

격납건물 콘크리트의 이축 파괴기준 및 응력-변형률 응답

Biaxial Failure Criteria and Stress-Strain Response  
for Concrete of Containment Structure

이상근\*, 우상근\*, 송영철\*, 권용길\*\*, 조철희\*\*\*

\* 전력연구원                      \*\* 충북대학교 토목공학과                      \*\*\* 한전 중앙교육원  
대전시 유성구 문지동 103-16    청주시 흥덕구 개신동 산48    서울시 노원구 공릉2동 170-2

요 약

원전 격납건물에 사용된 무근 콘크리트의 이축 파괴기준과 응력-변형률 응답이 일축 및 이축 응력(압축-압축, 압축-인장, 그리고 인장-인장 조합응력)하에서 다루어졌다. 일축 및 이축 재하를 위해 정사각 판형시편이 사용되었다. 실험 데이터로부터 이축 압축( $f_2/f_1=-1/-1$ )인 경우의 콘크리트 강도는 일축 압축강도 보다 17%가 더 큰 것으로 나타났으며, 푸아송비는 0.1745가 얻어졌다. 실험 결과를 이용하여 일축 강도 5660 psi인 콘크리트의 이축 파괴포락선과 세 개의 이축 재하영역에 따른 콘크리트 이축 파괴거동들이 도시되었다. 그리고, 콘크리트의 이축 파괴기준 및 응력-변형률 응답곡선들에 대한 신뢰성 있는 해석식들이 제안되었다.

Abstract

Biaxial failure criteria and stress-strain response for plain concrete of containment structure on nuclear power plants are studied under uniaxial and biaxial stress (compression-compression, compression-tension, and tension-tension combined stress). The concrete specimens of a square plate type are used for uniaxial and biaxial loading. The experimental data indicate that the strength of concrete under biaxial compression,  $f_2/f_1=-1/-1$ , is 17 percent larger than under uniaxial compression and the poisson's ratio of concrete is 0.1745. On the base of the results, a biaxial failure envelope for plain concrete that the uniaxial strength is 5660 psi are provided. and the biaxial failure behaviors for three biaxial loading areas are plotted respectively. And, various analytical equations having the reliability are proposed for representations of the biaxial failure criteria and stress-strain response curves of concrete.

1. 서 론

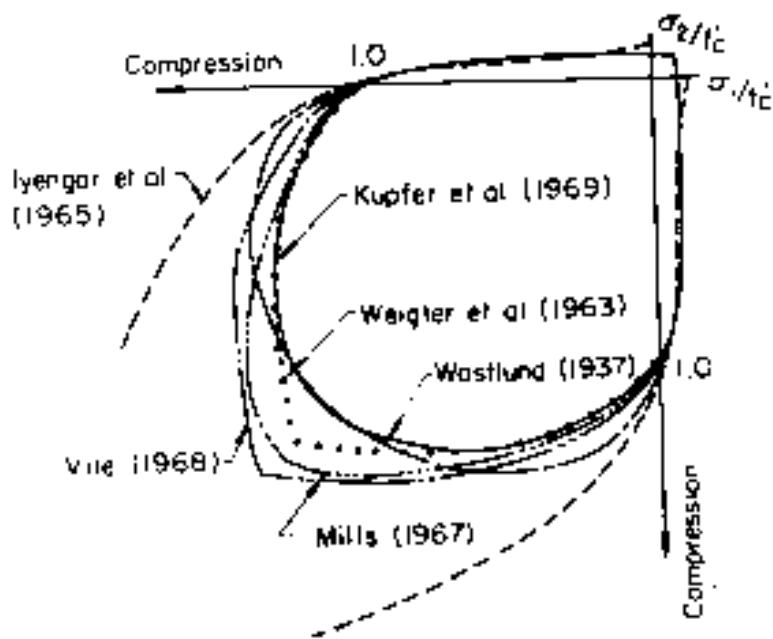
임의 공학 구조물들에 대한 비선형 해석을 수행하기 위해서는 먼저 그 공학 구조물을 구성하고 있는 구조 재료들의 비선형 재료 유한요소모델들이 필수적으로 필요시 된다. 비선형 재료 유한요소

모델은 재료가 일축(uniaxial), 이축(biaxial) 그리고 삼축(triaxial) 상에서 형성되는 응력장에서 임의 조합하중에 의해 발생하는 파괴거동 즉, 탄성구간은 물론 탄성한도에서 파괴점까지의 비선형 거동 구간에 대한 모든 거동 정보를 필요로 하기 때문에 각 구성 재료 모듈별 파괴실험을 통한 실제의 거동 정보를 획득하여 이를 토대로 비선형 재료모델을 개발해야만 한다. 그러나, 재료에 대한 다축(multi-axial) 응력하에서의 파괴실험을 수행하기가 매우 어렵고, 하나의 재료에 대해 파괴거동 및 기준을 제시하기 위해서 만도 상당한 소요기간을 필요로 하기 때문에 일반적으로 과거의 실험적 경험 데이터에 의존하고 있는 실정이다. 비균질성 복합재료인 콘크리트의 경우는 다축 재하실험에 있어서 한층 더 많은 어려움을 내포하고 있다. 이는 과거의 관련 연구들<sup>1-6)</sup>에서도 잘 나타나 있는데 가장 큰 어려움으로 시편의 구속효과(confining effect)를 들고 있다. <그림 1>은 과거 다수 연구자들<sup>1-6)</sup>이 콘크리트를 대상으로 수행한 이축 압축실험의 결과를 보여주는 것으로 동일 주응력을 받는 이축 압축하의 파괴강도가 구속효과를 인하여 서로간에 상당한 차이들을 보이고 있음을 알 수 있다.

콘크리트 구조물의 비선형 해석에 기존의 비선형 재료모델을 사용하는 것이 불합리한 것은 아니지만 보다 신뢰성 있는 해석이 되기 위해서는 대상 구조물에 사용된 동일 재료에 대한 실제의 실험으로부터 얻어진 데이터를 활용하는 것이 가장 타당할 것이다.

따라서, 본 연구는 원자력 구조물 중 안전의 핵심인 원자로 격납건물의 안전성 향상 차원에서 중대사고시 발생하는 극한내압하의 비선형 막대거동(membrane behavior) 예측 및 구조성능 평가가 보다 신뢰성 있게 평가되기 위해서 격납건물에 사용된 설계기준강도 5500psi에 준하는 콘크리트를 대상으로 일축 및 이축 응력실험을 수행하였다. 이축 실험은 압축-압축, 압축-인장, 그리고 인장-인장 재하영역 모두에 걸쳐 수행되었고, 여기서 얻은 실험결과로부터 콘크리트 이축 파괴포락선을 도출하였으며 1969년에 Kupfer<sup>1)</sup>가 제시한 실험결과와 비교하였다. 실험적 파괴포락선으로부터 단순화된 해석적 파괴포락선을 수식으로 표현하였고 각 이축 재하영역별로 응력비에 따른 파괴거동을 도출하였으며, 탄성계수와 프아송비 등 재료물성 값이 함께 제시되었다.

