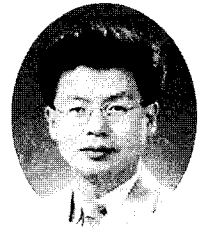


특 집

원자력발전소 설계 및 기술 동향

원자력발전소 격납 건물의 프리스트레싱 손실량 산정 기술

- Prediction of Prestressing Losses in Containment Structures of Nuclear Power Plants -



이태규*

1. 서 론

우리나라 원자력발전소의 원자로 격납 건물은 프리스트레스트 콘크리트 구조물로서 프리스트레싱 강선이 설치되는 텐던 덕트 내부를 그리스로 충전하는 비접착 방식(unbonded type)의 포스트텐셔닝 방식으로 되어 있다. 비접착 방식의 원자로 격납 건물의 포스트텐셔닝 시스템에 대한 가동 중 검사는 ACI 규정¹⁾과 USNRC Regulatory Guide 1.35의 규정²⁾에 근거하여 작성된 기술시방서 및 절차서에 따라 수행되어야 하는데, 기존에 가동되고 있는 원자력발전소들은 이러한 기술시방서 및 절차서가 외국의 관련 전문회사에서 외주의 형식으로 발주하여 작성되어 왔다.

우리나라에 설치되어 있는 원자력발전소는 초창기에는 기술 수준이 미약한 관계로 상당한 부분에 있어서 선진 기술의 도움을 받아 왔지만 이제는 지금까지 축적된 기술을 바탕으로 원자력발전소의 설계, 시공 및 사후 관리에 대하여 자립할 수 있는 토대가 마련되

었다.

따라서 1994년 영광 원자력발전소 3, 4호기에 대한 가동 중 검사 기술시방서 및 절차서³⁾ 작성을 필두로 하여 기존의 ACI 규정 및 USNRC Regulatory Guide 1.35의 규정에 근거하고 또한 우리나라의 특성에 맞는 방식을 도입한 원자력발전소 격납 건물의 가동 중 검사 기술시방서 및 절차서를 자체 기술로 개발하여 사용하고 있으며, 본고에서는 이러한 가동 중 검사 기술시방서 및 절차서 중 포스트텐셔닝 시스템의 텐던 긴장력에 대한 손실량을 예측하는 방법을 간략히 살펴보기로 한다.

2. 텐던 긴장력에 대한 손실량 산정

2.1 초기 손실량 산정

원자력발전소의 포스트텐셔닝 시스템은 초기에 텐던의 긴장시 앵커의 미끄럼(anchorage slip), 탄성 손실(elastic shortening), 국부적 파단(wire breakage) 등에 의한 초기 손실이 발생된다. 이 중 앵커의

* 정회원, 우송대학교 건축토목환경공학부 교수

미끄럼이나 국부적 파단과 같은 것은 텐던의 초기 정착(initial seating)시에 고려된 것으로 보아도 무방하기 때문에 별도의 고려가 필요 없지만, 탄성 손실은 텐던의 긴장 순서에 따른 영향이기 때문에 별도로 고려하여 주어야 한다.

임의의 초기 정착력으로 인한 탄성 손실량은 한 방향으로의 변위가 동일하다는 가정 하에 다음과 같은 식을 사용한다.

$$F_{loss}^i = \frac{F_o^i A_p E_p}{A_{cn}E_c + A_sE_s + A_pE_p + A_lE_l + A_dE_d} \quad (1)$$

여기서, F_o^i : i 번째 텐던의 초기 정착력(kips)

F_{loss}^i : i 번째 텐던의 초기 정착력으로 인한 탄성 손실량(kips)

A_{cn}, E_c : 콘크리트의 순단면적(in²)과 탄성계수(ksi)

A_s, E_s : 철근의 단면적(in²)과 탄성계수(ksi)

A_p, A_l, A_d : 텐던, 라이너, 덕트의 단면적(in²)

E_p, E_l, E_d : 텐던, 라이너, 덕트의 탄성계수(ksi)

