

고성능 팽창제를 이용한 FRP 긴장재의 정착에 관한 연구

김덕현*·조병완**·이계삼***·김영진****

A Study on the Behavior of Non-Metallic Anchoring System for FRP Tendons

Kim, Duck Hyun · Jo, Byung Wan · Lee, Gay Sam · Kim, Young Jin

Key Words: FRP tendon, anchorage, highly expansive mortar, pull-out test, epoxy mortar

Abstract

Since non-corrosive Fiber Reinforced Polymer(FRP) tendons have been in increasing use for underground and coastal structures constantly contacted with fresh water or sea water because of their superiority to metallic ones in corrosion-resistance, new non-metallic anchoring system for FRP tendons has been developed and investigated to verify the effectiveness of tendon force, which consist of mainly FRP pipes and Highly Expansive Mortar(HEM).

The major factors considered in this experiment were expansive pressures of HEM during its hydration, sleeve lengths and types, and anchoring methods of tendon.

New anchoring system were investigated from the pull-out tests. The pull-out procedures of the FRP tendons in the various pipe filled with HEM were analyzed and improved ideas were suggested to develop novel non-metallic anchoring system for FRP tendons

The pull-out tests for the FRP tendon and new non-metallic anchoring system were conducted. The results show that non-metallic anchoring system for the FRP tendon has been more stabilized due to the gradual expansive pressure of HEM, as time goes. Since the lower stiffness of FRP pipes causes the weakness of anchoring force, it requires the increase of stiffness using a carbon fiber or an increased section area.

1. 서론

최근 정착부의 응력집중을 완화시키기 위한 일환으로 강재 슬리브에 에폭시를 충전하여 정착하는 방법과 전자(前者)의 방법에 기존 썬기형을 병용하는 방법 등이 개발되어져 왔다.⁽⁴⁾ 그러나, 이러한 정착방법은 부분적인 강재 정착장치의 사용으로 인해 복합재 긴장재의 내식성을 최대한 활용하지 못한다는 단점을 가지고 있다. 따라서 복합재 긴장재의 탁월한 내식성을 최대한 발휘하기 위해서는 그 특성을 고려한 비금속 정착장치가 개발되어져야 한다. 또한 이에 병행하여 시공성,

부착특성, 내구성 및 장기 피로저항성 등도 꾸준히 연구되어져야 할 것이다.^{(3),(6)}

이에 본 연구에서는 고성능 팽창제를 이용하여 긴장재의 정착력을 증대시키고 응력집중을 감소시키고자 하였다. 또한 비금속의 GFRP 슬리브를 이용한 비금속 정착시스템의 가능성을 확인하고 인발실험(pull-out test)을 통해 제안된 정착시스템의 구조적 안정성을 확인하고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험개요

본 연구는 고성능팽창제와 복합재료를 이용한 비금속 정착장치의 구조적 안정성을 확인하기 위한 실험으로써 사용된 재료특성, 실험변수 및 실험방법 등은 다음과 같다.

* Korea Composite 대표이사

** 한양대학교 토목공학과 교수

*** 육군사관학교 교수요원

**** 한양대학교 토목공학과 박사과정

2.2 재료 특성

2.2.1 고성능 팽창제

고성능 팽창제는 석산이나 콘크리트 구조물을 발파하지 않고 파괴하는 “비폭성 파쇄제(非爆性破砕劑)”의 목적으로 일본에서 처음 개발되었다. 고성능 팽창제는 슬러지가 경화되면서 팽창하여 Fig. 1에 보여진 바와 같이 48시간 경과 후에는 40MPa 이상의 팽창압이 발현되며 1년 이상의 재령에서는 100MPa의 높은 팽창압이 발생된다.⁽⁷⁾

팽창압은 물-시멘트비, 온도, 구경 및 제조회사 등에 따라 다양하며 실험에 사용된 고성능 팽창제는 Sumitomo Osaka Cement사(일본)의 봄·가을 용을 1/4의 물-시멘트 비로 사용하였다. 사용된 팽창제의 구성 성분은 Table 1에 보여진 바와 같다.⁽⁸⁾