추가로 이축 압축 재하영역에서 주축방향의 극한응력과 극한변형률과의 관계식을 도출하고 이를 토대로 고려된 응력비에 따라 응력-변형률 응답에 대한 이론식들이 제시되었고 이론식과 실측데이터로 얻은 이축 압축하의 응력-변형률 응답을 서로 비교하였다.



<그림 1> 기존에 제안된 콘크리트 이축 파괴포락선들

## 2. 기존연구 분석

2축 응력하의 콘크리트 강도실험은 국외의 경우 1900년대 초기부터 수많은 실험적 연구가 수행되어 왔다. 그러나 이들 연구는 1969년에 Kupfer<sup>1)</sup>가 비교적 합리적인 실험결과를 제시하기 전 까진 대부분 수많은 시행착오를 겪어야 했으며 그들이 제시한 결과 역시 신뢰성을 갖지 못했다. 이처럼 오랜 기간 동안 시행착오를 겪을 수밖에 없었던 주된 이유 중 하나는 시험편에 명확하고도 일정한 2축 응력상태를 구현하는 것이 매우 어려운 과제였기 때문이다. 콘크리트 이축 응력실험에 대한 기존의 연구 이력을 살펴보면 국내의 경우는 전혀 수행된 바가 없고, 단지 국외에서만 다음과 같은 연구가 수행되었다.

2축 응력을 받는 콘크리트의 거동에 대한 Kupfer<sup>1)</sup> 이전의 연구들은 사용된 시험체의 형태에 따라서 세 그룹으로 분류할 수 있다. 첫째, 콘크리트의 2축 압축응력 하에서 입방체형(cubes) 또는 판형(plates) 콘크리트 시험체를 사용한 연구자로 Föple<sup>2)</sup>, Wästlund, Glomb, Weigler와 Becker, Iyengar, Vile 그리고 Robinson 등이 있다. Föple은 1축 또는 2축 압축 하중을 받는 각 주형(prismatic) 시험체의 경우 실험장비의 가압판(bearing platens)과 콘크리트 사이의 마찰에 기인하여 하중 재하면을 따라 구속효과가 발생할 수 있음을 보여주었으며, 그와 같은 구속이 시험체의 실제 강도를 증가시키는 문제점을 야기 시킨다는 사실을 알게되었다. 결국, Föple은 시험편의 재하면에 윤활재를 바름으로써 구속을 줄여보려 하였으나 그와 같은 처리가 반대의 효과를 이룰 수도 있다는 사실을 제시하였다. 즉, 가압판과 시험편 사이의 윤활 제품의 사용은 시험편에 횡방향 인장응력과 비균일 응력분포를 야기시키며, 결과적으로 실제 강도의 감소로 나타난다는 결론을 도출하였다. 이후의 연구자들 역시 계속해서 전통적인 가압판을 사용하였고 가압판과 시험편 사이의 구속효과를 제거하기 위해 콘크리트 표면의 다양한 처리나 부드러운 패킹을 이용하였고 이들의 결과를 비교할 때 주축 양방향에서 동일한 압축응력을 받는 경우에 대해 얻어진 강도는 동일한 시험체의 1축 압축강도의 80~350% 까지 다양하게 분포하여 어느 것이 신뢰성 있는 결과인지 판단하기가 어렵다.

다음으로, 2축 압축응력은 반경방향으로 정수압(hydrostatic pressure)을 받는 원주형 시험체에서도 발생시킬 수 있다. 이 방법은 Karman과 Böker에 의해 처음으로 대리석을 대상으로 한 실험에서 이용하였으며, 후에 Richard와 Brandtzaeg<sup>3)</sup> 그리고 Fumagalli<sup>4)</sup>가 이 방법을 콘크리트의 이축 강도실험에 적용하였다. 이들의 실험결과에 대해 Kupfer는 신뢰성 있는 이축 응력 상태를 구현하기 위해선 원주형 시험체의 길이방향 구속효과를 피하면서 동시에 시험체를 적절한 막으로도포하여 콘크리트 표면의 균열이나 공극에 압력 유체가 침입하는 것을 막아야 한다는 사실을 지적하면서 그들의 결과에 의문을 제기하였다. 실제로 그들은 결론에서 “2차원 압축상태에서의 콘크리트 강도는 최소한 일축 압축상태에서의 강도만큼은 커야한다”는 식의 비정량적인 표현을 사용하였다.

마지막으로, Bresler와 Pister<sup>5)</sup>, Goode와 Helmy 그리고 McHenry와 Pister는 압축-인장응력 영역에서의 콘크리트 거동을 연구를 위해 내부 정수압(internal hydraulic pressure)과 축압축을 받는 중공 원통형 시험체(hollow cylinders)를 사용하였고 Bellamy<sup>6)</sup>는 외부압력과 축압축을 받는 중공 원통형 공시체를 사용하였으며 그의 결과에서 2축 압축강도가 1축 압축강도의 1.48~2.69배 까지 나타나는 것으로 제시하였다.

1969년 Kupfer<sup>1)</sup>는 기존의 연구가 시편형상에 주안점을 두었던 것과는 달리 가압판의 형태를 변화시키는 방법을 사용하였다. Kupfer는 판형시편을 대상으로 단면이 3×5mm이고 길이가 100~140mm인 일련의 필라멘트들로 구성된 특수한 형태의 브러쉬 가압판(brush bearing platens)을 사용함으로써 시편과 가압판 사이의 마찰효과와 시편 둘레를 감싸고 있는 가압판 간의 구속효과를 대폭적으로 감소시켰으며, 따라서 그 결과에 매우 높은 신뢰성을 부여하였다. 한편,

Mansour(1989)<sup>7)</sup>는 강섬유보강 콘크리트를 대상으로 이축 압축영역하의 실험에서 브러쉬 형태가 아닌 고전적인 가압판을 그대로 사용하면서 0.1mm 비닐시트를 이용하여 양질의 결과를 제시하기도 하였다.

최근의 연구에서 Hussein(1999~2000)<sup>8,9)</sup>은 세가지 형태의 가압판 즉 고행가압판, Teflon 병용가압판, 그리고 브러쉬형 가압판을 고려한 유한요소해석을 수행하여 가압판과 시편 간에 발생하는 전단 응력을 제시하고 이들 세 가지 형태 중 Teflon을 사용한 가압판과 브러쉬 가압판이 고행 가압판에 비해 전단응력이 매우 작게 나타남을 보였다.

