



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 박 사 학 위 논 문

Fe-1.3Mn-Si계 引拔鋼線의 工程變數와 機械的
特性의 相關性에 관한 研究



2022년 8월

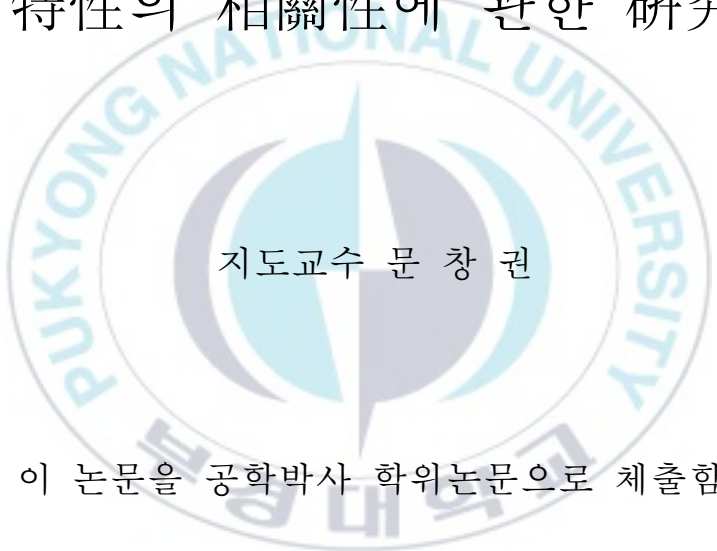
부 경 대 학 교 대 학 원

재 료 공 학 과

오 창 수

공 학 박 사 학 위 논 문

Fe-1.3Mn-Si계 引拔鋼線의 工程變數와 機械的
特性의 相關性에 관한 研究



지도교수 문 창 권

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함.

2022년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

재 료 공 학 과

오 창 수

오창수의 공학박사 학위논문을 인준함.

2022년 8월 26일



위 원 장	공학박사	김 부 안 (인)
위 원	공학박사	문 창 권 (인)
위 원	공학박사	노 상 훈 (인)
위 원	공학박사	김 현 주 (인)
위 원	공학박사	문 용 재 (인)

목 차

논문 요약	iii
Abstract	v
제1장 序 論	1
1.1 研究 背景 및 目的	1
1.2 理論的 背景	8
1.2.1 高周波 誘導加熱 熱處理	8
1.2.2 冷間引拔 加工	25
제2장 PHC 파일用 PC 鋼棒의 熱處理에 따른 微細組織 및 機械的 特性	36
2.1 序 論	36
2.2 材 料	38
2.3 實驗 方法	41
2.4 結果 및 考察	47
2.5 結 論	55
제3장 異形 PC 鋼棒 製作用 펀치 롤러의 耐久性 向上을 위한 表面處理 技術 開發	56
3.1 序 論	56
3.2 實驗 方法	60
3.3 結果 및 考察	62
3.4 結 論	76
제4장 高强度 異形 PC 鋼棒用 引拔 다이스 金型 技術 開發	77
4.1 序 論	77

4.2 材 料	79
4.3 實驗 方法	82
4.3.1 引拔 다이스 測定	82
4.3.2 引拔 다이스 모델링	88
4.3.3 成形 解釋	93
4.3.4 新規 引拔 다이스 效果 檢證	98
4.4 結 論	100
제5장 結 論	101
[參考 文獻]	103
[감사의 글]	112



Fe-1.3Mn-Si계引拔鋼線의工程變數와機械的特性的相關性에 관한研究

오 창 수

부 경 대 학 교 대 학 원 재료공학과

요 약

冷間引拔設備와連續高周波誘導加熱및冷却設備를이용하여異形PC(Pre-stressed Concrete)鋼棒에대한熱處理試驗과微細組織變化를觀察하였으며,핀치롤러의耐磨耗性能向上을위하여TD(Thermal Diffusion)코팅法을利用하여VC(Vanadium Carbide)코팅층이적용된핀치롤러를製作및耐磨耗試驗을實施하였다. 또한有限要素解析(Finite Element Analysis)을통하여引拔다이스의 최적形狀을計算하여引拔다이스를製作후,異形PC鋼棒生産에適用하여다이스磨耗限界到達까지의生産量測定으로檢證하였다.

異形PC鋼棒에대한熱處理와微細組織은直徑9.2mm異形PC鋼棒에적용되고 있는高周波誘導加熱熱處理의工程條件을參考하여直徑8.8mm異形PC鋼棒에적용할수 있는高周波誘導加熱熱處理條件을확보하기위하여熱處理試驗과微細組織分析을시행하여直徑9.2mm異形PC鋼棒과同一機械的特性을갖는高周波誘導加熱熱處理條件을구하였다. G3電流값및線束(선속)변경試驗結果,電流값대비線 속도변경이製品의機械的인特性에많은영향을끼치며,최적값은G3電流98A및線速48m/min인것으로나타났다. 최적값이적용된경우,기존제품(ϕ 9.2mm PC鋼棒)과유사한微細組織이觀察되며引張強度는1,455MPa로제품의허용값(1,420MPa)을충족하였다.

Fe-13Cr계냉간합금공구강인핀치롤러의熱擴散(Thermal diffusion)表面處理에 의한耐磨耗性에대한特性을分析,檢討하였다. VC(Vanadium carbide)코팅층의生成速度를確認하여유효한두께로코팅층을形成시켰으며,母材와VC코팅층의比磨耗量을測定하고VC코팅층이적용된핀치롤러를異形PC鋼棒製

造設備에 적용해 그 효과를 검증하였다. 異形 PC 鋼棒 生産에 적용되는 핀치 롤러의 耐 磨耗 性能 向上을 위한 1,000℃ 바나듐(Vanadium) 용탕에 沈積시키는 TD 코팅 方法에 의한 VC 층을 生成할 경우, 0.6-0.9 $\mu\text{m/hr}$ 의 VC 층 生成 速度를 보이며 10시간 沈積時 8 μm 의 VC 층이 生成 되었다. 母材와 VC 층의 比 磨耗量은 각각 2.02x10-4mm²/N와 0.73x10-4mm²/N으로, VC 층의 磨耗 量은 母材 대비 36%만 磨耗 되었다. VC 층이 적용된 핀치롤러를 異形 PC 鋼棒을 製造하는 誘導 加熱 熱處理設備에 適用 시 母材 대비 2배의 耐 磨耗 性能이 확인되었다.

인발 다이스 금형의 최적 설계는 AP angle(Approach angle)에 대한 유한요소해석을 통하여 검증하였다. 日本産 異形 PC 鋼棒用 引拔 다이스에 대한 AP angle을 확인하며 成形 解釋을 통한 引拔 다이스 金型의 최적 설계 방안을 도출하여 태광 금속(주)의 冷間引拔設備과 連續 高周波 誘導 加熱 및 冷却設備을 사용하여 그 효과를 검증하였다. 日本産 異形 PC 鋼棒 引拔 다이스의 AP angle은 AP #1과 AP #2는 각각 7.34°, 2.62°로 測定되었다. AP #1과 AP #2를 각각 $\pm 0.5^\circ$ 를 적용한 모델을 有限 要素 解析(유한 요소 해석)을 통하여 應力을 계산한 결과, +0.5°가 적용된 모델인 AP #1은 7.84°, AP #2는 3.11°로 설계된 모델에서 가장 낮은 應力이 계산되었으며 그 값은 기존 모델 대비 9% 감소한 253.8 MPa였다. AP angle이 최적화된 新規 引拔 다이스를 適用하여 9.2mm 異形 PC 鋼棒을 시험 생산한 결과 生産性 向上 45% 및 다이스 消耗量 減少 26%가 가능할 것으로 計算되었다. AP angle이 최적화된 신규 引拔 다이스(DIES)를 적용하여 8.8mm 異形 PC 鋼棒을 試驗 生産한 결과 生産性 向上 49% 및 다이스 消耗量 減少 28%가 가능할 것으로 計算되었다.

A study on the correlation between process parameters and mechanical properties of Fe-1.3Mn-Si based drawn steel wire

Chang Soo Oh

*Department of Material Science and Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

Heat treatment tests and microstructural changes were observed for deformed PC(pre-stressed concrete) steel rods using cold drawing equipment and continuous high-frequency induction heating and cooling facility. In order to improve the wear resistance performance of the pinch roller, a pinch roller with a VC(vanadium carbide) coating layer applied using the TD(thermal diffusion) coating method was manufactured and abrasion resistance test was performed. In addition, the optimal shape of the drawing die was calculated through finite element analysis, and the drawing die was manufactured, and then applied to the production of deformed PC steel bars and verified by measuring production until the die wear limit was reached.

The heat treatment and microstructure of the deformed PC steel bar was analyzed to analyze the process conditions of high frequency induction heating heat treatment applied to the 9.2 mm diameter deformed PC steel bar to secure the high frequency induction heating heat treatment conditions applicable to the 8.8 mm diameter deformed PC steel bar. Heat treatment test and microstructure analysis were performed to obtain high frequency induction heating heat treatment conditions with the same mechanical properties as 9.2mm deformed PC steel bars. As a result of the G3 current value and line speed change test, it was shown that the change of the line speed compared to the current value greatly affects the mechanical properties of the product, and the optimal value is the G3 current of 98A and the line speed of 48m/min. In the case of Specimen 2 to which the optimal value was applied, a microstructure similar to that of the existing product (ø9.2 mm PC steel bar) was observed, and the tensile strength was 1,455 MPa, which satisfies the product's allowable value (1,420 MPa).

The characteristics of abrasion resistance by thermal diffusion surface treatment of a pinch roller, a Fe-13Cr-based cold alloy tool steel, were analyzed and reviewed. The rate of formation of the VC (vanadium carbide) coating layer was checked, the coating layer was formed with an effective thickness, and the specific abrasion amount of the base material and the VC coating layer was measured, and the effect was verified by applying a pinch roller to which the VC coating layer was applied to the production facility for the deformable PC steel bar. When the VC layer is formed by the TD coating method, which is immersed in molten vanadium at 1,000°C to improve the abrasion resistance of pinch rollers applied to the production of deformed PC steel bars, the VC layer formation rate is 0.6-0.9 μ m/hr and immersion for 10 hours A VC layer of 8 μ m was produced. The specific wear amount of the base material and the VC layer was 2.02x10⁻⁴mm²/N and 0.73x10⁻⁴mm²/N, respectively, and the abrasion amount of the VC layer was only 36% worn compared to the base material. When the pinch roller to which the VC layer is applied is applied to an induction heat treatment machine that manufactures a deformed PC steel bar, twice the wear resistance performance of the base material was confirmed.

The optimal design of the drawing die mold was verified through finite element analysis of the AP angle (Approach angle). By checking the AP angle of the Japanese-made drawing die for PC steel bar, the optimal design method of the drawing die mold was derived through molding analysis, and the effect was obtained by using the cold drawing facility of Taekwang Metal Co., Ltd. and continuous high frequency induction heating and cooling facility. was verified. The AP angles of Japanese-made PC steel bar drawing dies were 7.34° and 2.62° for AP #1 and AP #2, respectively. As a result of calculating the stress through finite element analysis for the model to which AP #1 and AP #2 were applied $\pm 0.5^\circ$, AP #1, which is a model to which $+0.5^\circ$ was applied, was designed at 7.84° and AP #2 at 3.11°. The lowest stress was calculated at , and its value was 253.8MPa, which is a 9% decrease compared to the previous model. As a result of trial production of a 9.2mm deformed PC steel bar by applying a new drawing die with optimized AP angle, it was calculated that productivity improvement by 45% and die consumption reduction by 26% are possible. As a result of trial production of an 8.8mm deformed PC steel bar by applying a new drawing die with an optimized AP angle, it was calculated that productivity can be improved by 49% and die consumption can be reduced by 28%.

제1장 序 論

1.1 研究 背景 및 目的

국내에서도 하늘 위로 치솟고 있는 초고층빌딩과 高安全性을 요구하는 원자력발전소 같은 건설공사의 기초공사를 위해 먼저 PHC Pile 공사를 완벽하게 해야 지진에 안전한 건축 및 토목구조물을 세울 수 있다. 최근 경주, 포항 지진(2017년) 발생으로 한반도는 지진에 이제는 안전지대가 아닌 이상 건축물, 토목구조물 등 지진에 안전한 구조물을 세우기 위해서는 PC 鋼棒을 삽입하는 PHC Pile에 사용되는 고품질, 우수한 機械的 성질의 PC 鋼棒이 필수적 이다^{1~2)}.

PHC Pile은 건축물의 하중을 견디도록 도와주는 기초 전자재로 사용되는 콘크리트 말뚝으로 시멘트, 모래, 자갈과 물을 혼합해 반죽한 뒤, PC 鋼棒을 사용해 원통형으로 골격을 만든다.

PHC Pile은 일반적으로 5종류가 있다. 주택 등 일반 대다수 공사에는 일반 파일 또는 고강도 파일(외경 400~600mm, 압축강도 80MPa)이 사용되고 높은 강도가 요구되는 것에는 초고강도 파일(압축강도 110MPa), 초고층 건물과 인프라에는 대구경 파일(외경 700~1,000mm), 주문 제작 방식의 선단 확장 파일, 스마트파일 등이 있다³⁾.

최근 한반도 포항을 중심으로 連續的인 地震으로 건축 구조물의 안전 규제가 강화되고 취약 인프라 개보수, 신축 건물의 안전 규제 수준을 강화하고 있음. 특히 耐震設計와 직결되는 PHC Pile의 투입 수량이 늘고 초고강도, 대구경 파일 등의 고기능 파일의 수요가 늘어나는 환경 이다^{4~5)}.

국내에서는 1960년대부터 1970년대 초반까지는 주로 원심력 철근콘크리트 말뚝(RC Pile, Centrifugal reinforced concrete pile)을 사용하였고, 1970년대 후반부터 1990년대 초반까지는 원심력 프리스트레스 말뚝(PC Pile, Centrifugal pre-stressed concrete pile)이 主流를 이루었다. 하지만, 건축물의 高層化 및 大型化, 軟弱地盤 施工 增加 등으로 1970년대 후반부터 사용되던 PC 파일을 대체할 고품질 파일의 필요성이 대두됨에 따라 1992년 日本에서 원심력 고강도 프리스트레스 말뚝(PHC Pile, Centrifugal high

strength pre-stressed concrete pile)의 제조기술 도입하였으며, 현재 단일 말뚝으로는 세계 최대 규모의 시공량 수준을 나타내고 있다. PHC Pile은 우수한 휨 強度 및 長期 許容 支持力, 깊은 深度(심도)의 pile 시공이 가능하며, 뛰어난 施工性 및 經濟性으로 국내 건축물의 파일 기초로 광범위하게 사용되고 있으며 PHC Pile의 생산량은 꾸준히 증가하여 현재는 국내 총 콘크리트 말뚝 생산량의 90% 이상을 PHC Pile이 점유하고 있다⁶⁾.

PHC Pile의 뼈대 역할을 하는 PC 鋼棒(Prestressing steel bar)은 프리텐션(Pre-tension) 방식으로 콘크리트 말뚝이나 전주에 널리 사용되는 직경 9~33mm의 PC 강재를 말한다. PC 鋼線과 비교해 직경이 굵으며, 冷間引拔, 壓延, 熱處理 등의 工程 과정을 통해 製造된다. 지진의 위협으로 PHC Pile 관련 연구가 활발하게 이루어지는 일본의 경우, PHC Pile의 脆性(취성)的 剪斷破壞(전단파괴) 방지를 위하여 高強度 PHC Pile 용 다양한 異形 PC 鋼棒을 PHC Pile의 뼈대뿐만 아니라 전단 補強根 (보강근) 으로서 사용하기 위한 開發을 하고 있다^{7~9)}. Fig. 1.1에 異形 PC 鋼棒 形像을 나타내었으며, Fig. 1.2에 PHC Pile에 뼈대로서 적용된 도면과 사진을 나타내었다.

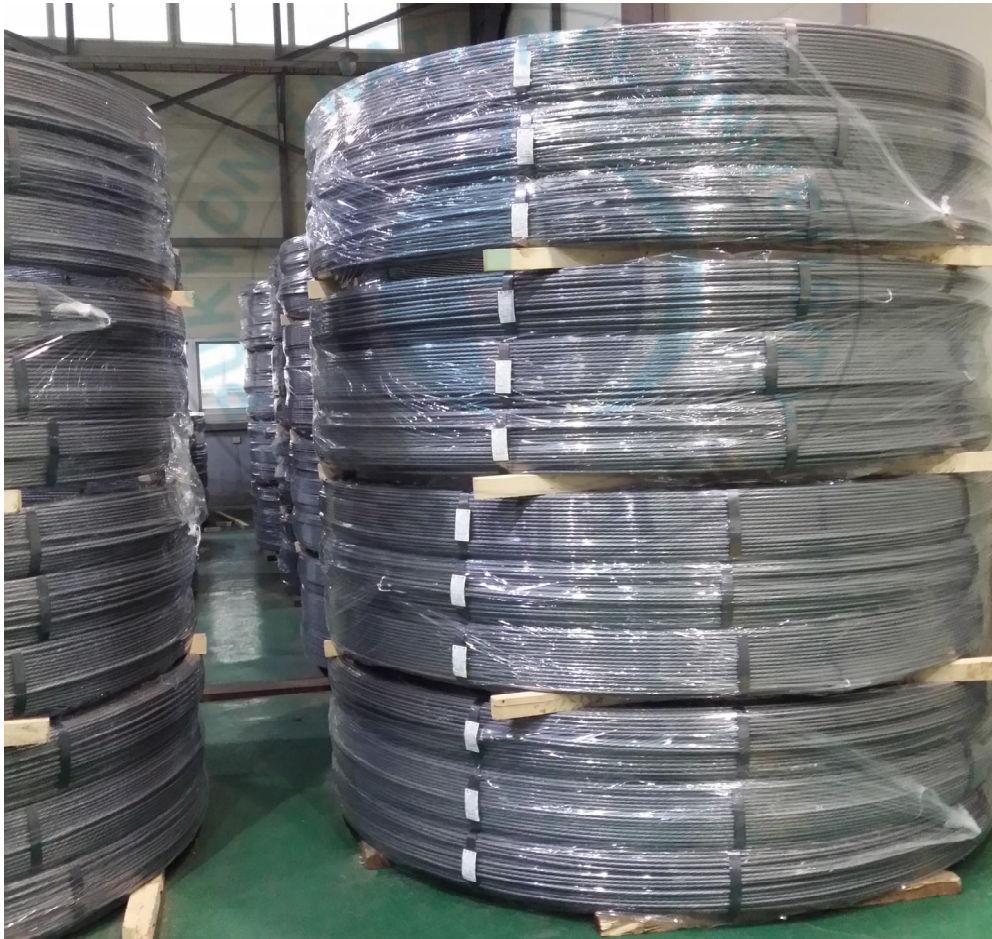


Fig. 1.1 Deformed PC steel bar

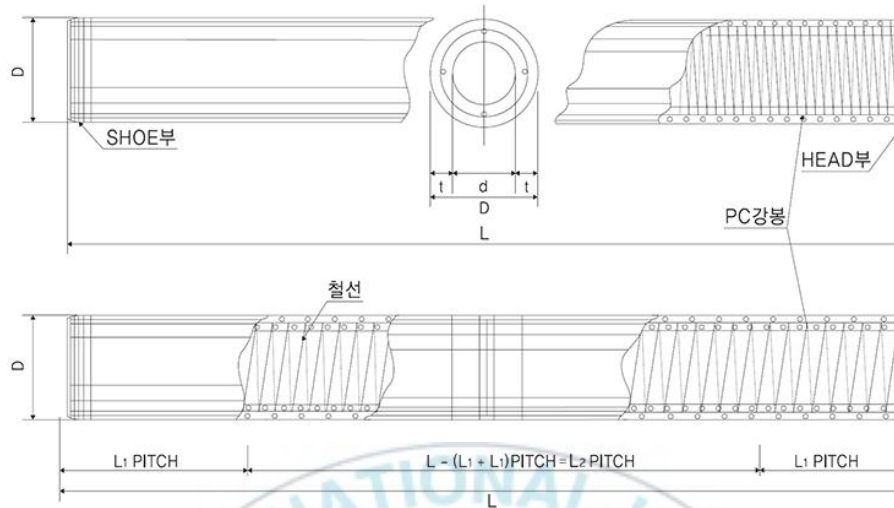


Fig. 1.2 Deformed PC steel bar in PHC pile

PC 鋼棒(Prestressing steel bar)은 직경 9~33mm의 PC 강재를 말하며, PC 鋼線보다 직경이 굵으며, 冷間引拔, 壓延, 熱處理 등의 工程 과정을 통해 제조된다. PC 鋼棒 제품은 프리텐션(Pre-tension) 방식으로 콘크리트 파일이나 전주에 사용되는 異形 PC 鋼棒과 포스트텐션(Post tension) 방식으로 제작되어 철도 선로 아래에 부설되는 콘크리트 내부에 심는 高張力 PC 鋼棒이 있다^{7~12)}. Fig. 1.3에 일반적인 異形 PC 鋼棒的 生産工程을 도식화하여 나타내었다.

특히, 異形 PC 鋼棒(Deformed prestressing concrete steel bar)은 콘크리트 파일 제작 과정 중에 콘크리트와의 附着力을 증대시키기 위해 表面에 나선 형태의 홈이 균일하게 정렬되어 콘크리트와 PC 鋼棒이 서로 강력한 附着力을 가진다.

異形 PC 鋼棒에 사용되는 원소재는 30MnSi 강재로 冷間引拔, 壓延, 熱處理 工程 과정을 통하여 強度(1,200MPa) 및 硬度(HV 400)가 크게 증가하는 특징이 있다. 異形 PC 鋼棒은 펀치 롤러에 의한 冷間壓延 工程 후 高周波 誘導 加熱 爐에서 熱處理되며 鋼棒的 直진성을 유지하기 위해 일정한 張力을 부여하기 위해 일정한 백 텐션(Back-tension)을 유지하는 工程 특징이 있다. 또 한 최종제품 직경으로 가공하기 위하여 반원 형태의 홈이 있는 펀치 롤러를 사용하여 冷間壓延 工程으로 PC 鋼棒 직경은 소폭(9.35 → 9.25mm) 減少한다.

