

미세 구조물이 성형된 실드슬롯판의 자중 처짐 해석

이상욱^{1*}, 심언태², 이경수³, 우동욱¹, 김정현¹

Gravitational deflection analysis for the shielded slot plate with many tiny structures

S. W. Lee^{1*}, U. T. Shim², K. S. Lee³, D. U. Woo¹ and J. H. Kim¹

요약 매우 작은 브릿지 형상을 무수히 지닌 용융탄산염 연료전지용 실드슬롯판이 생산 과정 중 일정한 곡률을 가지게 되는데, 자중으로 인해 본래의 곡률을 알 수 없게 되어 교정 작업에 지장을 초래한다. 본 연구에서는 이러한 실드슬롯판의 유효 물성치를 실험을 통하여 구하고, 이를 바탕으로 수치해석을 통해 실드슬롯판의 원래 곡률을 추정하였다. 구한 유효 물성치를 검증하기 위하여 정방향 및 역방향으로 놓인 실드슬롯판의 자중 처짐 형상을 계산을 통해 구하여 실험 결과와 비교하였다. 비교 결과 추정된 유효 물성치는 매우 타당하였고 이로부터 실드슬롯판의 원래 곡률을 추정할 수 있었다. 본 연구에서 추정된 유효 물성치는 추후 실드슬롯판의 편평도 향상에 대한 연구에서 유용한 자료로 활용될 수 있다.

Abstract In this study, the equivalent physical properties of the shielded slot plate having a lot of very tiny bridge shape structures on its plane were determined by tensile tests and structural analyses. With those results, numerical analyses for the deflection profile by gravity effect were carried out to compare with experimental results. The two results were shown coincident very well so that the estimated equivalent physical properties were verified enough for further studies such as curvature reduction for the shielded slot plate.

Key Words : Shielded slot plate, Equivalent physical property, Gravitational effect, MCFC

1. 서론

용융탄산염형 연료전지 (MCFC; Molten Carbonate Fuel Cell)는 용융탄산염을 전해질로 사용하여 전기화학 반응에 의해 무공해 발전이 가능한 시스템으로 환경 친화적인 발전 기술 장치로서 부각되고 있다. 고온에서 운전되므로 폐열 회수를 통한 높은 열효율과 전기화학반응이 용이하고 또 모듈화가 가능하다는 장점을 갖고 있다.

용융탄산염 연료전지는 단위전지를 적층하여 스택을 구성한다. 단위전지는 크게 세 부분으로 구성되어 있는데 전극부, 매트릭스부 및 분리판부가 그것이다. 그림 1에 분리판부를 전개한 그림을 보였다.

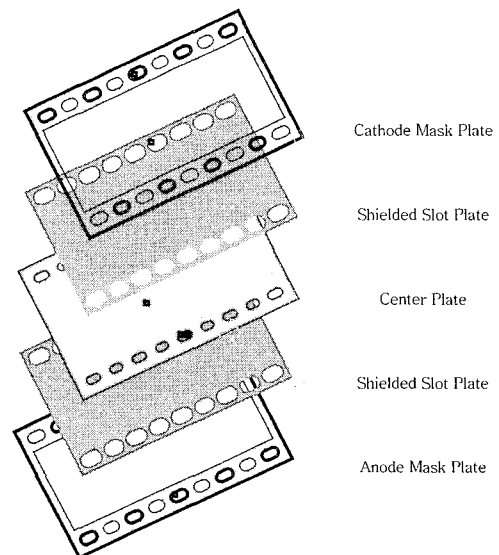


그림 1. MCFC용 분리판의 전개도

이 논문은 포항산업과학연구원 (RIST)의 지원으로 수행되었음.

