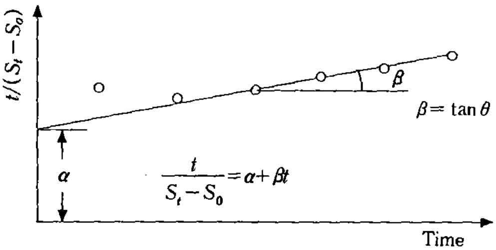

Fig. 1. Ultimate settlement prediction by hyperbolic method

이 식 (3)은 t/S와 t사이에 직선적 관계가 있음을 의미한다. 식 (2)는 장기침하량이 기울기의 역수인 $1/\beta$임을 보여준다. 침하거동이 쌍곡선식에 접근하는 충분한 정도의 자료가 확보되어 α, β가 결정되면 임의의 시간에서의 침하량을 식 (1)로부터 구할 수 있다.

실제로는 침하량이 항상 압밀이 개시될 때부터 계측되지는 않으며 일시에 성토되지도 않기 때문에 실제로는 식 (3)의 t/S와 t의 관계 대신에 $(t-t_i)/(S-S_i)$와 $(t-t_i)$를 사용하는 것이 일반적이다. 여기서, S_i는 t_i시간 경과시의 침하량이다.

2. Asaoka법(淺岡法)

Asaoka(1978)[1]법은 연약지반 성토의 의한 최종침하량(ultimate settlement)과 침하율(settlement rate)을 일정기간 동안에 측정된 침하 데이터를 이용하여 추정하는 방법이다. 이 방법은 단순한 curve fitting이 아니라 Mikasa(1963)의 유한변형률 압밀방정식으로부터 유도되었으며 Magnan과 Mieussens (1980)에 의해 도해법에 의하여 정의된 결과는 Fig. 2와 같다.

(1) 측정된 시간-침하 곡선을 XY곡선으로 도시하고 동일한 시간간격(Δt, 일반적으로 30~100일 정도)으로 나눈다. 각각의 시간(t_1, t_2, …)에 해당하는 침하량(S_1, S_2, …)을 읽는다.

(2) 침하량(S_1, S_2, …)을 Fig. 2와 같이 X축을 로하고 Y축을 S_{i-1}로 하여(S_{i-1}, S_i)의

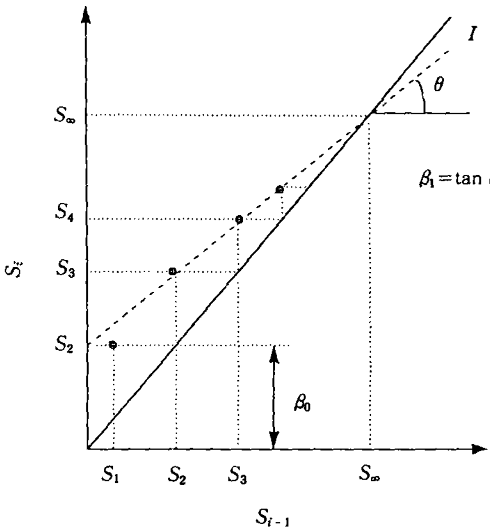

Fig. 2. Ultimate settlement prediction by Asaoka's method

점을 도시한다. 또, $S_i=S_{i-1}$인 45°의 직선을 그린다.

(3) 도시된 점을 이용하여 직선 I를 그린다. 이 때, 초기의 비직선 영역은 무시하고 선형회귀를 하여 직선을 구한다. 이 직선과 45° 선이 만나는 지점이 최종침하량(S_∞)이다. 즉, 직선회귀식의 기울기와 Y 절편을 각각 β_1과 β_0라 하면 최종침하량은 다음과 같다.

$$S_\infty=\frac{\beta_0}{1-\beta_1} \quad \cdots\cdots (4)$$

Fig. 2에 제시된 도해법은 일방향 혹은 이방향압밀 조건의 단일한 연약층의 경우에 대한 것이나 연직배수재를 사용하는 경우에도 적용할 수 있다. 또한, Asaoka와 Matuo (1980)는 연약지반이 여러개의 층으로 이루어져 있는 경우에 대한 확장법을 제안하였다.