異形 PC 鋼棒은 表面에 3~6개의 깊이 0.3~0.4mm 및 폭 2~3mm의 나선 형태 홈이 冷間引拔 加工으로 形成된다. 나선 형태의 홈을 생성하기 위하여 線材는 適정한 速度로 回轉하며 塑性 加工(=이 이루어지며 回傳 速度와 引拔 線束도 調整을 통하여 나선 홈의 리드 길이가 70~80mm로 形成 된다.

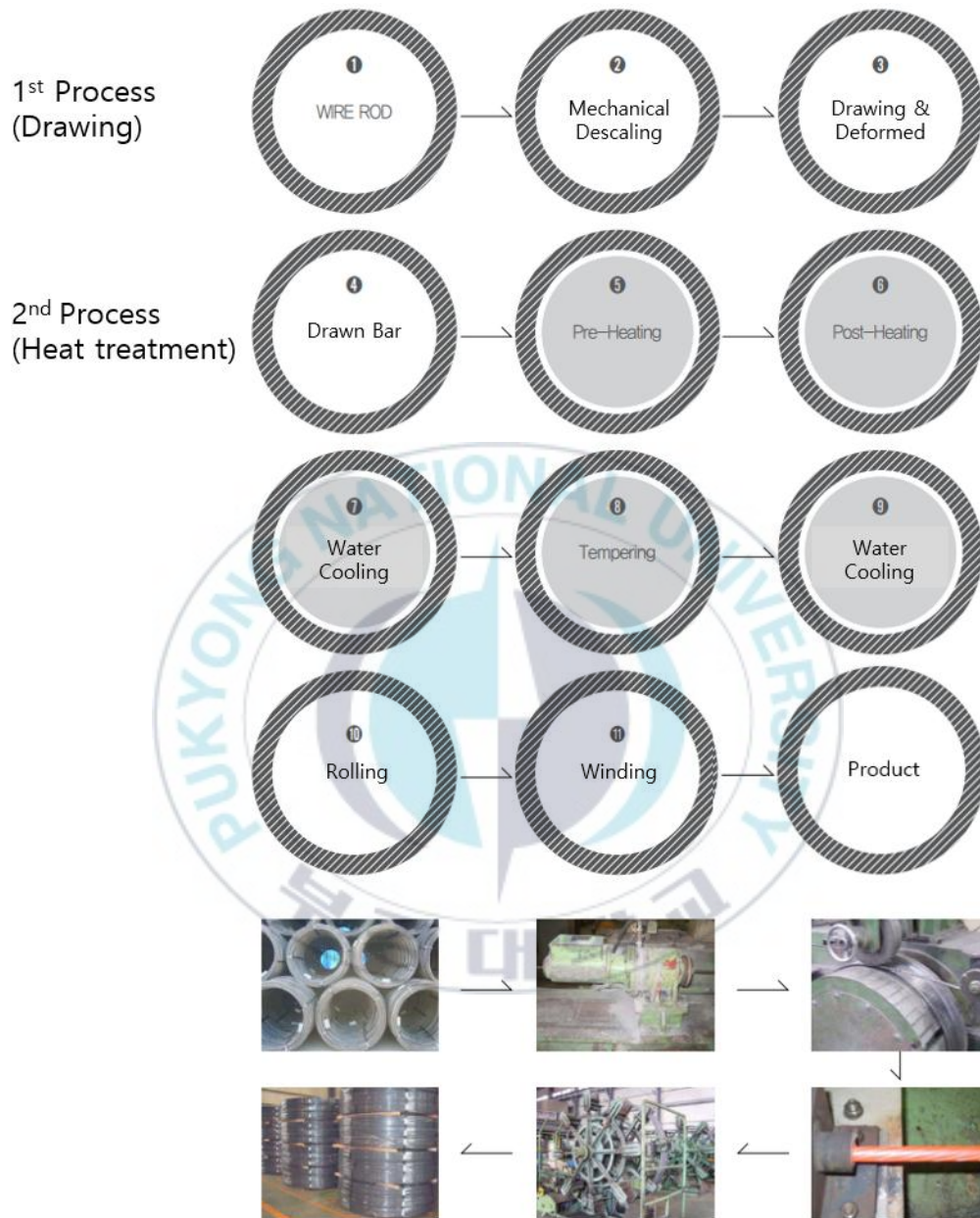
또한, 異形 PC 鋼棒은 PHC Pile의 뼈대를 이루고 있으므로 PHC Pile의 機械的 特性에 가장 큰 영향을 끼치게 되며, 최근에는 초고강도 PHC Pile의 수요가 늘어남에 따라 뼈대인 異形 PC 鋼棒에 대한 다양한 수요가 발생하고 있다. 기존의 PHC Pile 대비 고강도의 Pile을 제작하기 위하여 소구경의 異形 PC 鋼棒을 더 많은 개수로 배치하기 위하여 뛰어난 機械的 特性을 확보하려는 연구가 이루어지고 있다^{18~30)}.

따라서 본 연구에서는 기존의 ø9.2mm PC 鋼棒과 동등 수준의 機械的

特性을 가지는 $\phi 8.8\text{mm}$ PC 鋼棒 제조를 위한 高周波 誘導 加熱 熱處理 工程 설계에 대한 실험을 시행하였다. 또한, PC 鋼棒에 進直性 (진직성)을 확보하기 위하여 일정한 張力을 부여하며 冷間 壓延 工程이 이루어지는 펀치롤러의 磨耗 特性에 대해 研究를 하였다. 또한 $\phi 8.8\text{mm}$ PC 鋼棒用 冷間 引拔 金型 設計를 위하여 기존의 수입産 $\phi 9.2\text{mm}$ PC 鋼棒用 金型 (=DIES)을 分析하여 耐 磨耗 性能이 우수한 金型을 設計하였다.

초고강도 PHC Pile 제작을 위한 PC 鋼棒 製造를 위한 熱處理 및 冷間 引拔 加工 金型 연구와 冷間 壓延用 펀치 롤러에 대한 磨耗 特性 및 耐 磨耗 性能 向上으로 $\phi 8.8\text{mm}$ PC 鋼棒 製造에 適用하고자 하였다.





1.2 이론적 배경

1.2.1 高周波 誘導加熱 熱處理

(가) 高周波 誘導加熱의 概要

高周波 誘導 加熱은 金屬 加熱에 이용되며 電磁誘導(전자유도) 作用을 이용한 것이다. 高周波 數를 가지는 交流電流를 코일 형태의 加熱 장치에 부가시키며 도전체인 被加熱 재료는 渦電流(와전류, Eddy current) 損失과 히스테리시스(Hysteresis) 損失에 의하여 熱이 發生한다. 이와 같이 發生하는 열에너지를 이용하여 被加熱 물질을 加熱하는 것을 誘導 加熱이라 하며 특히 高周波 電流를 이용한 것을 高周波 誘導 加熱이라 한다^{31~36)}.

Fig. 1.4는 誘導 加熱의 原理를 도식화한 것으로 加熱 코일에 交流電流가 통하면 코일 주변의 交流電流에 의한 交變 磁束이 發生하고 이 磁界 속에 놓은 도전체에는 誘導電流가 發生하게 된다³⁷⁾. 이와 같은 導電體에 發生하는 磁力線의 變化를 저지하는 힘을 渦電流(와전류)라 하고 皮加열체의 固有 抵抗과 渦電流에 의한 줄(Joule) 熱이 發生하며 이를 渦電流 損失이라 하고 誘導 加熱 時의 發熱 原이 된다.

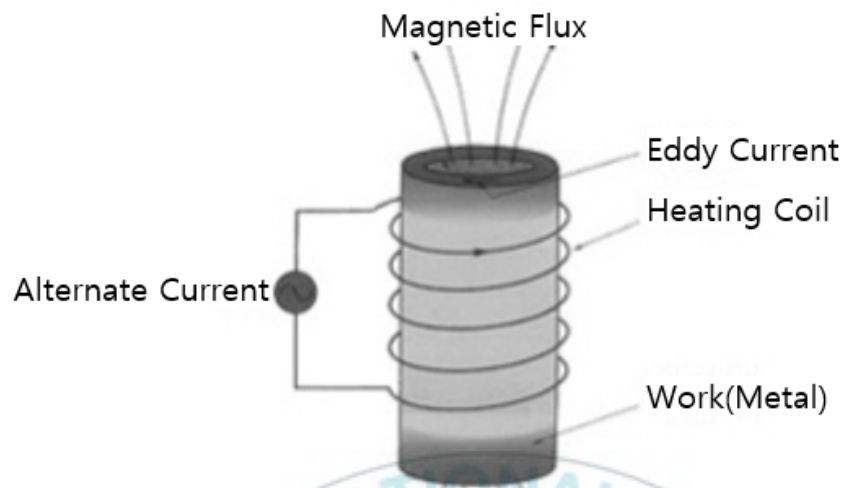


Fig. 1.4 Schematic model of high frequency induction heating

(나) 히스테리시스 損失

誘導 加熱이 될 수 있는 것은 電氣의 導體에 限定되며 그 외 不導體의 경우 응용기술을 이용하여야 하며 導體 중에는 磁性體에서는 渦電流 損失 외 히스테리시스 損失이라고 하는 磁化에 따른 電氣的 損失이 생겨서 非鐵金屬(비철금속)보다 加熱이 쉬우며 加熱 效率도 良好 하다^{31~33)}.

Fig. 1.5와 같이 强磁性體의 鐵心に 코일을 감고 交流 電流를 $0 \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G$ 방향으로 인가하면 鐵心은 磁化하게 되며 磁界 强度를 증가시켜 갈 때 磁束 密度의 變化를 나타내는 곡선과 磁界의 세기를 나타내는 곡선은 일치하지 않고 별도의 경로를 통화하게 된다. 이와 같은 현상을 히스테리시스 現狀이라 하며 이 곡선을 히스테리시스 곡선이라 한다. 磁界(자계)의 방향 H 를 주기적으로 변화시키면 곡선 내의 면적에 해당하는 에너지가 磁性體 내에서 熱로 變換(변환)된다. 이와 같은 히스테리시스 損失이 크게 되면 高周波 誘導 加熱에는 加熱 效果를 높이게 된다^{31, 37)}.

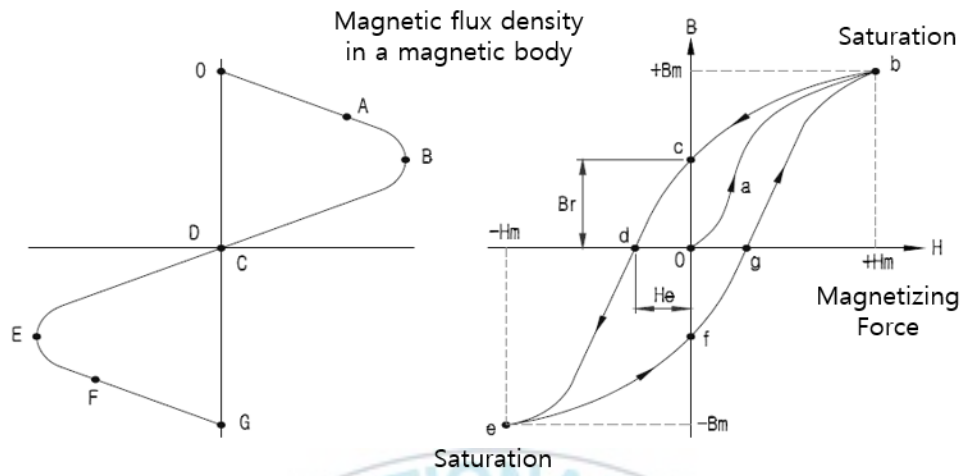
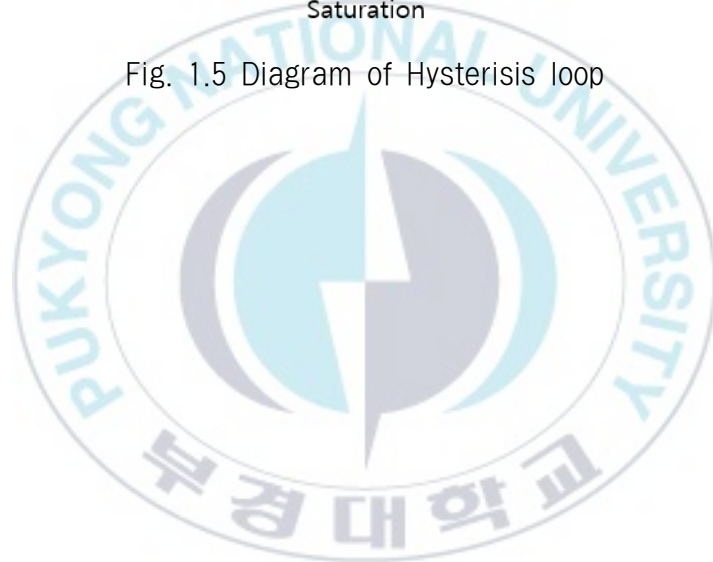


Fig. 1.5 Diagram of Hysteresis loop



히스테리시스 損失은 스타인멘츠 方程式으로 나타낼 수 있다.

$$P_h = n f B_m^{1.6} \dots\dots\dots$$

(1)

여기서, P_h 는 히스테리시스 損失(wb/m^2), n 은 히스테리시스 계수, f 는 주파수, B_m 은 자속 밀도(Wb/m^2), 1.6은 스타인멘츠 정수이다. 磁速 밀도 B_m 은 피 가열체의 透磁率(투자율)과 磁界의 세기에 比例한다. 따라서 히스테리시스 損失 P_h 는 周波數에 비례하지만 50 kHz 이상의 高周波數의 電流가 적용되면 周波數의 제공에 비례하는 渦電流 損失이 주요 發熱原이 된다.

Table 1.1에 대표적인 히스테리시스 계수를 나타내었다^{31, 37)}.



Table 1.1 Specific coefficient of hysteresis

Material	Coefficient of hysteresis
Nickel	3,500 ~ 9,500
Cast steel	2,800 ~ 4,000
Steel plate	500 ~ 7,500
2.5% Si steel plate	550
4.5% Si steel plate	190



(다) 渦電流 損失

非 磁性體나 磁性體의 경우도 溫度를 높여 磁氣 變態點 以上으로 加熱하면 히스테리시스 損失(손실)은 없어지며 渦電流 損失만에 의해 加熱되게 된다³¹⁾. Table 1.2에 대표적인 金屬의 磁氣 變態點을 나타내었다³⁷⁾.



Table 1.2 Specific curie temperature

Material	Temperature (°C)
Iron	770
Cobalt	1,152
Nickel	360
Steel	721



電流의 方向이 變하는 交流 磁界 內에 導體(도체)를 넣으면 電磁 誘導 作用으로 導體에는 電流가 發生하게 되는데 이는 소용돌이 형태의 電流가 되며 이를 渦電流라 한다. 高周波 加熱은 주로 渦電流에 의해 발생하며 저항이 있는 導體에 電流가 흐르며 熱이 發生하며 熱量은 電流의 供給과 導體의 抵抗 및 時間에 比例한다. 渦電流은 줄(Joule)의 法則으로 나타낼 수 있다.

$$w_e = \eta_e f^2 B_m^2 \dots\dots\dots (2)$$

여기서, w_e 는 渦電流, η_e 는 상수이다. 식(1)과 식(2)를 비교해보면 周波數 供給에 비례하는 渦電流 損失이 히스테리시스 損失보다 周波數 影響을 더 크게 받는 것을 알 수 있다. Fig. 1.6은 周波數 變化에 따른 渦電流 損失과 히스테리시스 損失을 나타낸 것으로 周波數가 낮으면 히스테리시스 損失이 크고 周波數가 높아지면 渦電流 損失이 增加하는 것을 보여준다.

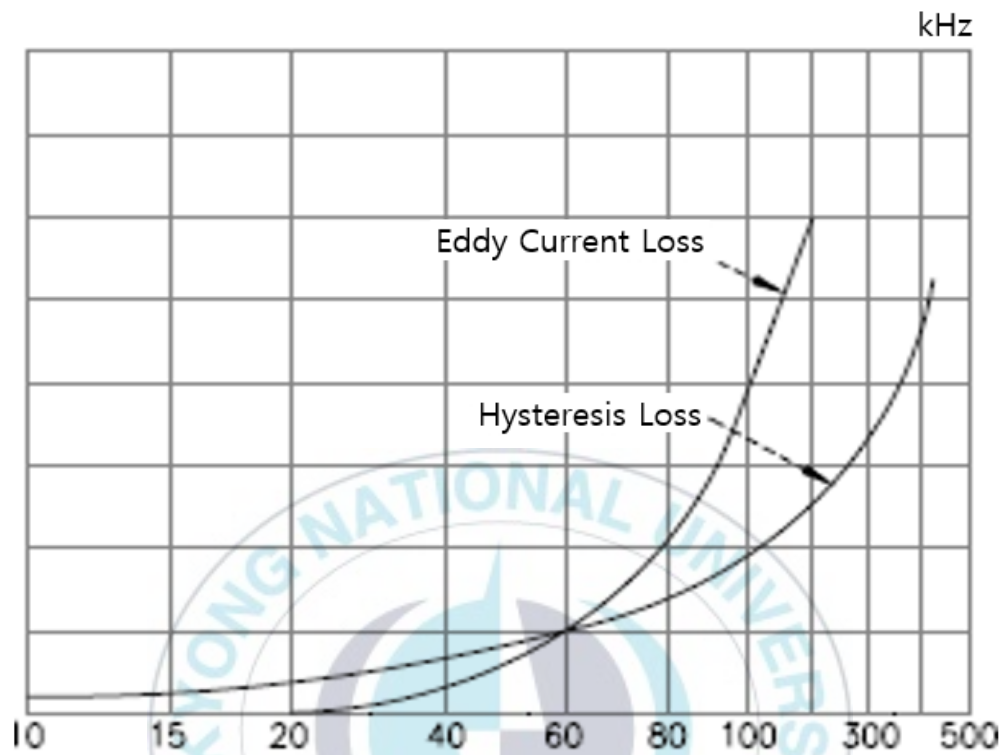


Fig. 1.6 Power loss by frequency

(라) 表皮 效果와 表皮 깊이

表皮 效果는 코일의 電流와 誘導電流(유도전류)의 방향은 서로 반대가 되고 코일과 被加熱 물체의 인접한 부위의 電流 密度가 높아지는 현상으로 被加熱體의 表面의 電流 密度를 높인다^{38~39)}. 渦電流는 도체의 표면에 따라 흐르고 있어 도체의 電流에 수직인 단면을 생각하는 경우, 그 단면의 단위 면적을 통과하는 양인 電流 密度는 도체의 단면에 대해서 다르게 작용하여 表面에 가까운 곳일수록 電流 密度는 크고 表面에서 中心部로 갈수록 電流 密度는 減少하는 現象을 表皮 效果(표피효과 Skin effect)라고 한다.

Fig. 1.7은 세로축에 表面의 電流 密度를 100%로 나타내고 가로축은 表面에서의 깊이를 나타낸 것이다. 表皮 效果는 周波數에 관계되며 周波數가 높을수록 表皮 效果가 크게 된다³¹⁾.



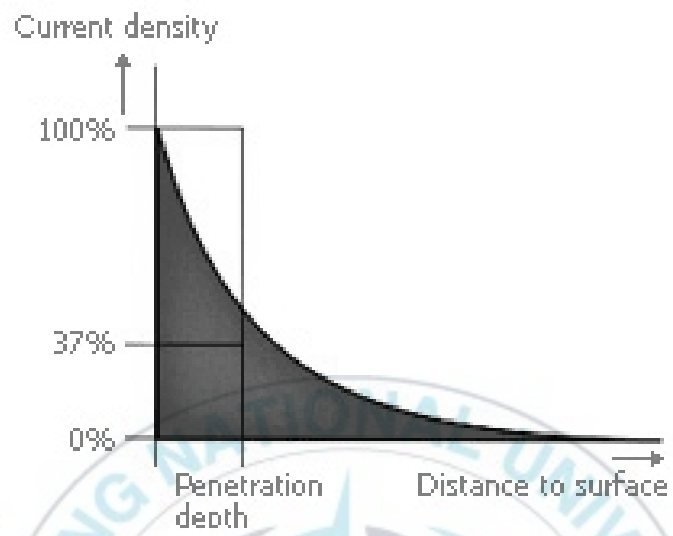


Fig. 1.7 Diagram of skin effect

被加熱物의 表皮에서 電流 密度의 크기가 e^{-1} (37%)까지 감소하는 깊이를 表皮 깊이라고 하며, 표피 깊이 d 는

$$d = \sqrt{\frac{1}{\pi \times f \times \mu \times \sigma}} \dots\dots\dots$$

(3)

여기서, f 는 주파수(Hz), μ 는 투자율(mH/m), σ 는 도전율(mS/m)을 나타낸다. 도전율 σ 는

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \dots\dots\dots (4)$$

여기서 ρ 는 전기 저항율($\Omega \cdot m$)를 나타낸다. 도체의 투자율은 1에 근접하므로 표피 깊이 d 는

$$d \approx \sqrt{\frac{\rho}{f}} \dots\dots\dots$$

(5)

즉, 표피 깊이 d 는 電流의 周波數가 높을수록 얇아지며 被加熱體의 電氣 抵抗率이 높을수록 깊어지게 된다.

또한 被加熱體의 溫度가 변하면 전기저항률 ρ 가 변화하므로 溫度에 따라 표피 깊이 d 가 변한다. Fig. 1.8는 금속봉에 발생하는 渦電流 分布를 나타낸 것이다³⁷⁾. 表面에 흐르는 磁速 密度가 100%일 때 表面에서의 깊이 1/8 지점에서는 40% 이하가 되며, 깊이 1/4 지점에서는 20% 이하, 그리고 깊이 1/2 지점에서는 電流가 거의 흐르지 않게 된다³¹⁾.



Fig. 1.8 Diagram of induction heating and skin effect

Table 1.3에 특정 재료에 대한 溫度別 表皮깊이(mm)를 나타내었다³¹⁾.