¹순천향대학교 기계공학과

²성균관대학교 기계공학과

³삼성전자 HD 디스플레이 센터

*교신저자: 이상욱(swlee@sch.ac.kr)

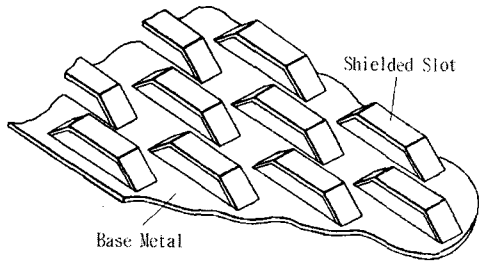


그림 2. 실드슬롯판에 형성되어 있는 브릿지 형상

분리판부의 구성 요소 중에서 실드슬롯판 (Shielded Slot Plate)에는 가스의 흐름을 원활하게 할 목적으로 그림 2와 같은 브릿지 형상의 미세 구조물을 무수히 성형시키는데, 이 때 한 쪽 방향으로만 성형함으로 인해서 생산 과정 중 실드슬롯판이 휘어지게 된다. 휘어진 실드슬롯판을 사용할 경우 연료전지의 성능이 악화되기 때문에 이를 해결하는 것이 매우 중요하다.

실드슬롯판에 성형된 실드슬롯으로 인해 원소재 (SUS 316L)의 물성치가 크게 달라진다. 반복패턴에 의한 물성치 변화에 대한 연구는 여러 연구자에 의해 진행되어 왔다. 박판에 작은 홀이 반복적으로 있는 판재에 대한 연구 [1-3]와 복합재료의 평균 물성치에 대한 연구 [4-7]가 수행되었다. 또한 박판의 휨문제에 대해 박원태 등[8]의 연구가 있었다.

본 연구에서는 실드슬롯판의 곡률을 개선하기 위한 첫 단계로서 실드슬롯판의 기계적 성질을 유한요소 해석을 통해 파악하고자 한다. 이를 위해 실드슬롯판의 유효 물성치를 구하여 자중 해석을 수행하고 이 결과를 실제 제품의 자중 처짐 형상과 비교함으로써 검증하고자 한다.

2. 실드슬롯판의 유효 물성치

그림 3은 현재 사용되고 있는 실드슬롯판에서 한 개의 반복 셀 (cell)을 보여주고 있다. 실드슬롯이 한쪽 방향으로만 성형되기 때문에 스프링백 현상에 의해 판재가 자연히 볼록한 형태를 띠게 된다. 볼록해지는 방향을 화살표로 표시하였다.

실드슬롯판의 원 소재는 SUS 316L이고 두께는 0.6 mm이다. 그러나 판재에 브릿지 형상의 실드슬롯이 무수히 성형됨으로 인해서 실드슬롯판의 물성치는 원래 판재의 그것과 판이하게 달라진다. 유한요소 해석으로 실드슬롯판의 거동을 파악하려면 무수한 실드슬롯의 효과가 포함된 유효 물성치 (균일 평균 물성치)를 구해야 할 필요가 있다.

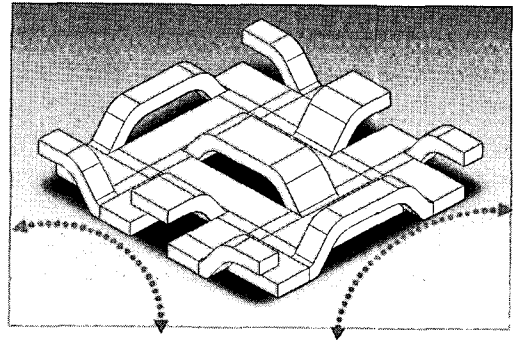


그림 3. 실드슬롯판의 단위 셀 형상과 스프링 백에 의한 곡률 생성 방향

재료 시험의 가장 기본적인 시험법인 인장 시험법을 이용하여 실드슬롯판의 유효 종탄성계수를 구하였다. 그림 4는 인장 시험 전후의 모습을 보여주고 있다. 그림 5는 인장 시험 결과 그래프를 보여주고 있다. 일반적인 금속 소재의 시험 결과와 비슷하게 선형구간이 나온 후 비선형 구간이 이어지는 모습을 보여주고 있다. 이 선형구간에서 실드슬롯판의 종탄성계수를 추정할 수 있다. 실드슬롯판의 유효 종탄성계수는 약 5.0 GPa로 나타났다. SUS 316L 원판의 통상적인 종탄성계수가 약 200 GPa이라는 사실을 고려할 때 상당히 줄어들었음을 알 수 있다. 이는 실드슬롯 각각의 절단부에서의 응력 집중 현상이 가장 큰 원인 중 하나인 것으로 생각된다. 항복은 연신율 2%에서 항복응력 80 MPa, 파괴가 일어나는 시점은 연신율 21%에 응력 213 MPa 정도임을 알 수 있다.