모든 텐던은 매 긴장시마다 그 이전에 긴장했던 텐던에서 식(1)과 같은 손실이 발생되며 또한 콘크리트 구조물은 포아손 효과에 의한 수평과 수직 방향의 상호 길이 변화 효과(lengthening effect)가 발생되므로, 각 텐던의 긴장 순서에 따라 탄성 손실량을 각기 다르게 고려해주어야 한다. 예를 들어, 영광 원자력발전

표 1. 영광 원자력발전소 3, 4호기의 텐던 긴장 순서

구분	Stage I	Stage II	Stage III	Stage IV	총 개수
3호기	수평 3개	수직 48개	수평 162개	수직 48개	수직 96개, 수평 165개
4호기	수직 48개	수평 165개	수직 48개	-	수직 96개, 수평 165개

표 2. 영광 원자력발전소 3호기의 텐던 긴장 순서에 따른 총 손실량

손실량	텐던 번호(k)	Stage I	Stage II	Stage III	Stage IV
$F_{LES, v}^k$	1~3	$\sum_{i=k+1}^3 F_{loss, h}$	$-\nu \sum_{i=1}^{48} F_{loss, v}$	$+\sum_{i=4}^{165} F_{loss, h}$	$-\nu \sum_{i=49}^{96} F_{loss, v}$
	4~165	-	-	$\sum_{i=k+1}^{165} F_{loss, h}$	$-\nu \sum_{i=49}^{96} F_{loss, v}$
$F_{LES, v}^k$	1~48	-	$\sum_{i=k+1}^{48} F_{loss, v}$	$-\frac{2}{3} \nu \sum_{i=4}^{165} F_{loss, h}$	$+\sum_{i=49}^{96} F_{loss, v}$
	49~96	-	-	-	$\sum_{i=k+1}^{96} F_{loss, v}$

표 3. 영광 원자력발전소 4호기의 텐던 긴장 순서에 따른 총 손실량

손실량	텐던 번호(k)	Stage I	Stage II	Stage III
$F_{LES, v}^k$	1~165	-	$\sum_{i=k+1}^{165} F_{loss, h}$	$-\nu \sum_{i=49}^{96} F_{loss, v}$
$F_{LES, v}^k$	1~48	$\sum_{i=k+1}^{48} F_{loss, v}$	$-\frac{2}{3} \nu \sum_{i=1}^{165} F_{loss, h}$	$+\sum_{i=49}^{96} F_{loss, v}$
	49~96	-	-	$\sum_{i=k+1}^{96} F_{loss, v}$

전소 3, 4호기의 각 텐던의 긴장 순서는 <표 1>과 같으며 긴장 순서에 따른 총 손실량은 <표 2> 및 <표 3>과 같다.

<표 2>와 <표 3>에서 수평 텐던에 의한 손실량을 누적 계산할 경우에는 임의의 텐던을 긴장한 후 그로 인하여 영향을 받는 범위까지만 손상을 고려하여야 하며, 또한 수평 텐던이 완전한 원형으로 긴장되는 것이 아니라 원형의 2/3만이 긴장되므로 이에 대한 영향을 추가로 고려하여야 한다.

먼저 수평 텐던의 긴장시 영향을 미치는 영향 범위를 산정하기 위하여 범용 구조 해석 프로그램을 사용하여 <그림 1>과 같이 수평 텐던의 긴장시 영향을 미치는 범위에 대한 해석을 실시하였으며, 이를 점선과 같이 단순화하여 ±R(발전소 격납 건물의 반지름) 사이에서만 영향을 미치는 것으로 손실량의 누적 계산 산정에 적용하였다.