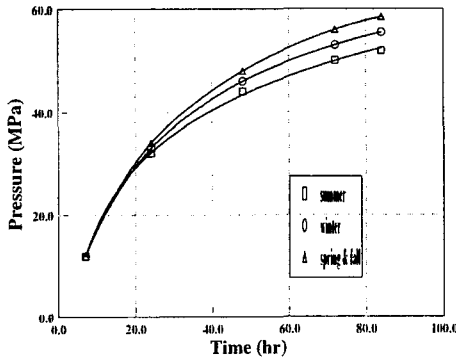


Fig. 1 Expansive pressure curves of HEM

Table 1 Natural composition of HEM

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Igloss
1.1%	0.9%	4.5%	83.5%	4.7%	3.4%	1.9%

Table 2 Material properties of epoxy mortar

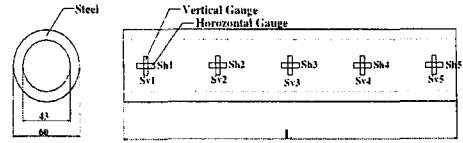
Aggregate	Part A	Part B	Elastic Modulus	Ultimate Strength
84 %	13 %	3 %	21.3 GPa	98 MPa

Table 3 Material properties of CFCC

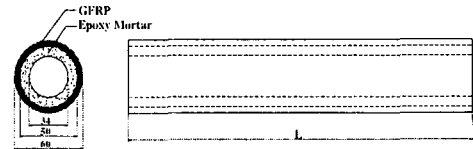
Designation	Diameter	Effective Area	Tensile Strength	Tensile Modulus	Guaranteed Capacity	Ultimate Capacity	Maximum Capacity
1×7 17.8 φ	17.8 mm	159.6 mm ²	2.13 GPa	144 GPa	280 kN	330 kN	363 kN

Table 4 Principal variables of test specimens

Specimens	Sleeve material	Sleeve length	Anchorage method
S-200-T1	steel	200mm	post-tension
S-300-T1		300mm	
S-400-T1		400mm	
S-400-T2		400mm	
G-300-T1	GFRP	300mm	post-tension
G-400-T1		400mm	



(a) Steel sleeve



(b) GFRP sleeve

Fig. 2 Shapes and dimensions of steel and GFRP sleeves

2.2.2 정착 슬리브

복합재료 슬리브는 고성능 팽창제의 높은 팽창압과 인발하중에 의해 발생하는 인장 및 압축강도를 고려하여 설계하였으며, E-glass/Epoxy ($E_{11}=39.2GPa$, $E_{22}=8.39GPa$, $E_{12}=2.18GPa$, $\nu=0.28$)를 [+45, -45]로 필라멘트 와인딩 공법으로 제작한 GFRP 파이프를 사용하였다. 또한 팽창압의 균일한 전달과 파이프의 좌굴 및 파이프 단부에서 발생하는 지압응력의 완화를 위하여 변성에폭시 몰탈을 이용하여 복합재료 파이

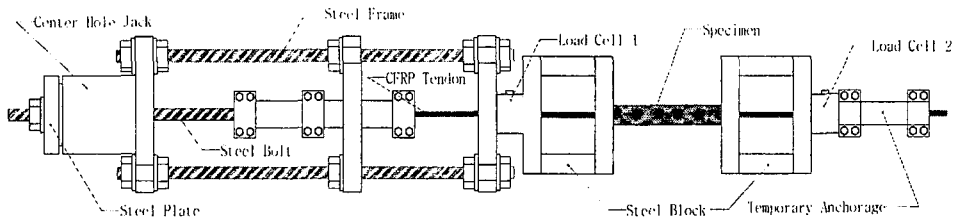


Fig. 3 Specimens setup(Pre-tension : Type 2)

프의 내부를 보강하였다.

공장 제작된 GFRP 파이프를 실험 변수에 입각한 적정 길이로 절단하고 내부에 변성 에폭시 몰탈을 타설하였다. 이 때 FRP 긴장재와 고성능 팽창제의 거취를 위한 공동을 가지도록 함과 동시에, 위에서 언급된 외력에 저항하기 위한 두께가 되도록 했다.