### 3. 시편 제작

#### 3.1 배합설계

실험에 사용한 콘크리트의 배합설계는 표 1과 같고 국내 경수로형 격납건물에 사용되는 콘크리트 설계기준강도가 5500psi(385 kg/cm<sup>2</sup>)인 점을 감안하여 이를 목표강도로 정하였다. 사용 골재는 국내 원전 건설현장(영광)으로부터 직접 수급 받아 사용하였으며 굵은골재 최대치수 19mm인 쇄석과 강모래 그리고 1종 시멘트가 사용되었다.

표 1 콘크리트 배합설계

W/C (%)	S/A (%)	Air (%)	단위량(kgf/m <sup>3</sup> )				고유동화제		AE제	
			W	C	G	S	%(×C)	kgf/m <sup>3</sup>	%(×C)	kgf/m <sup>3</sup>
51.0	43.3	2.0	175	349	1004	768	0.8	2.792	0.01	0.005

#### 3.2 시편제작 및 공칭강도

본 연구는 콘크리트에 대한 이축 재하가 가능하도록 시편 형상을 정사각 판형으로 제작하였다. 시편의 크기는 사용골재의 최대치수가 19mm인 점을 고려하여 두께가 골재 최대치수의 3배 이상이 되는 200(H)×200(W)×60(T)mm로 하였다. 판형시편은 이축 응력 실험시 하중을 받는 면에 추가적인 처리가 필요 없도록 정밀기계로 제작된 강제 몰드를 사용하여 제작하였으며, 사용된 몰드는 콘크리트 타설시 발생할 수 있는 변형성을 방지하면서 조립 및 해체에 의한 반복 사용이 가능하도록 하였다. 강제 몰드의 높이는 시편 두께보다 1mm 크게 제작하여 콘크리트 타설 후 침하로 인한 두께변화를 감안하였고 시편의 상면은 다이아몬드 연마기를 이용하여 0.1mm이하의 편평도를 유지도록 하였다. 원주형시편을 포함한 모든 판형시편에 대해 28일간 수중양생을 실시하였다.

판형시편의 일축 강도와 현재 우리 나라에서 콘크리트 공칭강도 측정을 위해 기준으로 사용하고 있는 원주형시편과의 형상이 다른 원인으로 인한 강도차를 측정하기 위해 판형시편과 별도로 원주형시편을 제작하였으며 원주형 시편에 대한 7일과 28일차 일축 압축강도와 쪼갬인장강도 실험을 실시하였으며 그 결과는 표 1과 같다. 실험결과 콘크리트의 28일 강도는 배합설계시 설계기준강도로 설정했던 386 kgf/cm<sup>2</sup>(5500psi)를 약간 초과하는 405 kgf/cm<sup>2</sup>(5760psi)의 강도를 나타냈다.

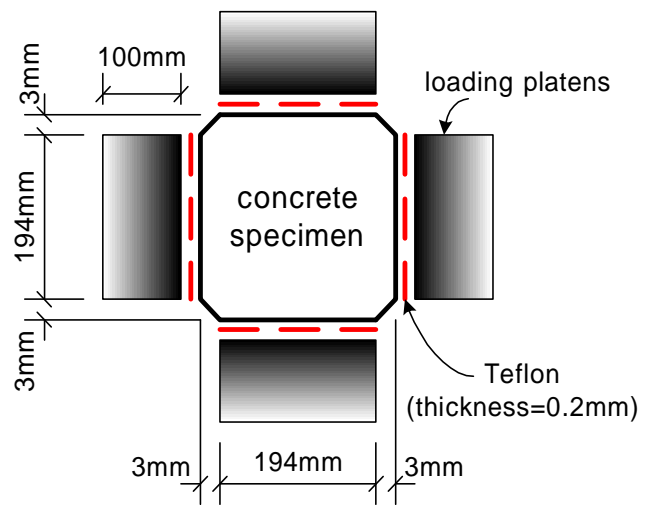
표 2 원주형 시편 강도실험 결과

시편치수 (mm)	압축강도 kgf/cm <sup>2</sup> (psi)		조깅인장강도 kgf/cm <sup>2</sup> (psi)		탄성계수 kgf/cm <sup>2</sup> (psi)
	7일	28일	7일	28일	28일
∅100*200	289 (4110)	405 (5760)	33 (469)	49 (597)	3.09E+05 (4.39E+05)

#### 4. 이축 재하시스템

##### 4.1 가압판(loading platens)

본 연구는 Hussein<sup>9)</sup>의 연구에서 고려한 세가지 형태 즉, 고�형 가압판, Teflon 병용 가압판, 그리고 브러쉬 가압판 중 브러쉬 가압판에 비해 제작이 용이하고 고�형 가압판에 비해 마찰 감소효과가 뛰어난 Teflon (두께 0.1mm) 병용 가압판을 사용하였다. 가압판의 치수는 194×60×100mm로 시험편 단면의 폭 200mm 보다 6mm 작게 제작하였으며, 이는 가압판 가장자리 양쪽으로 3mm의 여유공간을 둬으로써 이축 압축 재하시 시험편을 둘러싸고 있는 가압판 간의 구속효과를 제거하기 위한 방안이다(그림 2. 참조). 따라서 시험편의 단면보다 가압판의 단면이 부족하여 생기는 응력의 차를 최소화하기 위해 시험편의 두께방향 모서리를 3mm씩 연마하여 시험편 단면 전체에 하중이 전달 되도록 하였다. 한편, 인장가압판은 두께방향으로 발생 가능한 편심력을 감소시키기 위해 시험편과의 접촉부에서 70mm 떨어진 위치의 중앙에 가압판 길이방향으로 11mm 직경의 hole을 뚫고 10mm 봉을 삽입하여 힌지로 처리하였다.

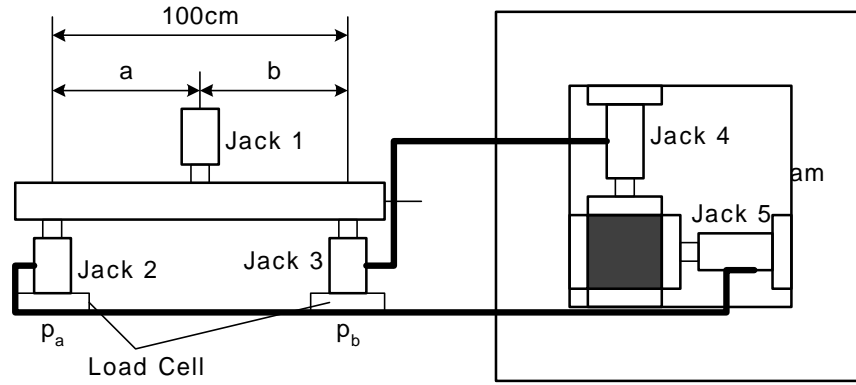


<그림 2> 이축 재하실험을 위한 가압판과 시편형상

##### 4.2 가력장비

본 실험에서 구성한 가력시스템은 압축-압축, 인장-압축, 그리고 인장-인장 응력 영역에서 응력비 조절이 가능하고 정해진 응력비가 일정하게 유지될 수 있도록 설계하였다. 강제 프레임을 비롯하여 200 tonf 용량의 유압실린더 1기와 100 tonf 유압실린더 4기 그리고 100 tonf 로드셀을 조합하여 <그림 3>과 같이 구성하였다. 여기서, 강제 프레임의 경우 예상 최대하중 재하시 최대 휨변형이  $1.0 \times 10^{-5}$ mm이하가 되도록 설계하였으며, 이축 실험시 응력비( $f_2/f_1$ ) 제어가 가능함과 동시에 가력후 파괴 시까지 일정한 응력비를 유지토록 하기 위하여 <그림 3>과 같이 단순보의 원리를 채택하였다. <그림 3>의 단순보에서 위에 놓여 있는 유압실린더 Jack 1을 보를 따라 적절히 이동시킴으로서 다음 식에 의해 응력비를 제어하였다.