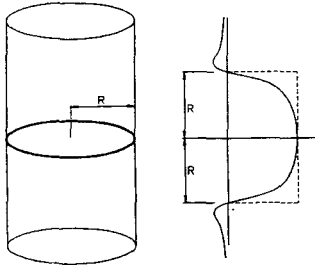


그림 1. 수평 텐던의 긴장으로 인하여 영향을 받는 범위의 산정

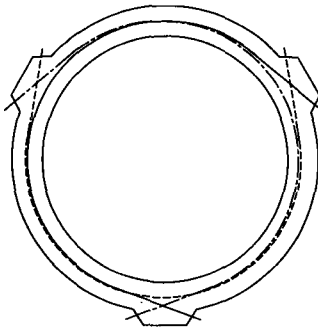


그림 2. 수평 텐던의 긴장

또한 수평 텐던의 긴장시 전체 원형으로 한번에 긴장되는 것이 아니고 <그림 2>와 같이 원주의 2/3씩 3회에 걸쳐서 차례로 긴장하므로 원주상의 모든 위치에서 긴장에 의한 효과가 모두 다르게 나타나며, 이를 정확히 고려하여 평가하기란 매우 어려운 문제이다. 따라서 한번 긴장(원주의 2/3)시의 효과를 전체 원형으로 긴장하였다고 가정하고 그 효과의 2/3만을 취하는 단순화된 방법을 사용하여 긴장력의 손실량을 계산하였다. 그 결과로 인하여 <표 2> 및 <표 3>에서 2/3의 계수가 곱해지는 형태로 표현되었다.

이와 같이 텐던의 긴장 순서를 고려하여 프리스트레싱 시스템에서 초기 정착시의 손실량을 제외한 실제 적용되는 수정된 초기 긴장력은 다음과 같이 나타난다.

$$F_i^n = F_o^n - F_{LES}^n \quad (2)$$

여기서, F_i^n : n번째 텐던의 수정된 초기 긴장력

F_o^n : n번째 텐던의 실제 초기 긴장력

F_{LES}^n : n번째 텐던의 총 손실량

2.2 크리프에 의한 손실

원자력발전소의 프리스트레싱 시스템에서 시간의 존성에 의한 효과를 고려할 때 가장 크게 영향을 미치는 부분이 콘크리트의 크리프이다. 크리프는 콘크리트의 배합 조건, 초기 하중 재하 시간, 재하 하중의 크기, 온도 등에 따라 그 차이가 매우 크게 나타나게 된다. 크리프의 양을 예측하는 모델식으로서 현재 가장 많이 사용되고 있는 식은 콘크리트표준시방서에 의한 모델식⁴⁾이나, 혹은 ACI 모델식⁵⁾, CEB-FIP 모델식⁶⁾, B3 모델식^{7)~9)} 등과 같은 식들이 있다. 그러나, 주지하다시피 크리프에 의한 변형은 매우 많은 여러가지의 요인에 의하여 변화하기 때문에 어떤 모델식을 사용하더라도 그 정확한 양을 예측하기란 거의 불가능하며, 단지 전체적인 크리프 거동에 대한 개략적인 경

표 4. 원자력발전소 콘크리트 배합표

구 분	Strength (psi)	W/C (%)	S/A (%)	Water (lb)	Cement (lb)	Sand (lb)	Gravel (lb)	WRA (ml)	AEA (ml)	Air Content (%)
영광 3,4호기	5,500	42	46	285	678	1,275	1,505	923	16	6
울진 3,4호기	5,500	44.5	38	288	647	1,097	1,791	1,225	18	6

향을 보여줄 뿐이다.

그러나, 원자력발전소 격납 건물의 프리스트레싱 시스템의 경우 장기 거동을 포함한 손실량에 대한 예측이 바로 구조물 전체의 안전성에 크게 영향을 미치기 때문에 세심한 주의를 필요로 하며, 따라서 다음과 같은 방법을 사용한다.