Table 1.3 Specific skin depth by frequencies

unit : mm

Material	Temp. (℃)	Frequency (Hz)					
		50	500	1k	3k	10k	400k
Iron	23	3.2	1.1	0.8	0.4	0.2	-
	1200	66.0	23.0	16.2	9.5	5.2	0.8
	1538	91.0	31.8	22.5	3.0	7.1	1.0
Stainless steel	23	57.0	19.7	13.9	8.0	4.4	0.7
	1200	75.0	26.0	18.4	10.6	5.8	0.9
Copper	23	9.5	3.3	2.3	1.2	0.7	0.1
	850	19.3	6.6	4.7	2.7	1.5	0.2
Aluminum	23	13.7	3.7	2.6	1.4	0.8	0.1
	500	19.3	6.0	4.7	2.7	1.5	0.2
Graphite	23	200.0	72.0	50.6	29.3	16.0	2.5

Table 1.4에 특정 金屬의 溫度別 電氣 抵抗率 變化를 나타내었다³¹⁾.

Table 1.4 Specific resistance ratio by temperature

Item	Resistivity ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	resistance ratio					
		-200℃	0℃	200℃	400℃	600℃	800℃
Aluminum	28.1	-	1.000	1.428	1.937	1.814	1.982
Copper	1.56	0.117	1.000	1.862	2.747	3.695	4.752
Iron	8.57	-	1.000	2.464	4.716	7.839	12.009
Nickel	6.38	-	1.000	2.501	4.847	5.882	6.751
Platinum	9.83	0.177	1.000	1.773	2.499	3.178	3.810
Silver	1.50	0.176	1.000	1.827	2.698	3.616	4.586

被加熱物의 반지름이 표피 깊이의 2.25배가 되는 周波數를 臨界 周波數라고 하며, 통상적으로 高周波 誘導 加熱 熱處理에는 臨界 周波數 이상의 주파수를 사용한다. 그러나 高周波 數의 電流를 사용할수록 熱處理가 이루어지는 영역이 감소하므로 표면경화 熱處理에 高周波 誘導 加熱 熱處理가 주로 적용되고 있다. 臨界 周波數 f_c 는 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$f_c = 1.285 \times 10^6 \times \frac{\rho}{\mu a^2} \dots\dots\dots (6)$$

여기서, f_c 는 臨界 周波數, a 는 피가열물의 반지름이다. Fig. 1.9에 주파수 변화에 따른 유도전력 발생을 나타내었다³⁸⁾. 臨界 周波數 이하에서는 주파수 변화에 대하여 電力 發生量이 크게 변화하며 높은 주파수에서는 표피효과가 심해져 표면에서의 열 방출이 커지게 된다. 따라서 일반적인 高周波 誘導 加熱 熱處理에서는 臨界 周波數의 5배 정도의 주파수가 사용된다^{40~42)}.

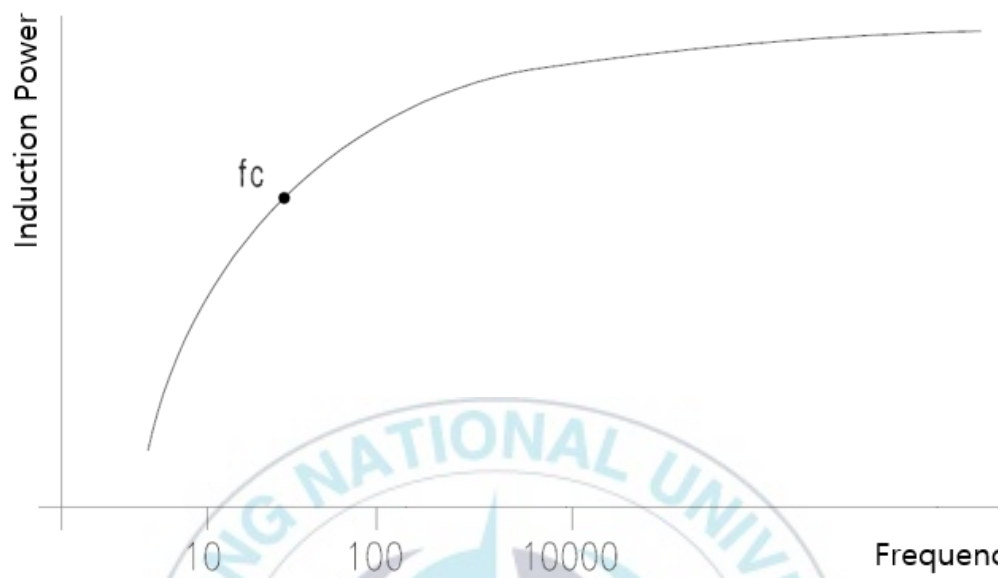


Fig. 1.9 Diagram of induction power by frequency

1.2.2 冷間引拔 加工

(가) 引拔 加工의 概要

소재의 단면적을 감소시켜 원하는 치수와 형상으로 加工하는 것을 목적으로 하는 引拔(drawing)은 金屬 加工 중 가장 오래된 방법의 하나 이다⁴³⁾. 引拔의 처음 형태는 金屬 線을 집게로 당겨서 다이 판(die plate)을 通過시켜 線을 製造하는 방법이었다. 이후 선을 당기는데 물과 같은 자연계에 있는 힘을 이용하였으나 低炭素鋼이나 黃銅과 같은 強度가 낮은 金屬만을 加工할 수 있었다⁴³⁻⁴⁵⁾. 潤滑劑를 使用함으로 高炭素鋼의 引拔 加工이 可能해졌으며 다이스 입구에 潤滑劑를 공급하는 방식이 일반화되었다. 引拔 加工을 만들어지는 제품 중, 線材 형태로 加工되는 것을 伸線 加工이라고 하며 이러한 伸線 加工은 크게 線材의 酸化層 除去, 潤滑劑의 皮膜 生成 등의 전처리 工程과 소재에 變形을 가하여 強度 및 線徑을 제어하는 加工 工程으로 구분되며 斷面 減少率이 클 경우, 伸線 工程 中間에 熱處理 工程이 수반되기도 한다⁴³⁾.

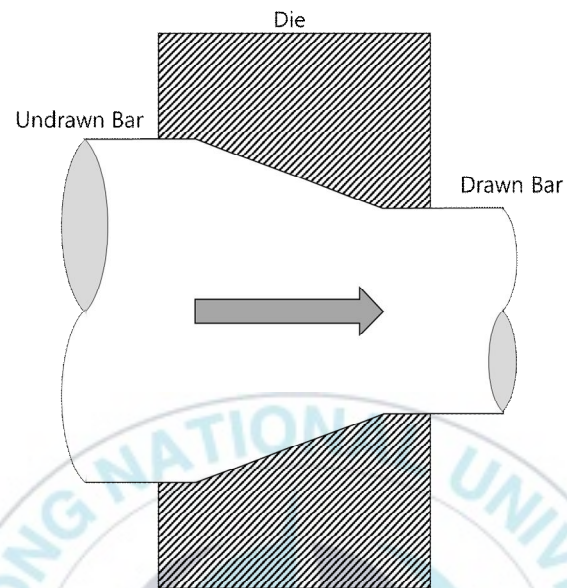


Fig. 1.10 Schematic model of drawing

(나) 引拔力과 最適 다이스 角度

Fig. 1.11은 引拔 加工 중 작용하는 힘을 도식화한 것이다⁴⁶⁾. 다이스에 引拔 加工 방향의 수직 단면에서 z 방향의 힘의 균형을 고려하면 아래와 같은 식이 성립한다.

$$(q + dq)(A + dA) - qA + P \frac{dA}{\sin \alpha} \sin \alpha + p\mu \frac{dA}{\sin \alpha} \cos \alpha = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$qdA + Adq + pdA + p\mu dA \cot \alpha = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

여기서, P 는 引拔力, σ_z 는 引拔 應力, p 는 다이스 壓力, q 는 引拔 方向의 平均 張力, A 는 斷面積, α 는 다이스 角度, μ 는 摩擦 係數이다.

引拔 方向의 응력 σ_z 는 제 1 주응력 σ_1 과 같고 그 값은 q 이며, 加工물과 다이스 사이의 수직 응력 σ_3 과도 같으며 그 값은 $-p$ 이다. 따라서 Treasca 항복 조건(식 (9))을 고려하면 식 (8)은 식 (10)와 같게 된다⁴⁷⁾.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = q + p = Y \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$Adq + (Y(1 + \mu \cot \alpha) - q\mu \cot \alpha) dA = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

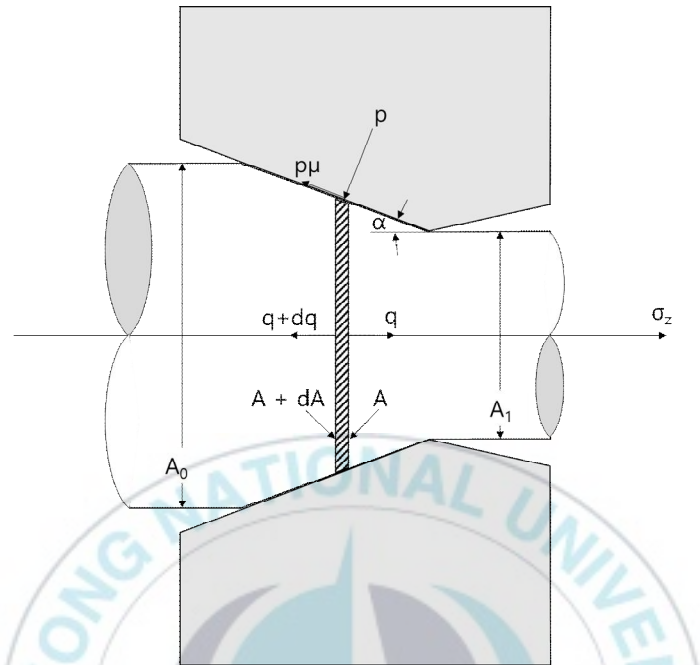


Fig. 1.11 Schematic model of stresses at drawing

경계조건 $A = A_0$ 에서 $q = 0$ 을 적용하여 적분하고 加工 硬化를 고려하지 않으면 Y 는 일정하게 되므로 식 (10)은 아래와 같이 정리 된다.

$$q = Y \left(1 + \frac{1}{\mu \cot \alpha} \right) \left[1 - \left(\frac{A}{A_0} \right)^{\mu \cot \alpha} \right] \dots\dots\dots (11)$$

다이스 출구에서 필요한 引拔力 P_z 는 $A = A_1$ 을 대입하면 아래와 같게 된다.

$$P_z = A_1 Y \left(1 + \frac{1}{\mu \cot \alpha} \right) \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^{\mu \cot \alpha} \right] \dots\dots\dots (12)$$

引拔 중의 加工 硬化를 고려할 경우에는 일반적으로 Y 대신 다이스 전후 소재의 평균 변형 강도 Y_a 를 적용한다. 따라서 실제 引拔力은 아래와 같게 된다⁴⁸⁻⁴⁹⁾.

$$P_z = A_1 Y_a \left(1 + \frac{1}{\mu \cot \alpha} \right) \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^{\mu \cot \alpha} \right] \dots\dots\dots (13)$$

Geleji는 식 (13)으로부터 최적 다이스 角度를 다음과 같은 식으로 나타내었다⁵⁰⁾.

$$\alpha = \frac{-\mu + \sqrt{\mu^2 + 10.5\mu \left(\frac{A_0 + A_1}{A_0 - A_1} \right)}}{2 \left(\frac{A_0 + A_1}{A_0 - A_1} \right)} \dots\dots\dots (14)$$

식 (14)에 의하면 다이스 각도는 引拔力을 최소로 하는 각도로써 재료의

변형 저항과는 무관하고 摩擦係數와 斷面 減少率과 관계가 있다는 것을 알 수 있다. Wistreich는 실험을 통하여 아래와 같은 식을 구하였다^{51~52)}.

$$\alpha = 53.5 \sqrt{\mu \frac{A_0}{A_1} - 1} \dots\dots\dots$$

(15)



(다) 斷面 減少率 設定

단면 감소율 r 은 인발 전후의 단면적 차이로 나타내며 다음과 같은 식으로 나타낸다^{51, 53)}.

$$r = \frac{A_0 - A_n}{A_0} \times 100 (\%) \dots\dots\dots (16)$$

여기서 A_0 은 인발 前 素材 斷面積, A_n 은 인발 後의 素材 斷面積이다.

인발 後 素材의 치수는 素材의 種類 및 1 pass 斷面 減少率에 따라 변화하며 설정된 다이스 치수와 차이나 나는 경우가 있다. 다이스 치수보다 인발 後 소재의 치수가 작은 경우는 인발 後에 인발력에 의해 소재 자체에 塑性 變形이 추가된 경우이다. 반면, 다이스 치수보다 인발 後 소재의 치수가 큰 경우는 소재가 다이스를 통과한 후 탄성 회복이 발생하였기 때문이다.

단면 감소율은 소재의 응력, 다이스 모양 등을 확인 후 아래와 같은 점을 고려하여 설정한다^{51, 54~60)}.

- 인발機의 특성 : 용량, 냉각 등
- 素材의 특성 : 소재의 소성 거동
- 經濟的 특성 : 소모 전력, 다이스 수명 등

초기에는 각 다이스에 감면율을 일정하게 하는 균등 pass schedule이 사용되었으나 Duckfield 등이 각 다이스에서의 변형일이 일정하게 되는 'tapered draft'라는 균동력 pass schedule을 제안하였다. 일본의 KOBE 제철소에서는 변형시효를 억제하기 위하여 등은 pass schedule을 제시하였으나 첫 다이스에서의 단면 감소량이 크게 되므로 윤활 층이 파괴될 우려가 있으며 다이스 사이의 냉각 문제가 발생하였다. 따라서 현재에는 'tapered draft'를 변형 및 조합하여 사용하고 있다⁶¹⁾.

(라) 素材 内の 變形 舉動

引拔 加工에 따른 변형 거동은 素材의 齒數, 斷面 減少率, 다이스 角度, 摩擦, 引拔 速度 등에 따라 變化한다. 斷面 減少率이 작을 경우에는 引拔 加工 중에는 소재의 표면 부근에서만 塑性 變形이 일어나고 중심 부근에서는 塑性 變形이 없이 다이스를 통과 한다^{62~65)}. 斷面 減少率이 클 경우에는 塑性 變形이 소재의 전 부위에서 발생하며 중심축에서의 應力은 특정 지점에서 큰 값을 나타내게 되므로 소재의 중심축에서 공공(void) 생성 및 微細 龜裂로 발전하여 中心 破斷이 발생하게 된다. Fig. 1.9에 중심 파단과 연관된 소재 내부의 흐름 형상을 나타내었다^{51. 55)}.



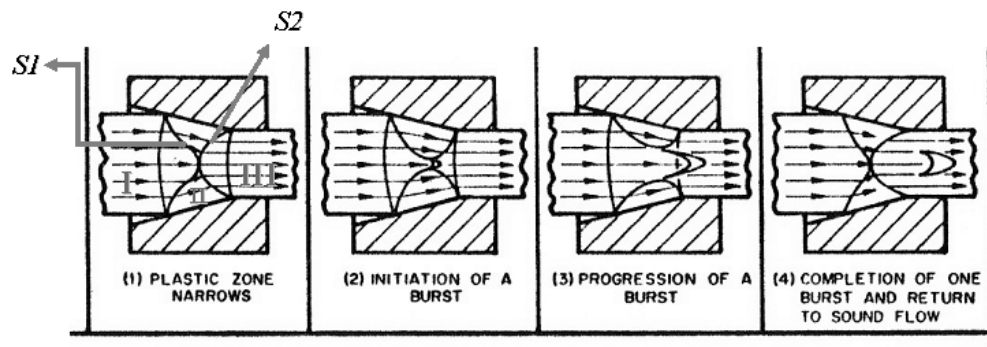


Fig. 1.12 Schematic model of flow pattern at central bursting defect



引拔 條件에 따라 素材 內的 應力 및 變形 舉動이 變化하므로 引拔 加工性 설정이 중요하다. 引拔 條件 變更 시 비교적 간단하게 適正性 여부를 파악하는 방법 중 다이스 shape factor라는 概念이 도입되었다^{66~67)}. 다이스 shape factor Δ 는 소재의 소성 영역을 나타내는 것으로 다이스 각도 α 와 단면 감소율 r 에 의하여 결정되며 아래의 식으로 나타낼 수 있다^{56~60)}.

$$\Delta = \frac{\alpha}{r} (1 + \sqrt{1-r})^2 \dots\dots\dots$$

(17)

Shape factor가 작다는 것은 다이스 角度가 작고 變形量이 많은 것을 의미하므로 塑性 變形 구간이 길어진다. 반대로 shape factor 값이 크면 좁은 범위에서 많은 變形이 發生한다. Shape factor 값이 1이면 塑性 變形 영역이 다이스 길이와 같게 된다. Table 1.5에 다이스 角度와 減免率(감면율)에 따른 shape factor를 나타내었다⁶⁷⁾.

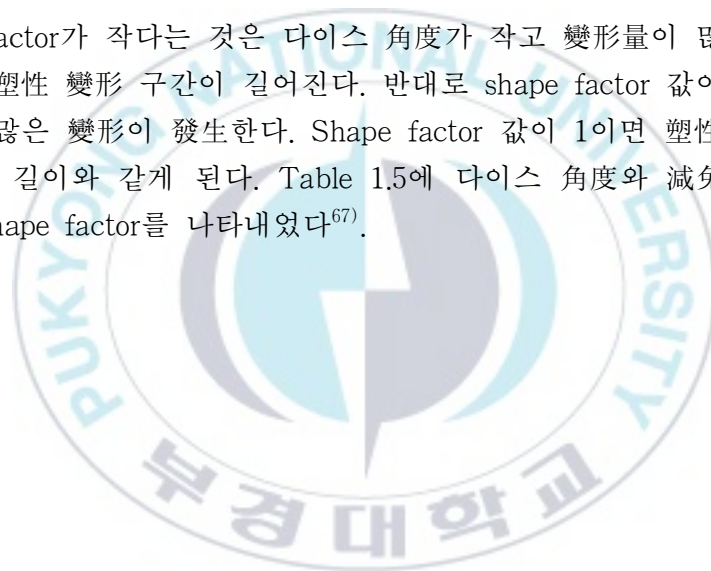


Table 1.5 Shape factors by approach angles and reduction ratios

	% Reduction						
	5	10	15	20	25	30	35
2°	2.73	1.33	0.86	0.63	0.49	0.39	0.33
4°	5.46	2.66	1.72	1.25	0.97	0.79	0.65
6°	8.19	3.99	2.59	1.83	1.46	1.18	0.98
8°	10.92	5.32	3.45	2.54	1.95	1.57	1.30
10°	13.65	6.65	4.31	3.14	2.44	1.97	1.63
12°	16.30	7.94	5.15	3.75	2.91	2.35	1.95
14°	19.03	9.27	6.01	4.38	3.40	2.74	2.27
16°	21.76	10.59	6.87	5.01	3.89	3.14	2.60

제2장 PHC 파일용 PC 鋼棒의 熱處理에 따른 微細組織 및 機械的 特性

2.1 序 論

국내에서는 1990년대 초반 건축물의 고층화 및 대형화, 연약지반 시공 증가 등에 따라 PHC 파일(Pretensioned spun high strength concrete pile)의 제조기술을 도입하여, 현재 단일 파일로는 세계 최대 규모의 시공량 수준을 보인다. 특히, 아파트用 콘크리트 기초의 90% 이상이 PHC 파일을 사용하고 있다⁶⁸⁾. 일본의 경우, 地震發生時 PHC 파일의 脆性(취성) 剪斷破壞(전단 파괴)로 인하여 건축물이 철거되는 사례가 다수 보고되고 있기에, PHC 파일의 취성적 전단 파괴를 방지하고 지진 안정성을 확보하기 위하여 PHC 파일의 뼈대 역할을 하는 PC 鋼棒에 대한 研究가 활발히 이루어지고 있다⁶⁹⁻⁷²⁾.

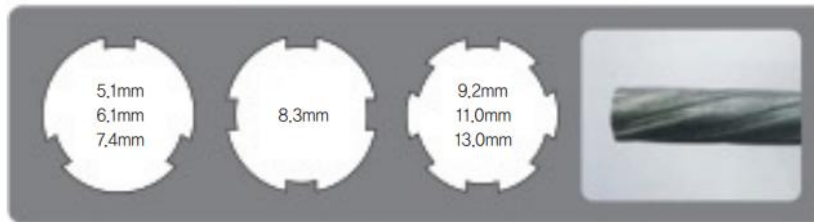
PC 鋼棒은 중탄소강인 30MnSi를 異形 引拔 加工과 熱處理로 나선 홈이 있는 高强度의 鐵鋼 棒을 사용한다. 高强度의 PHC 파일에 관한 연구⁶⁹⁾가 진행됨에 활발히 진행되면서 기존의 $\phi 9.2\text{mm}$ 의 PC 鋼棒을 대체할 수 있는 $\phi 8.8\text{mm}$ PC 鋼棒에 대한 수요가 발생하였다. Fig. 2.1에 異形 PC 鋼棒에 대한 KS 규격인 KS D 3505를 도식화하여 나타내었다.

$\phi 9.2\text{mm}$ PC 鋼棒과 동등 수준의 引張 荷重이 보장되는 熱處理 條件 확보가 필요하다. 일반적인 PC 鋼棒의 熱處理는 引張 荷重 대비 10~20%의 引張力이 유지되는 誘導加熱 方式의 熱處理 設備에서 진행되며, $\phi 8.8\text{mm}$ PC 鋼棒은 $\phi 9.2\text{mm}$ PC 鋼棒의 要求 特性인 1,420MPa 이상의 引張强度와 延伸率 10% 이상 및 240-440 HV10의 硬度가 보장되어야 한다. PC 鋼棒은 담금질과 뜨임 熱處理로 製造된다. 微細組織은 機械的 성질에 큰 영향을 미치게 되며, PC 鋼棒의 경우, 微細組織은 마지막 熱處理인 뜨임(=Tempering) 溫度에 따라 決定 된다^{72~73)}.

본 研究에서는 태광금속(주)의 冷間引拔 設備와 連續 高周波 誘導加熱 및 冷却 設備를 이용하여 KS B 0801의 2호 試驗片을 製作하여 여러 가지 조건 熱處理 條件으로 變形率 速度 $2.4 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 를 적용한 引張試驗 後 最

適의 熱處理 條件을 導出하였다.