$$\frac{a}{b} = \frac{p_b}{p_a} = \frac{f_1}{f_2} \quad (1)$$

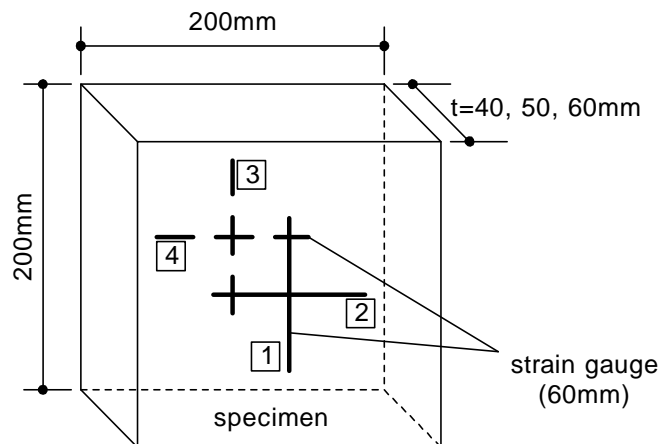


<그림 3> 이축 가력 유압시스템 구성도

### 5. 실험방법

판형시편을 이용한 일축 및 이축응력 실험은 압축-압축, 압축-인장, 그리고 인장-인장 재하 영역으로 구분하여 각 영역별 응력비  $\alpha (=f_2/f_1)$ 를 4수준으로 고려하여 실시하였다. 이 중 압축-압축 재하의 경우는 시편과 가압판 사이의 마찰로 인해 시편에 구속력이 발생하게 되어 강도가 과대 평가되는 문제점이 등장하고, 압축-인장 재하의 경우는 시편이 압축에 의해 구속되기 때문에 직교 방향 인장력에 의한 시편의 인장변형이 제약받는 현상이 나타나게 된다. 따라서 본 연구는 이를 극복하기 위해 시편과 가압판 사이에 0.1mm두께의 폴리에틸렌(polyethylene) 계열 Teflon을 사용하였으며, 압축-인장 재하실험에 있어서는 Teflon을 두장씩 겹쳐 사용함으로써 마찰효과를 최소화하였다. 일축 및 이축 인장실험은 시편에 일정한 분포하중으로 직접적인 재하가 가능할 수 있도록 에폭시(epoxy) 접착에 의해 부착력을 이용한 인장 재하방법을 따랐다. 에폭시 접착에 의한 인장실험은 국외의 관련 연구들에서 주로 사용했던 방법이다. 시편의 접착면에 약한 층을 이루고 있는 모르타르 성분을 연마하여 제거한 후 에폭시 접착하여 48시간 이상 경과하였을 때 실험을 실시하였다. 일축 및 이축 응력실험에서 하중 재하속도는 평균  $20\text{kgf/cm}^2$ 를 일정하게 유지시켰다.

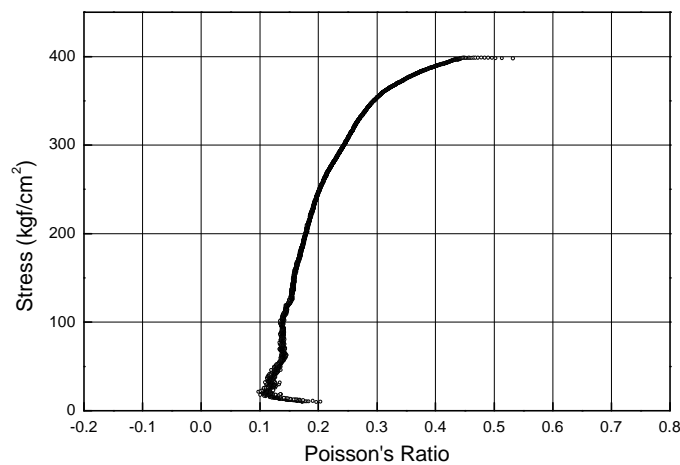
시편의 두 주축방향에 대한 변형률 측정을 위해 <그림 4>와 같이 전면과 후면에 4개의 변형률 게이지를 운용하여 응력에 따른 시편의 주변형률 값을 데이터획득장비(TDS602)를 이용하여 측정하였다.