원자력발전소 격납 건물의 주어진 콘크리트 배합 조건(〈표 4〉 참조)에서 시간에 따른 크리프의 양을 산정하기 위하여 실제 실험으로부터 구한 값(크리프 곡선의 경향)에 근거하여 유동학적 이론과 실험 데이터에 근거한 Hansen의 모델식¹⁰⁾을 적용한다.

$$\frac{\epsilon_c}{f_c} = A \left[1 - e^{-\frac{1}{30}(t-t_0)} \right] + B \log_{10} \frac{t}{t_0} \quad (3)$$

여기서, ϵ_c / f_c : 비크리프(specific creep)

f_c : 콘크리트의 응력(ksi)

ϵ_c : 시간에 따른 콘크리트 변형률

t : 콘크리트 타설 이후의 경과 시간(days)

t_0 : 콘크리트 타설 이후의 하중 재하 시간(days)

A, B : 실험적으로 구해지는 변수

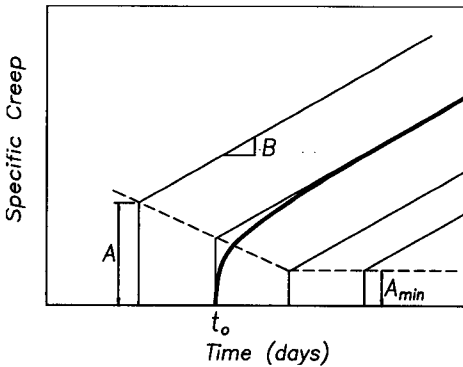


그림 3. 실험변수 A, B의 산정

예를 들어 영광 원자력발전소 3, 4호기의 경우에는 〈표 4〉에 나타난 콘크리트 배합으로 총 21개의 공시체를 만들어 ASTM Standard Test Method C512-76¹¹⁾에 근거하여 6개월까지의 크리프 시험을 실제 수행하였으며, 그 결과로 나타난 크리프 곡선을

〈그림 3〉과 같이 2개의 직선식으로 단순화하여 실험 변수 A와 B를 계산한다.

$$\begin{aligned} A &= 0.169 + 0.0546 (\ln 365 - \ln t) \\ B &= 0.1248 \end{aligned} \quad (4)$$

이와 같이 실험에 근거하여 구한 Hansen의 모델식을 ACI 모델식과 실험 결과와 비교하면 〈그림 4〉와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 Hansen의 모델식에 의한 곡선이 실험에 근거하였기 때문에 당연히 실험치와 거의 일치하는 결과를 보이며, 이 곡선을 원자력발전소 격납 건물의 프리스트레싱 시스템 손실량을 산정하는 데 사용한다.

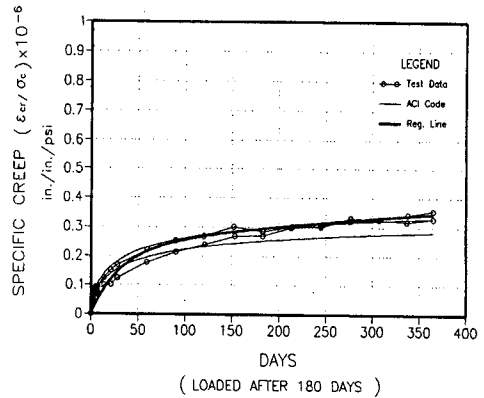


그림 4. 실험 결과와 곡선식의 비교

식(3)에서 구한 비크리프의 양을 텐던에 작용하는 변형률로 환산하면 다음과 같다.

$$\epsilon_{creep} = \frac{\epsilon_c}{f_c} \times f_{cr} \times \frac{E_{ps}}{f_{ps}} \quad (5)$$

여기서, f_{cr} : 실제 구조물에 작용되는 평균 콘크리트 응력(ksi)

2.3 건조 수축에 의한 손실

콘크리트의 건조 수축은 상대 습도와 밀접한 관계에 있으며, 건조 수축으로 인한 프리스트레싱 손실을 계산한 〈표 5〉와 같은 Baldwin의 모델¹²⁾을 사용한다.