© Deformed & Round Steel bar for prestressed concrete
: KS D 3505 –SBPD 1275/1420 for Tensile Steel



ITEM	Nominal Diameter (mm)	Minimum Yield Load(N)	Minimum Tensile Load(N)	Minimum Yield Strength (N/mm ²)	Minimum Tensile Strength (N/mm ²)	Elongation(%)	Relaxation 10hrs.(%)
SBPD 1275/ 1420 for Tension Steel	(5.1)	26,280	27,950	1275	1420	More than 5.0	Below 1.5
	(6.1)	37,850	40,210				
	7.4	51,190	56,880				
	(8.3)	70,120	74,680				
	9.2	81,985	91,000				
	11.0	115,230	127,975				
	13.0	160,045	177,740				

Fig. 2.1 KS D 3505

2.2 材 料

본 연구에서 試驗片 製作을 위하여 사용된 철강재료는 $\phi 9.2\text{mm}$ PC 鋼棒과 동일한 재료인 한국의 POSCO에서 열간 압연으로 제조된 30MnSi의 中炭素鋼을 사용하였다. $\phi 10\text{mm}$ 의 30MnSi 선재에서 3개의 시험편을 채취하여 濕式 分析法(습식 분석법)을 이용하여 化學 性分 分析하였으며 그 결과는 Table 2.1에 나타내었다.

引張試驗을 통하여 시험편의 機械的 特性을 分析하였으며 그 결과는 Table 2.2에 나타내었다.



Table 2.1 Chemical compositions of 30MnSi and specimens (wt%)

	C	Si	Mn	P	S
30MnSi	0.26- 0.34	0.50- 0.90	1.00- 1.40	≤ 0.035	≤ 0.030
Specimen 1	0.29	0.78	1.33	0.027	0.020
Specimen 2	0.30	0.75	1.21	0.019	0.025
Specimen 3	0.29	0.85	1.29	0.021	0.015



Table 2.2 Mechanical properties of 30MnSi and specimens

	Tensile Stress (MPa)	Strain (%)
30MnSi	600-780	>20
Specimen 1	654.93	26
Specimen 2	663.95	24
Specimen 3	689.12	22



2.3 實驗 方法

시험편을 제작한 태광금속(주)는 $\phi 9.2\text{mm}$ PC 鋼棒 製品을 生産하고 있으며, 사용한 誘導加熱 方式의 熱處理 設備의 仕様 및 $\phi 9.2\text{mm}$ PC 鋼棒 生産에 使用된 電流 크기 및 溫度는 Table 2.3에 나타내었다. Fig. 2.2은 본 실험에서 사용된 태광금속(주)의 高周波 誘導 加熱 熱處理 設備의 사진이다.

$\phi 9.2\text{mm}$ PC 鋼棒은 원소재인 선재(Steel Wire Rod)를 異形 引拔 加工 後, Ac3 變態點 以上の 溫度로 加熱 後, 담금질(=燒入)과 뜨임(=燒戻)으로 1,400MPa의 引張強度를 가지게 된다. 자세한 熱處理 선도는 Fig. 2.3에 나타내었다.

$\phi 9.2\text{mm}$ PC 鋼棒의 微細組織을 광학현미경으로 관찰한 결과, 2차 加熱 後에는 마르텐사이트 組織이 나타났으며 3차 加熱 後에는 마르텐사이트 組織과 유사한 組織이 관찰되었으나, 템퍼드 마르텐사이트 組織으로 판단되었다. 2차 및 3차 가열 후의 微細組織 觀察 結果를 Fig. 2.4에 나타내었다.

電流 入力값을 조정하여 熱處理 溫度를 制御하고 있으므로, 본 실험에서는 製品의 機械的 特性에 영향을 줄 수 있는 3차 加熱(G3) 電流 값 및 이송 速度(線速)를 변수로 설정하여 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 誘導 加熱 條件은 Table 2.4에 나타내었다. 1차 가열(G1) 및 2차 가열(G2)을 위한 電流 값은 $\phi 9.2\text{mm}$ PC 鋼棒 生産에 사용되는 電流 값을 사용하였으며, 減少한 단위 길이당 質量에 따른 生産性 저하가 발생하지 않도록 최저 線速(46m/min)을 이송 속도(線速) 변수값으로 사용하였다.

Table 2.3 Specifications of induction heater

Input Voltage	3-phases 440V 60Hz		
Output Power	200kW		
Frequency	160kHz		
Speed	43m/min		
Input Current	1st. Heating 249.6A	2nd. Heating 132.4A	3rd. Heating 96.4A
Temperature	1st. Heating 700°C	2nd. Heating 923°C	3rd. Heating 430°C

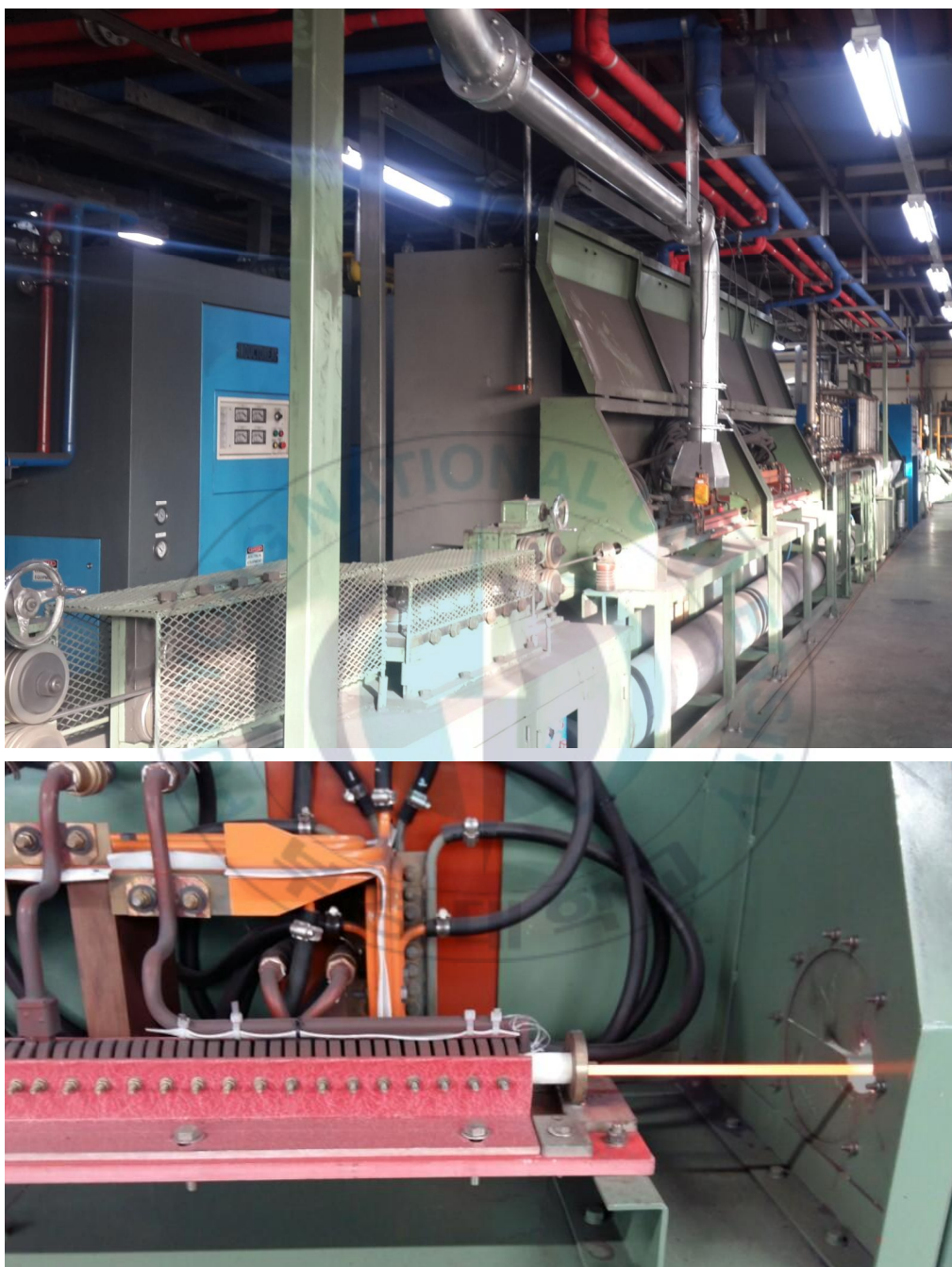
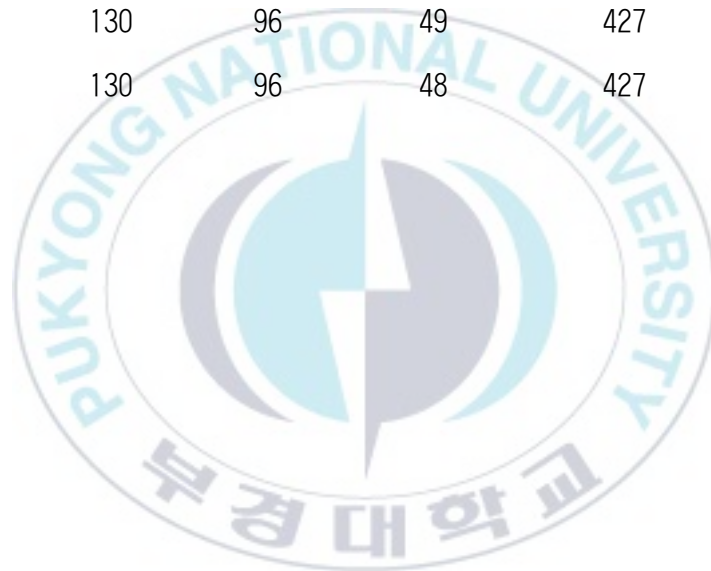


Fig. 2.2 High frequency induction heat treatment equipment

Table 2.4 Currents of G3 and temperatures at G3

	G1 current (A)	G2 current (A)	G3 current (A)	Speed (m/min)	Temperature at G3 (°C)
1	245	130	98	49	429
2	245	130	98	48	437
3	245	130	97	49	427
4	245	130	97	48	433
5	245	130	96	49	427
6	245	130	96	48	427



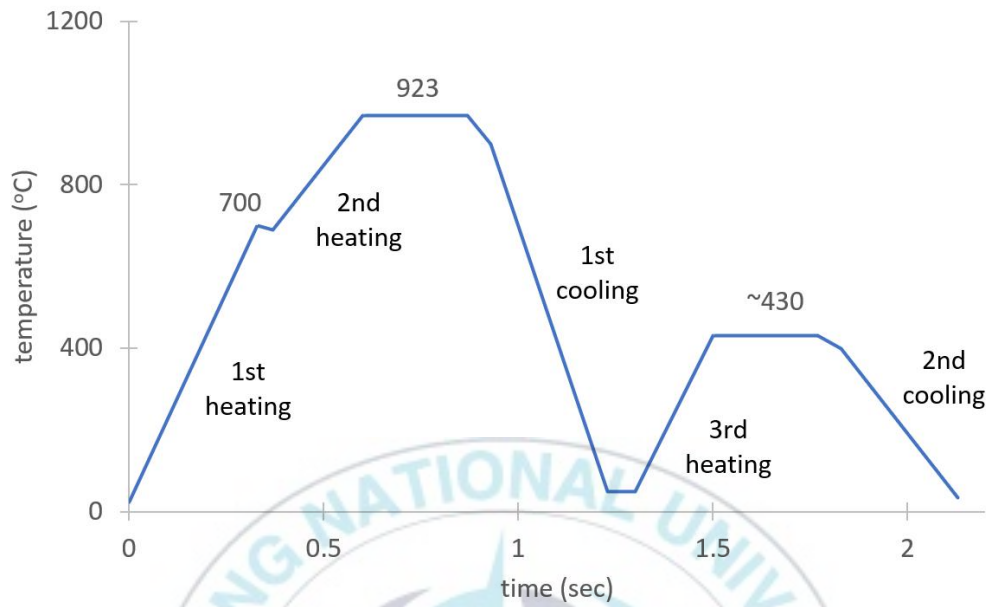


Fig. 2.3 Schematic diagram of induction heat treatment of $\varnothing 9.2\text{mm}$ PC steel rod

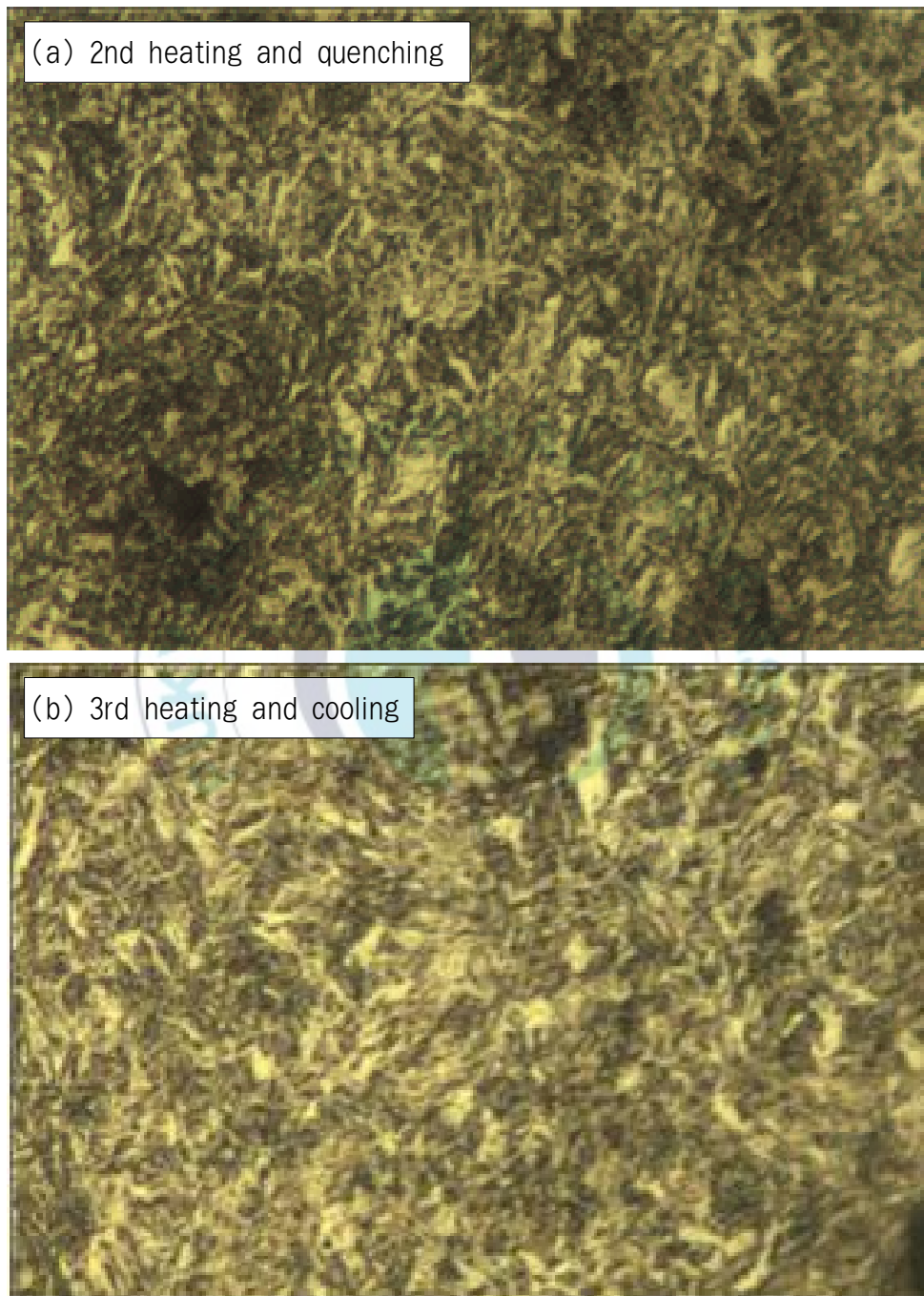


Fig. 2.4 Microstructures of $\phi 9.2\text{mm}$ PC steel rod

2.4 結果 및 考察

Fig. 2.5~2.10은 각 試片을 오스테나이트化 溫度에서 急冷 後, 試驗 條件別 溫度에서 뜨임 및 冷却한 試片에 대한 微細組織을 전자현미경으로 관찰한 결과이다.

Fig. 2.5 및 Fig. 2.6은 G3 입력 電流 98A에서, Fig. 2.7 및 Fig. 2.8은 G3 입력 電流 97A에서, Fig. 2.9 및 Fig. 2.10은 G3 입력 電流 96A에서 각각 이송 속도를 변화시키며 뜨임 熱處理한 微細組織이다. 試片 2(Fig. 2.6)와 試片 4(Fig. 2.8)의 微細組織은 $\phi 9.2\text{mm}$ PC 鋼棒의 템퍼드 마르텐사이트 組織과 유사한 組織이 觀察되었지만, 試片 1(Fig. 2.5), 試片 3(Fig. 2.7), 試片 5(Fig. 2.9)에서는 마르텐사이트 組織이 觀察되지 않았으며 이는 빠른 이송 速度로 인하여 충분한 熱處理가 이루어지지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 2.11은 G3 電流 및 移送速度 變化에 따른 뜨임 열처리된 30MnSi $\phi 8.8\text{mm}$ PC 鋼棒의 引張應力-變形律 曲線을 나타내었다. PC 鋼棒에 靱性을 부여하기 위하여 400°C 以上の 溫度에서 뜨임 熱處理를 하였으며 連續製造 設備로 인하여 이송 속도 변화를 통한 미세한 변화를 부여할 수 있었다. PC 鋼棒의 재료인 30MnSi의 경우, 뜨임 熱處理 溫度 427°C 에서도 1GPa급 이상의 引張 強度를 확보할 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 試片 3과 試片 5는 낮은 뜨임 溫度에 의하여 불충분한 뜨임 熱處理가 이루어져 낮은 延伸律(약 5%)을 가지는 것으로 나타났다. 뜨임 溫度가 430°C 이상인 試片 2 및 4는 引張強度 1,400MPa 이상을 나타내었지만 $\phi 9.2\text{mm}$ PC 鋼봉과 유사한 微細組織을 가지는 試片 2의 引張強度가 가장 큰 1,455MPa 나타내었다. 또한, 誘導 加熱 熱處理 設備의 짧은 온도 유지 시간 및 빠른 이송 속도로 인하여 試片 2에서는 마르텐사이트 組織이 試片 4 대비 많이 殘存하는 것으로 판단되며 이에 따라 延伸律 下落이 發生한 것으로 판단된다.