강관 및 복합재료 슬리브의 규격과 인발실험시 변형을 측정 위치는 Fig. 2에 보여진 바와 같다.

GFRP관의 내부 보강재로 사용된 변성 에폭시 몰탈은 주재(Part A), 경화제(Part B)와 골재로 구성되어 있으며, 변성에폭시 몰탈의 배합비와 재료적 물성은 Table 2에 보여진 바와 같다.

2.2.3 복합재(CFRP) 긴장재

복합재 긴장재는 탄소섬유를 이용한 7연선 형태의 일본 도쿄 로프사의 carbon fiber composite cable(CFCC)을 사용하였으며, 복합재료 긴장재의 재료적 물성치는 Table 3에 보여진 바와 같다.

2.3 실험변수

복합재 슬리브를 이용한 비금속 정착장치의 구조적 안정성을 평가하기 위해 강재 파이프와 유리섬유로 제작한 복합재 슬리브를 사용하였다. 고성능 팽창제를 이용한 정착장치의 정착길이 산정을 위해 슬리브의 길이를 200, 300 및 400mm로 변화시켜 인발실험을 실시하였으며, pre-tension과 post-tension에 의한 정착특성을 비교하고자 하였다.

실험에 사용된 실험변수는 Table 4에 보여진 바와 같다.

2.4 실험방법

시간에 따른 고성능 팽창제의 팽창압 발현 변

화를 측정하기 위해 Fig. 2에 나타난 바와 같이 슬리브의 원주방향 변형률을 측정하였으며, 인발 하중에 따른 정착부내에서의 응력변화 및 슬립 여부를 판단하기 슬리브와 복합재 긴장재의 동일한 위치에 인발하중 작용방향과 동일한 방향으로 변형률 게이지를 부착하였다. 인발실험은 Fig. 3에 보여진 바와 같이 post-tension과 pre-tension 방법의 특성을 고려하여 자체 제작한 실험장치를 사용하였다. Post-tension의 경우, 복합재 긴장재를 슬리브의 중앙에 위치시킨 후 슬러리 상태의 팽창제를 주입하여 소요 팽창압이 발현시킨 후 인발실험을 실시하였다(Fig. 3(a)). Pre-tension 방법은 가정착장치(temporary anchorage)를 이용하여 140kN(Guaranteed force의 50%)의 긴장력을 도입한 후 초기 릴렉세이션을 측정한 후 슬리브에 팽창제를 주입하여 소요 팽창압을 발현시켰다. 긴장력의 도입은 가정착장치의 긴장재의 단면을 점차적으로 감소시켜 긴장력 도입에 따른 전달길이를 측정하였으며, 인발실험을 post-tension 방법과 동일하다(Fig. 3(b)).

3. 실험결과 및 고찰

3.1 팽창압

3.1.1 팽창압의 계산

강재 슬리브의 팽창압은 실험에서 측정된 원주방향 변형률 ϵ_0 를 이용하여, 등방성 재료로 된 두께가 두꺼운 관의 방정식들에서 유도된 식(1)에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$p_i = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \frac{r_o^2 - r_i^2}{r_i^2} \epsilon_0 \quad \text{식(1)}$$

복합재 슬리브에 있어 보강된 변성 에폭시 몰탈은 높은 팽창압이 발생할 때 발생하는 인장 응력에 저항하지 못하므로, 외부의 복합재 슬리브만이 이에 저항하는 것으로 가정할 수 있다. 적층판에 작용하는 하중 변형률의 관계는 식(2)와 같다.⁽¹⁾

$$\begin{Bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_6 \\ M_1 \\ M_2 \\ M_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} & B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} & B_{61} & B_{62} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} & D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ B_{61} & B_{62} & B_{66} & D_{61} & D_{62} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_6 \\ \kappa_1 \\ \kappa_2 \\ \kappa_6 \end{Bmatrix} \quad \text{식(2)}$$

$$A_{ij} = \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \overline{Q}_{ijk} dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} \overline{Q}_{ij} dz \quad \text{식(3)}$$