표 5. 상대 습도와 건조 수축의 관계

Mean Daily Relative Humidity (Annual %)	40-Year Shrinkage Strain $\epsilon_{s,40}$ ($\times 10^{-6}$)
Under 40 %	130
40 to 80 %	100
Above 80 %	50

건조 수축량은 지수 형태의 시간에 따라 직선적으로 변화한다고 가정하여 텐던에 작용하는 건조 수축에 의한 변형률(ϵ_{shrin})을 계산하면 다음과 같다.

$$\epsilon_{shrin} = \frac{\ln(t/10)}{\ln(1460)} \times \epsilon_{s,40} \times \frac{E_{ps}}{f_{ps}} \quad (6)$$

(단, $t > 10$ day)

2.4 강재 릴랙세이션에 의한 손실

원자력발전소에서 사용되는 강재의 릴랙세이션율은 설계시 Post-Tensioning Institute⁶⁾에서 제안된 4%로 가정하여 고려하였기 때문에 이 값을 그대로 사용하며, 시간에 따른 릴랙세이션량(ϵ_{steel})은 지수 형태의 시간에 따라 선형적으로 변화한다고 가정하여 다음과 같은 식을 사용한다.

$$\epsilon_{steel} = \frac{\ln t}{\ln 14600} \times 0.004 \quad (7)$$

3. 불확실성에 대한 고려

실제 구조물에서 발생하는 긴장력의 손실은 크리프, 건조 수축, 강재 릴랙세이션이 주 원인이지만 이 외에도 기타 현장에서 발생할 수 있는 여러 가지의 불확실한 요인이 있으며 또한 위의 세 가지 요인에 대해서도 완벽하게 고려되었다고는 볼 수 없다.

따라서 이러한 불확실성을 고려하기 위하여 <표 6>과 같이 USNRC Regulatory Guide 1.35의 규정에 근거하여 상한치와 하한치를 설정하여 주었으며, 이를 각 해당 변형률의 값에 곱하여 사용하였다.

표 6. 불확실성에 의한 상한치와 하한치의 설정

구 분	크리프	건조 수축	릴랙세이션
상한치	+25%	+15%	+15%
하한치	-15%	-15%	-15%

4. 텐던 긴장력 손실량의 허용 범위 결정

이상에서와 같이 초기 손실 및 시간 의존성에 의한 손실과 불확실성에 의한 영향을 모두 고려하여 원자력 발전소 가동 후 40년까지의 격납 건물 프리스트레싱 시스템의 모든 텐던에 대하여 가동 중 검사시 해당 텐던 긴장력의 허용 범위를 산정하였다.

영광 원자력발전소의 경우 임의의 텐던인 수직 텐던 No. 6/139(6)과 수평 텐던 No. 1/23(B2), 그리고 울진 원자력발전소의 경우에도 임의의 텐던인 수평 텐던인 No. 1/12의 B2와 B3의 경우에 대한 시간에 따른 긴장력의 허용치 변화 추이를 도표로 나타내면 <표 7>과 같으며, 이를 그림으로 나타내면 <그림 5> 및 <그림 6>과 같다.