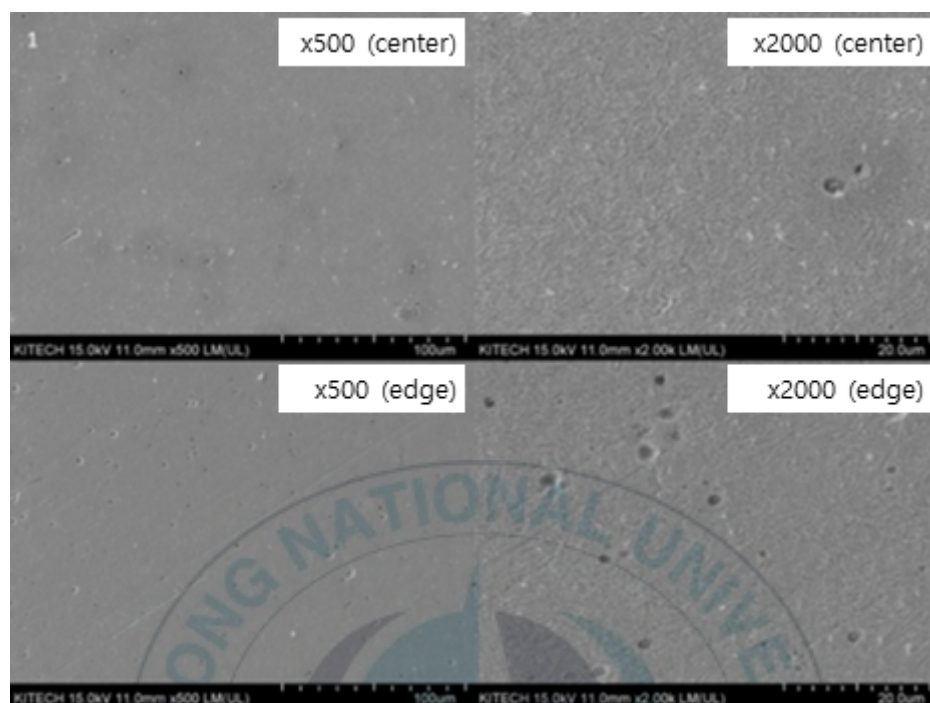


Fig. 2.5 SEM images of G3 98A and 49m/min

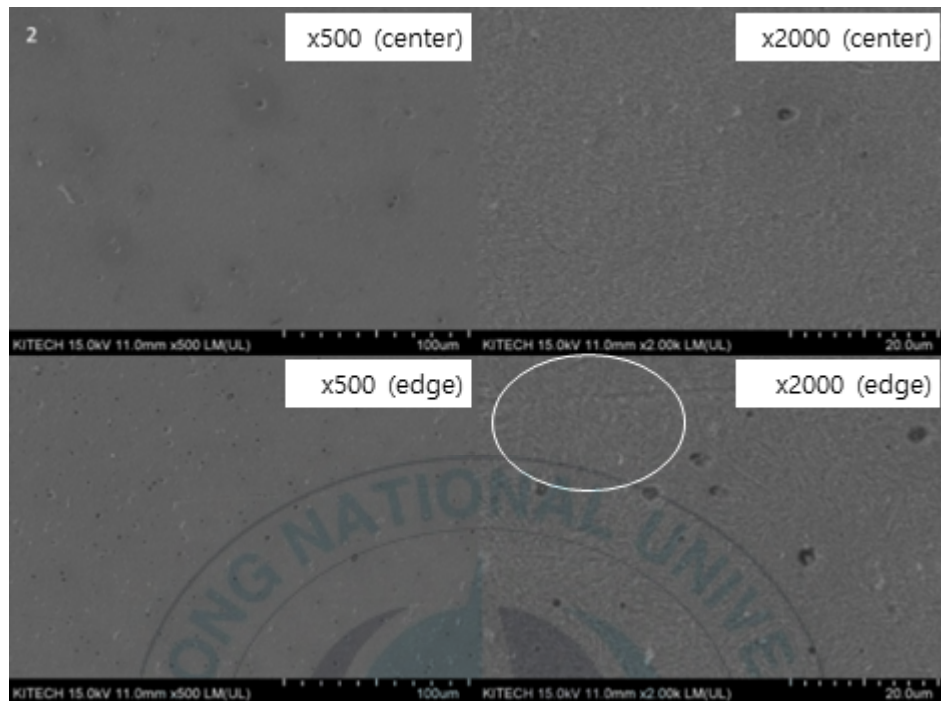


Fig. 2.6 SEM images of G3 98A and 48m/min

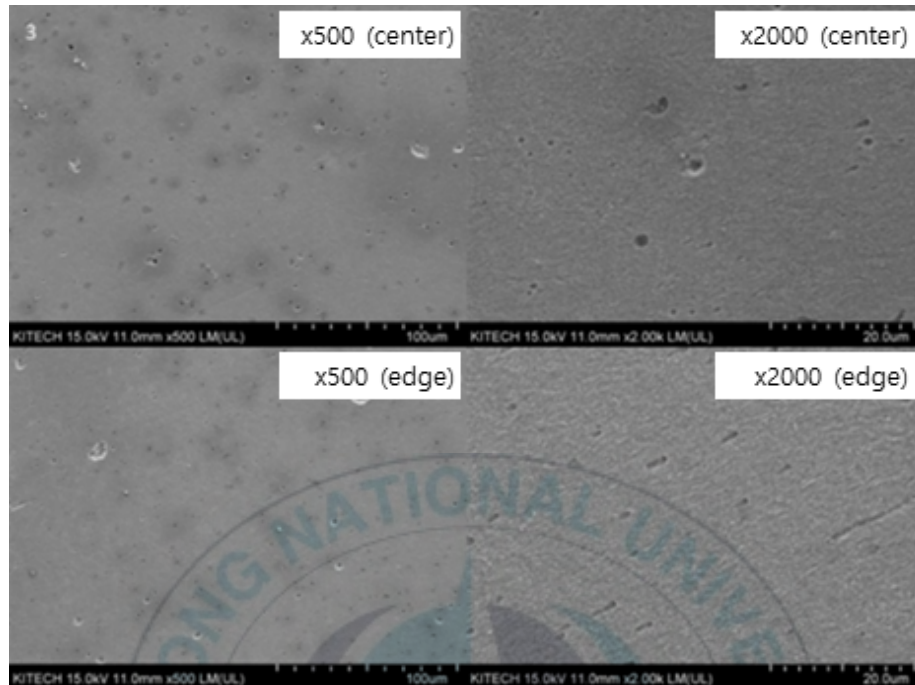


Fig. 2.7 SEM images of G3 97A and 49m/min

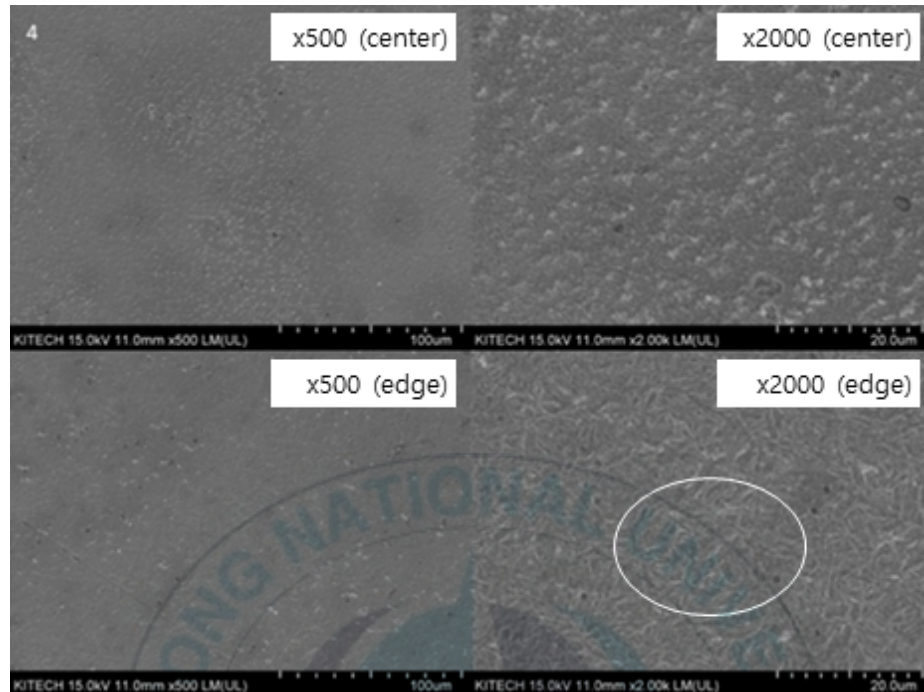


Fig. 2.8 SEM images of G3 97A and 48m/min

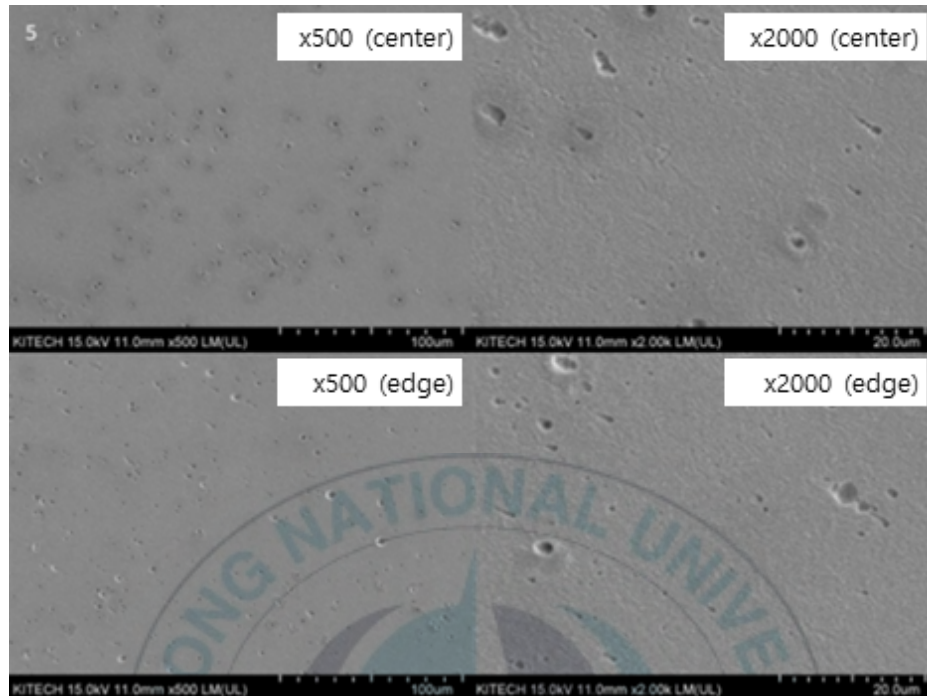


Fig. 2.9 SEM images of G3 96A and 49m/min

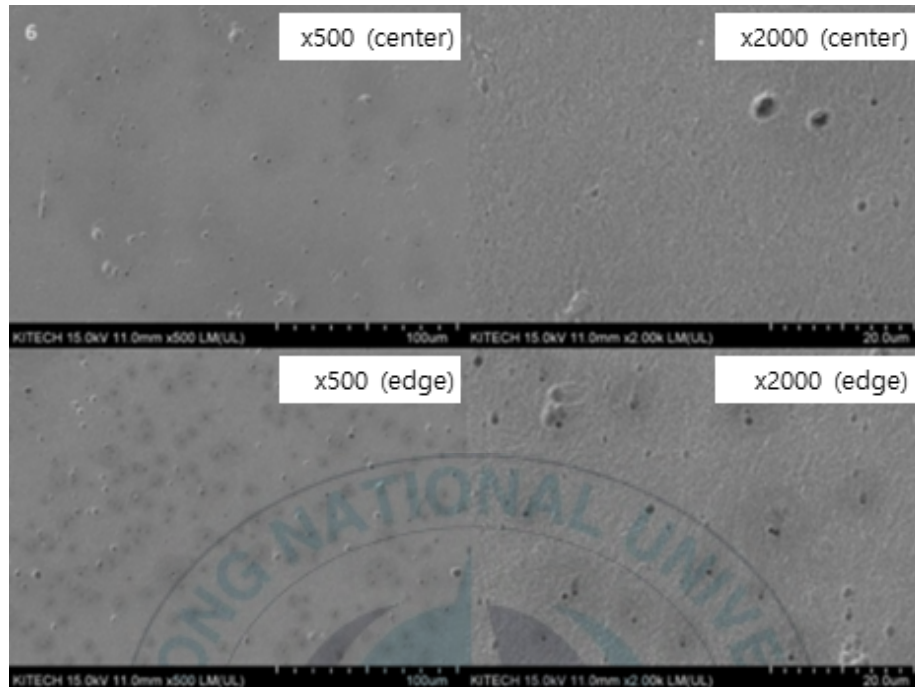


Fig. 2.10 SEM images of G3 96A and 48m/min

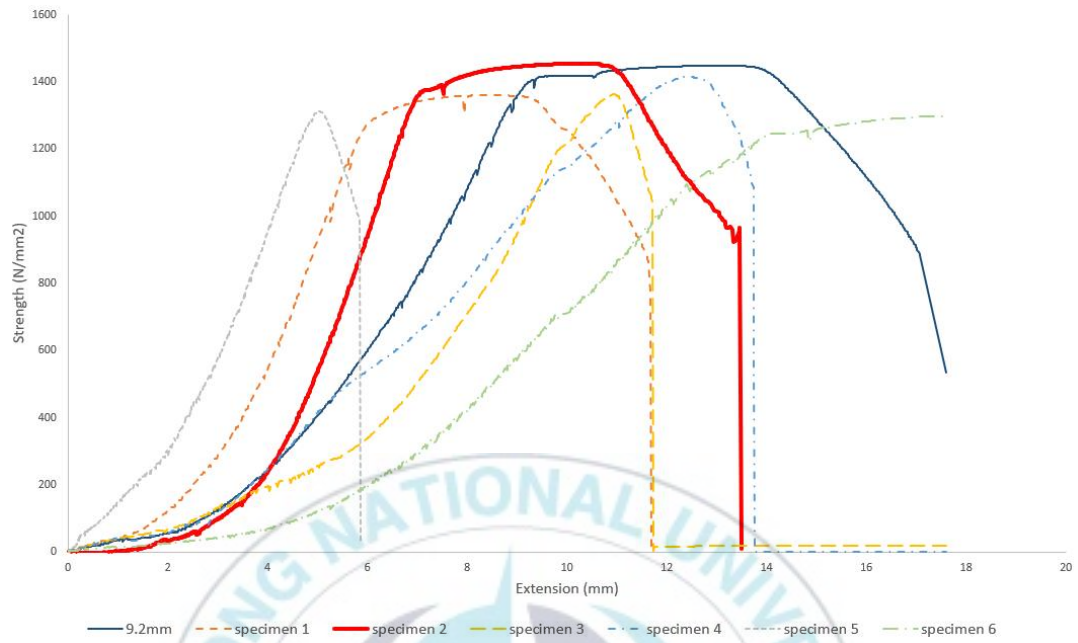


Fig. 2.11 Tensile stress-strain curves of $\phi 8.8\text{mm}$ and $\phi 9.2\text{mm}$ PC steel rod

2.5 結 論

中炭素鋼인 30MnSi를 使用하여 生産되는 $\phi 8.8\text{mm}$ PC 鋼棒은 기존의 $\phi 9.2\text{mm}$ PC 鋼棒과 다른 뜨임 溫度가 適用되어야 하므로 誘導加熱 熱處理 方式을 통하여 뜨임 後의 微細組織들을 比較·分析하고, 熱處理 條件別 張應力-變形律 曲線을 조사하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) G3 電流 값 및 線速 變更 試驗 結果, 電流 값 대비 線 속도 變更이 製品의 機械的인 特性에 많은 影響을 끼치며, 最適값은 G3 電流 98A 및 線速 48m/min인 것으로 나타내었다.

(2) 最適값이 적용된 試片2의 경우, 既存 製品($\phi 9.2\text{mm}$ PC 鋼棒)과 유사한 微細組織(템퍼드 마르텐사이트)이 觀察되며 引張強度는 1,455MPa으로 제품의 許容값(1,420MPa)을 充足하는 結果를 보였다.

제3장 異形 PC 鋼棒 制作用 핀치롤러의 耐久性 向上을 위한 表面處理 技術 開發

3.1 序 論

PHC Pile에 사용되는 PC鋼棒(Prestressing steel bar)은 직경 9~33mm의 PC 강재를 말하며, PC 鋼線과 비교해 직경이 굵으며, 冷間 引拔, 壓延, 熱處理 등의 工程 과정을 통해 製造된다. PC 鋼棒 제품은 프리텐션(Pre-tension) 방식으로 콘크리트 파일 및 전주에 사용되는 異形 PC 鋼棒과 포스트텐션(Post tension) 방식으로 제작되어 철도 선로 아래에 까는 콘크리트 내부에 심는 고장력 PC 鋼棒이 있다. 특히 異形 PC鋼棒(Deformed prestressing concrete steel bar)은 PHC Pile 제작 과정 중에 콘크리트와의 부착력을 증대시키기 위해 표면에 나선 형태의 홈이 균일하게 정렬되어 콘크리트와 PC 鋼棒이 서로 강력한 附着力을 가진다. PC 鋼棒에 사용되는 원소재는 30MnSi로서 冷間 引拔, 壓延, 熱處理 工程 과정을 통하여 強度(1,200MPa) 및 硬度(HV 400)가 크게 증가하는 특징이 있다⁷⁴⁾.

異形 PC 鋼棒은 핀치롤러에 의한 冷間 壓延 工程 後 誘導 加熱 方式으로 熱處理되며 鋼棒의 직진성을 유지하기 위해 균일한 장력을 부여하여 일정한 긴장력을 유지하여야 한다. HV400의 PC 鋼棒을 지속해서 壓延 時, 핀치롤러 表面에서의 磨耗는 필연적으로 發生하는 문제이다⁷⁵⁾. Fig. 3.1은 핀치롤러의 사진이며, Fig. 3.2는 핀치롤러가 적용되는 모습의 사진이다.

핀치롤러 홈 부분의 마모가 누적되면 PC 鋼棒 제작 工程 중 제품에 진동이 발생하여 제품의 진직도, 線徑 偏差 등 製品 品質이 저하된다. 마모가 진행된 핀치 롤러는 긴장력이 저하되고 결과적으로 PC 鋼棒에 일정한 장력이 유지되지 못하고 미끄러짐(=slip)이 發生한다. 또한 900℃ 이상의 고온 熱處理 工程을 통과하는 PC 鋼棒은 저하된 긴장력에 의하여 일정한 장력을 유지하지 못하게 된다⁷⁶⁾.

핀치롤러의 耐磨耗性(내마모성) 및 耐久性(내구성) 향상을 위하여 TD(thermal diffusion) 코팅에 의한 VC (Vanadium Carbide)을 形成시키

는 방법이 사용 된다^{77~80)}. TD 코팅은 일본, 미국, 스페인, 네덜란드 등 선진 각국에서 金型 및 耐磨耗性を 必要로 하는 機械 部品の 壽命 증가를 위하여 널리 사용되고 있는 表面處理 技術이다. TD 코팅의 VC 층은 母材 속의 炭素와 鎔融鹽 속의 vanadium이 擴散 結合하여 하드 코팅층을 생성하여, 耐磨耗性 및 母材와의 耐剝離性 (박리성)이 극히 우수하게 된다⁸⁰⁾.

따라서 본 연구에서는 熱擴散(Thermal diffusion) 表面處理에 의한 耐磨耗性이 享上된 핀치 롤러에 대한 特性을 分析, 檢討하였다.





Fig. 3.1 Pinch roller





Fig. 3.2 Pinch roller at High frequency induction heat treatment equipment

3.2 實驗 方法

본 연구에서 사용된 소재는 직경 120mm의 핀치 롤러로서 合金 成分이 1.5%C - 0.22%Si - 0.55%Mn - 0.014%P - 0.012%S - 12.52%Cr - 11.57%Mo - 1.13%Ni - 0.44%V(wt%)이다. 이 소재를 핀치 롤러 形狀으로 切削 加工 後, 질소 가스가 충전된 熱 處理爐에서 1,050℃ 이상을 加熱 後, 질소 가스에 의한 急冷을 하며, 170℃에서 저온 뜨임을 實施하였다. 熱處理가 완료된 핀치 롤러를 1,000℃의 Vanadium 용탕에서 10시간 沈積 後, 表面 練磨하여 試片을 준비하였다. Fig. 3.3은 VC 층이 생성된 핀치롤러의 사진이다.

코팅층의 두께는 광학현미경을 사용하여 測定하였으며 磨耗 試驗은 크롬(chrome) 재질의 직경 3mm의 球를 사용하는 Ball on Disk 방식을 적용하였다. 크롬 球의 線速度는 4.19m/s, 하중은 10N을 적용하여 직경 10mm 웨도를 100m 摩擦시킨 後 磨耗 量을 測定하여 非 磨耗 量과 摩擦係數를 계산하였다.



Fig. 3.3 VC coated pinch roller

3.3 結果 및 考察

Fig. 3.4은 TD 코팅이 적용된 핀치 롤러를 water jet을 이용하여 절단하여 단면을 광학현미경을 觀察한 結果를 나타내었다. VC 층의 두께는 약 8 μm 로 測定되었으며 코팅층 생성 速度는 0.6-0.9 $\mu\text{m/hr}$ 로 예상 된다.

Fig. 3.5와 Fig. 3.6은 Ball on disk 磨耗 試驗片의 磨耗 形狀을 광학현미경으로 관찰한 結果를 나타내었다. (a)는 TD 코팅을 적용하지 않은 VC 층이 없는 母材의 磨耗 形狀이며, (b)는 10시간의 TD 코팅을 적용하여 약 8 μm 의 VC 층이 형성된 試片의 磨耗 形狀이다.

Fig. 3.7과 Fig. 3.8은 摩擦係數를 測定한 結果를 나타내었다. Table 3.1은 각각의 실험에 대한 結果를 나타내었다. 摩擦係數는 母材와 VC 층이 각각 0.683과 0.644로 큰 차이가 나타나지 않으나, VC 층의 마모량은 母材 대비 36%만 마모되었다.

VC 층이 생성시키지 않은 핀치 롤러와 8 μm 의 VC 층이 생성된 핀치 롤러를 PC 鋼棒 生産用 誘導 加熱 熱處理기에 적용하여 동일한 제품(지름 9.2mm PC 鋼棒)을 동일한 중량(360톤) 생산 후, 磨耗 정도를 평가하였다. 1개의 熱處理 工程에는 핀치 롤러는 4개씩 3곳에 장착되며, 각각의 위치를 1번, 2번 그리고 3번으로 명명하였다. Fig. 3.9, 3.10, 3.11은 제품 생산 후, 적용한 핀치 롤러를 탈거하여 위치별 磨耗 정도를 接觸 시침으로 測定한 結果이다. 3번 위치의 핀치 롤러는 熱處理 중 緊張力 발생을 위하여 가장 큰 壓力이 가해지는 부위이다. 위치별 磨耗 정도를 비교한 結果는 Table 3.2에 나타내었다. Fig. 3.12는 VC 층이 생성된 핀치 롤러를 誘導加熱 熱處理 設備에 적용한 사진이다.

熱處理 중 PC 鋼棒의 진직도 및 외경 수정 역할을 위한 緊張力을 부여하는 3번 위치에서 가장 많은 磨耗量이 測定되었다. 3번 위치 기준 VC 층이 적용된 핀치 롤러의 磨耗 壽命이 약 2배로 예상된다. VC 층 두께 8 μm 및 마모 한계점 6.4 μm (VC 층 두께의 80%) 기준 최단 교체 주기는 5,120톤으로 계산되며, 1번 및 2번 위치는 장시간 시험 후 교체 주기 산정이 가능할 것이다.