<그림 4> strain gauge 위치

## 6. 실험결과 및 분석

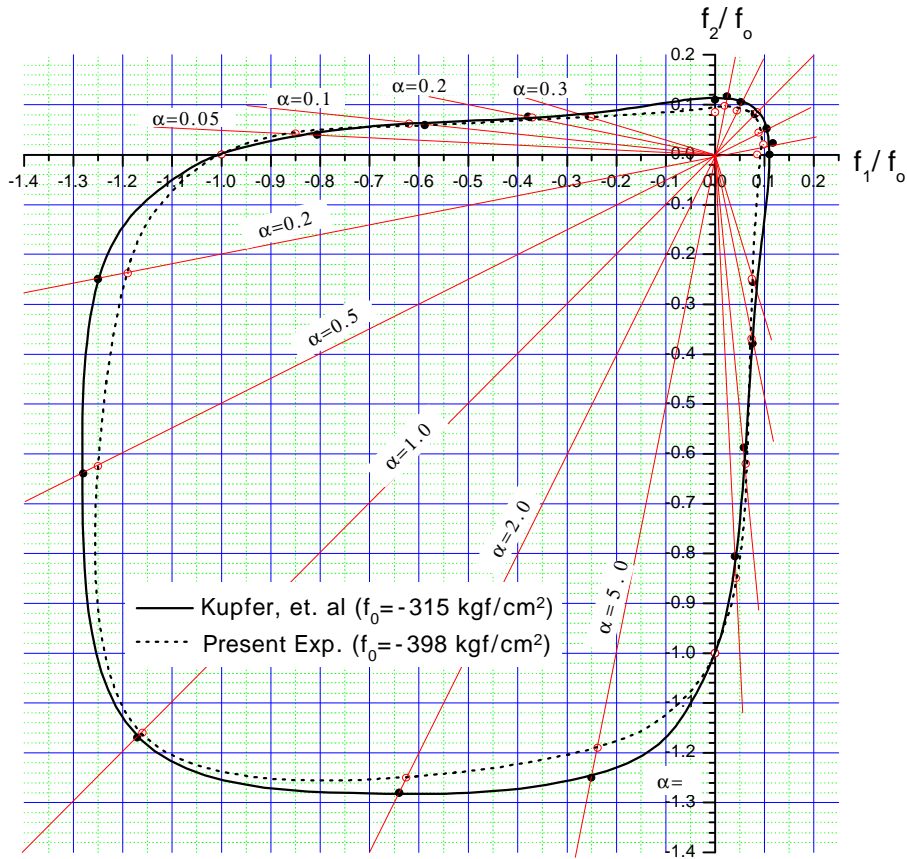
본 연구는 공칭강도  $405 \text{ kgf/cm}^2$ (원주형 공시체 28일 강도임)의 콘크리트를 대상으로 판형시편을 제작하여 일축 및 이축 응력실험을 실시하였다. 먼저, 판형시편을 이용한 일축 압축실험으로부터 기준강도,  $f_0$ 와 탄성계수,  $E$  그리고 푸아송 비,  $\nu$ 를 얻었다. 판형시편의 일축 압축강도(기준강도,  $f_0$ )는 원주형시편의 일축 압축강도(공칭강도,  $f_{ck}$ ),  $405 \text{ kgf/cm}^2$ 의 약 98%에 해당하는  $398 \text{ kgf/cm}^2$ 이 얻어졌으며 이는 시편형상이 달라서 나타나는 강도차이에 기인한다. 일축 압축하의 응력-변형률 관계로부터 도출한 콘크리트의 탄성계수는  $3.01 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ ( $4.28 \times 10^5 \text{ psi}$ ) 이었으며, <그림 5>의 응력에 따른 푸아송 비의 관계로부터 푸아송 비 0.1745를 도출하였다. <그림 5>의 경우 일반적으로 예상 할 수 있는 일정구간의 뚜렷한 수직구간이 나타나지 않아 명확하게 푸아송 비를 알 수 없기 때문에 비례 직선구간의 평균값을 계산하여 정하였다.



<그림 5> 일축 압축하의 응력에 따른 푸아송비

### 6.1 이축 파괴포락선

이축 재하실험을 통한 콘크리트의 파괴포락선을 그리기 위해 하나의 이축 조합응력 영역에 대해 4수준의 응력비를 고려하였고, 하나의 응력비 당 4개의 시편을 운용하였다. 응력비( $\alpha$ )의 경우 이축 압축영역과 이축 인장영역은 0, 0.2, 0.5, 1을, 이축 압축-인장영역은 0.05, 0.1, 0.2, 0.3을 고려하였다. 이축 재하실험 결과 얻어진 주축방향 극한강도 값을 기준강도( $f_0$ )에 대한 상대강도비로 환산하여 <그림 6>에 실선으로 도시한 이축 파괴포락선을 얻었다. <그림 6>에 점선으로 도시한 것은 1969년 Kupfer<sup>1)</sup>가 콘크리트 기준강도  $315 \text{ kgf/cm}^2$ 를 대상으로 이축 응력실험을 통해 제시한 파괴포락선으로 지금까지 많은 연구자들이 활용하고 있다. <그림 6>에서 알 수 있듯이 Kupfer<sup>1)</sup>의 파괴포락선과 유사한 형태를 보이고 있으며, 이는 본 연구의 이축 응력실험의 신뢰성을 단적으로 입증하는 것이다. Kupfer<sup>1)</sup>는 일축 압축강도( $\alpha=0$ )에 대한 이축 압축강도( $\alpha=1$ )의 비를 1.16으로 제시하여 이축 압축강도가 일축 압축강도보다 약 16%가 크다는 것을 피력하였는데 본 연구의 실험결과에서도 이와 비슷한 1.17의 값을 얻었다.



<그림 6> 본 실험 및 Kupfer<sup>1)</sup>에 의한 이축 파괴포락선 비교

## 6.2 이축 파괴기준식

본 연구는 이축 응력실험을 통해 얻은 비선형성 이축 파괴포락선을 <그림 7>의 실선과 같이 단 순화한 후 상대강도비와 응력비의 관계를 이용하여 해석에 쉽게 반영할 수 있는 파괴기준 식을 다음과 같이 제안하였다.

### 6.2.1 이축 압축영역

$$1.0 \geq \alpha \geq 0.2 \quad \frac{f_p}{f_0} = 1.25 \quad (1)$$

$$\alpha < 0.2 \quad \frac{f_p}{f_0} = \frac{1}{\alpha - 1} \quad (2)$$

$$5.0 \geq \alpha \geq 1.0 \quad \frac{f_p}{f_0} = \frac{1.25}{\alpha} \quad (3)$$

$$\alpha > 5.0 \quad \frac{f_p}{f_0} = -\frac{1}{\alpha - 1} \quad (4)$$

여기서,  $\alpha$ 는 응력비  $f_2/f_1$ 이고,  $f_0$ 는 일축 압축하의 판형시편 1축 극한강도를  $f_p$ 는 이축 응력 하에서 직교하는 두 주축 중 보다 큰 압축하중을 받는 방향(major principal direction)으로의 정점응력(peak stress)을 나타낸다.



6.2.2 이축 압축-인장영역

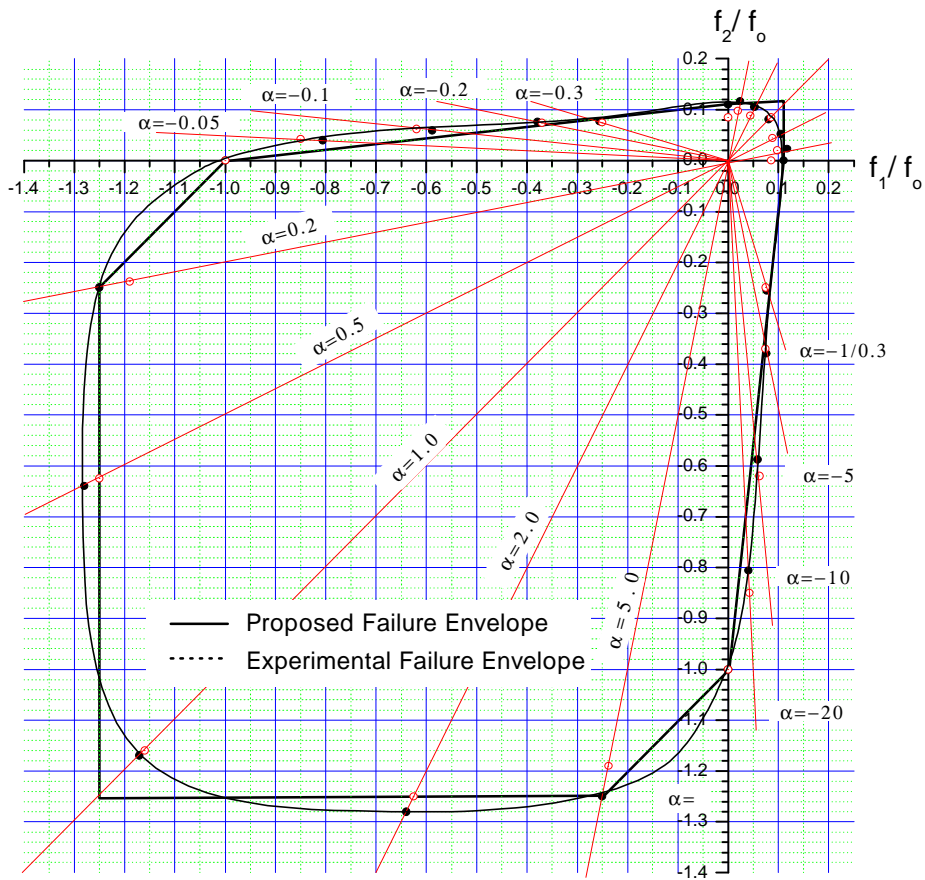
$$\alpha < 0 \quad \frac{f_p}{f_0} = \frac{0.11}{\alpha - 0.11} \quad (5)$$