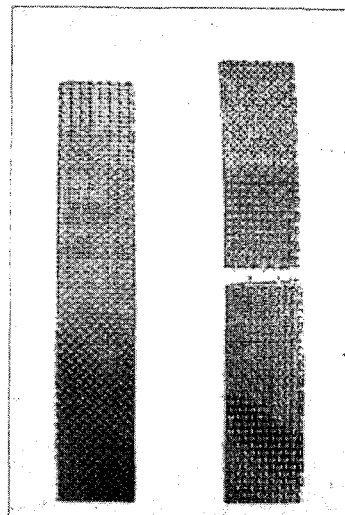


그림 4. 인장 시험 전후의 시편

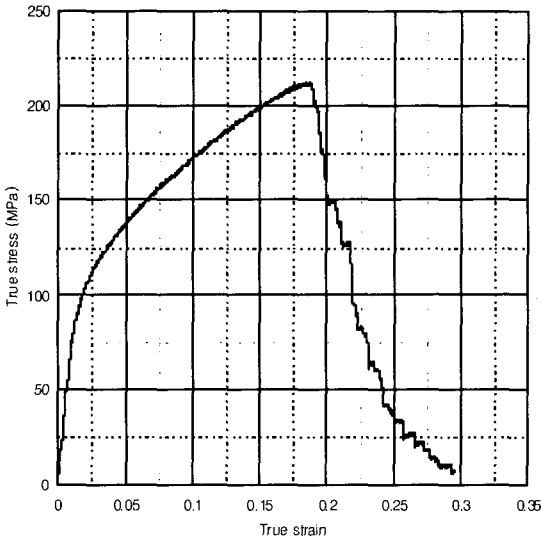


그림 5. 인장 시험 결과 그래프

실드슬롯판의 두께가 1.7 mm인 것을 감안하여 실드슬롯판의 유효 비중을 계산하였다. 그 결과 유효 비중은 2.27로 나타났다.

실드슬롯의 성형 높이가 두께에 반영되었기 때문에 굽힘 해석을 위한 단면 2차 모멘트의 수정계수 (Bending Moment Multiplier)를 구해야 한다. 수정계수는 무차원의 수로 ANSYS에서 RMI라는 이름의 변수로 입력된다 [9]. 이를 위해 그림 6과 같이 3차원 실드슬롯의 형상을 만든 후 이로부터 단면 깊이 에 따른 단면 2차 모멘트의 변화 (그림 7 참조)를 계산하여 면적 평균하였다. 이로부터 굽힘모멘트에 대한 수정계수를 0.45436으로 정하였다.

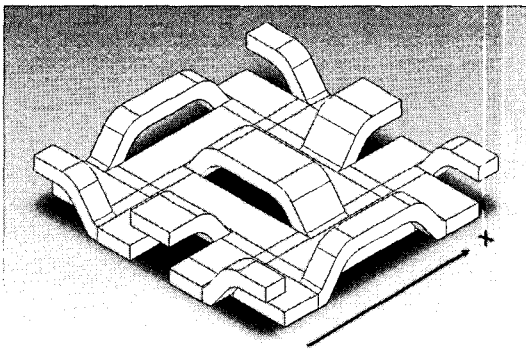


그림 6. 단면 2차 모멘트의 측정방향

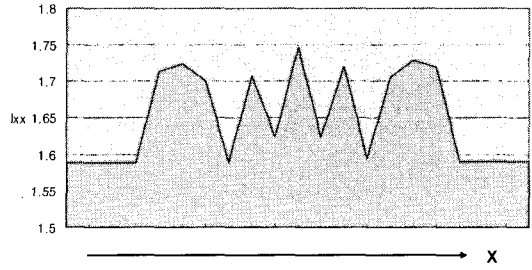


그림 7. x 방향에 따른 단면 2차 모멘트의 변화

3. 자중처짐해석

굽은 실드슬롯판의 원래의 (자중의 영향이 없을 때의) 곡률 반경을 구해보기 위하여 실드슬롯판에 대한 자중 해석을 유한요소법으로 시도하였다. 해석은 탄성 영역에서 수행되었으며 사용한 상용코드는 ANSYS 9.0이다. 또한 해석 결과를 검증하기 위하여 실제 실드슬롯판의 자중에 의한 처짐 (굽은) 형상을 측정하여 비교하였다.