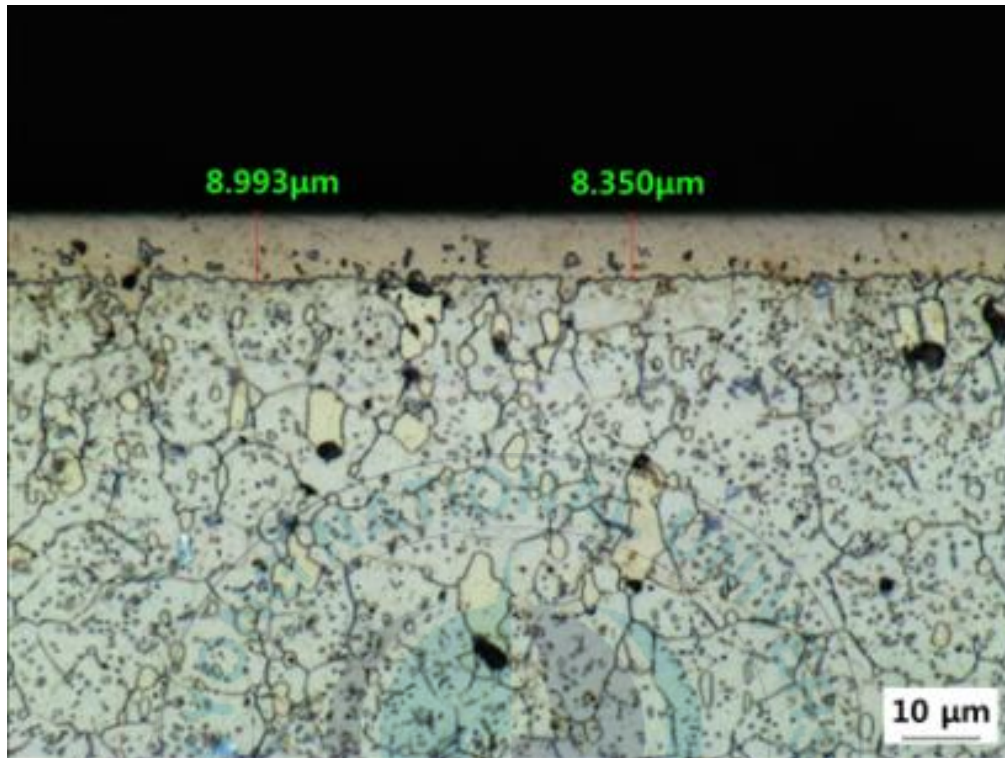


Fig. 3.4 Thickness of VC layer





Fig. 3.5 Shapes of wear tests without VC layer

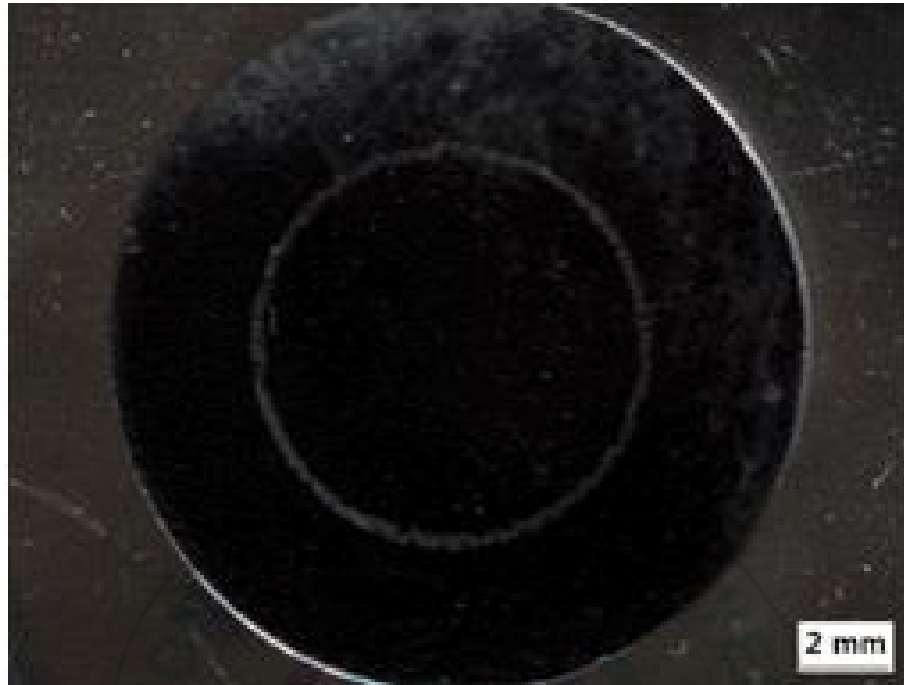


Fig. 3.6 Shapes of wear tests with VC layer

Table 3.1 Results of ball on disk wear test

	Coefficient of Friction	Wear area (μm^2)	Wear coefficient (mm^2/N)	Relative wear rate
Base material	0.683	6445.6	2.02×10^{-4}	100%
VC layer	0.644	2317.5	0.73×10^{-4}	36%



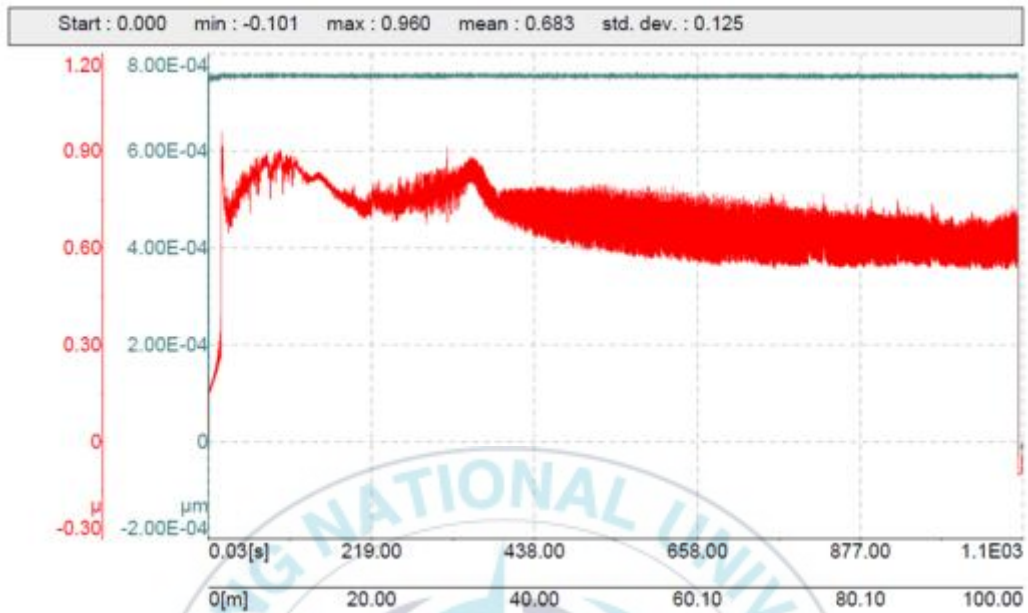


Fig. 3.7 Coefficient of Friction of base material

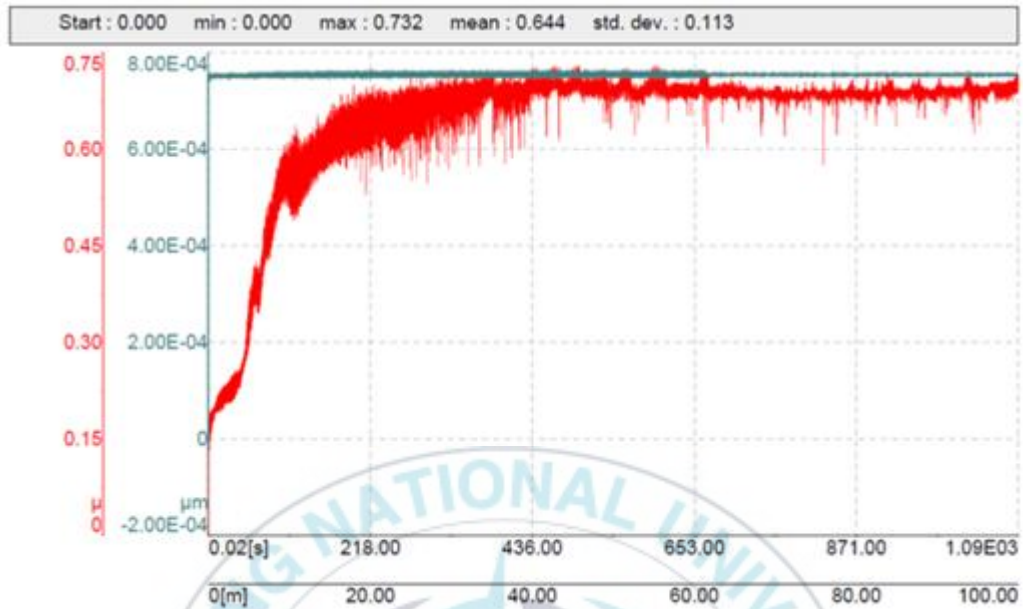


Fig. 3.8 Coefficient of Friction of VC layer

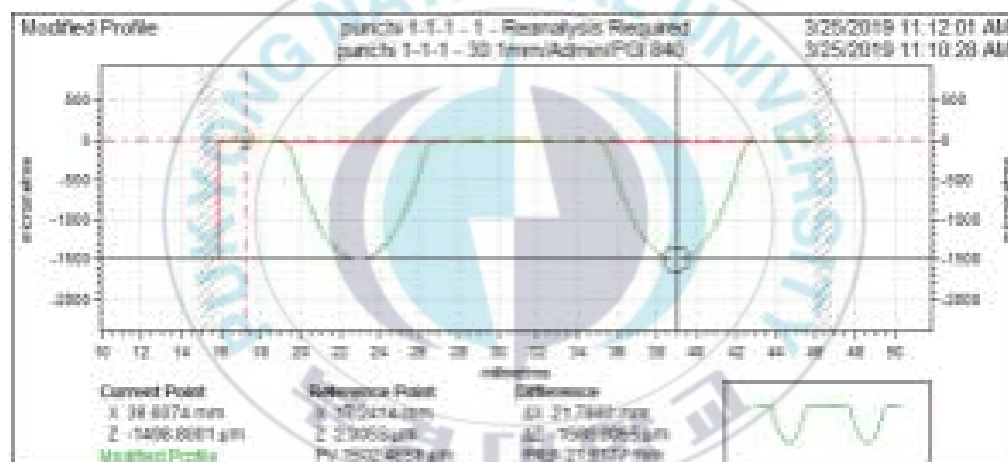
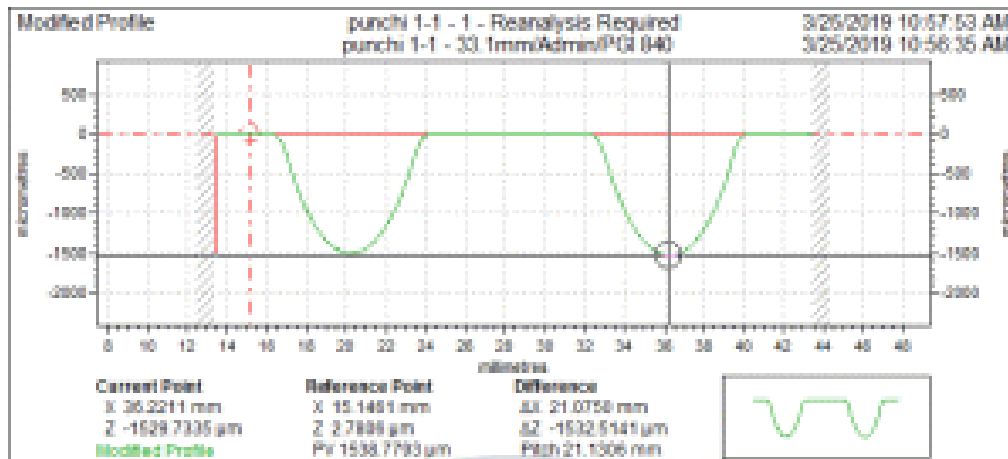


Fig. 3.9 Surface profiles of no.1 point

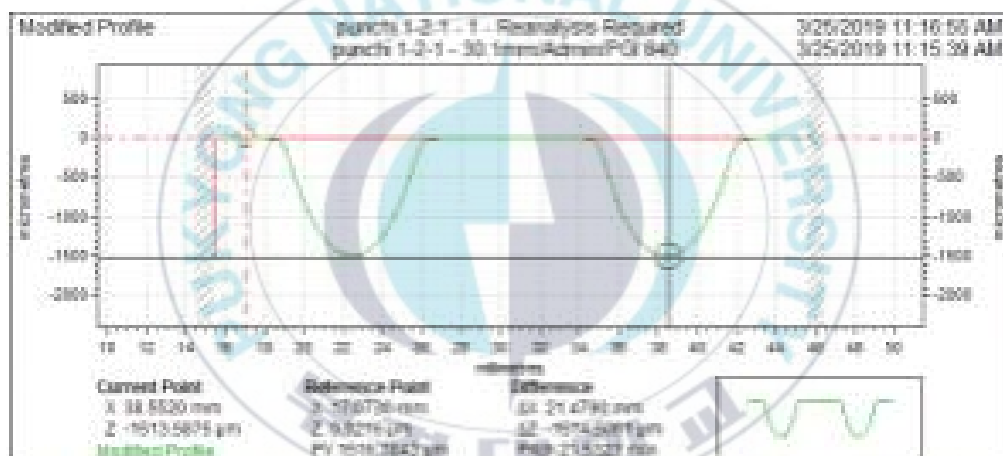
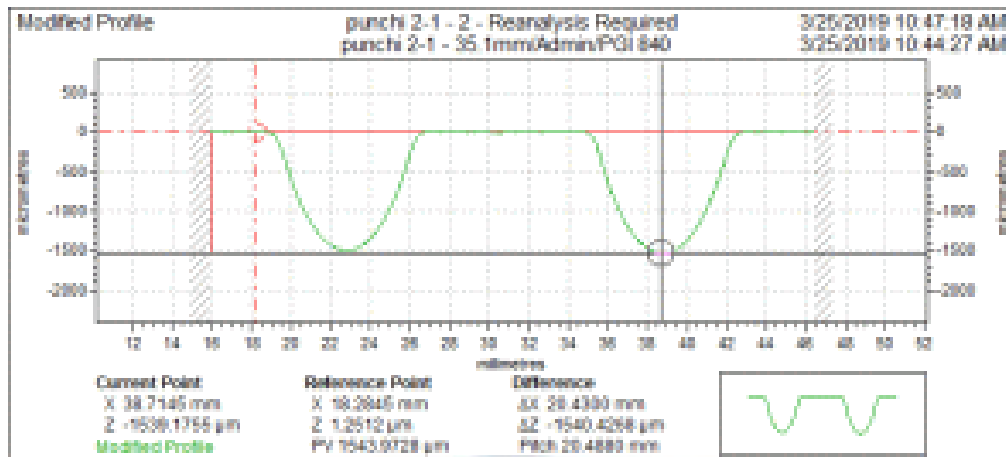


Fig. 3.10 Surface profiles of no.2 point

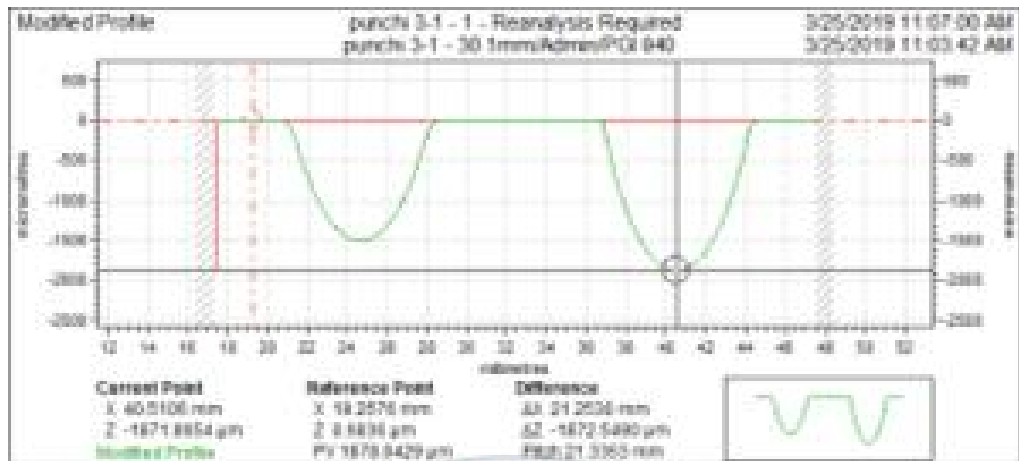


Fig. 3.11 Surface profiles of no.3 point

Table 3.2 Wear depth

Item	Wear depth (μm)		
	no.1 point	no.2 point	no.3 point
Base material	0.32	0.40	0.87
VC layer	0.00	0.15	0.45







Fig. 3.12 VC coated pinch roller at High frequency induction heat treatment equipment

3.4 結 論

본 研究 實驗의 結果로부터 다음 사실을 확인할 수 있다.

(1) 異形 PC 鋼棒 生産에 適用되는 핀치 롤러의 耐 磨耗性能 向上을 위한 TD 코팅 方法에 의한 VC 층을 生成할 경우, $0.6\sim0.9\mu\text{m/hr}$ 의 VC 층 生成 速度를 보이며 10시간 沈積時 $8.35\sim8.99\mu\text{m}$ 의 VC 층이 生成되었다.

(2) 母材와 VC 층의 比磨耗量은 각각 $2.02\times10^{-4}\text{mm}^2/\text{N}$ 와 $0.73\times10^{-4}\text{mm}^2/\text{N}$ 으로, VC 층의 磨耗量은 母材 대비 36%만 磨耗되었다.

(3) VC 층이 適用된 핀치롤러를 異形 PC 鋼棒을 製造하는 誘導 加熱 熱 處理 設備에 適用 時 母材 대비 2배의 耐磨耗性能이 확인되었다.



제4장 高强度 異形 PC 鋼棒用 引拔 다이스 金型 技術 開發

4.1 序 論

PHC Pile(Pretensioned spun high strength concrete pile) 용 異形 PC 鋼棒(Prestressing steel bar)의 경우 최종제품의 균일한 强度 보장을 위하여 치수 精度 및 機械的 性질의 확보가 매우 중요하다. 異形 PC 鋼棒과 같이 경도가 높고 단면이 복잡한 제품의 경우, 치수 정도 확보가 어려우며, 이러한 異形 PC 鋼棒에 대한 高精度, 高品質, 高生産性 확보를 위해서는 금속 소재 및 제품의 물리적 특성을 고려한 다이스 金型 設計 技術 확보가 필수적이다. 국내에서는 1990년대 후반부터 PHC Pile 용 異形 PC 鋼棒을 製造하고 있으나, 일본의 異形 PC 鋼棒 제조업체의 다이스를 도입하여 같은 규격으로 생산하고 있다. 引拔 製品의 斷面 齒數 程度, 비틀림, 그리고 引拔 力을 向上을 위해서는 최적 설계된 引拔 成形 다이스 金型の 適用이 우선시되어야 하며, 적절한 工程 條件 設定을 비롯하여 品質管理를 통한 不良率의 最小化가 필요하다^{81~82)}.

引拔 다이스의 가장 중요한 설계 요소는 진입 각도(Approach angle, AP angle)이다⁸¹⁾. AP angle은 두 개의 값을 가지고 있다. 原素材와 처음 접촉하는 부위의 角度를 AP #1이라고 하며 뒤쪽의 角度를 AP #2라고 한다^{81~82)}. AP angle은 素材의 摩擦係數와 減免率(감면율)을 고려하여 설정⁸³⁾하여야 하지만, 국내의 異形 PC 鋼棒 製造 社에서는 AP angle 최적화에 대한 技術 수요는 있으나 다이스 설계에 대한 원천 기술 부재로 인하여 기존 다이스를 재활용하며 AP angle에 미세한 변화만을 적용하는 수준이다.

따라서 引拔 工程 다이스 金型の 최적 設計 方案을 도출하고, 다이스 金型에 작용하는 荷重에 적합한 최적 設計 및 스프라인 제작을 통해 국산화는 물론, 原價節減 및 品質技術力 確保로 제품경쟁력을 강화할 필요가 있다.

본 연구에서는 태광금속(주)에서 사용하는 일본産 異形 PC 鋼棒용 引拔 다이스에 대한 AP angle을 確認하며 成形 解析을 통한 引拔 다이스 金型

의 最適 設計 方案을 도출하여 그 效果를 檢證하였다.



4.2 材 料

개발 물성 데이터 확보를 통한 加工性 評價 및 성형 해석 기초 데이터로 활용하기 위하여 原素材에 대한 分析을 실시하였다. 본 연구에서 사용한 소재는 한국의 POSCO에서 제조된 中炭素鋼 30MnSi를 WIRE ROD 사용하였다. 코일 형태(∼2톤)로 입고된 30MnSi 원소재 중, 3개 코일을 무작위 선정 후 成分 分析을 시행하였으며 그 결과는 Table 4.1에 나타내었다. 測定한 시험편은 30MnSi 化學 成分 規格을 滿足함을 확인하였다.

引張試驗을 통하여 소재의 引張強度와 延伸率을 測定하였으며, 그 결과는 Table 4.2에 나타내었으며 測定한 試驗片들은 지정된 규격을 만족함을 확인하였다.



Table 4.1 Chemical compositions of 30MnSi and specimens (wt%)

	C	Si	Mn	P	S
30MnSi	0.26– 0.34	0.50– 0.90	1.00– 1.40	≤0.035	≤0.030
Specimen 1	0.31	0.80	1.23	0.021	0.022
Specimen 2	0.33	0.75	1.32	0.018	0.015
Specimen 3	0.31	0.75	1.27	0.017	0.017



Table 4.2 Mechanical properties of 30MnSi and specimens

	Tensile Stress (MPa)	Strain (%)
30MnSi	600-780	>20
Specimen 1	652.19	28
Specimen 2	654.93	26
Specimen 3	663.95	24
Specimen 4	661.21	24
Specimen 5	689.12	22



4.3 實驗 方法

4.3.1 引拔 다이스 測定

異形 PC 鋼棒 製造 中 파손된 다이스에서 破損(파손) 部位를 觀察한 結果를 Fig. 4.1에 나타내었다. 다이스 파손은 原素材 진입부에서 발생한 것을 확인하였으며, AP #1과 AP #2 수정을 통한 다이스 최적 設計를 進行하였다.

기존 引拔 다이스에 대한 3D 測定을 통하여 AP #1의 값을 測定하였으며 그 結果를 Fig. 4.2와 Table 4.3에 나타내었다.

AP #2 및 베어링 부 進入 角度 測定을 위하여 저 수축 실리콘을 사용하여 다이스 내부 형상 본을 뜬 후 3D 스캔을 시행하였으며 그 結果를 Fig. 4.3과 Table 4.4에 나타내었다.

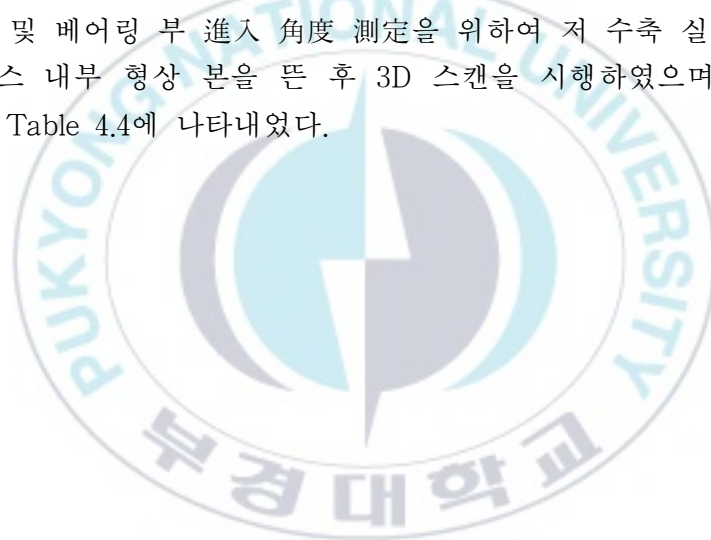




Fig. 4.1 Image of broken drawing die





Fig. 4.2 3D scanned image of drawing die for measuring AP #1

Table 4.3 Measurement of AP #1

Name	Measured	Mominal	Deviation	Upper Tol.	Lower Tol.
D1	97.341	0.000	97.341	1.000	-1.000
D10	97.340	0.000	97.340	1.000	-1.000





Fig. 4.3 3D scanned image of drawing die for measuring AP #2

Table 4.4 Measurement of AP #2

Name	Measured	Mominal	Deviation	Upper Tol.	Lower Tol.
D5	92.614	0.000	91.719	1.000	-1.000
D6	92.616	0.000	91.705	1.000	-1.000



4.3.2 引拔 다이스 모델링

測定된 AP #1과 AP #2에 대한 다이스를 2D 및 3D 모델링하였으며, 測定된 AP #1과 AP #2에 $\pm 0.5^\circ$ 를 적용한 2D 및 3D 모델도 작성하였다. 작성된 2D 및 3D 모델은 Table 4.5와 Fig. 4.4 ~ 4.6에 나타내었다.