3. 신뢰성 평가방법

연약지반의 압밀침하는 연직배수공법이 적용되지 않는 지반의 경우에는 Terzaghi의 일

차원 압밀이론, 연직배수공법 적용지반의 경우에는 Barron의 압밀이론으로 해석되는 것이 일반적이며 본 논문에서는 이를 각각 Terzaghi형 및 Barron형의 문제로 취급하였다. 이 두가지 압밀이론은 여러 문헌(Scott, 1963)에서 언급되어 있으므로 여기서는 다음과 같이 시간-압밀도 관계를 간략하게 제시하였다.

Terzaghi형 문제
(일정한 하중, 균일한 초기조건, 양면배수)

$$U(T_v)=1-\frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2}\exp\left[-\left(\frac{2n+1}{2}\pi\right)^2 T_v\right] \quad \cdots\cdots (5)$$

여기서, T_v는 시간계수 U는 압밀도이다.

Barron형 문제

$$U=1-\exp\left[\frac{-8T_h}{(F(n))}\right] \quad \cdots\cdots (6a)$$

$$F(n)=\frac{n^2}{n^2-1}\log_e(n)-\frac{3n^2-1}{4n^2} \quad \cdots (6b)$$

$$n=\frac{d_e}{d_w} \quad \cdots\cdots (6c)$$

여기서, d_e와 d_w는 각각 Drain재의 영향원의 직경과 Drain재의 직경이다.

장기침하량의 추정은 침하량(S)과 시간(t)의 관계를 이용한다. 압밀침하량(S)과 압밀도(U), 시간(t)과 시간계수(T_v)는 각각 다음과 같은 관계가 있다.

$$S=S_\infty \times U \quad \cdots\cdots (7a)$$

$$t=\frac{H_{dr}^2 T_v}{C_v} \quad \cdots\cdots (7b)$$

여기서, H_{dr}은 배수거리이다.

즉, 압밀침하량과 압밀도, 시간과 시간계수는 비례관계에 있으므로 시간-침하관계와 시간계수-압밀도 관계는 비례관계에 있으며 그 경향은 정확하게 일치한다. 따라서 시간-침하관계의 분석과 시간계수-압밀도의 분석은 동일한 결과를 주므로 이를 분석에 적용하여 각각 시간-압밀침하량으로 취급하였다. 본 연구에서 적용된 시간계수-압밀도 관계는 Fig. 3과 같다.

장기침하량 예측방법의 정확성을 정량적으로 검토하기 위해서 식 (8), (9)와 같은 오차량 및 예측률을 이용하였다.

$$\Delta S=S_m-S_f \quad \cdots\cdots (8)$$

$$K_t=[(S_f-S_o)/(S_m-S_o)]\times 100 \quad \cdots\cdots (9)$$

여기서, ΔS=오차량
K_t=예측률 (%)
S_m=이론 압밀침하량
S_f=예측 압밀침하량
S_o=예측시점의 침하량

이 식에서 오차량이 0에 가까울수록, 예측률은 100%에 근접할수록 예측精度가 좋다고

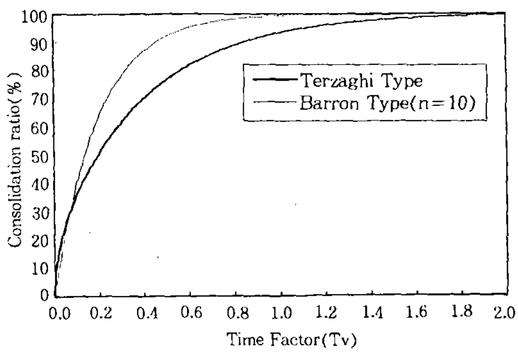

Fig. 3. Percent consolidation versus time factor used for analysis

할 수 있다. 또한 오차량이 음(−)이 되고 예측률이 100%를 초과하는 것은 예측침하량이 실측침하량보다 크다는 것을 의미한다.