실드슬롯판 원판의 크기가 1,400 mm × 800 mm로 매우 커서 자중의 효과가 크게 나타나므로 곡률 반경을 제대로 측정할 수 없었다. 원판의 일부를 잘라낸 소형판을 이용하면 자중의 효과가 덜 하므로 곡률 반경을 쉽게 잴 수 있다고 판단하였다. 그림 8 에 원판과 소형판과의 관계를 보였다. 테이블에 자유롭게 놓여 있을 때 원판이 자중에 의하여 끝단부를 제외한 나머지 부분은 테이블에 거의 밀착되는 모습을 볼 수 있다. 그러나 소형판에서는 성형에 의해 발생한 곡률이 잘 나타난다. 소형판의 크기는 420 mm × 520 mm 이다.

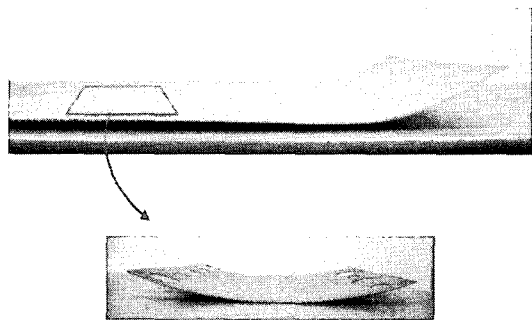


그림 8. 실드슬롯 원판에서 따낸 소형판과 두 판재의 곡률 형상

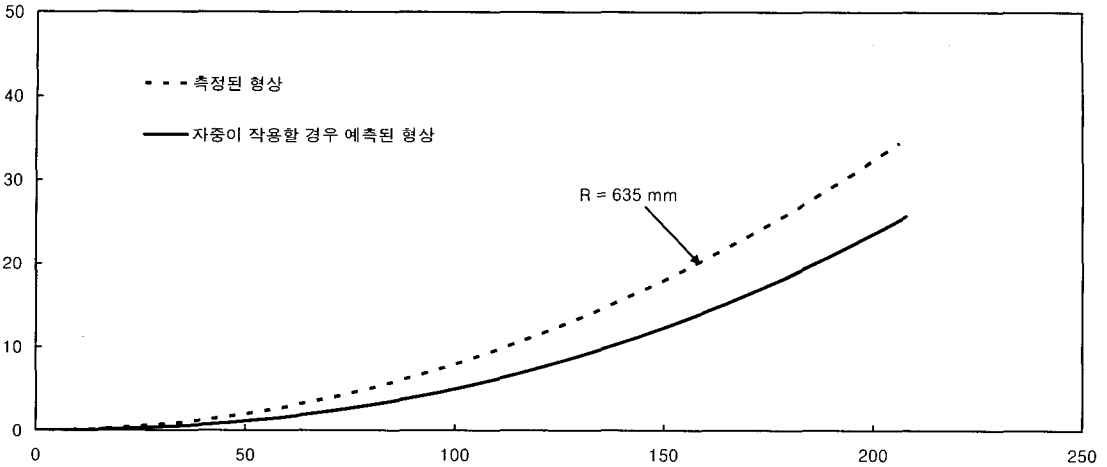


그림 9. 소형판에서 나타나는 자중 효과

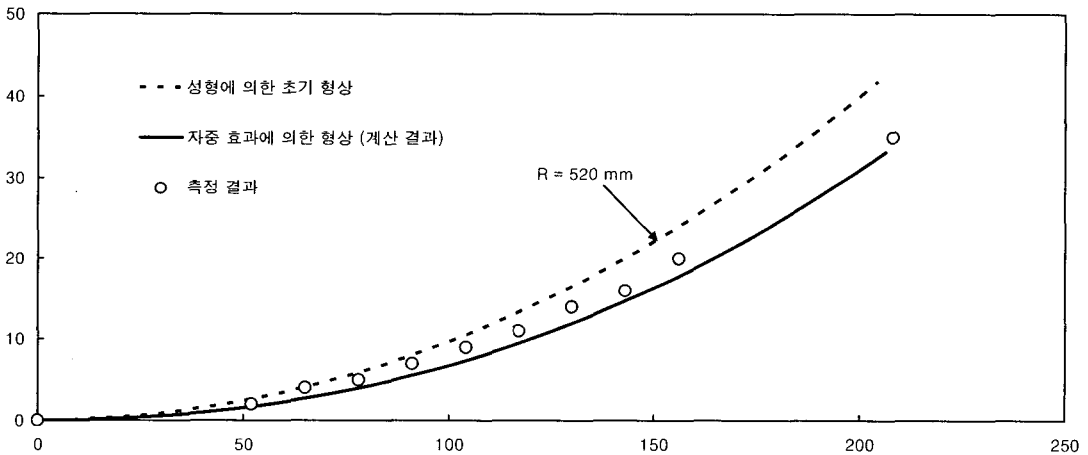


그림 10. 소형판으로부터 추정된 성형에 의한 초기 곡률 반경

소형판으로부터 측정된 곡률 반경은 약 635 mm이었다. 이 곡률 반경은 자중의 효과가 거의 배제되었을 때의 형상으로부터 나온 것으로 일차 추정하였다. 그러나 실제 소형판 정도의 크기에서도 자중의 효과가 있을 수 있어서 이에 대한 검증이 필요하였다. 