$$\alpha > 0 \quad \frac{f_p}{f_0} = -\frac{1}{\alpha - \frac{1}{0.11}} \quad (6)$$

6.2.3 이축 인장-인장영역

$$\alpha > 1 \quad \frac{f_p}{f_0} = \frac{0.11}{\alpha} \quad (7)$$

$$\alpha \geq 1 \quad \frac{f_p}{f_0} = 0.11 \quad (8)$$

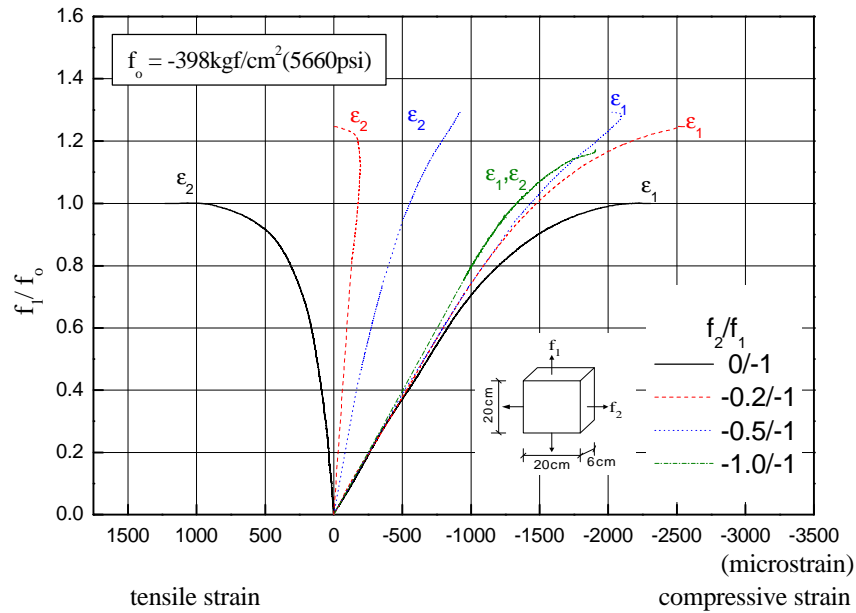


<그림 7> 이축 응력에 대해 제안된 단순 파괴포락선

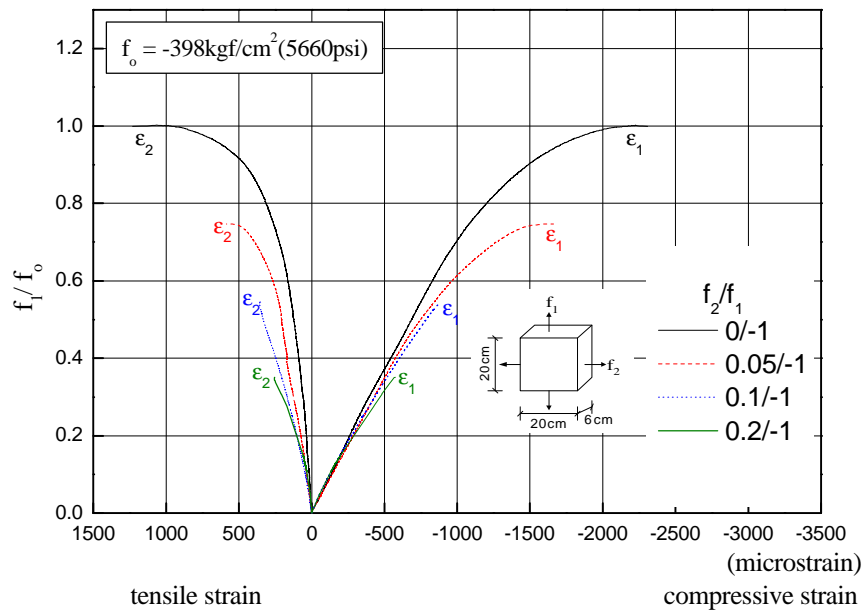
6.3 이축 응력하의 파괴거동

판형시편에 대해 두 개의 주축방향에서의 변형률이 측정되었으며, 측정 데이터로부터 응력-변형률 관계를 <그림 8>~<그림 9>에 제시하였다. <그림 8>은 이축 압축영역에서의 응력-변형률 관계를 나타내는 것으로 여기로부터 응력비  $f_2/f_1=0/-1$ 인 일축 압축의 경우가  $x=0$ 인 축을 기준으로 가장 외측으로 놓여지게 되고 반면에 응력비  $f_2/f_1=-1/-1$ 인 이축 압축의 경우가 가장 내측에 놓이게 됨을 알 수 있다. 이는 콘크리트가 이축 응력하에서 하중에 의한 구속효과가 발생하여 일축