$$= \sum_{k=1}^N \overline{Q}_{ij} (\bar{z}_{k+1} - \bar{z}_k)$$

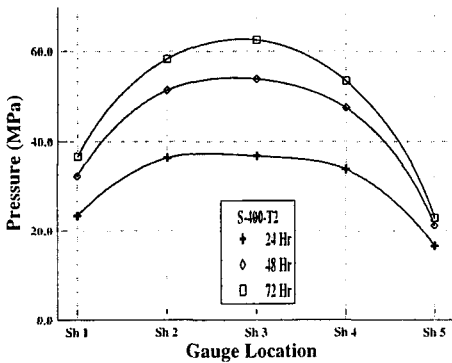


Fig. 4 Expansive pressures for the time(S-400-T2)

종방향 팽창압의 변화에 따른 곡률의 영향이 작을 경우, 식(2)에서 모멘트에 관련된 항은 무시할 수 있으며 식(4)과 같이 팽창압을 산정할 수

있다.

$$N_i = A_{ij} \epsilon_j \quad (ij=1,2,6) \quad \text{식(4)}$$

3.1.2 팽창압의 발현 특성

강재와 복합재 슬리브에 고성능 팽창제를 주입한 후 시간에 따른 팽창압은 Fig. 4에 보여지는 바와 같이 72시간 경과 후 슬리브 중앙부에서의 최대팽창압은 30~60MPa이 발현되었다. 팽창압의 분포는 각 시험체의 중앙부에서 최대 팽창압이 발생하고 슬리브의 양쪽 끝단으로 갈수록 점차적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 이와 같은 팽창압 분포는 Fig. 5에 보여진 바와 같이 복합재 긴장재에 인장력이 작용할 때, 정착부의 단부에서 발생하는 응력집중을 완화시켜 응력집중에 의한 복합재 긴장재의 파단을 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

슬리브의 길이에 비례하여 팽창압은 증가하였다. 이는 슬리브의 단부에서 팽창압의 구속력 저하로 인해 발생한 것으로 팽창압의 저하를 방지하기 위해서는 슬리브의 길이를 적절하게 확보하거나, 슬리브의 단부에서 팽창압을 구속시켜 팽창압의 감소를 방지할 수 있을 것으로 여겨진다.

Fig. 4 (e)와 Fig. 4 (f)에서 알 수 있듯이 G-300-T1, G-400-T1의 복합재 슬리브를 사용한 시험체의 최대팽창압은 각각 30MPa과 40MPa로서 동일한 길이의 강재 슬리브(S-300-T1, S-400-T1)를 사용한 시험체와 비교하여 약 40%의 팽창압 저하가 발생하였다. 이는 유리섬유를 사용한 복합재 슬리브의 낮은 강성으로 인해 팽창압을 충분히 구속하지 못한데 기인하는 것으로 판단된다. 따라서, 복합재 슬리브를 사용하기 위해서는 단면을 증대시키거나 슬리브의 재료로 탄

Table 5 Test results

Specimens		Sleeve length (mm)	Maximum pressure (MPa, 72hr)	Maximum load (kN)	Failure mode
Steel	S-200-T1	200	30.68	168.73	PF
	S-300-T1	300	52.74	252.35	PF
	S-400-T1	400	62.52	341.3	PF
	S-400-T2	400	62.52	362.8	TF
GFRP	G-300-T1	300	22.13	151.07	PF
	G-400-T1	400	34.47	225.63	PF

1) slip load : load when FRP tendon's slip occurs at the center of sleeve

2) PF : pull-out failure

3) TF : tendon fracture failure

소섬유와 같은 높은 탄성계수를 가지는 재료를 사용하여 강성을 증가시키는 경우, 소요 팽창압을 발현할 수 있을 것으로 기대된다.