이에 따라 앞 절에서 정한 유효 물성치를 사용하여 소형판에 대한 자중 해석을 시도하였다. 그림 9에 그 결과를 보였다. 그림에서 알 수 있듯이 소형판에도 자중 효과가 분명하게 있었다. 따라서 자중 효과가 완전히 배제된 곡률 반경은 635 mm 보다 작을 것으로 사료되었다.

소형판의 측정된 곡률 반경 635 mm를 참값으로 하여 자중 해석 후 처짐 곡률 반경이 그 값이 되도록 역추적 해석을 실시하였다. 그림 10에 이에 대한 결과 그림을 보였다. 해석 결과, 자중 효과가 완전히 배제되었을 때의 곡률 반경은 520 mm로 추정되었다. 따라서 이 값을 성형에

의해서만 발생하는 실드슬롯판의 초기 곡률 반경으로 간주하기로 하였다.

추정된 곡률 반경 520 mm를 사용하여 원판의 자중 처짐에 대한 해석을 시도하였다. 해석 결과를 그림 11에 나타내었다. 해석 결과는 실험값과 잘 일치하였다. 이로써 실드슬롯판에 대한 유효 물성치도 함께 검증되었다.

실드슬롯판이 역방향으로 뒤집혀 놓였을 때의 자중 처짐 형상을 해석하였다. 그림 12는 역방향으로 놓인 실드슬롯판의 자중 처짐 형상을 보여주고 있다. 원판에서 바로 외곽 형상을 얻기 어려워서 띠 형태로 원판을 길게 절단한 후 형상을 측정하였다. 순방향으로 놓인 실드슬롯판의 자중 처짐 형상과 달리 역방향으로 놓인 실드슬롯판은 끝단부 주변이 올라온 것을 제외하고는 테이블에 거의 밀착하며 끝단 부근의 곡률도 크지 않다.