III. 결과 및 고찰

1. 쌍곡선법에 대한 평가

쌍곡선법에 의해 예측된 최종 침하량과 이론 침하량 및 각 추정시점에서의 압밀도를 각각 Fig. 4와 Fig. 5에 제시하였다. 이를 살펴보면, Terzaghi형의 경우에는 압밀도 약 50% 이하에서는 최종 침하량을 작게 산정하였으며 약 80% 지점을 중심으로 위로 볼록한 형태를 보였다. Barron형의 경우, 초기부터 최종 침하량을 크게 산정하여 이후 압밀도(시간계수)가 증가함에 따라 점점 100%에 근접해 가는 경향을 보여주었다. Fig. 4로부터 쌍곡선법의 경우, 지반의 배수형태에 따라 해석결과가 상당한 영향을 받으며 압밀초기 단계에서 그 차이가 매우 크게 나타난다는 사실을 알 수 있다.

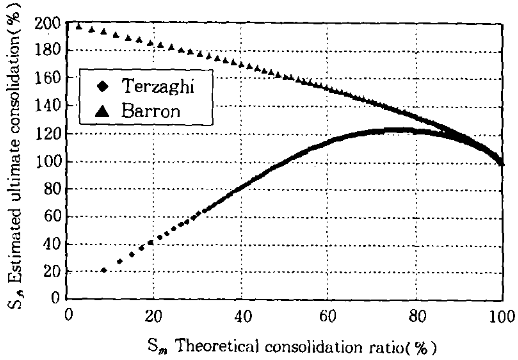

Fig. 4. Estimated ultimate settlement by hyperbolic method

해석결과를 오차량에 대하여 분석하여 보면, Terzaghi형의 경우 오차량은 +80∼-20% 정도의 범위에 있으며 40% 이상의 압밀도에서는 대략 ±20% 이내의 예측이 가능한 것으로 나타났다. Barron형의 경우, 추정된 최종 침하량이 초기에 최대 100% 정도 큰 값을 예측하고 있음을 볼 수 있으며 압밀도가 90% 이상에서 20% 이내의 추정이 가능함을 알 수 있다.

최종 침하량의 예측을 통해서 현재의 압밀도를 예측하는 경우에는 이와 다소 다른 결과를 준다. 즉, Fig. 5와 같이 Terzaghi형의 경우에는 -30∼+15%의 범위에 있으며 Barron형의 경우 +20%이내에 있음을 알 수 있다.

2. Asaoka법에 대한 평가

Asaoka법에 의한 침하량 추정결과는 Fig. 6, 7에 제시하였다. 여기서, Terzaghi형의 경우, 초기에는 최종 침하량을 실제보다 작게 추정하였으나 60% 이상에서는 거의 정확한