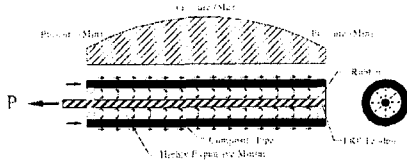


Fig. 5 Anchorage using friction and pressure

3.2 프리스트레스 손실

Pre-tension방법의 S-400-T2 시험체에 작용하고 있는 초기 긴장력(140kN)을 100%에서 0%로 제거하면서 긴장력의 도입에 따른 슬리브의 위치별 변형률(Sh 1~Sh 5) 변화를 측정하였다. 측정결과, Fig. 6에 보여진 바와 같이 긴장력이 도입되는 단부쪽에 위치한 Sh 4, Sh 5의 압축력이 감소하는 반면에 Sh 1~Sh 3에서의 압축 변형률 변화는 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 본 실험에서 사용된 복합재 긴장재(D17.8)의 경우, 140kN의 pre-tension 하중에서 전달길이는 약 150mm로 매우 작게 나타났다. 또한, 췌기식의 일반적인 정착방법의 사용시 발생하는 과도한 프리스트레스 즉시 손실은 본 실험에서 제안된 정착방법에서는 거의 발생하지 않음을 알 수 있으며, 초기 긴장력의 계산을 보다 간소화 할 수 있을 것으로 기대된다.

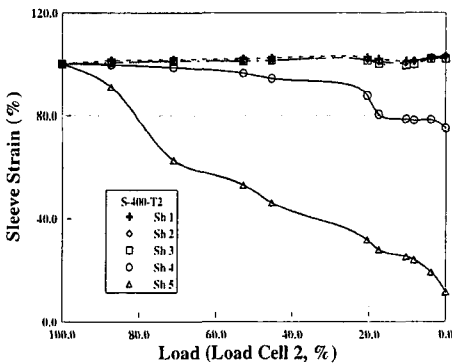


Fig. 6 Sleeve strain curves for introduction of prestress(S-400-T2)

3.3 파괴거동

정착부 내의 고성능팽창제에서 소정의 팽창압이 발현된 후 시험체별로 인발실험을 수행하였다. Fig. 7에 보여진 바와 같이 하중의 증가에 따른 슬리브의 변형률과 긴장재의 변형률 분포는 긴장재의 슬립 발생 유무에 따라 거의 동일하게 비선형적인 분포를 나타냄을 알 수 있다. 이는 긴장재에서 부착파괴가 일어난 이후에도 잔존하는 마찰 저항력이 발생함을 나타내며, 이는 정착부의 취성적인 인발파괴를 방지할 수 있을 것으로 기대된다.

일정하중에서 초기 슬립이 발생하여 비선형적 변형을 나타낸 후 변형률이 증가하면서 선형적인 분포를 나타낸다. 또한, 최대 인발하중은 정착 길이에 비례함을 알 수 있다.

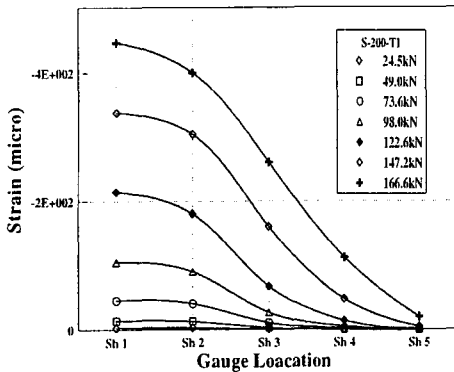
전반적인 부착파괴 과정은 강제 및 복합재 슬리브 모두 유사했다. 그러나 복합재 슬리브를 사용한 시험체의 경우, 정착길이가 동일한 시험체의 최대 인발 하중은 강재를 사용한 시험체보다 300mm 정착 길이에서는 약 40%, 400mm 정착 길이에서는 약 36% 더 낮게 나타났다. 이는 복합재 슬리브를 사용한 시험체의 낮은 팽창압과 함께 인발하중이 작용할 때 강성 부족으로 인해 긴장재의 구속력이 저하되었기 때문인 것으로 생각된다. 따라서, 적절한 팽창압의 확보와 함께 긴장재의 구속력을 증대시키기 위해서는 복합재 슬리브의 강성을 증대시켜야 할 것으로 판단된다.

Type 1 방식이 적용된 S-400-T1은 최대하중(341.3kN)에서 정착길이가 전 구간에서 슬립이 발생하였으나, Type 2 방식이 적용된 S-400-T2에서는 긴장재의 파단하중(362.8kN)에 도달할 때까지 정착부의 중앙부 이후에서는 긴장재의 슬립이 발생하지 않았으며, 응력집중에 의한 정착부 단부에서의 긴장재의 조기파단이 일어나지 않았다.