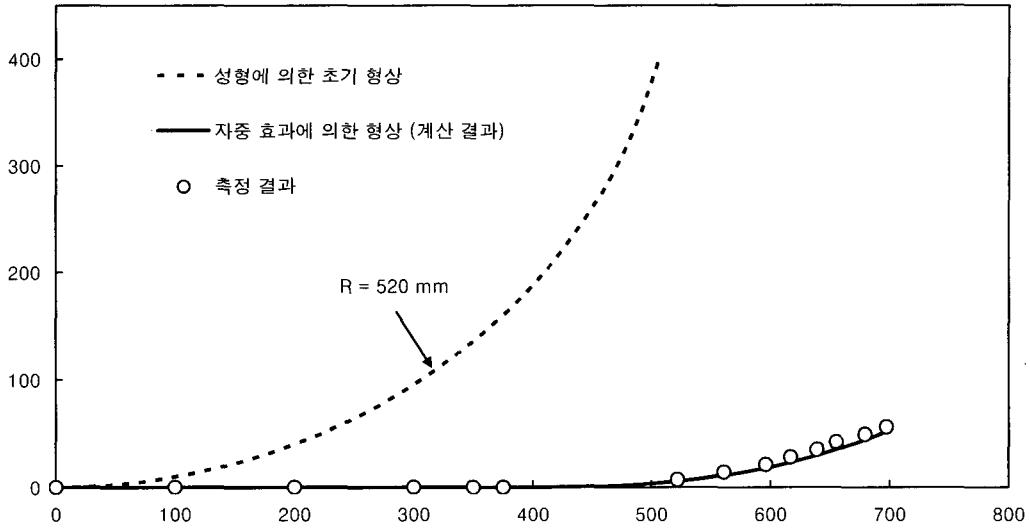


그림 11. 추정 곡률 반경을 사용하여 해석한 원판의 자중 처짐 형상 및 실험 결과와의 비교

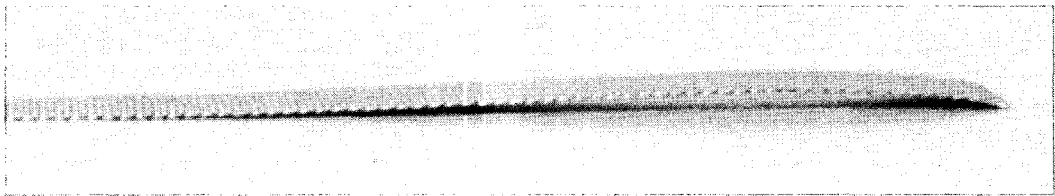


그림 12. 실드슬롯 판의 역방향 자중 처짐 형상

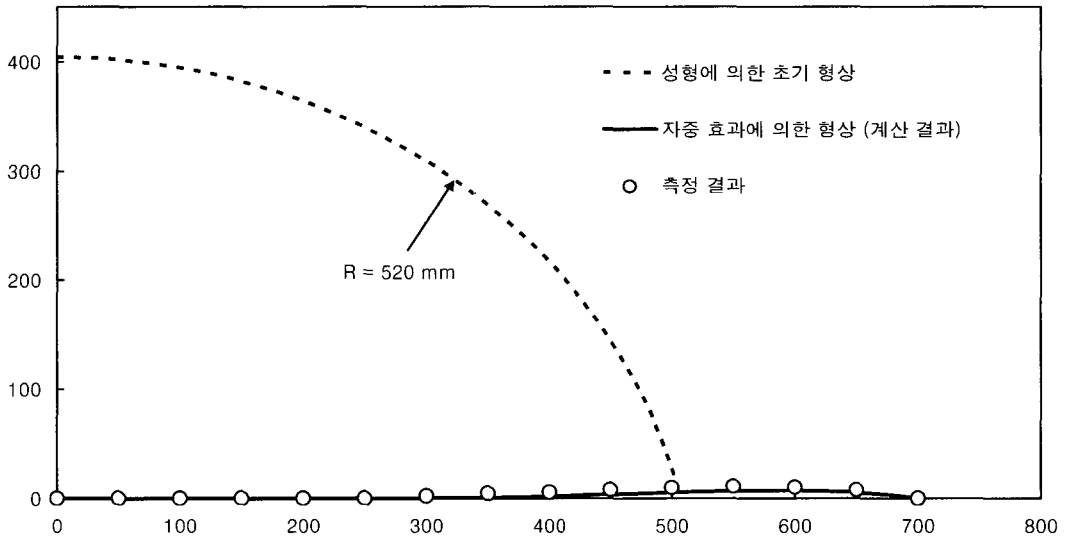


그림 13. 역방향 실드슬롯 원판의 자중 처짐 해석 결과 및 실험 결과와의 비교

그림 13에 해석한 결과와 실험값을 비교하였다. 두 결과 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이로써 유효 물성치가 잘 추정되었음을 다시 한 번 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 실험과 유한요소 해석을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 실드슬롯판의 유효 물성치를 인장시험 및 고체역학적 계산 (유효밀도 및 굽힘모멘트 수정계수)에 의해서 결정할 수 있었다.
- (2) 대형 원판 대신 자중효과를 덜 받는 소형판으로부터 실드슬롯판의 초기 곡률을 추정할 수 있었다.
- (3) 결정된 유효 물성치를 사용하여 실드슬롯 원판의 순방향 처짐 형상과 역방향 처짐 형상을 계산한 결과 실험 결과와 매우 잘 일치하였다.
- (4) 본 연구의 결과는 추후 실드슬롯판의 편평도 향상 실험을 수행하기 위한 기본 자료로 활용 가능하다고 판단된다.