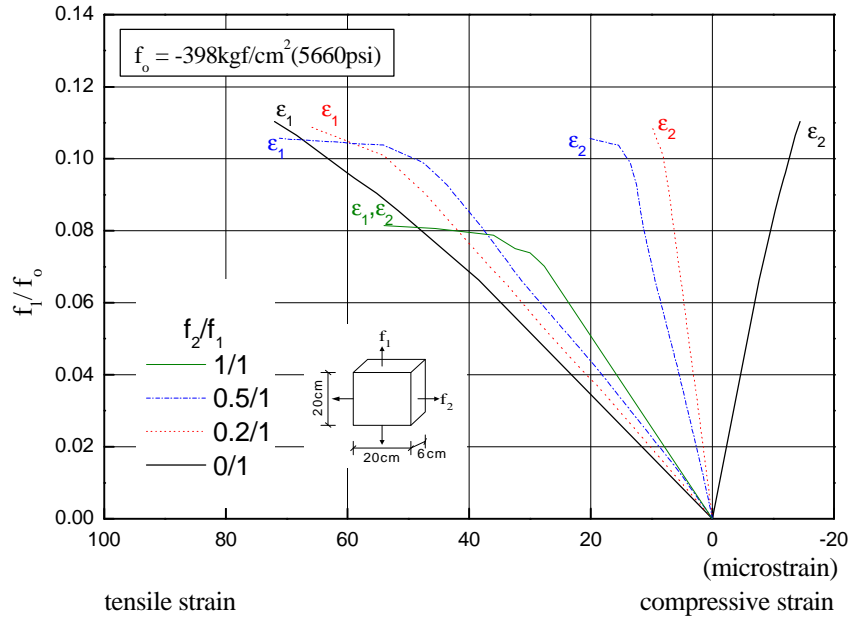
응력하에서 보다 강도가 증가하게 되기 때문이다. <그림 9>는 이축 압축-인장영역에서의 응력-변형률 관계를 나타내며 응력비의 절대값이 커질수록 인장력의 영향이 커짐으로 인하여 일축 압축강도에 비해 1축 방향 압축강도( $f_1$ )가 점점 작아짐을 보이고 있다. <그림 10>의 경우 이축 인장영역에서의 응력-변형률 관계를 나타내는 것으로 일축 인장강도는 일축 압축강도의 약 11%로 나타났고 응력비가 증가하면 이축 압축의 경우와 마찬가지로 변형률이 감소하는 경향을 보였다.



<그림 8> 이축 압축하의 응력변형률 관계



<그림 9> 이축 압축-인장하의 응력-변형률 관계



<그림 10> 이축 인장하의 응력-변형률 관계

### 7. 이축 압축하의 응력-변형률 응답 특성

만일 콘크리트가 균질한 재료이고 완전한 탄성체라고 가정하면 이축 재하상태에서 다음식을 적용할 수 있을 것이다.

$$\epsilon_1 = \frac{f_1}{E} - \nu \frac{f_2}{E} \quad (9)$$

여기서,  $E$ 는 탄성계수이고  $\nu$ 는 푸아송비이다.

식(9)를 다시 일반적인 형태로 표현하면 식(10)과 같이된다.

$$f = \frac{\epsilon E}{1 - \nu \alpha} \quad (10)$$

여기서,  $f$ 와  $E$ 는 각각 1방향과 2방향에서의 응력과 변형률이다.

Liu<sup>10)</sup>는 식(10)을 기초로 비선형 거동을 고려하여 이축 압축하의 콘크리트에 대해 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$f = \frac{A + B\epsilon E}{(1 - \nu \alpha)(1 + C\epsilon + D\epsilon^2)} \quad (11)$$

여기서, 매개변수  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , 그리고  $D$ 는 압축하의 응력-변형률 곡선상에서 다음의 조건들을 이용하여 얻을 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \epsilon &= 0, & f &= 0 \\ \epsilon &= 0, & \frac{df}{d\epsilon} &= \frac{E}{1 - \nu \alpha} \\ \epsilon &= \epsilon_b, & f &= f_b \\ \epsilon &= \epsilon_b, & \frac{df}{d\epsilon} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

여기서,  $f_p$ 와  $\epsilon_p$ 는 각각 이축 압축하의 정상응력과 정상응력에서의 변형률을 나타낸다.

따라서, 식(11)에 도출된 매개변수 값과 정상응력에서의 접선탄성계수  $E_s = f_p/\epsilon_p$ 를 대입하면 이축 압축하의 콘크리트에 대한 해석적 응력-변형률 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있다.<sup>10)</sup>

$$f = \frac{\epsilon E}{(1-\nu\alpha)\left[1 + \left(\frac{1}{1-\nu\alpha} \frac{E}{E_s} - 2\right)\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_p}\right) + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_p}\right)^2\right]} \quad (13)$$

여기서,

$f, \epsilon$  = 이축 재하에서의 응력과 변형률,

$E$  = 일축 재하에서의 콘크리트의 탄성계수,

$\nu$  = 일축 재하에서의 푸아송비,

$\epsilon_p$  = 이축 압축에 대해 주(major) 주축방향으로의 콘크리트 최대응력에서의 변형률,

$\alpha$  = 고려된 방향의 주응력(principal stress)에 대한 직교방향의 주응력 비,

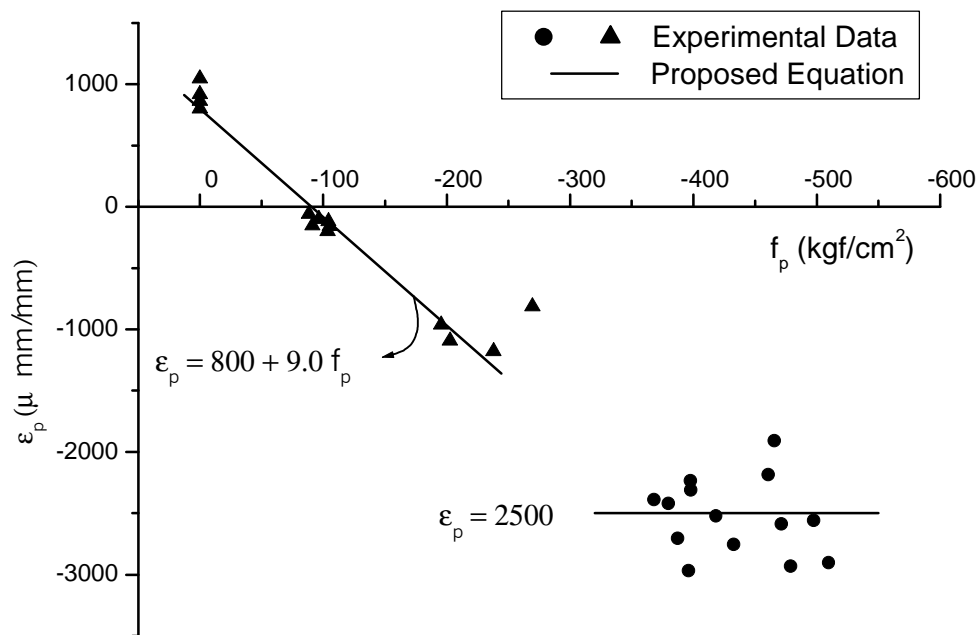
$E_s = f_p/\epsilon_p$

$f_p$  = 이축 압축에 대한 콘크리트의 극한강도(식(1)~(4)로부터 얻을 수 있음) 이다.

위의  $\epsilon_p$ 의 경우, 본 연구의 이축 압축실험에서 얻어진 데이터들을 이용하여 도시한 <그림 11>로부터 얻을 수 있는 제안식 식(14)와 (15)를 이용하여 그 값을 도출 할 수 있다.