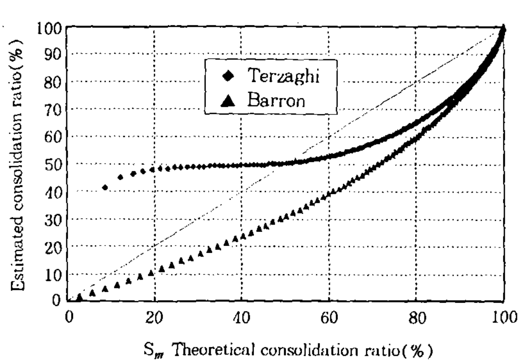

Fig. 5. Estimated consolidation ratio by hyperbolic method

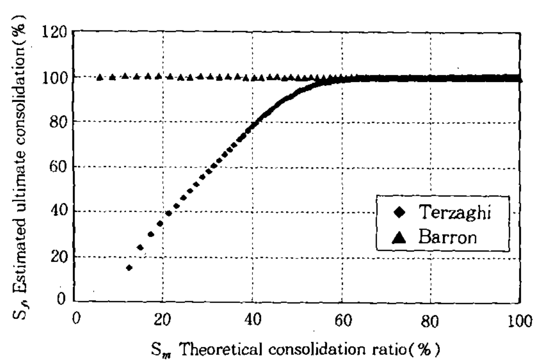

Fig. 6. Estimated ultimate settlement by Asaoka's method

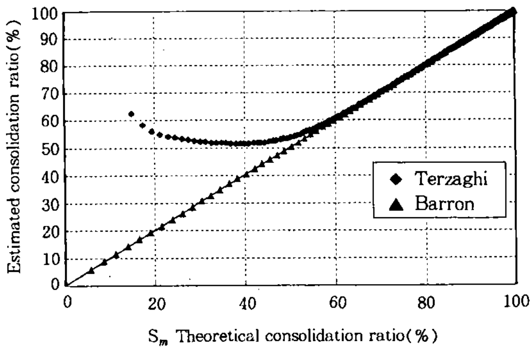

Fig. 7. Estimated consolidation ratio by Asaoka's method

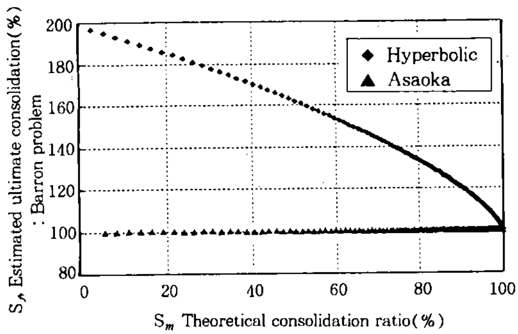

Fig. 9. Estimated ultimate settlement on Barron's vertical drain solution

값을 예측하였음을 보여주었다. Barron형의 경우에는 초기부터 정확한 값을 예측해 주었다.

분석시점에서의 압밀도는 Terzaghi형의 경우에는 약 30% 가량 차이를 주었으나 40% 이상에서는 약 10% 이내의 오차를 보이고 있으며 60% 이상에서는 거의 정확한 예측이 가능하였다. 따라서, Asaoka법은 Barron형의 압밀에 대하여 적절한 결과를 주며 40% 이상의 압밀도에서 예측하는 경우에는 상당한 신뢰성이 인정된다.

3. 압밀형에 따른 분석결과

Terzaghi형 및 Barron형의 압밀문제에 어떠한 추정방법이 적합한지를 검토하기 위해서 Fig. 8, 9와 같이 비교하여 제시하였다.

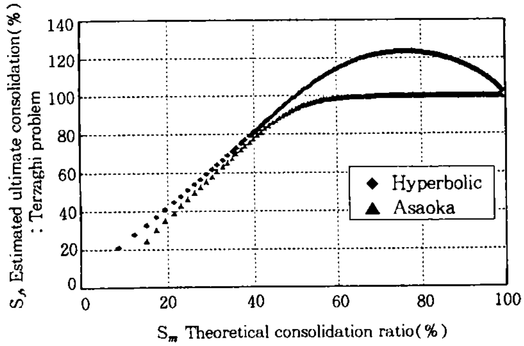

Fig. 8. Estimated ultimate settlement on Terzaghi's consolidation

이를 살펴보면, Terzaghi형의 문제의 경우, 50% 이하에서는 쌍곡선법이 다소 좋은 결과를 주나 그 이상에서는 Asaoka 법에 의한 예측결과가 좋다. Barron형의 경우, Asaoka법의 예측치는 초기부터 매우 정확한 예측치를 주고 있으나 쌍곡선법은 최대 100% 까지 차이가 있는 예측결과를 주었다. 따라서, Barron형의 문제는 Asaoka법에 의한 예측이 바람직한 것으로 나타났다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 연약지반의 침하량 계측결과를 이용한 장기침하량 예측기법의 신뢰성을 해석적 방법으로 검토하기 위하여 실측 시간-침하관계를 시간계수-압밀도 관계로 대치하여 분석하였으며 압밀침하문제의 대표적인 해석방법인 Terzaghi의 일차원 압밀해와 Barron의 압밀해를 중심으로 고찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 장기침하량 예측기법은 지반의 배수조건에 따라 그 예측결과에 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다.