Table 4.4 Design factors of drawing die

	AP angle 1 (°)	AP angle 2 (°)	Bearing length (mm)
Case 1	7.34	2.62	3.606
Case 2	7.84	3.11	3.606
Case 3	6.84	2.11	3.606



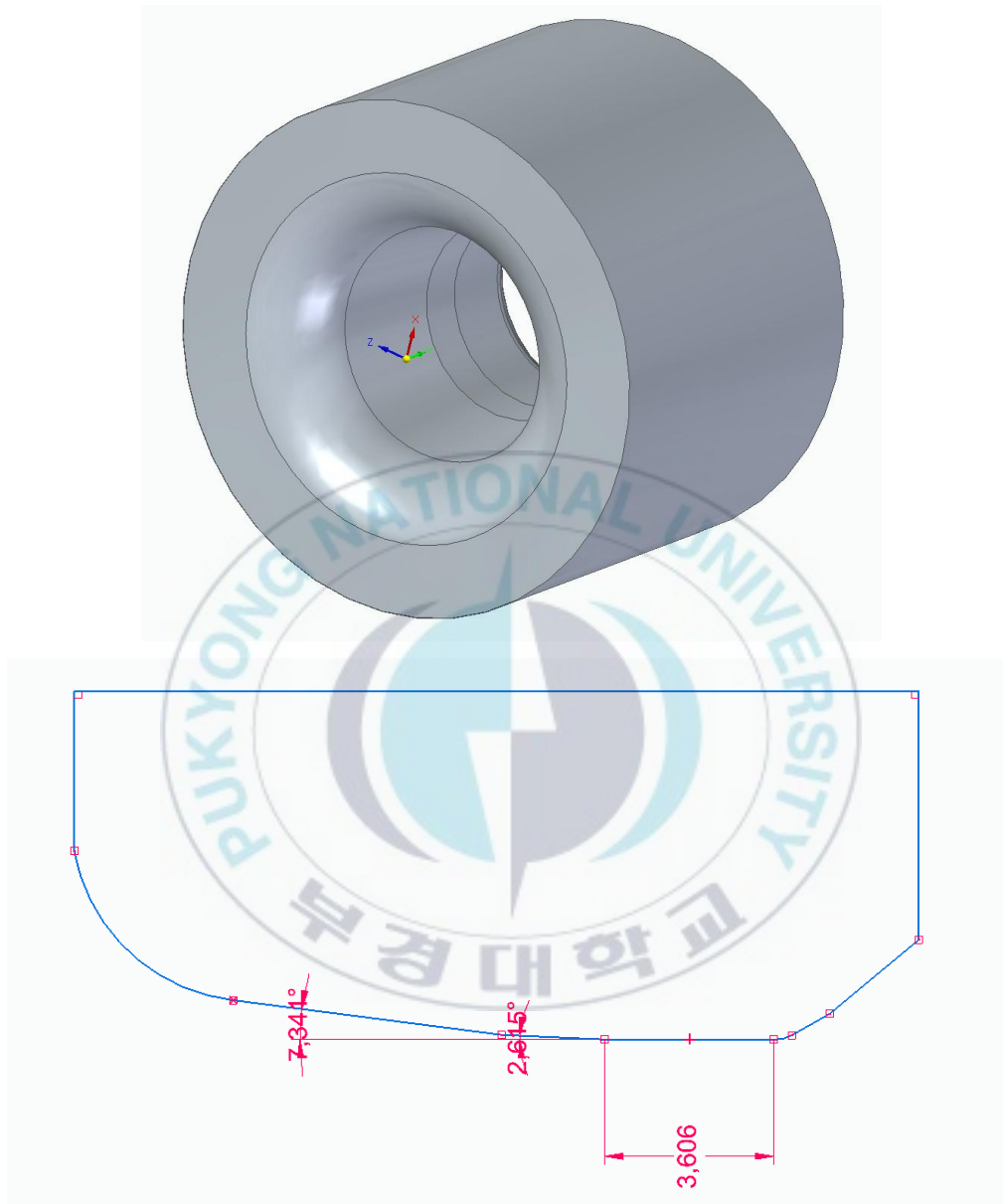


Fig. 4.4 2D and 3D image of drawing die case 1

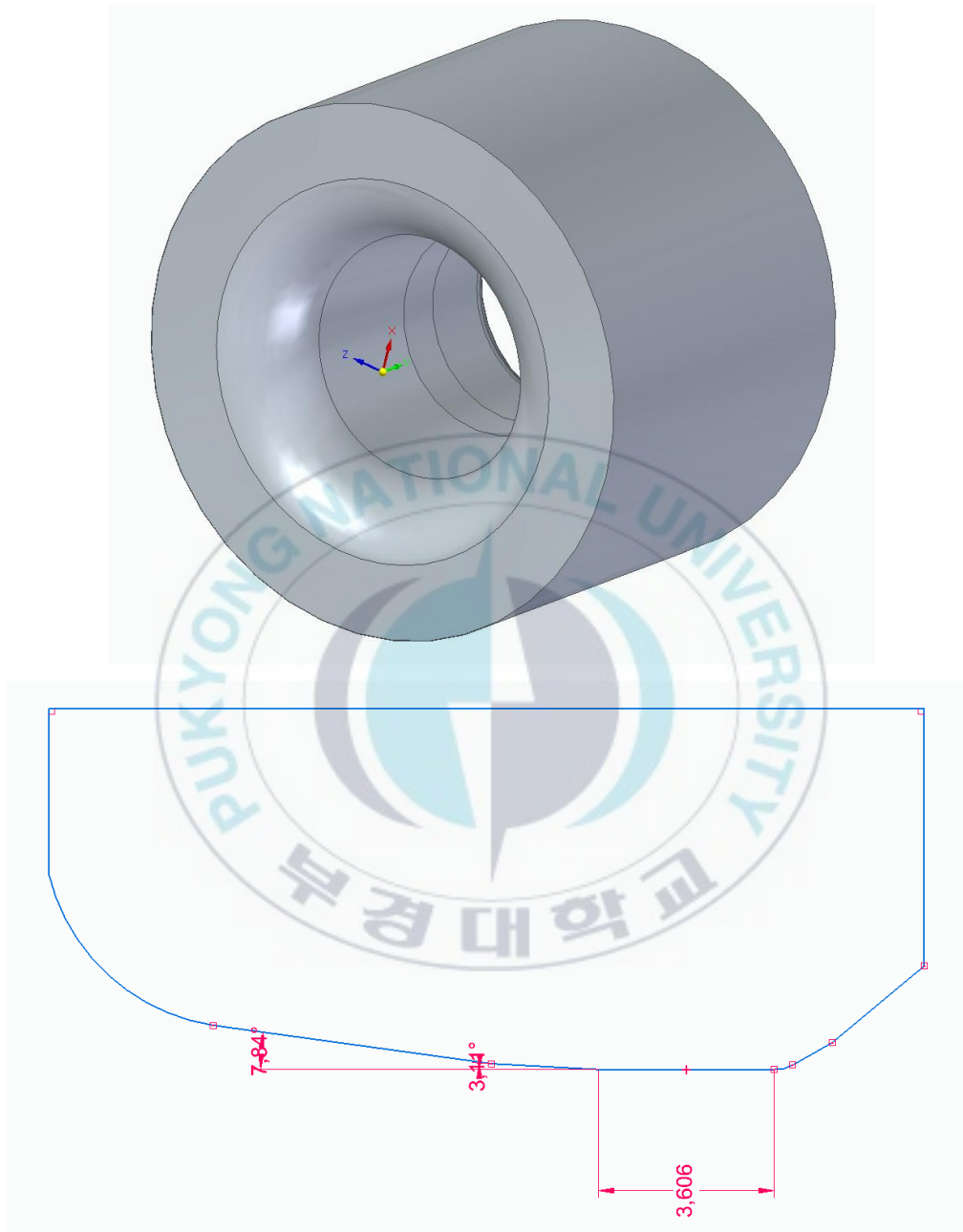


Fig. 4.5 2D and 3D image of drawing die case 2

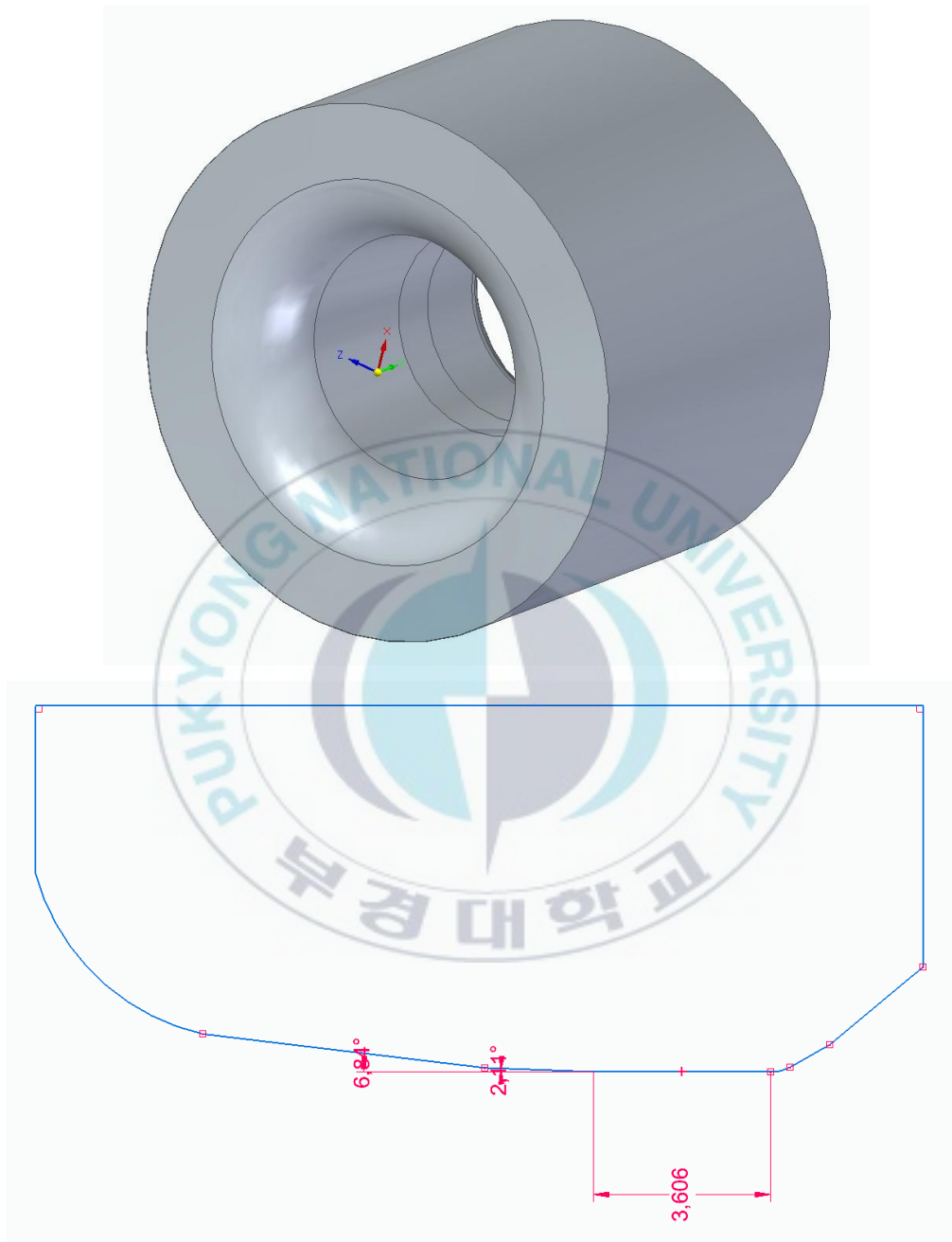


Fig. 4.6 2D and 3D image of drawing die case 3

4.3.3 成形 解釋

각각의 設計 경우에 대하여 Nastran solver를 사용하여 有限 要素 解析을 실시하였다. 解析 단순화를 위하여 각각의 다이스 形狀에 대한 斷面 形狀을 使用하였으며, 축 대칭을 이용하여 전체 形狀의 절반에 대하여 모델링 하였다. QUAD8의 要素를 사용하였으며 사용된 要素의 수는 588개이며 절점의 수는 826개이다. 비선형 정적 해석인 Nastran SOL106을 사용하여 다이스에 적용되는 반력에 대한 應力을 계산하였다.

각 경우에 대한 解析 結果는 Fig. 4.7 ~ 4.9와 Table 4.5에 나타내었다.

AP #1과 AP #2를 각각 0.5° 크게 한 Case 2에서 應力이 최소로 나타났다으며, 그 값은 기존 형상 대비 약 9% 감소하였다. 반면 AP #1과 AP #2를 각각 0.5° 감소시킨 Case 3에서는 최대 應力이 기존 형상 대비 약 11% 증가하였다.



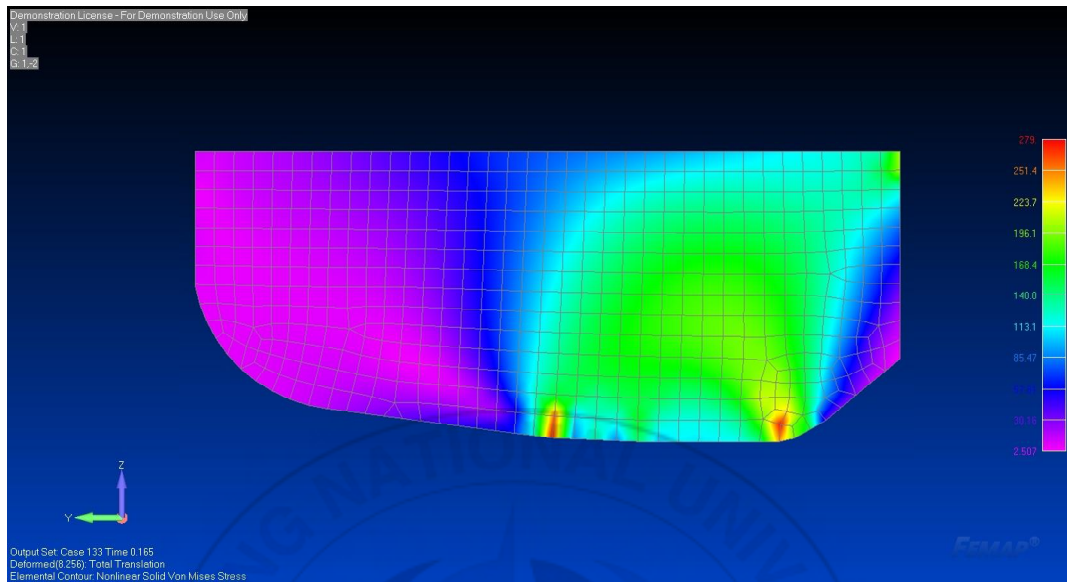


Fig. 4.7 FEM analysis Result of drawing die case 1

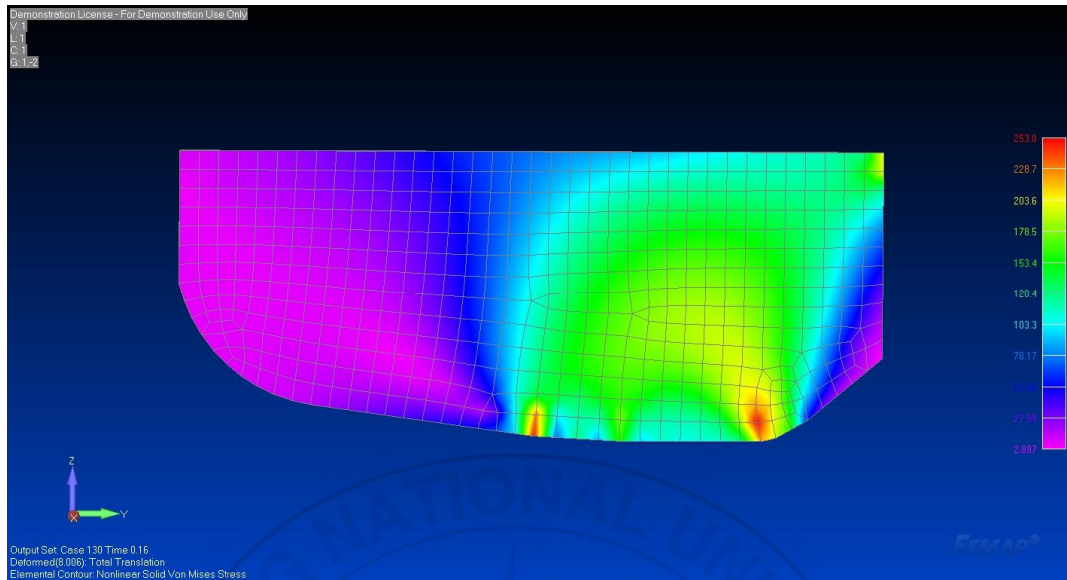


Fig. 4.8 FEM analysis Result of drawing die case 2

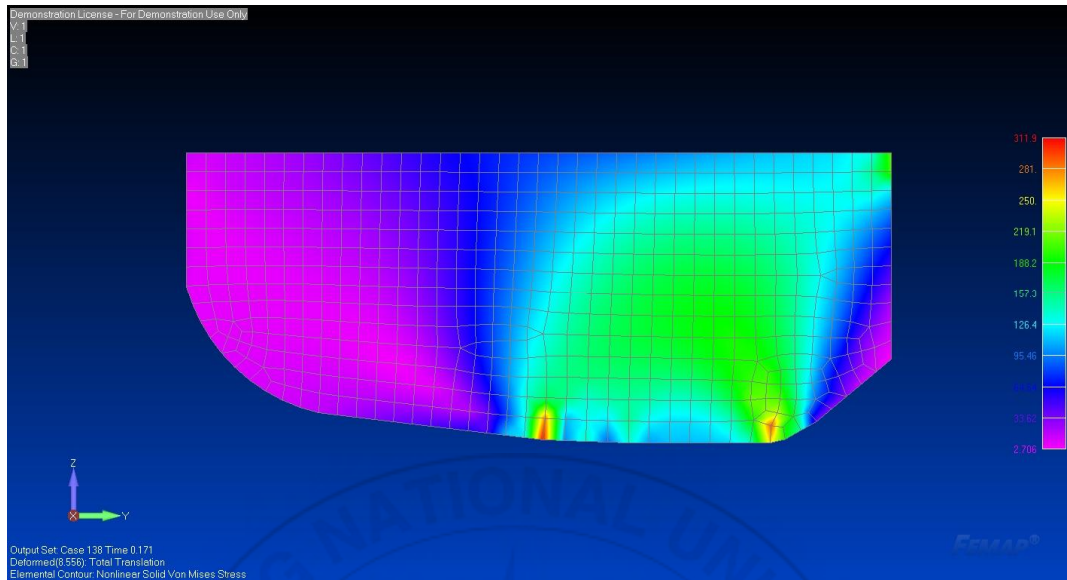


Fig. 4.9 FEM analysis Result of drawing die case 3

Table 4.5 Design factors of drawing die

	Max. Stress (MPa)	Remark
Case 1	279.0	Existing shape
Case 2	253.8	Optimized shape
Case 3	311.9	



4.3.4 新規 引拔 다이스 效果 檢證

有限 要素 解析 結果를 이용하여 -0.5° AP angle을 적용한 新規 다이스를 製作(Fig. 4.10)하여 效果를 檢定하였다.

9.2mm 異形 PC 鋼棒用 新規 引拔 다이스를 20개 製作하여 引拔 工程 적용하여 2,180톤의 製品을 生産하여, 기존 75톤/다이스 대비 109톤/다이스로써 生産性 向上 45%를 확인하였다.

또한, 30 작업일 기준(4,000톤 생산), 다이스 消耗量이 37개로 추정되었으며 이는 기존 다이스 소모량 50개/월 대비 26% 다이스 費用 節減이 가능할 것으로 계산되었다.

8.8mm 異形 PC 鋼棒用 新規 引拔 다이스를 20개 제작하여 引拔 工程 적용하여 2,240톤의 製品을 生産하여 기존 75톤/다이스 대비 112톤/다이스로써 生産성 향상 49%를 확인하였다.

또한, 30 작업일 기준(4,000톤 생산), 다이스 소모량이 36개로 추정되었으며 이는 기존 다이스 소모량 50개/월 대비 28% 다이스 비용 절감이 가능할 것으로 계산되었다.

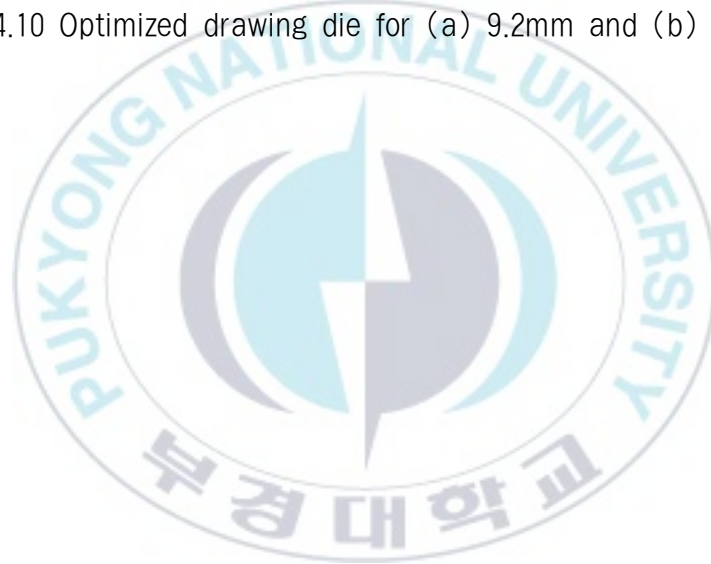


(a)



(b)

Fig. 4.10 Optimized drawing die for (a) 9.2mm and (b) 8.8mm



4.4 結 論

본 研究 實驗의 結果로부터 다음 사실을 확인할 수 있다.