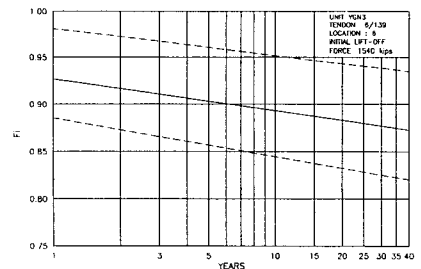


그림 5. 영광 원자력발전소 수직 텐던 No. 6/139(6)의 시간에 따른 텐던 가동 중 검사 평가도

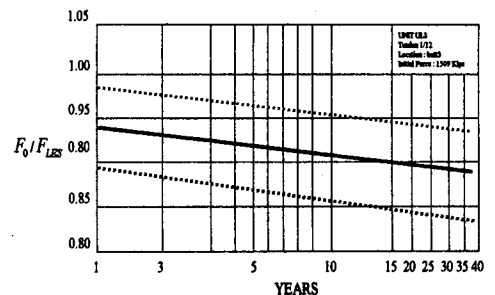


그림 6. 울진 원자력발전소 수평 텐던 No. 1/12(B3)의 시간에 따른 텐던 가동 중 검사 평가도

표 7. 원자력발전소 가동 중 검사 기준표

영광 원자력발전소 3호기												
No.	Fo (kips)		1	3	5	10	15	20	25	30	35	40
6/139 6	1539.7	Max.	0.980	0.968	0.962	0.953	0.948	0.944	0.941	0.939	0.936	0.935
		Mean	0.926	0.913	0.906	0.895	0.889	0.884	0.881	0.878	0.875	0.873
		Min.	0.885	0.869	0.860	0.847	0.840	0.834	0.830	0.826	0.823	0.820
1/23 B2	1495.3	Max.	0.972	0.959	0.951	0.941	0.935	0.930	0.927	0.924	0.921	0.919
		Mean	0.915	0.900	0.892	0.879	0.872	0.866	0.862	0.859	0.856	0.853
		Min.	0.870	0.852	0.842	0.827	0.817	0.811	0.806	0.801	0.798	0.795
울진 원자력발전소 3호기												
No.	Fo (kips)		1	3	5	10	15	20	25	30	35	40
1/12 B2	1467.0	Max.	0.970	0.960	0.955	0.949	0.945	0.943	0.941	0.939	0.937	0.936
		Mean	0.930	0.918	0.912	0.904	0.900	0.896	0.894	0.892	0.890	0.889
		Min.	0.864	0.848	0.841	0.831	0.825	0.821	0.818	0.815	0.813	0.811
1/12 B3	1508.8	Max.	0.970	0.960	0.956	0.949	0.946	0.943	0.941	0.940	0.938	0.937
		Mean	0.931	0.919	0.914	0.906	0.901	0.898	0.896	0.894	0.892	0.891
		Min.	0.867	0.851	0.844	0.834	0.829	0.825	0.822	0.819	0.817	0.815

그림에서 수직 축은 검사시 실측되는 텐던 긴장력을 텐던 최초 정착시의 긴장력으로 나눈 비를 나타내며, 수평 축은 가동 중 검사 해당 연도를 나타낸다. 또한 실선은 불확실성을 고려하지 않은 손실로 인한 이론적인 텐던 긴장력의 시간에 따른 감소 추세를 의미하며, 상하 점선은 검사 시점에서 실측된 텐던 긴장력이 가지는 허용 범위를 의미한다. 즉, 가동 중 검사시 실측된 임의의 텐던에 대한 긴장력의 값이 점선으로 표시된 상하한선 이내에 존재하여야 안전한 것으로 평가된다.

5. 결 론

우리나라 원자력발전소 격납 건물 포스트텐서닝 시스템의 시간에 따른 텐던 긴장력 손실량을 산정하기 위하여 긴장 순서에 따른 손실량 예측, 콘크리트의 크리프와 건조 수축, 강재의 릴랙세이션 등에 관한 실험적 검증 및 이론적 해석을 실시하였다.

이에 따라 원자력발전소 가설 후 40년까지의 가동 중 검사에서 사용되는 텐던의 허용 긴장력에 대한 평가 기준을 제시하였으며, 앞으로의 원자력발전소 격납 건물 포스트텐서닝 계통의 가동 중 검사에 대한 기술적 자립을 이룰 수 있게 되었다.