2. 쌍곡선법은 Barron의 문제보다는 Terzaghi형의 문제에 적합하다. 쌍곡선법을 Terzaghi형의 문제에 적용하면 40% 이상의 압밀도에서 예측하였을 하였을 때 ±20% 이내에

서 예측이 가능한 것으로 나타났다.

3. Asaoka법의 경우, Barron형의 문제에 매우 정확한 예측결과를 주었으며, 60% 이상의 압밀도에서는 Terzaghi형의 문제도 정확한 예측결과를 도출하였다.

4. Terzaghi형의 문제는 50% 이하에서는 쌍곡선법의 추정결과가 다소 좋은 결과를 보이나 그 이상에서는 Asaoka법이 정확하였다.

5. Barron형의 문제는 Asaoka법이 쌍곡선법보다는 정확한 추정이 가능하였다.

참 고 문 헌

1. Asaoka, A. 1978, "Observational procedure of settlement prediction", Soils and Foundations, 18(4), 87-101
2. Asaoka, A. and Matsuo, M., 1980, "An inverse problem approach to settlement prediction", Soils and Foundations, 20 (4), 55-66
3. Baker, S. A. 1994, "Settlement Prediction at Muar Flats using Asaoka's method", Prediction versus Performance in Geotechnical Engineering, Balasubramaniam et al(eds), Balkema, pp. 175-181
4. Barron, R. A.(1948), "Consolidation of fine grained soils by vertical wells", Trans. ASCE, Vol 113, pp. 718-754
5. Brand E.W, and Brenner R. P, 1981, Soft Clay Engineering, Elservier Scientific Publishing Company, Developments in Geotechnical Engineering 20, pp. 524-528
6. Duncan, J. M., and Chang, C. Y., 1970, "Nonlinear analysis of stress and strain in soils", J. Soil Mech. and Found. Engrg., ASCE, 96(5), pp. 1629-1653
7. Gibson, R. E., England, G. L., and Hussey, M.J.L, 1967, "The theory of one dimensional consolidatin of saturated clays. 1 : Finite non-linear consolidation of thin homogeneous layers." Geotechnique, 17(3), pp. 261-273
8. Magnan, J.-P., and Deroy, J.-M., 1980, "Analyse graphique des tassements observ s sous les ouvrages", Bull. Liais. Lab. Ponts Chauss., No. 199, pp. 45-52
9. Magnan, J.-P., and Mieussens, C., 1980, "Les remblais d'essain : Un outil efficace pour am liorer les projects d'ouvrages sur sols compressibles", Bull. Liais Lab. Ponts. Chauss., No. 106, pp 79-96
10. Micasa, M., 1963, "The Consolidation of Soft Clay-A New Consolidation Theory and Its Application", Kajima-suppan-kai, Tokyo (in Japanese)
11. Scott, R. F., 1963, Principles of soil mechanics, Addison-wesley publishing Co.
12. Tan, S-A, 1995, "The hyperbolic method for prediction of ultimate primary settlement in clays with vertical drain", Compression and Consolidation of Clayey Soils, Yoshikuni & Kusakabe(eds), Balkema
13. Tan, S-A, Inoue, T., and Lee, S-L, 1991, "Hyperbolic method for consolidation analysis", J. of Geotech. Engrg, ASCE, Vol 117, No. 11, pp. 1723-1737
14. 世良 至, 殿垣内 正 人, 川井田 實, 1993, 實測値に基づく軟弱地盤の沈下豫測法の精度と適用性, 土と基礎(41-2 421), pp. 11-16
15. 오재화, 남기현, 이문수, 허재은, 김영남, 1996, Pack-Drain으로 개량된 점토지반의 거동해석, 한국농공학회지, Vol. 38 No.1, pp. 115-127

(접수일자 : 1996년 7월 3일)