(1) 일본產 異形 PC 鋼棒 引拔 다이스의 AP angle은 AP #1과 AP #2는 각각 7.34° , 2.62° 로 測定되었다.

(2) AP #1과 AP #2를 각각 $\pm 0.5^{\circ}$ 를 적용한 모델을 有限 要素 解析을 통하여 응력을 계산한 결과, $+0.5^{\circ}$ 가 적용된 모델인 AP #1은 7.84° , AP #2는 3.11° 로 설계된 모델에서 가장 낮은 應力이 계산되었으며 그 값은 기존 모델 대비 9% 減少한 253.8 MPa였다.

(3) AP angle이 최적화된 新規 引拔 다이스를 適用하여 9.2mm 異形 PC 鋼棒을 시험 生産한 결과 生産性 向上 45% 및 다이스 消耗量 減少 26%가 가능할 것으로 계산되었다.

(4) AP angle이 최적화된 新規 引拔 다이스를 적용하여 8.8mm 異形 PC 鋼棒을 시험 生産한 결과 生産성 향상 49% 및 다이스 소모량 감소 28%가 가능할 것으로 계산되었다.

제5장 結 論

본 논문에서는 태광금속(주)의 냉간인발設備와連續高周波誘導加熱 및 冷却設備를 利用하여 異形 PC 鋼棒에 대한 熱處理 試驗과 微細組織 變化를 觀察하였으며, 핀치 롤러에 耐 磨耗 性能 向上을 위하여 TD 코팅法을 이용하여 VC 코팅층이 적용된 핀치 롤러를 製作 및 耐 磨耗 試驗을 실시하였다. 또한 有限 要素 解析을 통하여 인발 다이스의 최적 形狀을 計算하여 인발 다이스를 製作 후, 檢證하였다.

2장에서는 9.2mm 異形 PC 鋼棒에 적용되고 있는 高周波 誘導 加熱 熱處理의 工程 條件을 分析하여 8.8mm 異形 PC 鋼棒에 適用할 수 있는 高周波 誘導 加熱 熱處理 條件을 확보하기 위하여 熱處理 試驗과 微細組織 分析을 시행하여 9.2mm 異形 PC 鋼棒과 동일 機械的 特性을 갖는 高周波 誘導加熱 熱處理 條件을 구하였다.

3장에서는 열확산(Thermal diffusion) 표면처리에 의한 耐 磨耗性이 향상된 핀치 롤러에 대한 特性을 분석, 검토하였다. VC(Vanadium carbide) 코팅층의 생성 속도를 확인하여 有効한 두께로 코팅층을 형성시켰으며, 母材와 VC 코팅층의 비 마모량을 測定하고 VC 코팅층이 적용된 핀치롤러를 異形 PC 鋼棒 제조 설비에 적용해 그 효과를 검증하였다.

4장에서는 日本産 異形 PC 鋼棒용 人拔 다이스에 대한 AP angle을 확인하며 成形 解釋을 통한 人拔 다이스 金型의 최적 設計 方案을 도출하여 태광금속(주)의 冷間 人拔 設備와 連續 高周波 誘導加熱 및 冷却 設備를 사용하여 그 效果를 檢證하였다.

상기와 같은 연구를 통하여 얻은 結論은 다음과 같다.

1. G3 電流 값 및 線速 變更 試驗 結果, 電流 값 대비 線速度 변경이 製品의 機械的인 特性에 많은 영향을 끼치며, 최적값은 G3 電流 98A 및 線速 48m/min인 것으로 나타내었다.
2. 최적값이 적용된 試片2의 경우, 既存 製品($\phi 9.2\text{mm}$ PC 鋼棒)과 유사한 微細組織(템퍼드 마르텐사이트)이 觀察되며 引張強度는 1455N/mm^2 으로 製品의 許容값(1420N/mm^2)을 充足하는 結果를 보였다.

3. 異形 PC 鋼棒 生産에 適用되는 핀치 롤러의 耐 磨耗 性能 向上을 위한 TD 코팅 方法에 의한 VC 층을 生成할 경우, 0.6-0.9 μ m/hr의 VC 층 生成 速度를 보이며 10시간 沈積 時 8.35~8.99 μ m의 VC 층이 生成되었다.

4. 母材와 VC 층의 比 磨耗 量은 각각 $2.02 \times 10^{-4} \text{mm}^2/\text{N}$ 와 $0.73 \times 10^{-4} \text{mm}^2/\text{N}$ 으로, VC 층의 磨耗 量은 母材 대비 36%만 磨耗되었다.

5. VC 층이 적용된 핀치 롤러를 異形 PC 鋼棒을 製造하는 誘導 加熱 熱 處理기에 適用 時 母材 대비 2배의 耐 磨耗 性能이 확인되었다.

6. 日本産 異形 PC 鋼棒 引拔 다이스의 AP angle은 AP #1과 AP #2는 각각 7.34°, 2.62°로 測定되었다.

7. AP #1과 AP #2를 각각 $\pm 0.5^\circ$ 를 적용한 모델을 有限 要素 解析을 통하여 應力을 계산한 결과, $+0.5^\circ$ 가 적용된 모델인 AP #1은 7.84°, AP #2는 3.11°로 설계된 모델에서 가장 낮은 應力이 계산되었으며 그 값은 기존 모델 대비 9% 감소한 253.8 MPa였다.

8. AP angle이 최적화된 新規 引拔 다이스를 適用하여 9.2mm 異形 PC 鋼棒을 試驗 生産한 結果 生産性 向上 45% 및 다이스 消耗量 減少 26%가 可能할 것으로 計算되었다.

9. AP angle이 최적화된 新規 引拔 다이스를 適用하여 8.8mm 異形 PC 鋼棒을 試驗 生産한 結果 生産性 向上 49% 및 다이스 消耗量 減少 28%가 可能할 것으로 計算되었다.

이상의 결과를 바탕으로 8.8mm 異形 PC 鋼棒 生産을 위한 熱處理 工程 條件과 다이스 設計 技術에 확보하였으며, 異形 PC 鋼棒 生産의 生産性 向上을 위한 최적 설계된 다이스 및 耐 磨耗 性能이 向上된 핀치 롤러 適用할 수 있게 되었다.

[참고 문헌]

1. Park, J. W. (2005), Strength Prediction of RC Pile Caps Using 3-Dimensional Strut-Tie Model Approach. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 5A, 771-116
2. Park, J. W, Kuchma, D., & Souza, R. (2008), Strength Predictions of Pile Caps by A Strut-and-Tie Model Approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 35, 1399-1413
3. ACI Subcommittee, (2002). *Examples for the Design for Structural Concrete with Strut-and-Tie Models*. American Concrete Institute, Michigan, USA.
4. Adebar, P., Kuchma, D., & Collins, M. P. (1990), Strut-and-Tie Models for the Design of Pile Caps: An Experimental Study. *ACI Structural Journal*, Vol. 87, No. 1, 81-92
5. Adebar, P. & Zhou L. (1993), Bearing Strength of Compressive Struts Confined by Plain Concrete. *ACI Structural Journal*, Vol. 90, No. 5, 534-541
6. Ryu, C., (1996). Recent Method and Status for the Production of Spun-Concrete Products. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 8 no.1, 29-35
7. Suzuki, K., Otsuki, K., & Tsubata, T. (1998), Influence of Bar Arrangement on Ultimate Strength of Four-Pile Caps. *Transactions of the Japan Concrete Institute*, Vol. 20, 195-202
8. Suzuki, K., Otsuki, K., & Tsuchiya, T. (2000), Influence of Edge Distance on Failure Mechanism of Pile Caps. *Transactions of the Japan Concrete Institute*, Vol. 22, 361-368
9. The International Federation for Structural Concrete(fib) (2010), *Model Code 2010 Volume 2*, The International Federation for Structural Concrete(fib), Lausanne, Switzerland.

10. Adebar, P. & Zhou L. (1996), Design of Deep Pile Caps by Strut-and-Tie Models. *ACI Structural Journal*, Vol. 93, No. 4, 437-448
11. American Association of State Highway and Transportation Officials (2010), *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, 5th Edition, Washington, D.C., USA.
12. American Concrete Institute (1999), *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-99) and Commentary (ACI 318R-99)*, Farmington Hills, Michigan, USA.
13. American Concrete Institute (2011), *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-11) and Commentary*, Farmington Hills, Michigan, USA.
14. British Standards Institution (1997), *Structural Use of Concrete; BS8110*, Milton Keynes, UK.
15. Clarke, J. L. (1973), *Behavior and Design of Pile Caps with Four Piles*, Report No. 42.489, Cement and Concrete Association, London, UK.
16. Concrete Reinforcing Steel Institute (2008), *CRSI Design Handbook 2008*, 10th Edition, Illinois, USA.
17. Canadian Standards Association (2004), *Design of Concrete Structures for Buildings, A23.3-M04*, Rexdale, Ontario, Canada.
18. Jeun, C. H. and Yun, Y. M. (2010), Validity Evaluation of Effective Strength of Concrete Strut using Strut-Tie Model Analysis of Structural Concrete. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 5A, 443-462
19. Mitchell, D., Collins, M. P., Bhide, S. B., & Rabbat, B. G. (2004), *AASHTO LRFD Strut-and-Tie Model Design Examples*, Portland Cement Association, Illinois, USA.

20. Sabnis, G. M. & Gogate, A. B. (1984), Investigation of Thick Slab (Pile Cap) Behavior, *Proc. ACI Journal*, Farmington Hills, Michigan, Vol. 81, 35-39
21. Willam, K. J. & Warnke, E. P. (1974), Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete. *Proc., International Association of Bridge Structures*, Vol. 19, 1-30
22. Yun, Y. M. (2005), Effective Strength of Concrete Strut in Strut-Tie Model (I): Methods for Determining Effective Strength of Concrete Strut. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 1A, 49-59
23. Yun, Y. M. & Kim, B. H. (2008), A Two-Dimensional Grid Strut-Tie Model Approach for Structural Concrete. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 134, No. 7, 1199-1214
24. Yang, J. Y., & Park, S. K., (2004). Rehabilitation of RC Beams with High Tension Steel Bars. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 5, 438-441
25. Yon, J. H (2018). Derivation of Optimized Shape Equations for Ducts in Deviation Saddles. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 30, 601-608
26. Suh, J. I., Park, H. G., Hong, G. H., Kang, S. M., & Kim, C. G. (2015). Shear Strength of Prestressed PC-CIP Composite Beams with Vertical Shear Reinforcement. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 27, 399-409
27. Kim, J. S., & Oh, B. H., (1994). Fatigue Analysis of Prestressed Concrete Composite Girder Bridges. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 5, 135-145
28. Park, S. Y. (1998). Shear-tendon Rupture Failure of Concrete Beams Prestressed with FRP Tendons. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 10, 133-142

29. Yoon, G. S., & Kim, H. S., (2004). Model Test for the Development of Installing Manipulator of Concrete Pile Anchor. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 18, 45-72
30. Tam, C. M., Tong, Thomas K. L., L며, Tony C. T., & Chan K. K., (2004). Diagnosis of prestressed concrete pile defects using probabilistic neural networks. *Engineering Structures*, Vol. 28, 1155-1162
31. Davies, J. (1979). *Induction Heating Handbook*, Mc Graw-Hill Book Company
32. Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R. L., & Black, M. (2005). *Handbook of Induction Heating*. CRC Press
33. Boadi, A., Tsuchida, Y., Todaka, T., & Enokizono, M. (2005). *Designing of Suitable Construction of High-Frequency Induction Heating Coil by Using Finite-Element Method*. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS
34. Dieckerhoff, S., Ruan, M. J., & De Doncker, R. W., (1999). Design of an IGBT-based LCL-resonant Inverter for High-frequency Induction Heating. *Industry Applications Conference*, Vol. 3, 2039-2045
35. Erickson, C. J., (2000). *Handbook of Electrical Heating for Industry*, IEEE Press.
36. Ioannou, P. A., & Sun, J., (2002). *Robust Adaptive Control*, Prentice Hall.
37. 배종수 & 신완호 (1994). 高周波 誘導加熱장치 기술 현황. 기계와 재료
38. 상공부 (1991). 중전기 산업의 경쟁력 강화를 위한 '90년대 추진전략
39. 산자부 (1993). 고성능로 및 가열장치 개발에 관한 연구
40. Dede, E. J. (1992). *Transistors are replacing electronic tubes and thyristors in induction heating generators*, IEW

41. Frank, W. E. (1982). *Solid state RF generators for induction heating applications*, ISA
42. Kim, C. S. (2018). *New & Renewable Energy Statistics 2017*, KOREA ENERGY AGENCY, 388 Poeundaero Suji-gu Yongin-si Gyeonggi-do KOREA
43. Kim, J. H. (1997). Tribologists of Drawing Oil for a Web Strip Iron Mills. *Journal of the Korean professional engineers association*, Vol. 30 no.6, 91-99
44. Kim, Y. S., & Ahn, B. H. (1984). A Study on the Estimation of Friction Coefficient in Drawing Process. *Journal of the Korean Society of Fisheries Technology*, Vol. 20 no.2, 122-126
45. Kim, J. H. (1998). Degreasing of Impurities for a Web Strip Iron Mills. *Journal of the Korean professional engineers association*, Vol. 31 no.1, 74-84
46. Oh, P. K. (2004). A Study on the Numerical Friction Model in the Drawing. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 5 no.3, 260-265
47. Lee, T. S. (1975). A Study on Drawing by Numerical Analysis. *Journal of the Korean society of mechanical engineers*, Vol. 15 no.2, 186-196
48. Jeong, D. H., & Lee, S. H. (2020). Microstructure and Mechanical Properties of an AA1070 Wire Severely Deformed by Drawing Process. *Korean journal of materials research*, Vol. 30 no.6, 308-314

49. Ho, K. S. (2010). A phenomenological constitutive model for pseudoelastic shape memory alloy. *Trans. Mater. Process.*, Vol. 19, No.8, 468-473
50. Geleji, A. (1967). *Shaping of Metals*, Berlin, Akademie Verlag
51. Wistreich, J. G. (1955). Investigation of the mechanics of wire drawing. *Proc. Inst. Mech. Eng.*, Vol. 169, 654-665
52. Wistreich, J. G. (1958). The Fundamentals of wire drawing. *Metallurgical Reviews*, Vol. 10, n. 3, 97-142
53. Berlin, Akademie Verlag Yoshida, K., & Furuya, H. (2004). Mandrel drawing and plug drawing of shape-memory-alloy fine tubes used in catheters and stents. *J. Material. Process. Tech.*, Vol. 19, 145-150
54. Yoshida, K., Watanabe, M., & Ishikawa, H. (2001). Drawing of Ni-Ti shape-memory-alloy fine tubes used in medical tests. *J. Material. Process. Tech.*, Vol. 19 118, No. 1, 251-255
55. Kim, S. H., & Cho, M. H. (2007). Experimental test and numerical simulation on the SMA characteristics and behaviors for repeated actuations, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 31, No. 3, 373-379
56. Pelton, A. R., Rebelo, N., Duerig, T. W., & Wick, A. (1994). *The first international conference on shape memory and superelastic technologies*(editor: A. Pelton et al), Pacific Grove: MIAS, California, USA, 353-358
57. Kim, Y. J., Chung, J. H., & Lee, J. J. (2008). Analysis on the behavior of the shape memory alloy using Abaqus UMAT, *Trans.*

Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 32, No.12, 1153-1160

58. Wu, S. K., Lin, H. C., & Yen, W. C. (1996). A Study on the wire drawing of TiNi shape memory alloys, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 215, No. 1-2, 113-119

59. Ho, K. S. (2011). An improved constitutive model of shape memory alloy, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 20, No. 5, 350-356

60. Wang, X., Xu, B., & Yue, Z. (2007). Phase transformation behavior of pseudoelastic NiTi shape memory alloys under large strain, *J. Alloy. Compd.*, Vol. 463, No. 1-2, 417-422

61. Paige, R. E., & Mars, W. V. (2004). *ABAQUS Users' Conference*, Cooper Tire & Rubber Company, Boston, Massachusetts, USA

62. Diani, J., Fayolle, B., & Gilormini, P. (2009). A review on the mullins effect. *Eur. Polym. J.*, Vol. 45, No. 3, 601-612

63. Lee, Y. S., & Yang, Y. J. (2019). Study on Analysis of Rolling Characteristics of Stainless Hexagonal Bar using Drawing System. *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 21 no.2, 234-241

64. Choi, D. W., Ha, S. S., & Lee, C. H. (2007). Development Length of GFRP Rebars Based on Pullout Test. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 3, 323-331

65. Sim, J. S., Oh, H. S., Ju, M. K., & Lim, J. H. (2008). New Suggestion of Effective Moment of Inertia for Beams Reinforced with the Deformed GFRP Rebar. *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 2, 185-191

66. Youssef, T., Benmokrane, B., El-Gamal S., & El-Salakawy, Y. E. (2009). *Deflection and Strain Variation of GFRP-Reinforced Concrete Beams After*

- One Year of Continuous Loading*. In: Proceeding of 9 International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-9), Sydney, Australia
67. Brown, V. L. (1997). Sustained Load Deflections in GFRP Reinforced Concrete Beams. *Japan Concrete Institute*, Vol. 2, 495-502
 68. Choe, Y. G., & Kim, M. H. (2019). Study on the Applicability of Dynamic Pile Load Test to Check Integrity during Installation of Extension Plate Attached PHC Piles and Bolts Spliced PHC Piles and the Correct Proof Test of the Transformed-installation PHC Piles. *Geotechnical Engineering*, Vol. 35(2), 18-25
 69. Park, C. H., & Kang, S. G. (2001). Failure Investigation of Shear Stressed Bar in PC Box Bridge. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 91-96
 70. Kim, T. H. (2011). An effective connection method for steel girder and PC column by thread bars. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 31(2), 351-352
 71. Byun, J. H. (1999). LMI Based H^∞ Active Vibration Control of a Structure with Output Feedback : Experiment Results. *Journal of Power System Engineering*, Vol. 3, no.3, 83-90
 72. XIAO, G.-z., H.-s. DI, & X.-j. (2007). Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties of 30MnSi PC Steel Bar. *Iron & Steel*, 4
 73. He-min, Z. (2000). Research on Heat Treatment Process for PC Steel Bar. *Heat treatment of metals*, 10
 74. Neves, I. C., Rodrigues, J. P. C., & Loureiro, A. de P. (1996). Mechanical properties of reinforcing and prestressing steels after heating. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. No. 4, 189-194
 75. Wang, R. et al. (2018) Friction and wear behavior of AlTiN-coated carbide

- balls against SKD11 hardened steel at elevated temperatures. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, Vol. 31, 1073-1083
76. ZHANG, Y.-a., et al. (2005) Dynamics analysis and control method of a new kind of tail-opening pinch roller. *Heavy Machinery*, 4
77. Aghaie-Khafri, M., & Fazlalipour, F. (2008). Vanadium carbide coatings on die steel deposited by the thermo-reactive diffusion technique. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol. 69, Issu 10, 2465-2470
78. Kim, G. S. (1998). Acoustic Emission Characteristics of Ceramic Coated Steel by Plasma Spraying. *Journal of Power System Engineering*, Vol. 2, No. 3, 49-54
79. Kim, G. S., & Kim, S. I. (2002). Wear Characteristics on Friction Velocity and Force of Plasma Sprayed Ceramic Coating Layer. *Journal of Power System Engineering*, Vol. 6, No. 4, 56-61
80. Chicco, B., Borbidge, W., & Summerville, E. (1999). Experimental study of vanadium carbide and carbonitride coatings. *Materials Science and Engineering: A*, 266(1-2), 62-72
81. Lange, K. (1985). *Handbook of metal forming*, McGraw-Hill company
82. Groover, M. P. (2015). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*, John Wiley & Sons
83. Lee, T. K., Lee, J. E., Lee, S. K., & Kim, B. M. (2008). Design of Intermediate Die for Spline Drawing. *Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference*, 10a, 337-340

感謝의 글

논문을 마치고 “ 감사의 글”을 쓰고자 합니다.

1988년에 대학을 입학하였고 1995년 졸업과 동시에 회사에 입사해서 근무하게 되었습니다. 회사에 다니면서 산업대학원 석사 과정을 1998년에 졸업은 했으나, 사회 생활을 계속하면서 내가 전공한 학문에 대해 좀 더 공부하고자 2010년 박사과정을 입학해서 2012년 수료는 했으나, 생업을 핑계로 논문 작성이 늦었습니다.

지도교수님이신 문창권 교수님의 끝없는 관심과 격려로 이제 논문을 마감할 수 있게 되었습니다. 그리고 여러 가지로 옆에서 계속 지도해 주셨던 김부안 교수님께도 감사를 드립니다. 아울러 학부 및 석사 과정 및 박사수료 과정에서 지도교수 이 시 었던 정호신 교수님께도 감사를 드립니다.

회사에 근무하면서 박사과정 학업을 시작하게 해 주셨던 한국선재 주식회사 이제훈 사장님과 청우제강(주) 조하식 회장님께도 감사를 드립니다
그리고 금번 논문 자료와 연구 환경을 조성해 주셨던 태광금속(주) 임재학 이사님과 경영진께도 감사를 드립니다.

이번에 학회 논문 투고 및 졸업 논문 작성 시 물심양면의 도움을 주었던 한국생산 기술연구원 김형준 박사님과 임진호 박사님께도 감사를 드립니다.
지금 근무 중인 동경철강(주) 성일경 사장님의 배려 및 지원에도 감사를 드립니다.

마지막으로 이번 논문 작성 중에 2022년 5월 25일 하늘나라로 가신 어머니 영전에 논문을 올리고자 합니다 .아버지와 사랑하는 아내 장호와 큰딸 오미승 , 둘째딸 오 가영이 옆에서 응원해주었고, 축하해 주어서 감사합니다.

마지막으로 문창권 교수님 덕분에 이제야 1988년부터 시작한 학사부터 학업과정을 박사까지 마무리하여 부경대학교 졸업하게 해 주셔서 감사합니다.
스승님 사랑합니다.

2022년 8월 오창수