감사의 글

포항산업과학연구원 관계자 제위께 감사드리며 실험에 적극적으로 참여하고 도와준 김지영님께도 감사드립니다.

참고문헌

- [1] B.J.E.Rens, W.A.M.Brekelmans and F.P.T.Baaijens, Homogenization of the elastoplastic behavior of perforated plates, *Computers & Structures*, V.69, pp.537-545, 1998
- [2] 백승철, 한홍남, 오규환 및 이동녕, 새도마스크용 천 공판의 신장성형 해석, 한국소성가공학회 '94추계학술대회 논문집, pp.25-32, 1994
- [3] 이진희, 균질화법을 이용한 다공평판의 단순화된 응력해석, 전산구조공학, V.8, No.3, pp.51-58, 1995
- [4] S.Nemat-Nasser, T.Iwakuma and M.Hejazi, On composites with periodic structure, *Mechanics of Materials*, V.1, pp.239-267, 1982
- [5] J.M.Guedes and N.Kikuchi, Preprocessing and postprocessing for materials based on the homogenization method with adaptive finite element methods, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, V.83, pp.143-198, 1990

- [6] R.M.J.S.Sidhu, R.C.Averill, M.Riaz, F.Pourboghtr, Finite element analysis of textile composite preform stamping, *Composite Structures*, V.52, pp.483-497, 2001
- [7] Woong Ryeol Yu, Farhang Pourboghtr, Kwansoo Chung, Michael Zampaloni, Tae Jin Kang, Non-orthogonal constitutive equation for woven fabric reinforced thermoplastic composites, *Composites: Part A*, V.33, pp.1095-1105, 2002
- [8] 박원태, 최재진, 직교이방성 박판 및 후판의 해석연구, 산학기술학회논문지, Vol. 4, No. 2, pp. 76-80, 2003
- [9] ANSYS Theory Reference Manual Ver. 9.0, Chap. 14, Sec. 63, 2004

이상욱(Sang-Wook Lee)

[정회원]



- 1986년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1988년 2월 : 한국과학기술원 생산공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 기계공학과 부교수

<관심분야>

소성가공, 전산역학, 연료전지 등

심언태(Un-Tae Shim)

[준회원]



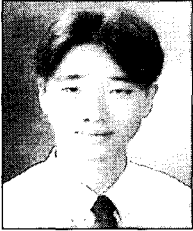
- 2006년 2월 : 순천향대학교 기계공학과 (공학사)
- 2006년 2월 ~ 현재 : 성균관대학교 기계공학과 석사과정

<관심분야>

소성가공, 파괴역학 등

이 경 수(Kyeong-Soo Lee)

[정회원]



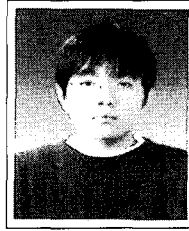
- 2006년 2월 : 순천향대학교 기계공학과 (공학사)
- 2006년 2월 ~ 현재 : (주)삼성전자 LCD 총괄

<관심분야>

소성가공, 디스플레이 등

김 정 현(Jung-Hyun Kim)

[준회원]



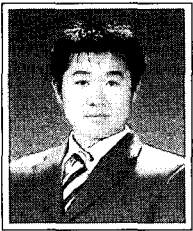
- 2005년 2월 : 순천향대학교 기계공학과 (공학사)
- 2005년 2월 ~ 현재 : 순천향대학교 기계공학과 석사과정

<관심분야>

소성역학, 연료전지 등

우 동 욱(Dong-Uk Woo)

[준회원]



- 2006년 2월 : 순천향대학교 기계공학과 (공학사)
- 2006년 2월 ~ 현재 : 순천향대학교 기계공학과 석사과정

<관심분야>

소성역학, 연료전지, 자동차공학 등