앞으로는 지금까지의 각종 현상에 대하여 단순화된 형태로 고려한 것을 보다 더 합리적인 방법으로 정량

화시키는 작업이 필요하며, 또한 아직까지도 내재되어 있는 여러 가지 불확실성에 대하여 보다 정확한 검증을 통한 정량화 작업이 수행되어야 할 것이다. 이와 같은 작업이 수행된다면 보다 정확한 평가 기준을 수립할 수 있을 것으로 판단되며, 이를 위해서는 이에 대한 지속적인 연구가 필요한 것으로 사료된다. □

참고문헌

1. ACI 201.1 R-68, "Guide for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components. Requirements for Class CC Concrete Components of Light-Water Cooled Plants," American Concrete Institute, 1994.
2. Nuclear Regulatory Research, "Regulatory Guide 1.35," U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1990.
3. "영광 3, 4호기 격납 건물의 포스트텐서닝 시스템 가동 중 검사를 위한 기술 시방서 및 절차서", 한국전력공사, 1994, 557p.
4. 「콘크리트표준시방서」, 한국콘크리트학회, 1999.
5. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures," ACI Manual of Concrete Practice(ACI 209R-82), 1990.
6. "CEB-FIP Model Code," Comite Euro International du Beton, 1991.
7. Bazant, Z.P., and Murphy, W.P., "Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and

- Design of Concrete Structures-Model B3," Materials and Structures, Vol. 28, 1995, pp.357 ~ 365.
8. Bazant, Z.P., and Baweja, S., "Justification and Refinements of Model B3 for Concrete Creep and Shrinkage : 1. Statistics and Sensitivity," Materials and Structures, Vol. 28, 1995, pp.415 ~ 430.
 9. Bazant, Z.P., and Baweja, S., "Justification and Refinements of Model B3 for Concrete Creep and Shrinkage : 2. Updating and Theoretical Basis," Materials and Structures, Vol. 28, 1995, pp.488 ~ 495.
 10. Hansen, T.C., "Creep and Stress Relaxation of Concrete," Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stokholm, 1960.
 11. American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression," ANSI/ASTM C512-87, 1987.
 12. Baldwin, J.L., "Climates of the United States," U.S. Department of Commerce, Washington DC, 1974.
 13. Post-Tensioning Institute, "Post-Tensioning Manual," Phoenix, 1986.

● 경제 용어 해설 ●

▶ 플래티늄카드 :

백금카드란 뜻으로 기존 골드(특별)카드보다 한 단계 더 높은 등급의 카드. 차별화된 서비스와 가치로 회원 만족을 위해 개발된 고품격 카드이다.

소수의 VIP 회원만 소지할 수 있는 만큼 회원 자격이 까다롭다. 공무원 3급 이상, 판·검사, 변호사, 공인회계사, 종합병원 의사, 병·의원 개업 의사, 정부 관련 기관·금융계 임원, 등록법인 이상 대표, 교육계 총·학장 등이 발급 대상이다.

변면 회원들에게 제공되는 서비스 또는 혜택은 다양하다. 예를 들어 현금 서비스가 1,000만원까지 가능하고 해외 유명 의료기관에서 위성으로 의료 진단 서비스를 받을 수 있다. 또 국내선 왕복 항공권을 매년 보내주거나 은행에서 최고 5,000만원까지 우대 금리를 적용 받아 무보증으로 대출해주기도 한다.

▶ 뉴 이코노미(New Economy) :

미국의 장기 경제 호황을 설명하는 새 경제학 이론. 이 이론은 18세기 산업 혁명보다 파급 효과가 큰 정보화 혁명을 겪고 있는 미국 경제를 설명하기 위해서는 기본 경제학의 틀을 뛰어넘는 새로운 경제 패러다임이 필요하다고 보고 있다.

기존 경제학 이론은 과도한 경제 성장은 물가 상승을 유발하므로 물가 상승을 유발하지 않는 미국의 적정 경제 성장률을 4% 이하로 봤으나 최근 미국이 그 이상의 경제 성장에도 물가가 안정돼 새로운 경제 이론의 필요성이 커졌다.

특히 최근 미국 주식 시장의 폭발적인 상승세를 설명하는 이론으로 기존 경제학의 한계를 극복하는 대안으로 뉴 이코노미가 대두했다. 그러나, 기존 경제학이 설명할 수 있는 경제 현상을 뉴 이코노미라는 이론으로 과대 포장했다는 주장도 함께 제기되고 있어 뉴 이코노미의 운명은 미지수이다.