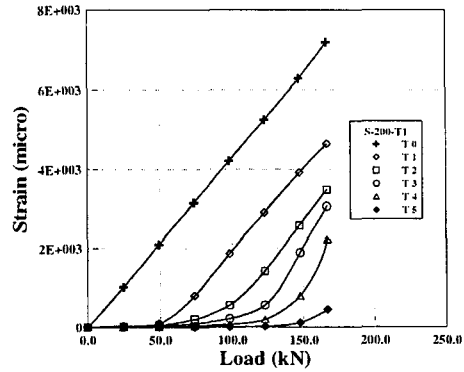
이상의 실험 결과를 요약하면 Table 5와 같다.

4. 결론

본 연구에서는 고성능 팽창제를 이용한 비금속 FRP 긴장재의 정착방법 시스템을 제안하기 위한 기초 연구로서 강재와 복합재 슬리브에 고성능 팽창제를 주입하여 복합재 긴장재를 정착한 후 인발시험을 실시하여 파괴특성을 비교·검토하였다. 본 연구로부터 얻어진 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.



(a) Load-sleeve's strain curves



(b) Load-FRP tendon's strain curves

Fig. 7 Strain curves of Sleeve and FRP tendon(S-200-T1)

- 1) 복합재 긴장재의 정착매개체로 고성능 팽창제를 사용하는 경우, 긴장재의 정착력은 시간의 경과와 함께 팽창압은 증대되어 구조적으로 더욱더 안정될 것으로 판단된다.
- 2) 슬리브의 길이에 따른 고성능 팽창제의 팽창력의 분포특성은 전단력에 취약한 복합재 긴장재의 단점을 보완하여 응력집중에 의한 긴장재 파단을 방지하는데 기여할 것으로 생각된다.
- 3) 고성능 팽창제를 이용한 정착장치의 경우, 정착길이의 산정시 긴장재의 정착에 필요한 소요팽창압을 얻기 위해서는 슬리브의 길이에 따른 팽창압의 변화 또한 검토하여야 한다.
- 4) GFRP 관의 경우에는 강관에 비하여 낮은 강성 때문에 고성능 팽창제의 팽창압 구속능력 결여로 팽창압이 낮게 발생하며, 정착력 또한 상대적으로 작게 나타났으나, 탄성계수가 높은 탄소섬유 등의 재료를 사용하거나 또는 GFRP 파이프의 단면적을 확대하여 강성을 높이면, 정착시스템의 기능을 충분히 수행할 수 있을 것으로 판단된다.
- 5) Type 2의 경우, 초기긴장으로 인해 추가적으로 작용하는 하중에 대한 변형률 감소와 함께 전달 길이 내에서의 긴장재의 쉐기작용으로 인해 보다 안정된 구조적 거동을 나타내었다.

후 기

시험체 제작에 도움을 주신 육사 기계연구실, 쌍용양회, 원창엔텍, 한국쇼본드건설에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김택현, "Composite Structures for Civil and Architectural Engineering", E & SPON, London, 1995
2. T. Harada et al, "Development of Non-Metallic Anchoring Devices For FRP Tendons", Proceedings of the Second International RILEM Symposium, Belgium, August, 1995
3. T. Harada et al, "Behavior of Anchorage for FRP Tendons Using Highly Expansive Material Under Cyclic Loading", Proceedings of the Third International Symposium, Vol. 2, October, 1997
4. 日本土木學會 制定, 連続纖維補強材を用いたコンクリート構造物の設計·施工指針(案) 日本土木學會, 1992
5. Myo Khin et al, "Experimental Study on Friction Factor for FRP Tendons In Pretensioned Prestressed Concrete Members", Proceedings of the Third International Symposium, Vol. 2, October, 1997
6. 최용환, CFRP긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 휨거동, 한양대, 1999. 12
7. T. Harada et al, "Characteristics of Expansive Pressure of An Expansive Demolition Agent and The Development of New Pressure Transducers", Proceedings of JSCE, Vol. 21, 1993