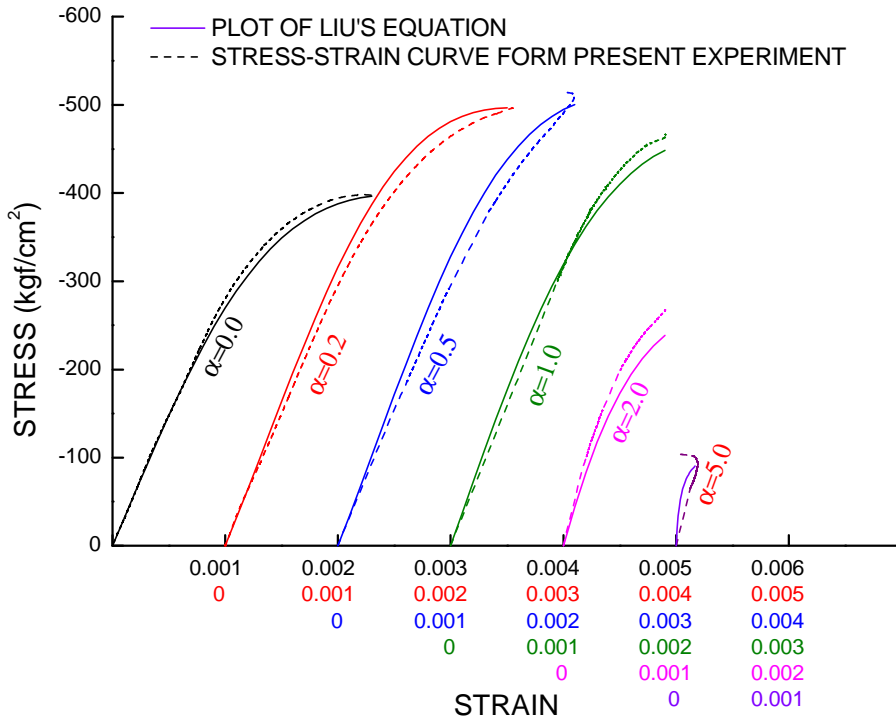
$$\alpha \leq 1, \quad \epsilon_p = 2500 \times 10^{-6} \quad (14)$$

$$\alpha > 1, \quad \epsilon_p = (800 + 9.0 f_p) \times 10^{-6} \quad (15)$$



<그림 11> 이축 압축하의 콘크리트에 대한 극한변형률과 극한응력과의 관계

<그림 12>는 본 연구의 이축 압축실험에서 얻어진 실험적 응력-변형률 관계와 Liu<sup>10)</sup>가 제안한 식(13)에 의한 응력-변형률 관계를 비교한 것으로 실험 결과와 해석적 결과가 대체로 잘 일치됨을 볼 수 있다. 따라서, Liu<sup>10)</sup>의 제안식이 본 연구의 실험 데이터 및 앞에서 제안된 실험식들과 잘 접목될 수 있고 이를 토대로 본 연구의 결과가 충분히 신뢰성 있음을 확인할 수 있다.



<그림 12> 이축 압축하의 실험적 응력-변형률 관계(본 연구)와 식(13)에 의한 해석적 응력-변형률 관계의 비교

## 8. 결론

본 연구는 격납건물 콘크리트(판형시편 일축 압축강도  $f_0=398 \text{ kgf/cm}^2$ )를 대상으로 일축 및 이축 응력실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 판형시편을 이용한 이축 압축, 이축 압축-인장, 그리고 이축 인장 재하실험을 통하여 실험적 이축 파괴포락선을 제시하였고 1969년 Kupfer<sup>1)</sup>가 제시한 파괴포락선과 비교함으로써 본 연구에서 제시한 파괴포락선이 신뢰성 있음을 입증하였다.
- 2) 제시된 실험적 이축 파괴포락선으로부터 단순화된 모델식들을 이축 재하영역별로 제안하였다.
- 3) 판형시편의 일축 압축강도에 대한 이축 압축강도의 비는 1.745로 나타났고, 일축 압축실험으로부터 콘크리트의 탄성계수는  $3.01 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2 (4.28 \times 10^5 \text{ psi})$  이었으며, 푸아송 비는 0.1745 이었다.

- 4) 일축 인장강도는 일축 압축강도의 약11%로 나타났다.
- 5) 이축 압축하의 콘크리트에 대한 극한변형률과 극한응력과의 관계식이 제안되었으며, 실험적 응력-변형률 응답이 Liu<sup>10)</sup>가 제안한 해석식에 의한 응력-변형률 관계와 비교적 잘 일치함을 보였다.

## 참고문헌

- 1) Kupfer H. and Hilsdorf, H. K., *Behavior of Concrete Under Biaxial Stress*, ACI Journal, Proceedings, 66(8), pp. 656-666, 1969.
- 2) Föpl, A., *Reports from the Laboratory for Engineering Mechanics*, (Mitteilungen aus dem Mech. Technischen Laboratorium der Koenig Techn. Hochschule), No. 27 and 28, Technischen Hochschule, München, 1899 and 1900.
- 3) Richart, F. E., Brandtzaeg, A., and Brown, R. L., *A Study of the Failure Mechanism of Concrete under Combined Stresses*, Bulletin No. 185, Engineering Experiment Station, University of Illinois, 1928.
- 4) Fumagalli, E., *Strength of Concrete under Multiaxial Compression*, *Instituto Sperimentale Modelli e Strutture*(Bergamo), V. 30, 1965.
- 5) Bresler, B., and Pister, K., *Strength of Concrete under Combined Stress*, ACI Journal, Proceedings V. 55, No. 3, pp. 321-345, Set. 1958.
- 6) Bellamy, C. J., *Strength of Concrete under Combined Stress*, "ACI Journal, Proceedings V. 58, No. 4, pp. 367-381, Oct. 1961.
- 7) Traina, L. A. and Mansour, S. A., *Biaxial Strength and Deformational Behavior of Plain and Steel Fiber Concrete*, ACI Materials Journal, V. 88, No. 4, pp. 354-362, Aug. 1991.
- 8) Hussein, A. and Marzouk, H., *Behavior of High-Strength Concrete under Biaxial Stresses*, *ACI Materials Journal*, Technical Paper, Vol. 97, No. 1, pp. 27-36, Feb. 2000.
- 9) Hussein, A. and Marzouk, H., *Finite Element Evaluation of the Boundary Conditions for Biaxial Testing of High Strength Concrete*, *Materials and Structures*, Vol. 33, pp299-308, June 2000.
- 10) Liu, T. C. Y., Nilson, A. H., and Slate, F. O., "Biaxial Stress-Strain Relations for Concrete", *Journal of the Structural Div., Proceedings of the ASCE*, pp. 1025~1034, 1972.